

引用格式:

彭志芸, 丁峰, 谌洁, 向开宏, 马鹏, 郭长春, 马均. 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.

PENG Z Y, DING F, SHEN J, XIANG K H, MA P, GUO C C, MA J. Effects of straw mulching and nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of direct seeding rice under wheat rape rice rotation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(3): 253–261.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



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

彭志芸^{1,2}, 丁峰^{1,2}, 谌洁^{1,2}, 向开宏^{1,2}, 马鹏^{1,2}, 郭长春^{1,2}, 马均^{1,2*}

(1.四川农业大学水稻研究所, 四川 温江 611130; 2.作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 温江 611130)

摘 要: 以宜香优 2115 为材料, 采用二因素裂区设计: 主区设小麦或油菜秸秆全量翻埋还田(M_1)和秸秆不还田对照(M_0); 副区设 4 个氮肥管理, 不施氮(N_0), 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 10 0 0 0(N_1), 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 3 3 2 2(N_2), 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 2 2 3 3(N_3), 研究秸秆还田和氮肥管理对直播稻的光合特性、干物质积累及产量的影响。结果表明: 麦-稻或油-稻轮作下, 氮肥管理对直播稻主要生育时期的干物质积累、光合特性及产量均存在显著或极显著的调控效应, 秸秆还田显著影响水稻拔节期、齐穗期的叶面积指数(LAI)及群体干物质积累, 同时油-稻轮作下其调控效应高于麦-稻轮作模式。秸秆不还田时, 配合 N_3 施肥方式, 可有效提高直播稻结实期剑叶净光合速率、SPAD 值和叶面积指数, 延缓叶片衰老, 且在拔节期至成熟期间保持较高的群体生长率, 干物质积累优势明显; 秸秆还田下, 配以基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 3 3 2 2 的管理模式, 麦茬或油茬直播稻群体构建合理, 结实期剑叶光合能力强, 有效穗、每穗粒数较多, 表现高产, 产量最高可达 10 090、10 693 kg/hm²。综合分析, 麦-稻或油-稻轮作下秸秆还田, 配合基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 3 3 2 2 的氮肥管理模式, 能实现直播稻的高产稳产。

关 键 词: 麦-稻轮作; 油-稻轮作; 直播稻; 秸秆还田; 氮肥管理; 产量构成; 光合特性

中图分类号: S511.047 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2020)03-0253-09

Effects of straw mulching and nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of direct seeding rice under wheat rape rice rotation

PENG Zhiyun^{1,2}, DING Feng^{1,2}, SHEN Jie^{1,2}, XIANG Kaihong^{1,2}, MA Peng^{1,2}, GUO Changchun^{1,2}, MA Jun^{1,2*}

(1.Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China; 2.Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Wenjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract: This study adopted two factors split plot design to study effects of the wheat/rape straw returned and nitrogen management of direct seeding on rice photosynthetic characteristics, the influence of the dry matter accumulation and yield. The main area was wheat /rape straw turned over and returned to the field(M_1) and the straw was not returned to the field (M_0). In the secondary area, 4 nitrogen fertilizer management contained the control with no nitrogen application (N_0), three groups with the ratio of the application rates of basal fertilizer, tillering fertilizer, flower-promoting fertilizer and flower-protecting fertilizer was 1 0 0 0 (N_1), 3 3 2 2 (N_2), 2 2 3 3 (N_3), respectively. The results showed that

收稿日期: 2019-08-29

修回日期: 2019-10-08

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

作者简介: 彭志芸(1995—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产高效优质栽培研究, 1403775459@qq.com; *通信作者, 马均, 博士, 教授, 主要从事水稻高产高效优质栽培研究, majunp2002@163.com

under wheat-rice or rape-rice rotation, nitrogen fertilizer management had significant or very significant regulation effects on dry matter accumulation, photosynthetic characteristics and yield of direct seeding rice at main growth stages. And straw returning significantly affected leaf area index (LAI) and population dry matter accumulation of rice at jointing stage and full heading stage. Meanwhile, the regulation effect of rape-rice rotation was significantly higher than that of wheat-rice rotation. When straw was not returned to the field, combined with N_3 fertilization, it could effectively increase the net photosynthetic rate, SPAD value and leaf area index of flag leaves, delay leaf senescence, and maintain a high population growth rate from jointing stage to mature stage. The advantage of dry matter accumulation is obvious. Under the nitrogen fertilizer management mode of straw returning to the field with N_2 , the population of direct seeding rice with wheat /rape stubble had reasonable construction, strong photosynthetic capacity of flag leaves at filling stage, more grains per panicle, high yield, and the highest yield could reach 10 090 kg/hm² and 10 693 kg/hm². In summary, with wheat /rape-rice rotation, the nitrogen fertilizer management model of straw returning to the field combined with that the ratio of the application rates of base fertilizer, tillering fertilizer, flower promoting fertilizer and flower protection fertilizer was 3 3 2 2 could achieve high and stable yield of direct seeding rice.

Keywords: wheat rice rotation; rape rice rotation; direct-seeding rice; straw returning to the field; nitrogen fertilizer management; yield formation; photosynthetic characteristics

籽粒产量和物质积累主要来源于光合产物, 良好的群体结构、适宜的叶面积指数(LAI)和较高的光合速率是实现作物高产的重要条件^[1]。前茬作物秸秆中含有氮、磷、钾等大量元素以及纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、脂肪等营养元素, 是一种可靠的有机肥源^[2], 还田后可明显提高水稻分蘖成穗率, 促进稻株生长发育, 增加抽穗期和成熟期叶面积指数(LAI)^[3], 显著提高水稻叶片净光合速率^[4], 开“源”扩“库”, 达到增产的目的^[5]。但秸秆物质结构复杂, 养分释放缓慢, 且腐解前期产生的乙酸、丙酸等物质不利于水稻根系生长发育^[6]; 秸秆 C/N 较高^[7], 前期微生物与作物争氮现象严重, 影响水稻氮素吸收。生产上, 通常需要配施氮肥来进行调控。

直播稻由于省去了育秧移栽等环节, 劳动生产效率大幅度提高, 已在全国各地推广应用。相比移栽稻, 直播稻具有根系浅、根数多且细^[8]、分蘖节位低、分蘖能力强^[9]、生育期较短^[10]等特点; 因此, 其氮肥管理模式应区别于移栽稻。研究^[11-12]表明, 直播稻适当降低基肥的施用比例, 能显著降低无效分蘖的数量, 提高根系氧化活性、叶绿素含量、LAI 及光合速率, 增加灌浆期叶片氮含量和植株氮积累量, 提高产量。施肥方法的优化对直播稻产量的提高具有重要意义。

麦茬稻和油茬稻是中国水稻种植的主体模式。

资料^[13]显示, 2015 年四川麦-稻、油-稻种植总面积分别达 1.33×10^6 、 9.66×10^5 hm²。麦-稻或油-稻轮作对于稳定粮食安全、促进可持续农业发展、改善农作物种植结构都具有至关重要的作用。目前, 关于轮作模式下的秸氮耦合研究较多, 但主要局限于单一的轮作模式^[14-15], 缺乏不同模式之间的系统比较。朱芸等^[16]研究指出, 麦-稻、油-稻周年轮作体系养分收支平衡存在较大差异, 这必然导致水稻生长发育及产量特性的不同。本研究中, 针对麦茬、油茬田同期开展试验, 比较 2 种轮作模式下前茬秸秆与氮肥配施对直播稻群体生长、光合特性及产量等影响的差异, 旨在筛选 2 种轮作方式下秸秆还田耦合氮肥管理的最佳模式, 为水稻的轻简化绿色栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地力情况

试验于 2018 年在四川省崇州市四川农业大学现代农业研发基地开展, 供试品种为宜香优 2115(三系中籼杂交稻, 全生育期 156.7 d)。耕层土壤(0~20 cm)质地为砂壤土, 主要化学性质见表 1。试验用肥选用尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。

表 1 试验田耕层土壤(0~20 cm)的化学性质

Table 1 Chemical properties of topsoil (0~20 cm) in the test field

前茬土壤类型	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	速效氮含量/(mg·kg ⁻¹)	速效磷含量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/(mg·kg ⁻¹)
麦茬田(P _w)	31.36	92.39	16.74	187.43
油茬田(P _o)	39.49	102.59	17.47	226.76

1.2 试验设计

试验采用两因素裂区设计,麦茬、油茬稻同田同期播种。主区为 2 种秸秆处理方式: M_0 , 秸秆不还田(对照); M_1 , 秸秆全量翻埋还田。裂区设 4 种氮肥管理模式: N_0 , 对照, 不施氮肥; N_1 , 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 10 0 0 0; N_2 , 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 3 3 2 2; N_3 , 基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 2 2 3 3。

小麦或油菜籽粒收获后秸秆经机器粉碎, 长度约为 10 cm, 整田时用旋耕机全量翻耕还田(小麦、油菜秸秆还田量分别为 5 300、5 483 kg/hm²), 不还田处理(M_0)将秸秆移除田间。水稻浸种后于 5 月 15 日采用上海世达尔现代农机有限公司生产的直播机 2BDXS-10CP(25)进行湿润直播, 行间距为 25 cm×20 cm, 播量为 3~5 粒/穴。氮肥总用量为 150 kg/hm², 按不同运筹模式施用。基肥、分蘖肥分别于 2 叶期、5 叶期施用; 促花肥、保花肥分别于倒 4 叶、倒 2 叶施用。磷肥(施肥量 75 kg/hm²)作基肥, 一次性施用。钾肥(施肥量 150 kg/hm²)用作基肥、穗肥, 施用比例为 1 1。每个处理 3 次重复。小区面积 15 m²。小区间筑埂(宽 40 cm), 并用塑料薄膜包裹, 防止水肥互串。水分管理及病虫草害防治等按照常规管理进行。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 剑叶 SPAD 值的测定

稻株齐穗后开始, 每隔 7 d, 每小区选具有代表性的稻株 30 株, 用便携式 SPAD-502 叶绿素仪, 于 14:00—16:00 测定剑叶中部及其上下 1/3 处 3 点的 SPAD 值, 结果取平均值。

1.3.2 叶面积的测定

于水稻拔节期和齐穗期按各小区的平均茎蘖数取 3 穴稻株, 用美国生产的 CID-203 叶面积仪测定绿叶面积, 并计算叶面积指数, 其中高效叶面积为上 3 叶的总叶面积。

1.3.3 光合参数的测定

于齐穗后 0、15、30 d, 用美国生产的 Li-6400 便携式光合仪, 测定剑叶净光合速率(Pn)。控制条

件如下: CO₂ 浓度 400 μmol/mol, 温度 30 °C, 光照 1 200 μmol/(m²·s)。各小区选具代表性的主茎剑叶 5 片, 避开叶脉测定中部, 每叶重复测定 3 次。

1.3.4 干物质积累量

于拔节期、齐穗期、成熟期按各小区的平均茎蘖数取 3 穴稻株, 分离茎鞘、叶和穗(拔节期除外), 105 °C 杀青 45 min, 80 °C 烘干至恒重。

1.3.5 考种与计产

于成熟期各小区随机调查 60 穴的茎蘖数, 平均值记为有效穗。再取具代表性稻株 5 穴, 考查穗部性状。收获时各小区去边行, 按实收株数计产。

1.4 数据计算和统计分析

$$A=(LAI_2 - LAI_1)/(t_2 - t_1)。$$

式中: A 为叶面积衰减率; LAI_1 、 LAI_2 分别为拔节期、齐穗期测定的叶面积指数; t_1 、 t_2 分别为拔节及齐穗期测定的时间。

$$B=(W_2 - W_1)/(T_2 - T_1)。$$

式中: B 为群体生长率; W_1 、 W_2 分别为前后 2 个生育时期测定的群体干物质质量; T_1 、 T_2 分别为前后 2 个生育时期测定的时间。

用 Microsoft Excel、Origin 9.0 及 DPS 6.5 进行数据处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻光合特性的影响

2.1.1 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻结实期剑叶 SPAD 动态的影响

由图 1 可见, 2 种轮作模式下, 齐穗后各处理水稻剑叶 SPAD 值均随生育进程逐渐下降, 于齐穗后 21 d 时下降速率加快, N_1 处理呈近似直线下降趋势, N_2 和 N_3 处理下降速率有所减缓且变化较为平缓。不同氮肥管理下, 水稻结实期剑叶 SPAD 值从大到小依次为 N_3 、 N_2 、 N_1 、 N_0 , 表明追施穗肥能有效减缓叶片衰老, 延长叶片功能期, 且 N_3 较 N_2 更利于维持结实期水稻叶片 SPAD 值的稳定。秸秆还田直播稻剑叶的 SPAD 值较不还田的略高, 但差异不显著。

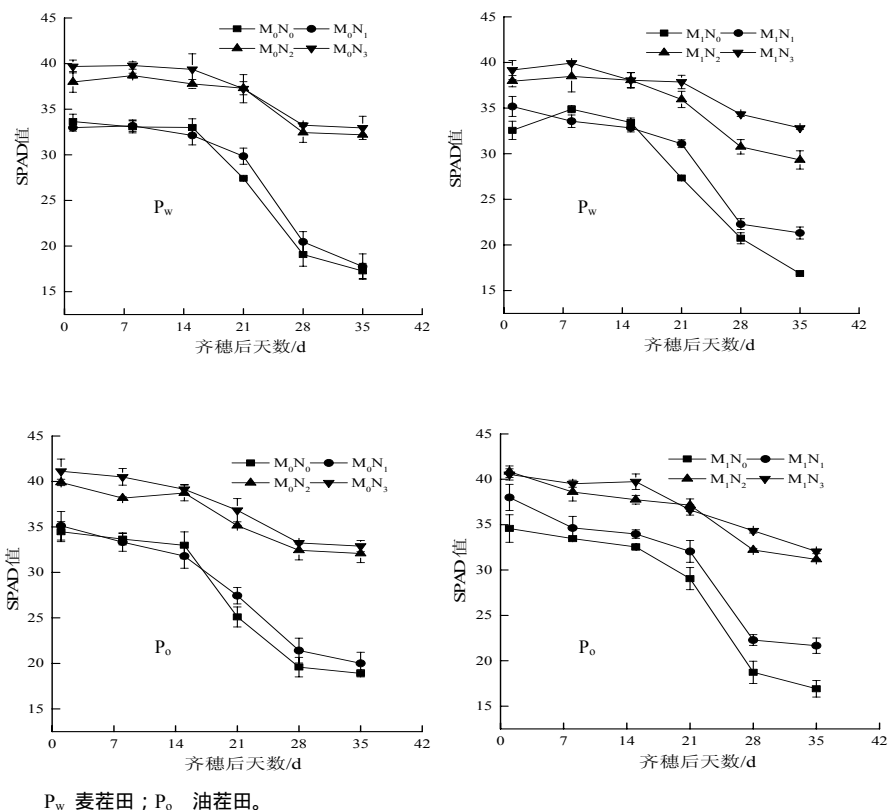


图 1 不同秸秆还田与氮肥管理模式下直播稻结实期剑叶的 SPAD 值

Fig.1 The SPAD values of the blade of direct seeding rice under different straw mulching and nitrogen fertilizer management modes

2.1.2 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻结实期剑叶光合速率的影响

从表 2 可知， N_0 和 N_1 处理在结实期叶片净光合速率均较低， N_2 、 N_3 在齐穗后 15、30 d 净光合速率显著高于 N_0 和 N_1 的，可见，增施穗肥可显著

提高水稻结实期剑叶净光合速率。除麦茬稻秸秆还田齐穗后 30 d 和油茬稻秸秆不还田齐穗后 30 d 下的剑叶净光合速率 N_3 显著高于 N_2 的外，其余时期 N_2 、 N_3 的剑叶净光合速率差异均不显著。秸秆还田下直播稻剑叶净光合速率较不还田的高。

表 2 不同秸秆还田与氮肥管理模式下直播稻齐穗后剑叶的净光合速率

Table 2 Net photosynthetic rate of sword-leaf of direct seeding rice under different straw mulching and nitrogen fertilizer management modes					
轮作方式	处理	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
		0 d	15 d	30 d	
麦-稻	M_0N_0	14.39	14.70b	7.32c	
	M_0N_1	15.15	13.23b	11.71b	
	M_0N_2	16.21	20.36a	16.69a	
	M_0N_3	16.04	20.50a	17.91a	
	均值	15.45	17.20	13.41	
	M_1N_0	15.44b	14.67b	10.17d	
	M_1N_1	16.69ab	14.80b	12.74c	
	M_1N_2	18.34a	22.10a	15.04b	
	M_1N_3	17.53ab	19.95a	17.86a	
	均值	17.00	17.88	13.95	
F	M	15.88	4.85	2.64	
	N	2.88	40.89**	60.15**	
	$M\times N$	0.66	0.88	11.52**	
轮作方式	处理	净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
		0 d	15 d	30 d	
油-稻	M_0N_0	15.85ab	14.45b	10.07c	
	M_0N_1	14.66b	14.10b	11.62c	
	M_0N_2	16.74a	18.49a	16.39b	
	M_0N_3	17.26a	19.98a	18.68a	
	均值	16.13	16.76	14.19	
	M_1N_0	16.24b	12.74c	11.84b	
	M_1N_1	17.08ab	15.41b	12.26b	
	M_1N_2	18.03a	18.48a	18.03a	
	M_1N_3	18.60a	20.50a	17.00a	
	均值	17.49	16.79	14.78	
F	M	2.07	0.001	1.37	
	N	6.14**	17.17**	41.11**	
	$M\times N$	1.03	0.72	2.09	

同列数据后的不同小写字母表示在同一秸秆处理下 4 个氮肥管理在 0.05 水平上差异显著；“**”表示在 0.01 水平上差异显著。

2.1.3 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻光合叶面积的影响

从表 3 可以看出,氮肥管理对直播稻拔节期、齐穗期叶面积指数(LAI),齐穗期高效叶面积指数(FHLAI)、高效叶面积率(FHLAR)、拔节期至齐穗期叶面积衰减率的影响达极显著水平;秸秆处理对麦茬直播稻拔节期 LAI、叶面积衰减率和油茬直播稻齐穗期 LAI、FHLAI 有显著影响;两者互作对 FHLAR 有极显著影响,对油茬直播稻的 FHLAI 有显著影响。秸秆还田较不还田的光合物质生产指标(除麦/油茬稻拔节期 LAI)总体上均有所提高,其中

麦茬稻齐穗期的平均 LAI、FHLAI 和 FHLAR 较不还田的分别提高了 13.92%、15.76%和 0.51%,油茬稻的则分别提高 10.75%、12.71%和 0.77%。相对麦茬稻,油茬稻有更好的光合物质生产表现,其拔节期 LAI、齐穗期 LAI、FHLAI 在秸秆还田下较麦茬稻的平均高 3.10%、9.41%、7.27%;不还田下,平均高 17.79%、6.37%、4.45%。在秸秆未还田下,随氮肥后移量的增加,直播稻拔节期 LAI 呈递减趋势,齐穗期 LAI、FHLAI、FHLAR 和拔节至齐穗期叶面积衰减率从大到小依次为 N₃、N₂、N₁,秸秆还田时其大小依次为 N₂、N₃、N₁。

表 3 不同秸秆还田与氮肥管理模式下直播稻的光合叶面积特征

Table 3 Photoperiod area characters of live rice under different straw mulching and nitrogen fertilizer management modes						
轮作方式	处理	叶面积指数		齐穗期高效叶面积指数	齐穗期高效叶面积率/%	叶面积衰减率/(LAI·d ⁻¹)
		拔节期	齐穗期			
麦-稻	M ₀ N ₀	3.69c	3.72c	2.40c	64.56b	0.001b
	M ₀ N ₁	6.25a	4.73b	2.92b	61.72c	-0.038c
	M ₀ N ₂	5.10b	5.69a	3.72a	65.22ab	0.015b
	M ₀ N ₃	4.33c	6.27a	4.15a	66.17a	0.049a
	M ₁ N ₀	2.96b	4.02c	2.29c	56.92d	0.027b
	M ₁ N ₁	4.63a	5.56b	3.55b	63.82c	0.023b
	M ₁ N ₂	4.30a	7.04a	4.93a	70.05a	0.068a
	M ₁ N ₃	4.08a	6.63a	4.52a	68.21b	0.064a
	<i>F</i>					
	M	21.19*	5.00	6.92	1.36	48.601*
油-稻	N	18.17**	30.41**	35.91**	99.37**	14.562**
	M×N	1.86	1.22	2.94	65.41**	2.178
	M ₀ N ₀	3.85c	4.33c	2.72c	62.90b	0.012b
	M ₀ N ₁	6.25a	5.39b	3.24b	60.20c	-0.022c
	M ₀ N ₂	5.00b	6.15a	3.98a	64.74a	0.029a
	M ₀ N ₃	4.85b	6.46a	4.23a	65.46a	0.040a
	M ₁ N ₀	3.73b	4.69c	2.68c	57.01c	0.024b
	M ₁ N ₁	5.18a	5.49b	3.48b	63.35b	0.008c
	M ₁ N ₂	5.07a	7.42a	5.04a	67.92a	0.059a
	M ₁ N ₃	4.81a	7.11a	4.77a	67.00a	0.058a
	<i>F</i>					
	M	1.18	310.10**	52.23*	0.29	13.498
	N	20.50**	50.79**	66.12**	31.52**	25.998**
	M×N	2.21	2.60	4.68*	14.27**	0.771

同列数据后的不同小写字母表示在同一秸秆处理下 4 个氮肥管理在 0.05 水平上差异显著;“*”“**”“***”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

2.2 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻干物质积累的影响

从表 4 可知,氮肥管理对 2 种轮作模式下稻株的干物质积累特征(除油茬稻拔节期单茎干质量外)均有显著或极显著的调控效应,秸秆处理对麦茬稻

拔节期群体干质量及播种至拔节期的群体生长率以及油茬稻齐穗期的干物质积累和成熟期的群体干质量调控效应显著,两者互作对成熟期麦茬稻群体干质量和油茬稻群体生长率有显著影响。相较秸秆不还田,还田后麦/油茬稻拔节期干物质积累量减

少,但齐穗期和成熟期干物质积累优势显著。麦茬稻成熟期的单茎干质量、群体干质量及拔节至齐穗期群体生长率在秸秆还田下较不还田分别提高了2.86%、2.11%和8.75%,油茬稻则分别提高3.99%、4.42%和7.90%。油茬稻各时期的平均干物质积累量均高于麦茬稻,其成熟期单茎、群体干物质积累量和全生育期群体生长率在秸秆还田下比麦茬稻高

1.98%、3.74%、3.90%,不还田下高3.10%、6.09%、16.45%。从氮肥管理来看,拔节期 N_1 、 N_2 的物质积累表现较好。齐穗期和成熟期的干物质积累及积累速率在秸秆未还田时大小依次为 N_3 、 N_2 、 N_1 ;秸秆还田下,除油茬稻齐穗期单茎干质量大小依次为 N_3 、 N_2 、 N_1 外,其余指标大小依次为 N_2 、 N_3 、 N_1 。

表 4 不同秸秆还田与氮肥管理模式直播稻干物质的积累特性

Table 4 Accumulation of dry matter in direct seeding rice under different straw mulching and nitrogen fertilizer management modes										
轮作方式	处理	单茎干质量/g			群体干质量/(t·hm ⁻²)			群体生长率/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)		
		JS	FHS	MS	JS	FHS	MS	SS-JS	JS-FHS	FHS-MS
麦-稻	M ₀ N ₀	0.86b	5.78b	8.28c	1.82c	9.87c	14.11c	3.43c	20.12b	10.60b
	M ₀ N ₁	1.10a	6.06b	8.46c	3.17a	11.77b	16.10b	5.99a	21.49b	10.83ab
	M ₀ N ₂	1.01a	6.87a	9.47b	2.44b	13.12a	17.81b	4.60b	26.69a	11.74b
	M ₀ N ₃	0.96ab	6.99a	10.13a	2.25b	13.34a	18.76a	4.24b	27.73a	13.55a
	M ₁ N ₀	0.67b	5.85b	8.45b	1.13c	9.36c	13.48d	2.13c	20.59c	10.31b
	M ₁ N ₁	0.85a	6.21b	8.57b	2.26a	11.85b	16.34c	4.27a	23.96b	11.22ab
	M ₁ N ₂	0.93a	7.43a	10.35a	2.13a	14.28a	19.43a	4.02a	30.37a	12.88a
	M ₁ N ₃	0.80a	7.10a	10.03a	1.73b	13.54a	18.45b	3.27b	29.53a	12.26a
F	M	12.15	1.46	1.00	32.99*	0.24	0.62	32.98*	3.49	0.11
	N	6.00**	13.31**	38.54**	31.11**	62.58**	191.50**	31.11**	37.64**	4.13*
	M×N	0.83	0.40	2.18	1.85	2.11	8.20**	1.85	0.97	0.48
油-稻	M ₀ N ₀	1.03	6.02b	8.82b	2.19b	10.37c	15.31b	4.14b	20.44b	11.45b
	M ₀ N ₁	1.05	5.69c	8.05c	2.75a	11.49b	16.46b	5.18a	21.85b	11.80ab
	M ₀ N ₂	1.09	7.16a	9.90a	2.80a	13.20a	18.26a	5.28a	26.12a	12.09ab
	M ₀ N ₃	0.98	7.19a	10.29a	2.39b	13.32a	18.73a	4.51b	27.22a	13.52a
	M ₁ N ₀	0.91b	6.14b	8.82b	2.11b	10.36c	14.90c	3.99b	20.60c	10.74b
	M ₁ N ₁	0.99ab	6.18b	8.49b	2.57a	12.14b	16.78b	4.86a	23.91b	11.61b
	M ₁ N ₂	1.11a	7.43a	10.62a	2.72a	14.41a	20.50a	5.13a	29.66a	15.67a
	M ₁ N ₃	1.08a	7.52a	10.61a	2.56a	13.90a	19.61a	4.83a	29.04a	14.75a
F	M	0.06	72.13*	4.70	0.06	38.07*	36.04*	0.06	16.48*	2.49
	N	1.575	90.46**	47.49**	6.96**	60.52**	28.67**	6.96**	49.25**	11.08**
	M×N	1.265	0.89	0.89	0.52	1.42	2.12	0.52	1.66	4.35*

JS 拔节期; FHS 齐穗期; MS 成熟期; SS-JS 播种-拔节期; JS-FHS 拔节期-齐穗期; FHS-MS 齐穗期-成熟期。同列数据后的不同小写字母表示在同一秸秆处理下4个氮肥管理在0.05水平上差异显著; “*”“**”“***”分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。

2.3 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻产量及其构成因子的影响

从表5可以看出,氮肥管理对直播稻产量的影响达极显著水平,秸秆处理对产量影响不显著,两者互作对产量及其构成因子均无显著性影响。麦-稻轮作、油-稻轮作下秸秆还田较不还田分别增产0.96%~4.66%、0.60%~4.56%,油茬稻的产量较麦茬稻的产量在秸秆还田、不还田下分别提高了5.22%、4.71%。从氮肥管理来看,秸秆不还田时,产量从高至低依次为 N_3 、 N_2 、 N_1 ;秸秆还田时,产

量从高至低依次为 N_2 、 N_3 、 N_1 。表明2种轮作方式下秸秆还田耦合 N_2 的氮肥模式更利于直播稻产量的提高。

从产量构成来看,氮肥管理对其影响均达显著或极显著水平。麦茬稻秸秆还田的平均千粒质量、结实率、每穗粒数较不还田的均有所增加,有效穗数略有减少;油茬稻秸秆还田的平均有效穗、结实率和每穗粒数较不还田的有所增加,千粒质量有所降低。对比分析2种轮作模式下氮肥管理对水稻产量构成的影响,有效穗数从多至少依次为 N_1 、 N_2 、

N_3 ,除麦茬稻 M_1N_2 的每穗粒数高于 M_1N_3 的外 ,其他处理的每穗粒数从多至少依次为 N_3 、 N_2 、 N_1 , N_1 的千粒质量和结实率均高于 N_2 、 N_3 的。综合来看 ,2 种轮作模式下秸秆还田配合 N_2 的氮肥管理均有较高的有效穗和每穗粒数 ,同时保持稳定的千粒质量和结实率 ,从而获得直播稻的高产。

表 5 不同秸秆还田与氮肥管理模式下直播稻的产量及其构成因子

Table 5 Yield and its components of direct seeding rice under different straw mulching and nitrogen fertilizer management modes						
轮作方式	处理	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒质量/g	结实率/%	每穗粒数	实际产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
麦-稻	M_0N_0	160.50b	37.78ab	92.60a	145.19b	7 790b
	M_0N_1	190.33a	38.25a	92.17a	146.19b	9 309a
	M_0N_2	188.17a	37.46bc	88.70b	160.51a	9 641a
	M_0N_3	183.78a	37.11c	88.75b	170.02a	9 761a
	M_1N_0	156.33c	37.65b	92.18a	143.13b	7 409c
	M_1N_1	190.67a	38.28a	92.61a	144.10b	9 489b
	M_1N_2	185.44ab	37.66b	90.04ab	175.55a	10 090a
	M_1N_3	182.89b	37.25b	88.53b	173.00a	9 855ab
F	M	5.00	0.12	0.49	0.85	0.31
	N	59.61**	9.95**	4.83*	28.15**	75.57**
	$M \times N$	0.28	0.26	0.20	2.16	1.99
油-稻	M_0N_0	173.67c	37.88ab	91.21ab	144.21b	8 253c
	M_0N_1	201.33a	38.14a	91.90a	145.23b	9 331b
	M_0N_2	183.67b	37.59b	89.61ab	173.52a	10 227a
	M_0N_3	181.00b	37.51b	89.29b	177.10a	10 411a
	M_1N_0	169.00c	37.93ab	93.89a	143.77c	8 015c
	M_1N_1	197.56a	38.07a	92.40a	145.83c	9 588b
	M_1N_2	194.67ab	37.43bc	89.66b	172.69b	10 693a
	M_1N_3	186.67b	37.36c	88.59b	182.41a	10 473a
F	M	6.18	3.50	0.68	0.31	0.52
	N	27.47**	5.22*	7.76**	65.35**	78.6**
	$M \times N$	2.88	0.11	1.43	0.33	1.46

同列数据后的不同小写字母表示在同一秸秆处理下 4 个氮肥管理在 0.05 水平上差异显著 ; “*”“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

3 结论与讨论

前茬作物秸秆是丰富的有机肥源。前人研究发现 , 秸秆还田能培肥地力、提高水稻产量 , 且增产效应随还田时间延长而增加^[17-18]。本研究结果表明 , 秸秆还田能有效提高水稻结实期的剑叶净光合速率、齐穗期叶面积指数和高效叶面积率 , 减缓叶片衰老 , 提高直播稻中后期群体生长速率 , 中后期干物质积累优势明显 , 故而增产 , 这与李思平等^[19]的研究结果一致。2 种轮作模式均在秸秆还田耦合基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥氮肥施用比例为 3 3 2 2 的管理模式下产量表现最好 ; 而在秸秆不还田时 , 以基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥的氮肥施用比例为 2 2 3 3 的处理产量表现更佳。说

明在秸秆还田下适当增加基蘖肥配比可有效缓解因秸秆还田微生物与作物争氮的矛盾 , 保障了直播稻前期分蘖的发生及干物质的积累。

本研究结果表明 , 秸秆未还田时 , 直播稻产量随穗肥比例增大而增加 , 当耦合 60% 的穗肥比例时 , 有最好的产量表现 , 这与邓安凤等^[20]的研究结果大致相同。究其原因 , 可能是足够的穗肥处理保证了直播稻中后期的光合物质生产能力 , 麦茬稻、油茬稻齐穗期 SPAD 值、净光合速率和 LAI 均较大 , 后期物质积累优势明显。秸秆还田下 , 40% 的穗肥处理产量最佳 , 表明秸秆还田下直播稻的氮肥管理中基蘖肥的比例不宜过少 , 这与赵锋等^[21]的研究结论相同。本试验 N_1 处理 , 有效穗虽多 , 但后期无氮肥供应 , 导致叶片早衰严重 , 后期光合物质供应

不足,每穗颖花数急剧减少,因而穗型较小,产量较低;在 N_3 处理中,氮肥后移较多,前期氮素供应不足,影响水稻分蘖的发生,最终形成的有效穗较少,虽后期单茎光合物质生产能力较强,但群体干物质积累优势不明显,产量不高。

本试验中油-稻轮作模式下的直播稻产量高于麦-稻轮作,主要优势为有效穗较多,其他产量构成因子间相互协调得较好。这源于油-稻轮作体系中前期的高群体生长速率(油-稻轮作在秸秆还田、不还田处理下,播种至拔节阶段的干物质积累速率高于麦茬稻的),以及花后叶片强光合同化能力(齐穗期高效叶面积指数),保障了有效分蘖的充分形成,有利于库容的充分构建及籽粒灌浆,从而获得较高的每穗粒数和稳定的干粒质量、结实率。曹培等^[22]的研究表明,油-稻轮作模式相比麦-稻轮作模式,更利于提高稻田耕层不同层次土壤的有机碳储量,增加土壤固碳能力,可有效提高水稻季籽粒产量。另外,油菜秸秆C/N较低^[23-24],利于微生物的降解,也更有利于稻谷产量的提高。

综合来看,2种轮作模式下,秸秆还田耦合基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥的氮肥施用比例为3 3 2 2的氮肥管理模式能有效发挥直播稻穗数优势,增强结实期叶片光合性能,促进花后叶片、茎鞘将同化物质转运至籽粒,显著提高直播稻产量,尤其以油-稻轮作模式下水稻的产量更高。

参考文献:

- [1] WEI H Y, ZHANG H C, BLUMWALD E, et al. Different characteristics of high yield formation between inbred japonica super rice and inter-sub-specific hybrid super rice[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 179-187.
- [2] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695-2702.
- [3] 易镇邪, 刘书波, 陈冬林, 等. 不同复种制下秸秆还田对水稻生产能力的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 39(6): 565-569.
YI Z X, LIU S B, CHEN D L, et al. Effect of straw returning to field on rice productivity in different cropping systems[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2013, 39(6): 565-569.
- [4] 隋阳辉, 高继平, 刘彩虹, 等. 东北冷凉地区秸秆还田方式对水稻光合、干物质积累及氮素吸收的影响[J]. *作物杂志*, 2018(5): 137-143.
- [5] SUI Y H, GAO J P, LIU C H, et al. Effects of straw incorporation modes on rice photosynthesis, dry matter accumulation and nitrogen uptake in cool region of northeast China[J]. *Crops*, 2018(5): 137-143.
- [6] 肖汉乾, 屠乃美, 关广晟, 等. 烟-稻复种制下烟杆还田对晚稻生产的效应[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(2): 154-158.
XIAO H Q, TU N M, GUAN G S, et al. Effects of flue-cured tobacco straw returning on late season rice production under tobacco-rice cropping pattern[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2008, 34(2): 154-158.
- [7] 金鑫, 蔡林运, 李刚华, 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5): 80-85.
JIN X, CAI L Y, LI G H, et al. Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(5): 80-85.
- [8] 张淑香, 吕庭宏, 杨建林, 等. 旱塬农区秸秆还田对土壤理化性质的影响[J]. *土壤肥料*, 1999(4): 15-17.
ZHANG S X, LYU T H, YANG J L, et al. Influence of straw return to field on physico-chemical properties in upland regions[J]. *Soils and Fertilizers*, 1999(4): 15-17.
- [9] 陶冶. 不同种植方式下水稻产量、水氮利用效率及稻田温室气体排放比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
TAO Y. Comparison among different rice establishment methods: grain yield, water and nitrogen utilization efficiencies and greenhouse gas emissions[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [10] 许轲, 唐磊, 张洪程, 等. 不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 43-52.
XU K, TANG L, ZHANG H C, et al. Effect of different mechanical direct seeding methods on tiller characteristics and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 43-52.
- [11] 毛永兴. 直播水稻生长发育特性及其配套栽培技术研究[J]. *耕作与栽培*, 2003(1): 30-31.
MAO Y X. Study on growth and development characteristics of direct seeding rice and its supporting cultivation techniques[J]. *Tillage and Cultivation*, 2003(1): 30-31.
- [12] 刘元英, 吴振雨, 彭显龙, 等. 养分管理对寒地直播稻生长发育及产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2014, 45(7): 1-8.
LIU Y Y, WU Z Y, PENG X L, et al. Effect of nutrient management on growth and yield of direct-seeded rice in cold area[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2014, 45(7): 1-8.

- [12] ZHANG H, YU C, KONG X S, et al. Progressive integrative crop managements increase grain yield, nitrogen use efficiency and irrigation water productivity in rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 1–11.
- [13] 卓福昌. 四川省主要稻作区水旱轮作模式调查与综合评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- ZHUO F C. The investigation and comprehensive evaluation about rice-xerophyte rotation in Sichuan Province[D]. Yaan, China: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [14] 曹凯, 王建红, 张贤, 等. 浙江油-稻轮作土壤肥力与作物产量特征[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(6): 947–949.
- CAO K, WANG J H, ZHANG X, et al. Characteristics of crops yield and soil fertility under rice-rapeseed rotation in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(6): 947–949.
- [15] 游来勇, 李冰, 王昌全, 等. 秸秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(12): 2394–2401.
- YOU L Y, LI B, WANG C Q, et al. Effects of different amount of straw incorporation on grain yield, nitrogen uptake and use efficiency in wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(12): 2394–2401.
- [16] 朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 等. 长江流域油-稻与麦-稻轮作体系周年养分收支差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 64–73.
- ZHU Y, LIAO S P, LIU Y, et al. Differences of annual nutrient budgets between rapeseed-rice and wheat-rice rotations in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 64–73.
- [17] YUAN L, ZHANG Z C, CAO X C, et al. Responses of rice production, milled rice quality and soil properties to various nitrogen inputs and rice straw incorporation under continuous plastic film mulching cultivation[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 164–171.
- [18] 王德建, 常志州, 王灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(9): 1073–1082.
- WANG D J, CHANG Z Z, WANG C, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1073–1082.
- [19] 李思平, 丁效东, 曾路生, 等. 秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 208–215.
- LI S P, DING X D, ZENG L S, et al. Effects of straw returning and chemical fertilizer reduction on growth index and photosynthetic parameters of rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 208–215.
- [20] 邓安凤, 杨从党, 陈清华, 等. 不同施肥方式对不同密度下直播稻的产量及群体光合物质生产的影响[J]. *中国稻米*, 2017, 23(4): 123–129.
- DENG A F, YANG C D, CHEN Q H, et al. Effects of different fertilization methods on yield and photosynthetic material production of direct seeding rice at different densities[J]. *China Rice*, 2017, 23(4): 123–129.
- [21] 赵锋, 程建平, 汪本福, 等. 氮肥运筹对机械栽植早稻两优287根系特征和产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(7): 1505–1509.
- ZHAO F, CHENG J P, WANG B F, et al. Effect of nitrogen management patterns to root traits and yield of mechanical planting early rice variety liangyou 287[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(7): 1505–1509.
- [22] 曹培, 朱杰, 朱波, 等. 稻田水旱轮作系统对土壤有机碳及产量的短期影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(4): 81–85.
- CAO P, ZHU J, ZHU B, et al. Short-term effects of paddy-upland rotation systems on soil organic carbon and yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(4): 81–85.
- [23] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(3): 100–104.
- SONG L, HAN S, LU J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(3): 100–104.
- [24] 段宗颜, 王瑞宝, 鲁耀, 等. 小麦秸秆碳氮比调控施用对烟叶氮磷钾吸收的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(23): 12510–12513.
- DUAN Z Y, WANG R B, LU Y, et al. Effects of regulation of C/N ratio wheat straw application on tobacco nitrogen, phosphorus and potassium uptake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(23): 12510–12513.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳 正