

栽培密度对双季稻产量及群体光合特性的影响

刘利成^{1,2}, 陈立云¹, 肖应辉¹, 唐文帮¹, 敬礼恒³, 邓化冰^{1*}

(1.湖南农业大学水稻研究所, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省农业科学院水稻研究所, 湖南 长沙 410125; 3.江华县烟草公司, 湖南 永州 425500)

摘要:以杂交早稻株两优4024、金优402和晚稻H优159、金优207为材料,研究2011、2012年不同栽培密度(设置13.3 cm×20 cm、16.7 cm×20 cm、20 cm×20 cm、13.3 cm×26 cm共4种栽插密度,分别记作A₁、A₂、A₃、A₄)对双季稻(早稻、晚稻)产量及群体特性的影响。结果表明:2个早稻组合株两优4024和金优402的产量均呈A₂、A₁、A₃、A₄依次减小的变化趋势,说明16.7 cm×20 cm是双季早稻较适宜的栽培密度;晚稻H优159在2年的有效穗数、每穗粒数和产量均以A₃处理的最高,而其对金优207在2年的有效穗数和产量均以A₄处理的最高,说明晚稻适宜的栽培密度受其本身分蘖能力的影响较大,分蘖能力强的组合适合稀插,而分蘖能力较弱的组合不能栽培过稀;早稻株两优4024和金优402全生育期的高效叶面积指数、有效叶面积指数、最大叶面积指数均随密度的增大而增大,即呈A₁、A₂、A₄、A₃依次减小的变化趋势;晚稻H优159齐穗至齐穗后13 d期间,各处理的最大叶面积指数、高效叶面积指数和有效叶面积指数呈A₃、A₄、A₂、A₁依次减小的变化趋势,说明适当加大早稻株两优4024的栽插密度有利于提高其叶面积指数,而晚稻H优159适当稀植有利于提高其叶面积指数。相关分析结果表明,齐穗期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数与产量之间,齐穗后13 d的有效叶面积指数、最大叶面积指数和剑叶光合速率与产量之间,成熟期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数与产量之间均呈显著或极显著正相关,说明齐穗后保持较大的叶面积指数和较高的剑叶光合速率是双季稻高产的关键。

关键词: 双季稻; 栽培密度; 产量; 群体光合特性

中图分类号: S511.4⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2014)05-0449-09

Effects of cultivation density on yield and photosynthetic characters of double cropping rice

LIU Li-cheng^{1,2}, CHEN Li-yun¹, XIAO Ying-hui¹, TANG Wen-bang¹, JING Li-heng³, DENG Hua-bing^{1*}

(1. Rice Research Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Rice Research Institute, Hunan Agricultural Academy of Science, Changsha 410125, China; 3. Jianghua County Tobacco Companies, Yongzhou, Hunan 425500, China)

Abstract: In this study, Zhuliangyou4024 and Jinyou402, two hybrid early rice combination and Hyou159 and Jinyou207, two late combination were employed for tested materials, the effects of different cultivation density (they were A₁(13.3 cm×20 cm), A₂(16.7 cm×20 cm), A₃(20 cm×20 cm), A₄(13.3 cm×26 cm)) on canopy apparent photosynthesis (CAP) and yield were studied. The results showed that the yield of early hybrid rice combination Zhuliangyou4024 and Jinyou402 was showed decreased from A₂, A₁, A₃ to A₄ in turn, which indicated that A₂ was a suitable cultivation density for early rice of double cropping. The effective panicle number, grain number per panicle and yield of treatment A₃ of late combination Hyou159 were the highest in two years. The effective panicle number and yield of treatment A₄ of late combination Jinyou207 were the highest in two years, which indicated the suitable planting density of late rice were

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家农业科技成果转化基金项目(2010GB2D200314); 国家自然科学基金项目(31101134)

作者简介: 刘利成(1987—), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 主要从事水稻遗传育种与推广研究, liulicheng713@163.com; *通信作者, denghuabing@126.com

greatly affected by their tillering ability. The combination with strong tillering ability could adopt small transplanting density. High effective leaf area index, effective leaf area index, maximum leaf area index of two early hybrid rice combination Zhuliangyou4024 and Jinyou402 were increased with the density increased during the whole growth period. High effective leaf area index, effective leaf area index, maximum leaf area index of Hyou159 decreased from A_3 , A_4 , A_2 , to A_1 in turn in the first 13 d of heading stage, which indicated that increasing planting density of early hybrid rice combination Zhuliangyou4024 could improve its leaf area index, and decreasing planting density of late combination Hyou159 could improve its leaf area index. The results of correlation analysis showed that high effective leaf area index, effective leaf area index, maximum leaf area index in full heading stage and mature period, effective leaf area index, maximum leaf area index, flag leaf photosynthetic rate after 13 d of heading stage had significant or very significant positive correlation with yield, which indicated that maintaining larger leaf area index and higher photosynthetic rate of flag leaf after heading stage were the key measures to acquire high yield of double cropping rice.

Key words: double cropping rice; cultivation density; yield; canopy apparent photosynthesis(CAP)

适宜栽培密度研究一直是水稻高产栽培研究的重点。20 世纪 60 年代有人提出了小株密植高产、三角形栽插等理论；20 世纪 80 年代提出了“稀少平”高产栽培法^[1]和基本苗计算公式及扩行、控苗等群体质量优化措施^[2]。已有较多关于水稻栽插密度对其产量影响的研究^[3-9]，但关于双季早、晚稻配套栽培的研究较少。笔者以杂交早稻组合株两优 4024、金优 402 和杂交晚稻组合 H 优 159、金优 207 为材料，研究不同栽插密度下其产量及群体光合特性的变化，旨在为完善南方稻区双季稻配套高产栽培技术提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

杂交早稻组合为株两优 4024 和金优 402(对照)；杂交晚稻组合为 H 优 159 和金优 207(对照)。

1.2 试验设计

试验于 2011、2012 年在湖南农业大学水稻科学研究所的试验田进行。早、晚稻种植田块相同。试验设 13.3 cm×20 cm(A_1)、16.7 cm×20 cm(A_2)、20 cm×20 cm(A_3)、13.3 cm×26 cm(A_4)4 种栽插密度。采用裂区试验设计，栽插密度为主处理，品种为副处理，各处理设 3 次重复，每小区种植 200 株。早稻株两优 4024、金优 402 于 3 月 26 日播种，4 月 26 日移栽；晚稻 H 优 159、金优 207 于 6 月 22 日播种，7 月 22 日移栽。氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量分别为 180、60、120 kg/hm²。常规栽培管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态观察

移栽后每 4 d 观察、记载各小区中间 10 株的分蘖数。试验于 2012 年进行。

1.3.2 产量与产量构成因素考查

于成熟期每小区数取 20 株计算单位面积有效穗数。取穗数与平均穗数基本一致的 5 株，考查每穗总粒数、每穗实粒数、千粒重，计算理论产量。收割各小区中间没有缺兜的 100 株的谷粒，晒干扬净，测定水分后折算成含水量 14%的稻谷质量，计算实际产量。试验于 2011 年和 2012 年进行。

1.3.3 高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数的测定

2012 年于分蘖盛期、齐穗期、齐穗后 13 d、成熟期在每小区取中间植株 3 株，于分蘖盛期测量总叶面积。抽穗后，摘取其所有叶片，分单有效分蘖和无效分蘖叶类。有效分蘖叶又分倒三叶叶类和其他叶类。按类型分别测量叶长、叶宽。叶面积=叶长×叶宽×K 值(0.75)。叶面积指数 LAI=单位土地面积上的总叶面积/单位土地面积。高效叶面积指数为倒三叶叶面积指数；有效叶面积指数为有效分蘖的叶面积指数；最大叶面积指数为整株叶面积指数。

1.3.4 剑叶叶绿素 SPAD 值和光合速率的测定

2012 年抽穗后，用日产 SPAD502 仪测定每小区中间 10 株主茎剑叶上、中、下部位的 SPAD 值，每 4 d 测 1 次，计算每株的平均 SPAD 值。

2012 年, 分别于齐穗期、齐穗后 13 d 和成熟期在每小区取中间的 3 株, 用 Li-6200 仪测定剑叶光合速率。

1.4 数据分析方法

采用软件 MS Excel 2003 和 DPS 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 栽培密度对双季稻分蘖动态的影响

由图 1 可见, 杂交早稻组合株两优 4024 和金优 402 的分蘖数随移栽时间的变化基本一致, 均呈上升、下降、平稳的变化趋势, 分蘖数约在移栽后

31 d 达到最大值, 然后逐渐下降。不同密度处理下的分蘖数间存在一定差异, 早稻株两优 4024 的分蘖数在移栽后呈 A₁、A₂、A₄、A₃ 依次减小的变化趋势; 金优 402 的分蘖数在移栽后至移栽后 35 d 呈 A₁、A₂、A₃、A₄ 依次减小的变化趋势, 移栽 39 d 后呈 A₁、A₂、A₄、A₃ 依次减小的变化趋势。与对照金优 402 相比, 移栽至移栽后 39 d, 株两优 4024 的 4 个处理平均分蘖数少于对照金优 402 的; 移栽 39 d 后, 株两优 4024 的 4 个处理平均分蘖数多于对照金优 402 的。

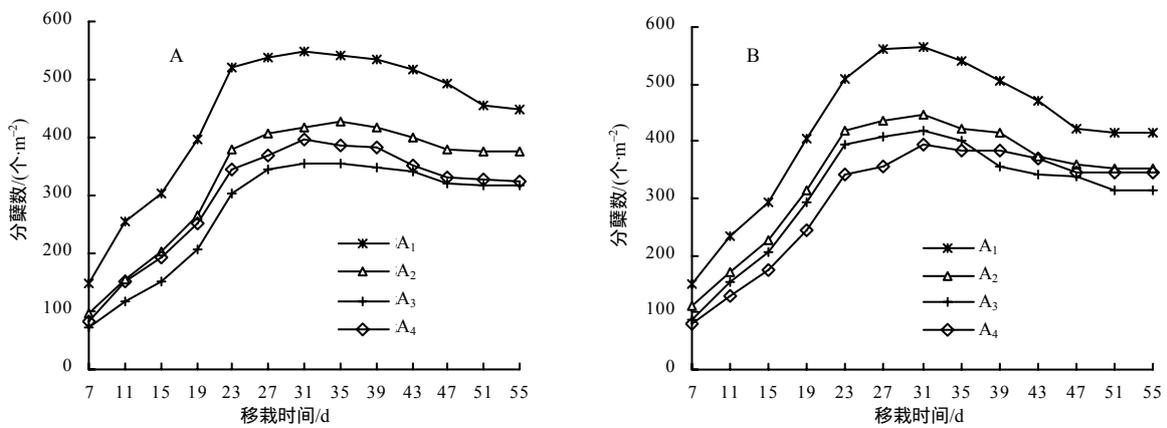


图 1 各处理株两优 4024(A)和金优 402(B)的分蘖动态

Fig.1 Tilling dynamics of Zhuliangyou 4024(A) and Jinyou402(B) under different treatments

从图 2 可知, 杂交晚稻组合 H 优 159 和金优 207 的分蘖数随移栽时间的变化与 2 个早稻组合的基本一致, 均呈上升、下降、平稳的变化趋势, 其中 H 优 159 和金优 207 的分蘖数在移栽后 26~30 d 达到最大值。不同密度处理下的分蘖数间存在一定差异, H 优 159 的 4 个处理最大分蘖数和移栽 50 d

后的分蘖数均呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势; 金优 207 的 4 个处理最大分蘖数呈 A₁、A₂、A₄、A₃ 依次减小的变化趋势, 移栽 38 d 的分蘖数呈 A₄、A₂、A₁、A₃ 依次减小的变化趋势。与对照金优 207 相比, 移栽至移栽后 54 d 内 H 优 159 的 4 个处理平均分蘖数均多于对照金优 207 的。

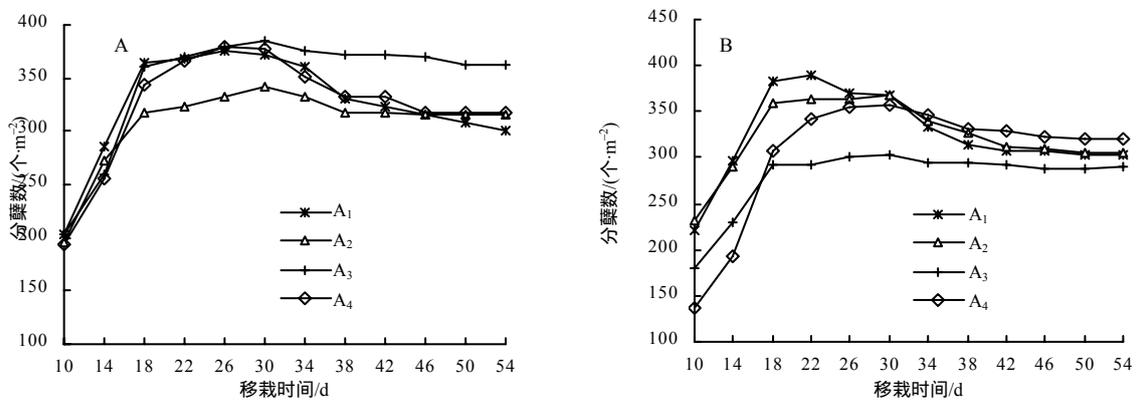


图 2 各处理 H 优 159(A)和金优 207(B)的分蘖动态

Fig.2 Tilling dynamics of Hyou159(A) and Jinyou207(B) under different treatments

由图 1、图 2 可知,株两优 4024 和 H 优 159 移栽后期的分蘖数均分别多于其对照金优 402 和金优 207 的,这可为最终获得较多的有效穗数提供参考。

2.2 栽培密度对双季稻产量及产量构成因素的影响

由表 1 可见,早稻株两优 4024 各处理 2 年的

有效穗数间的差异、产量间的差异均有达极显著水平的,均呈 A₂、A₁、A₃、A₄ 依次减小的变化趋势,其变化趋势与其对照金优 402 各处理的变化趋势一致。

表 1 各处理双季稻的产量及其构成因素

Table 1 Yields and their components of double cropping rice under different treatments								
年份	季节	组合	处理	有效穗数/(个·m ⁻²)	每穗粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	产量/(t·hm ⁻²)
2011	早季	株两优 4024	A ₁	319abA	102	87.8	28.4	7.71aA
			A ₂	324aA	102	87.8	28.3	7.88aA
			A ₃	310bAB	105	87.2	28.5	7.33bB
			A ₄	298cB	101	86.5	28.4	6.87cC
		金优 402	A ₁	293bAB	110	88.2	26.7	7.22abAB
			A ₂	306aA	112	87.8	26.6	7.46aA
			A ₃	283bcB	112	87.2	26.8	7.00bcB
			A ₄	278cB	113	87.3	26.6	6.83cB
	晚季	H 优 159	A ₁	287bB	106cC	86.1ab	27.2	6.80cC
			A ₂	290bB	111bB	87.9a	27.3	7.18bB
			A ₃	315aA	113aA	87.1ab	27.3	7.64aA
			A ₄	308aA	111bB	85.7b	27.2	7.48aAB
		金优 207	A ₁	265bA	124dD	86.2aA	24.9	6.58bB
			A ₂	273abA	126cC	87.6aA	25.0	7.10aA
			A ₃	255cB	130bB	83.2bB	25.0	6.50bB
			A ₄	273aA	138aA	87.8aA	25.0	7.23aA
2012	早季	株两优 4024	A ₁	321abA	105	88.1aA	28.3	7.83bA
			A ₂	327aA	106	88.0aA	28.4	8.05aA
			A ₃	317bA	107	83.3cC	28.4	7.38cB
			A ₄	301cB	107	85.0bB	28.4	7.01dC
		金优 402	A ₁	300bB	110	88.0	26.6	7.34bB
			A ₂	316aA	111	87.9	26.6	7.61aA
			A ₃	292bBC	112	87.4	26.7	7.08cC
			A ₄	283cC	111	87.7	26.7	6.95dC
	晚季	H 优 159	A ₁	297cC	113	85.9ac	27.4	6.89cC
			A ₂	306bA	113	86.4abc	27.4	7.38bB
			A ₃	322aA	116	86.8a	27.5	7.78aA
			A ₄	320aA	113	86.7ab	27.4	7.59aAB
		金优 207	A ₁	267bB	133	87.8a	25.1	6.85bB
			A ₂	279aA	138	86.9b	25.2	7.32aA
			A ₃	259cC	136	87.3ab	25.1	6.67cB
			A ₄	286aA	137	87.1ab	25.2	7.49aA

数字后大小写字母分别示差异达 1%、5%水平。下表同。

由表 1 可见,2011 年,晚稻 H 优 159 各处理的有效穗数间差异、每穗粒数间差异、结实率间差异和产量间差异均有达显著水平的,2012 年晚稻 H 优 159 各处理有效穗数间差异、结实率间差异和产量间差异均有达到显著水平的; H 优 159 的 A₃ 处

理 2 年的有效穗数、每穗粒数和产量均最高,金优 207 的 A₄ 处理 2 年的有效穗数和产量均最高。

由表 2 可见,2011 年,早稻株两优 4024 与对照金优 402 的 4 个处理平均产量间差异无统计学意义,但 2012 年平均产量间的差异达显著水平; 2 年的平

均有效穗数间差异、每穗粒数间差异均达显著水平，千粒重间差异达极显著水平，均表现为株两优 4024 的平均有效穗数和千粒重高于对照金优 402 的，而每穗粒数显著低于对照金优 402 的。晚稻 H 优 159

及其对照金优 207 的 2 年平均有效穗数间差异和千粒重间差异均达极显著水平，每穗粒数间差异和产量间差异均达显著水平，均表现为 H 优 159 的平均有效穗数、千粒重和产量高于对照金优 207 的。

表 2 双季稻产量及产量构成因素各处理的平均值

Table 2 Average of yields and their components of double cropping rice under different treatments

年份	季节	组合	有效穗数/(个·m ⁻²)	每穗粒数/粒	结实率/%	千粒重/g	产量/(t·hm ⁻²)
2011	早季	株两优 4024	318a	102b	87.3	28.4aA	7.45
		金优 402	290b	112a	87.6	26.7bB	7.13
	晚季	H 优 159	300aA	110bB	86.7	27.2aA	7.27a
		金优 207	267bB	130aA	86.2	25.0bB	6.85b
2012	早季	株两优 4024	317a	106bB	86.1	28.4aA	7.57a
		金优 402	297b	111aA	87.8	26.7bB	7.24b
	晚季	H 优 159	311aA	114b	86.4	27.4aA	7.41a
		金优 207	272bB	136a	87.3	25.1bB	7.08b

2.3 各处理双季稻的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数

由表 3 可知，早稻株两优 4024 各处理分蘖盛期、齐穗期、成熟期的最大叶面积指数间差异、成熟期的高效叶面积指数间差异和有效叶面积指数间差异均达显著水平。金优 402 各处理分蘖盛期、齐穗期、齐穗后 13 d 的最大叶面积指数间差异、齐穗期的有效叶面积指数间差异、成熟期高效叶面积指数间差异均达显著水平。早稻株两优 4024 和金优 402 全生育期的高效叶面积指数、有效叶面积指数、最大叶面积指数均随密度的增大而增大，即呈 A₁、A₂、A₄、A₃ 依次减小的变化趋势。

晚稻 H 优 159 各处理齐穗后 13 d 的高效叶面积指数间差异、有效叶面积指数间差异、最大叶面积指数间差异均达显著水平，金优 207 各处理分蘖盛期和齐穗期的最大叶面积指数间差异均达显著

水平。晚稻 H 优 159 和金优 207 各处理在齐穗前高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数均呈 A₁、A₂、A₄、A₃ 依次减小的变化趋势。与齐穗期相比，齐穗后 13 d H 优 159 在 A₃ 栽插密度下的最大叶面积指数降幅最小，为 19.15%，其他各处理的降幅随密度的增大而增大，A₄、A₂、A₁ 处理的降幅分别为 24.78%、26.13%、30.08%。齐穗后 13 d 各处理的最大叶面积指数、高效叶面积指数和有效叶面积指数呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势。齐穗期及以后，金优 207 各处理的最大叶面积指数、高效叶面积指数和有效叶面积指数呈 A₄、A₂、A₁、A₃ 依次减小的变化趋势。

上述结果表明，适当加大早稻株两优 4024 的栽插密度有利于提高其叶面积指数，而晚稻 H 优 159 的情况相反，适当稀植有利于提高其叶面积指数。

表 3 各处理双季稻的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数

Table 3 High effective leaf area index, effective leaf area index and maximum leaf area index of double cropping rice under different treatments

季节	组合	处理	最大叶面积指数				有效叶面积指数			高效叶面积指数			
			分蘖盛期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期	
早季	株两优 4024	A ₁	2.20aA	6.17a	5.29	4.90aA	5.37	4.63	4.39aA	4.47	4.16	4.26aA	
		A ₂	2.13aA	6.06a	5.65	4.05aA	5.32	4.49	3.92aA	4.24	3.53	3.80aA	
		A ₃	1.73bB	5.51b	4.18	2.35bB	5.00	3.98	2.33bB	4.02	3.37	2.24bB	
		A ₄	2.00aAB	5.80ab	5.17	3.73aAB	5.18	4.82	3.49aAB	4.15	4.25	3.19aAB	
	金优 402	A ₁	2.18aA	6.06a	5.16ab	4.12	5.34aA	4.90	3.86	4.20	4.10	3.79a	
		A ₂	1.96aAB	5.85a	5.56a	3.34	5.24aAB	4.43	3.23	4.03	4.07	3.14ab	
		A ₃	1.40cC	5.21b	3.82b	2.96	4.32bC	3.75	2.70	3.55	3.22	2.62b	
		A ₄	1.65bBC	5.54ab	4.43ab	3.26	4.58bBC	4.01	2.93	3.68	3.65	2.85ab	
	晚季	H 优 159	A ₁	4.12	5.26a	3.42b	2.77	4.90	3.28b	2.71	3.99	3.03bB	2.70
			A ₂	3.91	5.29a	3.87ab	2.93	4.94	3.49b	2.76	3.99	3.17bAB	2.76
			A ₃	3.62	5.41a	4.58a	3.11	5.13	4.41a	3.04	4.69	3.93aA	2.99
			A ₄	3.89	5.32a	3.92ab	3.05	5.00	3.63ab	2.94	4.34	3.33bAB	2.81
金优 207		A ₁	4.70aA	4.77b	4.05	2.75	4.18	3.81	2.69	3.34	3.29	2.64	
		A ₂	3.79abAB	4.92ab	4.15	2.76	4.20	3.93	2.71	3.38	3.37	2.70	
		A ₃	2.99bB	4.65b	3.76	2.73	4.03	3.44	2.64	3.20	3.21	2.63	
		A ₄	3.52bAB	5.37a	4.22	2.81	4.24	3.94	2.74	3.48	3.45	2.74	

表 4 双季稻高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数各处理的平均值

Table 4 Average of high effective leaf area index, effective leaf area index and maximum leaf area index of double cropping rice under different treatments

季节	组合	最大叶面积指数				有效叶面积指数			高效叶面积指数		
		分蘖盛期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期	齐穗期	齐穗后 13 d	成熟期
早季	株两优 4024	2.02	5.89	5.07	3.76	5.22	4.48	3.53	4.22	3.83	3.37
	金优 402	1.80	5.67	4.74	3.42	4.87	4.27	3.18	3.86	3.76	3.10
晚季	H 优 159	3.89	5.32a	3.95	2.97	5.00a	3.70	2.86	4.25a	3.36	2.82
	金优 207	3.75	4.93b	4.05	2.76	4.16b	3.78	2.69	3.35b	3.33	2.68

2.4 各处理双季稻剑叶 SPAD 值

从图 3 可以看出,早稻株两优 4024 和金优 402 各处理的剑叶 SPAD 值在齐穗后 4 d(株两优 4024 于 6 月 20 日齐穗,金优 402 于 6 月 18 日齐穗)基本上保持不变,且均在 6 月 28 日剑叶 SPAD 值达到最大;齐穗后约 20 d(7 月 10 日)开始,剑叶 SPAD 值

急剧下降,其中株两优 4024 以 A₄ 处理的下降幅度最大,至齐穗后 28 d, A₄ 处理下降了 13.86%; A₂ 处理的下降幅度最小;成熟期,株两优 4024 和金优 402 各处理剑叶 SPAD 值均呈 A₃、A₂、A₄、A₁ 依次减小的变化趋势。株两优 4024 各处理剑叶平均 SPAD 值始终高于对照。

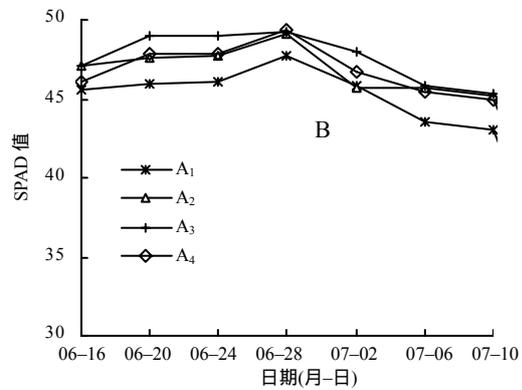
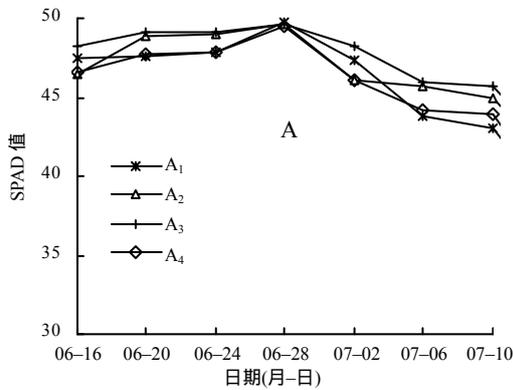


图 3 各处理株两优 4024(A)和金优 402(B)的剑叶 SPAD 值

Fig.3 SPAD values of Zhuliangyou 4024(A) and Jinyou402(B) under different treatments

由图 4 可见,晚稻 H 优 159 和金优 207 在齐穗前后 4 d 内(9 月 8 日齐穗)的剑叶 SPAD 值相对稳定。与齐穗后 20 d 相比,成熟期 H 优 159 的 SPAD 值以 A₁ 处理的下降幅度最大,降幅为 6.50%,而 A₃ 处理基本保持稳定,各处理呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势。H 优 159 A₁ 处理在籽粒成熟

期剑叶出现早衰,而 A₃ 处理剑叶在生长后期(齐穗后 13 d 至成熟期)能保持较高的叶绿素含量,衰败缓慢。晚稻 H 优 159 在前期各处理的剑叶 SPAD 值均小于对照金优 207,但后期金优 207 的剑叶 SPAD 值下降幅度较大,至成熟期,H 优 159 各处理的剑叶 SPAD 平均值略高于对照金优 207。

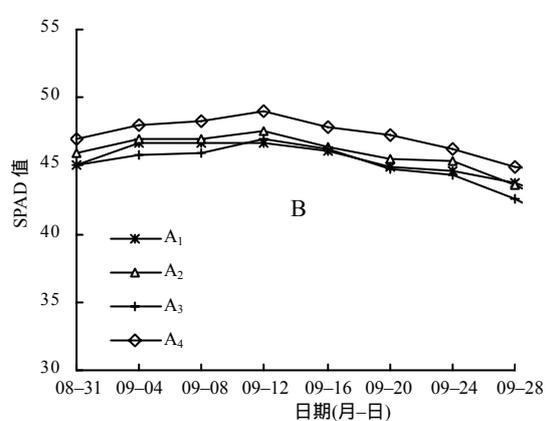
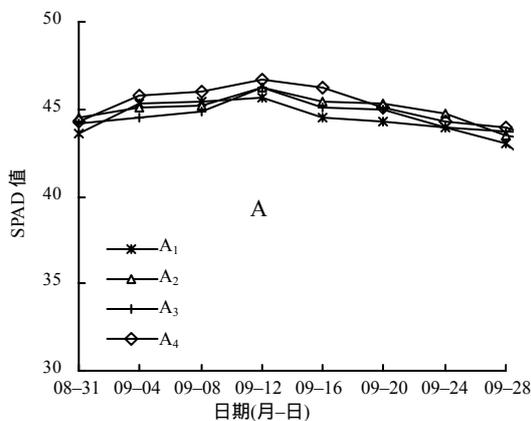


图 4 各处理 H 优 159(A)和金优 207(B)的剑叶 SPAD 值

Fig.4 SPAD values of Hyou159(A) and Jinyou207(B) under different treatments

2.5 各处理双季稻剑叶的光合特性

由表 5、表 6 可知,早稻株两优 4024 和金优 402 各处理齐穗期、齐穗后 13 d、成熟期的剑叶光合速率间差异均有达显著水平的,其中,株两优 4024 和金优 402 的齐穗期 A₄ 处理具有较大的剑叶光合速率;在籽粒充实的关键时期(齐穗后 13 d),A₂ 处理保持了较高的光合速率,A₁ 和 A₃ 相当,A₄ 最小。齐穗期株两优 4024 各处理的平均剑叶光合速率极显

著高于对照金优 402 的。晚稻 H 优 159 各处理齐穗期和成熟期剑叶光合速率间差异均有达显著水平的,金优 207 各处理齐穗期和齐穗后 13 d 剑叶光合速率间差异均有达显著水平的,其中,晚稻 H 优 159 和金优 207 齐穗期 A₄ 处理具有较大的剑叶光合速率,各处理齐穗后 13 d 的剑叶光合速率大幅度下降,且呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势,即随栽培密度的增大而减小。齐穗后 H 优 159 各处理的剑叶光合速率下降速率较小,至成熟期各处理平均剑叶光合速率显著高于对照金优 207。

表 5 各处理双季稻的剑叶光合速率

Table 5 Photosynthetic rate in flag leaves of double cropping rice under different treatments

季节	组合	处理	光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
			齐穗期	齐穗后13 d	成熟期
早季	株两优 4024	A ₁	26.8bB	23.1ab	17.3aA
		A ₂	27.7aA	24.3a	14.6bAB
		A ₃	27.8aA	23.2ab	17.1aA
		A ₄	28.2aA	21.7b	14.5bAB
金优 402	A ₁	A ₁	27.6abA	23.1b	18.2aA
		A ₂	26.0cB	25.1a	14.9bB
		A ₃	26.6bcAB	23.2ab	16.6abAB
		A ₄	28.1aA	22.9b	14.6bB
晚季	H 优 159	A ₁	24.4bB	22.7	20.1a
		A ₂	24.4bB	22.9	19.7ab
		A ₃	24.5bB	25.3	19.7a
		A ₄	28.2aA	23.0	18.6b
	金优 207	A ₁	28.6ab	20.0b	17.2
		A ₂	28.7ab	22.4ab	17.1
		A ₃	27.8b	23.8a	16.4
		A ₄	29.9a	23.3a	17.8

表 6 双季稻剑叶光合速率各处理的平均值

Table 6 Average photosynthetic rate in flag leaves of double cropping rice under different treatments

季节	组合	光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		齐穗期	齐穗后13 d	成熟期
早季	株两优4024	27.6aA	23.1	15.9
	金优402	27.1bB	23.6	16.1
晚季	H优159	25.4	23.5	19.5a
	金优207	28.7	22.4	17.1b

2.6 双季稻齐穗后的群体特性与产量的相关性

相关分析结果(表 7)表明,双季稻齐穗期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数与产量间呈极显著正相关;齐穗后 13 d 的有效叶面积指数和剑叶光合速率与产量间呈显著正相关,最大叶面积指数与产量间呈极显著正相关;成熟期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数

表 7 各处理双季稻齐穗后生理性状与产量的相关系数

Table 7 Correlation analysis of the physiological characteristics and yield of double cropping rice after heading stage under different treatments

时期	性状	相关系数				
		有效穗数	每穗粒数	结实率	粒重	产量
齐穗期	高效叶面积指数	0.912**	-0.772**	0.368	0.817**	0.763**
	有效叶面积指数	0.904**	-0.855**	0.467*	0.855**	0.719**
	最大叶面积指数	0.786**	-0.715**	0.645**	0.738**	0.696**
	剑叶 SPAD 值	0.087	-0.203	-0.088	0.176	0.148
	剑叶光合速率	-0.427	0.446*	0.089	-0.412	-0.144
齐穗后 13 d	高效叶面积指数	0.499*	-0.409	0.419	0.407	0.416
	有效叶面积指数	0.545*	-0.435	0.533*	0.438	0.496*
	最大叶面积指数	0.607**	-0.455*	0.519*	0.451*	0.592**
	剑叶 SPAD 值	0.215	-0.331	-0.174	0.286	0.226
	剑叶光合速率	0.518*	-0.298	0.134	0.259	0.558*
成熟期	高效叶面积指数	0.562**	-0.484*	0.421	0.449*	0.572**
	有效叶面积指数	0.598**	-0.541*	0.406	0.509*	0.567**
	最大叶面积指数	0.564**	-0.551*	0.411	0.514*	0.521*
	剑叶 SPAD 值	-0.040	0.479*	-0.284	-0.177	0.119
	剑叶光合速率	0.107	0.142	-0.177	-0.037	0.053

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。下同。

与产量间均呈显著或极显著正相关,说明大的叶面积指数有利于高产。从产量构成因子来看,齐穗期和成熟期各叶面积指数与有效穗数、粒重均呈显著或极显著正相关,与每穗粒数呈显著或极显著负相关,说明齐穗期和成熟期较大的叶面积指数有利于有效穗数和粒重的增加,但不利于每穗粒数的增加。总的来看,齐穗后保持较大的叶面积指数和齐穗后 13 d 具有较高的剑叶光合速率是双季稻高产的关键。

2.7 齐穗期叶面积指数、产量构成因素与产量间的逐步回归分析

以产量(Y)为因变量,以齐穗期高效叶面积指数(X_1)、齐穗期有效叶面积指数(X_2)、齐穗期最大叶面积指数(X_3)、齐穗后 13 d 高效叶面积指数(X_4)、齐穗后 13 d 有效叶面积指数(X_5)、齐穗后 13 d 最大叶面积指数(X_6)、成熟期高效叶面积指数(X_7)、成熟期有效叶面积指数(X_8)、成熟期最大叶面积指数(X_9)、最大分蘖数(X_{10})、齐穗后 13 d 剑叶光合速率(X_{11})

为自变量,以 $P=0.05$ 为变量入选和剔除条件进行逐步回归分析。结果(表 8)表明,不同密度处理下齐穗期高效叶面积指数和齐穗后 13 d 剑叶光合速率对株两优 4024 产量的影响较大,这 2 个性状对其产量具有正向作用,共解释了其产量总变异的 99.83%。不同密度处理下最大分蘖数和齐穗后 13 d 剑叶光合速率对金优 402 产量的影响较大,这 2 个性状共解释了其产量总变异的 99.98%。不同密度处理下成熟期最大叶面积指数对 H 优 159 产量的影响较大,这个性状的偏回归系数为 0.993 9,说明这个性状对产量具有正向作用,解释了其产量总变异的 98.78%。不同密度处理下成熟期高效叶面积指数对金优 207 产量的影响较大,这个性状的偏回归系数为 0.984 5,解释了其产量总变异的 96.92%。结果表明,齐穗期的叶面积指数和齐穗后的剑叶光合速率对双季早稻产量的影响较大,而成熟期的叶面积指数对双季晚稻产量的影响较大。

表 8 齐穗期叶面积指数、产量构成因素与产量间的逐步回归分析结果

组合	回归方程	偏回归系数	决定系数
株两优 4024	$Y=-5.274\ 235\ 11+1.066\ 057\ 387\ 5X_1+0.361\ 558\ 957\ 1X_{11}$	$B(X_1)=0.995\ 5^{**}; B(X_{11})=0.998\ 7^*$	0.998 3**
金优 402	$Y=0.428\ 126\ 391+0.001\ 952\ 151\ 545\ 9X_{10}+0.251\ 405\ 629\ 67X_{11}$	$B(X_{10})=0.999\ 7^{**}; B(X_{11})=0.999\ 9^*$	0.999 8**
H 优 159	$Y=-0.118\ 903\ 703\ 7+2.539\ 259\ 259\ 3X_9$	$B(X_9)=0.993\ 9^{**}$	0.987 8*
金优 207	$Y=-12.522\ 105\ 26+7.321\ 981\ 424X_7$	$B(X_7)=0.984\ 5^{**}$	0.969 2*

3 结论与讨论

a.栽培密度对双季稻产量的影响。高产水稻生产需要合理的群体条件,而合理的基本苗数是构建合理群体的基础^[10]。基本苗数的多少直接关系到水稻的分蘖数和群体质量优劣^[11]。适宜的栽插密度能充分利用光照资源,高效地利用地力,保证个体与群体和谐发展,取得高产。本研究结果表明,2 个早稻组合株两优 4024 和金优 402 的产量均呈 A_2 、 A_1 、 A_3 、 A_4 依次减小的变化趋势,其中 A_1 处理虽然总分蘖数较多,但由于成穗率较低,未能高产,说明双季早稻既不能太稀植也不能太密插,16.7 cm×20 cm 是其较适宜的栽培密度。这种密度既能保持一定的基本苗数,又可以留出足够的空间让其分蘖。前人的研究^[12-13]表明,早稻移栽的基本苗数对其有效穗数的影响较大。这一结果与前人的研究结果基本一致。晚稻 H 优 159 的 A_3 处理 2 年有效穗数、每穗粒数和产量最高,而其对

照金优 207 的 A_4 处理 2 年有效穗数和产量最高,说明晚稻适宜的栽培密度受其本身分蘖能力的影响较大,分蘖能力强的组合适合稀插(如 H 优 159);分蘖能力较弱的组合不能栽培过稀,否则容易造成单位面积总分蘖数减少,从而导致减产(如金优 207)。总的来说,与早稻比较,晚稻可以适当稀植,以保证足够的空间让其分蘖。

b.栽培密度对群体特性的影响。水稻的群体特性受栽培密度的影响较大。本研究结果表明,早稻株两优 4024 和金优 402 全生育期的高效叶面积指数、有效叶面积指数、最大叶面积指数均随密度的增大而增大,即呈 A_1 、 A_2 、 A_4 、 A_3 依次减小的变化趋势。晚稻 H 优 159 和金优 207 在齐穗前高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数均呈 A_1 、 A_2 、 A_4 、 A_3 依次减小的变化趋势。在齐穗至齐穗后 13 d 期间,晚稻 H 优 159 各处理的最大叶面积指数、高效叶面积指数和有效叶面积指数呈 A_3 、

A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势。齐穗期及以后, 金优 207 各处理的最大叶面积指数、高效叶面积指数和有效叶面积指数呈 A₄、A₂、A₁、A₃ 依次减小的变化趋势。结果表明, 适当加大早稻株两优 4024 的栽插密度有利于提高其叶面积指数, 而晚稻 H 优 159 适当稀植有利于提高其叶面积指数。株两优 4024 和金优 402 成熟期各处理剑叶的 SPAD 值均呈 A₃、A₂、A₄、A₁ 依次减小的变化趋势。晚稻 H 优 159 和金优 207 齐穗后 20 d 至成熟, 各处理呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势, 结果表明, 不论早稻还是晚稻, 适当稀植有利于剑叶保持较高的叶绿素含量, 从而减缓剑叶的衰老。晚稻 H 优 159 和金优 207 各处理齐穗后 13 d 的剑叶光合速率大幅度下降, 呈 A₃、A₄、A₂、A₁ 依次减小的变化趋势, 即剑叶光合速率随栽插密度的增大而减小, 说明适当稀植有利于晚稻剑叶保持较高的光合水平。

c. 双季稻齐穗后的群体特性与产量的相关性。随着栽培密度的增大, 早稻的单位面积分蘖数增加, 齐穗后高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数等也增加^[13]。本研究结果表明, 双季稻齐穗期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数与产量之间, 齐穗后 13 d 的有效叶面积指数、最大叶面积指数和剑叶光合速率与产量之间, 成熟期的高效叶面积指数、有效叶面积指数和最大叶面积指数与产量之间均呈显著或极显著正相关, 说明齐穗后保持较大的叶面积指数和较高的剑叶光合速率是双季稻高产的关键。逐步回归分析结果表明, 不同密度处理下齐穗期高效叶面积指数和齐穗后 13 d 剑叶光合速率对株两优 4024 产量的影响较大, 这 2 个性状共解释了其产量总变异的 99.83%; 不同密度处理下最大分蘖数和齐穗后 13 d 剑叶光合速率对金优 402 产量的影响较大, 这 2 个性状共解释了其产量总变异的 99.98%; 不同密度处理下成熟期最大叶面积指数对 H 优 159 产量的影响较大, 这个性状解释了其产量总变异的 98.78%; 不同密度处理下成熟期高效叶面积指数对金优 207 产量的影响较大, 这个性状解释了其产量总变异的 96.92%, 说明齐穗期的叶面积指数和齐穗后的剑叶光合速率对

双季早稻产量的影响较大, 而成熟期的叶面积指数对双季晚稻产量的影响较大。

参考文献:

- [1] 蒋彭炎, 姚长溪, 任正龙. 水稻稀播少本插高产技术的研究[J]. 作物学报, 1981, 7(4): 241-248.
- [2] 凌启鸿, 苏祖芳, 张海泉. 水稻成穗率与群体质量的关系及其影响因素的研究[J]. 作物学报, 1995, 21(4): 463-469.
- [3] 郑克武, 邹江石, 吕川根. 氮肥和栽插密度对杂交稻“两优培九”产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 23(6): 885-893.
- [4] 闫川, 丁艳锋, 王强盛, 等. 行株距配置对水稻茎秆形态生理与群体生态的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(5): 530-536.
- [5] 吴朝晖, 袁隆平, 青先国, 等. 栽培方式对超级杂交稻生理特性和产量的影响及其灰色关联度分析[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(4): 379-385.
- [6] 蔡艳, 陶武辉, 张毅, 等. 不同移栽密度对“大三围强化栽培”模式下水稻产量及氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1603-1605.
- [7] 郎有忠, 王美娥, 吕川根, 等. 水稻叶片形态、群体结构和产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 7-11.
- [8] 汪秀志, 刘崇文, 许谊强, 等. 肥密互作对寒地水稻源库关系的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(1): 17-22.
- [9] Maite Martinez-eixarch, ZHU De-feng, Maria del Mar Catala-former, et al. Water, nitrogen and plant density affect the response of leaf appearance of direct seeded rice to thermal time[J]. Rice Science, 2013, 20(1): 52-60.
- [10] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻高产精确定量栽培[J]. 北方水稻, 2007, 12(2): 1-9.
- [11] 黄冬福. 种植密度影响水稻农艺性状的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(1): 70-76.
- [12] 李木英, 石庆华, 王涛, 等. 种植密度对双季超级稻群体发育和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2009, 24(2): 72-77.
- [13] 刘武. 氮肥用量和移栽密度对早稻产量及某些生理性状的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学农学院, 2008.

责任编辑: 王赛群

英文编辑: 王 库