

引用格式:

周文涛, 龙文飞, 戈家敏, 龙攀, 徐莹, 傅志强. 增密减氮对双季稻光合特性及水分利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 1-7.

ZHOU W T, LONG W F, GE J M, LONG P, XU Y, FU Z Q. Effects of density increasing and nitrogen reducing on photosynthetic characteristics and water use efficiency of double cropping rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(1): 1-7.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



增密减氮对双季稻光合特性及水分利用率的影响

周文涛^{1,2,3}, 龙文飞^{1,2,3}, 戈家敏^{1,2,3}, 龙攀^{1,2,3}, 徐莹^{1,2,3}, 傅志强^{1,2,3*}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.作物生理与分子生物学教育部重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3.农业部华中地区作物栽培科学观测实验站, 湖南 长沙 410128)

摘要:以陆两优 996(早稻)和丰源优 299(晚稻)为供试材料,在“早蓄晚灌”节水条件下,设置常规施氮处理(CK)、不施氮处理(N₀)和 3 个增密减氮处理(IR₁、IR₂、IR₃),早稻的 IR₁、IR₂、IR₃ 的施氮量分别为 103.2、86.4、69.6 kg/hm², 栽植密度分别 3.2×10⁵、3.6×10⁵、4.0×10⁵ 株/hm²;晚稻的 IR₁、IR₂、IR₃ 的施氮量分别为 129、108、87 kg/hm², 栽植密度分别为 2.8×10⁵、3.2×10⁵、3.6×10⁵ 株/hm², 探索增密减氮对双季稻光合特性、水分利用效率的影响。结果表明:在早、晚稻的孕穗期、齐穗期,IR₃ 处理的叶绿素相对含量(SPAD)均高于其他处理;分蘖期的净光合速率(Pn)大于乳熟期的,孕穗、乳熟期 IR₃ 的 Pn 明显高于其他处理;早稻分蘖、孕穗、齐穗期以及晚稻孕穗、齐穗期的 SPAD 值均与产量呈显著正相关;早、晚稻孕穗期的气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)与产量呈显著正相关性;分蘖期的蒸腾速率(Tr)与产量呈显著负相关。与常规施肥和种植密度处理相比,增密减氮 IR₃ 处理既能提高 SPAD 值和 Pn,又可显著提高水分利用效率。

关键词: 双季稻; 节水栽培; 增密减氮; 光合特性; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S511.044

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)01-0001-07

Effects of density increasing and nitrogen reducing on photosynthetic characteristics and water use efficiency of double cropping rice

ZHOU Wentao^{1,2,3}, LONG Wenfei^{1,2,3}, GE Jiamin^{1,2,3}, LONG Pan^{1,2,3}, XU Ying^{1,2,3}, FU Zhiqiang^{1,2,3*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Key Laboratory of Crop Physiology and Molecular Biology, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Ministry of Education, Scientific Observation and Experimental Station of Crop Cultivation in Central China, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Luliangyou 996(early rice) and Fengyuanyou 299(late rice) were selected for field experiment to investigate the planting parameters(water saving, density increasing and nitrogen reducing) effects on photosynthetic characteristics, yield correlation and water use efficiency of double cropping rice. Under the water-saving condition of “early storage and late irrigation”, conventional fertilizer density(CK) and normal density without nitrogen fertilizer(N₀), densification and nitrogen reduction(IR₁,IR₂,IR₃) were set up for this study. For early rice, the nitrogen application rates of IR₁, IR₂ and IR₃ were 103.2, 86.4 and 69.6 kg/hm², respectively, and the planting densities were 3.2 × 10⁵, 3.6 × 10⁵ and 4.0 × 10⁵ plants/hm², respectively. In late rice, the nitrogen application rates of IR₁, IR₂ and IR₃ were 129, 108 and 87 kg/hm², respectively. The planting densities were 2.8 × 10⁵, 3.2 × 10⁵ and 3.6 × 10⁵ plants/hm², respectively. The results showed that chlorophyll relative content(SPAD) of IR₃ treatment was higher than that of other treatments at booting stage and full

收稿日期: 2020-09-08

修回日期: 2021-12-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0301003)

作者简介: 周文涛(1996—),女,湖南永州人,硕士研究生,主要从事作物高产高效栽培研究,1250171795@qq.com; *通信作者,傅志强,博士,教授,主要从事多熟制种植模式优化与碳氮循环研究, zqf_cis@126.com

heading stage of the early and late rice. The net photosynthetic rate(Pn) at tillering stage was higher than that at milking stage, and the Pn of IR₃ at booting and milking stage was higher than that of other treatments. There was a significant positive correlation between yield and SPAD in tillering, booting and full heading stage of early rice and booting and full heading stage of late rice. And, Gs and Ci at booting stage of early and late rice were significantly positively correlated with yield. Tr at tillering stage was significantly negatively correlated with yield. Compared with conventional fertilizer density treatment, densification and nitrogen reduction IR₃ treatment could not only increase SPAD and Pn, but also significantly improve water use efficiency.

Keywords: double cropping rice; water saving cultivation; density increasing and nitrogen reducing; photosynthetic characteristics; yield; water use efficiency

适宜的施肥水平和种植密度是水稻栽培高产、高效的重要因素^[1-2]。农田生态系统氮素的转化效率与氮肥的投入极其相关^[3]。过度的施用氮肥会造成资源浪费和环境污染^[4]。高密度种植会增加群体内部个体对光温资源以及养分的竞争,导致单株地上部分干物质积累量减小,植株容易倒伏且病虫害发生频繁^[5]。合理的种植密度,配合减氮种植手段,可以达到水稻高产、稳产的目的^[6-8]。适度增密减氮不仅有利于氮肥高效利用和温室气体减排,还可兼顾水稻高产^[9-10]。有研究^[11]表明,适中密度和适宜施氮量可以增加有效分蘖,促进水稻拔节,提高群体光合势、生长率和产量。

研究^[12]表明,水稻剑叶是向穗部输送光合产物的主要供应者。水稻90%以上的生物量来自光合产物,其中90%以上的光合产物又是依靠叶片的光合作用产生的^[13]。合理的施肥和密度措施,对净光合速率、气孔导度影响显著^[8]。氮肥、种植密度互作可以提高水稻生育前期与后期的光合作用,维持生育中期光合作用大小,从而提高经济产量^[14]。以往研究^[15-16]都趋向探究氮肥、密度互作对水稻光合特性、产量、氮肥利用率的影响,对“早蓄晚灌”(早稻小区蓄的水用于晚稻灌溉)节水背景下,增密减氮与双季稻的光合特性、水分利用效率、产量相关性研究较少。本研究中,根据当地的施肥和种植习惯,设置5个处理,通过减少蘖肥,增加单位面积水稻穴数的方式,探究最佳施肥与种植密度组合,以达到水稻高产稳产、水分高效利用的目的。

1 试验地概况

试验于2016年在湖南省浏阳市沿溪镇科研试验基地(113.49°E, 28.18°N)进行。该基地海拔高度

44.9 m,年平均温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$,积温5300~6500 $^{\circ}\text{C}$,年降水量约1400 mm,为南方典型的双季稻生产区。试验田土壤为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土,其耕前理化性状为:碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为142.51、53.11、97.06 mg/kg,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为33.17、2.39、0.63、7.11 g/kg, pH 5.85。

2 材料与方法

2.1 供试材料

早稻陆两优996种子和晚稻丰源优299种子均购于湖南金色农丰种业有限公司。

2.2 试验设计

试验设不施氮处理(N₀)、3个增密减氮处理(IR₁、IR₂、IR₃)和对照(CK),随机区组设计。3次重复。小区面积25 m²。各小区间用田埂分开,田埂覆膜以防肥水串灌。每个小区单独排灌。早、晚稻小区设计、移栽方式等均一致。蘖肥于插秧后5 d施入。穗肥分2次施入,第1次在幼穗分化时期施用;第2次在移栽35 d后晒田5 d,灌水后施入。灌浆后蓄水,保持“寸水”左右,其余时期采用薄水层(10~20 mm)与无水层相间的灌水方式。早晚稻磷钾肥施入量为:过磷酸钙750 kg/hm²,氯化钾201 kg/hm²。磷肥作蘖肥一次性施入,钾肥中蘖肥、穗肥的施用比例为5:5。所有处理磷、钾肥施用方法一致。氮肥施用和栽植密度如下。

早稻:CK,施氮量120 kg/hm²,蘖肥84 kg/hm²,密度 2.8×10^5 株/hm²; IR₁,施氮量103.2 kg/hm²,蘖肥67.2 kg/hm²,密度 3.2×10^5 株/hm²; IR₂,施氮量86.4 kg/hm²,蘖肥50.4 kg/hm²,密度 3.6×10^5 株/hm²; IR₃,施氮量69.6 kg/hm²,蘖肥33.6 kg/hm²,密度 4.0×10^5 株/hm²; N₀,不施氮,密度及其他管理同CK。

晚稻:CK,施氮量 150 kg/hm², 蘖肥 105 kg/hm², 密度 2.4×10⁵ 株/hm²; IR₁, 施氮量 129 kg/hm², 蘖肥 84 kg/hm², 密度 2.8×10⁵ 株/hm²; IR₂, 施氮量 108 kg/hm², 蘖肥 63 kg/hm², 密度 3.2×10⁵ 株/hm²; IR₃, 施氮量 87 kg/hm², 蘖肥 42 kg/hm², 密度 3.6×10⁵ 株/hm²; N₀, 不施氮, 密度及其他管理同 CK 处理。

2.3 观测指标与方法

2.3.1 叶绿素相对含量的测定

在水稻主要生育期的晴天 09:00—11:30, 每个小区选取具有代表性的 10 片叶, 利用 SPAD-502 叶绿素仪(日本柯尼卡美能达)测量叶片基部、中部、尖部的叶绿素相对含量(SPAD 值), 分蘖期和孕穗期测倒 2 叶, 齐穗(抽穗)期和乳熟期测剑叶, 计算平均值。

2.3.2 光合速率和水分利用效率(WUE)的测定

在水稻主要生育期的晴天 09:00—11:30, 每个小区选取具有代表性的 5 片叶, 采用 LI-6400XT 光合测量仪测定分蘖期和孕穗期倒 2 叶、齐穗(抽穗)期和乳熟期剑叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr), 并计算水分利用效率(WUE)。

$$WUE=Pn/Tr \quad (1)$$

2.3.3 产量的测定

在水稻成熟期, 每个小区内收割 2 m² 范围内的

水稻(移栽后作好标记, 为测产区域), 用小型脱粒机脱粒后晒干, 称其质量。从中取少量谷粒, 75 °C 烘至恒重, 称重, 并测定其含水率。根据公式(2)计算供试品种的标准产量^[17]。

$$RY=DW/(1-0.14) \quad (2)$$

式中: RY 表示稻谷标准产量; DW 表示稻谷烘干质量; 0.14 为籼稻品种的标准含水率(适合仓库存储的含水率)。

2.4 数据处理与分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据统计分析; 采用新复极差法(Duncan)进行多重比较; 采用 Pearson 法进行相关性分析; 采用 Excel 2003 绘图。

3 结果与分析

3.1 增密减氮对双季稻光合特性的影响

3.1.1 增密减氮对双季稻叶绿素含量的影响

从表 1 可知, 早稻 CK、IR₁、IR₂、IR₃ 的叶绿素相对含量(SPAD 值)在分蘖到齐穗过程中不断升高, 到乳熟期下降; 各生育期 N₀ 的 SPAD 值不断下降且均小于其他处理。在分蘖期、孕穗期、齐穗期 IR₃ 的 SPAD 值均大于其他处理的, 较 CK 的分别高 2.55%、2.57%、1.47%。在乳熟期 IR₁、CK、IR₂、IR₃、N₀ 的 SPAD 值依次降低。

表 1 不同生育时期水稻各处理的 SPAD 值

Table 1 SPAD values of each treatment at different stages

季别	处理	SPAD 值			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	乳熟期
早稻	IR ₁	(39.83±0.19)b	(41.78±0.32)a	(42.68±0.32)ab	(41.63±0.83)a
	IR ₂	(40.32±0.35)a	(41.57±0.01)a	(42.25±0.16)b	(40.68±0.08)ab
	IR ₃	(40.58±0.28)a	(41.90±0.20)a	(42.80±0.20)a	(40.27±0.74)b
	CK	(39.57±0.08)b	(40.85±0.33)b	(42.18±0.38)b	(41.02±0.90)ab
	N ₀	(39.03±0.03)c	(38.65±0.19)c	(37.18±0.31)c	(35.02±0.28)c
晚稻	IR ₁	(38.78±0.30)ab	(39.13±0.81)bc	(43.12±0.64)a	(42.07±0.85)a
	IR ₂	(40.00±0.93)a	(41.18±0.91)a	(44.00±0.34)a	(42.00±1.63)a
	IR ₃	(38.68±0.95)ab	(41.47±0.81)a	(44.35±0.79)a	(41.53±0.82)a
	CK	(38.58±0.63)b	(40.30±0.36)ab	(43.67±0.60)a	(42.62±0.86)a
	N ₀	(38.43±0.50)b	(38.08±0.96)c	(37.03±0.71)b	(36.30±0.62)b

同季水稻同列数据不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

晚稻各个生育时期, 水稻植株叶片 SPAD 值的变化趋势与早稻的基本相同, 但晚稻 SPAD 值的增长程度稍高, 峰值点较早稻高 1.55。在分蘖期, 以 IR₂

的最高, 增密减氮处理的 SPAD 值均高于 CK 的; 在孕穗期、齐穗期, 以 IR₃ 的最高, 较 CK 分别高 2.90%、1.56%; 在乳熟期, CK 的 SPAD 值最高,

N_0 的最低。综上所述,早、晚稻增密减氮处理的 SPAD 值均较高,施氮处理比不施氮处理的 SPAD 值高。

3.1.2 增密减氮对双季稻净光合速率的影响

由图 1 可知,早稻在整个生育时期每个处理的净光合速率(Pn)随生育进程呈逐渐下降的趋势,乳熟期的 Pn 最低。在分蘖期 IR_3 的 Pn 明显高于其他处理的, N_0 与 IR_1 、 IR_2 的差异不显著, IR_1 的最低。在孕穗期 IR_3 的 Pn 最高, CK 与 N_0 、 IR_1 与 IR_2 的差异不显著;在齐穗期 CK、 IR_3 、 IR_1 、 N_0 、 IR_2 的 Pn

依次降低,其中 N_0 与 IR_1 、 IR_2 差异不显著;在乳熟期 IR_3 的 Pn 显著高于其他 4 个处理的,分别较 CK、 IR_1 、 IR_2 、 N_0 高 8.4%、37.9%、29.38%、12.08%, IR_1 与 IR_2 的 Pn 差异不显著。

晚稻各处理的植株叶片 Pn 在分蘖期最高,孕穗期最低。在分蘖期 CK 的 Pn 最高, IR_2 的最低, IR_1 、 IR_3 、 N_0 的差异不显著;在孕穗期各处理之间差异明显, IR_3 、 N_0 、 IR_1 、CK、 IR_2 的 Pn 依次降低;在齐穗期、乳熟期均以 IR_3 的 Pn 最高。

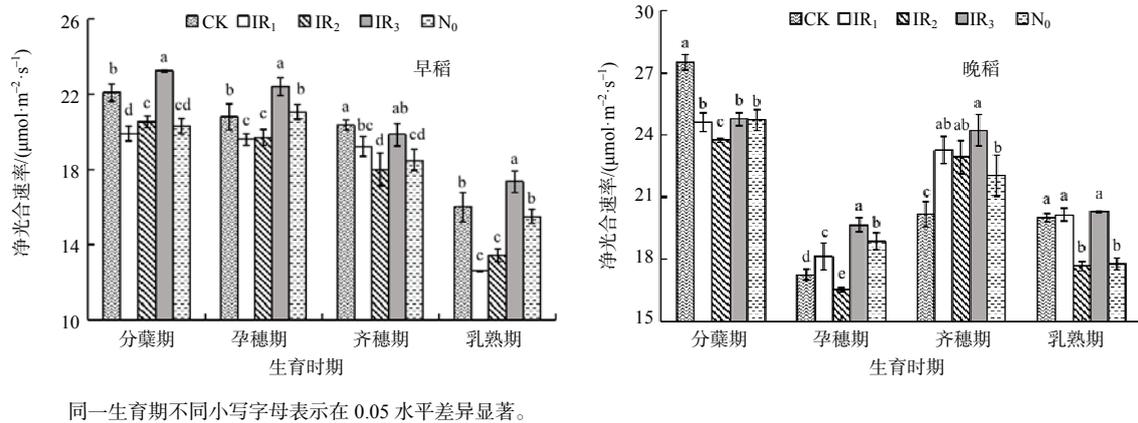


图 1 早、晚稻不同生育期的净光合速率

Fig.1 Net photosynthetic rate at different growth stages of early rice and late rice

3.1.3 增密减氮对双季稻气孔导度的影响

从图 2 可知,早稻各处理的气孔导度(Gs)在乳熟期最低,孕穗期最高。分蘖期以 CK 的 Gs 最高, IR_3 的最低, IR_2 与 N_0 的 Gs 差异不显著;孕穗期、齐穗期均以 IR_1 的气孔导度最高, CK、 IR_2 和 IR_3 的差异均不显著;乳熟期 IR_3 、 N_0 的差异不显著,但明显高于 IR_1 、 IR_2 。

在全生育时期晚稻各处理的 Gs 随生育进程呈逐渐下降的趋势。分蘖期、孕穗期 CK 的 Gs 最高;3 个增密减氮处理以 IR_2 的 Gs 最高; N_0 的 Gs 在分蘖期仅次于 CK 的,在孕穗期为最低。齐穗期 IR_3 的 Gs 最高,与 IR_1 差异不显著, N_0 的最低;乳熟期仍以 IR_3 的 Gs 最高, CK、 IR_1 、 IR_2 、 N_0 的差异不显著。

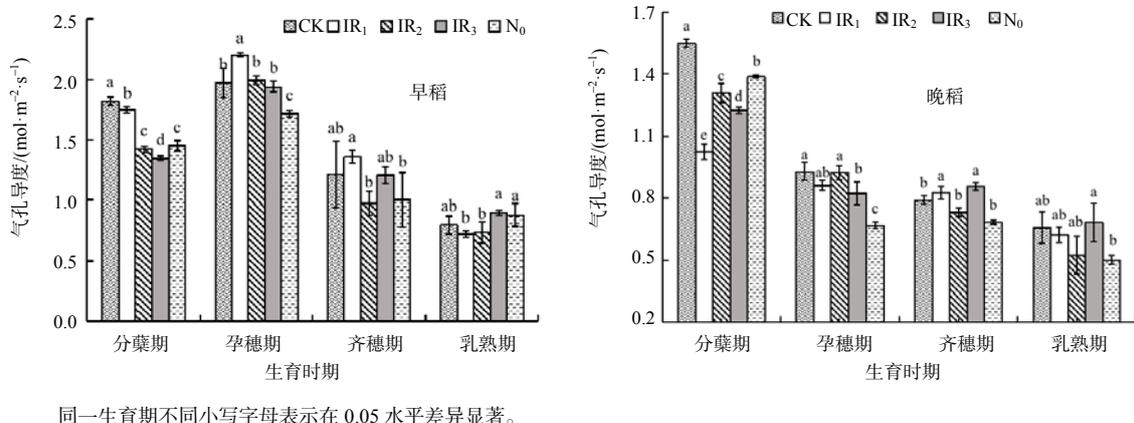


图 2 早、晚稻不同生育期的气孔导度

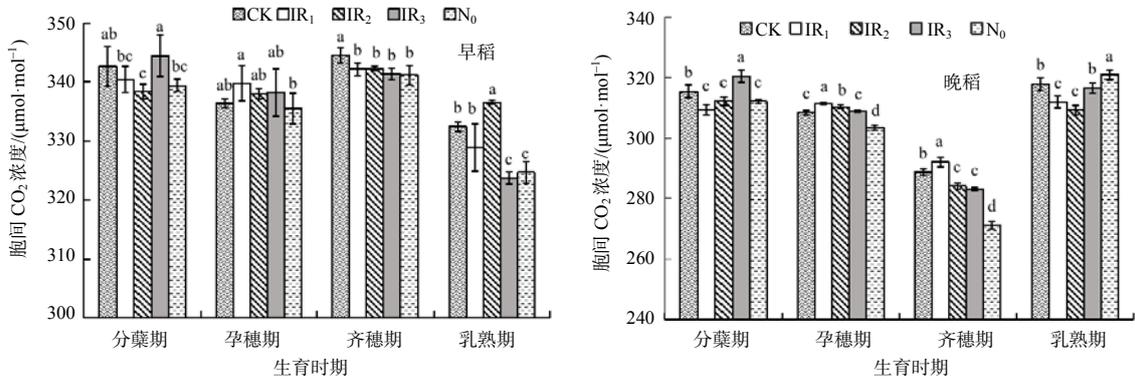
Fig.2 Conductance to H_2O at different growth stages of early rice and late rice

3.1.4 增密减氮对双季稻胞间 CO₂ 浓度的影响

从图 3 可以看出, 早稻的胞间 CO₂ 浓度(Ci)在乳熟期最低。分蘖期 IR₃ 的 Ci 最高, 明显高于 IR₁、IR₂、N₀, 与 CK 差异不显著; 孕穗期 IR₁ 的 Ci 最高, 显著高于 N₀, 与 IR₃、IR₂、CK 的差异不显著; 齐穗期 CK 的 Ci 最高, 明显高于其他 4 个处理; 乳

熟期 IR₂ 的 Ci 最高, CK 与 IR₁ 差异不显著, IR₃ 与 N₀ 的差异不显著。

晚稻的 Ci 在齐穗期最低。分蘖期 IR₃ 的 Ci 最高, 孕穗期、齐穗期均以 IR₁ 的最高。乳熟期 N₀ 的 Ci 最高, 明显高于其他处理, CK 与 IR₃、IR₁ 与 IR₂ 的差异均不显著。



同一生育期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

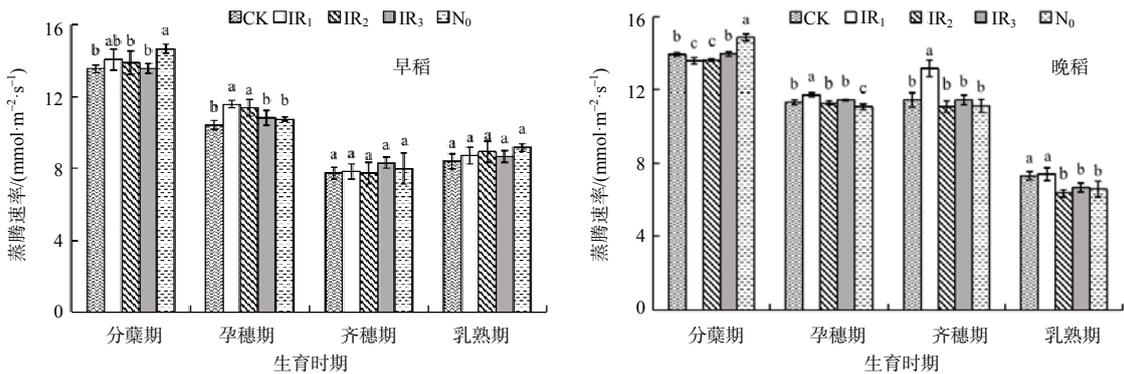
图 3 早、晚稻不同生育期的胞间 CO₂ 浓度

Fig.3 Intercellular CO₂ concentrations at different growth stages of early rice and late rice

3.1.5 增密减氮对双季稻蒸腾速率的影响

如图 4 所示, 早稻在分蘖期 N₀ 的蒸腾速率(Tr)最高, 明显高于 CK、IR₂、IR₃, 与 IR₁ 差异不显著; 孕穗期 IR₁ 与 IR₂ 的 Tr 差异不显著, 以 IR₁ 的最高, CK 的最低; 齐穗期、乳熟期各个处理之间的差异不显著。

晚稻各处理的 Tr 在分蘖期最高, 乳熟期最低。分蘖期 N₀ 的 Tr 最高, 显著高于其他 4 个处理, CK 与 IR₃、IR₁ 与 IR₂ 差异不显著; 孕穗期以 IR₁ 的 Tr 最高, 显著高于其他 4 个处理, CK 与 IR₂、IR₃ 的差异不显著; 齐穗期、乳熟期 IR₁ 的 Tr 最高, IR₂、IR₃、N₀ 的 Tr 差异不显著。



同一生育期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

图 4 早、晚稻不同生育期的蒸腾速率

Fig.4 Transpiration rates at different growth stages of early rice and late rice

3.2 双季稻产量与不同生育期光合特性的相关性分析

双季稻 4 个生育时期的光合特性与产量相关性分析的结果如表 2 所示。在早稻的各个处理中, 分蘖期的 SPAD 值与产量呈显著正相关, Tr 与产量呈

显著负相关; 孕穗期的 SPAD 值、Gs 与产量呈极显著正相关; 齐穗期的 SPAD 与产量呈显著正相关, 乳熟期的 Pn 与产量呈显著正相关。在晚稻的各个处理中, 分蘖期的 Tr 与产量呈极显著负相关; 孕穗期的 Gs、Ci 与产量呈极显著正相关; 齐穗期的 SPAD

值、Ci 与产量呈极显著正相关, 乳熟期的 SPAD 值 与产量呈显著正相关, 而 Ci 与产量呈显著负相关。

表 2 不同生育期光合特性与经济产量的相关系数

季别	生育期	相关系数				
		SPAD 值	Pn	Gs	Ci	Tr
早稻	分蘖期	0.94*	0.09	-0.09	0.25	-0.55*
	孕穗期	0.98**	-0.20	0.68**	0.45*	0.37
	齐穗期	0.94*	0.20	0.31	0.06	0.07
	乳熟期	0.86	0.69*	-0.31	0.25	-0.32
晚稻	分蘖期	0.50	-0.04	-0.31	0.32	-0.85**
	孕穗期	0.85	-0.21	0.78**	0.87**	0.13
	齐穗期	0.99**	0.33	0.02	0.75**	0.26
	乳熟期	0.92*	0.50	0.37	-0.64**	0.65

示相关性显著($P<0.05$); *示相关性极显著($P<0.01$)。

3.3 增密减氮对双季稻叶片水分利用效率的影响

由表 3 可知, 早稻在齐穗期水分利用效率最高; 分蘖期、孕穗期、乳熟期 IR₃ 的水分利用效率最高, 比各个时期的 CK 分别高 4.9%、3.5%、4.7%; 齐穗期 CK 的水分利用效率最高, 显著高于其他处理的,

比 IR₃ 高 10.0%。晚稻的生育进程中, 分蘖期 CK 的水分利用效率最高, 明显高于其他处理, 其后依次是 IR₁、IR₃、IR₂、N₀; 孕穗期、齐穗期、乳熟期 IR₃ 的水分利用效率最高, 较 CK 分别高 13.2%、16.6%、11.3%。

表 3 双季稻叶片水分利用效率

季别	处理	水分利用效率			
		分蘖期	孕穗期	齐穗期	乳熟期
早稻	IR ₁	(1.42±0.09)bc	(1.69±0.03)c	(2.46±0.08)b	(1.44±0.07)c
	IR ₂	(1.48±0.06)b	(1.73±0.06)c	(2.33±0.07)b	(1.50±0.07)c
	IR ₃	(1.71±0.04)a	(2.07±0.07)a	(2.39±0.07)b	(2.00±0.14)a
	CK	(1.63±0.05)a	(2.00±0.08)ab	(2.63±0.10)a	(1.91±0.08)a
	N ₀	(1.39±0.05)c	(1.96±0.05)b	(2.32±0.18)b	(1.69±0.04)b
晚稻	IR ₁	(1.81±0.01)b	(1.55±0.05)b	(1.77±0.04)c	(2.73±0.08)b
	IR ₂	(1.74±0.01)c	(1.49±0.01)b	(2.06±0.07)a	(2.78±0.14)b
	IR ₃	(1.77±0.02)c	(1.72±0.03)a	(2.11±0.04)a	(3.05±0.17)a
	CK	(1.98±0.02)a	(1.52±0.04)b	(1.81±0.07)c	(2.74±0.06)b
	N ₀	(1.67±0.05)d	(1.66±0.04)a	(1.93±0.11)b	(2.70±0.09)b

同季水稻同列数据不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

4 结论与讨论

刘文祥等^[18]研究发现, 中氮和中密组合处理下早稻的 SPAD 值在齐穗期最高。本研究中, 早、晚稻在分蘖到齐穗过程中, 4 个施肥处理的 SPAD 值不断升高, 在齐穗期最高, 而不施肥处理(N₀)的 SPAD 值不断下降, 且明显低于施肥处理的。这是因为施氮在一定程度上可延缓叶片衰老^[19]。同时适宜的栽植密度, 可以保证个体的正常发育和群体的协调发展, 减少氮肥, 个体的分蘖能力虽减少^[20], 但群体的分蘖数量增加了, 可以更有效地利用光能, 从而有利于叶绿素含量的提高。本研究中, 早稻分蘖、孕穗、乳熟期 IR₃ 的 Pn 均最高, 在晚稻季孕穗、齐

穗、乳熟期 IR₃ 的 Pn 也最高, 可见, IR₃ 处理能提高双季稻的净光合速率, 尤其是在水稻生长发育的后期阶段。有研究^[21]认为, 水稻结实期叶片的净光合能力是影响产量的关键因素, 产量的 80%以上来自水稻抽穗后叶片的光合作用^[22]。本研究发现, 早稻乳熟期的 Pn 与产量具有显著正相关性, 晚稻齐穗期的 SPAD 值与产量呈极显著正相关(相关系数为 0.99), 这说明早、晚稻在抽穗期以后有效利用养分和截取太阳辐射对于确保水稻产量至关重要^[23]。

水稻叶片净光合速率(Pn)增加, 叶片水分利用效率(WUE)则会增加; 叶片的蒸腾速率增加会导致 WUE 降低。本研究中, IR₃ 处理的 Pn 在早稻的分

蘖期、孕穗期、乳熟期均高于其他处理,在晚稻的孕穗、齐穗、乳熟期,IR₃处理的 Pn 也最高,说明 IR₃ 处理能明显提高叶片水分利用效率。以上结果说明土壤水分一定时,氮肥和种植密度合理组合,有利于养分的转化和供给,使水、肥、种植密度间发挥良好的协同效应。在“早蓄晚灌”节水背景下,IR₃ 的栽植密度和减氮施用有利于提高水稻群体间对水分的利用效率。

综上所述,IR₃ 处理对于提高双季稻光合作用以及叶片水分利用效率的效果最好。氮素在一定程度上为植株提供养分,有助于光合作用以及叶片水分转化。节约氮肥投入、增加植株密度并没有降低群体生产力,甚至还明显提高了水分利用效率,充分利用了地力。较高的栽植密度和较低的氮素水平,可调节氮素养分与环境之间的矛盾,有利于集约化农业的可持续发展,符合资源节约与环境友好型的社会发展。但长期减氮和较高的植株密度是否会对土壤环境以及稻米品质造成不利影响还需作进一步探究。

参考文献:

- [1] 徐新朋,周卫,梁国庆,等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 763–772.
- [2] 蒋鹏,熊洪,张林,等. 分蘖期干旱对不同施氮量和移栽密度下杂交稻产量及稻米品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 465–471.
- [3] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [4] JENSEN L S, SCHJOERRING J K, VAN DER HOEK K W, et al. Benefits of nitrogen for food, fibre and industrial production[M]//SUTTON M A, HOWARD C M, ERISMAN J W, et al. The European Nitrogen Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [5] 杨志长,沈涛,胡宇倩,等. 低氮密植对机插晚稻产量形成和光合特性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3): 546–553.
- [6] 刘利成,陈立云,肖应辉,等. 栽培密度对双季稻产量及群体光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(5): 449–457.
- [7] 陈佳娜,曹放波,谢小兵,等. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1176–1187.
- [8] 陈乾,刘科,何爱斌,等. 氮肥和密度互作对机插超级杂交稻叶型、光合特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(4): 27–30.
- [9] 朱相成,张振平,张俊,等. 增密减氮对东北水稻产量、氮肥利用效率及温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 453–461.
- [10] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences the United States of America, 2013, 110(21): 8375–8380.
- [11] 王海月,张桥,武云霞,等. 不同株距下氮肥减量配施运筹对机插杂交稻的产量及光合特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(5): 447–456.
- [12] 李仕贵,何平,王玉平,等. 水稻剑叶性状的遗传分析和基因定位[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 261–265.
- [13] 田红刚,刘永巍,樊冬生,等. 超高产水稻生育后期剑叶光合生理特性变化的研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(10): 268–271.
- [14] 龙文飞,傅志强,钟娟,等. 节水灌溉条件下氮密互作对双季晚稻光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(6): 206–212.
- [15] 李超,肖小平,唐海明,等. 减氮增密对机插双季稻生物学特性及周年产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2451–2459.
- [16] 彭志芸,丁峰,谌洁,等. 麦油稻轮作秸秆还田与施氮对水稻光合特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 253–261.
- [17] 周文涛,龙文飞,毛燕,等. 节水轻筒栽培模式下增密减氮对双季稻田温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2604–2612.
- [18] 刘文祥,青先国,艾治勇,等. 氮密互作对陆两优996 冠层特性和产量的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(1): 213–220.
- [19] 陈新红,刘凯,徐国伟,等. 结实期氮素养分和土壤水分对水稻光合特性、产量及品质的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2004, 22(1): 48–53.
- [20] CHEN W W, WANG Y Y, ZHAO Z C, et al. The effect of planting density on carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from a cold paddy field in the Sanjiang Plain, northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 178: 64–70.
- [21] 陈信波,廖爱君,罗泽民. 大穗型水稻生育后期叶片和根系生理的特性[J]. 生命科学研究, 1999, 3(3): 250–255.
- [22] 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.
- [23] HOU W F, KHAN M R, ZHANG J L, et al. Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 183–192.

责任编辑:毛友纯
英文编辑:柳正