

马鹏, 杨志远, 李娜, 等. 油菜-水稻轮作模式下油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合生产力及产量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(3): 23-30.
MA Peng, YANG Zhiyuan, LI Na, et al. Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on photosynthetic productivity and yield of hybrid japonica rice under rape-rice rotation mode[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(3): 23-30.

油菜-水稻轮作模式下油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合生产力及产量的影响

马 鹏, 杨志远, 李 娜, 李 郁, 吕 旭, 孙永健, 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】探索油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合生产力及产量的影响, 为水旱轮作模式下水稻适宜的氮肥运筹方式提供理论和实践依据。【方法】以杂交籼稻‘F 优 498’为试验材料, 研究油菜季 2 种氮肥投入量(常规施氮: $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 减量施氮: $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、水稻季 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量基础上 3 种氮肥运筹模式 [M1— m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=2:2:6, M2— m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=3:3:4, M3— m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=4:4:2)] 对杂交籼光合特性、干物质积累与转运和产量的影响。【结果】相对于常规施氮, 油菜季减量施氮影响了杂交籼齐穗期光合特性但没有达到显著水平; 水稻季 M1、M2、M3 处理杂交籼齐穗期和齐穗后 15 d 的光合生产力均增加; 油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹模式杂交籼的光合速率增幅最大。油菜季减量施氮处理杂交籼齐穗期和成熟期茎鞘干物质质量、转化率和产量均增加; 水稻季 M1、M2、M3 处理杂交籼齐穗期茎鞘干物质质量和产量增加; 油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式干物质积累增幅最大。【结论】油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式可增强杂交籼生育后期光合性能, 提高杂交籼叶面积指数, 增加杂交籼干物质积累与转运, 从而提高杂交籼产量, 为本研究最佳处理。

关键词: 油菜-水稻轮作; 减量施氮; 氮肥运筹; 光合速率; 产量

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)03-0023-08

Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on photosynthetic productivity and yield of hybrid japonica rice under rape-rice rotation mode

MA Peng, YANG Zhiyuan, LI Na, LI Yu, LÜ Xu, SUN Yongjian, MA Jun
(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on hybrid japonica rice photosynthetic productivity and yield, and provide a theoretical and practical basis for suitable nitrogen fertilizer operation mode of rice under paddy-upland rotation.

【Method】 The hybrid japonica rice ‘F you 498’ was used as experimental material to investigate the effects of two nitrogen fertilizer application amounts (conventional nitrogen fertilizer application of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, reduced nitrogen fertilizer application of $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) in rape season and three nitrogen fertilizer management methods

收稿日期: 2019-08-12 网络首发时间: 2020-04-22 11:00:34

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20200421.1055.016.html>

作者简介: 马 鹏 (1989—), 男, 博士研究生, E-mail: 1163299054@qq.com; 通信作者: 马 均 (1963—), 男, 教授, 博士, E-mail: majunp2002@163.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0301202, 2017YFD0301706, 2017YFD0301701); 四川省育种攻关专项 (2016NYZ0051)

based on $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season on photosynthetic characteristics, material accumulation and transport and yield of hybrid rice. The concrete nitrogen fertilizer management methods were M1 (the mass ratio of base fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer was 2 : 2 : 6), M2 (the mass ratio of base fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer was 3 : 3 : 4) and M3 (the mass ratio of base fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer was 4 : 4 : 2). **【Result】** Compared to conventional nitrogen fertilizer application, reduced nitrogen fertilizer application affected photosynthetic characteristics of rice at full heading stage, but the effect was not significant. M1, M2 and M3 treatments increased photosynthetic productivity of rice at full heading stage and 15 days after full heading. The photosynthetic rate increased most in reduced nitrogen fertilizer application and M3 treatment. Reduced nitrogen fertilizer application increased rice stem-sheath dry matter mass at full heading stage and maturity stage, conversion rate and yield. M1, M2 and M3 increased rice stem-sheath dry matter mass at full heading stage and yield. The highest increase of dry matter accumulation was in reduced nitrogen fertilizer application and M3 treatment. **【Conclusion】** Reduced nitrogen fertilizer application in rape season and M3 management method in rice season can improve rice yield by enhancing photosynthetic performance at late growth stage, increasing leaf area index, and promoting dry matter accumulation and transportation. It is the best treatment in this study.

Key words: rape-rice rotation; reduced nitrogen fertilizer application; nitrogen fertilizer management; photosynthetic rate; yield

人口基数大、耕地资源少是我国的基本国情,预计在 2030 年我国人口将达到 14.73 亿^[1],农作物产量只有在现有基础上继续提升才能实现粮食的安全供给,提高粮食作物产量是解决我国人多地少问题的主要途径。水稻作为我国四大粮食作物之一,单产高出世界水平的 65% 以上,保证水稻的高产和稳产对我国乃至世界粮食安全有重要作用^[2]。合理施用氮肥是保证水稻稳产、高产的栽培技术之一^[3-5]。氮素是植株体内核酸、辅酶以及光合色素分子等的重要组成成分,植株含氮量与光合速率密切相关,在一定的施氮量范围内水稻叶片含氮量和净光合速率随施氮量的增加而增加,叶片含氮量过高光合速率降低^[6-7]。水稻生育后期适当施用氮肥可以延缓叶片衰老、延长光合作用时间^[8-11]。四川成都是长江上游的主要稻作区,水旱轮作是成都平原的主要种植模式,油菜季氮肥施用和水稻季氮肥管理的栽培技术能否满足资源高效利用和实现水稻高产尚不明确,前人的研究主要集中在水稻季的氮肥管理对杂交稻光合特性的影响^[8, 10],油菜季氮肥投入及水稻季氮肥运筹对杂交稻光合生产力及氮素利用的影响少有研究。因此,本研究以‘F 优 498’为试验材料,采用大田小区试验,在 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量基础上,研究油菜季 2 种氮肥投入和水稻季 3 种氮肥配比运筹条件下杂交稻光合特性、物质生产能力以及氮素利用规律,明确油菜季氮肥投入及水稻季氮肥运筹对杂交水稻物质转运及氮素吸收利用

的影响,为探索成都平原油菜-水稻轮作模式下适宜的水稻氮肥运筹方式提供理论和实践依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地情况

试验于 2017—2018 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,供试土壤为砂壤土,种植油菜前 0~20 cm 土层有机质 $24.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $116.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $23.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $49.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 6.19。

1.2 试验设计与实施

试验采用两因素裂区设计,主区为油菜季常规施氮 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和减量施氮 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 2 种氮肥投入量,副区为水稻季在 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量的基础上设置 3 种运筹模式: m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=2:2:6(M1)、 m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=3:3:4(M2)、 m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=4:4:2(M3)。以副区不施氮处理 (M0) 为对照,共 8 个处理,3 次重复。小区面积 12.9 m^2 ,小区间筑埂 (宽 30 cm、高 40 cm) 并用塑料薄膜包裹,以防串水串肥。油菜季氮、磷、钾质量配比为 2:1:2,氮肥按基肥与追肥各占 50% 的比例配施,磷、钾肥全部作为基肥施用。水稻季氮、磷、钾质量配比为 2:1:2,磷肥 (P_2O_5) $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥 (K_2O) $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 全部

作基肥施用,基肥在移栽前1天施入,分蘖肥于移栽后第7天施用,穗肥分促花肥和保花肥,相同施

用量,分别于倒4叶和倒2叶期施用。油菜收获后水稻田土壤理化性质如表1所示。

表1 油菜收获后水稻田土壤理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of paddy soil after harvesting rape

氮肥投入	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	pH
Nitrogen fertilizer application	Organic matter	Total nitrogen	Available nitrogen	Available phosphorus	Available potassium	
常规施氮	29.39a	1.87a	128.47a	26.20a	65.86a	6.19a
Conventional nitrogen fertilizer application						
减量施氮	27.03b	1.65b	117.36b	25.03b	61.32b	6.15a
Reduced nitrogen fertilizer application						

1)同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, LSD法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$, LSD method)

供试水稻品种为‘F优498’,该品种属籼型三系杂交水稻,抗逆性强,耐热性较弱,产量较高。采用早育秧,于2018年4月17日播种,5月23日人工移栽,单株种植,株行距为33.3 cm×16.7 cm,其他田间管理措施与当地高产栽培技术相同。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤基础理化性质 油菜收获后利用五点采样法收集土壤样品,取0~20 cm耕层土壤带回实验室于阴凉通风处风干,磨细过筛后置于干燥处保存。土壤pH用电位法测定,水土质量比为2.5:1;有机质含量采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄稀释热法测定;全氮含量采用FOSS-8400凯氏定氮仪测定;速效磷含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用火焰光度法测定。

1.3.2 光合特性和叶绿素含量 分别于齐穗期、齐穗后15 d的09:00—11:00使用便携式光合测定系统LI-6400(美国LI-COR公司生产)测定剑叶净光合速率、气孔导度以及蒸腾速率,每个处理取5片生长基本一致的叶片进行测定,重复3次。

1.3.3 叶面积 各小区分别于拔节期和齐穗期选择生长基本一致的植株3株,用叶面积仪CI-203测定拔节期叶面积和齐穗期高效叶面积,并计算叶面积指数,其中高效叶面积为有效茎蘖上3叶的总面积。

1.3.4 杂交稻植株干物质积累与转运 于拔节期、齐穗期和成熟期取田间长势基本一致的植株3株,分茎、叶片和穗3部分于105℃杀青30 min,75℃烘干72 h至恒质量,称取各部分干质量,计算茎鞘物质输出率和转化率。

1.3.5 测产与考种 杂交稻成熟时,每个小区除去

边行保护行,其余杂交稻植株均单打单收,晒干后折算成容许含水量13.5%记为实收产量。

1.4 相关参数计算

$$\text{光合势} = 1/2(S_1 + S_2)(t_2 - t_1),$$

式中, S_1 、 S_2 分别为拔节期及齐穗期测定的叶面积; t_1 、 t_2 分别为拔节期及齐穗期测定叶面积的时间。

茎鞘物质输出率=(齐穗期茎鞘干质量-成熟期茎鞘干质量)/齐穗期茎鞘干质量×100%,

茎鞘物质转化率=(齐穗期茎鞘干质量-成熟期茎鞘干质量)/籽粒干质量×100%。

1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2016统计数据,采用DPS 7.05进行数据统计分析,用LSD法分析不同处理在 $P<0.05$ 水平的差异显著性,采用Origin 9.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 油菜季减量施氮对油菜产量的影响

常规施氮处理油菜的平均产量为2.59 t·hm⁻²,减量施氮处理油菜的平均产量为2.22 t·hm⁻²,比常规施氮处理显著减产14.28%,说明减量施氮会降低油菜产量。

2.2 油菜季减量施氮与水稻季氮肥运筹对杂交水稻叶面积指数及光合势的影响

由表2可知,油菜季施氮量对杂交稻拔节期和齐穗期叶面积指数和光合势的影响不显著,水稻季氮肥运筹影响显著,二者交互效应的影响也达到显著水平。相对于常规施氮,减量施氮处理杂交稻拔节期叶面积指数增加5.61%,齐穗期叶面积指数和拔节期至齐穗期光合势分别增加8.57%和2.90%。

表 2 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻叶面积指数及光合势的影响¹⁾Table 2 Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on leaf area index and photosynthetic potential of hybrid *jayonica* rice

氮肥投入 Nitrogen fertilizer application	氮肥运筹 Nitrogen management	拔节期 Jointing stage		齐穗期 Full heading stage		拔节期至齐穗期 Jointing stage to full heading stage
		叶面积指数 Leaf area index	叶面积指数 Leaf area index	高效叶面积指数 High effective leaf area index	高效叶面积率/% High effective leaf area ratio	光合势/ ($\times 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{hm}^{-2}$) Photosynthetic potential
常规施氮 Conventional nitrogen fertilizer application	M0	4.20c	5.63c	3.63c	63.94b	164.83d
	M1	5.54ab	6.69b	4.15bc	61.24c	224.05c
	M2	5.28b	7.45a	4.89ab	65.78a	227.35b
	M3	5.65a	7.76a	5.14a	66.50a	233.87a
	平均值 Average	5.17	6.88	4.46	64.37	212.53
减量施氮 Reduced nitrogen fertilizer application	M0	4.32c	5.99c	3.59b	58.05d	169.60d
	M1	5.32ab	6.79b	4.39b	64.39c	214.68c
	M2	5.47b	8.41a	5.68a	68.96a	239.58b
	M3	6.72a	8.72a	5.95a	68.04b	250.94a
	平均值 Average	5.46	7.47	4.91	64.86	218.71
P	N	0.350 5	0.098 9	0.151 8	0.833 8	0.566 7
	M	0.050 6	0.018 1	0.027 5	0.026 6	0.037 2
	N×M	0.000 1	0.049 6	0.025 6	0.000 1	0.000 1

1)M0: 水稻季不施氮; M1: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=2 : 2 : 6; M2: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=3 : 3 : 4; M3: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=4 : 4 : 2; N: 油菜季施氮处理; M: 水稻季氮肥运筹方式; 油菜季相同施氮量同列数据后的不同小写字母表示水稻季不同氮肥运筹方式间差异显著($P < 0.05$, LSD法)

1) M0: No nitrogen fertilizer application in rice season; M1: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=2 : 2 : 6; M2: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=3 : 3 : 4; M3: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=4 : 4 : 2; N: Nitrogen fertilizer application treatment in rape season; M: Nitrogen fertilizer management method in rice season; Different lowercase letters in the same column and nitrogen fertilizer application treatment in rape season indicate significant differences among different nitrogen fertilizer management methods in rice season ($P < 0.05$, LSD method)

常规施氮和减量施氮条件下, 水稻季 M1、M2、M3 处理杂交稻拔节期、齐穗期叶面积指数及齐穗期至拔节期光合势均较 M0 处理增加, 其中均以 M3 处理的增幅最大, 分别增加 34.52%、37.83%、41.88% 和 55.55%、45.57%、47.95%。油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹模式更有利于提高拔节期和齐穗期叶面积指数及拔节期至齐穗期光合势。

2.3 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合特性的影响

由表 3 可知, 油菜季施氮量对杂交稻齐穗期、齐穗后 15 d 光合特性的影响不显著, 水稻季氮肥运筹对杂交稻齐穗期光合速率、蒸腾速率和齐穗后 15 d 的光合速率影响显著, 对其他光合指标影响不显著, 二者的交互效应对齐穗期气孔导度影响不显

著, 对其他光合指标影响显著。相对于常规施氮, 减量施氮降低了齐穗期光合速率, 但差异不明显。油菜季常规施氮和减量施氮条件下, 水稻季 M1、M2、M3 处理杂交稻齐穗期和齐穗后 15 d 的光合速率、气孔导度和蒸腾速率均比 M0 处理增加, 其中光合速率均以 M3 增幅最大。油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式的光合速率增幅最大, 有利于提高杂交稻剑叶的光合速率。

2.4 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻物质积累、转运及产量的影响

2.4.1 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻物质积累、转运的影响 水稻季氮肥运筹对杂交稻干物质质量的影响在油菜季常规施氮和减量施氮处理中存在一定差异 (图 1)。在油菜季常规施氮条件下, 相对于 M0 处理, M1、M2 和 M3 处理主

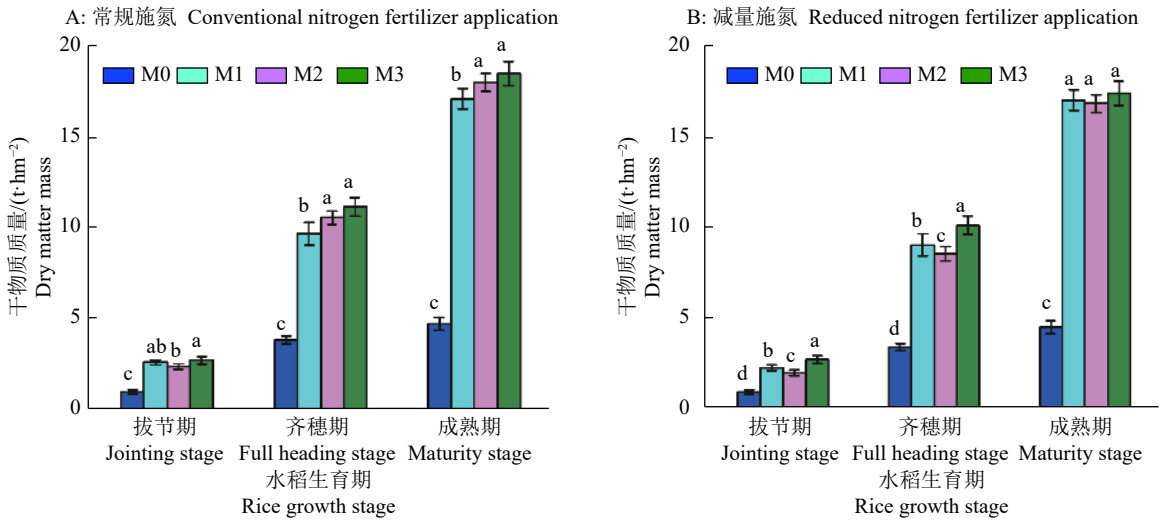
表3 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合特性的影响

Table 3 Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on photosynthetic traits of hybrid japonica rice

氮肥投入 Nitrogen fertilizer application	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer management	齐穗期 Full heading stage			齐穗后15 d 15 days after full heading		
		光合速率/ Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	光合速率/ Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度/ Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/ Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
常规施氮 Conventional nitrogen fertilizer application	M0	12.85d	0.137 6a	6.95c	9.05d	0.044 9a	3.32b
	M1	20.98c	0.165 9a	7.04bc	15.77c	0.046 4a	3.37ab
	M2	22.72b	0.172 1a	7.34b	16.95b	0.053 5a	3.43ab
	M3	29.41a	0.182 3a	7.70a	20.97a	0.055 4a	3.46a
	平均值 Average	21.49	0.164 4	7.24	15.68	0.050 0	3.29
减量施氮 Reduced nitrogen fertilizer application	M0	11.78d	0.131 7b	6.37b	8.25d	0.041 7b	3.42b
	M1	19.41c	0.134 1b	6.43b	17.33c	0.050 2ab	3.59a
	M2	20.60b	0.178 5ab	7.11a	19.08b	0.057 7a	3.62a
	M3	24.61a	0.204 5a	7.31a	25.77a	0.059 1a	3.67a
	平均值 Average	19.10	0.162 2	6.81	17.61	0.052 1	3.57
P	N	0.063 8	0.862 3	0.204 5	0.193 3	0.714 4	0.106 8
	M	0.004 2	0.116 2	0.047 2	0.010 8	0.600 2	0.873 7
	N×M	0.000 1	0.513 3	0.000 2	0.000 1	0.038 8	0.002 1

1)M0: 水稻季不施氮; M1: 水稻季施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=2 : 2 : 6; M2: 水稻季施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=3 : 3 : 4; M3: 水稻季施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=4 : 4 : 2; N: 油菜季施氮处理; M: 水稻季氮肥运筹方式; 油菜季相同施氮量同列数据后的不同小写字母表示水稻季不同氮肥运筹方式间差异显著 ($P<0.05$, LSD法)

1) M0: No nitrogen fertilizer application in rice season; M1: Applying $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=2 : 2 : 6; M2: Applying $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=3 : 3 : 4; M3: Applying $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=4 : 4 : 2; N: Nitrogen fertilizer application treatment in rape season; M: Nitrogen fertilizer management method in rice season; Different lowercase letters in the same column and nitrogen fertilizer application amount in rape season indicate significant differences among different nitrogen fertilizer management methods in rice season ($P<0.05$, LSD method)



M0: 水稻季不施氮; M1、M2、M3: 水稻季施氮量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 基肥、分蘖肥、穗肥质量比分别为 2:2:6、3:3:4、4:4:2; 各图中相同生育期不同柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD法)

M0: No nitrogen fertilizer application in rice season; M1, M2, M3: Applying $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, the mass ratios of base fertilizer, tiller fertilizer and panicle fertilizer were 2:2:6, 3:3:4 and 4:4:2, respectively; Different lowercase letters on the different columns at the same growth stage in each figure indicate significant differences ($P<0.05$, LSD method)

图1 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻干物质积累的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on dry matter accumulation of hybrid japonica rice

要生育期干物质积累增加,拔节期干物质积累表现为 $M3 > M1 > M2 > M0$, 齐穗期和成熟期表现为 $M3 > M2 > M1 > M0$, $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 间多差异显著,且均显著高于 $M0$ (图 1A)。在油菜季减量施氮条件下,相对于 $M0$ 处理, $M1$ 、 $M2$ 和 $M3$ 处理干物质积累增加,均表现为 $M3 > M1 > M2 > M0$, $M1$ 、 $M2$ 和 $M3$ 处理间的干物质积累在拔节期和抽穗期差异显著,成熟期差异不显著,均显著高于 $M0$ (图 1B)。相对于常规施氮,减量施氮成熟期 $M0$ 、 $M1$ 、 $M3$ 处理干物质积累分别降低 4.84%、1.15%、5.08%,说明油菜季常规施氮和水稻季 $M3$ 运筹方式是提高杂交稻干物质积累量的优势组合。

由表 4 可知,油菜季施氮量、水稻季氮肥运筹方式及二者的交互效应对杂交稻物质转运的影响大多达到显著或极显著水平。相对于常规施氮,减

量施氮处理齐穗期茎鞘干物质质量、成熟期茎鞘干物质质量、茎鞘物质转化率分别增加了 7.98%、8.60%、10.29%。油菜季常规施氮和减量施氮条件下,相对于 $M0$ 处理, $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 处理齐穗期和成熟期茎鞘干物质质量均增加,且均以 $M3$ 处理的增幅最大,分别增加 31.10%、16.54% 和 34.54%、15.55%。从整体上看,油菜季减量施氮和水稻季 $M3$ 运筹模式的干物质积累量更大,更有利于促进杂交稻物质积累与转运。

2.4.2 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻产量的影响 由表 5 可知,油菜季施氮量、水稻季氮肥运筹方式及二者的交互效应对杂交稻产量构成因素影响不显著,但水稻季氮肥运筹模式及二者的交互效应对实收产量的影响达显著或极显著水平。相对于常规施氮,减量施氮处

表 4 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻物质积累转运的影响

Table 4 Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on accumulation and transport of hybrid japonica rice

氮肥投入 Nitrogen fertilizer application	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer management	齐穗期茎鞘干物质质量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Stem-sheath dry matter mass of full heading stage	成熟期茎鞘干物质质量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Stem-sheath dry matter mass mass of maturity stage	茎鞘物质输出率/% Export rate of stem-sheath matter	茎鞘物质转化率/% Conversion rate of stem-sheath matter
常规施氮 Conventional nitrogen fertilizer application	M0	5 340.46d	4 034.71d	24.45ab	19.71ab
	M1	5 378.51c	4 166.68c	22.53b	13.48b
	M2	6 575.03b	4 556.74b	30.73ab	22.30a
	M3	7 001.52a	4 702.05a	32.84a	23.76a
	平均值 Average	6 073.88	4 365.05	27.64	19.81
减量施氮 Reduced nitrogen fertilizer application	M0	5 604.60d	4 286.55c	23.54ab	18.46bc
	M1	5 637.07c	4 357.23d	22.70ab	14.38c
	M2	7 452.83b	4 865.72b	34.71a	27.92a
	M3	7 540.67a	4 953.19a	34.31a	26.65ab
	平均值 Average	6 558.79	4 740.25	28.15	21.85
P	N	0.045 3	0.001 9	0.100 6	0.008 4
	M	0.005 8	0.027 2	0.005 4	0.023 8
	N×M	0.000 1	0.000 1	0.000 3	0.000 1

1) $M0$: 水稻季不施氮; $M1$: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=2 : 2 : 6; $M2$: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=3 : 3 : 4; $M3$: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=4 : 4 : 2; N: 油菜季施氮处理; M: 水稻季氮肥运筹方式; 油菜季相同施氮量同列数据后的不同小写字母表示水稻季不同氮肥运筹方式间差异显著($P < 0.05$, LSD法)

1) $M0$: No nitrogen fertilizer application in rice season; $M1$: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=2 : 2 : 6; $M2$: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=3 : 3 : 4; $M3$: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=4 : 4 : 2; N: Nitrogen fertilizer application treatment in rape season; M: Nitrogen fertilizer management method in rice season; Different lowercase letters in the same column and nitrogen fertilizer application amount in rape season indicate significant differences among different nitrogen fertilizer management methods in rice season ($P < 0.05$, LSD method)

表 5 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻产量及产量构成的影响

Table 5 Effects of nitrogen fertilizer application in rape season and nitrogen fertilizer management in rice season on yield and yield component of hybrid japonica rice

氮肥投入 Nitrogen fertilizer application	氮肥运筹 Nitrogen fertilizer management	有效穗数/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Number of effective spike	每穗粒数 Number of seeds per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒质量/g 1000-grain weight	实收产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
常规施氮 Conventional nitrogen fertilizer application	M0	133.21c	199.62b	89.86b	30.70c	6.62c
	M1	153.86ab	203.66b	90.86ab	31.19bc	8.98b
	M2	152.82b	207.63b	91.51a	31.78ab	9.05b
	M3	160.74a	218.68a	91.58a	32.16a	9.67a
	平均值 Average	150.15	207.39	90.95	31.46	8.58
减量施氮 Reduced nitrogen fertilizer application	M0	128.71b	205.71a	89.92b	30.25c	6.54c
	M1	153.72a	211.63a	90.83ab	31.61ab	8.99b
	M2	149.64a	218.64a	90.94ab	31.33b	9.26ab
	M3	155.88a	226.36a	92.27a	32.25a	9.70a
	平均值 Average	146.99	215.58	90.99	31.36	8.62
P	N	0.335 9	0.293 7	0.885 8	0.776 7	0.286 1
	M	0.024 5	0.129 5	0.054 4	0.129 2	0.002 0
	N×M	0.082 3	0.239 2	0.584 0	0.095 6	0.000 1

1) M0: 水稻季不施氮; M1: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=2 : 2 : 6; M2: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=3 : 3 : 4; M3: 水稻季施氮量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, m (基肥) : m (分蘖肥) : m (穗肥)=4 : 4 : 2; N: 油菜季施氮处理; M: 水稻季氮肥运筹方式; 油菜季相同施氮量同列数据后的不同小写字母表示水稻季不同氮肥运筹方式间差异显著($P < 0.05$, LSD法)

1) M0: No nitrogen fertilizer application in rice season; M1: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=2 : 2 : 6; M2: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=3 : 3 : 4; M3: Applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer in rice season, m (base fertilizer) : m (tiller fertilizer) : m (panicle fertilizer)=4 : 4 : 2; N: Nitrogen fertilizer application treatment in rape season; M: Nitrogen fertilizer management method in rice season; Different lowercase letters in the same column and nitrogen fertilizer application amount in rape season indicate significant differences among different nitrogen fertilizer management methods in rice season ($P < 0.05$, LSD method)

理每穗粒数、结实率、实收产量分别增加了 3.95%、0.04%、0.47%。在油菜季常规施氮和减量施氮条件下, 相对于 M0 处理, M1、M2、M3 处理的有效穗数、每穗粒数和实收产量均有增加, 均以 M3 处理增幅最大, 分别增加 20.66%、9.55%、46.04% 和 21.10%、10.03%、48.39%。由此可知, 油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式杂交稻有效穗数和每穗粒数增加的幅度更大, 更有利于提高杂交稻产量。

3 讨论与结论

3.1 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻光合生理特性的影响

水稻生育后期的光合作用会直接影响产量, 合理的氮肥运筹方式可以调控水稻生育后期的生长及光合作用^[12]。本研究发现, 在油菜-水稻轮作模式下, 油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式提高了

水稻光合性能、叶面积指数及拔节期至齐穗期光合势, 进而提高水稻产量, 其主要原因可能是油菜根系比较发达, 吸收和富集养分的能力比较强, 根系分泌的有机酸可以溶解土壤中难溶的营养元素, 提高其有效性。油菜季氮素大部分残留在土壤中导致水稻季土壤氮素含量比较高, 水稻季合理的氮肥运筹增加了前期氮肥供应, 弥补了前期土壤肥力的不足, 塑造了良好的前期群体, 水稻生育中后期叶面积指数和高效叶面积指数增加, 具有较强的光捕获能力, 改善水稻的光合性能, 减缓光合速率下降的幅度, 为籽粒分配更多的同化物质^[13]。合理的氮肥运筹可以协调水稻生长期的吸氮特性, 增加同化物质的转化, 提高叶绿素含量, 增强光系统电子传递能力, 延缓水稻植株衰老, 有效调节光合性能, 进而增产^[14]。同时合理的氮肥运筹延长水稻叶面积指数高值持续期, 保持较高的光合面积, 对提高产量具有重要意义。

3.2 油菜季氮肥投入与水稻季氮肥运筹对杂交籼稻物质积累与转运、产量的影响

水稻干物质生产能力和分配方式直接影响最终产量。作物生产能力和同化物向器官转运能力是作物产量的基础,受基因和栽培条件调控^[15-17]。本研究表明,油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式具有较高的干物质积累量和产量,原因可能是水稻分蘖期至拔节期生长速度比较快,对氮素的需求较多,适宜的氮肥运筹与水稻对氮素的需求时期相吻合^[18],从而保证水稻生育后期具有较强的同化物转化能力,促进其向籽粒中分配,提高千粒质量。相关研究表明,合理的施氮水平和氮肥运筹方式可以显著提高水稻产量^[19]。本研究发现,相对于常规施氮,减量施氮处理水稻产量增加了 0.47%。油菜季常规施氮和减量施氮水稻季 M3 运筹方式的实收产量无差异,可能是油菜季减量施氮和水稻季 M3 运筹方式减少无效分蘖和弱势分蘖的发生,促进优势分蘖成穗,其着粒数和实粒数也提高,形成优势群体。合理的氮肥运筹提高了水稻的有效穗数、每穗粒数和千粒质量,这与徐富贤等^[20] 研究结果相似。在本试验条件下,油菜季减量施氮水稻季 M3 运筹方式杂交稻实收产量最高,达到 9.70 t·hm⁻²,既能降低氮肥投入,又能优化群体生长,保证产量,为本试验最佳处理。

3.3 结论

从资源高效利用来看,油菜季减量施氮 (150 kg·hm⁻²) 和水稻季 M3 运筹方式 [m (基肥): m (蘖肥): m (穗肥)=4:4:2] 通过增强水稻生育后期光合性能,提高水稻叶面积指数,增加水稻干物质积累与转运,从而提高水稻产量,促进水稻生产可持续发展,为本研究最佳处理。

参考文献:

- [1] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [2] 王丹英. 水稻品种演替过程中植株形态与氮肥利用效率的变化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [3] 王海月, 殷尧鑫, 孙永健, 等. 不同株距和缓释氮肥配施量下机插杂交稻的产量及光合特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 843-855.
- [4] 王海月, 郭长春, 孙永健, 等. 缓释氮肥减量配施和株距对机插杂交籼稻氮素利用的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 155(4): 66-78.
- [5] 邓中华. 机插株行距和施氮量对杂交水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(2): 75-79.
- [6] EVANS J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Plant Physiol*, 1983, 72(2): 297-302.
- [7] OLSZEWSKI J, MAKOWSKA M, PSZCZÓLKOWSKA A, et al. The effect of nitrogen fertilization on flag leaf and ear photosynthesis and grain yield of spring wheat[J]. *Plant Soil Environ*, 2014, 60(12): 531-536.
- [8] 张军, 谢兆伟, 朱敏敏, 等. 不同施氮时期对水稻剑叶光合特性及稻米品质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2008, 24(5): 656-661.
- [9] 田畅, 王洋, 卜险峰, 等. 行向和种植方式对生育后期玉米叶片衰老进程的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(1): 55-62.
- [10] 龙继瑞, 马国辉, 万宜珍, 等. 施氮量对超级杂交中稻生育后期剑叶叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(5): 501-507.
- [11] 周亮. 氮肥种类与施用量对早稻光合特性及产量的影响[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(4): 51-54.
- [12] 苏姗, 傅志强, 龙文飞, 等. 氮肥运筹对双季晚稻产量及光合特性的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(3): 222-227.
- [13] 张涛. 不同施氮量和氮素形式对水稻光合特性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2004.
- [14] 朱懿. 宜香 1A 系列组合的光合生产及产量形成特点[J]. *杂交水稻*, 2014, 29(4): 68-72.
- [15] 邓飞, 王丽, 刘利, 等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1930-1942.
- [16] 胡琳, 许为钢, 赵新西, 等. 论作物高产的遗传基础及实现产量突破的技术与途径[J]. *河南农业科学*, 2008, 37(11): 29-32.
- [17] 杨建昌, 张建华. 促进稻麦同化物转运和籽粒灌浆的途径与机制[J]. *科学通报*, 2018, 63(Z2): 20-31.
- [18] 杨惠杰, 房贤涛, 谢祖钦, 等. 不同施氮量对杂交水稻干物质生产的影响[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(4): 333-337.
- [19] 成臣, 曾勇军, 王祺, 等. 氮肥运筹对南方双季晚粳稻产量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1386-1395.
- [20] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 西南地区氮肥后移对杂交中稻产量及构成因素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 29-36.

【责任编辑 李庆玲】