

柯希欢, 李霞, 仲维功, 等. 栽插苗数对 4 个高产粳稻品种冠层、生理指标和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 16-26.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.01.003

# 栽插苗数对 4 个高产粳稻品种冠层、生理指标和产量的影响

柯希欢, 李霞, 仲维功, 范方军

(江苏省农业科学院粮食作物研究所/江苏省优质水稻工程技术研究中心, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 以水稻品种南粳 45、南粳 49、南粳 94140 和淮稻 5 号为材料, 研究了不同栽插苗数对粳稻冠层光合参数和产量的影响。结果表明: 南粳 49 和淮稻 5 号在 2~4 株/穴时能够获得较高产量, 而在 5 株/穴时, 产量显著下降; 南粳 45 和南粳 94140 在不同栽插苗数下均获得稳定产量。南粳 49 在较低栽插苗数下获得高产是由于有较多的每穗粒数、较大的叶基角、较高的 PS II 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 以及花后不同时期较多的干物质累积; 而淮稻 5 号则还具有较多有效穗数以及生育后期较大叶面积。南粳 45 和南粳 94140 是通过其冠层叶基角、光拦截以及最大光化学效率的适应调节, 从而达到每穗粒数、千粒质量以及结实率等产量构成因子之间相互协调。说明, 供试水稻品种均是具有较强群体调控能力的高产水稻品种类型, 栽插密度对其产量的影响均与其高产群体配置和个体的生理功能密切相关, 其中南粳 49 和淮稻 5 号在 2~4 株/穴栽插密度下有利于产量潜力的发挥, 而南粳 45 和南粳 94140 对不同的栽插苗数有较大的适应能力, 产量表现稳定。

**关键词:** 粳稻; 栽插苗数; 净光合速率; 冠层生长; 干物质积累; 产量

**中图分类号:** S511.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)01-0016-11

## Effects of planting density on canopy, physiological index and yield performances of four high-yielding japonica rice varieties

KE Xi-huan, LI Xia, ZHONG Wei-gong, FAN Fang-jun

(Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu High Quality Rice Engineering Technology Research Center, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Using four high-yielding rice varieties (Nanjing 45, Nanjing 49, Nanjing 94140, Huaidao 5) as experimental materials, four different planting densities (2, 3, 4, 5 seedlings per hill) were set to study the effects of different planting densities on rice canopy, photosynthetic indexes and yield. The results showed that Nanjing 49 and Huaidao 5 achieved high yield at 2 to 4 seedlings per hill, and the yield at 5 seedlings per hill decreased markedly. The yields of Nanjing 45 and Nanjing 94140 were kept stable at different planting densities. Nanjing 49 could achieve higher yield at lower planting seedlings due to more spikelet per panicle, larger leaf base angle, higher  $F_v/F_m$  and more dry matter after flowering while for Huaidao 5, it was resulted from more effective panicle, more spikelet per panicle, larger leaf area at late growth

stage higher  $F_v/F_m$ , and more dry matter after flowering. Nanjing 45 and Nanjing 94140 realized the intercoordination between spikelet per panicle, 1000-grain weight and seed-setting rate through the adaptive regulation of leaf base angle of canopy, light intensity and the maximum  $F_v/F_m$  to keep stable production. It is indicated that as rice varieties capable of population regulation, the yield influenced by planting density was closed related to the population structure and individual plant physiological function. The density of 2-4 plants per hill for Nan-

收稿日期: 2015-05-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31371554, 31571585); 国家科技支撑计划重大项目 (2011BAD16B03); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX (14)5004]

**作者简介:** 柯希欢 (1989-), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要从事水稻生理栽培研究。 (E-mail) 826976550@qq.com

**通讯作者:** 李霞 (E-mail) jspllx@jaas.ac.cn; 1779119573@qq.com

jing 49 and Huaidao 5 is in favor of the yield potential. Nanjing 45 and Nanjing 94140 owns great adaptions to different planting densities.

**Key words:** japonica rice; planting density; net photosynthetic rate; canopy growth; dry weight accumulation; yield

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,为世界上50%以上的人口提供食物和营养<sup>[1]</sup>。水稻种植面积约占粮食总面积的30%,总产量占粮食总产量的40%<sup>[2]</sup>。据预测,到2030年中国人口将达到16亿,粮食作物综合生产能力需提高55%才能基本满足吃饭之需<sup>[3]</sup>。在新增粮食产量中,水稻将占40%以上<sup>[4]</sup>。由于受水资源和耕地面积的限制,加上经济发展和城市化的推进,不少产稻国家水稻种植面积增加的空间有限,为此,今后进一步提高产量的途径将主要依赖于单位面积产量的提高。而实现这一目标的途径主要有二,一是改进栽培条件和技术,二是选育产量潜力比现有品种更高的水稻品种<sup>[4]</sup>。合理密植是水稻高产优质栽培的重要策略之一<sup>[5]</sup>。水稻合理密植包括合理的每蔸基本苗数、单位面积蔸数和行株距配置方式3个部分<sup>[6]</sup>。前人就不同种植密度对水稻产量以及农艺性状的影响已做了不少研究,但是得出的结果却不尽相同。如潘圣刚等发现扬两优6号的种植密度显著影响了单位面积有效穗和产量,密度越大则单位面积有效穗和产量越高<sup>[7]</sup>。而郑克武认为两优培九在不同的栽插密度下,成穗率、结实率及千粒质量波动不大,主要影响有效穗数和每穗粒数,但是产量则没有受到显著影响<sup>[8]</sup>。而采用强化栽培技术的研究结果表明:不同栽插行距的超级稻是通过有效的群体和强的光合能力来实现高产<sup>[9]</sup>。可见,不同品种水稻的生长发育特性有差异,针对某一特定品种有必要研究不同的栽培措施,以便发挥其产量潜力<sup>[10]</sup>。近年来的研究多从控制行株距的配比上来分析栽插密度对水稻种植的影响<sup>[11-14]</sup>,本研究进一步研究每穴不同栽插苗数对水稻冠层生长动态、冠层特性、生理指标以及产量表现,旨在明确最近选育的高产品种适宜栽培密度,为其推广和应用提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

以4个高产粳稻品种南粳45、南粳49、南粳94140和淮稻5号为材料。南粳45是以中粳315/盐334-6/武运粳8号配组杂交,经过连续6代的选

择,于2003年由江苏省农业科学院粮食作物研究所育成<sup>[15]</sup>;南粳49是以镇稻42///盐引/9707//72036/武运粳8号配组杂交,经过连续多代人工与分子标记辅助选择,于2007年由江苏省农业科学院粮食作物研究所育成<sup>[16]</sup>;南粳94140是以扬粳201/盐稻8号杂交选育于2009年,由江苏省农业科学院粮食作物研究所育成<sup>[17]</sup>;淮稻5号由江苏省徐淮地区淮阴市农科所用复交材料7208/武育粳3号杂交选育而成<sup>[18]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验于2013年在江苏省农业科学院实验大田进行,土壤质地为黄棕壤土,试验前取土样,其土壤理化性质由江苏省农业科学院食品检测研究所测定,pH值6.20,有机质2.45%,全氮0.12%,速效氮85.1 mg/kg,有效磷13.0 mg/kg,有效钾91.6 mg/kg。水稻于5月10日播种,6月10日人工移栽至大田。栽插基本苗设置4个处理,分别为2株/穴(T2)、3株/穴(T3)、4株/穴(T4)、5株/穴(T5),株行距为13.3 cm×25.0 cm,3次重复,随机区组排列。每个小区20.0 m<sup>2</sup>,另外在外围栽种5行保护行,常规水肥管理。试验田块的保水力较强,排灌方便,氮肥用量(尿素,含氮量46.4%)525 kg/hm<sup>2</sup>,分3次施入,即移栽后7 d施60%,移栽后15 d施20%,孕穗期施20%;磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)225 kg/hm<sup>2</sup>作基肥1次施入;钾肥用量(氯化钾,K<sub>2</sub>O含量60%)525 kg/hm<sup>2</sup>,分2次施入,即移栽后7 d施50%,7月中旬施50%。

### 1.3 测定内容与方法

在分蘖期、拔节期和开花后分别测定植株的不同冠层形态指标和生理指标。并按照金磊等<sup>[19]</sup>的方法,在成熟期考察小区产量及产量构成。

**1.3.1 净光合速率( $P_n$ )的测定** 采用美国生产的LI-6400便携式光合测定仪,开放系统,选取红蓝光作为内置光源,光量子通量密度(PPFD)设定为800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,流速设为500  $\mu\text{mol}/\text{s}$ ,叶室温度为25℃,分别测定分蘖期、拔节期和开花后10 d等3个时期的叶片 $P_n$ ,在分蘖期和拔节期选取倒2叶为测定叶片,而在开花后10 d选取剑叶作为测定叶片,每小区测定3穴水稻,测定时间选为天气晴朗时

的上午8:00—11:00<sup>[20-21]</sup>。

**1.3.2 分蘖数的测定** 在分蘖盛期、开花期和成熟期选取不同田块的相对位置一致的区域,每小区调查8穴分蘖数。

**1.3.3 叶基角的测定** 叶基角指的是叶片与茎秆的夹角<sup>[22]</sup>。在自然状态下,测定时间选在开花期,每小区测定3穴水稻,测定叶位为倒1叶、倒2叶和倒3叶。

**1.3.4 叶面积的测定** 将长宽系数法<sup>[23]</sup>和叶质量法<sup>[24]</sup>结合起来,用于测定水稻叶片叶面积。从同一小区取出3穴水稻,从这3穴水稻中的3个单蘖中取出5片倒2叶,用长宽系数法(水稻的系数为0.75)分别测定叶片的叶面积,并同时测定相应的叶质量,然后用叶质量除以与之对应的叶面积,即得到叶质重,取叶片叶质重的平均值作为这一小区的参考值,进而求出所选小区单穴的叶面积。

**1.3.5 干物质累积的测定** 从开花0 d开始,每隔7 d,每小区分别取3穴水稻(地上部分),再将每穴的地上部分分为茎鞘、叶和穗3部分,用报纸包好并做好相应的标签。置于烘箱中105℃杀青30 min,然后将温度调到80℃烘至恒定质量,分别称量干质量,并计算相对生长速率(Relative growth rate)<sup>[25]</sup>。取代表性植株10穴,测定从植株基部齐泥到穗顶的高度为植株的株高。每小区调查30穴有效穗,并计算每穴平均穗数,以平均有效穗数为标准。在小区不同区域取株高和有效穗有代表性的10穴测定其穗长、每穗粒数、结实率,分小区实收,单独脱粒晒干并风选后,称干谷质量,同时测定干谷水分含量,计算折合含水量为14.5%(粳稻)的稻谷产量,并从测产的样本中取样,测定千粒质量。

**1.3.6 水稻冠层太阳辐射截获率的测定** 在开花后10 d,采用英国Delta公司生产的Sunscan冠层分析系统,分别测定水稻冠层不同叶位的光强,设置叶片最上层(即地面上91 cm)、叶片中层(即地面上57 cm)以及叶片下层(即地面上23 cm)。冠层太阳辐射截获率(%) = 冠层截获的太阳辐射量/穗顶部太阳辐射总量×100%,计算光强拦截率<sup>[26]</sup>,每小区都选取3个相对位置一致的位点来测量。

**1.3.7 叶绿素荧光参数的测定** 叶绿素荧光的测定及数据处理用Handy-PEA连续激发式荧光仪(Hansatech, UK)活体测量快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P荧光诱导曲线),在灌浆期上午

9:00—10:00选择不同处理的水稻剑叶为测试对象,叶片在测定前暗适应20 min,然后暴露在饱和脉冲光下 $[3\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,测得最大光化学效率 $F_v/F_m$ ,每小区测定6次<sup>[27]</sup>。

## 1.4 统计分析

用SPSS 19.0软件,通过单因素方差分析Duncan检验来分析数据的差异显著性和Pearson系数参数的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 栽插苗数对水稻产量以及产量构成因子的影响

由表1可知,4个供试粳稻品种随着穴内栽插苗数的增加,产量呈下降趋势。其中南粳49和淮稻5号2株/穴的产量显著高于5株/穴的产量,2株/穴、3株/穴和4株/穴的产量则没有显著差异;南粳45和南粳94140在不同穴数产量表现稳定。

进一步分析不同栽插苗数下供试材料的产量构成因子,随着栽插密度的增加,4个品种的株高均没有显著变化;而对于有效穗数,南粳45、南粳94140和淮稻5号则变化不显著,而南粳49则显著增加;对于每穗粒数则均随栽插苗数的增加而下降,但不同品种下降的程度不同,大穗型材料南粳49下降显著,而其他3个品种则略微下降;对于千粒质量和结实率而言,除了南粳49保持不变,其他材料均随栽插苗数的增加而增加。总的来说,4个供试水稻品种产量在不同栽插苗数间没有表现出显著差异,均具有较好的适应性,但是不同品种适应的机制有差异,其中南粳45、南粳94140和淮稻5号主要通过增加千粒质量和结实率,来缓解增加栽插苗数对每穗粒数降低的补偿,而南粳49每穗粒数超过120粒,是大穗型品种类型,增加栽插密度降低了其每穗粒数,它则通过增加有效穗数来抵消每穗粒数的大幅减少,在每穴2~4株时,均没有表现产量的显著下降,只有在每穴5株时,产量表现下降。

### 2.2 栽插苗数对水稻分蘖数的影响

分蘖是影响水稻穗数进而影响其产量的重要农艺性状之一,其发生状况是水稻个体健壮过程的一个重要指标<sup>[28]</sup>。由图1可知,4个供试水稻品种随着生育期的变化分蘖数都表现出先增加后减少的规律。进一步从图2看出,增加栽插苗数并没有显著增加供试材料的单株有效穗数,尤其对于单株有效

表 1 不同栽插苗数对供试水稻产量及产量构成因子的影响

Table 1 Effects on yield and yield components of 4 rice varieties under different planting densities

水稻品种	栽插密度 (株/穴)	株高 (cm)	有效穗数 (个/穴)	每穗粒数 (粒/穴)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	实际产量 (t/hm <sup>2</sup> )
南粳 45	2	106.2 ± 1.5a	10.2 ± 1.0a	112 ± 10a	81.9 ± 3.1b	25.1 ± 0.2b	11.74 ± 0.31a
	3	108.2 ± 2.5a	10.3 ± 0.5a	116 ± 15a	82.0 ± 2.0b	24.6 ± 0.3b	11.45 ± 0.25a
	4	107.9 ± 1.5a	9.7 ± 0.8a	106 ± 14a	86.0 ± 2.1a	26.8 ± 0.2a	11.18 ± 0.92a
	5	108.4 ± 1.6a	10.8 ± 1.2a	94 ± 15b	83.9 ± 2.1ab	26.1 ± 0.2a	11.05 ± 0.80a
南粳 49	2	105.3 ± 0.6a	9.7 ± 0.4b	159 ± 11a	87.0 ± 4.0a	25.6 ± 0.2a	12.63 ± 0.65a
	3	105.4 ± 4.9a	12.1 ± 0.3a	144 ± 8b	87.6 ± 2.1a	25.4 ± 0.3a	11.95 ± 0.16ab
	4	106.3 ± 2.9a	11.0 ± 0.4ab	136 ± 7b	87.3 ± 3.2a	25.5 ± 0.4a	12.00 ± 0.61ab
	5	108.4 ± 2.8a	12.0 ± 0.5a	124 ± 9c	88.6 ± 4.0a	25.2 ± 0.5a	11.27 ± 0.73b
南粳 94140	2	105.3 ± 1.2a	11.2 ± 2.6a	109 ± 11a	80.9 ± 2.1b	24.9 ± 0.3b	12.24 ± 0.54a
	3	107.1 ± 2.7a	11.5 ± 1.0a	118 ± 16a	87.0 ± 1.0a	26.4 ± 0.2a	12.25 ± 0.59a
	4	106.5 ± 2.3a	10.8 ± 0.8a	91 ± 20b	86.0 ± 2.0a	26.3 ± 0.3a	12.32 ± 0.39a
	5	109.6 ± 3.1a	11.7 ± 1.4a	97 ± 15b	80.4 ± 2.1b	25.8 ± 0.4ab	11.59 ± 0.50a
淮稻 5 号	2	104.5 ± 0.9a	13.0 ± 0.6a	101 ± 18a	89.0 ± 2.0ab	24.6 ± 0.2b	12.48 ± 0.65a
	3	105.2 ± 1.1a	11.0 ± 0.9b	91 ± 16b	82.9 ± 4.1b	24.0 ± 0.4b	11.95 ± 0.45ab
	4	107.0 ± 3.5a	12.0 ± 0.9ab	84 ± 10b	96.9 ± 1.1a	25.4 ± 0.5ab	11.82 ± 0.56ab
	5	106.9 ± 3.6a	12.0 ± 1.3ab	94 ± 18ab	94.5 ± 3.0a	26.2 ± 0.2a	11.04 ± 0.74b

同一列中不同小写字母表示同一品种在 0.05 水平上差异显著。

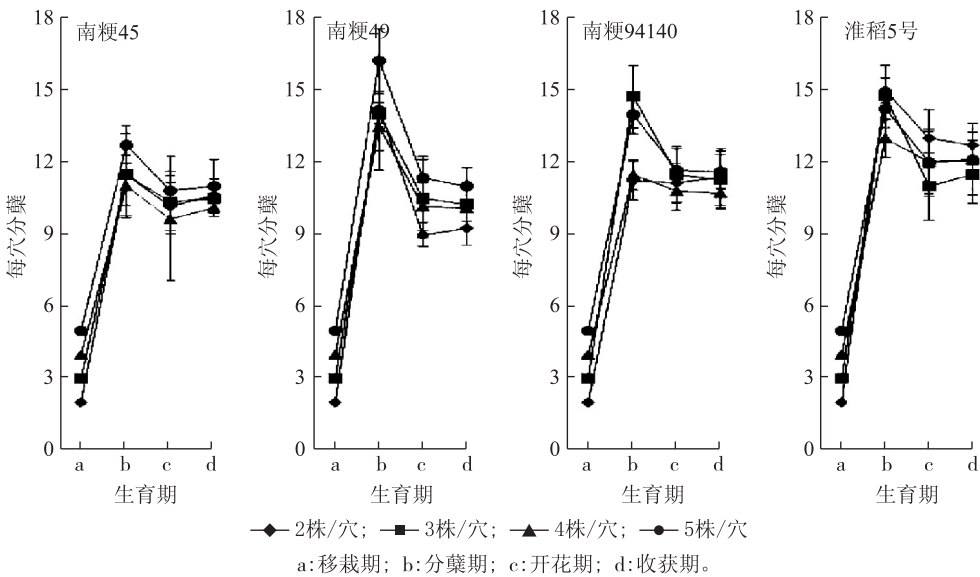


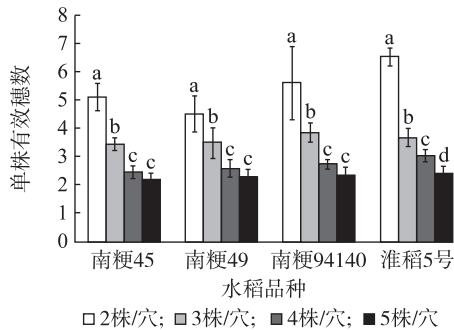
图 1 不同栽插苗数下供试水稻不同时期每穴分蘖数

Fig.1 Tiller number per hill of four rice varieties at different developmental stages under different planting densities

穗数最高的淮稻 5 号,增加栽插苗数明显抑制了单株的成穗率。其中南粳 49 在分蘖期的分蘖数最高,

但是最后决定产量的单株有效穗数却是淮稻 5 号的最高,成穗率实际上是南粳 45 最高,南粳 49 在分蘖





不同小写字母表示同品种不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图 2 不同栽插苗数下供试水稻单株有效穗数

Fig.2 Effective spike number of per plant of four rice varieties under different planting densities

期产生了较多的无效分蘖,并没有贡献于最后的产量。

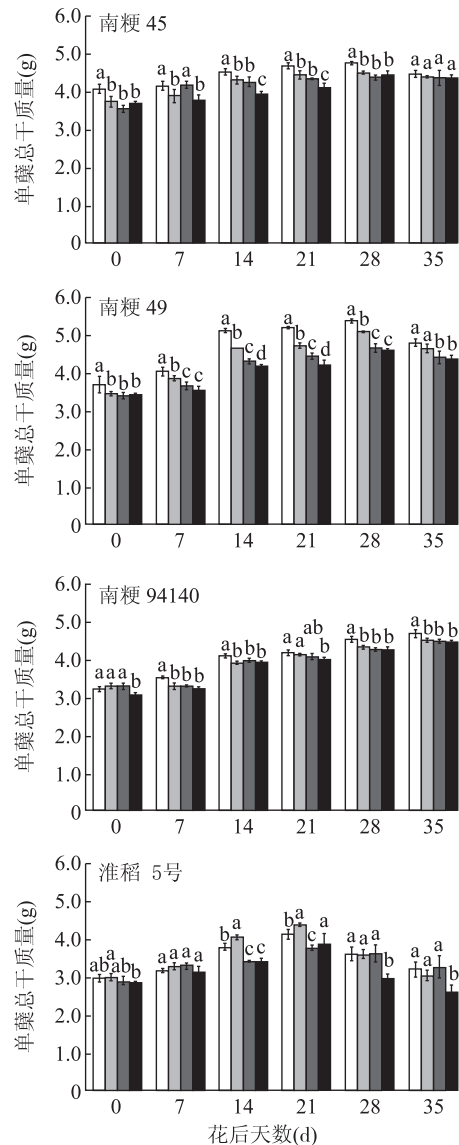
### 2.3 栽插苗数对水稻叶片叶面积的影响

抽穗后有较大的光合面积是获得水稻高产的保证<sup>[29]</sup>。由图 3 可知,4 个供试水稻品种花后不同时期的叶面积都随生育期的后延表现出逐渐下降的趋势,但各个品种在不同栽插苗数处理下的表现又有所差异,其中不同栽插苗数对南梗 45 和南梗 94140 单穴叶面积影响不大,花后各个时期叶面积没有显著差异。但是对于南梗 49,增加栽插苗数,则显著增加了其叶面积,淮稻 5 号在开花后 28 d 以后,则每穴 5 株密度的叶面积随叶片的衰老而显著下降,可推测,南梗 49 通过增加叶面积来维持高密度栽插苗数对群体构成的影响,保持强源(绿叶面积)从而缓解有效穗数的降低,而淮稻 5 号则可能以牺牲叶面积来维持有效穗率的稳定,可见不同品种对栽插密度的适应机制并不相同。

### 2.4 不同栽插苗数对水稻叶基角和光强分布的影响

已有研究结果表明:倒 1 叶、倒 2 叶和倒 3 叶等功能叶是水稻产量的主要贡献者<sup>[30]</sup>。叶基角的大小和动态直接影响作物对冠层光的截获。由表 2 可以看出,栽插密度对倒 3 叶片的叶基角影响较大,随着栽插密度的增加,叶基角变小,而对其他叶位的影响不大。4 个品种中,南梗 49 的倒 1 叶、倒 2 叶和倒 3 叶的叶基角均较大,是一个相对披散的株型。

水稻冠层的光能截获率与光合生产潜力密切相关,群体结构良好的水稻光能截获率相对高。由表 3 可知,从光能截获的特点看,南梗 45 和南梗 49 的



A: 南梗 45; B: 南梗 49; C: 南梗 94140; D: 淮稻 5 号。

□: 2 株/穴; □: 3 株/穴; ■: 4 株/穴; ■: 5 株/穴。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达 0.05 水平显著。

图 3 不同栽插苗数下供试水稻花后不同时期单穴叶面积

Fig.3 Leaf area per hill of four rice varieties at different stages under different planting densities

冠层相对光强类似,而南梗 94140 和淮稻 5 号的冠层相对光强类似。而不同叶层对栽插密度的表现也不同。对于倒 2 叶,随着栽插密度的增加,截获光能的比例增加,而倒 3 叶截获光能的比例则下降,值得注意的是南梗 45 和南梗 49 虽然倒 3 叶的叶基角不同,但是叶片的相对截获能力却类似。可见,不同高产品种可通过调节叶基角,提高高密度栽培条件下叶片的受光特性,使其具有较宽泛的栽插密度区间。

表 2 不同栽插苗数对水稻叶基角的影响

Table 2 Effect of planting densities on leaf base angle of four rice varieties

水稻品种	栽插密度 (株/穴)	叶基角(°)		
		倒 1 叶	倒 2 叶	倒 3 叶
南粳 45	2	4.4 ± 0.5a	11.0 ± 0.7a	11.4 ± 2.2ab
	3	5.3 ± 0.8a	10.5 ± 0.8a	12.5 ± 0.5a
	4	4.7 ± 1.2a	11.2 ± 0.4a	12.7 ± 1.8a
	5	5.6 ± 0.9a	11.4 ± 0.5a	10.0 ± 1.2b
南粳 49	2	9.3 ± 2.1a	14.2 ± 1.0ab	13.3 ± 1.5ab
	3	8.5 ± 2.2ab	15.3 ± 1.9a	14.5 ± 1.7a
	4	7.5 ± 1.0ab	11.8 ± 0.4c	12.8 ± 1.7ab
	5	6.2 ± 0.4b	13.0 ± 1.0bc	12.6 ± 1.5b
南粳 94140	2	4.7 ± 0.5a	9.1 ± 0.4b	9.7 ± 0.5b
	3	5.7 ± 0.5a	10.7 ± 1.2a	12.0 ± 1.8a
	4	5.8 ± 0.4a	10.4 ± 1.3a	11.8 ± 1.8a
	5	4.2 ± 0.4a	9.6 ± 0.5ab	10.8 ± 1.3ab
淮稻 5 号	2	5.0 ± 0.8ab	10.0 ± 0.8a	13.3 ± 0.5a
	3	6.2 ± 0.4a	10.7 ± 0.5a	11.3 ± 0.5b
	4	4.9 ± 0.7ab	11.0 ± 0.5a	10.4 ± 0.8b
	5	4.1 ± 0.7b	10.6 ± 1.9a	8.1 ± 0.7c

同一列中不同小写字母表示同一品种在 0.05 水平上差异显著。

2.5 栽插苗数对水稻功能叶片光合能力的影响

水稻的产量最终来自于光合产物的积累和分配,尤其是抽穗后的光合作用<sup>[31]</sup>。在良好株型的基础上,进一步提高单叶的光合速率,则可进一步提高光合产物的累积。由图 4 可以看出不同栽插苗数、不同生育期供试水稻功能叶片的净光合速率存在差异,在分蘖期 4 个供试水稻品种都表现出在 2 株/穴时有最大净光合速率;在孕穗期,南粳 49、南粳 94140 和淮稻 5 号在较低栽插苗数下均有较大净光合速率,但是南粳 45 却相反;在灌浆期,南粳 94140 和淮稻 5 号表现为在较高栽插苗数下有较大净光合速率。但南粳 45 不同时期不同栽插密度对其功能叶片的净光合速率影响不显著;而其他 3 个材料则表现随生育期的成熟,以及对有效穗数的最后确定,群体减少了无效分蘖,孕穗期特别是灌浆期的功能叶片随栽插苗数的增加而净光合速率显著增加,但是南粳 49 在灌浆期时,其每穴 5 株时功能叶片的净光合速率与其他穴数处理的持平,没有表现增加。

PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )反映了 PS II 反应

表 3 不同栽插苗数对水稻花后 14 d 群体冠层相对光强的影响

Table 3 Effect of planting densities on relative light intensity of four rice canopies

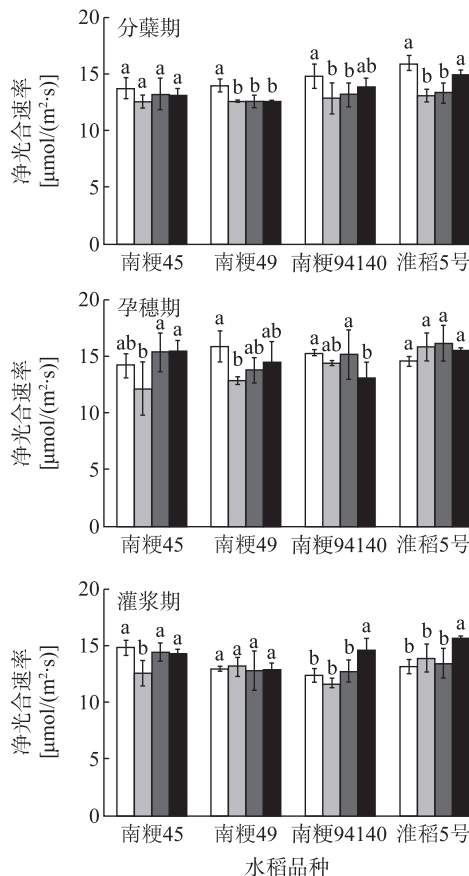
水稻品种	栽插密度 (株/穴)	上层 相对光强 (%)	中层 相对光强 (%)	下层 相对光强 (%)
南粳 45	2	100.00	43.56 ± 2.93bc	16.49 ± 0.47ab
	3	100.00	40.01 ± 3.92c	13.64 ± 1.13b
	4	100.00	51.82 ± 0.95a	15.08 ± 4.41b
	5	100.00	49.17 ± 3.04ab	20.09 ± 2.58a
南粳 49	2	100.00	37.36 ± 5.53b	14.34 ± 3.08b
	3	100.00	39.51 ± 7.10b	13.93 ± 3.47b
	4	100.00	51.22 ± 3.84a	17.05 ± 4.60ab
	5	100.00	47.97 ± 5.14a	20.41 ± 1.07a
南粳 94140	2	100.00	41.36 ± 2.03a	14.79 ± 0.49a
	3	100.00	42.51 ± 3.19a	13.50 ± 1.61ab
	4	100.00	41.70 ± 2.21a	11.91 ± 1.33ab
	5	100.00	37.11 ± 1.59a	9.45 ± 2.75b
淮稻 5 号	2	100.00	39.62 ± 2.42a	12.85 ± 1.89ab
	3	100.00	37.96 ± 2.81a	13.15 ± 0.39a
	4	100.00	41.91 ± 2.31a	13.07 ± 2.56a
	5	100.00	41.45 ± 1.23a	8.83 ± 2.56b

同一列中不同小写字母表示同一品种在 0.05 水平上差异显著。

中心内原初光能转化效率<sup>[32]</sup>,是植物遭受逆境胁迫的重要生理指标。由图 5 可知,4 个供试水稻品种在灌浆期都表现出在较低栽插苗数下有较大的  $F_v/F_m$ 。其中南粳 45 在 2 株/穴、3 株/穴时的  $F_v/F_m$  显著要高于 4 株/穴和 5 株/穴;南粳 49 在 3 株/穴的  $F_v/F_m$  显著要高于 5 株/穴,2 株/穴、3 株/穴和 4 株/穴间  $F_v/F_m$  没有显著差异;南粳 94140 不同栽插苗数间叶片的  $F_v/F_m$  没有显著差异;淮稻 5 号 3 株/穴的  $F_v/F_m$  最高,显著要大于 5 株/穴,其他密度没有显著差异,可见淮稻 5 号虽然功能叶片的净光合速率在每穴 5 株时最大,但是其相应的  $F_v/F_m$  则较低,表明其对逆境的适应能力有限,结合其叶面积在生育后期也衰减明显,因此,其最终的产量在每穴 5 株并没有表现优势,而是显著下降,提示水稻品种对逆境的适应能力,也是关系到水稻稳产的重要方面。

2.6 栽插苗数对水稻干物质累积的影响

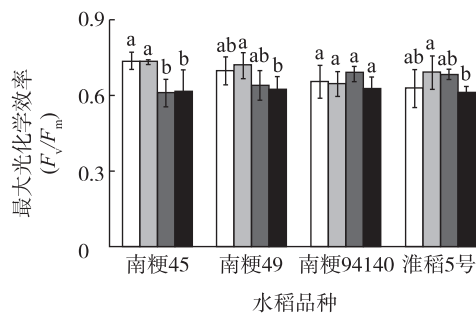
干物质生产和积累是水稻获得高产的物质基础,尤其是抽穗后的干物质是籽粒灌浆所需要的主要营养物质,水稻产量形成的过程,实质上是光合干



□:2株/穴;▨:3株/穴;▤:4株/穴;■:5株/穴。不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达0.05水平显著。

图4 不同生育期不同栽插苗数下水稻净光合速率

Fig.4 Net photosynthetic rate of four rice varieties at different developmental stages under different planting densities

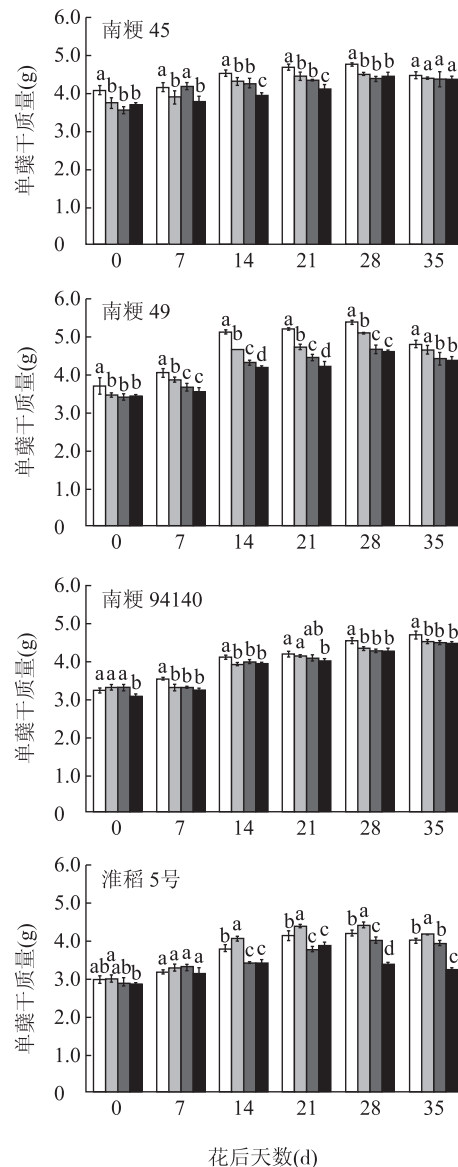


□:2株/穴;▨:3株/穴;▤:4株/穴;■:5株/穴。不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达0.05水平显著。

图5 不同栽插苗数对水稻灌浆期叶片最大光化学效率的影响

Fig.5 The maximum photochemical efficiency of four rice varieties under different planting densities during filling stage

水稻单穗的干物质在花后不同天数均表现单峰,在生育后期达到最大,不同栽插苗数对单穗干物质的影响因品种而异,南粳45和南粳94140随栽插密度的增加则变化不显著(图6A和6C),南粳49则表现随栽插密度增加,干物质下降,处理间差异显著(图6B),而淮稻5号每穴2株、每穴3株、每穴4株差异不显著,而每穴5株则比其他栽插密度显著下降(图6D),可见干物质的累积特点与其群体和单叶的光合能力表现是一致的。



□:2株/穴;▨:3株/穴;▤:4株/穴;■:5株/穴。不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达0.05水平显著。

图6 供试水稻花后不同时期单个分蘖干物质的累积

Fig.6 Total dry matter accumulation in a single tiller of four rice varieties at different stages after flowering

物质生产与分配的过程<sup>[33]</sup>。由图6可知,4个供试

进一步分析栽插密度对花后不同天数水稻品种相对生长速率的影响(表4),从表4可以看出,花后14 d 是水稻生长速率最大的时期。随着栽插密度的增加,生长速率呈下降趋势,其中该时期生长最快的品种是南粳49;但随着叶片的成熟,生长速率显著下降,其中花后21 d,淮稻5号的生长速率最大;而在花后28 d后,南粳49和南粳94140还保持一

定的生长速率,南粳45的生长速率则基本保持不变,但是淮稻5号在每穴5株时,已经出现显著的负增长,生长衰减明显;在开花后35 d 只有南粳94140仍然保持一定的生长速率,其他3个品种均呈现负增长,其中南粳49衰减最快,可见,生长速率的特点与群体和生理的特征表现类似。

表4 水稻花后不同时期相对生长速率  
Table 4 The relative growth rate of four rice varieties after flowering

品种	栽稻密度 (株/穴)	相对生长速率 (g/d)				
		花后7 d	花后14 d	花后21 d	花后28 d	花后35 d
南粳45	2	0.011 9±0.000 5e	0.053 8±0.002 0d	0.022 9±0.001 0d	0.010 0±0.000 4f	-0.041 0±0.001 1
	3	0.021 9±0.000 9d	0.058 6±0.002 9d	0.017 6±0.000 8d	0.009 5±0.000 4f	-0.014 8±0.000 7
	4	0.090 5±0.004 5a	0.011 0±0.000 5g	0.010 0±0.004 0e	0.007 1±0.000 2g	-0.001 4±0.000 1
	5	0.010 5±0.000 5e	0.024 3±0.001 1f	0.022 9±0.001 0d	0.047 6±0.002 1c	-0.010 0±0.000 1
南粳49	2	0.049 0±0.002 4c	0.151 4±0.007 5a	0.011 9±0.000 5e	0.026 7±0.001 3d	-0.081 9±0.000 7
	3	0.055 2±0.002 5b	0.115 2±0.005 0b	0.008 1±0.000 4f	0.050 9±0.002 5b	-0.061 9±0.001 1
	4	0.034 3±0.001 7c	0.097 1±0.004 8b	0.017 1±0.000 8e	0.030 5±0.001 5d	-0.035 2±0.001 1
	5	0.013 3±0.000 6e	0.091 9±0.004 4b	0.004 3±0.000 2g	0.055 7±0.002 1b	-0.031 9±0.000 8
南粳94140	2	0.043 3±0.002 0c	0.083 3±0.004 1c	0.011 9±0.000 5e	0.051 9±0.002 0b	0.020 0±0.000 4
	3	0.001 4±0.000 1e	0.087 1±0.004 1c	0.032 4±0.001 5c	0.028 1±0.001 1d	0.025 2±0.000 1
	4	0.001 4±0.000 1e	0.096 7±0.004 8b	0.014 3±0.000 7e	0.028 1±0.001 1d	0.030 5±0.001 5
	5	0.020 0±0.009 0d	0.101 4±0.004 0b	0.012 4±0.000 6e	0.034 3±0.001 6c	0.030 0±0.001 0
淮稻5号	2	0.027 6±0.001 3d	0.089 1±0.004 1c	0.049 0±0.002 0b	0.009 5±0.000 4a	-0.028 6±0.001 1
	3	0.041 0±0.002 0c	0.109 0±0.000 5b	0.047 6±0.002 3b	0.004 3±0.000 2h	-0.033 3±0.000 6
	4	0.058 1±0.002 9b	0.019 0±0.000 9b	0.049 1±0.002 1b	0.034 3±0.001 1d	-0.011 4±0.000 3
	5	0.041 9±0.002 0c	0.040 5±0.002 0e	0.054 8±0.002 6a	-0.062 9±0.002 5	-0.015 7±0.003 0

同一列中不同小写字母表示同一品种在0.05水平上差异显著。

2.7 水稻形态、生理指标和产量指标的相关性分析

由表5可知供试水稻在不同栽插苗数处理下,每穗粒数与倒3叶叶基角、花后35 d 穗干质量、花后35 d 总干质量呈显著正相关,说明增加栽插密度对倒3叶叶姿(叶基角)影响最显著,其中南粳49可通过加大该叶位的叶基角,使其冠层拦截更多的光能,并提高群体光能利用效率和单叶的光合能力,产生更多干物质累积,有利于保持产量稳定。

3 讨论

水稻冠层结构及产量形成受到品种和栽培措施等多种因素的综合影响<sup>[34]</sup>,而栽插密度是最基本的

栽培措施之一。因此,通过合理密植,塑造合理的群体结构,提高群体光能利用率,对提高作物产量具有重要意义。水稻群体和个体的发展既互相对立,又互相统一,要获得水稻高产优质,必须协调好两者的矛盾,使个体与群体的优势达到最大统一<sup>[35]</sup>。袁万臣等认为适宜的移栽密度能有效利用光能,充分利用地力,保证个体的正常发育和群体的协调发展,使单位面积上穗数、粒数和粒质量得到统一,从而获得高产<sup>[36]</sup>。而群体密度过大,栽培措施不当,会造成个体和群体矛盾激化<sup>[10]</sup>。本研究比较了4个高产粳稻品种不同时期形态、生理特性以及产量水平,结果表明:4个品种对栽插密度均有较好的适应性,其



表 5 供试水稻不同形态生理和产量指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between different morphological, physiological and yield parameters of four rice varieties

指标	有效穗数	每穗粒数	千粒质量	结实率	倒 3 叶 叶基角	下层 相对光强	最大光 化学效率	花后 35 d 穗干质量	花后 35 d 总干质量
产量	0.064	0.337	-0.271	-0.062	0.415	-0.207	0.403	0.193	0.423
有效穗数		-0.251	-0.208	0.459	-0.088	-0.232	-0.270	-0.479	-0.472
每穗粒数			-0.029	-0.091	0.665 **	0.296	0.299	0.813 **	0.569 *
千粒质量				0.236	-0.145	-0.093	-0.474	-0.074	-0.031
结实率					-0.105	-0.158	-0.154	-0.315	-0.641 **
倒 3 叶叶基角						0.252	0.353	0.746 **	0.558 *
下层相对光强							-0.171	0.536 *	0.394
最大光化学效率								0.286	0.306
花后 35 d 穗干质量									0.756 **

\* 表示显著相关; \*\* 表示极显著相关。

中较低栽插苗数,有利于叶片获得更多光能,提高单叶的光合能力,缓解开花后期叶片的衰老,增强干物质的累积,提高产量,说明较低栽插苗数可以优化水稻个体的质量而获得高产。影响水稻分蘖数的有自然条件、植物营养、植物激素以及遗传等因素<sup>[28,37]</sup>。水稻群体中无效分蘖死亡后其部分养分可以转移给有效分蘖,但其数量很有限,而且对有效分蘖形成竞争,成为影响个体正常发育、阻碍和限制后期群体光合作用的一个重要因素。因此,国际水稻所认为理想株型的一个重要的特征就是无效分蘖少<sup>[38]</sup>。本试验结果表明,在 4 个供试水稻品种中,南粳 49 的高峰苗最多,分蘖能力最强,但无效分蘖也最多,最后成熟期的有效穗数并不多,因此增加栽插苗数对其产量影响不显著。是否南粳 49 可以通过提高氮素施用量,弥补栽插苗数增加造成的营养限制,提高有效穗数,增强结实率,从而发挥其高产潜力,值得进一步研究。

壮秆大穗对于提高水稻的群体质量有十分重要的作用,单茎茎鞘重则群体质量高<sup>[39]</sup>。但从本研究看不同品种表现不同,比如淮稻 5 号相对生长速率不高,但是由于有效穗数多,因此,产量与其他 3 个品种没有显著差异,只是在每穴 5 株的栽插密度下,相对生长速率显著下降,产量才明显下降;而南粳 49 和南粳 94140 在开花后均有较大的总干质量,而南粳 45 则在开花期的总干质量不高,但始终保持较稳定的生物量,除了淮稻 5 号的每穴 5 株的处理之外,其他不同品种以及不同栽插苗数下,产量水平差

异并不显著。

实现水稻高产必须在充分发挥群体质量的基础上,进一步发挥各产量构成因素的内在潜力,在外界环境因素和适宜的栽培措施协同作用下,使各个产量构成因素达到协调平衡的最佳效果。水稻产量最高并不是某一产量构成因子达到最高,而是各构成因子平衡协调的结果,在足够有效穗数的基础上力争增加每穗粒数,同时也要顾及结实率和千粒质量<sup>[40-42]</sup>。本试验中南粳 45 和南粳 94140 随着栽插密度的增加,虽然降低了每穗粒数,但是由于增加了结实率和千粒质量,不同处理的产量并没有差异;南粳 49 则表现不同,随着栽插密度的增加,千粒质量和结实率均没有变化,但每穴有效穗数增加,虽然其每穗粒数显著降低,但是总的产量在每穴 2~4 株也没有差异;而淮稻 5 号在每穴 2~4 株时每穗粒数保持稳定,而千粒质量和结实率则增加,处理间产量没有显著差异,但是每穴 5 株处理时,与其他栽插密度处理相比,其结实率显著降低,产量显著降低。可见虽然南粳 49 通过提高叶面积,而淮稻 5 号通过提高有效穗数来适应栽插密度的提高,但是随着栽插密度的提高,后期叶片易衰老,并没有增加产量;而从节本增效的角度分析,适当的稀插有利于 4 个供试水稻品种产量潜力的发挥。本研究中 4 个供试水稻品种都表现为在较低栽插苗数下能够获得较大的每穗粒数,但是南粳 45、南粳 94140 和淮稻 5 号的千粒质量和结实率却在较低栽插苗数下表现较低,这与人研究的结果不一致<sup>[43-45]</sup>,推测可能是由于较

低栽插苗数下每穗粒数较多,而分配到籽粒的营养不够所致。简而言之,本研究所用的4个供试水稻品种产量构成因子对不同栽插苗数处理的响应有所差别,说明品种间有共性也有个性,这就需要最优化各自栽培条件,做到因种栽培,从而使各水稻品种发挥其产量潜力。

籽粒所积累的有机物有 $2/3 \sim 3/4$ 来自于抽穗后叶片的光合作用,水稻灌浆期的光合产物对产量的贡献率达到60%以上,高产水稻开花后所积累的有机物占到产量的90%<sup>[31]</sup>。从本研究中植物响应逆境的生理指标 $F_v/F_m$ 看,随着每穴栽插密度的提高,水稻生育后期功能叶片光合能力维持以及不早衰很重要。在稀播的基础上,优化高产群体质量,保证植株充分伸展,最大限度地接收光能,增强单叶尤其是功能叶片的光合能力,使其在抽穗期具有较大的相对生长速率,均是获得更多干物质以及产量的重要生理基础。从节约用种和减少用工的角度,本研究涉及的4个高产品种的生产中,选择稀插更有利。尤其对于南粳49和淮稻5号,选择每穴2株的栽插苗数,可在前期获得足够的高产群体,齐穗期通过单叶光合能力的提高,确保稳定的分蘖成穗率和较多的干物质积累,达到较稳定的高效叶面积,并维持后期的绿叶面积,不早衰,从而高效地协调各产量构成因子,更有利于其超高产量潜力的发挥。

## 参考文献:

- [1] 谢安华,张建福,王乌齐,等.超级稻育种实践和前景[J].分子植物育种,2006,4(3):4-10.
- [2] CHEN S, WANG D Y, XU C M, et al., Responses of super rice (*Oryza sativa* L.) to different planting methods for grain yield and nitrogen-use efficiency in the single cropping season [J]. PLoS ONE, 2014, 9(8): e104950.
- [3] 付景,杨建昌.超级稻高产栽培生理研究进展[J].中国水稻科学,2011,25(4):343-348.
- [4] 苏泽胜,李泽福.安徽省超级稻研究与应用现状及展望[J].沈阳农业大学学报,2007,38(5):739-743.
- [5] BOND J A, WALKER T W, OTTIS B V, et al. Rice seeding and nitrogen rate effects on yield and yield components of two rice cultivars [J]. Agron J, 2008, 100: 393-397.
- [6] MISYURA M, GUEVARA D, SUBEDI S, et al. Nitrogen limitation and high density responses in rice suggest a role for ethylene under high density stress [J]. BMC Genomics, 2014, 15: 681.
- [7] 潘圣刚,黄胜奇,江洋,等.秧龄和栽插密度对水稻生物学特性的影响[J].华北农学报,2011,26(3):134-138.
- [8] 郑克武,邹江石,吕川根.氮肥和栽插密度穗杂交稻“两优培九”产量及氮素吸收利用的影响[J].作物学报,2006,32(6):885-893.
- [9] YANG Z Y, LI N, MA J, et al. High-yielding traits of heavy panicle varieties under triangle plant ingeometry: a new plant spatial configuration for hybrid rice in China [J]. Field Crops Research, 2014, 168: 135-147.
- [10] 戴正元,李爱宏,肖宁,等.超级杂交稻扬两优6号不同栽插密度下的群体生长特性[J].江苏农业学报,2010,26(1):22-27.
- [11] 徐春梅,王丹英,邵国胜,等.施氮量和栽插密度对超高产水稻中旱22产量和品质的影响[J].中国水稻科学,2008,22(5):507-512.
- [12] FAGERIA N K. Yield physiology of rice [J]. Journal of Plant Nutrition. 2007, 30: 6, 843-879.
- [13] NAKANO H, MORITA S, KITAGAWA H, et al. Grain yield response to planting density in forage rice with a large number of spikelets [J]. Crop Sci, 2012, 52: 345-350.
- [14] FUKUSHIMA A, SHIRATSUCHI H, YAMAGUCHI H, et al. Effects of nitrogen application and planting density on morphological traits, dry matter production and yield of large grain type rice variety bekooba and strategies for super high-yielding rice in the Tohoku region of Japan [J]. Plant Prod Sci, 2011, 14(1): 56-63.
- [15] 仲维功,陈志德,杨杰,等.粳稻新品种南粳45的选育及栽培技术[J].江苏农业科学,2009(5):123-125.
- [16] 仲维功,杨杰,王军,等.水稻新品种南粳49的选育与应用[J].江苏农业科学,2012,40(11):103-104.
- [17] 仲维功,杨杰,王军,等.水稻新品种南粳51的选育与栽培要点[J].江苏农业科学,2014,42(11):91-92.
- [18] 严桂江.“淮稻5号”品种特征特性及高产栽培技术研究[J].上海农业科技,2013(2):26-28.
- [19] 金磊,李霞,仲维功.光强与施氮量对水稻南粳45光合特性和产量构成的影响[J].西北农业学报,2011,20(7):88-93.
- [20] 金磊,李霞,魏晓东,等.不同氮效率粳稻生育后期产量形成的生理基础[J].华北农学报,2013,28(5):175-186.
- [21] LI X, CAO K, WANG C, et al. Variation of photosynthetic tolerance of rice cultivars (*Oryza sativa* L.) to chilling temperature in the light [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(9): 1325-1337.
- [22] 陈宗祥,陈刚,胡俊,等.*Rt* 卷叶基因在杂交水稻中的遗传表达及效应研究[J].作物学报,2002,28(6):847-851.
- [23] 陆秀明,黄庆,孙雪晨,等.图像处理技术估测水稻叶面积指数的研究[J].中国农学通报,2011,27(3):65-68.
- [24] 柯希欢,李霞,仲维功,等.栽插苗数对超级稻南粳49冠层和产量的影响[J].福建农业学报,2014,29(8):725-732.
- [25] 金磊,李霞,朱镇,等.不同施氮量下南粳44光合生理特性及其与产量的关系[J].福建农业学报,2011,26(2):193-199.
- [26] 李霞,任承钢.内源 $H_2O_2$ 对高表达转玉米 $C_4$  *pepc* 水稻光合特性及叶绿素荧光特性的影响[J].植物生理学报,2012,48(6):549-556.
- [27] 凌启鸿,张洪程,蔡建中,等.水稻高产群体质量及其优化控制

- 探讨[J].中国农业科学,1993,26(6):1-11.
- [28] 刘 杨,王强盛,丁艳锋,等.水稻分蘖发生机理的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(3):1-5.
- [29] 黄卫群,何 沛,魏芳勤,等.杂交水稻品种功能叶对穗重的影响研究[J].中国稻米,2010,16(3):19-20.
- [30] 龚金龙,张洪程,李 杰,等.水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展[J].中国水稻科学,2010,24(4):417-424.
- [31] 夏 冰,阳树英,刘清波.生态因子对水稻叶片光合生理功能的影响综述[J].作物研究,2008(2):140-142.
- [32] 李 霞,刘友良,焦德茂.不同高产水稻品种叶片的荧光参数的日变化和光适应特性的关系[J].作物学报,2002,28(2):145-153.
- [33] 陈立云.两系法杂交水稻的理论与技术[M].上海:上海科学技术出版社,2001,297-300.
- [34] 许凤英,张秀娟,王晓玲,等.液体硅钾肥对水稻冠层结构、光合特性及产量的影响[J].江苏农业学报,2014,30(1):67-72.
- [35] 张洪程,王夫玉.中国水稻群体研究进展[J].中国水稻科学,2001,15(1):51-56.
- [36] 袁万臣,商文楠,刘 岩,等.不同穴内密度对水稻生长发育及产量的影响[J].黑龙江农业科学,2009(4):21-23.
- [37] 魏广彬,徐 蕊,孙和平,等.水稻分蘖与主茎同伸叶片大小的定量关系及其对氮素的响应[J].江苏农业学报,2014,30(5):950-958.
- [38] PENG S B, KHUSH G S, VIRK P, et al., Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential[J].Field Crops Research, 2008,108:32-38.
- [39] 陈德威,秦华东,徐世宏,等.稻田耕作方式和施氮水平对抛栽水稻群体质量及产量的影响[J].杂交水稻,2006,21(S1):70-73.
- [40] 周江明,赵 琳,董越勇,等.氮肥和栽插密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):274-281.
- [41] 陈益明.超级稻的产量结构与超高产配套技术[J].江西农业学报,2008,20(2):20-22.
- [42] 周有炎,龚金龙,沙安勤,等.江苏里下河地区武运梗24号机插高产形成特征及配套栽培技术[J].江苏农业科学,2014,42(8):66-69.
- [43] 金传旭,钟芹辅,黄大英,等.栽插密度与穴栽苗数对水稻产量及其构成因素的影响[J].贵州农业科学,2012,40(4):85-87.
- [44] 钱银飞,张洪程,吴文革,等.移栽密度组合对机插水稻淮稻5号生长发育及其产量形成的影响[J].江西农业大学学报,2009,31(1):41-48.
- [45] 石守设,尹海庆,扶 定,等.施氮量和栽插密度对郑稻18产量及其构成因素的影响[J].中国农学通报,2010,26(10):115-121.

(责任编辑:陈海霞)