

# 缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交籼稻 叶片生长及产量的影响

严田蓉, 何艳, 唐源, 彭志芸, 马鹏, 余华清,

丁峰, 王春雨, 孙永健, 杨志远, 马均\*

(四川农业大学水稻研究所/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川成都 611130)

**摘要:**【目的】逐步采用机械化直播的集约栽培模式已是水稻种植的主要趋势之一, 本文研究了机械化水稻直播条件下, 缓释尿素与普通尿素不同配施对水稻生长和产量的影响特征, 为直播稻的高产高效施肥技术提供理论基础。【方法】以优质杂交籼稻‘宜香优 2115’为材料, 采用两因素裂区设计, 主区为直播(C<sub>D</sub>)和手插(C<sub>H</sub>)两种栽植模式; 副区为氮肥运筹方式, 总施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>, 设普通尿素按基、蘖、穗肥配比为 3:3:4 (U<sub>30</sub>), 普通尿素全量基施 (U<sub>100</sub>), 缓释尿素全量基施 (S<sub>100</sub>) 及缓释尿素 (基肥) 与普通尿素 (穗肥) 配比为 8:2 (S<sub>80</sub>)、6:4 (S<sub>60</sub>)、4:6 (S<sub>40</sub>) 6 种肥料运筹方式, 以不施氮肥 (CK) 为对照。调查了直播水稻的叶色变化、叶片生长、LAI、剑叶光合作用和叶片碳氮代谢及其与产量形成的关系。【结果】1) 直播稻产量略高于手插稻, 前者有效穗数优势显著, 后者优势在于每穗粒数, 其产量差异表现取决于有效穗数和每穗粒数是否充分互补, 具体体现在总颖花数, 优势肥料处理在有效穗数和每穗粒数上协调性更强。2) 缓释尿素与普通尿素的配施处理下叶色表现, 直播稻和手插稻分别呈“三黑三黄”和“二黑二黄”交替变化, 直播稻的叶色相对较浅; 直播稻叶片生长前快后慢, 齐穗期 LAI 及齐穗后剑叶 Pn 值均较低, 但其高效叶面积率较高, 表明后期群体上部功能叶叶面积较大, 群体质量较高; 在叶片碳氮代谢上, 直播稻中、后期叶片 NSC/N 较高, 碳代谢较旺盛, 两种栽植方式中高产处理后期叶片 NSC/N 相近, 均较低, 但代谢途径不同, 直播稻主要通过增强氮代谢, 手插稻则通过增强碳水化合物的同化进行调节。增加穗肥占比可有效优化直播稻中后期的叶片质量。3) 相关分析显示, 孕穗期的叶片增长率、LAI、剑叶 Pn 及叶片 NSC/N 均与产量呈显著或极显著相关, 表明孕穗期的叶片质量是影响产量形成的关键。4) 直播稻和手插稻分别在基肥 (缓释尿素) 与穗肥 (普通尿素) 配比为 4:6 和 8:2 下产量最高, 分别达 12.11 t/hm<sup>2</sup> 和 11.51 t/hm<sup>2</sup>, 较普通尿素常规运筹 (U<sub>30</sub>) 分别增产 15.55% 和 5.40%。【结论】缓释尿素与普通尿素配施下, 增大速效穗肥比例, 前期控氮控群体, 后期增氮壮个体, 实现直播稻群体与个体的协调, 增强后期氮代谢, 有效调节叶片碳氮比, 提高叶片质量防早衰, 是增产的有效途径。

**关键词:** 缓释尿素; 普通尿素; 籼稻; 直播; 叶片生长; 产量形成

## Effects of slow-release urea combined with conventional urea on leaf growth and yield formation of *indica* hybrid rice under direct seeding cultivation

YAN Tian-rong, HE Yan, TANG Yuan, PENG Zhi-yun, MA Peng, YU Hua-qing,

DING Feng, WANG Chun-yu, SUN Yong-jian, YANG Zhi-yuan, MA Jun\*

(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** 【Objectives】 It is one of the main irreversible trends to adopt mechanized direct seeding intensive cultivation mode progressively in rice plants. Combination of slow-release urea and urea under direct seeding condition could provide theoretical and practical basis that aim to acquire high yield and improve high efficiency

收稿日期: 2018-05-20 接受日期: 2018-09-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301701, 2017YFD0301706, 2016YFD0300506); 四川省育种攻关专项 (2016NYZ0051); 四川省教育厅重点项目 (18ZA0390) 资助。

联系方式: 严田蓉 E-mail: ytr0724@163.com; \* 通信作者 马均 E-mail: majunp2002@163.com

fertilization techniques for direct seeding rice. **【 Methods 】** An experiment was conducted using the split plot design with two factors, and ‘Yixiangyou 2115’ high-quality hybrid *indica* rice, was used as material. The main plot was two cultivation methods: direct seeding ( $C_D$ ) and transplanting by hand ( $C_H$ ), and the subplot was six N application ratios in total amount of  $150 \text{ kg/hm}^2$ , the ratio of urea application for basal N, tiller N and panicle N was 3 : 3 : 4 ( $U_{30}$ ), urea as single basal application ( $U_{100}$ ), slow-release urea as single basal application ( $S_{100}$ ), the ratios of slow-release urea(basal N) and urea (panicle N) was 8 : 2 ( $S_{80}$ ), 6 : 4 ( $S_{60}$ ), and 4 : 6 ( $S_{40}$ ), and without N application served as a control (CK). In comparison to hand-transplanting rice, changes of leaf color, leaf growth, LAI, photosynthesis of flag leaves and carbon and nitrogen metabolism of leaves and their relationship with yield formation were investigated in direct seeding rice. **【 Results 】** 1) The yield of the direct seeding rice was slightly higher than that of the hand-transplanting rice, while the former had a significant advantage in effective panicles and the latter advantage was grains per panicle. However, the advantages and disadvantages depended on whether effective panicles and grains per panicle were effective complementary, which reflected in the total number of spikelets. Superior treatment was more coordinated in terms of effective panicles and grains per panicle. 2) Under the combined application of slow-release urea and regular urea, the leaf color of direct seeding rice showed that was alternating with “thrice black and thrice yellow”, the hand-transplanting rice appeared change of “twice black and twice yellow”, the leaf color of direct seeding rice was relatively shallow. The leaf growth of direct seeding rice manifested as early fast and late slow, both LAI at the heading stage and Pn value of the flag leaves after the heading stage were relatively low. However, the more effective leaf area rate indicated that the upper functional leaf area of the later population was larger, and the quality of population was better. The carbon metabolism of direct seeding rice leaves was more vigorous, and the NSC/N ratio was higher at the middle and late stages, and the NSC/N of the high yield treatment was lower, which was similar to the one of hand-transplanting rice at the later stage. But the metabolism pathway was different; the direct seeding rice was strengthened in nitrogen metabolism, while the hand-transplanting rice was mainly regulated by enhancing carbohydrate assimilation. Increased the ratio of panicle N can effectively optimize the leaf quality at the mid-late stage of direct seeding rice. 3) The correlation analysis suggested that leaf growth rate, LAI, flag leaf Pn and leaf NSC/N at the booting stage were significantly or extremely significantly correlated with yield, which indicated that leaf quality at the booting stage was the key to affecting yield formation. 4) Direct seeding rice and hand-transplanting rice had the highest yields at the ratios of 4 : 6 and 8 : 2 for base fertilizer (slow-release urea) and panicle fertilizer (regular urea) treatments, respectively, reaching  $12.11 \text{ t/hm}^2$  and  $11.51 \text{ t/hm}^2$ , and the yields were higher than those of the regular urea treatments, separately by 15.55% and 5.40%. **【 Conclusions 】** This study indicated that the slow-release urea combined with urea increased the proportion of panicle fertilizer, controlled populations at the early stage and enhanced individuals at the later stage, it can be achieved the coordination between population and individual of direct seeding rice, enhanced the later stage nitrogen metabolism, effectively regulated the leaf carbon-nitrogen ratio, and improved leaf quality and prevented premature aging, so it’s an effective way to increase grain yield.

**Key words:** slow-release urea; urea; *indica* rice; direct seeding; growth of leaf; yield formation

水稻 (*Oryza sativa*) 作为我国的主要粮食作物, 2015 年数据统计中, 其种植面积占全国粮食作物总种植面积的 26.7%<sup>[1]</sup>, 但国内水稻的生产效率整体较低, 其中种植机械化率发展滞缓是限制水稻生产高效化的主因<sup>[2-3]</sup>。水稻直播种植相较传统手工移栽可将劳动生产效率提高 5~10 倍<sup>[4]</sup>, 相较机插可减少作

业环节, 降低生产成本, 是一种可在耕种上实现高效化的栽植方式<sup>[5-6]</sup>。近年华南农业大学罗锡文等成功研制的 2BD 系列水稻精量穴直播机操作性能优越, 实现了农机与农艺更好的结合, 推动了水稻直播的进一步发展<sup>[7-9]</sup>, 在此基础上研究更适合直播稻的氮肥管理模式显得尤为重要。

凌启鸿<sup>[10]</sup>曾提出实现精确定量轻简化是作物栽培现代化的发展方向, 其中“在最适宜的生育时期, 用最适宜的物化技术数量”是重点之一。在水稻生产中氮素营养的供给情况直接影响稻株的生长发育和产量的形成<sup>[11]</sup>, 可见优化氮肥管理促进水稻个体与群体协调发展, 是实现增产的关键, 现代水稻生产需要有效地将兼具轻简化与高效化的栽植方式与施肥方式结合。缓释肥作为一种高效肥料, 可减少施肥作业次数, 同时实现节肥与增产<sup>[12-14]</sup>, 在水稻栽培上亦有运用研究, 但大多均集中于手插稻和机插稻<sup>[15-17]</sup>, 在直播稻上的运用研究鲜见报道。而直播作为一种特殊的稻作方式, 直播稻的生长发育、群体结构、个体特征等均有别于移栽稻, 其对养分的需求必然不同<sup>[18-20]</sup>, 施用缓释尿素条件下, 如何合理地与普通尿素配施促进其群体与个体的协调发展, 是提高直播稻产量的关键。所以本研究通过与手插稻对比, 在模拟机直播条件下, 采用缓释尿素与普通尿素配施的氮肥管理方式, 研究叶片生长发育的特征特性, 从相关指标对产量及其构成的影响上, 明确直播稻在缓释尿素与普通尿素配施下对氮素养分的需求特点, 以期为直播稻的高产高效施肥技术提供理论基础和实践依据。

## 1 材料与方法

试验于 2017 年在四川省成都市温江区四川农业大学水稻研究所试验田 (103.87°E、30.71°N) 进行, 供试品种为优质杂交籼稻“宜香优 2115” (全生育期 154 d)。试验地前茬作物为大麦 (*Hordeum vulgare*), 土壤质地为砂壤土, 0—20 cm 土层有机质 20.2 g/kg、全氮 1.54 g/kg、碱解氮 115 mg/kg、速效磷 22.6 mg/kg、速效钾 48.1 mg/kg、pH 为 6.16。水稻生育阶段气象数据见图 1。

采用两因素裂区设计。主区为种植模式, 设 2 个处理, 具体按实际生产上较适宜的模式实施: 模拟直播机型 2BDXS-10CP (25) 进行穴直播 ( $C_D$ , 25 cm × 20 cm), 每穴播种 3~6 粒、手插稻 ( $C_H$ , 33.3 cm × 16.7 cm), 采用单本移栽。副区为缓释尿素 (含氮量 44%, 金正集团生产的树脂包膜尿素) 与普通尿素 (含氮量 46%) 的运筹方式, 设 7 个处理 (表 1)。

稻种经浸种催芽露白后, 于 4 月 26 日同期播种, 手插稻采用早育秧, 5 月 19 日 (5 叶 1 心期) 移栽。氮磷钾养分施用配比为 2 : 1 : 2。总施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (过磷酸钙) 为 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O (氯

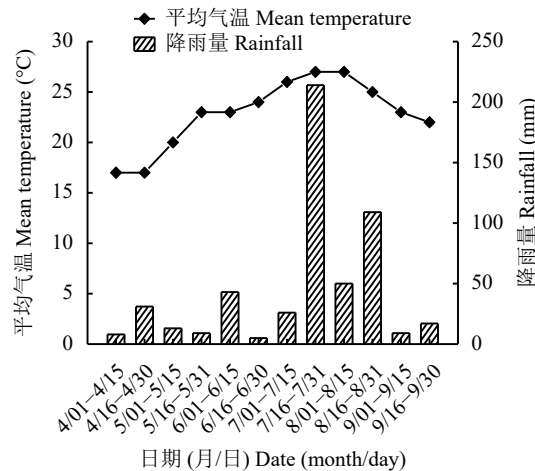


图 1 2017 年水稻生育阶段降雨量和平均气温

Fig. 1 Rainfall and mean temperature during the rice growing season in 2017

表 1 各处理缓释尿素与普通尿素用量配比与氮量分配

Table 1 Ratio of slow-release urea to urea and allocation of N input in the three stages in each treatment

处理 Treatment	基肥 Basal N	蘖肥 Tillering N	穗肥 Panicle N
CK	0	0	0
U <sub>30</sub>	30% U	30% U	40% U
U <sub>100</sub>	100% U	0	0
S <sub>100</sub>	100% S	0	0
S <sub>80</sub>	80% S	0	20% U
S <sub>60</sub>	60% S	0	40% U
S <sub>40</sub>	40% S	0	60% U

注 (Note): 所有施氮处理施 N 150 kg/hm<sup>2</sup> All N treatments were applied with N 150 kg/hm<sup>2</sup>; U—普通尿素 Urea; S—缓释尿素 Slow-released urea; U 和 S 下标数字代表该肥料在总氮投入中的比例 The lower digital after U and S mean their ratios in total N input.

化钾) 150 kg/hm<sup>2</sup>, 氮肥的施用按肥料运筹进行, 磷钾肥均作基肥一次施入。直播处理基肥于 2 叶期施用, 分蘖肥于 5 叶期施用, 手工移栽处理基肥于栽插前 1 d 施用, 分蘖肥于移栽后 7 d 施用, 穗肥均于倒 4 叶期施用。其它田间管理按常规田间管理方式进行。小区面积为 15 m<sup>2</sup>, 各处理均设 3 次重复, 不同小区间筑埂包地膜, 防止窜水窜肥。

### 1.1 测定项目与方法

1.1.1 叶面积 于分蘖盛期、拔节期及齐穗期, 每小区选择生长基本一致的植株 3 穴, 使用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积, 齐穗期分上三叶和其余叶分别记载, 计算绿叶叶面积指数 (LAI) 和高效叶面积指数。

**1.1.2 SPAD 和剑叶净光合效率** 于播后 30 d 至蜡熟期每隔 10~15 d, 每小区选择代表性植株 10 株, 使用日本生产的 SPAD-502 型叶绿素快速测定仪, 测定其最后一叶完全展开叶中部及上下 1/3 处 3 点的 SPAD 值, 取平均值, 测定时避开叶脉。于孕穗期、齐穗期、乳熟期及蜡熟期, 选择晴朗的上午, 每小区选择剑叶完全抽出的代表性植株 10 株, 使用美国生产的 LI-6400 光合测定仪, 测定剑叶中部的净光合速率 (Pn)。

**1.1.3 叶片干物质积累** 于 6 叶期、分蘖盛期、拔节期、齐穗期及成熟期 5 个时期取样, 每小区取代表性植株 3 穴, 取下叶片, 装袋, 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干至恒重后称重。

**1.1.4 全氮和非结构性碳水化合物 (NSC) 含量** 将植株样品粉碎过 0.18 mm (80 目) 筛, 经浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O 消煮后, 用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定叶片全氮含量; 用硫酸—蒽酮比色法测 NSC 含量, 其包括可溶性糖和淀粉含量的测定, 二者含量之和即为 NSC 含量。

**1.1.5 产量及其构成** 于成熟期各小区随机取代表性植株 5 穴, 进行室内考种, 考查穗粒数、结实率、千粒重等产量构成因素。收获时除去边行和杂株按实收株数计产。

## 1.2 参数计算

高效叶面积率 (%) = 高效 LAI/齐穗期 LAI × 100

叶面积指数增长率 (LAI/d) = (LAI<sub>2</sub>-LAI<sub>1</sub>)/(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>),

LAI<sub>1</sub> 和 LAI<sub>2</sub> 分别为相邻前、后期测定的叶面积指数, t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 分别为测定 LAI<sub>1</sub> 和 LAI<sub>2</sub> 的时间。

叶片生长率[g/(m<sup>2</sup>·d)] = (W<sub>2</sub>-W<sub>1</sub>)/(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>), W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub> 分别为相邻前、后期取样测定的叶片干物重, t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 分别为测定 W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub> 的时间

## 1.3 数据处理

用 Microsoft Excel 2007、DPS 6.55 和 Origin 9.1 进行数据分析及图表绘制, 并用最小显著差异法 (LSD) 检验处理间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 缓释尿素、普通尿素及其配施对直播杂交籼稻叶片生长率及叶面积指数的影响

从叶片的生长率 (图 2) 来看, 分蘖盛期前穴直播方式 (C<sub>H</sub>) 高于手插稻方式 (C<sub>D</sub>), 分蘖盛期至齐穗期 C<sub>H</sub> 方式高于 C<sub>D</sub> 方式, 齐穗后叶片的衰减率 C<sub>H</sub> 方式高于 C<sub>D</sub> 方式。在 C<sub>D</sub> 栽植方式下, U<sub>100</sub> 和 S<sub>100</sub> 施肥处理在分蘖盛期至拔节期叶片生长最快, 而其它施氮处理在孕穗期叶片生长最快, 齐穗后叶片衰减率为 S<sub>80</sub> > S<sub>60</sub> > U<sub>100</sub>、S<sub>40</sub> > S<sub>100</sub> > U<sub>30</sub>、CK; C<sub>H</sub> 直播方式下, 分蘖盛期至拔节期的叶片生长率高于孕穗阶段, 随穗肥占比的增加, 两阶段内的差异缩小, 与 C<sub>D</sub> 方式相反, 其中 S<sub>100</sub> 和 S<sub>80</sub> 施肥处理的叶片生长率在齐穗前均较高, 但齐穗后的衰减率亦较高。可见, 相比手插稻, 直播稻在分蘖前期生长较快, 分蘖盛期到拔节期生长较慢, 且施用穗肥可促进直播稻后期叶片生长率的提高。

栽植方式对分蘖盛期和齐穗期叶面积指数 (LAI) 及孕穗阶段叶面积增长率的影响达极显著或显著水

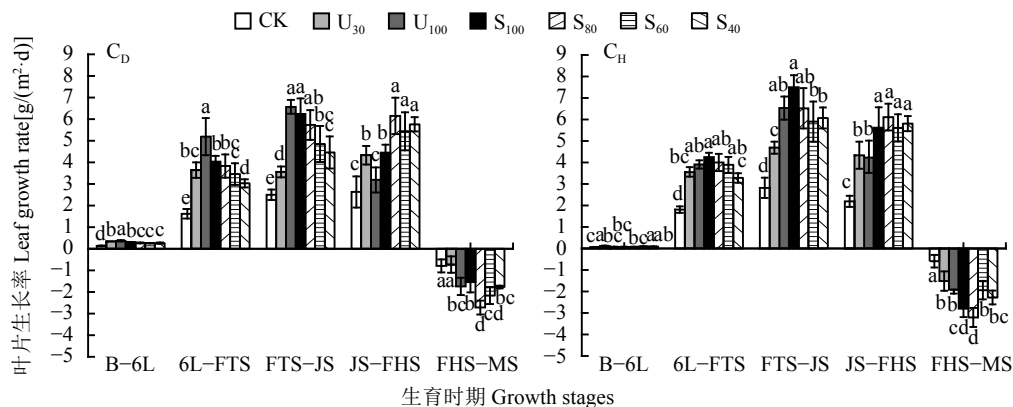


图 2 不同栽植方式下各处理杂交籼稻叶片的生长率

Fig. 2 Leaf growth rate of rice at different growing stages under different treatments

[注 (Note): B-6L—6 叶期前 Before 6-leaf stage; 6L-FTS—6 叶期至分蘖盛期 6-leaf-fully tillering stages; FTS-JS—分蘖盛期至拔节期 Fully tillering-jointing stages; JS-FHS—拔节期至齐穗期 Jointing-fully heading stages; FHS-MS—齐穗期—成熟期 Fully heading-maturity stages; 柱子顶端不同字母表示同一栽植方式下不同氮肥处理间在 5% 水平上差异显著 Different small letters over the bars indicate significant difference among the N-fertilizer treatments under the same cultivation method at the 5% level.]

平, 氮肥管理对各指标的影响均达极显著水平, 两因素在分蘖盛期和拔节期 LAI、齐穗期高效叶面积率上有极显著的互作效应(表 2)。整体来看, 相比 C<sub>H</sub> 种植方式, C<sub>D</sub> 种植方式拔节期的 LAI、分蘖盛期至拔节期的叶面积指数增长率、高效叶面积率均较高。在 C<sub>D</sub> 种植方式下, 拔节期的 LAI 均随前期施氮量的增加而增大, 齐穗期 LAI 及高效 LAI 除 CK 和 U<sub>30</sub> 施肥处理外, 其它处理间差异较小, 高效叶面积率在 U<sub>30</sub>、S<sub>60</sub> 和 S<sub>40</sub> 间差异较小, 均较高, 分蘖盛期至拔节期 U<sub>100</sub>、S<sub>100</sub> 和 S<sub>80</sub> 处理的叶面积增长较快, 孕穗阶段 S<sub>80</sub>、S<sub>60</sub> 和 S<sub>40</sub> 处理增长较快; C<sub>H</sub> 种植方式下, S<sub>100</sub> 和 S<sub>80</sub> 处理的 LAI 始终较大, S<sub>80</sub> 处理的高效 LAI 和高效叶面积率具有显著优势, 分蘖盛期至拔

节期的增长率以 S<sub>100</sub> 处理最高, 孕穗阶段以 S<sub>80</sub> 处理最高。可见, 缓释尿素全量基施或配施少量穗肥即能保证 C<sub>H</sub> 种植方式叶面积上的优势, 而增加穗肥占比对提高 C<sub>D</sub> 方式下高效叶面积率更有利。

## 2.2 缓释尿素、普通尿素及其配施对直播杂交水稻叶色变化的影响

由图 3 可知, 整体来看, 播种后的 30~130 d, 直播稻(C<sub>D</sub>)的 SPAD 值低于手插稻(C<sub>H</sub>), 均值分别为 35.4 和 37.5, 叶色的变化在配施处理下 C<sub>D</sub> 方式呈“三黑三黄”, 拔节前 15d、拔节后 15d 及齐穗后 15d 达峰值, 拔节期和齐穗期在峰谷; C<sub>H</sub> 方式呈“二黑二黄”, 分别在拔节前 15d 或拔节、齐穗或齐穗后 15d 达峰值, 拔节后 15d 在峰谷。在 C<sub>D</sub> 方式下, CK 的

表 2 不同栽植方式下各处理杂交水稻的叶面积指数

Table 2 Leaf area index of *indica* hybrid rice in each treatment under different planting methods

栽植方式 Cultivation method	氮肥处理 Treatment	叶面积指数 LAI			高效叶面积指数 ELAI	高效叶面积率 ELAI rate (%)	叶面积指数增长率 (LAI/d) Daily growth of LAI	
		FTS	JS	FHS	FHS	FTS-JS	JS-FHS	
C <sub>D</sub>	CK	0.50 e	2.07 f	3.53 d	1.90 c	53.92 d	0.067 d	0.045 c
	U <sub>30</sub>	1.20 bc	4.11 de	6.19 c	3.86 b	62.42 a	0.130 cd	0.063 bc
	U <sub>100</sub>	2.08 a	8.14 a	8.27 ab	5.02 a	60.71 b	0.267 a	0.004 d
	S <sub>100</sub>	1.42 b	6.33 b	8.42 a	5.11 a	60.64 b	0.213 ab	0.063 bc
	S <sub>80</sub>	1.31 bc	5.81 bc	8.60 a	5.05 a	58.70 c	0.197 ab	0.085 ab
	S <sub>60</sub>	1.06 cd	4.92 cd	7.64 b	4.80 a	62.73 a	0.167 bc	0.082 b
	S <sub>40</sub>	0.90 d	3.69 e	7.79 ab	4.77 a	61.24 ab	0.123 cd	0.124 a
	平均 Average		1.21	5.01	7.21	4.37	60.22	0.166
C <sub>H</sub>	CK	1.03 e	2.00 d	3.72 d	2.02 d	54.27 d	0.073 c	0.048 d
	U <sub>30</sub>	2.20 c	3.9b c	8.02 c	4.49 c	55.87 bc	0.130 bc	0.115 ab
	U <sub>100</sub>	2.77 b	4.88 b	8.05 bc	4.49 c	55.95 bc	0.160 b	0.088 bc
	S <sub>100</sub>	2.94 ab	6.36 a	8.93 b	5.06 b	56.64 b	0.263 a	0.071 cd
	S <sub>80</sub>	3.11 a	4.97 b	10.08 a	6.01 a	59.55 a	0.143 b	0.142 a
	S <sub>60</sub>	2.31 c	4.71 bc	8.72 bc	4.98 b	57.09 b	0.180 ab	0.111 ab
	S <sub>40</sub>	1.88 d	4.16 bc	8.57 bc	4.72 bc	55.10 cd	0.173 b	0.123 ab
	平均 Average		2.32	4.42	8.01	4.54	56.35	0.161
F 值 F value								
栽植方式 Cultivation method (C)		350.97**	8.74	30.98*	1.12	11.33	0.14	30.72*
氮肥运筹方式 Nitrogen management (N)		43.65**	25.58**	55.55**	56.61**	19.66**	6.43**	7.07**
C × N		6.65**	4.06**	2.05	2.45*	12.72**	1.69	1.93

注 (Note): LAI—Leaf area index; ELAI—High-effective LAI; FTS—分蘖盛期 Fully tillering stage; JS—拔节期 Jointing stage; FHS—齐穗期 Fully heading stage; FTS-JS—分蘖盛期至拔节期 Fully tillering-jointing stages; JS-FHS—拔节期至齐穗期 Jointing-fully heading stages. 同列数据后不同字母表示同一栽植方式下不同氮肥处理间在 5% 水平上差异显著 Data followed by different letters in a column indicate significant differences among the N-fertilizer treatments under the same cultivation method at the 5% level. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

叶色变化与  $C_H$  方式一致,  $U_{30}$  处理第一个峰值最早出现, 但峰值较低,  $U_{100}$  和  $S_{100}$  处理在第一个峰谷后叶色基本恒定至第三个峰值后下降,  $S_{80}$ 、 $S_{60}$  和  $S_{40}$  处理趋势一致, 呈“三黑三黄”变化, 随穗肥占比的增加后期的峰值和峰谷均较高;  $C_H$  方式下,  $S_{80}$  处理第一个峰值在拔节前 15 d, 其余均在拔节期,  $U_{100}$ 、 $S_{100}$  和  $S_{80}$  处理第二个峰值在齐穗期, 其余处理在齐穗后 15 d。可见, 直播稻叶色波动较频繁, 但波幅较小, 穗肥占比增加能有效保持后期叶色。

### 2.3 缓释尿素、普通尿素及其配施对直播杂交籼稻剑叶光合作用的影响

由图 4 可知, 除孕穗期,  $C_D$  方式下剑叶 Pn 值在各时期均低于  $C_H$  方式, 两栽植处理剑叶 Pn 的平均值在齐穗期分别为 16.98、17.88, 蜡熟期分别为 10.07、13.63, 随生育进程推移, 剑叶 Pn 逐渐减小的同时, 两处理间差异逐渐增大。在  $C_D$  方式下, 缓

释尿素的施用能在后期保持较高的剑叶 Pn, 并在一定程度上减少降幅, 其中  $S_{40}$  处理在各时期均较优;  $C_H$  方式下在不同氮肥处理间差异较大, CK 和  $S_{60}$  处理的剑叶 Pn 在齐穗期有小幅升高,  $S_{100}$  和  $S_{80}$  处理在乳熟期不降反升, 其它处理趋势与  $C_D$  方式一致。可见, 群体差异对剑叶光合作用的影响较大, 施用缓释尿素条件下, 增加穗肥占比可有效保持孕穗后直播稻剑叶的光合能力, 缓释肥全量基施或配施少量穗肥更利于稳定手插稻齐穗期和灌浆阶段的光合能力。

### 2.4 缓释尿素、普通尿素及其配施对直播杂交籼稻叶片 NSC、氮积累及 NSC/N 的影响

氮肥管理对 NSC 和氮积累与输出的影响及其与栽植方式的互作效应均达极显著水平, 两因素对拔节、齐穗和成熟期叶片 NSC/N 的影响亦基本达极显著水平, 且产生了极显著的互作效应(表 3)。整体来看, 孕穗期  $C_D$  方式的 NSC 积累量显著低于  $C_H$  方

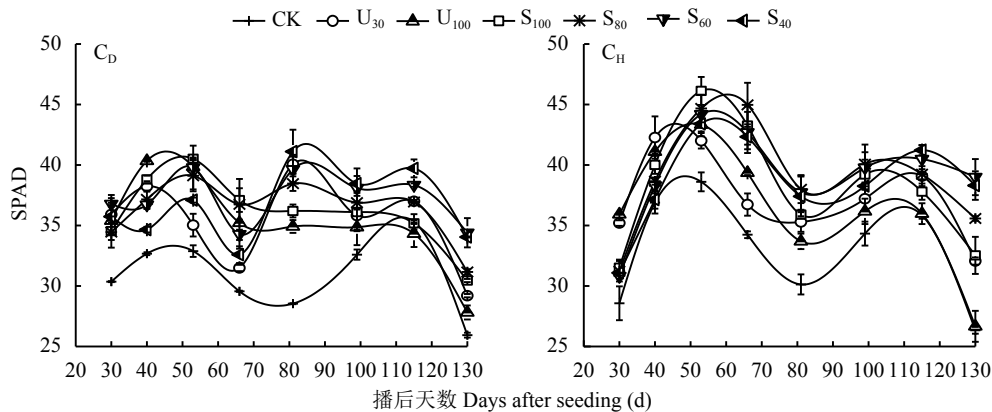


图 3 不同栽植方式下各处理杂交籼稻的叶片 SPAD 值

Fig. 3 SPAD of *indica* hybrid rice leaves in each treatment under different planting methods

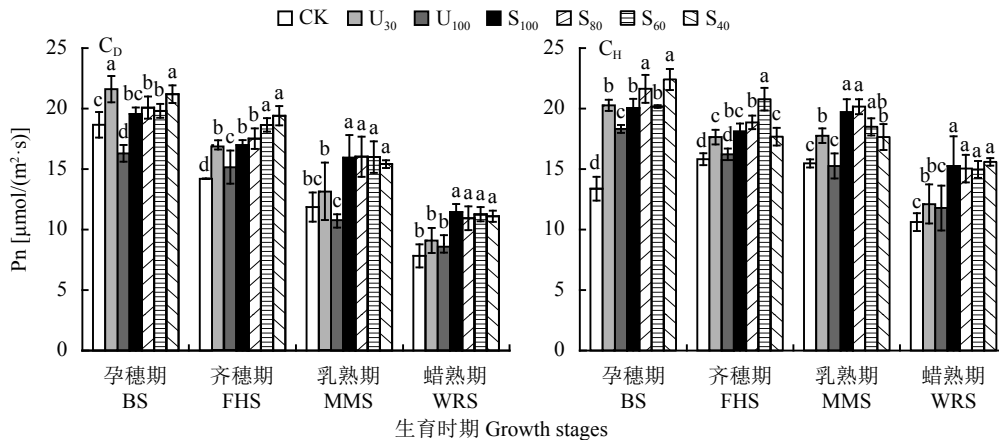


图 4 不同栽植方式下各处理杂交籼稻剑叶净光合速率

Fig. 4 Pn values of *indica* hybrid rice flag leaves in each treatment under different planting methods

[注 (Note): Pn—净光合速率 Net photosynthetic rate; BS—Booting stage; FHS—Fully heading stage; MMS—Milky maturity stage; WRS—Waxy ripe stage. 柱上不同字母表示同一生育期不同氮肥处理间在 5% 水平上差异显著 Different letters above the bars indicate significant differences among the N-fertilizer treatments under the same growth stage at the 5% level.]

表 3 不同栽植方式下各处理杂交籼稻叶片 NSC、氮积累量及 NSC/N  
 Table 3 Accumulation of NSC, N and NSC/N of *indica* hybrid rice in each treatment under direct seeding and hand transplanting

栽植方式 Cultivation method	氮肥处理 Treatment	积累量 Accumulation (kg/hm <sup>2</sup> )		输出量 Output (kg/hm <sup>2</sup> )		NSC/N		
		NSC	N	NSC	N	JS	FHS	MS
C <sub>D</sub>	CK	38.21 e	7.44 e	46.00 d	11.10 d	16.05 a	11.34 a	23.14 a
	U <sub>30</sub>	121.62 d	21.32 d	78.67 c	24.28 c	13.76 b	9.34 b	19.46 cd
	U <sub>100</sub>	178.46 c	5.81 e	108.55 b	25.67 c	7.68 de	12.05 a	22.73 ab
	S <sub>100</sub>	265.67 a	7.49 e	178.25 a	30.36 b	7.50 e	11.91 a	22.66 ab
	S <sub>80</sub>	198.37 b	26.09 c	79.25 c	38.73 a	8.73 d	8.24 b	21.02 bc
	S <sub>60</sub>	114.86 d	30.08 b	47.01 d	35.87 a	11.64 c	6.66c	18.21 d
	S <sub>40</sub>	110.40 d	36.26 a	87.40 c	35.97 a	12.30 c	6.44 c	13.27 e
	平均 Average		146.80	19.21	89.30	28.85	11.10	9.43
C <sub>H</sub>	CK	62.79 d	5.22 e	72.69 b	8.99 c	12.23 a	12.75 a	18.80 ab
	U <sub>30</sub>	156.58 c	19.43 c	87.16 a	30.01 b	6.16 b	6.99 c	15.14 c
	U <sub>100</sub>	156.03 c	7.11 e	99.08 a	28.85 b	6.39 b	8.99 b	20.50 a
	S <sub>100</sub>	176.85 ab	15.82 d	36.14 d	41.57 a	4.12 d	5.91 cd	18.16 b
	S <sub>80</sub>	161.91 bc	24.76 b	51.63 c	40.37 a	4.78 cd	5.45 d	12.63 d
	S <sub>60</sub>	170.26 ab	28.39 a	58.62 c	38.98 a	4.97 cd	5.44 d	11.38 d
	S <sub>40</sub>	184.98 a	31.39 a	72.57 b	38.63 a	5.46 bc	5.67 d	11.82 d
	平均 Average		152.77	18.88	68.27	32.49	6.30	7.31
F 值 F-value								
栽植方式 (C) Cultivation method		401.64**	0.72	16.47	42.91*	619.74**	189.19**	20.78*
氮肥运筹方式 (N) Nitrogen management		132.30**	210.08**	27.47**	143.93**	68.69**	26.74**	33.27**
C × N		40.28**	7.61**	48.87**	5.58**	11.72**	6.70**	4.21**

注 (Note): NSC—非结构性碳水化合物 Non-structural carbohydrates; NSC/N—碳 (非结构性碳水化合物) 氮比 The ratio of carbon in non-structural carbohydrates to nitrogen; 积累量是从拔节至齐穗期的 Accumulation was from jointing to full heading stage; 输出量是从齐穗期至成熟期的 Output was from full heading to maturing stage; JS—拔节期 Jointing stage; FHS—齐穗期 Fully heading stage; MS—成熟期 Maturity stages; 同列数据后不同字母表示同一栽植方式下不同氮肥处理间在 5% 水平上差异显著 Data followed by different letters in a column indicate significant differences among the N-fertilizer treatments under the same cultivation method at the 5% level. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

式, 氮积累量则差异较小, 齐穗后 C<sub>D</sub> 方式的 NSC 输出量较大, 氮输出量反而较小, 叶片 NSC/N 随生育进程推进呈增加趋势, 各时期 C<sub>D</sub> 方式均高于 C<sub>H</sub> 方式。在 C<sub>D</sub> 方式下, 孕穗期叶片 NSC 和氮积累量分别随穗肥占比的增加呈降低和增加的趋势, 齐穗后的输出量亦有相似的趋势, 除 U<sub>100</sub> 和 S<sub>100</sub> 外, 叶片 NSC/N 在齐穗期均有所下降; C<sub>H</sub> 方式下, 缓释肥的施用能在孕穗期提高 NSC 积累量, 在齐穗后降低 NSC 输出量, 氮积累量的变化与 C<sub>D</sub> 方式基本一致。可见, 相比 C<sub>H</sub> 方式, C<sub>D</sub> 方式叶片碳代谢在后期更旺盛, 且叶片 NSC 转运效率较高, 但其

积累较多源于前期, 后期氮的输出较少, 能够保持叶片含氮量的相对稳定。

## 2.5 缓释尿素、普通尿素及其配施对直播杂交籼稻产量及其构成的影响

栽植方式和氮肥管理对有效穗数和每穗粒数的影响均达极显著水平, 且在生物产量和产量上存在极显著的互作效应, 氮肥管理对产量及其构成因素均产生了极显著的影响 (表 4)。整体来看, C<sub>D</sub> 方式的有效穗数、千粒重、生物产量和籽粒产量分别比 C<sub>H</sub> 方式高出 22.5%、2.7%、2.79% 和 1.96%。在

表 4 不同栽植方式下各处理杂交水稻的产量及构成因素

Table 4 Grain yield and yield components of *indica* hybrid rice in each treatment under different planting methods

栽植方式 Cultivation method	氮肥处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	每穗粒数 Grains per panicle	总颖花数 Total spikelets ( $\times 10^7/\text{hm}^2$ )	千粒重 (g) 1000-grain weight	结实率 (%) Seed setting rate	生物产量 Biomass yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )	实际产量 Grain yield ( $\text{t}/\text{hm}^2$ )
C <sub>D</sub>	CK	198.67 e	103.01 e	20.41 d	37.05 a	92.41 a	11.36 c	7.35 d
	U <sub>30</sub>	247.11 d	135.04 ab	33.35 c	36.30 abc	85.72 bc	18.32 b	10.48 c
	U <sub>100</sub>	283.87 a	114.05 d	32.37 c	36.67 ab	88.58 ab	18.81 b	10.74 c
	S <sub>100</sub>	284.89 a	123.75 c	35.23 b	36.20 bc	86.14 bc	20.29 a	11.33 b
	S <sub>80</sub>	277.33 ab	131.52 bc	36.43 ab	35.74 c	84.77 c	19.79 a	11.41 b
	S <sub>60</sub>	267.33 bc	144.55 a	38.63 a	35.98 c	84.90 c	18.90 b	11.42 b
	S <sub>40</sub>	257.78 c	144.11 a	36.98 ab	36.05 bc	87.53 bc	18.89 b	12.11 a
	平均 Average		259.57	128.00	33.34	36.28	87.15	18.05
C <sub>H</sub>	CK	139.86 e	141.76 d	19.80 e	36.20 ab	91.75 ab	12.63 d	6.50 e
	U <sub>30</sub>	197.01 d	175.85 ab	34.67 c	35.29 c	90.32 ab	18.23 bc	10.92 c
	U <sub>100</sub>	207.39 c	150.52 d	31.18 d	36.98 a	93.02 a	17.89 c	10.29 d
	S <sub>100</sub>	210.79 bc	164.71 c	34.71 c	35.99 b	87.41 bc	18.70 ab	11.38 ab
	S <sub>80</sub>	224.97 a	169.88 bc	38.21 ab	35.20 c	86.32 c	19.14 a	11.51 a
	S <sub>60</sub>	221.58 ab	181.89 a	40.27 a	34.47 d	84.94 c	19.33 a	11.20 abc
	S <sub>40</sub>	206.40 cd	180.37 ab	37.22 b	34.85 cd	85.89 c	18.67 ab	10.99 bc
	平均 Average		201.14	166.42	33.72	35.57	88.52	17.80
F 值 F-value								
栽植方式 (C) Cultivation method		633.44**	296.33**	1.50	9.25	2.02	0.71	6.42
氮肥运筹方式 (N) Nitrogen management		66.26**	24.52**	101.73**	8.25**	4.59**	161.76**	203.13**
C × N		2.96*	0.10	0.89	2.11	0.93	4.93**	5.78**

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一栽植方式下不同氮肥处理间在 5% 水平上差异显著 Data followed by different letters in a column indicate significant differences among the N-fertilizer treatments under the same cultivation method at the 5% level. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

C<sub>D</sub> 方式下, S<sub>100</sub>、S<sub>80</sub> 处理的生物产量和 S<sub>40</sub> 处理的产量均显著高于其它处理, 表现为穗肥占比越大产量越高, 每穗粒数表现为 S<sub>60</sub> > S<sub>40</sub> > U<sub>30</sub> > S<sub>80</sub> > S<sub>100</sub> > U<sub>100</sub> > CK, 有效穗数趋势相反, 结实率表现为 CK 和 U<sub>100</sub> 处理较高, 其它处理间差异较小, 千粒重在配施处理下均有所降低。C<sub>H</sub> 方式下, 以 S<sub>80</sub> 处理产量最高, 与 S<sub>100</sub> 和 S<sub>60</sub> 处理差异较小, 但显著高于其它处理, 生物产量、有效穗数和籽粒产量趋势大体一致, 每穗粒数表现与 C<sub>D</sub> 方式一致, 结实率和千粒重在 U<sub>100</sub> 处理下最高, 缓释尿素处理下以 S<sub>100</sub> 和 S<sub>80</sub> 处理较高。以上表明, 对于直播稻, 在足量的有效穗数下, 每穗粒数是高产的关键, 增加穗肥占比有利于增粒促结实进而高产, 对于手插稻, 缓释肥全量

基施或配施少量穗肥方可形成适宜的每穗粒数与较高有效穗数的高产优势。

## 2.6 叶片生长指标与产量及其构成的相关性

从表 5 可见, 有效穗数与分蘖盛期前的叶片生长率、拔节期的 LAI 均呈显著或极显著正相关; 每穗粒数与孕穗期叶片增长率和齐穗期 LAI 显著正相关, 与籽粒灌浆阶段剑叶 Pn 和拔节后叶片碳氮比分别呈极显著正相关和负相关, 千粒重和结实率与以上各指标的相关性与有效穗数相反; 总颖花数、生物产量和实际产量与叶片生长指标的相关性基本一致, 与叶片生长率在齐穗前呈极显著正相关, 在齐穗后呈显著或极显著负相关, 与拔节期和齐穗期 LAI 呈显著或极显著正相关, 与孕穗阶段剑叶 Pn 呈



表 5 杂交籼稻叶片生长指标与产量及其构成的相关性

Table 5 Correlation coefficients of leaf growth indexes with grain yield and yield components of *indica* hybrid rice

指标 Index	生育期 Growth stage	有效穗数 Effective panicles	每穗粒数 Grains per panicle	总颖花数 Total spikelets	千粒重 1000-grain weight	结实率 Seed setting rate	生物产量 Biomass yield	实际产量 Grain yield
叶片增长率 Leaf growth rate	6 叶至分蘖盛期 6L-FTS	0.62*	0.22	0.67**	-0.22	-0.47	0.83**	0.75**
	分蘖盛期至拔节期 FTS-JS	0.41	0.36	0.65**	-0.25	-0.34	0.75**	0.69**
	拔节至齐穗期 JS-FHS	0.46	0.54*	0.89**	-0.60*	-0.73**	0.77**	0.86**
	齐穗至成熟期 FHS-MS	-0.34	-0.45	-0.69**	0.42	0.46	-0.64*	-0.69**
LAI	分蘖盛期 FTS	-0.18	0.61*	0.35	-0.33	0.04	0.38	0.34
	拔节期 JS	0.71**	-0.06	0.54*	0.00	-0.43	0.73**	0.64*
	齐穗期 FHS	0.49	0.53*	0.89**	-0.53*	-0.58*	0.91**	0.90**
Pn	孕穗期 BS	0.34	0.44	0.72**	-0.49	-0.60*	0.57*	0.71**
	齐穗期 FHS	0.17	0.72**	0.81**	-0.77**	-0.67**	0.63*	0.69**
	乳熟期 MMS	-0.25	0.85**	0.53*	-0.74**	-0.35	0.40	0.42
	蜡熟期 WRS	-0.21	0.89**	0.59*	-0.77**	-0.38	0.46	0.46
NSC/N	拔节期 JS	-0.01	-0.69**	-0.60*	0.57*	0.24	-0.64**	-0.54*
	齐穗期 FHS	-0.02	-0.80**	-0.77**	0.71**	0.49	-0.54*	-0.66**
	成熟期 MS	0.26	-0.87**	-0.61*	0.84**	0.35	-0.37	-0.38

注 (Note): 6L—6-leaf stage; FTS—Fully tillering stage; JS—Jointing stage; FHS—Fully heading stage; BS—Booting stage; MMS—Milky maturity stage; WRS—Waxy ripe stage; MS—Maturity stages. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

显著或极显著正相关, 与拔节和齐穗期叶片 NSC/N 呈显著或极显著负相关。这表明叶片生长率、LAI 和剑叶 Pn 主要在孕穗期影响产量构成, 后期叶片过度生长会在一定程度上抑制产量形成, 叶片 NSC/N 的提高虽能增加千粒重, 但同样不利于产量形成。

### 3 讨论

#### 3.1 缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交籼稻叶片生长的影响

水稻植株叶色“黑黄交替”的变化能够反映稻株在不同生育阶段的碳氮代谢情况<sup>[21, 22]</sup>, 在水稻高产理论中, 叶色的变化呈“三黑三黄”, “一黑一黄”壮苗促分蘖, “二黑二黄”保穗促分化, “三黑三黄”积累碳水化合物促穗发育<sup>[23]</sup>。本研究发现, 缓释尿素与普通尿素配施下直播稻叶色契合水稻高产理论中“三黑三黄”的变化, 但叶色的具体变化与前人的研究存在一定的差异<sup>[11, 21-22]</sup>。本研究中, 直播稻前期基于群体优势, 分蘖快速增长, 群体数量逐步增大后, 茎蘖个体羸弱矛盾凸显, 氮素含量降低、叶色较浅, 个体生长由氮代谢为主转向以碳代谢为主, 积累 NSC, 为后续的生长发育奠定物质基

础, 此为叶色“一黑一黄”的变化; 整个孕穗期至抽穗前, 合理的氮肥管理下以促花为主, 当前期积累了充足的 NSC, 且穗肥施用足量时, 氮素吸收量增大, 转以氮代谢为主, 后续保花, 碳代谢增强, 实现了孕穗期碳氮代谢的平衡, 此为叶色“二黑二黄”的变化; 抽穗后为保证后期的光合同化能力, 氮代谢再次加强, 随籽粒灌浆的进行, NSC 及氮素由“源”到“库”的输出, 群体逐渐衰老, 叶色发生不可逆转的黄化, 此为叶色“三黑三黄”的变化。手插稻在群体上优势不及直播稻, 但其单茎和个体生长较强壮, 对氮素的吸收能力较强, 增加前期缓释尿素施用量, 可有效促进分蘖发生, 并尽可能多地进行氮素积累, 前期由氮代谢为主向碳代谢为主的转变推迟, 叶色“一黑一黄”持续时间较长; “二黑二黄”的变化与直播稻的“三黑三黄”相似, 亦与“源”的生产能力及由“源”到“库”的输出相关。另外, 缓释尿素养分在前期持续的供给可有效保持叶色, 后期通过合理的穗肥管理, 直播稻在“促”调下加强氮代谢, 手插稻在“控”调下加强碳水化合物同化, 可保证叶片碳氮代谢的平衡, 使叶色分别提升和控制于适宜水平。

在涉及栽植方式处理的研究中,舒时富等<sup>[24]</sup>认为,精量穴直播稻在孕穗期和齐穗期的叶绿素含量和光合速率均较手插稻高,叶靖等<sup>[25]</sup>却表示,直播稻在抽穗期的叶面积指数和剑叶净光合速率均低于移栽稻,光合能力较弱。本研究结果表明,群体优势使得直播稻叶片在前期生长较快,分蘖盛期后由于群体数量降低及个体劣势,中后期叶片生长速率、LAI 及剑叶 Pn 值均低于手插稻,可见,协调直播稻在整个生育期的生长,需在氮肥供给上进行前控后促,减少基肥占比,实行“前控”,增加穗肥占比,实行“后促”,可实现诸如高效叶面积率和孕穗期剑叶 Pn 值等指标的提高,并可有效减缓叶片在后期的衰老。对于手插稻,群体数较小,前期施足缓释尿素,养分供给充足持续,有效促进分蘖发生,增大群体,后期适量补充养分,即可延续前期的生长优势,在各叶片质量指标上均有所体现。

### 3.2 缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交籼稻产量形成的影响

大量研究表明,直播稻的产量不及手插稻和机插稻,主要原因在于,直播稻分蘖成穗率低、每穗粒数少,结实率和千粒重均无优势<sup>[19,26-27]</sup>。但亦有研究指出直播稻存在高产潜力,其群体增穗部分的贡献大于单穗减粒部分的影响<sup>[28]</sup>,另外播种方式的优化能进一步激发直播稻的增产潜能,其中精量穴直播在众多直播种植方式中表现较为突出<sup>[29-30]</sup>。在模拟机械化穴直播的条件下,本研究中直播稻产量高于手插稻,结实率和千粒重与手插稻差异较小,有效穗数和每穗粒数分别较手插稻高 29.05% 和低 23.09%,差异均达极显著水平,形成互补,具体体现在总颖花数,整体差异较小。可见,虽然足穗与大穗结合是高产的保障<sup>[31]</sup>,但有效穗数与穗粒数充分互补同样利于高产形成,直播稻正是在有效穗数充分弥补每穗粒数的处理下形成高产。

前人研究显示,穗肥占比为 40% 时水稻产量优势显著<sup>[32-33]</sup>,本研究发现,在以缓释尿素为基肥的前提下,直播稻在基肥与穗肥配比为 4:6 (S<sub>40</sub>) 时产量优势突出,手插稻在穗肥占比为 20% (S<sub>80</sub>) 时产量较高,分别较普通尿素常规运筹(基蘖穗肥配比为 3:3:4) 增产 15.55% 和 5.40%,可见直播稻在施用缓释尿素的基础上进行优化配施能实现产量的大幅增加。对于结构不同的群体,高产配施比例存在较大差异,直播稻群体数量较大,前期需少肥控群体,后期提高穗肥占比促进大穗形成,手插稻群体数量较小,施足基蘖肥,方可获得较高的有效穗数,这与前人的研究存在相似之处<sup>[34-36]</sup>。另外,不同

氮肥处理下结实率和千粒重差异较大,有效穗数或每穗粒数的优势会对结实率和千粒重造成一定影响,可见直播稻和手插稻均需在总颖花数与千粒重和结实率的相互协调下形成高产。

### 3.3 缓释尿素与普通尿素配施下杂交籼稻叶片生长与产量形成的关系

水稻一生中超过 90% 的干物质积累来自光合产物,叶片作为水稻的主要“源”,是重要的光合器官,叶片质量对水稻产量的形成起决定性作用<sup>[37]</sup>。本研究发现,中后期叶片整体质量与产量基本呈显著以上正相关,其中孕穗期叶片生长率、LAI、剑叶 Pn 及叶片 NSC/N 均与产量呈显著或极显著相关,表明孕穗期的叶片质量是影响产量形成的关键,缪小建<sup>[38]</sup>亦曾指出,保证稻株生育后期源的供应能力是提高产量的关键。在叶片质量指标对产量构成的影响上,其前期与有效穗数、中后期与每穗粒数基本呈正相关,但孕穗期与结实率、齐穗后与千粒重基本呈负相关,可见,叶片主要通过有效穗数和每穗粒数的构建来影响产量形成,结实率和千粒重亦是产量构建的基础,但受总颖花数的影响,在本研究中未能突显其决定性的作用,与前人的研究存在一定的差异<sup>[19]</sup>。在众叶片质量指标中,叶片 NSC/N 在拔节后与产量及其构成的相关性与其它叶片指标相反,说明中、后期叶片的碳氮比不宜太高,碳的同化与稻株的氮素积累具有相关性<sup>[39]</sup>,后期氮素养分供给不足,直接影响叶片正常的光合碳同化。另外,前人通过有机无机结合施肥<sup>[39]</sup>、秸秆还田<sup>[40]</sup>等方式均有效调节了稻株不同器官的碳氮储量,本研究通过缓释尿素与普通尿素的合理配施,亦有效调节了叶片中、后期的碳氮比,产量最高的处理 (C<sub>D</sub>S<sub>40</sub> 和 C<sub>11</sub>S<sub>80</sub>) 在齐穗后叶片的 NSC/N 均相对较小,数值相近,说明后期叶片的碳氮比需在一定的范围内才能实现高产。

## 4 结论

由于直播稻和手插稻群体数量和个体质量存在较大差异,配施处理的叶色整体分别呈“三黄三黑”和“二黄二黑”的变化,直播稻叶色较浅,相关分析表明孕穗期的叶片质量是影响产量形成的关键,增加穗肥占比,既可加深后期叶色,又可优化中后期叶片质量。直播稻和手插稻在配施处理下均可通过提高并控制总颖花量实现增产,但增产途径不同。直播稻的有效穗数是增产基础,每穗粒数是增产关键,手插稻则反之,优势肥料处理对有效穗数与每穗粒数的协调力更强。在本试验条件下,直

播稻和手插稻分别在基肥(缓释尿素)与穗肥(普通尿素)配比为4:6和8:2下产量最高。可见,水稻直播处理下,前期控氮合理协调群体生长,后期增氮提高个体质量,可实现群体与个体的协调,叶片质量的提高,是增产的有效措施。

### 参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.  
China agricultural statistics 2015[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
- [2] 李伟国. 力争2020年全国水稻耕种收综合机械化水平超78%[J]. 农机科技推广, 2015, (5): 4-6.  
Li W G. Strive to achieve over 78% of the comprehensive mechanization of rice cultivation in China by 2020[J]. Agricultural Technology Promotion, 2015, (5): 4-6.
- [3] 张曲, 肖丽萍, 蔡金平, 等. 我国水稻生产机械化发展现状[J]. 中国农机化, 2012, (5): 9-12, 16.  
Zhang Q, Xiao L P, Cai J P, et al. Present situation of rice production mechanization in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012, (5): 9-12, 16.
- [4] Virender K, Ladha J. Direct seeding of rice: Recent developments and future research needs[J]. Advances in Agronomy, 2011, 111: 297-413.
- [5] Liu H, Hussain S, Peng S, et al. Potentially toxic elements concentration in milled rice differ among various planting patterns[J]. Field Crops Research, 2014, 168: 19-26.
- [6] Liu H Y, Saddam H, Zheng M M, et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(1): 285-294.
- [7] 王在满. 同步开沟起垄水稻机械化穴播技术研究[D]. 广州: 华南农业大学博士学位论文, 2016.  
Wang Z M. Design and experiments of precision rice hill-drop drilling technology with synchronous furrowing and ridging[D]. Guangzhou: PhD Dissertation of South China Agricultural University, 2016.
- [8] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 10-15.  
Zhang M H, Wang Z M, Luo X W, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10-15.
- [9] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52-56.  
Luo X W, Jiang E C, Wang Z M, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 52-56.
- [10] 凌启鸿. 精确定量轻筒栽培是作物生产现代化的发展方向[J]. 中国稻米, 2010, 16(4): 1-6.  
Ling Q H. Accurate quantitative light and simple cultivation is the development direction of crop production modernization[J]. Chinese Rice, 2010, 16(4): 1-6.
- [11] 何俊俊, 杨京平, 杨虎, 等. 光照及氮素水平对水稻冠层叶片 SPAD值动态变化的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, 40(5): 495-504.  
He J J, Yang J P, Yang H, et al. Effects of light intensity and nitrogen supply on the dynamic characteristics of leaf SPAD value of rice canopy[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science Edition), 2014, 40(5): 495-504.
- [12] Zheng W, Zhang M, Liu Z, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62.
- [13] Geng J, Ma Q, Zhang M, et al. Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 9-16.
- [14] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat[J]. Agronomy Journal, 2011, 103: 479-485.
- [15] 王海月, 李玥, 孙永健, 等. 不同施氮水平下缓释氮肥施对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 50-64.  
Wang H Y, Li Y, Sun Y J, et al. Effects of slow-release urea on nitrogen utilization and yield in mechanically-transplanted rice under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(1): 50-64.
- [16] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4892-4902.  
Xing X M, Li X C, Ding Y F, et al. Effects of types of controlled released nitrogen and fertilization modes on yield and dry mass production[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(24): 4892-4902.
- [17] 付月君. 控释氮肥与尿素配施对水稻生长及氮素吸收累积的影响研究[D]. 成都: 四川农业大学硕士学位论文, 2016.  
Fu Y J. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer combined with urea on growth, nitrogen uptake accumulation of rice[D]. Chengdu: MS Thesis of Sichuan Agricultural University, 2016.
- [18] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 周炜. 不同播栽方式对水稻生长发育特性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2326-2331.  
Liu H J, Zheng J C, Chen L G, Zhou W. Effects of different planting modes on the growth and development characteristics of rice[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2326-2331.
- [19] 刘红江, 陈虞雯, 张岳芳, 等. 不同播栽方式对水稻叶片光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1206-1211.  
Liu H J, Chen Y W, Zhang Y F, et al. Effects of planting pattern on leaf photosynthetic characteristics and yield of rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2016, 32(6): 1206-1211.
- [20] 田青兰, 刘波, 钟晓媛, 等. 不同播栽方式下杂交籼稻非结构性碳水化合物与枝梗和颖花形成及产量性状的关系[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 35-53.  
Tian Q L, Liu B, Zhong X Y, et al. Relationship of NSC with the formation of branches and spikelets and the yield traits of indica hybrid rice in different planting methods[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(1): 35-53.
- [21] 李杰, 冯跃华, 王旭, 等. 水稻叶片SPAD值分布特征及其与施氮量的关系[J]. 南方农业学报, 2017, 48(1): 38-45.  
Li J, Feng Y H, Wang X, et al. Distribution characteristics of SPAD value in rice leaf and its relationship with nitrogen application rate[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(1): 38-45.

- [22] 赵全志, 丁艳锋, 王强盛, 等. 水稻叶色变化与氮素吸收的关系[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(5): 916–921.  
Zhao Q Z, Ding Y F, Wang Q S, *et al.* Relationship between leaf color and nitrogen uptake of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 916–921.
- [23] 姜继萍, 杨京平, 杨正超, 等. 不同氮素水平下水稻叶片及相邻叶位SPAD值变化特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(2): 166–174.  
Jiang J P, Yang J P, Yang Z C, *et al.* Dynamic characteristics of SPAD value of rice leaf and adjacent leaf under different N application rates[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Science Edition)*, 2012, 38(2): 166–174.
- [24] 舒时富, 郑天翔, 贾兴娜, 等. 精量穴直播晚稻的产量形成特性研究[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(1): 96–98.  
Shu S F, Zheng T X, Jia X N, *et al.* Yield formation characteristics of precision hill-direct-seeding late rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31(1): 96–98.
- [25] 叶靖, 董立强, 王术, 等. 种植方式对水稻产量及相关性状的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(6): 73–75.  
Ye J, Dong L Q, Wang S, *et al.* Effects of planting methods on rice yield and related characters[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(6): 73–75.
- [26] 何瑞银, 罗汉亚, 李玉同, 等. 水稻不同种植方式的比较试验与评价[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 167–171.  
He R Y, Luo H Y, Li Y T, *et al.* Comparison and analysis of different rice planting methods in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 167–171.
- [27] 金军, 薛艳凤, 于林惠, 等. 水稻不同种植方式群体质量差异比较[J]. *中国稻米*, 2006, (6): 31–33.  
Jin J, Xie Y F, Yu H L, *et al.* Comparison of population quality differences in different planting patterns of rice[J]. *China Rice*, 2006, (6): 31–33.
- [28] 黄示瑜, 吴洁远, 蒋兴龙, 黄训颀. 直播稻的生育特点和增产因素分析[J]. *广西农业科学*, 2003, (5): 24–25.  
Huang S Y, Wu J Y, Jiang X L, Huang X Y. Analysis of fertility characteristics and yield-increasing factors of direct-seeded rice[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2003, (5): 24–25.
- [29] 程建平, 罗锡文, 樊启洲, 等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29(1): 1–5.  
Chen J P, Luo X W, Fan Q Z, *et al.* Effects of different planting methods on rice growth characteristics and yield[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(1): 1–5.
- [30] 唐湘如, 罗锡文, 黎国喜, 等. 精量穴直播早稻的产量形成特性[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 84–87.  
Tang X R, Luo X W, Li G X, *et al.* Yield formation characteristics of precision hill-drop drilling early rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 84–87.
- [31] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(11): 2147–2158.  
Gong J L, Hu Y J, Long H Y, *et al.* Study on collaborating characteristics of grain yield components and panicle traits of large panicle hybrid japonica rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2147–2158.
- [32] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(9): 1639–1649.  
Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, *et al.* Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(9): 1639–1649.
- [33] 孙永健, 孙园园, 严奉君, 等. 氮肥后移对不同氮效率水稻花后碳氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(3): 407–419.  
Sun Y J, Sun Y Y, Yan F J, *et al.* Effects of postponing nitrogen topdressing on post-anthesis carbon and nitrogen metabolism in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(3): 407–419.
- [34] 杨志远, 胡蓉, 孙永健, 等. 三角形强化栽培模式下氮肥运筹对II优498产量及氮肥利用的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 1097–1106.  
Yang Z Y, Hu R, Sun Y J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency of Eryou 498 in triangle-planted system of rice intensification[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1097–1106.
- [35] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 773–781.  
Li X Y, Sun Y J, Chen H B, *et al.* Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 773–781.
- [36] 周群. 不同栽培模式对水稻产量的影响及其生理基础[D]. 扬州: 扬州大学硕士学位论文, 2015.  
Zhou Q. The difference of cultivation patterns on rice yield and their physiological bases[D]. Yangzhou: MS Thesis of Yangzhou University, 2015.
- [37] 张建福, 朱永生, 蔡秋华, 等. 再生稻净光合速率与产量及其构成因素的相关性分析[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(1): 103–106.  
Zhang J F, Zhu Y S, Cai Q H, *et al.* Analysis on correlation of net photosynthetic rate with yield and its components of ratooning rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(1): 103–106.
- [38] 缪小建. 水稻非结构性碳水化合物运转规律及产量、品质形成研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2008.  
Miu X J. Study on non-structural carbohydrate movement and yield and quality formation in rice[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agricultural University, 2008.
- [39] 冯蕾. 施肥对水稻植株碳氮分配与积累的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2011.  
Feng L. *et al.* Effects of fertilization on absorption, partition and accumulation of carbon and nitrogen in rice plants[D]. Xi'an: MS Thesis of Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [40] 周卫军, 王凯荣, 郝金菊, 等. 红壤稻田生态系统有机物料循环对土壤有机碳转化的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 140–144.  
Zhou W J, Wang K R, Hao J J, *et al.* Effects of organic materials cycling on soil organic carbon turnover in a red soil paddy ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 140–144.