

有序摆抛栽超高产栽培对水稻根系形态生理特征的影响

郭保卫¹ 许轲¹ 张洪程^{1,*} 戴其根¹ 霍中洋¹ 魏海燕¹ 陈厚存²

(¹扬州大学 农业部长江流域稻作技术创新中心/江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; ²海安县农作物栽培技术指导站, 江苏 海安 226600; * 通讯联系人, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

Effect of Ordered Transplanting and Optimized Broadcasting on Rice Root System Morphological and Physiological Characteristics Under Super High-yielding Cultivation

GUO Bao-wei¹, XU Ke¹, ZHANG Hong-cheng^{1,*}, DAI Qi-gen¹, HUO Zhong-yang¹, WEI Hai-yan¹, CHEN Hou-cun²

(¹Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture/ Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ²Haian County Crop Cultural Station, Haian 226600, China; * Corresponding author, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

GUO Baowei, XU Ke, ZHANG Hongcheng, et al. Effect of ordered transplanting and optimized broadcasting on rice root system morphological and physiological characteristics under super high-yielding cultivation. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(6): 611-625.

Abstract: The rice root system morphological and physiological characteristics were to explore the approaches to achieve super high yield. Super rice Wuyunjing 24 and Nanjing 44 were used as experimental material and three planting methods including ordered transplanting (OT), optimized broadcasting (OB) and cast transplanting (CT) were designed to investigate the root system morphological and physiological characteristics with mechanical transplanting (MT) as control. The results were as follows: root length, number and weight of 3-hole seedlings had obvious advantages 7 d after transplanting and 2-hole seedlings had obvious advantages 15 d after transplanting. Root dry weight, root shoot ratio and activity of root system at each stage followed the trend of OT>OB>CT>MT, while treatments of different holes showed a trend of 2-hole>3-hole>1-hole. And total root absorbing surface area, active absorbing area, ratio of active absorbing surface area to total absorbing surface area and root bleeding sap showed the same trend. Root dry weight, root shoot ratio, root activity, total absorbing surface area, active absorbing area, ratio of active absorbing surface area to total absorbing surface area and root bleeding sap had a very significant positive correlation with grain yield. Root at the depth of top 5 cm accounted for more than 70%, while at depth of top 10 cm accounted for more than 90%. And root dry weight, root volume and root weight density at each layer showed the trend of OT>OB>CT, 2-hole>3-hole >1-hole. Root weight ratio at the depth of 5–10 cm, 10–15 cm and 15–20 cm showed the same trend. And root dry weight at each layer was very significantly correlated with grain yield, and root at the upper layer made greater contributions to the grain yield, and the contribution rate of root to yield at the top 10 cm depth was more than 90%. And it could be concluded that, ordered transplanting and optimized broadcasting rice with 2-hole seedling had quicker root growth, higher root activities and more reasonable root distribution at late growing stage which were the physiological basis for super high yield.

Key words: rice; ordered transplanting and optimized broadcasting; 2-hole gathered; 3-hole gathered; root system; morphological and physiological characteristics

郭保卫, 许轲, 张洪程, 等. 有序摆抛栽超高产栽培对水稻根系形态生理特征的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(6): 611-625.

摘要: 为研究不同抛栽方式对水稻根系形态生理的影响, 探索抛秧稻超高产轻简栽培新途径, 以粳型超级稻武运粳 24 和南粳 44 为试验材料, 设置摆栽、点抛和撒抛三种抛栽方式, 并以机插为对照, 系统研究了有序摆抛稻根系的形态和生理特征。结果显示, 水稻有序摆栽和点抛后秧苗根系长度、根数、单株根质量高于撒抛和机插, 栽后 7 d 3 连孔

收稿日期: 2016-05-10; 修改稿收到日期: 2016-07-28。

基金项目: 江苏省农业自主创新基金重点项目[CX(15)1002]; 公益性行业(农业)科研专项(201303102); 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB210014); 扬州大学科技创新培育基金资助项目(2015CXJ042); 江苏省农业三新工程资助项目[SXGC(2015)325, SXGC(2014)315]。

秧苗优势明显,栽后15 d 2连孔秧苗表现出较强的优势。各生育时期群体根干质量、根冠比、根系活力表现为摆栽>点抛>撒抛>机插,不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔,根系吸收总面积、活跃吸收表面积和吸收面积比与穗后根系伤流量亦呈现相同趋势。各生育时期的根系干质量、根冠比、根系活力及抽穗期单茎根系伤流量、根系吸收表面积、活跃吸收表面积、活跃吸收比与产量极显著相关。齐穗后15 d,70%以上根系分布在0~5 cm,90%以上根系分布在0~10 cm,各层根干质量、根体积、根干质量密度抛栽方式间表现为摆栽>点抛>撒抛,不同连孔处理间为2连孔>3连孔>单孔,5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm的根系比例亦呈现此趋势。0~20 cm内,各层根系干质量、根系体积、根干质量密度与产量极显著相关,上层根系对产量贡献较大,0~10 cm贡献率达90%以上。总之,水稻有序摆抛栽根系发生快,各生育期活力强,后期分布合理,其良好的根系特性是超高产形成的生理基础。

关键词: 水稻;有序摆抛;二连孔;三连孔;根系;形态生理

中图分类号: Q944.54; S511.044

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)06-0611-15

抛秧是我国一项水稻轻简栽培技术,因秧苗素质好、栽后活棵立苗快、易操作而被广泛应用,面积近667万 hm^2 。目前抛秧多是无序抛秧,秧苗分布千姿百态,根球入土深度不一,影响了秧苗的发根和立苗^[1],制约了秧苗活棵生长和后期的生长^[2]。根系作为水稻植株的组成部分,不仅是吸收水分和养分的主要器官,也是合成多种生理活性物质的重要场所,在水稻生长发育过程中具有举足轻重的作用^[3-5]。发达的根系是水稻高产、超高产的基础,利于提高根系活力,促进根系对水分和养分的吸收与保持良好的株型,也利于提高水稻的抗倒、抗逆能力^[6-9]。超高产水稻或超级稻在产量上具有明显的优势,这与其庞大而高活力的根系是密不可分的^[10-11]。水稻撒抛,特别是免耕抛秧因平躺苗比例较高,抛秧发根节与土壤接触面较小,根球入土浅,因而新根发生少,影响到了地上部的生长^[12],后期易发生倒伏而严重制约高产的形成。有序摆栽或点抛既有较高的群体起点质量^[13],保证前期稳定的根系生长,后期又能保持较强的根系活性,发挥抛秧稻后期不早衰的优势^[14]。有关水稻有序摆栽或点抛研究多集中于产量及地上部生长方面,而对其根系特征的研究也多是单孔秧苗,本课题组对抛秧稻新型多连孔高产栽培模式已有初步研究^[15],但对其根系特征还缺乏系统研究。本研究采用2连孔、3连孔秧盘培育壮秧,对摆栽、点抛和撒抛三种方式抛栽稻的根系特点进行研究,阐明水稻有序摆抛栽超高产的根系特征,以期抛秧稻高产栽培模式的根系调控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验时间与地点

试验于2011年在江苏海安试验基地和扬州大学试验农场两地进行。海安试验田前茬为小麦,土

壤质地为砂壤土,地力中等,全氮含量为0.16%,碱解氮含量为87.2 mg/kg,速效磷含量为30.1 mg/kg,速效钾含量为84.6 mg/kg。扬州试验田前茬为小麦,土壤质地为砂壤土,地力中等,全氮含量为0.152%,碱解氮含量为89.6 mg/kg,速效磷含量为33.2 mg/kg,速效钾含量为87.7 mg/kg。

1.2 试验方法

试验材料为超级粳稻品种南粳44、武运粳24。采用常规434单孔塑盘和由此改进而来的新型三连孔、二连孔塑盘早育秧,三连孔由3个单孔以正三角形形式组成,中间连接处相通,二连孔由2个单孔组成,连接处相通^[15]。播种时单孔秧盘每孔播3粒,二连孔秧盘的每2连孔播4粒,其构成每个单孔播2粒,三连孔秧盘的每3连孔播6粒,其构成的每个单孔播2粒。每张秧盘播种时施用15 g“龙祺”牌壮秧剂,2叶1心期每50张秧盘喷15%多效唑4 g,秧龄25 d。对照为机插毯苗,每盘100 g,秧龄20 d。三连孔、二连孔由单孔组成,其组成三连孔、二连孔的小孔和434孔秧盘的单孔排列顺序和直径一样,上部孔径口为21 mm,底部小孔直径10 mm,其中透水气孔孔径为3 mm。

试验中三连孔、二连孔、单孔秧苗分别设置摆栽、点抛、常规撒抛等抛栽方式,试验采用裂区设计,其中,品种为主区,抛栽方式为裂区。摆栽有固定的行株距,行距为30 cm,株距因基本苗而定,点抛是人工将带土秧苗控距向下投掷,秧苗在田间分布较均匀,是一种半有序化的抛秧方式。移栽前在三连孔、二连孔、单孔秧盘中分别选取每穴6苗、4苗和3苗的秧苗(图1),抛栽穴数分别为12.0万穴/ hm^2 、18.0万穴/ hm^2 、24.0万穴/ hm^2 ,单孔、二连孔、三连孔秧苗摆栽行距均为30 cm,株距分别为13.9 cm、18.5 cm、27.8 cm,各抛栽处理基本苗一致,均为72万/ hm^2 。对照为机插(行株距为30 cm×13.2 cm),

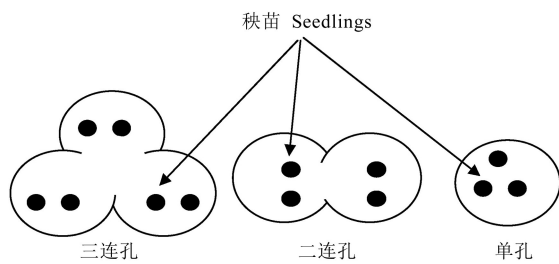


图1 三连孔、二连孔和单孔秧苗示意图

Fig.1. 3-hole, 2-hole and 1-hole seedlings.

机插秧每穴4苗,25.5万穴/hm²,采用人工模拟机插。小区面积20 m²,3次重复。

以尿素形式施入氮肥(折合成纯氮)270 kg/hm²,过磷酸钙形式施入磷肥(折合成P₂O₅)112.4 kg/hm²,氯化钾形式施入钾肥(折合成K₂O)112.4 kg/hm²。其中,氮肥的 $m_{基肥} : m_{蘖肥} : m_{穗肥} = 3 : 3 : 4$,穗肥分别于倒4叶和倒2叶期各施50%,磷肥全作基肥,钾肥的50%用作基肥,50%于倒5叶期施用。

1.3 测定内容与与方法

1.3.1 根系干质量、根冠比

于有效分蘖临界叶龄期、拔节期、抽穗期和成熟期在田间每小区取出茎蘖数与大田平均茎蘖数一致的3穴水稻植株,将带土根系放入网袋中用流水冲洗干净,将根与地上部放置恒温烘箱内,105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒重,对根系和地上部进行称重,并计算根冠比。

1.3.2 根系体积、根系活力、根系吸收面积

于有效分蘖临界叶龄期、拔节期、抽穗期和成熟期从每小区取出3穴生长一致的稻株(带土根系),放入网袋中用流水冲洗干净,量筒灌水测量根系的体积, α -NA氧化法测量根氧化力,甲烯蓝蘸根法测量根系总吸收表面积和活跃吸收表面积。

1.3.3 根系伤流

于抽穗期、抽穗后20 d、35 d、45 d选取每小区具有代表性的稻株3穴,测基部的伤流量(18:00在离地面10 cm处剪去地上部,套上内装有脱脂棉并已称重的自封袋,次日上午8:00收集并称重)。

1.3.4 根系在土壤中的分布

齐穗后15 d从每个小区以单穴稻株为中心,按3连孔稻株30 cm×27.8 cm,2连孔稻株30 cm×18.5 cm,单孔30 cm×13.9 cm,机插稻30 cm×13.2 cm的规格进行挖取0~5 cm、5~10 cm、10~15

cm、15~20 cm及20~25 cm土层根系,放入网袋中用流水冲洗干净,分别对各层根测量体积和烘干后称干物质量。根干质量密度(g/cm³)=各层根干质量(g)/各层根体积(cm³)。

1.4 产量的测定

普查成熟期每小区50穴,计算有效穗数,取5穴调查每穗粒数、结实率和测定千粒重,计算理论产量,并实收核产。

1.5 数据统计与分析

所测数据使用Microsoft Excel 2003和DPS软件进行数据处理和统计分析,方差分析采用LSD多重比较。两地趋势基本一致,部分数据以海安基地为主。

2 结果与分析

2.1 水稻有序摆抛栽的产量及构成因素

不同抛栽方式水稻的产量均表现为摆栽>点抛>撒抛。同种抛栽方式下,不同连孔稻株的产量均呈现2连孔>3连孔>单孔,除撒-3、撒-1处理外,其余各处理均高于对照(机插)。不同抛栽方式水稻的有效穗数表现为摆栽<点抛<撒抛,均极显著小于机插稻,而每穗粒数则呈现相反的趋势,这与机插稻栽插苗数多且栽后分蘖发生量大有关。对不同连孔稻株而言,有效穗数均表现为2连孔>单孔>3连孔,且3连孔和2连孔每穗粒数无显著差异。所有处理结实率、千粒重无显著差异(表1)。

2.2 栽后秧苗的根系特点

不同抛栽方式处理栽后7 d和15 d稻苗的单株根长、单株根数和根系干物质量均表现为摆栽>点抛>撒抛>机插,且有序摆抛栽显著大于撒抛(表2),点抛和撒抛因存在立苗过程,根系生长优势不如摆栽。就不同连孔秧苗而言,栽后7 d单株根长、单株根数、单株干质量表现为3连孔>2连孔>单孔,而栽后15 d则表现为2连孔>3连孔>单孔,这与3连孔栽后7 d穴间空间大,而栽后15 d因秧苗生长,2连孔在穴间与穴内得到较好协调有关。

2.3 水稻有序摆抛栽的根系干质量及根冠比

除有效分蘖临界叶龄期外,各生育期的单茎根干质量和群体根干质量不同抛栽方式间均表现为摆栽>点抛>撒抛>机插,不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔。有效分蘖临界叶龄期,点抛和撒抛地下部生长量大,这可能与该时期撒抛和点抛分蘖节入土浅,分蘖发生多有关^[2](表3)。

表1 不同移栽方式对水稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Grain yield and its components of rice under different transplanting ways.

试验地点与品种 Site and variety	移栽方式 Transplanting ways	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	理论产量	实收产量	
		Effective panicle number ($\times 10^4 \text{hm}^{-2}$)	No. of grains per panicle	Seed setting rate %	1000-grain weight /g	Theoretical yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	Harvest yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	
江苏海安 Haian, Jiangsu 武运梗 24 Wuyunjing 24	机插 MT	352.7 Aa	127.3 EFf	93.5 Bc	27.1 Aa	11.4 CDEd	10.8 EFGef	
	摆-3 OT-3	295.2 Fg	156.6 Aa	95.2 Aab	27.3 Aa	12.0 ABab	11.5 ABCb	
	摆-2 OT-2	307.0 EFef	154.1 ABab	95.5 Aa	27.3 Aa	12.3 Aa	11.8 Aa	
	摆-1 OT-1	297.5 Ffg	152.4 Bb	95.3 Aab	27.3 Aa	11.8 BCbc	11.3 BCDBbc	
	点-3 OB-3	305.8 EFef	147.8 Cc	95.0 Aab	27.3 Aa	11.7 BCDbc	11.3 BCDEbcd	
	点-2 OB-2	321.7 CDd	146.2 Cc	95.3 Aab	27.2 Aa	12.2 ABa	11.6 ABab	
	点-1 OB-1	314.8 DEde	141.3 Dd	95.2 Aab	27.2 Aa	11.5 CDcd	11.1 CDEFcde	
	撒-3 CT-3	324.3 CDcd	134.2 Ee	94.8 Ab	27.3 Aa	11.3 EFe	10.7 FGfg	
	撒-2 CT-2	339.6 Bb	132.3 EFe	95.1 Ac	27.2 Aa	11.6 DEd	11.0 DEFde	
	撒-1 CT-1	331.9 BCbc	129.0 FGf	94.9 Aab	27.2 Aa	11.1 Fe	10.5 Gg	
	南梗 44 Nanjing 44	机插 MT	356.8 Aa	127.3 EFf	93.5 Bc	27.1 Aa	11.2 CDEd	10.7 DEef
		摆-3 OT-3	297.7 De	150.8 Aa	95.3 ABab	27.1 Aa	11.6 ABCb	11.0 BCbc
		摆-2 OT-2	310.9 CDde	148.0 ABab	95.7 Aa	27.1 Aa	11.9 Aa	11.5 Aa
		摆-1 OT-1	300.4 De	145.2 Bb	95.5 ABab	27.1 Aa	11.3 BCDc	10.8 CDede
点-3 OB-3		319.9 BCDcd	136.0 Cc	95.2 ABbc	27.1 Aa	11.2 CDc	10.8 CDede	
点-2 OB-2		335.2 ABbc	135.0 Cc	95.5 ABab	27.0 Aa	11.7 ABab	11.2 ABb	
点-1 OB-1		329.1 BCbc	130.4 Dd	95.4 ABab	27.0 Aa	11.1 Dcd	10.7 CDEde	
撒-3 CT-3		325.9 BCbcd	129.3 Dd	95.0 Bc	27.1 Aa	10.9 DEde	10.5 EFfg	
撒-2 CT-2		341.8 ABab	128.3 EDd	95.3 ABbc	27.0 Aa	11.3 DEcd	11.0 BCDcd	
撒-1 CT-1		336.9 ABb	123.0 Ee	95.2 ABbc	27.0 Aa	10.7 Ee	10.2 Fg	
江苏扬州 Yangzhou, Jiangsu 武运梗 24 Wuyunjing 24		机插 MT	347.8 Aa	124.3 Gh	93.8 Bb	27.0 Ac	11.0 EFe	10.7 EFef
		摆-3 OT-3	293.9 Gh	152.8 Aa	95.7 Aa	27.5 Aa	11.8 ABCbc	11.4 ABCbc
		摆-2 OT-2	310.3 DEFef	150.3 ABb	95.8 Aa	27.4 Aa	12.2 Aa	11.6 Aa
		摆-1 OT-1	301.3 FGg	147.6 BCc	95.5 Aa	27.4 Aa	11.6 BCcd	11.2 BCc
	点-3 OB-3	302.8 Fg	145.4 Cd	95.4 Aa	27.4 Aa	11.5 Ccd	11.2 CDc	
	点-2 OB-2	314.8 DEde	145.2 Cd	95.6 Aa	27.4 Aa	12.0 ABab	11.5 ABab	
	点-1 OB-1	307.3 EFfg	142.3 De	95.5 Aa	27.3 Aabc	11.4 CDd	10.9 DEd	
	撒-3 CT-3	318.0 CDcd	131.2 Ef	95.4 Aa	27.2 Aabc	10.8 EFef	10.6 FGf	
	撒-2 CT-2	331.3 Bb	129.3 EFfg	95.3 Aa	27.1 Abc	11.1 DEe	10.8 EFde	
	撒-1 CT-1	323.8 BCc	127.4 Fg	95.3 Aa	27.0 Ac	10.6 Ff	10.4 Gg	
	南梗 44 Nanjing 44	机插 MT	350.8 Aa	123.6 Fi	94.7 Ce	26.8 Ab	11.0 CDEcd	10.5 DEe
		摆-3 OT-3	292.4 Gg	151.5 Aa	95.5 ABabc	27.0 Aab	11.4 ABCb	10.9 BCc
		摆-2 OT-2	304.3 EFef	149.6 Ab	95.7 Aa	27.1 Aa	11.8 Aa	11.4 Aa
		摆-1 OT-1	296.9 FGfg	146.5 Bc	95.6 ABab	27.0 Aab	11.2 BCDbc	10.7 CDd
点-3 OB-3		308.8 DEe	139.3 Cd	95.4 ABabcd	26.9 Aab	11.0 CDEcd	10.4 Eef	
点-2 OB-2		326.8 BCbc	137.2 Ce	95.4 ABabcd	26.9 Aab	11.5 ABb	11.1 Bb	
点-1 OB-1		317.8 CDd	132.7 Df	95.3 ABbcd	27.0 Aab	10.9 DEFd	10.3 EFfg	
撒-3 CT-3		320.8 CDcd	131.3 DEFg	95.2 ABCcd	26.8 Ab	10.7 Efd	10.2 Fg	
撒-2 CT-2		332.2 Bb	129.9 Eg	95.1 BCD	26.9 Aab	11.1 CDEcd	10.7 Dd	
撒-1 CT-1		325.3 BCbcd	125.8 Fh	95.1 BCc	26.8 Ab	10.4 Fe	9.9 Gh	

数据后跟相同大小写字母分别表示在1%和5%水平差异不显著。摆-3—摆栽3连孔秧苗；摆-2—摆栽2连孔秧苗；摆-1—摆栽单孔秧苗；点-3—点抛3连孔秧苗；点-2—点抛2连孔秧苗；点-1—点抛单连孔秧苗；撒-3—撒抛3连孔秧苗；撒-2—撒抛2连孔秧苗；撒-1—撒抛单孔秧苗。下同。

Values followed by common letters are not significantly different at 1% (capital) and 5% (small) probability levels, respectively. OT-3, 3-hole seedlings under ordered transplanting; OT-2, 2-hole seedlings under ordered transplanting; OT-1, Single-hole seedlings under ordered transplanting; OB-3, 3-hole seedlings under optimized broadcasting; OB-2, 2-hole seedlings under optimized broadcasting; OB-1, Single-hole seedlings under optimized broadcasting; CT-3, 3-hole seedlings under cast transplanting; CT-2, 2-hole seedlings under cast transplanting; CT-1, Single-hole seedlings under cast transplanting; MT, Mechanical transplanting. The same as below.

表 2 不同移栽方式对水稻栽后秧苗根系特征的影响(江苏海安)

Table 2. Root characteristics of seedling after transplanting (Haian, Jiangsu).

品种与移栽方式 Variety and transplanting ways	栽后 7 d after transplanting			栽后 15 d after transplanting		
	单株根长	单株根数	根干质量	单株根长	单株根数	根干质量
	Root length per plant/cm	Root number per plant	Dry weight of root /(g · plant ⁻¹)	Root length per plant/cm	Root number per plant	Dry weight of root per plant /(g · plant ⁻¹)
武运粳 24 Wuyunjing 24						
机插 MT	77.1 Gh	10.0 Gg	0.0507 Ge	229.9 E _{ff}	39.8 B _{bc}	0.0715 D _{Eef}
摆-3 OT-3	139.5 Aa	18.8 Aa	0.0719 Aa	272.9 B _b	44.5 Aa	0.0760 A _{Bab}
摆-2 OT-2	133.7 AB _b	18.1 AB _{ab}	0.0709 AB _a	290.0 Aa	46.0 Aa	0.0777 Aa
摆-1 OT-1	129.2 BC _b	17.6 BC _b	0.0626 DE _c	246.2 CD _{cd}	40.3 B _b	0.0721 CD _{Ede}
点-3 OB-3	123.6 Cc	16.8 Cc	0.0680 BC _b	256.2 Cc	35.3 C _d	0.0746 AB _{ab}
点-2 OB-2	114.4 D _d	15.7 D _d	0.0662 CD _b	281.3 AB _{ab}	38.3 B _c	0.0760 AB _{ab}
点-1 OB-1	103.1 E _{ef}	14.4 Ee	0.0578 F _d	233.0 DE _{Fef}	33.0 C _{De}	0.0696 E _f
撒-3 CT-3	105.6 Ee	14.7 DEe	0.0629 DE _c	223.9 FG _f	30.0 E _{fg}	0.0706 E _{ef}
撒-2 CT-2	98.8 E _f	13.9 Ee	0.0617 E _c	242.8 CD _{Ede}	31.5 DE _{ef}	0.0737 BC _{Dcd}
撒-1 CT-1	90.6 F _g	12.8 F _f	0.0559 F _d	212.9 G _g	29.5 E _g	0.0668 F _g
南粳 44 Nanjing 44						
机插 MT	84.2 F _g	12.0 F _d	0.0421 F _i	205.3 F _g	32.7 C _{De}	0.0678 E _{Fef}
摆-3 OT-3	129.3 Aa	17.8 Aa	0.0650 Aa	250.2 B _{bc}	35.8 B _b	0.0743 AB _{ab}
摆-2 OT-2	123.0 B _b	17.1 AB _a	0.0630 A _b	274.0 Aa	39.5 Aa	0.0754 Aa
摆-1 OT-1	114.0 C _c	16.1 BC _b	0.0544 C _{De}	235.9 C _d	34.5 BC _{bc}	0.0727 B _{bc}
点-3 OB-3	115.1 Cc	16.0 BC _b	0.0591 B _c	237.8 C _d	33.0 B _{Cc}	0.0703 C _{Dd}
点-2 OB-2	109.7 C _d	15.6 C _{Db}	0.0568 BC _d	256.2 B _b	35.3 B _{Cb}	0.0720 B _{Cc}
点-1 OB-1	100.4 D _e	14.5 DE _c	0.0493 E _g	221.2 DE _e	30.0 D _{Ed}	0.0683 DE _{Fef}
撒-3 CT-3	103.1 D _e	14.6 DE _c	0.0544 C _{De}	224.2 D _e	30.0 D _{Ed}	0.0674 E _{Ffg}
撒-2 CT-2	100.9 D _e	14.4 D _{Ec}	0.0523 D _f	248.8 B _c	32.5 C _{De}	0.0695 DE _d
撒-1 CT-1	93.5 E _f	13.7 E _c	0.0443 F _h	212.7 E _{Ff}	28.0 E _d	0.0660 F _g

表 3 不同移栽方式水稻各生育期的根系干物质量的影响(江苏海安)

Table 3. Dry weight root of broadcasted rice under different transplanting ways (Haian, Jiangsu).

品种与移栽方式 Variety and transplanting ways	单茎根系干质量 Root dry weight/(g · stem ⁻¹)				群体根干质量 Root dry weight of population/(g · m ⁻²)			
	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期
	CS	ES	HS	MS	CS	ES	HS	MS
武运粳 24 Wuyunjing 24								
机插 MT	0.096 F _f	0.202 F _g	0.338 C _e	0.200 D _{de}	44.0 A _{bc}	90.4 A _{bcde}	122.1 B _c	70.4 BC _{Dbcd}
摆-3 OT-3	0.128 AB _{ab}	0.283 AB _{ab}	0.427 A _{ab}	0.254 A _a	45.8 A _{abc}	95.4 A _{ab}	132.4 AB _{ab}	75.0 AB _{bcd}
摆-2 OT-2	0.131 Aa	0.290 Aa	0.431 Aa	0.254 Aa	43.6 A _c	96.2 Aa	135.0 Aa	78.2 Aa
摆-1 OT-1	0.125 ABC _{abc}	0.279 ABC _{ab}	0.415 A _{abc}	0.250 Aa	48.6 A _{abc}	95.2 A _{abc}	128.9 AB _{abc}	74.2 ABC _{abc}
点-3 OB-3	0.121 BC _{Dcd}	0.270 BC _{bc}	0.390 AB _{cd}	0.229 B _{bc}	48.3 A _{abc}	93.0 A _{abcde}	126.4 AB _{bc}	70.1 BC _{Dcd}
点-2 OB-2	0.123 ABC _{bc}	0.281 ABC _{ab}	0.396 AB _{bc}	0.233 B _b	44.6 A _{bc}	94.3 A _{abcd}	128.8 AB _{abc}	75.1 AB _{ab}
点-1 OB-1	0.120 BC _{Dede}	0.263 C _{Dcd}	0.389 AB _{cd}	0.220 B _{Cc}	50.8 A _{ab}	92.1 A _{abcde}	125.5 AB _{bc}	69.2 BC _{Dde}
撒-3 CT-3	0.113 DE _e	0.241 E _{ef}	0.355 B _{Ce}	0.208 C _{Dd}	49.7 A _{abc}	89.4 A _{de}	121.5 B _c	67.4 C _{Dde}
撒-2 CT-2	0.116 C _{Dede}	0.250 DE _{de}	0.361 BC _{de}	0.207 C _{Dd}	46.0 A _{abc}	89.9 A _{ede}	124.0 AB _{bc}	70.6 BC _{Dbcd}
撒-1 CT-1	0.111 E _e	0.235 E _f	0.353 B _{Ce}	0.196 D _e	51.5 Aa	88.6 A _e	120.6 B _c	65.0 D _e
南粳 44 Nanjing 44								
机插 MT	0.101 E _f	0.191 F _g	0.345 D _e	0.185 DE _{ef}	47.8 AB _{bcd}	89.4 B _c	127.3 AB _{ab}	66.1 DE _{de}
摆-3 OT-3	0.133 Aa	0.279 AB _b	0.410 AB _{ab}	0.261 Aa	48.6 AB _{bcd}	93.4 AB _{ab}	128.5 AB _{ab}	78.0 AB _b
摆-2 OT-2	0.135 Aa	0.295 Aa	0.420 Aa	0.266 Aa	45.2 B _d	94.6 Aa	131.5 Aa	82.6 Aa
摆-1 OT-1	0.131 AB _{ab}	0.271 BC _{bc}	0.404 B _b	0.256 Aa	52.1 AB _{abc}	93.2 AB _{ab}	126.5 AB _{abc}	76.9 B _{bc}
点-3 OB-3	0.121 BC _{Dbcd}	0.257 C _{Dcd}	0.369 C _{cd}	0.230 B _b	53.6 A _{ab}	92.8 AB _{abc}	124.5 ABC _{bc}	73.6 B _{Cc}
点-2 OB-2	0.124 BC _{Dede}	0.270 BC _{bc}	0.378 C _c	0.227 B _b	47.3 AB _{cd}	94.2 AB _a	128.0 AB _{ab}	76.4 B _{bc}
点-1 OB-1	0.117 C _{Dede}	0.253 C _{Dd}	0.365 C _d	0.211 C _c	55.1 Aa	92.4 AB _{abc}	123.1 BC _{Dbcd}	69.4 C _{Dd}
撒-3 CT-3	0.111 C _{Dedef}	0.227 E _{ef}	0.336 DE _{ef}	0.194 DE _{de}	53.6 A _{ab}	91.2 AB _{abc}	117.8 C _{Dde}	63.2 E _{Fef}
撒-2 CT-2	0.115 C _{Dede}	0.237 DE _e	0.345 D _e	0.198 C _{Dd}	47.8 AB _{bcd}	92.1 AB _{abc}	121.1 BC _{Dcd}	67.6 DE _d
撒-1 CT-1	0.107 DE _{ef}	0.220 E _f	0.328 E _f	0.179 E _f	55.5 Aa	90.5 AB _{bc}	115.5 D _e	60.4 F _f

表4 不同移栽方式对水稻各生育期根冠比的影响(江苏海安)

Table 4. Root shoot ratio of broadcasted rice under different transplanting ways (Haian, Jiangsu).

移栽方式 Transplanting ways	武运粳 24 Wuyunjing 24				南粳 44 Nanjing 44			
	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期
	ES	ES	HS	MS	ES	ES	HS	MS
	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CS
机插 MT	0.275 Ff	0.225 EFe	0.106 Ac	0.037 ABCbc	0.284 Fg	0.220 FGef	0.111 ABab	0.035 DEde
摆-3 OT-3	0.327 ABab	0.243 ABab	0.112 Aab	0.038 ABab	0.328 ABb	0.236 Bb	0.110 ABCabc	0.040 ABb
摆-2 OT-2	0.335 Aa	0.246 Aa	0.113 Aa	0.039 Aa	0.333 Aa	0.243 Aa	0.112 Aa	0.042 Aa
摆-1 OT-1	0.319 ABCDb	0.239 BCb	0.110 Aabc	0.038 ABab	0.323 Bc	0.231 CDc	0.109 ABCabcd	0.040 ABb
点-3 OB-3	0.318 BCDbc	0.233 CDc	0.108 Aabc	0.036 BCcd	0.311 Cd	0.224 EFd	0.106 ABCbcde	0.038 BCc
点-2 OB-2	0.322 ABCb	0.241 ABb	0.109 Aabc	0.038 ABab	0.315 Cd	0.235 BCb	0.108 ABCbcde	0.039 Bbc
点-1 OB-1	0.307 CDEcd	0.227 DEFde	0.108 Aabc	0.036 BCcd	0.304 De	0.221 FGde	0.105 ABCcde	0.036 CDd
撒-3 CT-3	0.298 Ede	0.223 FGe	0.107 Abc	0.036 BCcd	0.294 Ef	0.222 Fde	0.104 BCde	0.034 DEef
撒-2 CT-2	0.305 DEd	0.230 DEcd	0.108 Aabc	0.037 ABCbc	0.298 Ef	0.228 DEc	0.104 BCde	0.035 DEde
撒-1 CT-1	0.292 Ee	0.218 Gf	0.107 Abc	0.035 Cd	0.286 Fg	0.217 Gf	0.103 Ce	0.033 Ef

表5 不同移栽方式水稻各生育期根系活力(江苏扬州)

Table 5. Root activity of broadcasted rice under different transplanting ways (Yangzhou, Jiangsu).

 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$

移栽方式 Transplanting ways	武运粳 24 Wuyunjing 24				南粳 44 Nanjing 44			
	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期	有效分蘖 临界叶龄期	拔节期	抽穗期	成熟期
	ES	ES	HS	MS	ES	ES	HS	MS
	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CS
机插 MT	40.5 DEdef	98.4 CDEdef	73.6 BCcde	20.5 BCDdef	35.8 Ff	93.4 Ef	69.7 Dde	22.8 BCDcd
摆-3 OT-3	47.8 ABa	105.2 ABCbc	78.5 ABab	24.6 ABab	43.2 BCbc	108.6 ABab	76.5 ABab	24.6 ABCabc
摆-2 OT-2	49.7 Aa	110.5 Aa	81.2 Aa	26.2 Aa	46.4 Aa	112.2 Aa	78.2 Aa	26.2 Aa
摆-1 OT-1	45.3 BCb	102.1 BCDbcd	76.4 ABCbc	23.4 ABCabc	41.6 BCDcd	105.5 BCbc	74.8 ABCbc	23.2 ABCDbcd
点-3 OB-3	44.6 Cbc	100.5 BCDEcde	75.3 ABCbcd	21.4 ABCDbcde	42.5 BCbcd	103.5 BCcd	72.8 BCDcd	23.1 BCDbcd
点-2 OB-2	45.5 BCb	106.7 ABab	78.4 ABab	24.7 ABab	44.3 ABb	107.6 ABbc	74.3 ABCbc	25.7 ABa
点-1 OB-1	42.7 CDcd	98.3 CDEdef	73.7 BCcde	18.7 CDef	39.3 De	100.4 CDde	68.5 DEe	21.4 Dde
撒-3 CT-3	40.3 DEef	96.4 DEef	71.6 Cde	19.6 CDdef	38.7 DEe	96.7 DEef	68.4 DEe	22.3 CDde
撒-2 CT-2	41.2 DEde	99.3 CDEde	75.4 ABCbcd	22.2 ABCDbcd	40.6 CDde	100.8 CDde	70.5 CDde	25.2 ABCab
撒-1 CT-1	38.5 Ef	93.5 Ef	70.8 Ce	17.5 Df	36.4 EFf	92.4 Ef	64.6 Ef	20.6 De

2.4 水稻有序摆抛栽的根系活力

不同抛栽方式水稻各生育期的根系活力均表现为摆栽>点抛>撒抛、机插,机插介于撒抛、点抛处理之间,拔节前不同方式间差异显著,拔节后摆栽与撒抛有显著差异,点抛与摆栽和撒抛均无显著差异(表5)。不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔,2连孔与单孔间有显著或极显著差异,3连孔与单孔间、2连孔大多无显著差异,介于二者之间。根系活力最大出现在拔节期,其次是抽穗期,有序摆抛栽成熟期仍能保持较高的根系活力。

各连孔处理下不同抛栽方式间各生育期的根冠比均表现为摆栽>点抛>撒抛,机插大多介于撒抛和点抛之间。除抽穗期和武运粳24成熟期外,摆栽、点抛均与撒抛有极显著差异,机插介于撒抛各处理之间。不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔,除抽穗期外,2连孔与单孔间差异显著,根冠

比较低(表4),这可能与机插秧苗素质弱,栽培植伤重,群体生长量大等有关。

2.5 水稻有序摆抛栽的根系吸收表面积

不同抛栽方式间各生育期的根系吸收表面积、活跃吸收表面积和活跃吸收比表现为摆栽>点抛>撒抛、机插,机插介于撒抛和点抛处理之间(表6)。摆栽、点抛各生育期的根系吸收表面积与撒抛有极显著差异,武运粳24的部分连孔处理的摆栽与点抛间有显著差异,南粳44二者间则无显著差异。对活跃吸收表面积而言,除抽穗期外,摆栽、点抛与撒抛有显著或极显著差异,摆栽和点抛间大多无显著差异。就活跃吸收比而言,两品种有效分蘖临界叶龄期、拔节期和成熟期及武运粳24的抽穗期中,除撒-1、撒-3和机插外,其他处理间无显著差异,南粳44抽穗期除撒-3、机插和摆-2外,其他处理间无显著差异。

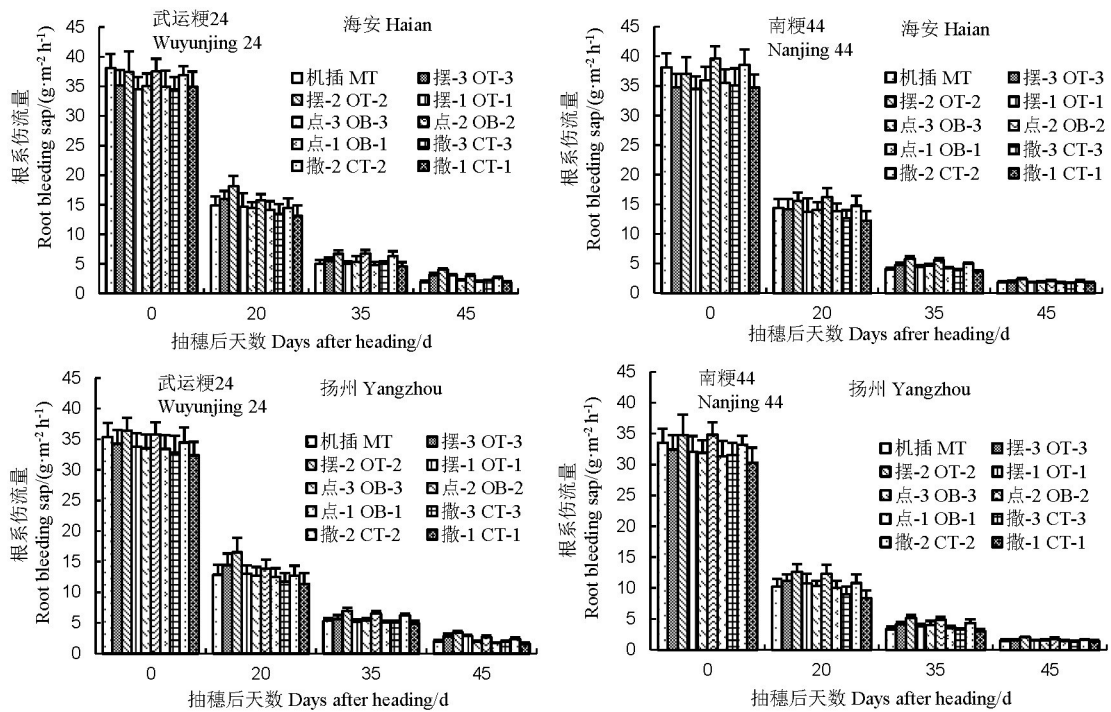


图2 不同移栽方式下水稻抽穗后的群体根系伤流量

Fig. 2. Root bleeding of broadcasted rice after heading under different transplanting ways.

不同连孔稻株间根系吸收表面积、活跃吸收表面积和活跃吸收比表现为2连孔>3连孔>单孔。不同连孔处理间有效分蘖临界叶龄期、拔节期和抽穗期的根系吸收表面积和活跃吸收表面积基本无显著差异,成熟期2连孔处理显著高于3连孔和单孔,不同连孔处理间的活跃吸收比无显著差异。

2.6 水稻有序摆抛栽抽穗后根系伤流量变化

不同抛栽方式间穗后群体根系伤流均表现为摆栽>点抛>撒抛,机插介于撒抛和点抛之间(图2)。不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔,2连孔与3连孔和单孔间有显著差异。水稻2连孔、3连孔摆抛栽后期能保持较强的根系活性和较慢的衰减率,利于后期大穗的形成和充实。

2.7 水稻有序摆抛栽后期根系在土层中的分布

2.7.1 各层根系干质量及比例

齐穗后15 d不同抛栽方式间根系总干质量表现为摆栽>点抛>撒抛,机插介于撒抛处理间或小于撒抛处理,极显著小于摆栽、点抛(表7)。不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔。0~5 cm、5~10 cm干质量比例表现为撒抛>点抛>摆栽,10~15 cm、15~20 cm、20~25 cm的根质量比例则为摆栽>点抛>撒抛。不同连孔间除0~5 cm、20~

25 cm外,均表现为2连孔>3连孔>单孔(表8)。

2.7.2 各层根系体积与根干质量密度

齐穗后15 d不同抛栽方式间各层根体积表现为摆栽>点抛>撒抛,有序摆抛栽与撒抛差异显著,机插除5~10 cm外,根体积均小于其他处理,不同连孔稻株间表现为2连孔>3连孔>单孔,差异不显著(表9)。各层根干质量密度不同抛栽方式间表现为摆栽>点抛>撒抛,不同连孔处理表现为2连孔>3连孔>单孔,且差异不显著(表10)。

2.8 根系特征与产量的相关性

2.8.1 各生育期根系特征与产量的相关性分析

各生育期单茎根干质量、群体根干质量、根冠比、吸收表面积、活跃吸收表面积、活跃吸收比、抽穗期单茎伤流强度等与产量呈极显著的线性相关,抽穗期群体根系伤流强度与产量相关不显著(表11)。因此,控制适宜的茎蘖群体,提高个体根系活力,仍是栽培调控关键点。

2.8.2 根系特征与产量的关系

相关分析表明,各层根干质量间极显著或显著相关,除20~25 cm外,各层根系干质量均与产量呈极显著或显著相关,相关系数只表达了两个因素间的表现相关程度,为分清其中的直接作用和间接作

用,又对4个与产量相关达显著程度的因素进行通径分析,结果评估出各层根系对形成超高产的贡献率为0~5 cm、5~10 cm 较高,底层根系通过上层根对产量的间接作用仍较大(表12)。因此,为了实现水稻超高产,必须大力培育发达的上层根,同时注意培育耕作层内的下层根,并保持根系高而持久的

活力。另对根系其他特性相关分析表明(表13),各层根体积间极显著或显著相关,除20~25 cm 外,根系体积、根干质量密度与产量极显著相关,10~20 cm 的根系比例与产量显著或极显著线性相关,也说明根深利于高产的形成。

表6 不同移栽方式水稻的根系吸收表面积、活跃吸收表面积与吸收面积比(江苏扬州)

Table 6. Total absorbing surface area, active absorbing surface area and ratio of active absorbing surface area to total absorbing surface area of broadcasted rice under different transplanting ways (Yangzhou, Jiangsu).

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	根系吸收表面积			
	Total absorbing surface area / ($\times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	有效分蘖 临界叶龄期 CS	拔节期 ES	抽穗期 HS	成熟期 MS
武运梗 24 Wuyunjing 24				
机插 MT	2.16 CDde	6.67 EFef	9.93 EFde	6.48 BCDbc
摆-3 OT-3	2.26 ABab	7.35 ABab	10.62 ABab	6.59 BCb
摆-2 OT-2	2.27 Aa	7.44 Aa	10.85 Aa	6.88 Aa
摆-1 OT-1	2.24 ABCabc	7.31 ABCabc	10.54 ABCb	6.46 BCDbc
点-3 OB-3	2.21 ABCDabcd	7.14 BCed	10.21 CDEcd	6.48 BCDbc
点-2 OB-2	2.23 ABCabc	7.23 ABCbcd	10.36 BCDbc	6.63 Bb
点-1 OB-1	2.20 ABCDbcde	7.06 CDd	10.12 DEFcd	6.35 CDEcd
撒-3 CT-3	2.16 CDde	6.57 Ff	9.82 EFe	6.11 EFef
撒-2 CT-2	2.18 BCDede	6.85 DEe	10.03 DEFde	6.26 DEde
撒-1 CT-1	2.14 De	6.48 Ff	9.74 Fe	5.95 Ff
南梗 44 Nanjing 44				
机插 MT	2.15 ABbcd	6.54 Cd	9.57 DEef	6.48 Bbc
摆-3 OT-3	2.26 Aa	7.29 ABa	10.73 ABab	6.55 Bb
摆-2 OT-2	2.26 Aa	7.37 Aa	10.89 Aa	6.80 Aa
摆-1 OT-1	2.23 ABab	7.22 ABabc	10.61 ABCabc	6.41 BCbc
点-3 OB-3	2.20 ABabc	7.07 ABbc	10.34 BCcd	6.36 BCcd
点-2 OB-2	2.21 ABabc	7.25 ABab	10.57 ABbc	6.59 ABb
点-1 OB-1	2.15 ABbcd	7.02 Bc	10.25 Cd	6.23 Cd
撒-3 CT-3	2.12 ABcd	6.41 Cde	9.47 DEF	5.48 Ef
撒-2 CT-2	2.14 ABbcd	6.56 Cd	9.81 De	5.87 De
撒-1 CT-1	2.09 Bb	6.29 Ce	9.32 Ef	5.33 Ef
品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	活跃吸收表面积			
	Active absorbing surface area / ($\times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)			
	有效分蘖 临界叶龄期 CS	拔节期 ES	抽穗期 HS	成熟期 MS
武运梗 24 Wuyunjing 24				
机插 MT	1.01 De	3.62 BCDde	5.94 CDde	2.39 BCbcd
摆-3 OT-3	1.15 Aab	4.06 Aa	6.52 ABab	2.48 Bbc
摆-2 OT-2	1.16 Aa	4.08 Aa	6.76 Aa	2.64 Aa
摆-1 OT-1	1.14 ABab	4.03 Aab	6.42 ABCabc	2.41 BCbc
点-3 OB-3	1.11 ABCabc	3.87 ABabc	6.2 ABCDbcd	2.42 BCbc
点-2 OB-2	1.13 ABab	3.93 ABab	6.39 ABCabc	2.51 ABb
点-1 OB-1	1.10 ABCDabc	3.81 ABCbcd	6.11 BCDcde	2.36 BCDcd
撒-3 CT-3	1.05 BCDede	3.52 CDe	5.83 De	2.21 DEef
撒-2 CT-2	1.08 ABCDbcd	3.67 BCDede	6.05 BCDede	2.29 CDEde
撒-1 CT-1	1.03 De	3.45 De	5.74 De	2.14 Ef
南梗 44 Nanjing 44				
机插 MT	0.98 De	3.44 CDc	5.54 CDEef	2.32 BCbc
摆-3 OT-3	1.12 ABa	3.94 Aa	6.36 ABab	2.41 ABb
摆-2 OT-2	1.15 Aa	4.02 Aa	6.58 Aa	2.55 Aa
摆-1 OT-1	1.10 ABab	3.88 ABa	6.24 ABabc	2.33 BCbc
点-3 OB-3	1.09 ABCabc	3.79 ABCab	6.01 BCbcd	2.30 BCbc
点-2 OB-2	1.11 ABab	3.93 ABa	6.30 ABab	2.43 ABab
点-1 OB-1	1.05 BCDbcd	3.75 ABCab	5.92 BCDcd	2.23 BCcd
撒-3 CT-3	1.03 BCDede	3.40 CDc	5.45 DEef	1.96 DEe
撒-2 CT-2	1.05 BCDbcd	3.52 BCDbc	5.72 CDEde	2.13 CDd
撒-1 CT-1	1.01 CDde	3.32 Dc	5.33 Ef	1.88 Ee

续表 6

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	活跃吸收面积比 Ratio of active absorbing surface area to total absorbing surface area / %			
	有效分蘖 临界叶龄期 CS	拔节期 ES	抽穗期 HS	成熟期 MS
	武运梗 24 Wuyunjing 24			
机插 MT	46.67 Ab	54.32 Aab	59.81 Aabc	36.88 Aab
摆-3 OT-3	50.88 Aab	55.24 Aa	61.40 Aabc	37.66 Aab
摆-2 OT-2	51.10 Aa	54.84 Aab	62.29 Aa	38.37 Aa
摆-1 OT-1	50.89 Aab	55.19 Aa	60.93 Aabc	37.34 Aab
点-3 OB-3	50.23 Aab	54.21 Aab	61.03 Aabc	37.32 Aab
点-2 OB-2	50.67 Aab	54.40 Aab	61.69 Aab	37.82 Aab
点-1 OB-1	50.00 Aab	53.99 Aab	60.36 Aabc	37.10 Aab
撒-3 CT-3	48.61 Aab	53.61 Aab	59.38 Abc	36.20 Ab
撒-2 CT-2	49.54 Aab	53.57 Aab	60.32 Aabc	36.61 Aab
撒-1 CT-1	48.13 Aab	53.25 Ab	58.94 Ac	36.01 Ab
南梗 44 Nanjing 44				
机插 MT	45.7 Bb	52.6 Ac	56.23 Cd	35.77 Aab
摆-3 OT-3	49.6 ABa	54.1 Aab	58.63 ABCabc	36.73 Aab
摆-2 OT-2	50.8 Aa	54.6 Aa	60.42 Aa	37.44 Aa
摆-1 OT-1	49.3 ABa	53.8 Aabc	58.27 ABCbcd	36.23 Aab
点-3 OB-3	49.4 ABa	53.6 Aabc	58.12 ABCbcd	36.23 Aab
点-2 OB-2	50.2 Aa	54.2 Aab	59.63 ABab	36.88 Aab
点-1 OB-1	49.0 ABa	53.4 Aabc	57.74 ABCbcd	35.75 Aab
撒-3 CT-3	48.5 ABa	53.1 Abc	57.56 ABCbcd	35.82 Aab
撒-2 CT-2	49.1 ABa	53.7 Aabc	58.88 ABCabc	36.35 Aab
撒-1 CT-1	48.2 ABab	52.8 Abc	57.20 BCcd	35.34 Ab

表 7 不同移栽方式下水稻齐穗后 15 d 各层根干质量(江苏海安)

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	根层深度 Soil depth					总干质量 Total root dry weight
	g/m ²					
	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~25 cm	
武运梗 24 Wuyunjing 24						
机插 MT	63.21 Fg	14.55 Dd	4.23 Dd	0.28 Df	0.05 Bb	82.32 Eg
摆-3 OT-3	80.52 ABb	17.86 ABa	5.78 Aab	0.78 Aa	0.07 Aa	105.01 ABab
摆-2 OT-2	82.74 Aa	18.17 Aa	6.12 Aa	0.80 Aa	0.07 Aa	107.90 Aa
摆-1 OT-1	79.19 BCbc	17.23 ABCab	5.61 ABab	0.75 Aa	0.06 ABab	102.84 ABCbc
点-3 OB-3	76.35 Cd	16.82 ABCDab	5.37 ABCbc	0.61 Bbc	0.06 ABab	99.21 CDcd
点-2 OB-2	78.18 BCcd	17.69 ABa	5.58 ABab	0.66 Bb	0.07 Aa	102.18 BCbcd
点-1 OB-1	76.10 Cd	16.39 ABCDabcd	5.27 ABCbc	0.57 Bc	0.07 Aa	98.40 CDd
撒-3 CT-3	66.47 Ef	15.50 BCDbcd	4.77 BCDcd	0.42 Cde	0.07 Aa	87.23 Ef
撒-2 CT-2	72.29 De	16.48 ABCDabc	5.27 ABCbc	0.46 Cd	0.07 Aa	94.57 De
撒-1 CT-1	64.77 EFfg	14.90 CDcd	4.58 CDd	0.38 Ce	0.07 Aa	84.70 Efg
南梗 44 Nanjing 44						
机插 MT	66.32 Ee	12.51 Cd	3.83 Dd	0.30 Cg	0.04 Bc	83.00 Dd
摆-3 OT-3	78.88 Bb	15.38 ABa	5.21 ABab	0.58 ABbc	0.06 ABab	100.11 ABab
摆-2 OT-2	81.62 Aa	15.82 Aa	5.78 Aa	0.75 Aa	0.07 Aa	104.04 Aa
摆-1 OT-1	75.34 Cc	14.84 ABabc	4.69 BCDbc	0.55 Bbcd	0.07 Aa	95.49 BCbc
点-3 OB-3	74.21 CDcd	14.42 ABCabc	4.86 BCbc	0.59 ABbc	0.06 ABab	94.14 BCc
点-2 OB-2	75.41 Cc	15.23 ABab	5.12 ABCb	0.62 ABb	0.06 ABab	96.44 BCbc
点-1 OB-1	72.96 CDd	13.83 ABCbcd	4.59 BCDbc	0.47 BCcde	0.05 ABbc	91.90 Cc
撒-3 CT-3	66.13 Ee	13.46 BCcd	4.65 BCDbc	0.36 Cefg	0.05 ABbc	84.65 Dd
撒-2 CT-2	72.60 Dd	14.90 ABab	5.03 ABCb	0.44 BCdef	0.06 ABab	93.03 BCc
撒-1 CT-1	63.61 Ff	12.47 Cd	4.28 CDcd	0.31 Cfg	0.06 ABab	80.73 Dd

3 讨论

3.1 水稻有序摆抛栽的根系形态生理系特征

3.1.1 根系生长特性

水稻灌浆结实期群体的根系活力与上 3 叶中的叶绿素含量、SOD 及 POD 活性、上 3 叶净光合速率

呈极显著正相关,与 MDA 含量呈极显著负相关,抽穗结实期较高的根系活力有利于保持地上部叶片的功能,防止早衰,提高叶片的净光合速率利于籽粒灌浆结实率^[16]。徐芬芬等^[17]认为各时期更高的根系活力,较高的根系生物量,稻株氮素吸收及利用率增强,是后期干物质积累及产量提高的重要生理原因。

表8 不同移栽方式水稻各层根干质量占总干质量比例(江苏海安)

Table 8. Ratio of root dry weight in various soil layers to total root dry weight of broadcasted rice under different transplanting ways (Haian, Jiangsu).

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	根层深度 Soil depth				
	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~25 cm
武运粳 24 Wuyunjing 24					
机插 MT	76.79 Aa	17.67 Aa	5.14 Bc	0.34 Ee	0.06 Bb
摆-3 OT-3	76.68 Aa	17.01 BCDbcd	5.50 ABab	0.74 Aa	0.07 ABab
摆-2 OT-2	76.68 Aa	16.84 CDd	5.67 Aa	0.74 Aa	0.06 Bb
摆-1 OT-1	77.00 Aa	16.75 Dd	5.46 ABab	0.73 Aa	0.06 Bb
点-3 OB-3	76.96 Aa	16.95 BCDcd	5.41 ABabc	0.61 ABCb	0.06 Bb
点-2 OB-2	76.51 Aa	17.31 ABCDabc	5.46 ABab	0.65 ABab	0.07 ABab
点-1 OB-1	77.34 Aa	16.66 Dd	5.36 ABbc	0.58 BCDcd	0.07 ABab
撒-3 CT-3	76.20 Aa	17.77 Aa	5.47 ABab	0.48 CDcd	0.08 Aa
撒-2 CT-2	76.44 Aa	17.43 ABCab	5.57 Aab	0.49 CDcd	0.07 ABab
撒-1 CT-1	76.47 Aa	17.59 ABa	5.41 ABabc	0.45 DEd	0.08 Aa
南粳 44 Nanjing 44					
机插 MT	79.90 Aa	15.07 Cd	4.61 Bd	0.36 De	0.05 Bc
摆-3 OT-3	78.79 Aa	15.36 ABCbcd	5.20 ABabc	0.58 ABCbc	0.06 ABb
摆-2 OT-2	78.45 Aa	15.21 BCd	5.56 Aa	0.72 Aa	0.07 Aa
摆-1 OT-1	78.90 Aa	15.54 ABCabcd	4.91 ABcd	0.58 ABCbc	0.07 Aa
点-3 OB-3	78.83 Aa	15.32 ABCcd	5.16 ABabc	0.63 ABab	0.06 ABb
点-2 OB-2	78.19 Aa	15.79 ABCabc	5.31 Aabc	0.64 ABab	0.06 ABb
点-1 OB-1	79.39 Aa	15.05 Cd	4.99 ABbcd	0.51 BCDbcd	0.05 Bc
撒-3 CT-3	78.12 Aa	15.90 ABab	5.49 Aa	0.43 CDde	0.06 ABb
撒-2 CT-2	78.04 Aa	16.02 Aa	5.41 Aab	0.47 BCDede	0.06 ABb
撒-1 CT-1	78.79 Aa	15.45 ABCbcd	5.30 Aabc	0.38 Dde	0.07 Aa

表9 不同移栽方式下水稻各层根体积(江苏海安)

Table 9. Root volume in various soil layers of broadcasted rice under different transplanting ways (Haian, Jiangsu).

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	根层深度 Soil depth				
	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~25 cm
武运粳 24 Wuyunjing 24					
机插 MT	802.79 Dd	214.86 BCcd	66.35 Ee	5.15 Dd	1.16 Cd
摆-3 OT-3	986.52 Aab	247.24 Aab	85.04 ABab	12.34 Aa	1.37 Aa
摆-2 OT-2	1008.54 Aa	250.74 Aa	88.36 Aa	12.23 Aa	1.37 Aa
摆-1 OT-1	985.07 Aab	238.35 ABab	82.96 ABCab	12.04 Aa	1.36 ABa
点-3 OB-3	960.43 Aab	237.40 ABab	81.20 ABCDbc	9.87 Bb	1.21 BCb
点-2 OB-2	967.05 Aab	248.60 Aa	81.51 ABCDbc	10.58 ABb	1.35 ABa
点-1 OB-1	952.99 ABb	230.65 ABCabc	80.62 ABCDbc	9.72 Bb	1.38 Aa
撒-3 CT-3	845.85 CDcd	217.68 BCcd	75.68 CDcd	7.00 CDc	1.35 ABa
撒-2 CT-2	891.44 BCc	227.87 ABCbcd	79.32 BCDbcd	7.56 Cc	1.35 ABa
撒-1 CT-1	831.37 CDd	209.41 Cd	74.26 Dd	6.81 CDc	1.35 Aab
南粳 44 Nanjing 44					
机插 MT	825.85 Eef	200.04 Bd	62.19 Cc	5.11 Ed	1.02 De
摆-3 OT-3	975.03 ABab	237.81 Aa	82.02 ABab	11.14 Aab	1.17 BCDcd
摆-2 OT-2	998.06 Aa	238.46 Aa	87.48 Aa	12.02 Aa	1.36 Aa
摆-1 OT-1	945.58 ABCabc	225.30 ABabc	76.92 ABb	9.85 ABCabc	1.34 ABab
点-3 OB-3	921.77 ABCDbcd	224.11 ABabc	80.39 ABab	9.93 ABCab	1.22 ABCbcd
点-2 OB-2	938.78 ABCbc	235.71 Aab	82.68 ABab	10.35 ABab	1.24 ABCbc
点-1 OB-1	905.58 BCDcd	212.96 ABbcd	74.14 ABCb	9.38 ABCDbc	1.10 CDde
撒-3 CT-3	847.64 DEef	213.17 ABbcd	78.23 ABab	6.54 CDEd	1.16 BCDcd
撒-2 CT-2	878.97 CDEde	225.69 ABabc	79.21 ABab	7.43 BCDEcd	1.21 ABCbcd
撒-1 CT-1	820.88 Ef	205.17 ABcd	73.04 BCb	6.03 DEd	1.22 ABCbcd

李杰等^[18]研究认为,采用大秧龄苗移栽且直立苗比例高的手栽稻各生育期群体根干质量、单茎根干质量大,抽穗后单茎总根长、单茎根系伤流量大,根系吸收表面积大,根系干质量衰减率低等是其高产的

根系特征。本研究中有顺序摆抛栽稻苗栽后根系长度、干质量、根冠比等显著高于撒抛,可见有序摆抛栽水稻发根快,根系生长量大。有效分蘖临界叶龄期的根系干质量、根冠比略小于撒抛,抽穗至成熟期

表 10 不同移栽方式下水稻各层根干质量密度(江苏海安)

Table 10. Root density in various soil layers of broadcasted rice under different transplanting ways (Haian, Jiangsu).

g/cm³

品种与抛栽方式 Variety and transplanting ways	根层深度 Soil depth				
	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm	15~20 cm	20~25 cm
武运粳 24 Wuyunjing 24					
机插 MT	0.0787 ABbc	0.0677 Ab	0.0638 ABabc	0.0543 Cd	0.0430 Bb
摆-3 OT-3	0.0816 ABa	0.0722 Aa	0.0680 ABab	0.0632 Aab	0.0511 Aa
摆-2 OT-2	0.0820 Aa	0.0725 Aa	0.0693 Aa	0.0654 Aa	0.0512 Aa
摆-1 OT-1	0.0804 ABabc	0.0723 Aa	0.0676 ABab	0.0623 ABab	0.0441 Bb
点-3 OB-3	0.0795 ABabc	0.0709 Aab	0.0661 ABabcd	0.0618 ABab	0.0495 Aa
点-2 OB-2	0.0808 ABab	0.0712 Aab	0.0685 Aa	0.0624 ABab	0.0519 Aa
点-1 OB-1	0.0799 ABabc	0.0711 Aab	0.0654 ABabcd	0.0587 ABCbcd	0.0509 Aa
撒-3 CT-3	0.0786 ABbc	0.0712 Aab	0.0630 ABcd	0.0600 ABCbc	0.0519 Aa
撒-2 CT-2	0.0811 ABab	0.0723 Aa	0.0664 ABabc	0.0608 ABCab	0.0520 Aa
撒-1 CT-1	0.0779 ABabc	0.0712 Aab	0.0617 Bd	0.0558 BCcd	0.0519 Aa
南粳 44 Nanjing 44					
机插 MT	0.0803 ABabc	0.0625 Aab	0.0616 BCbc	0.0587 ABabc	0.0392 Dd
摆-3 OT-3	0.0809 ABab	0.0647 Aab	0.0635 ABb	0.0521 Cdef	0.0511 Aa
摆-2 OT-2	0.0818 ABa	0.0663 Aa	0.0661 Aa	0.0624 Aa	0.0515 Aa
摆-1 OT-1	0.0797 ABabc	0.0659 Aab	0.0610 BCcd	0.0559 ABab	0.0523 Aa
点-3 OB-3	0.0805 ABabc	0.0643 Aab	0.0605 BCcd	0.0594 ABab	0.0490 ABab
点-2 OB-2	0.0803 ABabc	0.0646 Aab	0.0619 BCbc	0.0599 ABab	0.0485 ABab
点-1 OB-1	0.0806 ABabc	0.0649 Aab	0.0619 BCbc	0.0501 Cf	0.0454 BCbc
撒-3 CT-3	0.0780 Bbc	0.0631 Aab	0.0594 Ccd	0.0550 BCcde	0.0430 CDe
撒-2 CT-2	0.0826 Aa	0.0660 Aab	0.0635 ABb	0.0592 ABab	0.0495 ABa
撒-1 CT-1	0.0775 Bc	0.0608 Ab	0.0586 Cd	0.0514 Cef	0.0494 ABa

表 11 根系性状与产量的相关系数

Table 11. Coefficients between root system traits with grain yield.

根系性状 Root system trait	有效分蘖 临界叶龄期 CS	拔节期 ES	抽穗期 HS	成熟期 MS
单茎干质量 Root dry weight per stem	0.671**	0.781**	0.840**	0.756**
群体干质量 Root dry weight of population	-0.738**	0.827**	0.894**	0.793**
根冠比 Root shoot ratio	0.795**	0.947**	0.746**	0.679**
根系活力 Root activity	0.940**	0.815**	0.922**	0.651**
吸收表面积 Total absorbing surface area	0.866**	0.854**	0.808**	0.824**
活跃吸收表面积 Active absorbing surface area	0.869**	0.885**	0.921**	0.902**
活跃吸收比 Ratio of active absorbing surface area to total absorbing surface area	0.768**	0.864**	0.862**	0.962**
抽穗期单茎根系伤流强度(海安) Root bleeding intensity per stem at the heading (Haian)			0.922**	
抽穗期群体根系伤流强度(海安) Population root bleeding intensity at the heading (Haian)			0.303	
抽穗期单茎根系伤流强度(扬州) Root bleeding intensity per stem at the heading (Yangzhou)			0.936**	
抽穗期群体根系伤流强度(扬州) Population root bleeding intensity at the heading (Yangzhou)			0.350	

*, ** 分别表示显著或极显著相关。

* and ** indicate significant correlation at $P=0.05$ or $P=0.01$, respectively.

表12 水稻各层根系干质量对稻谷产量的作用(江苏海安)

Table 12. Correlation between dry matter weights in various soil layers with grain yields (Haian, Jiangsu)

稻根深度 Root depth /cm	因素间相关系数 The correlation coefficient between factors(r)					对产量通径系数 Path coefficient to yield(P)					对产量 贡献率 RCTY ($P \cdot r$)
	x_2	x_3	x_4	x_5	产量 y	x_1 - y	x_2 - y	x_3 - y	x_4 - y	x_5 - y	
	0-5, x_1	0.752**	0.885**	0.955**	0.468*	0.877**	0.408	0.307	0.361	0.390	
5-10, x_2		0.902**	0.809**	0.677**	0.872**	0.481	0.639	0.577	0.517	0.433	0.5572
10-15, x_3			0.917**	0.657**	0.882**	0.064	0.065	0.072	0.066	0.047	0.0635
15-20, x_4				0.545*	0.879**	0.048	0.041	0.046	0.051	0.028	—
20-25, x_5					0.433	-0.124	-0.180	-0.175	-0.145	-0.266	—

RCTY, The rate of contribution to yield; y , Yield.

表13 稻根比例、体积及密度与产量的相关性分析(江苏海安)

Table 13. Correlation root ratio, volume and root weight density between dry matter weights in various soil layers with grain yield (Haian, Jiangsu).

项目 Item	稻根深度 Root depth/cm	因素间相关系数 The correlation coefficient between factors(r)				
		x_2	x_3	x_4	x_5	y
		根系比例 Root ratio	0-5, x_1	-0.964**	-0.728**	-0.220
	5-10, x_2		0.537*	0.007	0.546*	0.221
	10-15, x_3			0.456*	0.484*	0.454*
	15-20, x_4				0.065	0.838**
	20-25, x_5					-0.062
根系体积 Root volume	0-5, x_1	0.903**	0.855**	0.976**	0.497*	0.851**
	5-10, x_2		0.864**	0.876**	0.590**	0.932**
	10-15, x_3			0.866**	0.643**	0.721**
	15-20, x_4				0.515*	0.808**
	20-25, x_5					0.483*
根干质量密度 Root weight density	0-5, x_1	0.225	0.608**	0.527*	0.210	0.723**
	5-10, x_2		0.809**	0.641**	0.432	0.582**
	10-15, x_3			0.748**	0.306	0.895**
	15-20, x_4				0.268	0.762**
	20-25, x_5					0.314

根系干质量和根冠比显著高于撒抛,不同抛栽方式水稻各生育期的根系活力、根系吸收表面积等均表现为摆栽>点抛>撒抛,且穗后根系伤流量大。说明抛秧平躺秧苗的发根在立苗中的重要作用,而地上部在立苗中相对生长缓慢,中后期摆栽因其秧苗横向和纵向分布有序,根系入土深度较撒抛深,具有良好的根系系统。颖花穗颈伤流量与粒叶比、抽穗至成熟期积累的干物量关系密切,前期保持合理的根系生长量和适宜的根冠比,后期较大的根系生长量是水稻高产、超高产的根系特征,水稻有序摆抛栽稻各生育时期较强的根系活性,特别是中后期的良好根系生长和活性,利于地上部的健壮生长和促进大穗的形成。

3.1.2 根系分布特性

郑景生^[19]认为超高产水稻20cm土层内各层根系具有较大的干质量、体积和总长,分枝根十分发达,在土壤中密集成网,随着产量提高,根质量增长

率较地上增长率偏低,冠根比大,维持了地上、地下部形态及机能的平衡。根系密度与根系吸收能力密切相关^[9],以根系生物量表示的根系密度,表层为最高,随土层向下逐渐下降,在土层15cm以下根系密度变化较小。本研究中,成熟期土壤0~5cm的根系生物量达70%以上,0~10cm的根系质量所占比例达90%以上,即大部分的根系分布在土壤表层。各层的根系干质量、比例、体积和根密度均表现为摆栽>点抛>撒抛,0~20cm内有序摆抛栽稻的根干质量和体积显著高于撒抛,各层根系比例和根干质量密度变化较小。根干质量密度与根系吸收能力密切相关,本研究中各处理表层根干质量密度为最高,随土层深度增加而逐渐下降,2连孔有序摆抛栽稻株的根干质量密度相对较高。这表明有序摆抛栽稻根系生物量大,且在土壤中分布较深,及深层根比例越大,根系吸收能力强,这也是其后期不早衰、叶片功能期长的主要原因。

3.1.3 大穴稀植与根系形态生理

稀植栽培条件下,根系健壮,衰老缓慢。刘岩等^[20]认为超稀植栽培较常规栽培根系干质量和体积明显增加,上层根系分布较多。整个生育期内根系活力较高,齐穗后根系的伤流液强度和 POD 活性也明显高于常规栽培。许凤英等^[21]研究发现,与常规栽培相比,强化稀植栽培能明显增加从分蘖至成熟各生育时期的单株根系干质量,降低齐穗后根系中可溶性糖含量,提高生育后期根系的生理活性,特别是在籽粒灌浆结实的关键时期,强化栽培的根系伤流强度明显高于常规栽培。因此,强化栽培可以延缓后期根系及叶片衰老,提高结实率及千粒重,进而提高产量。栽培上可考虑通过稀植栽培,提高水稻根系的生命活力,延长水稻根系寿命,提高水稻的整体生产力。超稀植栽培在水稻生育期内根系干物质积累比常规栽培多,拥有发达的根系,而且主要集中在 0~10 cm 耕层中,同时 10~20 cm 耕层内也有相当数量的根系存在,这为水稻生育后期产量的形成做出了重要贡献^[22]。本研究中 2 连孔、3 连孔稀植栽插,抽穗后根系活力较强,根系发达,根系下扎深,根干质量密度大,底层仍有较大的根系分布比例。但是并非越稀越好,2 连孔与 3 连孔在基本苗数一样的情况下,2 连孔水稻生长比 3 连孔要好,究其原因,3 连孔固然穴间距大,但穴内苗数多,穴内竞争一定程度上削弱了穴间优势,而 2 连孔则实现了穴间距和穴内苗数较好的协调,综合表现 2 连孔水稻的根系性状要优于 3 连孔。生产上的单孔抛栽因栽插苗数和穴数多,穴间通风透光相对较差,单孔抛栽稻生长不如 2 连孔和 3 连孔水稻。强大的根系生长利于地上部的生长。许乃霞认为^[16]抽穗后根系活力强的群体地上部功能叶衰老缓慢,叶绿素含量下降速度慢,使抽穗后水稻的功能叶捕获光能的能力增强,从而形成较高光合能力的水稻群体,最终形成高产。2 连孔有序摆抛稻的强根系活力也是其高产、超高产的地下部特征和生理生态基础。

3.2 根系特征与水稻超高产的关系

水稻明显的增产优势是对根系生长优势的一种响应,与根冠比、单株根干质量、根系总吸收面积和活跃吸收面积、根系养分吸收能力和根系活力提高有关^[23]。超高产水稻的根系发达、生长快、深生、粗生表现在单茎根质量高、根冠比高、比根质量大,根系发达而粗壮^[24]。秦华东等^[25]认为稻草还田显著提高免耕抛秧稻的产量,主要是显著或极显著

提高单株根系干质量、单株生物量、根半径、单株根表面积、单株根长、单条根长、根长密度、根系活力及超氧化物歧化酶活性。张耗等^[26]通过多年来品种的演化研究认为,根干质量、根长、根直径、根系氧化力、根系总吸收面积和根系活跃吸收面积与产量呈极显著线性正相关关系。郑华斌等^[27]研究发现良好的根系特性(根系氧化力、根表面吸收面积、根系孔隙度)以及齐穗后干物质积累量大是梯式窄垄栽培技术和窄厢栽培技术增产的重要原因。说明改善根系和地上部的生长,促进了现代水稻品种产量的提高。高产水稻与各生育期根系生长情况密切相关,刘桃菊等^[28]认为齐穗期上位根根干质量密度、根长密度、根表面积密度和根活性表面积密度与每蔸有效穗数及籽粒产量之间呈显著正相关,根长密度、根干质量密度与每蔸穗数也呈显著正相关。蔡昆争等^[29]认为各生育期根质量均与地上部质量、总质量呈显著或极显著正相关,根活力与分蘖期地上部各性状和成熟期产量呈显著正相关,而抽穗期和成熟期的根冠比均与产量呈极显著负相关。唐文帮^[30]对 C 两优系列杂交组合研究,发现其在整个生育期内比汕优 63 具有发达的根系和较强的根系活力,保证了其营养元素和水分的吸收,从而为高产奠定了基础。尤其是在生育后期仍保持较强的根系活力及地下部与地上部的和谐关系是其高产的重要原因。本研究中产量较高的 2 连孔、3 连孔有序摆抛栽稻株,其各生育期的根系干质量、根冠比、根系活力和根系吸收面积和穗后根系伤流量等均较撒抛和机插显著提高,与产量均极显著相关,这是其超高产地下部优势的反映。通过栽插方式和栽培措施改善水稻的根系生长特性,提高根系活力、根系吸收面积和抽穗后根系干物质质量,延缓根系衰老,利于实现水稻高产和超高产。

水稻根系的分布与产量也密切相关^[31],合理的根系分布有助于增强水稻对土壤不良环境的适应能力,提高水稻抗逆性。关于土培条件下根系分布、活力和数量与产量的关系,郑景生^[19]认为 0~5cm 的上层根对超高产形成的贡献率达 65%,5~20cm 的下层根占 35%,而土层 20 cm 以下根系与产量无关。根系生物量的 52%~63%分布在 0~12 cm 土层中,70%~79%分布在 0~24 cm 土层中,根系生物量大,深根系比例高,植株更耐早衰。Morita^[32]指出,产水稻深层根系(土层 10 cm 以下)的比例高,认为深层根系对高产同样重要。蔡昆争等^[33]也认

为上层根(0~10 cm)质量与产量之间没有显著的相关关系,而下层根质量(10 cm以下)与产量之间呈显著正相关关系,认为适当减少表层根系,培育和增加深层根系的比有利于促进水稻产量的提高。这可能与所用品种类型、耕作方法、肥水管理措施及大田条件下根系取样方法等有关。本研究中0~5 cm、5~10 cm的根系干质量均与产量呈极显著的线性相关,对产量的通径系数较大,二者对产量贡献率较大。有序摆栽和点抛水稻的底层根系生物量大于撒抛,各抛栽处理下层根通过上层根对产量的间接影响仍较大,底层根系对产量仍有重要的影响。唐拴虎等^[34]的研究表明随着根系分布加深植株分蘖数减少,生长中后期功能叶叶绿素含量提高,成穗数减少,但成穗率、总粒数、实粒数明显增加,产量较高。我们也发现有序摆栽和点抛栽底层根量大于撒抛,其分蘖数和成穗数低于撒抛,但其每穗粒数较高,最终产量高,撒抛处理则是分蘖数和最终成穗数较多,因每穗粒数较少,而产量较低。说明强化根系下扎,增加土壤深层的根系分布能显著增加水稻实粒数和总粒数,这与深扎的根系提高叶片光合能力有关^[35],促进地上部光合产物向穗部的转运,利于培育大穗和提高结实率,同时根系衰老慢,有助于灌浆等有关。撒抛水稻根球入土浅,受热状态良好,能促进分蘖的发生,但灌浆结实期高温易导致根系早衰,对灌浆充实有一定影响。因此,表层足够的根系生长量和较深的根层分布是水稻超高产的根系分布特征。

参考文献:

- [1] 江立庚,李如平,韦善清,等.金优253免耕抛栽秧苗的根系生长与立苗特性.广西农业生物科学,2005,24(1):30-34. Jiang L G, Li R P, Wei S Q, et al. Root growth and standing characteristics of Jinyou 253 seedlings under no-tillage with cast transplantation. *J Guangxi Agric Biol Sci*, 2005, 24(1): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭保卫,张洪程,张春华,等.抛秧立苗对水稻光合特性和物质生产的影响.中国水稻科学,2012,26(3):311-319. Guo B W, Zhang H C, Zhang C H, et al. Effect of seedling standing and establishment on photosynthetic characteristics and matter production of broadcasted rice. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(3): 311-319. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in super rice. *Field Crops Res*, 2009, 113: 31-40.
- [4] 陈桐,蔡全英,吴启堂,等.PAEs胁迫对高/低累积品种水稻根系形态及根系分泌低分子有机酸的影响.生态环境学报,2015,24(3):494-500. Chen T, Cai Q Y, Wu Q T, et al. Effects of PAEs stress on root morphology and low molecular weight organic acid (LM-WOC) in root exudates of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars with high- and low-PAE accumulation. *Ecol Environ Sci*, 2015, 24(3): 494-500. (in Chinese with English abstract)
- [5] 梁永书,周军杰,南文斌,等.水稻根系研究进展.植物学报,2016,51(1):98-106. Liang Y S, Zhou J J, Nan W B, et al. Progress in rice root system research. *Acta Bot Sin*, 2016, 51(1): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- [6] 凌启鸿,陆伟平,蔡建中,曹显祖.水稻根系分布与叶角关系的研究初报.作物学报,1989,15(2):123-131. Ling Q H, Lu W P, Cao J Z, Cao X Z. The relationship between root distribution and leaf angle in rice plant. *Acta Agron Sin*, 1989, 15(2): 123-131. (in Chinese with English abstract)
- [7] Terashima K, Ogata T, Akita S. Eco-physiological characteristics related with lodging tolerance of rice in direct sowing cultivation: II. Root growth characteristics of tolerant cultivars to root lodging. *Jpn J Crop Sci*, 1994, 63: 34-41.
- [8] 龚金龙,邢志鹏,胡雅杰,等.籼、粳超级稻品种根系形态及若干生征的差异.作物学报,2014,40(6):1066-1080. Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, et al. Difference of root morphological and several physiological characteristics between indica and japonica super rice varieties. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(6): 1066-1080. (in Chinese with English abstract)
- [9] 耿林,李廷轩,张锡洲,余海英.氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征.中国农业科学,2012,45(23):4770-4781. Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(23): 4770-4781. (in Chinese with English abstract)
- [10] 许明,贾德涛,马殿荣,等.北方超级粳稻根系生理、叶片光合性能特点及其相互关系.作物学报,2010,36(6):1030-1036. Xu M, Jia D T, Ma D R, et al. Correlation of root physiology and leaf photosynthesis characteristics in northern Chinese japonica super rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(6): 1030-1036. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈达刚,周新桥,李丽君,等.华南主栽高产籼稻根系形态特征及其与产量构成的关系.作物学报,2013,39(10):1899-1908. Chen D G, Zhou X Q, Li L J, et al. Relationship between root morphological characteristics and yield components of major commercial indica rice in south China. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(10): 1899-1908. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.核农学报,2007,21(3):287-290. Ren W J, Yang W Y, Fan G Q, et al. Effects of different tillage and transplanting methods on rice rooting ability. *Acta Agric Nucl Sin*, 2007, 21(3): 287-290. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张洪程,郭保卫,陈厚存,等.水稻有序摆、抛栽的生理生态特征及超高产形成机制.中国农业科学,2013,46(3):463-475. Zhang H C, Guo B W, Chen H C, et al. Eco-physiological characteristics and super high yield formation mechanism of ordered transplanting and optimized broadcasting rice. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(3): 463-475. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘军,黄华,付华,等.水稻免耕抛秧高产稳产的生理基础研究.中国农业科学,2002,35(2):152-156. Liu J, Huang H, Fu H, et al. Physiological mechanism of high and stable yield of no-tillage cast-transplanted rice. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(2): 152-156. (in Chinese with English abstract)
- [15] 许轲,郭保卫,张洪程,等.有序摆抛栽对超级稻超高产与光合生产力的影响及水稻超高产模式探索.作物学报,2013,39(9):1652-1667. Xu K, Guo B W, Zhang H C, et al. Effect of ordered trans-

- planting and optimized broadcasting on super high yield and photosynthetic productivity and exploration of rice super high yield model. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(9): 1652-1667. (in Chinese with English abstract)
- [16] 许乃霞, 杨益花. 抽穗后水稻根系活力与地上部叶片衰老及净光合速率相关性的研究. *安徽农业科学*, 2009, 37(5): 1919-1921.
Xu N X, Yang Y H. Research on the relationship between the root Activity and leaf ageing, photosynthetic rate of rice after heading stage. *Anhui Agric Sci*, 2009, 37(5): 1919-1921. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 叶利民. 不同灌溉方式对水稻根系生长的影响. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 102-104.
Xu F F, Zeng X C, Shi Q H, Ye L M. Effects of different irrigation patterns on the growth of rice root. *Agric Res Arid Areas*, 2007, 25(1): 102-104. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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. *作物学报*, 2011, 37(12): 2208-2220.
Li J, Zhang H C, Chang Y, et al. Influence of planting methods on root system morphological and physiological characteristics of super rice under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2208-2220. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郑景生, 林文, 姜照伟, 李义珍. 超高产水稻根系发育形态学研究. *福建农业学报*, 1999, 14(3): 1-6.
Zheng J S, Lin W, Jiang Z W, Li Y Z. Root developmental morphology for super high yielding rice. *Fujian Agric Sci*, 1999, 14(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘岩, 孙涛, 李晶, 魏混. 超稀植栽培不同处理对水稻根系的生长动态和氧化力及 POD 酶活性影响. *黑龙江农业科学*, 2010(6): 21-23.
Liu Y, Sun T, Li J, Wei S. Effects of super-sparse cultivation different treatments on rice root growth dynamics, oxidizing power and POD enzyme activity. *Heilongjiang Agric Sci*, 2010(6): 21-23. (in Chinese with English abstract)
- [21] 许凤英, 马均, 王贺正, 等. 强化栽培条件下水稻的根系特征及其与产量形成的关系. *杂交水稻*, 2003, 18(4): 61-65.
Xu F Y, Ma J, Wang H Z, et al. The Characteristics of Roots and Their Relation to the Formation of Grain yield under the Cultivation by System of Rice Intensification (SRI). *Hybrid Rice*, 2003, 18(4): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- [22] 凌启鸿, 凌励. 水稻不同层次根系的功能及对产量形成作用的研究. *中国农业科学*, 1984, 17(5): 3-11.
Ling Q H, Ling L. Studies on the functions of roots at different nodepositions and their relation to the yield formation in rice plants. *Sci Agric Sin*, 1984, 17(5): 3-11. (in Chinese with English abstract)
- [23] 冯跃华, 邹应斌, Roland J Buresh, 等. 不同耕作方式对杂交水稻根系特性及产量的影响. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 693-701.
Feng Y H, Zhou Y B, Roland B, et al. Effects of different tillage system on the root properties and the yield in hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(4): 693-701. (in Chinese with English abstract)
- [24] 周汉钦, 林青山, 陈文丰, 等. 超高产特优质水稻根系特点初探. *广东农业科学*, 1997(6): 11-14.
Zhou H Q, Lin Q S, Chen W F, et al. Primary research on root system characteristics of super high yield and super high quality rice. *Guangdong Agric Sci*, 1997(6): 11-14. (in Chinese)
- [25] 秦华东, 张玉, 徐世宏, 等. 稻草还田对免耕水稻根系生长及产量的影响. *杂交水稻*, 2011, 26(4): 65-67.
Qin H D, Zhang Y, Xu S H, et al. Effects of straw incorporation on root growth and grain yield under no-tillage in rice. *Hybrid Rice*, 2011, 26(4): 65-67. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张耗, 黄钻华, 王静超, 等. 江苏中籼水稻品种演进过程中根系形态生理性状的变化及其与产量的关系. *作物学报*, 2011, 37(6): 1020-1030.
Zhang H, Huang Z H, Wang J C, et al. Changes in morphological and physiological traits of roots and their relationships with grain yield during the evolution of mid-season indica rice cultivars in jiangsu province. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(6): 1020-1030. (in Chinese with English abstract)
- [27] 郑华斌, 姚林, 刘建霞, 等. 种植方式对水稻产量及根系性状的影响. *作物学报*, 2014, 40(4): 667-677.
Zheng H B, Yao L, Liu J X, et al. Effect of ridge & terraced cultivation on rice yield and root trait. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(4): 667-677. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1416-1419.
Liu T J, Qi C H, Tang J J. Studies on relationship between the character parameters of root and yield formation in rice. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(11): 1416-1419. (in Chinese with English abstract)
- [29] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系. *华南农业大学学报*, 2005, 26(2): 1-4.
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between root system of rice and aboveground characteristics and yield. *J South China Agric Univ*, 2005, 26(2): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐文帮, 邓化冰, 肖应辉, 等. 两系杂交水稻 C 两优系列组合的高产根系特征. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2859-2868.
Tang W B, Deng H B, Xiao Y H, et al. Root characteristics of high-yield C Liangyou rice combinations of two-line hybrid rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(14): 2859-2868. (in Chinese with English abstract)
- [31] 石庆华, 李木英, 徐益群, 等. 水稻根系特征与地上部关系的研究初报. *江西农业大学学报*, 1995, 17(2): 110-115.
Shi Q H, Li M Y, Xu Y Q, et al. Preliminary studies on the relationship between the characteristics of roots and shoots in rice. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 1995, 17(2): 110-115. (in Chinese with English abstract)
- [32] Monita S, Suga T, Yamazaki K. The relationship between root length density and yield in rice plants. *Japan J Crop Sci*, 1988, 57(3): 438-443.
- [33] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的分布及其与产量的关系. *华南农业大学学报:自然科学版*, 2003, 24(3): 1-4.
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between spatial distribution of rice root system and yield. *J South China Agric Univ (Nat Sci Edn)*, 2003, 24(3): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [34] 唐拴虎, 黄旭, 张发宝, 等. 根系分布及施肥模式对水稻生长发育的影响研究初报. *广东农业科学*, 2006, (9): 5-8.
Tang S H, Huang X, Zhang F B, et al. Preliminary study on the effects of root distribution and fertilizing methods on growth and development of rice. *Guangdong Agric Sci*, 2006, (9): 5-8. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵全志, 乔江方, 刘辉, 等. 水稻根系与叶片光合特性的关系. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 1064-1068.
Zhao Q Z, Qiao J F, Liu H, et al. Relationship between root and leaf photosynthetic characteristic in rice. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(5): 1064-1068. (in Chinese with English abstract)