

抛秧立苗的根系特点及其对水稻生长的影响

郭保卫¹ 张春华¹ 陈厚存² 张洪程^{1,*} 周兴涛¹ 张军¹ 李杰¹ 陈京都¹ 许轲¹
魏海燕¹ 戴其根¹ 霍中洋¹ 邢琳¹ 朱聪聪¹

(¹扬州大学农学院/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)

Root Characteristics of Broadcasted Rice Seedlings During Seedling Standing and Its Effect on Plant Growth

GUO Bao-wei¹, ZHANG Chun-hua¹, CHEN Hou-cun², ZHANG Hong-cheng^{1,*}, ZHOU Xing-tao¹, ZHANG Jun¹, Li Jie¹,
CHEN Jing-du¹, XU Ke¹, WEI Hai-yan¹, DAI Qi-gen¹, HUO Zhong-yang¹, XING Lin¹, ZHU Cong-cong¹

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

GUO Baowei, ZHANG Chunhua, CHEN Houcun, et al. Root characteristics of broadcasted rice seedlings during seedling standing and its effect on plant growth. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(6): 621-628.

Abstract: The root growth characteristics of broadcasted rice seedlings and the effects of broadcasting on plant growth were systematically studied under the treatments of upright seedlings with soil (USWS), leaning seedlings with soil (LESWS), lying seedlings with soil (LASWS), leaning seedlings without soil (LASWTS) and upright seedlings without soil (USWTS). USWS and LESWS recovered earlier with a smaller dead root ratio, and the length and the dry weight of roots were both higher than those of LASWS and LESWTS whose seedling standing speed was extremely and significantly correlated with the root growth. USWS and LESWS, characterized by earlier tillering and higher productive tiller rates, maintained stronger root activity at later stages and optimum root-shoot ratio throughout the whole growth period, displaying significantly higher nitrogen absorption rates, leaf chlorophyll content and root depths than LASWS and LASWTS. Considering earlier standing and recovery, significantly better root growth and fairly stronger growth capacity of USWS and LESWS, it is reasonable to seek high yielding and super high yielding of broadcasted rice by means of increasing the rate of upright seedlings with soil, reducing lying seedlings and improving seedling standing by promoting root growth.

Key words: broadcasted seedling; seedling standing; root; growth; rice

郭保卫, 张春华, 陈厚存, 等. 抛秧立苗的根系特点及其对水稻生长的影响. *中国水稻科学*, 2011, 25(6): 621-628.

摘 要: 通过设置带土直立苗、带土倾斜苗、带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗等不同苗姿,研究了抛秧稻的根系生长特点及其对水稻生长的影响。带土直立苗、带土倾斜苗抛秧活棵立苗快,在根系长度、根系干质量、黄根比方面都优于带土平躺苗和无土平躺苗,后者的立苗速度和根系生长极显著线性相关。秧苗活棵立苗后,带土直立苗、带土倾斜苗分蘖发生迅速且成穗率高,后期有着较强的根系活性,各生育时期保持适宜的根冠比,植株的吸氮速率、叶片的叶绿素含量、根系下扎深度都显著高于带土平躺苗和无土平躺苗。带土直立苗、带土倾斜苗活棵立苗快,其根系生长显著优于带土平躺苗和无土平躺苗,并在各生育时期保持较强的生长势。因此,提高带土直立苗比率、减少平躺苗比率 and 通过促进根系生长来促进抛秧立苗,进而促进抛秧稻高产、超高产。

关键词: 抛秧; 立苗; 根系; 生长; 水稻

中图分类号: S318; S511.04

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2011)06-0621-08

近年来,随着水稻播种面积的不断扩大,劳动力的不断减少,节本增效型栽培技术越来越受到广大农民的欢迎。水稻抛秧技术就是一项低投入高产出的农业技术,不但适合各种稻作体制与多熟种植制,而且与中国农村经济状况和农民状况较为适应,得到亿万群众的欢迎与接受,具有巨大的市场需求。但是,由于抛栽作业的特殊性,秧苗根系入土浅且不一致,抛后一般呈现直立、倾斜、平躺三种典型苗姿,非直立苗几乎均是抛栽过浅所致^[1-3]。立苗是指抛

栽后斜立甚至平躺在田面的秧苗自身垂直竖立起来的生长过程。立苗的好坏、立苗时间的长短直接影响到水稻群体生产力,最终影响抛秧稻的产量^[4-7]。根系不但在立苗期吸收营养和水分,还是立苗的主

收稿日期: 2011-01-09; 修改稿收到日期: 2011-04-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771273); 江苏省粮食丰产科技工程(BE2009425); 江苏省农业科技自主创新资金资助项目[CX(10)129]。

要动力^[8]。研究发现抛秧立苗时间越短,根系生长越有优势^[9],并且利于分蘖的发生^[10]。戴其根等^[11]认为抛秧稻分蘖开始早于手插稻,且低位分蘖多。张洪熙等^[12]研究不同生化剂处理的秧苗,发现发根效应大的秧苗,立苗效果佳。抛秧稻若立苗状况差,根系下扎土层浅,后期容易出现根系倒伏,并且不利于后期植株生长^[2],而苗期促进根系的发生,后期植株衰老慢,有利于产量的提高^[13-14]。目前抛秧主要是带土抛秧,抛后千姿百态,因育秧和抛秧水平的差异,部分秧苗会出现无土的情况。以往对抛秧立苗的根系有诸多研究,但多是从抛秧的混合群体方面入手的,而从秧苗根部是否带土及抛栽后不同苗姿探讨它们与抛秧立苗的关系及其对抛秧水稻生长的影响则较少。本研究对苗姿及不带土秧苗抛秧立苗的根系特点及对水稻后期生长的影响进行了系统研究,从根系方面探讨抛秧立苗,旨在为完善抛秧立苗技术、提高抛秧稻产量奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验时间与地点

试验于2008—2010年在扬州大学农学院试验农场进行,3年趋势基本一致,故以2009年为例。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1.5 mg/g,碱解氮含量为90.2 mg/kg,速效磷含量为34.5 mg/kg,速效钾含量为88.5 mg/kg。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

人工设置带土直立苗(主茎与地面夹角90°)、带土倾斜苗(主茎与地面夹角45°)、带土平躺苗(主茎与地面夹角0°)、无土平躺苗(主茎与地面夹角为0°)、无土直立苗(对照)等5个处理。供试材料为南粳44,5月25日采用434圆孔塑盘早育秧,6月15日抛栽,行株距为28 cm×15 cm,每穴2本,重复3次。小区面积16 m²。分别以尿素、过磷酸钙和氯化钾的形式施入氮肥(折合纯N)15 kg/667m²,磷肥(折合P₂O₅)7.5 kg/667m²,钾肥(折合K₂O)7.5 kg/667m²。其中,氮肥按 $m_{\text{基肥}} : m_{\text{蘖肥}} : m_{\text{穗肥}} = 3 : 3 : 4$ 施入,穗肥分别于倒3.5叶和倒2叶叶龄等量施入,磷肥全作基肥,钾肥50%作基肥,50%于倒5叶期施入。

1.2.2 测定项目与方法

自抛秧后12 d内每隔1 d观察计数10株秧苗的立苗角度,并各处理取30株苗,测定根长、根系干

质量、黄根干质量等。

各处理抛秧后12 d内每隔1 d取50株苗,取下根部,置105℃烘箱中杀青0.5 h,80℃下烘至恒重。同时定点10穴,移栽后每隔5 d调查1次茎蘖数。

于抽穗期每处理选取代表性稻株3穴,参照樊剑波等^[15]的方法,采用整株脱脂棉吸液差重法收集根系伤流液,根系伤流强度以每株单日伤流量表示。取代表性植株4穴,根系按28 cm×15 cm×20 cm规格取样,置70目网袋中流水冲洗获得完整根系,其中2穴用于测定根系体积、根系总吸收表面积、活跃吸收表面积,另外2穴用于测定根系活力。用排水法测定每穴根系体积,甲烯蓝蘸根法测定根系总吸收表面积和活跃吸收表面积, α -萘胺(α -NA)氧化法测定根系活力。

根系活跃吸收表面积比=根系活跃吸收表面积/根系总吸收表面积×100%。

于孕穗期、抽穗期、乳熟期(齐穗后20 d)、蜡熟期(齐穗后35 d)、成熟期用叶绿素仪定株定叶测定水稻剑叶的叶绿素相对含量(SPAD值),每处理定10穴,每穴定剑叶2片,共计20片叶,每片叶测定上中下部3点,取平均值。

蜡熟期,在典型地段按普查平均茎蘖数选取典型稻株5穴,截取有效穗基部20 cm长茎秆(含叶鞘),迅速放在间距16 cm的两个支点上,用弹簧秤测定两支点中间折断时的承受力(即单茎抗折断力)。

成熟期每处理选连续5穴4处,分别用棍子推压至60°、50°、30°和0°各3次,过夜后按所有茎蘖与地面夹角(锐角)之和/(所有茎蘖数×90)×100计算恢复度。另外每处理取代表性植株挖根3穴(每穴以稻株基部为中心,挖取28 cm×15 cm×4 cm带根土样,每4 cm深一层连续挖根至20 cm处),装于70目的筛网袋中,先用流水冲洗,然后用压缩喷雾器将根冲洗干净,烘干后称根干质量,取地上部植株测定理论产量,并对小区实收计产。

1.3 数据处理

所测数据用DPS软件和Excel软件进行分析处理,方差分析采用LSD多重比较。

2 结果与分析

2.1 根系生长对抛秧立苗的影响

2.1.1 抛秧立苗时间

表1表明,倾斜苗需4 d左右完全直立,带土平

表 1 不同处理抛秧后直立苗比率

Table 1. Upright seedling rates after broadcasting under different treatments.

%

年份 Year	处理 Treatment	抛秧后天数 Days after broadcasting/d						
		0	2	4	6	8	10	12
2009	带土直立苗 USWS	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa
	带土倾斜苗 LESWS	0.0 Bb	50.8 Bb	100.0 Aa				
	带土平躺苗 LASWS	0.0 Bb	0.0 Cc	20.3 Bb	51.5 Bb	95.6 Bb	100.0 Aa	100.0 Aa
	无土平躺苗 LASWTS	0.0 Bb	0.0 Cc	3.5 Cc	26.8 Cc	59.6 Cc	80.2 Bb	100.0 Aa
	无土直立苗 USWTS	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa
2008	带土直立苗 USWS	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa
	带土倾斜苗 LESWS	0.0 Bb	45.5 Bb	100.0 Aa				
	带土平躺苗 LASWS	0.0 Bb	0.0 Cc	12.6 Bb	45.8 Bb	93.3 Bb	100.0 Aa	100.0 Aa
	无土平躺苗 LASWTS	0.0 Bb	0.0 Cc	2.6 Cc	15.4 Cc	45.2 Cc	75.3 Bb	100.0 Aa
	无土直立苗 USWTS	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa	100.0 Aa

USWS—带土直立苗; LESWS—带土倾斜苗; LASWS—带土平躺苗; LASWTS—无土平躺苗; USWTS—无土直立苗。同一栏内跟不同大小写字母者表示在 1% 和 5% 水平差异显著。下同。

USWS, Upright seedlings with soil; LESWS, Leaning seedlings with soil; LASWS, Lying seedlings with soil; LASWTS, Lying seedlings without soil; USWTS, Upright seedlings without soil. Values followed by different uppercase and lowercase letters within a column are significantly different at 1% and 5% probability levels, respectively. The same as below.

表 2 抛秧立苗过程中的总根长变化

Table 2. Root lengths of seedlings after broadcasting under different treatments.

cm

处理 Treatment	抛秧后天数 Days after broadcasting/d						
	0	2	4	6	8	10	12
带土直立苗 USWS	22.0	42.3 Aa	81.7 Aa	93.5 Aa	107.3 Aa	123.2 Aa	140.6 Aa
带土倾斜苗 LESWS	22.0	36.9 ABb	78.5 Ab	89.0 Ab	106.5 Aa	120.5 Aa	135.7 Aa
带土平躺苗 LASWS	22.0	30.6 Cc	56.7 Bc	75.3 Bc	92.9 Bb	108.6 Bb	120.8 Bb
无土平躺苗 LASWTS	22.0	26.7 Cd	41.5 Ce	61.0 Ce	67.9 Cd	86.3 Cc	102.5 Cc
无土直立苗 USWTS	22.0	33.1 BCc	50.4 Bd	72.9 Bd	87.9 Bc	104.6 Bb	118.9 Bb

躺苗比倾斜苗推迟 4 d 立苗, 无土平躺苗立苗时间为 12 d。抛后 4~8 d 内, 带土倾斜苗、带土平躺苗、无土平躺苗的直立苗比率均存在极显著差异。

2.1.2 水稻抛秧立苗期根长

水稻抛秧后不同苗姿秧苗的根长不同(表 2)。立苗初期(抛秧后 2 d), 各处理根长表现为: 带土直立苗 > 带土倾斜苗 > 无土直立苗 > 带土平躺苗 > 无土平躺苗。以后带土直立苗和带土倾斜苗的发根优势明显, 至第 4 天根长都极显著长于带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗。带土平躺苗与无土直立苗各时期的根长大体相当, 均极显著长于无土平躺苗。由此可见, 与根系无土秧苗和带土平躺秧苗相比, 根系带土的直立苗和倾斜苗更有利于发根, 加快立苗。其中根系带土的直立苗最有利于活棵立苗, 相反, 根系无土平躺苗的活棵立苗性最差。

2.1.3 水稻抛秧立苗期的根干质量

所有苗姿秧苗抛后根系总干质量都呈上升趋势(图 1), 抛后各时期根系干质量和增速均表现为: 带

土直立苗、带土倾斜苗 > 无土直立苗、带土平躺苗 > 无土平躺苗。抛秧后 6 d, 带土直立苗根系干质量分别比带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗高 26.0%、30.4% 和 25.4%, 带土平躺苗和无土直立苗没有显著差异。抛后 8 d, 带土倾斜苗根系干质量

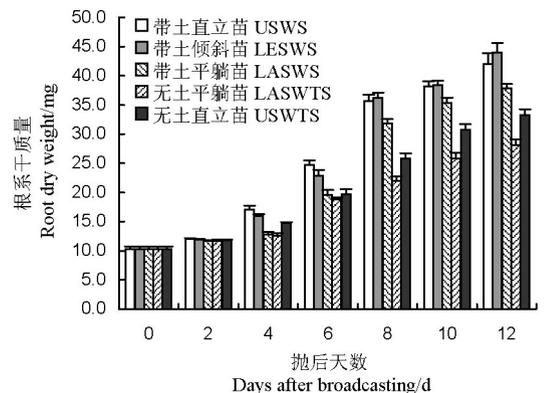


图 1 水稻抛秧立苗期根系总干质量变化

Fig. 1. Root dry weights of broadcasted seedlings during seedling standing.

略大于带土直立苗,带土平躺苗极显著大于无土直立苗,这主要因为非直立苗根系入土浅,利于根系的发生和生长。

所有苗姿秧苗抛后根系中黄根比均呈先上升后下降的趋势(图2),且在抛后4d黄根比达到最大,带土直立苗比带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗分别低44.7%、74.1%和60.4%,且带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗间均呈极显著差异。之后各苗姿秧苗的黄根比表现为:带土直立苗<带土倾斜苗<无土直立苗<带土平躺苗<无土平躺苗。

2.1.4 根系生长与水稻生长的相关性分析

根系长度和根系干质量对直立苗比率有着重要影响,相关分析表明(表3),完全立苗前带土平躺苗、无土平躺苗的直立苗比率与根长、根干质量呈极显著的线性相关。因此,促进根系的发生和生长利于抛秧立苗。

2.2 不同苗姿对水稻生长的影响

2.2.1 不同苗姿抛秧稻株茎蘖动态

抛后15d内,带土直立苗、带土倾斜苗分蘖发生量大,抛后15~35d,带土平躺苗、无土平躺苗分蘖增量明显(图3)。带土直立苗、带土倾斜苗、无土直立苗的高峰苗一般出现在抛后35d左右,带土平躺苗、无土平躺苗高峰苗出现在抛后30d左右,即提早1个叶龄左右。最终有效茎蘖表现为:带土直立苗>带土倾斜苗、无土直立苗>带土平躺苗>无土平躺苗。这主要由于带土直立苗、倾斜苗不存在立苗问题或立苗时间短,群体生长起步快,分蘖发生早,前期表现出较强的生长势。而带土平躺苗、无土平躺苗由于分蘖节入土浅,低位分蘖多,表现分蘖增量快,分蘖弱小且无效分蘖多,成熟期有效茎蘖数并不多。

表3 不同处理下根长和干质量与抛栽秧苗直立苗比率的相关性分析

Table 3. Correlation analysis of root length (x_1) and root dry weight (x_2) of leaning, lying seedlings with upright seedling rate (y) after broadcasting.

处理 Treatment	根系特征 Root character(x)	模型方程 Equation	相关系数 Correlation coefficient
带土倾斜苗 LESWS	根长 Root length(x_1)	$y=1.6431x_1-24.989$	0.962
	根干质量 Root dry weight(x_2)	$y=1644.8x_2-159.17$	0.967
带土平躺苗 LASWS	根长 Root length(x_1)	$y=1.2611x_1-37.415$	0.977**
	根干质量 Root dry weight(x_2)	$y=676.47x_2-79.115$	0.986**
无土平躺苗 LASWTS	根长 Root length(x_1)	$y=1.6271x_1-47.838$	0.927**
	根干质量 Root dry weight (x_2)	$y=402.55x_2-37.783$	0.965**

**表示处理间差异达 $P<0.01$ 显著水平。

** Significant at 0.01 probability level.

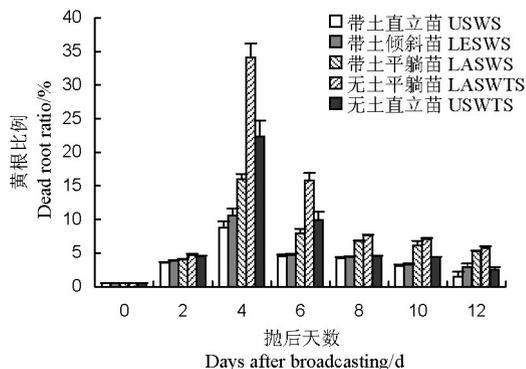


图2 水稻抛秧立苗期的黄根比例

Fig. 2. Dead root ratio of broadcasted seedlings during seedling standing.

2.2.2 不同苗姿抛秧稻株抽穗期的根系特征

抽穗期植株的单株根体积、单株总吸收表面积、活跃吸收表面积、活跃面积比、根系伤流量、 α -萘胺氧化量均表现为:带土直立苗>无土直立苗、带土倾斜苗>带土平躺苗>无土平躺苗,带土直立苗、带土倾斜苗、无土直立苗上述参数基本上极显著大于带土平躺苗和无土平躺苗(表4)。由此说明,带土直立苗根系发达,根系活力强,根系吸收能力强,平躺苗秧苗根系活力差。

2.2.3 不同苗姿稻株各生育期的根冠比

各生育时期,不同处理水稻植株根冠比存在显著差异(表5)。其中,完全立苗期(抛后15d),平躺苗由于地上部生长缓慢,根冠比显著高于直立苗。有效分蘖临界叶龄期和拔节期,带土倾斜苗、带土平躺苗、无土平躺苗的根冠比要小于带土直立苗,主要因为倾斜苗和平躺苗根系浅,地上部分蘖发生多。而进入抽穗期后,平躺苗根冠比又大于直立苗。究

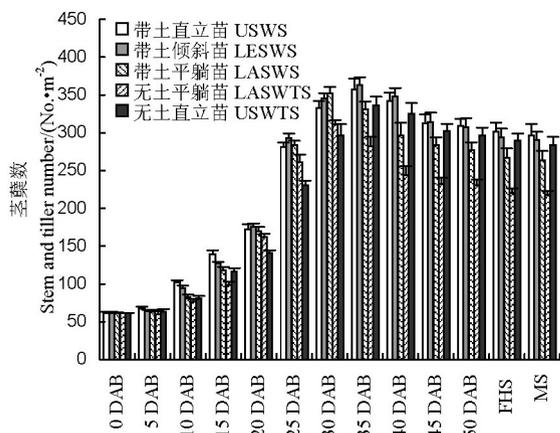


图3 不同处理下抛秧稻的茎蘖动态

Fig. 3. Dynamics of stems and tillers of broadcasted rice.

DAB, 抛秧后天数; FHS—齐穗期; MS—成熟期。

DAB, Days after broadcasting; FHS, Full heading stage; MS, Maturity stage.

其原因,可能是由于直立苗地上部生长比较旺盛,穗大粒多,平躺苗和倾斜苗下部无效分蘖由于光照不足逐渐死亡造成的。

2.2.4 不同苗姿抛秧稻株的氮素吸收

不同苗姿对抛秧水稻各生育阶段的吸氮速率有

影响。各时期的吸氮速率均表现为:带土直立苗>带土倾斜苗>无土直立苗>带土平躺苗>无土平躺苗(表6)。吸氮速率高峰出现在拔节-抽穗期,此阶段带土直立苗的吸氮速率极显著高于其他苗姿秧苗,无土平躺苗极显著低于其他苗姿秧苗,其中,带土直立苗比带土平躺苗、无土平躺苗、无土直立苗分别高5.6%、29.5%、2.4%。

2.2.5 不同苗姿抛秧稻株后期剑叶的SPAD值

孕穗期的剑叶SPAD值,除无土平躺苗外,其他苗姿秧苗间均无显著差异,各苗姿秧苗后期剑叶SPAD相对含量均以抽穗期最大。穗后剑叶SPAD值衰减幅度分别为:无土平躺苗>带土平躺苗>无土直立苗>带土倾斜苗>带土直立苗(表7)。非直立苗由于根系入土浅,不能更好吸收养分、水分,穗后叶片衰老较快。

2.2.6 不同苗姿抛秧稻株成熟期根系分布

在0~4 cm表土,带土倾斜苗、带土平躺苗根系干质量比带土直立苗高8.3%和5.9%,无土平躺苗根系干质量显著低于其他苗姿秧苗,带土直立苗和无土直立苗间无显著差异。而在4~8 cm表土,直立苗的根干质量极显著高于非直立苗,分别是

表4 不同处理下抛秧水稻抽穗期根系特征

Table 4. Root characteristics of broadcasted rice at the heading stage under different treatments.

处理 Treatment	根体积 Root volume /(cm ³ ·hill ⁻¹)	总吸收表面积 Total absorption surface area /(m ² ·hill ⁻¹)	活跃吸收表面积 Active absorption surface area /(m ² ·hill ⁻¹)	根系活跃面积比 Ratio of active absorption surface area /%	根系伤流量 Bleeding sap amount of root /(g·hill ⁻¹ d ⁻¹)	α-萘胺氧化量 Oxidative of root /(μg·g ⁻¹ h ⁻¹)
带土直立苗 USWS	33.00 Aa	13.26 Aa	6.36 Aa	47.96 Aa	17.56 Aa	54.72 Aa
带土倾斜苗 LESWS	28.50 Bc	12.70 Aa	5.08 Bb	40.00 Bb	15.74 Bc	54.50 Aa
带土平躺苗 LASWS	22.50 Cd	8.25 Bc	3.25 Cc	39.39 Bc	13.21 Dd	40.25 Cc
无土平躺苗 LASWTS	18.00 Ce	8.10 Bd	3.06 Cd	37.78 Dd	9.63 Ee	30.95 Dd
无土直立苗 USWTS	29.50 Bb	12.15 Ab	4.85 Bb	39.92 Bb	16.07 Bb	50.02 Bb

表5 不同处理下抛秧稻各生育期的根冠比

Table 5. Root-shoot ratio of broadcasted rice at different growth stages under various treatments.

处理 Treatment	抛后15 d 15 days after broadcasting	有效分蘖 临界叶龄期 Critical stage for effective tillering	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
带土直立苗 USWS	0.224 Ce	0.443 Aa	0.342 Aa	0.184 Ce	0.075 Bc
带土倾斜苗 LESWS	0.235 Bc	0.435 ABb	0.336 ABb	0.187 BCd	0.078 Bc
带土平躺苗 LASWS	0.251 Bb	0.428 BCc	0.324 Bc	0.192 Ab	0.082 Ab
无土平躺苗 LASWTS	0.277 Aa	0.392 Dd	0.308 Cd	0.196 Aa	0.088 Aa
无土直立苗 USWTS	0.228 BCd	0.425 Cc	0.327 Bc	0.190 ABc	0.076 Bc

表6 不同处理下抛秧稻各生育阶段植株氮素吸收速率

Table 6. Nitrogen absorption rate of broadcasted rice at different growth stages under different treatments.

处理 Treatment	有效分蘖临界叶龄期-拔节期 Critical stage for effective tillering-elongation stage (/kg·hm ⁻² d ⁻¹)	拔节-抽穗期 Elongation- heading stage (/kg·hm ⁻² d ⁻¹)	抽穗-成熟期 Heading- maturing stage (/kg·hm ⁻² d ⁻¹)	抽穗后氮素净积累贡献率 Net N absorbed conversion rate after heading stage /%
带土直立苗 USWS	1.24 Aa	3.38 Aa	0.79 Aa	32.45 Aa
带土倾斜苗 LESWS	1.23 Aa	3.32 Bb	0.77 Ab	32.03 Ab
带土平躺苗 LASWS	1.19 Ab	3.20 Bc	0.59 Bc	30.05 Bc
无土平躺苗 LASWTS	0.58 Bc	2.61 Cd	0.41 Cd	27.84 Cd
无土直立苗 USWTS	1.20 Ab	3.30 Bb	0.75 Ab	32.14 Ab

表7 不同处理下抛秧稻后期剑叶 SPAD 值变化

Table 7. SPAD value in the flag leaves of broadcasted rice under different treatments.

处理 Treatment	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	乳熟期 Milky maturity stage	蜡熟期 Wax maturity stage	完熟期 Maturity stage
带土直立苗 USWS	44.3 Aa	47.6 Aa	46.1 Aa	36.2 Aa	33.9 Aa
带土倾斜苗 LESWS	44.0 Aa	47.3 Aa	45.7 Aa	35.0 ABb	32.7 ABb
带土平躺苗 LASWS	43.6 Ab	46.5 Ab	44.8 Ab	33.7 Bc	31.3 Bc
无土平躺苗 LASWTS	42.1 Bc	45.2 Bc	42.6 Bc	31.5 Cd	28.4 Cd
无土直立苗 USWTS	43.8 Ab	47.0 Aa	45.1 Ab	34.3 Bbc	32.0 Bbc

表8 不同处理下抛秧稻各层根系干质量

Table 8. Root distribution and dry weight of broadcasted rice under different treatments.

年份 Year	处理 Treatment	不同深度土层根系干质量 Dry root weight at different soil depths					根系总干质量 Total root dry weight
		0~4 cm	4~8 cm	8~12 cm	12~16 cm	16~20 cm	
2009	带土直立苗 USWS	1.681 Bc	0.728 Aa	0.216 Aa	0.064 Aa	0.023 Aa	2.712 Aa
	带土倾斜苗 LESWS	1.820 Aa	0.601 Bc	0.144 Bc	0.049 Bb	0.014 Bb	2.628 Ab
	带土平躺苗 LASWS	1.780 Ab	0.278 Cd	0.094 Cd	0.030 Cc	0.009 Cc	2.191 Bc
	无土平躺苗 LASWTS	1.415 Cd	0.185 De	0.059 De	0.011 Dd	0.002 Dd	1.673 Cd
	无土直立苗 USWTS	1.648 Bc	0.694 Ab	0.191 Ab	0.058 Aa	0.020 Aa	2.611 Ab
2008	带土直立苗 USWS	1.924 Bb	0.593 Aa	0.160 Aa	0.055 Aa	0.020 Aa	2.75 Aa
	带土倾斜苗 LESWS	2.046 Aa	0.424 Bb	0.151 Aab	0.044 Ab	0.015 Aa	2.680 Ab
	带土平躺苗 LASWS	1.822 Cc	0.310 Cc	0.108 Bb	0.029 Bc	0.006 Bb	2.280 Bc
	无土平躺苗 LASWTS	1.468 Dd	0.192 Dd	0.061 Cc	0.013 Cd	0.001 Cc	1.740 Cd
	无土直立苗 USWTS	1.794 Cc	0.647 Aa	0.154 Ab	0.053 Aa	0.116 Aa	2.760 Ab

带土倾斜苗、带土平躺苗、无土平躺苗的 1.21、2.62、3.94 倍(表 8)。8~20 cm 内的各层深度秧苗的根系干质量均表现为:带土直立苗>无土直立苗>带土倾斜苗>带土平躺苗>无土平躺苗,根系总干质量表现为:带土直立苗>带土倾斜苗>无土直立苗>带土平躺苗>无土平躺苗。由此可见,非直立苗不利于根系深扎,不能更好吸收养分、水分,无土平躺苗由于抛栽后根系受损严重,成熟期单株根系干质量较小。同种苗姿秧苗,根球带土秧苗的根系总干质量比无土秧苗的大。

2.2.7 不同苗姿抛秧稻株的倒伏性

以稻株推压一定角度看其恢复情况作为衡量倒

伏性的一个指标,不论哪种推压角度,带土平躺苗和无土平躺苗的恢复程度均极显著优于其他苗姿稻株,且带土平躺苗恢复程度极显著高于无土平躺苗。随着推压程度的增加,带土直立苗、带土倾斜苗、无土直立苗之间恢复程度的差异越来越大,除推压 60°外,其他的恢复度均表现为:无土直立苗>带土直立苗>带土倾斜苗。单茎抗折力表现为:带土直立苗>带土倾斜苗>无土直立苗>带土平躺苗>无土平躺苗(表 9)。

2.2.8 不同苗姿抛秧稻的产量

成熟期的理论产量和实际产量均呈现带土直立苗>带土倾斜苗>无土直立苗>带土平躺苗>无土

表 9 不同处理下抛秧稻的抗倒性和单茎抗折力

Table 9. The resisting power of broadcasted rice to lodging and its break force under different treatments.

处理 Treatment	恢复度 Recovery after pushing/%				单茎抗折力 Break force /(g · stem ⁻¹)
	推压至 60° Pushing to 60°	推压至 50° Pushing to 50°	推压至 30° Pushing to 30°	推压至 0° Pushing to 0°	
带土直立苗 USWS	100.0 Aa	96.5 Aa	67.2 Aa	43.7 Ab	515.4 Aa
带土倾斜苗 LESWS	100.0 Aa	94.5 Ab	62.6 Bb	34.5 Bc	503.3 Aa
带土平躺苗 LASWS	94.5 Bb	85.6 Bc	54.6 Cc	28.7 Cd	478.5 Bc
无土平躺苗 LASWTS	85.3 Cc	74.7 Cd	48.2 Dd	24.2 De	440.8 Cd
无土直立苗 USWTS	100.0 Aa	98.8 Aa	70.4 Aa	48.6 Aa	492.6 Ab

表 10 不同处理下抛栽水稻的产量及其构成因素

Table 10. Grain yield and its components of broadcasted rice under different treatments.

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数	每穗粒数	千粒重	结实率	理论产量	实收产量	成穗率
		No. of effective panicles /(×10 ⁴ · hm ⁻²)	No. of grains per panicle	1000-grain weight /g	Seed setting rate/%	Theoretical yield /(t · hm ⁻²)	Harvest yield /(t · hm ⁻²)	Productive tiller rate /%
2009	带土直立苗 USWS	296.9 Aa	142.2 Aa	26.3 Aa	91.5 Aa	10.16 Aa	9.97 Aa	83.1 ABa
	带土倾斜苗 LESWS	290.9 Aa	142.5 Aa	26.3 Aa	91.2 Aa	9.94 Aab	9.78 Aab	80.0 Bb
	带土平躺苗 LASWS	263.9 Bb	143.7 Aa	26.2 Aa	90.4 Aa	8.98 Bc	8.78 Bc	75.0 Cc
	无土平躺苗 LASWTS	211.4 Cc	143.2 Aa	26.0 Aa	89.6 Aa	7.05 Cd	6.75 Cd	70.1 Dd
	无土直立苗 USWTS	283.4 Aa	144.3 Aa	26.3 Aa	90.9 Aa	9.78 Ab	9.56 Ab	84.2 Aa
2008	带土直立苗 USWS	301.5 Aa	144.3 Aa	26.5 Aa	91.0 Aa	10.49 Aa	10.29 Aa	81.4 Aa
	带土倾斜苗 LESWS	294.0 Aa	145.4 Aa	26.5 Aa	90.6 Aa	10.26 Aab	9.94 Aab	79.9 Aa
	带土平躺苗 LASWS	262.4 Bb	146.6 Aa	26.4 Aa	89.5 Aab	9.09 Bc	8.91 Bc	76.0 ABb
	无土平躺苗 LASWTS	205.4 Cc	145.3 Aa	26.2 Aa	88.7 Ab	6.94 Cd	6.37 Cd	71.8 Bc
	无土直立苗 USWTS	287.9 Aa	147.1 Aa	26.5 Aa	90.3 Aab	10.13 Ab	9.65 Ab	81.8 Aa

平躺苗的趋势(表 10),带土平躺苗、无土平躺苗的理论产量和实际产量均极显著小于带土直立苗、带土倾斜苗和无土直立苗,带土平躺苗的理论产量和实际产量极显著高于无土平躺苗,每穗粒数、千粒重和结实率间无显著差异。成穗率呈现的趋势为:无土直立苗、带土直立苗>带土倾斜苗>带土平躺苗>无土平躺苗。

3 讨论

3.1 根系生长对抛秧立苗的影响

根系生长是抛秧立苗的主要动力^[8,16],同时还影响水稻的养分和水分吸收。江立庚等^[16]认为促进抛秧立苗,主要是促进根系的生长。李如平等^[17]发现稻草还田促进了根系的发生和生长,促进抛秧立苗。本研究中,带土直立苗、带土倾斜苗不存在立苗问题,根系生长有着显著的优势,并且黄根较少。前人研究发现抛秧立苗根系生长与立苗角度呈极显著的线性相关^[10,18]。本研究发现带土平躺苗、无土平躺苗抛后根系长度、根系干质量与直立苗比率亦有着极显著的线性相关关系,可见根系的生长对抛秧立苗有重要影响。

选择根系生长能力强的品种,改善土壤环境,促

进水稻根系生长和立苗。通过化学调控,如采用壮秧剂育苗,苗期喷施萘乙酸^[19]、植物生长激素^[20]、亚硫酸氢钠和高吸水剂量包衣种子^[12]等,促进抛秧秧苗根系生长,从而促进抛秧活棵立苗。通过不同稻作、耕作方式调控抛秧立苗,抛秧田整地松软,利于秧苗根系生长。

3.2 不同苗姿抛秧稻株的根系特点与水稻生长

不同苗姿秧苗分蘖发生不同。抛秧立苗期,带土直立苗、带土倾斜苗分蘖发生上要优于带土平躺苗、无土平躺苗和无土直立苗,恢复立苗后,带土平躺苗和无土平躺苗分蘖发生表现一定优势,这主要因为抛栽后带土直立苗、带土倾斜苗根系所受伤害少、活棵立苗快,立苗期后,平躺秧苗因根系入土浅,低位分蘖发生多,但多为小分蘖或无效分蘖,抽穗以后这类分蘖成穗率低^[11]。带土直立苗、倾斜苗、无土直立苗在抽穗前根冠比大于带土平躺苗、无土平躺苗,而抽穗后则小于后者,主要由于带土直立苗、带土倾斜苗后期有较强的物质生产能力且平躺苗滋生的无效分蘖后期死亡。

抽穗期带土直立苗、带土倾斜苗、无土直立苗均表现较强的根系活性,平躺苗根系活性下降较快。此时无土直立苗根系活性略大于带土倾斜苗,无土

直立苗后期与带土直立苗、带土倾斜苗的差异越来越小,可见即使是不带土秧苗,直立的无土直立苗生长仍具有较强的优势。戴其根等^[11]认为抛秧稻各生育时期根系生长,直立苗和倾斜苗明显优于平躺苗,本研究中带土直立苗、带土倾斜苗和无土直立苗成熟期的单株根量大,且下扎能力强,有利于抛栽水稻水、肥、气的吸收,提高光合产物生产量,减少无效分蘖,增加单位面积有效穗数,利于高产的形成。带土平躺苗成熟期的根系70%以上集中于土壤表层(4 cm)内,无土平躺苗则达到80%,根系下扎能力弱,生长量小。这种根系生长和下扎能力的差异,是带土直立苗、无土直立苗抗倒伏能力强,而平躺秧苗抗倒伏能力差的主要原因^[3,9]。根倒伏直接与茎、根、土相关^[21-22]。因此,在农业生产实践中,抛栽时选用带土矮壮秧苗,提高直立苗比率,促进抛秧立苗的根系生长和保持适宜的根系下扎深度,抛栽后加强水分定量化管理:浅水活棵立苗,促进分蘖发生;提早轻度搁田,以水带肥,促进根系向土层伸展;拔节至抽穗期实行湿润灌溉,满足水稻生理需水,增强根系活力,以上栽培措施的实施有利于提高抛秧稻的抗倒伏能力。

张洪程等^[23]研究认为抛秧稻地上部具有较大的生长规模,特别是带土直立苗、带土倾斜苗。本研究中带土直立苗、带土倾斜苗各生育阶段氮素吸收速率显著或极显著高于带土平躺苗、无土平躺苗,且有着较高的穗后氮素净贡献率,这是它生长量大的一个主要原因。叶绿素含量的下降可作为水稻后期衰老的指标之一^[24],后期的剑叶 SPAD 值和吸氮速率表现出一致趋势,带土平躺苗、无土平躺苗后期的剑叶 SPAD 值衰减快,表明后期叶片衰老快。这主要因为带土直立苗、带土倾斜苗、无土直立苗生育后期具有较强的根系活性,较强的养分吸收能力,而带土平躺苗、无土平躺苗根系分布浅,后期吸收养分、水分能力弱于带土直立苗、带土倾斜苗和无土直立苗,因而后期衰老快。

参考文献:

[1] 张洪程,戴其根,钟喜明,等. 抛栽水稻产量形成及其生态特征的研究. 中国农业科学, 1993, 26(3): 39-49.

[2] 戴其根,张洪程,苏宝林,等. 抛秧水稻生长发育与产量形成的生态生理机制: I. 活棵立苗及其生态生理特点. 作物学报, 2001, 27(3): 278-285.

[3] 戴其根,许轲,张洪程,等. 抛秧水稻生长发育与产量形成

的生态生理机制: III. 秧苗地面水平面上的分布格局及其生态生理效应. 作物学报, 2001, 27(6): 802-810.

[4] 戴其根,张洪程,霍中洋,等. 抛秧稻生长发育特征及产量形成规律的探讨. 江苏农业研究, 2000, 21(1): 1-7.

[5] 张洪程,戴其根,霍中洋,等. 中国抛秧稻作技术体系及其特征. 中国农业科学, 2008, 41(1): 43-52.

[6] 吴建富,王海辉,潘晓华. 影响杂交早稻免耕抛栽立苗的几个因素. 江西农业大学学报, 2005, 27(6): 811-815.

[7] 郭保卫,陈厚存,张春华,等. 水稻抛栽秧苗立苗中的形态与生理变化. 作物学报, 2010, 36(10): 1715-1724.

[8] 徐世宏,江立庚,李如平,等. 免耕抛栽水稻的根系生长与立苗特性. 杂交水稻, 2006, 21(Suppl 1): 26-28.

[9] 洪晓富,蒋彭炎,徐海沙,等. 早稻盘育机械抛秧立苗环境与立苗过程的研究. 浙江农业科学, 1998(2): 51-53.

[10] 吴建富,潘晓华,石庆华. 免耕抛秧稻的立苗特性与立苗技术研究. 作物学报, 2009, 35(5): 930-939.

[11] 戴其根,霍中洋,张洪程,等. 抛秧水稻生长发育与产量形成的生态生理机制: II. 秧苗田间垂直分布格局及其生态生理效应. 作物学报, 2001, 27(5): 600-611.

[12] 张洪熙,徐卯林,黄年生,等. 水稻早育抛秧立苗技术途径. 江苏农业学报, 2000(4): 197-203.

[13] 刘永霞,岳延滨,刘岩,等. 水稻单株产量与根系主要几何属性的定量关系. 江苏农业学报, 2010, 26(3): 456-461.

[14] 许明,贾德涛,马殿荣,等. 粳稻根系性状与植株产量及其构成因素的关系. 河南农业科学, 2010(10): 14-18.

[15] 樊剑波,沈其荣,谭炯壮,等. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异. 生态学报, 2009, 29(6): 3053-3056.

[16] 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.

[17] 李如平,唐茂艳,杨为芳,等. 稻草还田免耕抛秧稻的立苗与根系生长以及对产量的影响. 杂交水稻, 2006, 21(Suppl 1): 96-99.

[18] 郭保卫,张春华,魏海燕,等. 抛秧物理立苗对水稻生长的影响及其调控因素的研究. 中国农业科学, 2010, 43(19): 3945-3953.

[19] 张洪熙,张宝群,孔祥斗,等. 化学药物处理大苗抛秧技术研究及其应用. 江苏农业科学, 1990(4): 1-5.

[20] 赵步洪,张洪熙,徐卯林,等. 水稻早育抛秧壮根立苗技术途径的探讨. 江苏农学院学报, 1996, 17(2): 17-20.

[21] 吴建富,潘晓华,王璐,等. 免耕抛栽水稻的根系特性初步研究. 杂交水稻, 2009, 24(3): 68-71.

[22] 戴其根,张洪程,苏宝林. 水稻抛秧栽培若干关键技术与理论研究进展. 耕作与栽培, 1998(5): 63.

[23] 张洪程,戴其根,邱枫,等. 抛秧稻产量形成的生物学优势及高产栽培途径的研究. 江苏农学院学报, 1998, 19(3): 11-17.

[24] 丁四兵,朱碧岩,吴冬云,等. 温光对水稻抽穗后剑叶衰老和籽粒灌浆的影响. 华南师范大学学报:自然科学版, 2004(1): 117-121.