

杨 洪,李旭毅,卿发红,等. 不同产量水平水稻群体光合特性和产量构成差异[J].江苏农业学报,2023,39(5): 1089-1096.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.05.001

不同产量水平水稻群体光合特性和产量构成差异

杨 洪^{1,2}, 李旭毅^{1,3}, 卿发红⁴, 余俊奇¹, 朱从桦^{1,3}, 李 伟¹, 李 天², 陈光毅²,
欧阳裕元^{1,2,3}

(1.四川省农业科学院作物研究所,四川 成都 610066; 2.四川农业大学农学院,四川 成都 611130; 3.粮油作物绿色种质创新与遗传改良四川省重点实验室,四川 成都 610066; 4.绵竹市农业农村局,四川 德阳 618200)

摘要: 为明确不同产量水平水稻产量构成、群体结构、光合特性和氮素利用率等指标的变化规律,在绵竹和中江设置农户水平(FL)、高产高效水平(HH)和超高产水平(SH)3种栽培模式,并设置不施氮肥对照。分析不同产量水平水稻之间产量、群体、光合特性和氮素利用率的差异,探究不同产量水平形成原因及进一步提高产量的途径。结果表明,(1)与FL处理相比,HH和SH处理的结实率和千粒质量均明显增加,但每穗粒数降低,有效穗数分别显著增加12.74%和26.10%;(2)抽穗后不同产量水平水稻间干物质积累量差异显著,成熟期两生态点SH处理的平均干物质积累量为21.98 t/hm²,与HH和FL处理相比分别显著提高10.95%和20.90%;(3)不同产量水平水稻茎蘖数差异较大,成熟期两生态点FL、HH和SH处理的平均茎蘖数分别为1 hm² 2.689 9×10⁶、3.032 8×10⁶和3.392 1×10⁶,SH处理比HH处理高11.85%,HH处理比FL处理高12.75%;(4)总体上,不同产量水平水稻的平均叶面积指数、剑叶SPAD值、光合速率和辐射利用率均表现为SH>HH>FL;(5)与FL处理相比,HH处理的氮素偏生产力与氮素农学利用率均表现为增加,而SH处理的氮素农学利用率提高,氮素偏生产力降低。因此,实现水稻产量从农户水平到高产高效水平甚至超高产水平的关键在于“增穗稳粒”,并在此基础上提升群体质量和光合能力,今后水稻高产栽培应着重于改善抽穗后群体质量和冠层结构。

关键词: 水稻; 产量水平; 群体结构; 光合特性; 产量构成; 氮素利用

中图分类号: S511.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)05-1089-08

Differences in photosynthetic characteristics and yield components of rice populations at different yield levels

YANG Hong^{1,2}, LI Xu-yi^{1,3}, QING Fa-hong⁴, YU Jun-qi¹, ZHU Cong-hua^{1,3}, LI Wei¹, LI Tian²,
CHEN Guang-yi², OU YANG Yu-yuan^{1,2,3}

(1. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3. Environment-friendly Crop Germplasm Innovation and Genetic Improvement Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610066, China; 4. Agriculture and Rural Bureau of Mianzhu, Deyang 618200, China)

收稿日期:2022-08-15

基金项目:四川省育种攻关项目(2021YFYZ0005);崇州天府优质粮油功能区高食味优质稻高产增效生产技术示范及产业化开发项目(2020-YF09-00079-SN);国家现代农业产业技术体系四川水稻创新团队项目(SCCXTD-2020-03);四川省科技计划重点研发项目(2021YFYZ0016)

作者简介:杨 洪(1998-),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事水稻高产优质栽培研究。(E-mail) yanghon222@163.com

通讯作者:欧阳裕元,(E-mail) ouyang8805@126.com

Abstract: To investigate the differences of yield components, population structure, photosynthetic characteristics and nitrogen use efficiency of rice under different yield levels, three cultivation modes of super-high-yield level (SH), high-yield and high-efficiency level (HH), and farmer production level (FL) were set up in Mianzhu and Zhongjiang, and no nitrogen fertilizer control was set up. Differences in yield, population, photosynthetic charac-

teristics and nitrogen use efficiency of rice at different yield levels were analyzed, and the factors affecting yield gap and the ways to reduce the gap were explored. The results showed that compared with FL treatment, the seed setting rate and 1 000-grain weight of HH and SH treatments increased but spikelets per panicle decreased, and the number of effective panicles increased significantly by 12.74% and 26.10%, respectively. There were significant differences in dry matter accumulation among rice varieties with different yield levels after heading. The average dry matter accumulation of two experimental sites under SH treatment was 21.98 t/hm² at maturity stage, which was 10.95% and 20.90% higher than that under HH and FL treatments. The number of tillers of rice at different yield levels was quite different. The average tiller numbers of FL, HH and SH treatments were 2.689 9×10⁶, 3.032 8×10⁶ and 3.392 1×10⁶ per hectare, respectively. The average tiller number of SH treatment was 11.85% higher than that of HH treatment, and the average tiller number of HH treatment was 12.75% higher than that of FL treatment. In general, the average leaf area index, flag leaf SPAD value, photosynthetic rate and radiation utilization rate of rice at different yield levels followed the order of SH>HH>FL. Compared with FL treatment, the nitrogen partial productivity and nitrogen agronomic efficiency of HH treatment increased, while the nitrogen agronomic efficiency of SH treatment increased and the nitrogen partial productivity decreased. Therefore, the key to achieve rice yield from the farmer level to the high-yield and high-efficiency level or even the super-high-yield level was to increase the panicle and stabilize the grain, and on this basis to improve the quality of the population and photosynthetic capacity. In the future, high-yield cultivation of rice should focus on improving the population quality and canopy structure after heading.

Key words: rice; yield level; population structure; photosynthetic characteristics; yield components; nitrogen utilization

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是中国最主要的粮食作物,改进栽培技术对水稻增产稳产及中国粮食安全意义重大。进入新世纪以来,中国水稻呈现“面积无增长,单产提高慢”的不良态势^[1]。究其原因,主要是当前农户水稻栽种水平已达产量潜力的 70% 以上,进一步提高单产需要更精细的田间管理技术^[2]。此外,中国水稻种植施氮量过高,产量提升的同时氮素利用率却显著下降^[3]。数据显示,中国氮素利用率仅为 32.3%,远低于发达国家的 40%~60%^[4]。因此,提升水稻单产的同时还面临着提升氮肥利用率的严峻挑战。良好的群体质量和光合特性是争取水稻高产的重要基础。前人研究结果表明,水稻品种^[5-6]、灌溉技术^[7-9]、氮素营养^[10-11]、栽插密度^[12-13]、植物生长调节剂^[14]及种植模式^[15-16]等因素均显著影响水稻群体质量和氮肥利用效率。说明优化栽培技术能进一步发挥水稻的产量潜力。李刚华等^[17]认为,适宜的氮肥施用量和运筹有利于构建高光效株型,提高抽穗后干物质积累。通过优化

施肥能实现产量和氮素利用效率的协同提高^[18]。秦炎等^[19]认为,合理的株行距对发挥杂交稻分蘖优势,提高冠层光合能力具有重要作用。前人从单因素对水稻生长、产量及氮素利用率影响的研究较多,然而关于多因素集成的不同产量水平间水稻群体质量、光合指标和氮素利用效率差异的研究相对较少。基于此,本试验在绵竹和中江两地,以天优华占为试验材料,设置农户水平、高产高效水平和超高产水平 3 种不同产量水平。探究不同产量水平下水稻群体质量指标的变化规律,以期为进一步提高水稻产量的途径提供理论支持和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2021 年在绵竹市孝德镇粮经复合专家大院试验基地 (N31°15', E104°13') 和中江县黄鹿镇宝塘村试验基地 (N31°14', E104°42') 进行,2 个生态点的土壤基础理化性质状况见表 1。

表 1 不同生态点土壤 (0~20 cm) 理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil (0~20 cm) in different ecological sites

地点	全氮 (g/kg)	有机质 (g/kg)	速效养分 (mg/kg)			pH	容重 (g/cm ³)
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
绵竹	1.64	24.42	63.12	9.46	70.54	6.87	1.33
中江	1.72	24.74	63.14	9.51	70.42	6.74	1.27

1.2 试验设计

试验材料选用籼型三系杂交水稻天优华占(生育期 152.9 d),试验采用随机区组设计。根据当地农户种植习惯设置农户水平(FL),并在农户水平的基础上改进栽插密度、化肥施用量和肥料运筹,建立高产高效水平(HH),结合当地高产攻关经验,设置

超高产水平(SH)。肥料运筹和种植密度详见表 2,氮肥采用普通尿素(U)和腐殖酸尿素(UHA),磷肥采用过磷酸钙,钾肥采用氯化钾,有机肥(OF)氮含量 1%。每个处理设 3 个重复,小区之间筑埂并且埂覆膜,防止串水串肥。

表 2 各处理的种植密度和肥料运筹

Table 2 Plant density and application of fertilizer in different treatments

处理	行株距 (cm)	肥料类型	用量 (kg/hm ²)	比例(%)			
				基肥	分蘖肥	促花肥	保花肥
N0	30×20	氮肥(纯 N)	0	0	0	0	0
		磷肥(P ₂ O ₅)	90	100	0	0	0
		钾肥(K ₂ O)	112.5	100	0	0	0
FL	30×20	氮肥(纯 N)	150	75(U)	25(U)	0	0
		磷肥(P ₂ O ₅)	90	100	0	0	0
		钾肥(K ₂ O)	112.5	100	0	0	0
HH	30×16	氮肥(纯 N)	165	50(U)	10(UHA)	20(UHA)	20(UHA)
		磷肥(P ₂ O ₅)	90	100	0	0	0
		钾肥(K ₂ O)	180	50	0	50	0
SH	30×14	OF	7 500	100	0	0	0
		氮肥(纯 N)	180	50(U)	10(UHA)	20(UHA)	20(UHA)
		磷肥(P ₂ O ₅)	90	100	0	0	0
		钾肥(K ₂ O)	240	50	0	25	25

N0:无氮对照;FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平;U:普通尿素;UHA:腐殖酸尿素;OF:有机肥。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量及其构成因素 选取与平均穗数相等的 10 穴植株用于调查每穗粒数、结实率和千粒质量。各处理单独测量实际产量。

1.3.2 水稻群体动态 各处理选取 12 穴,分别于苗期、拔节期、孕穗期、齐穗期和成熟期调查并记录茎蘖数。

1.3.3 干物质量 各处理分别在苗期、拔节期、孕穗期、齐穗期和成熟期选取 12 穴生长一致的植株,分成茎、叶、穗 3 部分,在 105 ℃杀青 30 min,75 ℃下烘干至恒质量并称质量。

1.3.4 叶面积指数(LAI) 分别在水稻拔节期、孕穗期、齐穗期和成熟期选取 12 穴长势相同的植株,按长×宽系数法计算叶面积,再计算叶面积指数。

1.3.5 叶绿素相对含量与光合速率 各处理分别在苗期、拔节期、孕穗期、齐穗期、成熟期选取 10 片顶叶,利用 SPAD 仪测定每片叶的上、中、下 3 个部位,取平均值。利用 GFS3000 光合仪测定水稻齐穗期(HD)、齐穗后 15 d(HD 15)齐穗后 30 d(HD 30)

完全叶的净光合速率(P_n)。

1.3.6 辐射利用率(RUE) 在晴天早上 10:30–12:30,使用 Sunscan 冠层分析仪测定各处理水稻冠层和底部的有效辐射,行、株距方向各测定 3 次,截获率=1-透光率。各生育期辐射截获量=0.5×前后生育期的截获率之和×该时期的总辐射量; $RUE(g/MJ)$ =总干物质量×各生育期辐射截获量的总和^[20]。

1.3.7 氮素利用率 氮素偏生产力(kg/kg)=施氮区籽粒产量/施氮量

氮素农学利用率(kg/kg)=(施氮区产量-无氮区产量)/施氮量

1.4 数据处理

利用 SPSS27.0 (SPSS Institute Inc. Chicago, USA)用最小显著差数法(LSD)在 $P<0.05$ 水平上进行差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同产量水平水稻产量及其构成差异

由表 3 可知,两生态点 HH 和 SH 处理的有效穗

数、结实率和千粒质量均高于 FL 处理,但每穗粒数降低。FL、HH 和 SH 处理的平均有效穗数分别为 $1\text{ hm}^2 2.690\ 0\times 10^6$ 、 $3.032\ 8\times 10^6$ 和 $3.392\ 2\times 10^6$,SH 处理较 HH 处理显著增加 11.85%,HH 处理较 FL 处理显著增加 12.74%;HH 处理和 SH 处理的平均每穗粒数、结实率和千粒质量无显著差异,与 FL 处理相比,HH 处理的每穗粒数、结实率和千粒质量分别提高了-7.28%、4.22%和 6.12%,SH 处理的每穗粒

数、结实率和千粒质量分别提高了-7.50%、4.00%和 5.65%;FL、HH 和 SH 处理的平均产量分别为 $9.92\ \text{t}/\text{hm}^2$ 、 $11.36\ \text{t}/\text{hm}^2$ 和 $12.61\ \text{t}/\text{hm}^2$ 。SH 处理较 HH 处理显著增加 11.00%,HH 处理较 FL 处理显著增加 14.52%。以上结果说明,高产高效水平处理产量的提高得益于有效穗数和千粒质量的显著提高,超高产水平处理产量的提高得益于进一步提高有效穗数和千粒质量的同时巩固每穗粒数。

表 3 不同产量水平下产量及其构成因素

Table 3 Yield and its components under different yield levels

生态点	处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm^2)	每穗粒数	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (t/hm^2)
绵竹	NO	209.83 \pm 15.98d	192.03 \pm 2.53a	86.16 \pm 2.26a	24.28 \pm 0.48b	8.44 \pm 0.36d
	FL	280.58 \pm 9.20c	190.12 \pm 3.26a	79.18 \pm 0.51b	24.05 \pm 0.19b	10.24 \pm 0.13c
	HH	311.28 \pm 18.14b	175.45 \pm 2.63b	83.12 \pm 2.55ab	26.02 \pm 0.10a	11.48 \pm 0.19b
	SH	339.17 \pm 9.34a	173.68 \pm 5.35b	83.71 \pm 2.74a	26.01 \pm 0.12a	12.62 \pm 0.24a
中江	NO	225.87 \pm 9.73c	207.30 \pm 11.17a	70.92 \pm 4.79b	24.91 \pm 0.20b	8.08 \pm 0.20d
	FL	257.41 \pm 3.66b	188.66 \pm 3.63b	79.72 \pm 0.99a	25.13 \pm 0.07b	9.60 \pm 0.25c
	HH	295.27 \pm 16.31b	175.75 \pm 1.02c	82.49 \pm 1.03a	26.17 \pm 0.48a	11.24 \pm 0.05b
	SH	339.26 \pm 25.03a	176.79 \pm 4.78bc	81.54 \pm 1.23a	25.95 \pm 0.57a	12.59 \pm 0.29a

NO:无氮水平;FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一生态点同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2 不同产量水平水稻群体结构差异

2.2.1 不同产量水平水稻群体数量 由表 4 可知,不同产量水平的水稻茎蘖数均随生育期的推进呈先增加后减少的变化趋势,并在拔节期出现峰值。随产量水平的递进,水稻茎蘖数逐步增加,成穗率明显提升,绵竹 SH 处理的成穗率显著高于 FL 处理。

如表 4 所示,在拔节期,各处理水稻茎蘖数表现

为SH>HH>FL,其中 SH 处理显著高于 FL、HH 处理。在成熟期,两生态点 FL、HH、SH 处理的平均茎蘖数分别为 $1\text{ hm}^2 2.689\ 9\times 10^6$ 、 $3.032\ 8\times 10^6$ 和 $3.392\ 1\times 10^6$,HH 处理比 FL 处理高 12.75%,SH 处理比 HH 处理高 11.85%。以上结果说明,拔节期高茎蘖数和成熟期高成穗率是实现水稻产量从农户水平向高产甚至更高产水平递进的关键。

表 4 不同产量水平水稻茎蘖动态及其成穗率

Table 4 Tiller dynamics and panicle formation rate of paddy rice under different yield levels

生态点	处理	茎蘖数 ($\times 10^4$, 1 hm^2)					茎蘖成穗率 (%)
		苗期	拔节期	孕穗期	齐穗期	成熟期	
绵竹	FL	70.22 \pm 4.30a	425.09 \pm 12.62b	371.66 \pm 11.63a	318.63 \pm 28.22a	280.58 \pm 9.20c	66.08 \pm 4.08b
	HH	75.40 \pm 2.24a	442.02 \pm 25.77b	399.63 \pm 19.79a	340.57 \pm 9.73a	311.28 \pm 18.14b	70.42 \pm 0ab
	SH	79.73 \pm 6.99a	471.62 \pm 4.60a	403.89 \pm 39.92a	363.07 \pm 42.05a	339.17 \pm 9.34a	71.93 \pm 2.61a
中江	FL	72.53 \pm 4.58a	408.67 \pm 11.40b	306.06 \pm 32.04b	261.44 \pm 20.69b	257.41 \pm 3.66c	63.10 \pm 3.52a
	HH	77.81 \pm 3.21a	432.96 \pm 10.20b	378.72 \pm 27.68a	328.29 \pm 10.31a	295.27 \pm 16.31b	68.36 \pm 6.01a
	SH	78.79 \pm 4.38a	477.93 \pm 12.49a	423.15 \pm 11.84a	359.26 \pm 30.54a	339.26 \pm 25.03a	70.94 \pm 4.07a

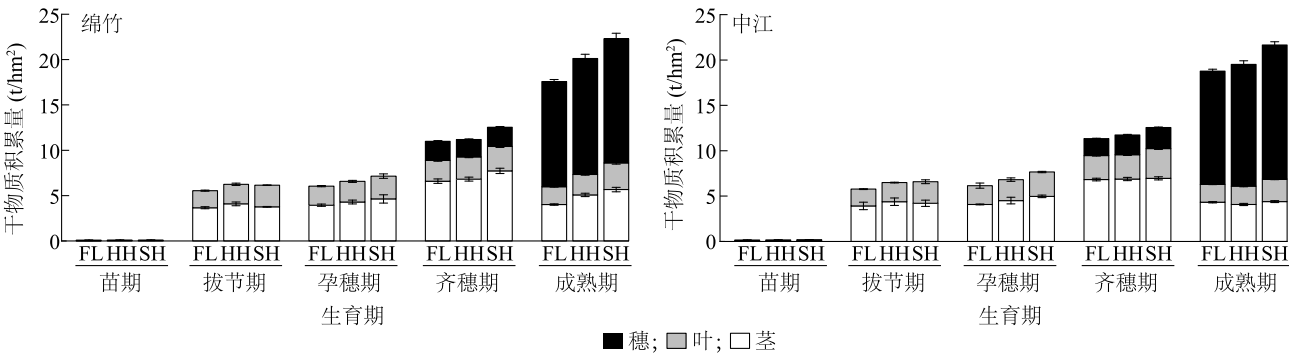
FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一生态点同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2.2 不同产量水平水稻干物质积累量 由图 1 可知,水稻干物质积累量随生育进程的推进逐渐增加,各处理不同产量水平之间表现为SH>HH>FL,不同生态点间变化趋势一致。两生态点 SH 处理成熟

期的平均干物质积累量为 $21.98\ \text{t}/\text{hm}^2$,较 HH 处理高出 10.95%,HH 处理成熟期的平均干物质积累量为 $19.82\ \text{t}/\text{hm}^2$,较 FL 处理高出 8.97%。绵竹 SH 处理抽穗后(齐穗期-成熟期)干物质积累量为 7.54

t/hm²,比 HH、FL 处理分别提高 5.97%、51.01%。中江 SH 处理抽穗后干物质积累量为 6.40 t/hm²,比 HH 和 FL 处理分别提高 20.44% 和 33.36%。以上

结果表明,高产高效水平和超高产水平处理产量的提高与抽穗后干物质积累量的增加密切相关。



FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。

图1 不同产量水平水稻干物质积累动态

Fig.1 Dynamics of dry matter accumulation in rice at different yield levels

2.2.3 不同产量水平水稻叶面积指数 由表 5 可知,两生态点的叶面积指数的变化趋势一致,整体表现为随生育期的推进呈先上升后下降的变化趋势,并在齐穗期达到峰值。两生态点的 HH 和 SH 处理均提高了水稻的叶面积指数,绵竹生态点 HH 和 SH 处理花后叶面积指数衰减率显著低于 FL 处理,中江生态点 SH 处理花后叶面积指数衰减率略高于 FL

处理,但差异不显著。在齐穗期,SH 处理的平均叶面积指数比 HH 处理高 7.08%,HH 处理较 FL 处理高 4.75%。在成熟期,SH 处理的平均叶面积指数较 HH 处理高 8.31%,HH 处理较 FL 处理高 7.84%。以上结果说明,提高齐穗期和成熟期叶面积指数,同时保持较低的叶面积指数衰减率是水稻高产的关键。

表 5 不同产量水平水稻叶面积指数

Table 5 Leaf area index of rice at different yield levels

生态点	处理	叶面积指数				花后叶面积 指数衰减率
		拔节期	孕穗期	齐穗期	成熟期	
绵竹	FL	5.69±0.17a	6.25±0.85a	7.52±0.16a	4.30±0.16c	0.09±0.01a
	HH	5.74±0.33a	6.27±0.51a	7.59±0.20a	4.89±0.16b	0.08±0.01b
	SH	5.86±0.06a	6.39±0.18a	7.80±0.19a	5.26±0.20a	0.07±0.01b
中江	FL	4.83±0.12b	5.32±0.27b	7.26±0.16b	4.63±0.10b	0.08±0.01ab
	HH	5.83±0.11a	6.07±0.22a	7.38±0.14b	4.74±0.13b	0.08±0ab
	SH	6.08±0.54a	6.40±0.24a	8.23±0.20a	5.17±0.13a	0.09±0a

FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一生态点同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

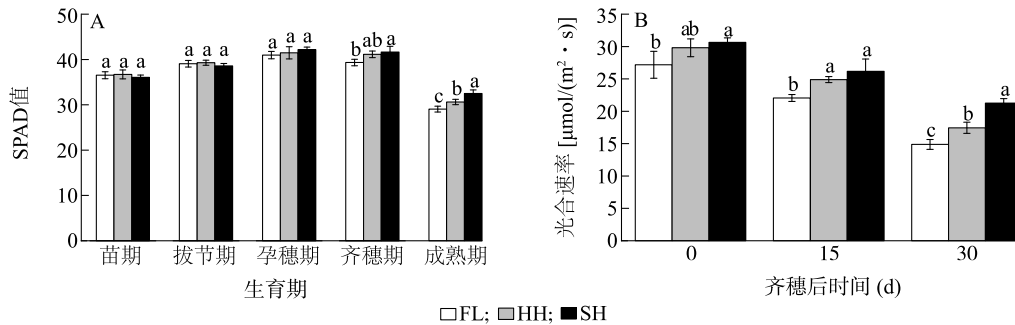
2.2.4 不同产量水平水稻叶绿素相对含量和光合速率 由图 2A 可知,不同产量水平水稻叶绿素相对含量随生育期的推进表现为先上升后下降的变化趋势,且均在孕穗期达到峰值。在齐穗期前,不同产量水平处理间叶绿素相对含量无明显差异,从齐穗期开始差异明显,各处理表现为SH>HH>FL。齐穗期 HH 和 SH 处理 SPAD 值比 FL 处理分别高出 4.60% 和 5.88%,成熟期分别高出 5.43% 和 11.88%。光合速

率的变化趋势与叶绿素相对含量一致(图 2B),从齐穗期(齐穗后 0 d)到齐穗后 30 d,始终以 SH 处理的光合速率最高,其次为 HH 处理;在齐穗后 15 d 和 30 d,HH 处理的光合速率比 FL 处理分别显著增加了 12.88% 和 17.27%;在齐穗期至成熟期 SH 处理的光合速率均显著高于 FL 处理。

2.2.5 不同产量水平水稻辐射截获量 由表 6 可知,不同产量水平水稻的辐射截获量表现为随生育进程的

推进呈先快速上升后缓慢下降的变化趋势,其中拔节期-齐穗期的辐射截获量最高。除移栽-分蘖期外,其余阶段的辐射截获量均以 SH 处理最高,FL 处理最低。

比较齐穗期-成熟期的辐射截获量发现,随产量水平递进,辐射截获量显著上升。以上结果说明,HH 和 SH 处理显著提升了水稻生育后期对光能的捕获能力。



FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一时期或同一齐穗后时间不同一产量水平处理间不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同产量水平水稻 SPAD 值和光合速率变化

Fig.2 Changes of SPAD value and photosynthetic rate of rice at different yield levels

表 6 不同产量水平水稻群体辐射截获量

Table 6 Radiation interception of rice population at different yield levels

处理	移栽-分蘖期 (MJ/m ²)	分蘖期-拔节期 (MJ/m ²)	拔节期-齐穗期 (MJ/m ²)	齐穗期-成熟期 (MJ/m ²)
FL	11.36±2.01 ^b	140.19±8.11 ^c	566.94±41.75 ^a	471.26±2.92 ^c
HH	14.02±1.18 ^a	176.96±9.67 ^b	577.96±27.36 ^a	499.93±9.82 ^b
SH	11.65±0.94 ^{ab}	200.17±2.70 ^a	610.55±13.01 ^a	551.96±14.37 ^a

FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2.6 不同产量水平水稻辐射截获率和利用率

由表 7 可知,不同产量水平水稻的辐射截获率随生育进程的推进表现为先上升后下降的变化趋势,并在齐穗期达到峰值。HH 处理的辐射利用率较 FL

处理提高了 5.34%,SH 处理的辐射利用率比 HH 处理提高了 21.74%。以上结果说明,水稻实现高产到超高产的突破与辐射利用率的提高密切相关。

表 7 不同产量水平水稻群体截获率和辐射利用率

Table 7 Interception rate and radiation utilization rate of rice population at different yield levels

处理	截获率(%)					辐射利用率 (g/MJ)
	苗期	拔节期	孕穗期	齐穗期	成熟期	
FL	11.49±2.03 ^a	46.96±1.39 ^c	73.10±10.00 ^{ab}	96.50±2.06 ^a	85.55±3.12 ^a	1.31±0.05 ^b
HH	13.82±1.16 ^a	53.27±3.11 ^b	76.57±6.26 ^a	97.07±2.60 ^a	83.92±2.72 ^a	1.38±0.13 ^{ab}
SH	13.65±1.10 ^a	57.58±0.56 ^a	81.65±2.29 ^a	97.17±2.37 ^a	89.22±3.37 ^a	1.68±0.22 ^a

FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2.7 不同产量水平水稻氮素利用率 由表 8 可知,不同产量水平水稻的氮素偏生产力表现为HH>FL>SH,两生态点之间差异程度不一。绵竹生态点 FL 处理和 HH 处理之间的氮素偏生产力差异不明显,两者比 SH 处理分别显著高出 37.97%和 40.60%。中江生态点,HH 处理比 FL 和 SH 处理分

别显著增加 6.47%和 37.92%,FL 处理比 SH 处理显著提高 29.54%。不同产量水平水稻的氮素农学利用率表现为HH>SH>FL,FL、HH 和 SH 处理 2 个生态点的平均氮素农学利用率分别为 11.06 kg/kg、18.76 kg/kg和 17.05 kg/kg。其中,HH 和 SH 处理比 FL 处理分别提高了 69.62%和 54.16%。

表 8 不同产量水平氮素利用效率
Table 8 Nitrogen use efficiency at different yield levels

生态点	处理	氮素偏生产力 (kg/kg)	氮素农学利用率 (kg/kg)
绵竹	FL	68.27±0.89a	12.03±3.27b
	HH	69.57±1.15a	18.44±1.13a
	SH	49.48±0.95b	16.40±2.11ab
中江	FL	63.98±1.65b	10.09±2.83b
	HH	68.12±0.28a	19.13±1.40a
	SH	49.39±1.14c	17.69±1.89a

FL:农户水平;HH:高产高效水平;SH:超高产水平。同一生态点同一列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

3.1 不同产量水平水稻产量的差异分析

水稻产量受各产量构成因素的共同调控,协调产量构成因素是取得高产的关键。前人关于产量构成因素的研究结论不尽相同,郑华斌等^[21]认为,高产栽培水稻的单位面积有效穗数显著增加,但每穗粒数根据品种特性呈现不同程度减少。提升有效穗数的同时兼顾每穗粒数是水稻高产的关键^[22-23]。以上结论的差异主要集中在每穗粒数,可能是由于品种和环境因素导致。如杨建昌所选用的品种均为粳稻,与郑华斌选用的杂交籼稻在株型、每穗粒数和结实率等方面均存在明显差异。本研究中,随产量水平的递进,有效穗数呈显著增加的趋势。从 FL 处理到 HH 处理,每穗粒数显著降低,HH 处理和 SH 处理之间无明显差异,这与郑华斌结论一致。因此,结合前人结论,水稻产量从农户水平递进至高产高效水平主要依靠有效穗数的增加,从高产高效水平递进至超高产水平主要在于保证每穗粒数的基础上进一步增加有效穗。

3.2 不同产量水平水稻群体特性的差异分析

抽穗后的光合产物是水稻灌浆过程中最主要的物质来源^[24]。凌启鸿等^[25-26]指出,水稻生育后期干物质积累与产量密切相关,抽穗后的干物质积累量约为全生育期干物质积累量的 40%。本研究中,不同产量水平水稻间的干物质积累在生育前期无明显差异,在抽穗后差异显著,表现为随产量水平的递进显著上升,这表明提高抽穗后干物质积累是实现高产的关键因素。从干物质转运来看,随着产量水平递进,叶部干物质积累逐渐增加,向穗部的转运比例有所降低。关于抽穗后干物质生产效率和转运规律的变化可能与光合源和光合质量协同提高和辐射利用率增加有关。

叶片是光合产物的主要合成部位^[27-29],叶面积指数和叶绿素含量代表了光合源的多少,光合速率则体现了光合源的质量^[30-33]。本研究中,HH 和 SH 处理的叶面积指数、叶绿素含量和光合速率均高于 FL 处理,在齐穗期至成熟期尤为明显。说明叶片光合能力的改善有利于提高干物质生产效率。

辐射利用率反应水稻对太阳辐射的吸收和转化能力,认为水稻辐射利用率越高产量越高^[34-37]。本研究中,各产量水平水稻的辐射截获量、截获率和利用率总体上均表现为 SH>HH>FL。说明水稻对太阳辐射的截获与转化能力和高产密切相关。进一步对成熟期干物质和辐射利用进行相关分析得出,干物质积累与辐射截获量、辐射截获率和辐射利用率均呈密切正相关(相关系数分别为 0.990、0.969、0.949)。这提示我们在水稻生产中应注重优化栽培措施来获取更高的温光资源,同样是提高产量的重要一环。

3.3 不同产量水平水稻氮素利用率的差异分析

氮是叶绿素的重要组成部分,同时和生态环境及生产效益密切相关^[38]。因此,合理施氮有利于协调水稻生产和生态环境之间的矛盾。本研究结果表明,HH 处理的氮素偏生产力明显提升,但 SH 处理的氮素偏生产力却显著低于 FL 处理。从氮素农学利用率看,各产量水平处理间表现为 HH>SH>FL。FL 处理氮素利用率较低可能是由于基肥比例过高,导致大部分氮肥未被及时吸收,通过硝化、淋溶等途径散失。HH 和 SH 处理通过氮肥后移有效避免了以上问题。SH 处理的利用率虽然显著高于 FL 处理,但也明显低于 HH 处理,这可能与前者较高的氮肥投入量有关。以上结果表明,通过合理的肥料运筹,有助于实现水稻高产与绿色协同。

4 结论

不同产量水平水稻在产量构成因素、群体特性和氮素利用效率等方面存在显著差异。从农户水平到高产高效水平和超高产水平,增产的核心为“增穗稳粒”扩大库容。表现为中后期群体光合生产能力增强,生物产量提高;增效机制为水稻氮素利用率和太阳辐射利用率协同提高,最终实现生物产量和收获指数协同提高。

参考文献:

[1] 王 彤,阙补超,夏 明,等. 水稻产量和品质的研究进展[J].

- 北方水稻,2017,47(2): 51-55.
- [2] VAN-WART J, CHRISTIAN-KERSEBAUM K, PENG S B, et al. Estimating crop yield potential at regional to national scales[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143: 34-43.
- [3] YU Y Q, HUANG Y, ZHANG W. Changes in rice yields in China since 1980 associated with cultivar improvement, climate and crop management[J]. *Field Crops Research*, 2012, 136: 65-75.
- [4] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [5] 钱银飞,张洪程,李杰,等. 不同穗型水稻品种直播产量及其群体质量特征的研究[J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30(5): 766-772.
- [6] LIU Q Y, CHEN S, ZHOU L, et al. Characteristics of population quality and rice quality of semi-waxy japonica rice varieties with different grain yields[J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): 241.
- [7] 武云霞,郭长春,孙永健,等. 水氮互作下直播稻群体质量与氮素利用特征的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 899-908.
- [8] 张自常,徐云姬,褚光,等. 不同灌溉方式下的水稻群体质量[J]. *作物学报*, 2011, 37(11): 2011-2019.
- [9] YAN J, YU J, TAO G C, et al. Yield formation and tillering dynamics of direct-seeded rice in flooded and non-flooded soils in the Huai River Basin of China[J]. *Field Crops Research*, 2010, 116: 252-259.
- [10] 曾勇军,石庆华,潘晓华,等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(8): 1409-1416.
- [11] 宋晓华,柳楷婧,彭波,等. 施氮水平对豫南地区杂交粳稻群体质量和产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2019, 34(4): 39-43.
- [12] TIAN C, ZHOU X, LIU Q, et al. Increasing yield, quality and profitability of winter oilseed rape (*Brassica napus*) under combinations of nutrient levels in fertilizer and planting density[J]. *Crop & Pasture Science*, 2020, 71(12): 11-12.
- [13] 张荣萍,戴红燕,蔡光泽,等. 不同栽插密度对有色稻产量和群体质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(16): 123-127.
- [14] 翟孝勋. 多效唑在水稻群体质量控制中的作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [15] 房辉,周江鸿,王云月,等. 优化水稻群体种植模式与稻瘟病控制研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5): 916-924.
- [16] HUANG M, ZOU Y B, JIANG P, et al. Effect of tillage on soil and crop properties of wet-seeded rice[J]. *Field Crops Research*, 2012, 129: 28-38.
- [17] 李刚华,张国发,陈功磊,等. 超高产常规粳稻宁梗1号和宁梗3号群体特征及对氮的响应[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1106-1114.
- [18] ZHOU B Y, SUN X F, DING Z S, et al. Multisplit nitrogen application via drip irrigation improves maize grain yield and nitrogen use efficiency[J]. *Crop Science*, 2017, 57: 1687-1703.
- [19] 秦炎,秦亚平. 种植密度对水稻群体质量和产量形成的影响[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(12): 2222-2225.
- [20] 张恒栋,黄敏,单双吕,等. 机插条件下不同米粉稻品种产量形成特点与辐射利用率比较[J]. *中国稻米*, 2017, 23(4): 63-66.
- [21] 郑华斌,李波,王慰亲,等. 不同栽培模式对“早籼晚粳”双季稻光氮利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(7): 1565-1578.
- [22] 薛亚光,葛立立,王康君,等. 不同栽培模式对杂交粳稻群体质量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 280-291.
- [23] 杨建昌,杜永,吴长付,等. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1336-1345.
- [24] VENKATESWARLU B, VISPERAS R M. Source-sink relationships in crop plants[J]. *International Rice Research Paper Series*, 1987, 125: 1-19.
- [25] 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.
- [26] 凌启鸿,张洪程,丁艳峰. 水稻丰产高效技术及理论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] 叶威,李强,陈颖,等. 雌、雄株和金叶银杏光合生理及黄酮成分年动态变化研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 77-86.
- [28] 王东清,温学飞. 留茬高度对小叶锦鸡儿叶片部分光合指标及土壤水分的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(6): 47-57.
- [29] 徐展宏,朱莹,金慧颖,等. 不同叶色青钱柳叶片色素、多酚含量及光合特性的差异[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 103-110.
- [30] 徐新刚,赵春江,王纪华,等. 新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 188-191.
- [31] 韩康顺,商全玉,韩亚东,等. 不同施肥水平对水稻 9741 物质生产和冠层特性及产量的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2010(4): 12-18.
- [32] CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using lands at TM images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [33] 赵明,李少昆,王志敏,等. 论作物源的数量、质量关系及其类型划分[J]. *中国农业大学学报*, 1998, 3(3): 53-58.
- [34] 汤亮,朱相成,曹梦莹,等. 水稻冠层光截获、光能利用与产量的关系[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1269-1276.
- [35] 段斌,宋世枝,何世界,等. 信阳地区粳稻晚播气候资源利用率分析[J]. *中国稻米*, 2016, 22(6): 42-45.
- [36] 李迪秦,唐启源,秦建权,等. 施氮量与氮管理模式对超级稻产量和辐射利用率影响[J]. *核农学报*, 2010, 24(4): 809-814.
- [37] 何虎,曾勇军,贾维强,等. 栽插密度对天优华占辐射利用及产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(4): 65-70.
- [38] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1456-1461.

(责任编辑:成纾寒)