



麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤氮素供应及直播稻产量的影响

彭志芸^{1,2}, 吕旭¹, 伍杂日曲¹, 舒川海¹, 湛洁¹, 向开宏¹, 杨志远¹, 马均^{1*}

(1. 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, 成都 611130; 2. 宜宾市农业科学院, 四川 宜宾 644000)

摘要 为探究麦(油)-稻轮作模式下秸秆还田和氮肥运筹对土壤氮素供应和直播稻产量的影响, 于2018年和2019年在四川农业大学崇州试验基地开展2年定位试验。试验采用两因素裂区设计, 主区为麦(油)秸秆全量翻埋还田(M_1)和秸秆不还田(对照, M_0), 副区在施氮量 150 kg/hm^2 的基础上设氮肥前移(N_1)、均衡施氮(N_2)、氮肥后移(N_3)3种氮肥运筹, 以不施氮肥为对照(N_0), 测定土壤铵态氮、硝态氮、全氮含量以及稻株氮素积累量及产量。结果表明: 2018年麦(油)-稻轮作模式下秸秆还田较不还田成熟期稻株氮素积累量提高7.13%(8.50%), 产量增加0.94%(1.43%), 2019年增至15.17%(17.12%)、6.60%(7.42%)。2018年拔节期, 麦(油)茬田中直播稻氮素积累量整体呈 $N_1 > N_2 > N_3$ 趋势, 齐穗期和成熟期稻株的氮素积累量及产量在秸秆不还田处理下表现为 $N_3 > N_2 > N_1$, 秸秆还田后则是 $N_2 > N_3 > N_1$ 。相较秸秆不还田, 秸秆还田后麦(油)茬直播稻成熟期田间0~10、>10~20 cm土层的氨态氮含量有增有减, 硝态氮含量则整体降低了44.22%(30.99%)、8.05%(20.09%)。土壤全氮含量在直播稻各生育期变化较小, N_1 处理下各生育期土壤硝态氮、铵态氮和全氮含量均保持在较高水平。综上所述, 连续的秸秆还田有利于提高土壤全氮含量, 麦(油)-稻轮作模式下均是均衡施氮配合能有效促进稻株氮素吸收, 显著提高水稻产量, 以油-稻轮作模式下增产效果更佳。

关键词 秸秆还田; 氮肥运筹; 麦(油)-稻轮作; 土壤氮素; 产量

中图分类号 S 511.3; S 14

文献标志码 A

引用格式 彭志芸, 吕旭, 伍杂日曲, 等. 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤氮素供应及直播稻产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022, 48(1): 45-56. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2021.03.083

PENG Zhiyun, LÜ Xu, WUZA Riqu, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on soil nitrogen supply and yield of direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2022, 48(1): 45-56.

Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on soil nitrogen supply and yield of direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation

PENG Zhiyun^{1,2}, LÜ Xu¹, WUZA Riqu¹, SHU Chuanhai¹, SHEN Jie¹, XIANG Kaihong¹, YANG Zhiyuan¹, MA Jun^{1*} (1. Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 2. Yibin Academy of Agricultural Sciences, Yibin 644000, Sichuan, China)

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

***通信作者** (Corresponding author): 马均 (https://orcid.org/0000-0001-6103-5635), Tel: +86-28-86290303, E-mail: majunp2002@163.com

第一作者 (First author): 彭志芸 (https://orcid.org/0000-0001-8248-873X), E-mail: 1403775459@qq.com

收稿日期 (Received): 2021-03-08; **接受日期** (Accepted): 2021-06-18

Abstract The positioning test was carried out in the Chongzhou Experimental Base of Sichuan Agricultural University in 2018–2019, aiming at exploring the effects of straw returning and nitrogen (N) fertilizer management on soil N supply and yield of direct seeding rice under the wheat (rape)–rice rotation. The two-factor split-zone design was adopted. The main area was wheat/rape straw being turned over to field (M_1) and straw being not returned to field (control, M_0). In the sub-area, on the basis of 150 kg/hm^2 of N application, there were three kinds of N fertilizer operation, including N fertilizer moving forward (N_1), balanced N application (N_2) and N fertilizer moving backward (N_3), with no N fertilizer application as a control (N_0). Then, the contents of soil ammonium–N, nitrate–N and total N, N accumulation and yield of direct seeding rice were determined. The results showed that the N accumulation of rice plant increased by 7.13% (8.50%) and the yield increased by 0.94% (1.43%) in 2018, and which increased to 15.17% (17.12%) and 6.60% (7.42%) in 2019 under the wheat (rape)–rice rotation at the maturing stage compared with those without straw returning. At the jointing stage in 2018, N accumulation amounts of direct seeding rice in the wheat (rape) stubble field were $N_1 > N_2 > N_3$ treatments as a whole. At the full heading stage and maturing stage, N accumulation amounts and yields of rice plants were $N_3 > N_2 > N_1$ treatments under the no straw returning, as well as $N_2 > N_3 > N_1$ treatments under the straw returning. Compared with the no straw returning, the ammonium–N contents in 0–10 and >10–20 cm soil layers at the rice maturing stage under the wheat (rape)–rice rotation increased or decreased after straw returning. While the nitrate–N contents decreased by 44.22% (30.99%) and 8.05% (20.09%) overall. Soil total N contents had little change in each growth stage of direct seeding rice, and the contents of nitrate–N, ammonium–N and total N in the soils under the N_1 treatment remained at a high level in each growth stage. In conclusion, continuous straw returning is beneficial to increase soil total N content; under the wheat (rape)–rice rotation, the balanced N application could effectively promote the N uptake by rice plants and significantly increase the rice yield, and the effect of increasing yield is better under the rape–rice rotation.

Key words straw returning; nitrogen fertilizer management; wheat (rape)–rice rotation; soil nitrogen; yield

氮素是作物需求量大且在土壤中较缺乏的矿物质元素,对调节和维持作物正常生长发育具有重要作用。土壤中能直接被作物吸收利用的氮有硝态氮、亚硝态氮、铵态氮、分子氮和一些可溶性有机氮^[1]。相关研究表明,秸秆还田后的氮素释放能引起土壤氮素矿化的正激发效应,强化土壤的供氮能力^[2]。严奉君^[3]研究表明,秸秆还田后氮素释放能提高水稻前中期0~20 cm土层全氮含量。秸秆还田还能提高微生物活性及数量^[4],而微生物量的增加可以加强土壤对铵态氮的固定,减少硝态氮的积累,降低氮肥的损失^[5]。同时,秸秆腐解后的养分释放能提高土壤磷、钾含量,促进作物养分吸收,有助于增产增效^[6]。

氮肥运筹能显著调控土壤氮素含量,进而影响稻株的氮素吸收和产量形成。王允青等^[7]认为,杂交中籼稻氮肥施用以 m (基肥): m (分蘖肥): m (穗肥)=4:3:3为宜;布哈丽且木·阿不力孜等^[8]研究结果显示,提高穗肥比例有利于水稻产量的提高。而在秸秆还田条件下,氮肥施用情况又有所不同。李勇等^[9]研究表明,秸秆还田结合重基肥、轻蘖肥、补穗肥的施肥模式有较高的速效氮供应,有利于维持

土壤氮素平衡,同时,水稻增产9.3%。严奉君^[3]研究认为,秸秆覆盖条件下均衡施氮能平衡稻株氮素吸收量与土壤氮素含量,且水稻各时期氮素吸收量和氮肥利用效率显著提高,增产效应达极显著水平。

直播栽培水稻可以减轻用工强度,提升水稻生产效率^[10]。麦-稻、油-稻模式是西南地区典型的轮作方式,在小麦、油菜收获后进行水稻直播,可有效地降低水稻生产成本,提高经济效益^[11]。在生产上直播稻一般采取“前促、中控、后补”^[12]的施肥策略。因此,本试验立足于麦-稻、油-稻轮作模式,设计了麦、油秸秆还田与3种氮肥运筹,研究秸秆还田与氮肥前移、后移及均衡施肥对土壤氮素供应及直播稻产量的影响,旨在为西南地区水稻绿色轻简化栽培的合理施肥提供理论依据和实践经验。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年和2019年在四川农业大学崇州试验基地开展,供试品种为在四川地区广泛应用的优质杂交籼稻宜香优2115(全生育期157 d)。耕层

土壤(0~20 cm)质地为砂壤土,其肥力情况(有机质、全氮、有效磷和速效钾含量)如表1所示。水稻

生育期间试验区气象数据由四川省气象局提供(图1)。

表1 试验田耕层土壤(0~20 cm)肥力状况

Table 1 Fertility status of topsoil (0~20 cm) in the test field

年份 Year	试验田 Test field	有机质 Organic matter/(g/kg)	全氮 Total N/(g/kg)	有效磷 Available P/(mg/kg)	速效钾 Available K/(mg/kg)
2018	麦茬田 Wheat stubble field	31.36	1.65	16.74	187.43
	油茬田 Rape stubble field	39.49	1.83	17.47	226.76
2019	麦茬田 Wheat stubble field	32.43	1.75	19.11	168.59
	油茬田 Rape stubble field	39.55	1.87	20.55	207.22

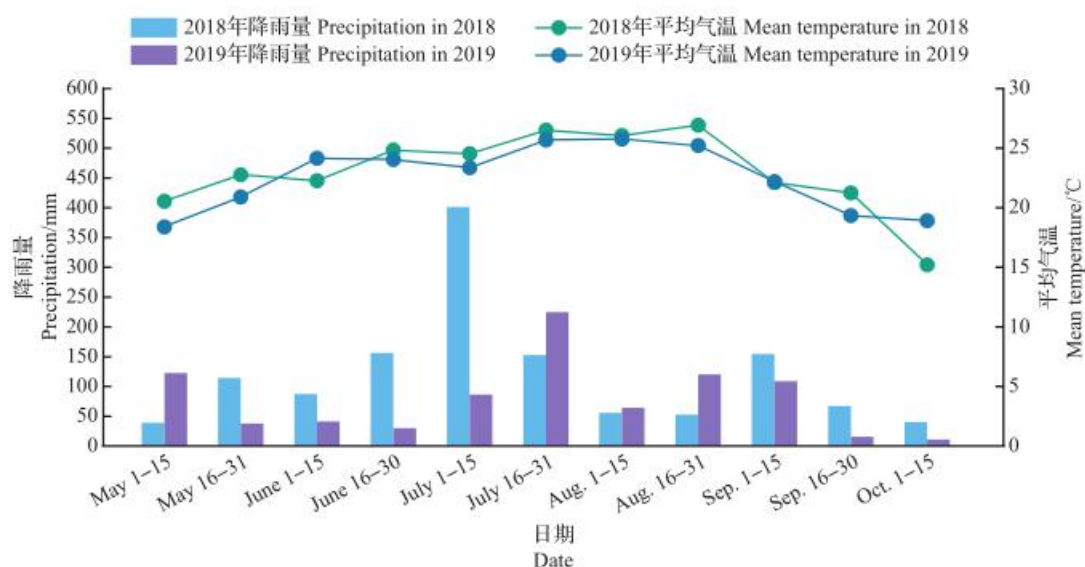


图1 2018—2019年试验区水稻生育期平均气温和降雨量

Fig. 1 Mean temperature and precipitation during the growth period of rice in the experimental area from 2018 to 2019

1.2 试验设计

采用2年定位试验和两因素裂区设计,麦茬田和油茬田同期播种。主区为秸秆处理:秸秆不还田(对照, M_0)、秸秆全量翻埋还田(M_1),2018年、2019年小麦(油菜)秸秆还田量分别为5 300 kg/hm² (5 483 kg/hm²)、6 239 kg/hm² (6 993 kg/hm²)。副区在施氮量150 kg/hm²的基础上设3种氮肥运筹模式:氮肥前移(N_1)、均衡施氮(N_2)、氮肥后移(N_3),以不施氮肥为对照(N_0)。供试水稻施肥管理:氮肥施用按不同运筹处理(表2)进行;磷肥75 kg/hm²,全作基肥施用;钾肥150 kg/hm²,按 m (基肥): m (穗肥)=5:5施用。试验用肥为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%)。

小麦(油菜)籽粒收获后秸秆经机器粉碎至5~10 cm,在旋耕整田时全量翻耕还田(M_1),不还田(M_0)处理将秸秆移出田间。水稻浸种后于2018年

5月15日采用人工模拟机械精量穴直播进行湿润播种,行间距为25 cm×20 cm,播量为3~5粒/穴。2019年为定位试验,在原小区内整田,于5月18日播种,整田和播种方式均与2018年一致。每个处理3次重复,小区面积为15 m²,小区间筑埂(宽40 cm),并用塑料薄膜包裹,防止水肥互串。病虫害防治等均按照常规田间管理进行。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土样全氮、铵态氮、硝态氮含量的测定

于水稻拔节期、齐穗期和成熟期采用5点取样法,分别在各小区行间中点,用取土器分别对0~10、>10~20 cm土层进行取样。经自然风干、磨碎、过筛(100目)后,采用凯氏定氮法测定土样全氮含量,采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定其铵态氮含量,采用双波长紫外分光光度法测定其硝态氮含量^[13]。

表 2 不同氮肥运筹模式下水稻各生育时期的施氮量

Table 2 Nitrogen application amounts of rice at different growth stages under different nitrogen fertilizer management models

kg/hm²

氮肥运筹模式 Nitrogen fertilizer management model	2叶期 2-leaf stage	5叶期 5-leaf stage	倒4叶期 Inverted 4-leaf stage	倒2叶期 Inverted 2-leaf stage
N ₁ 氮肥前移 Nitrogen fertilizer moving forward	150	0	0	0
N ₂ 均衡施氮 Balanced nitrogen application	45	45	30	30
N ₃ 氮肥后移 Nitrogen fertilizer moving backward	30	30	45	45

1.3.2 稻株氮素积累的测定

分别于拔节期、齐穗期、成熟期在每小区选取长势一致且无病虫害的水稻 3 穴,在烘箱中以 105 ℃ 杀青 45 min 后,在 80 ℃ 条件下烘干至恒量,称量、粉碎、过筛(100 目)后,用 UDK169 型凯氏定氮仪(意大利 Velp Scientifica 公司)测定各生育期稻株全氮含量。

1.3.3 水稻产量统计

于成熟期去除边行水稻和按实际穴数进行收获,并按标准含水量 13.5% 计算水稻产量。

1.4 数据统计分析

用 Excel 2007、DPS 6.5 软件进行数据分析,采用最小显著差数法(least significant difference, LSD)进行差异显著性检验($P < 0.05$)。用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤铵态氮含量的影响

秸秆处理仅对麦茬田成熟期 0~10 cm 土层及油茬田齐穗期 0~10 cm 土层的铵态氮含量有极显著的影响,氮肥运筹对直播稻不同生育期的土壤铵态氮含量有显著或极显著的调控效应,且有显著或极显著的互作效应(表 3)。

相较秸秆不还田,秸秆还田后麦茬田直播稻各生育期 0~10 cm 土层铵态氮含量均呈不同程度的减少,成熟期减少了 32.21%, >10~20 cm 土层的铵态氮含量在齐穗后有一定增加。油茬田中秸秆还田后直播稻各生育期 0~10 cm 土层铵态氮含量均较不还田高,拔节期、齐穗期、成熟期分别提高 15.13%、9.00%、10.03%(表 3)。

就氮肥运筹而言,在秸秆不还田情况下,齐穗期麦茬田 0~10 cm 土层铵态氮含量以 N₃ 处理最高,

成熟期以 N₁ 处理最高。油茬田 0~10 cm 土层铵态氮含量在水稻各生育期无显著差异,拔节期和齐穗期 >10~20 cm 土层铵态氮含量为 N₁ 处理显著高于 N₂、N₃ 处理。秸秆还田后,拔节期麦茬田 0~10 cm 土层铵态氮含量以 N₃ 处理最高,齐穗后以 N₁ 处理更高, >10~20 cm 土层铵态氮含量在水稻各生育期以 N₀ 处理较高。油茬田 0~10 cm 土层铵态氮含量在水稻各生育期整体上以 N₁ 处理较高,拔节期 >10~20 cm 土层铵态氮含量表现为 N₃ > N₂ > N₁, 齐穗后以 N₃ 处理更高(表 3)。

2.2 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤硝态氮含量的影响

秸秆处理及氮肥运筹对不同时期的土层硝态氮含量存在显著或极显著影响,且有显著或极显著的互作效应(表 4)。

相较秸秆不还田,秸秆还田后,麦(油)茬田土层硝态氮含量在拔节期和齐穗期表现为有增有减,成熟期麦(油)茬田 0~10、>10~20 cm 土层硝态氮含量较秸秆不还田均有不同程度的降低,分别减少 44.22%(30.99%)、8.05%(20.09%)(表 4)。

就氮肥运筹来看,在秸秆不还田情况下,麦茬田拔节期 0~10、>10~20 cm 土层硝态氮含量表现为 N₁ > N₂ > N₃, 齐穗后 0~10 cm 土层硝态氮含量以 N₂ 处理最高,齐穗期 >10~20 cm 土层硝态氮含量为 N₃ 处理较 N₁、N₂ 处理显著提高 175.57%、171.43%。油茬田各时期 0~10 cm 土层硝态氮含量表现为 N₃ 处理最高,齐穗期 >10~20 cm 土层硝态氮含量以 N₂ 处理最高。秸秆还田后,麦(油)茬田 0~10、>10~20 cm 土层硝态氮含量无明显变化规律,整体上以 N₁、N₂ 处理较高(表 4)。

2.3 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对土壤全氮含量的影响

从表 5~6 可知,2018 年秸秆处理仅对麦茬田拔节期 0~10 cm 土层及齐穗期、成熟期 >10~20 cm

表3 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对稻田各土层铵态氮含量的影响(2018年)

Table 3 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) content in each soil layer of paddy field under wheat (rape)-rice rotation (2018)

处理 Treatment		0~10 cm 土层铵态氮含量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the 0~10 cm soil layer			>10~20 cm 土层铵态氮含量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the >10~20 cm soil layer		
		拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
		mg/kg					
$\text{P}_w\text{-M}_0$	N_0	6.58b	4.82c	3.98b	5.70a	2.41b	2.19ab
	N_1	9.67a	6.05b	4.91a	5.83a	4.02a	1.52b
	N_2	8.61a	5.28bc	2.80c	4.32b	2.52ab	2.95a
	N_3	9.67a	7.48a	3.69b	6.23a	3.42ab	3.15a
均值 Average		8.63	5.91	3.85	5.52	3.09	2.45
$\text{P}_w\text{-M}_1$	N_0	6.11b	6.15a	2.29b	6.13a	4.28a	3.81a
	N_1	8.73a	6.09a	3.78a	3.29c	2.69b	3.07ab
	N_2	7.63ab	5.35a	1.63c	3.67c	3.38ab	2.65ab
	N_3	9.22a	5.42a	2.74b	4.89b	4.43a	2.06b
均值 Average		7.92	5.75	2.61	4.49	3.70	2.90
F 值 F value	M	0.37	0.04	54 914.99**	1.84	1.25	15.61
	N	6.97**	2.36	34.70**	10.04**	0.98	0.90
	M×N	0.07	4.21*	1.14	4.93*	2.84	4.59*
$\text{P}_o\text{-M}_0$	N_0	8.79a	5.50a	4.15a	5.82b	4.55b	2.96ab
	N_1	7.87a	5.93a	3.18b	8.11a	6.55a	2.90ab
	N_2	6.82a	6.02a	3.48ab	6.08b	4.69b	2.54b
	N_3	6.92a	6.12a	3.13b	5.44b	4.26b	3.28a
均值 Average		7.60	5.89	3.49	6.36	5.01	2.92
$\text{P}_o\text{-M}_1$	N_0	7.20b	8.03a	5.49a	6.50a	4.40b	3.08ab
	N_1	9.92a	6.15b	4.01b	3.44c	5.98a	2.48b
	N_2	9.81ab	6.72ab	2.86c	4.82b	6.47a	3.15a
	N_3	8.09ab	4.78c	3.01c	7.64a	3.29c	2.88ab
均值 Average		8.75	6.42	3.84	5.60	5.04	2.90
F 值 F value	M	17.47	428.88**	0.32	14.13	0.008	0.02
	N	0.66	2.57	11.89**	1.27	14.41**	1.02
	M×N	1.90	5.32*	3.63*	12.54**	4.31*	1.97

P_w : 麦茬田; P_o : 油茬田; M_0 : 秸秆不还田; M_1 : 秸秆全量翻埋还田; N_0 : 不施氮肥; N_1 : 氮肥前移; N_2 : 均衡施氮; N_3 : 氮肥后移。同列数据后不同小写字母表示不同施氮处理间在 $P<0.05$ 水平差异有统计学意义; *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异有统计学和高度统计学意义(LSD 检验)。下同。

P_w : Wheat stubble field; P_o : Rape stubble field; M_0 : Straw is not returned to the field; M_1 : Full amount of straw is turned over and returned to the field; N_0 : No nitrogen fertilizer application; N_1 : Nitrogen fertilizer moving forward; N_2 : Balanced nitrogen application; N_3 : Nitrogen fertilizer moving backward. JS: Jointing stage; FHS: Full heading stage; MS: Maturing stage. The values within the same column followed by different lowercase letters indicate significant differences among different nitrogen application treatments at the 0.05 probability level; single asterisk (*) and double asterisks (**) indicate significant and highly significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively (LSD test). The same below.

土层的全氮含量有显著或极显著影响,2019年则显著或极显著调控麦茬田>10~20 cm 土层各时期及油茬田>10~20 cm 土层齐穗期的全氮含量,氮肥运筹对不同时期土层全氮含量有显著或极显著影响,且有不同程度的互作效应。

就年际间来看,2019年成熟期麦(油)茬田0~

10 cm 土层全氮含量较2018成熟期在秸秆不还田、秸秆还田情况下分别提高了7.19%(10.00%)、4.09%(7.43%)。2种秸秆还田模式下不施氮肥处理各时期的0~10、>10~20 cm 土层全氮含量整体低于其他处理,施用氮肥后除成熟期0~10 cm 土层外,2018年麦茬田0~10、>10~20 cm 土层全氮含量仍

表 4 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对稻田各土层硝态氮含量的影响(2018年)

Table 4 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on nitrate nitrogen (NO_3^- -N) content in each soil layer of paddy field under wheat (rape)-rice rotation (2018)

处理 Treatment		0~10 cm 土层硝态氮含量 NO_3^- -N content in the 0~10 cm soil layer			>10~20 cm 土层硝态氮含量 NO_3^- -N content in the >10~20 cm soil layer		
		拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
		mg/kg					
$\text{P}_w\text{-M}_0$	N_0	0.90b	3.72a	3.20bc	1.24b	1.93b	1.68a
	N_1	2.89a	2.48b	3.51b	1.82a	1.31c	1.54a
	N_2	2.44a	4.23a	6.57a	0.76c	1.33c	1.90a
	N_3	1.31b	3.83a	2.28c	0.67c	3.61a	1.85a
均值 Average		1.89	3.56	3.89	1.12	2.04	1.74
$\text{P}_w\text{-M}_1$	N_0	3.40a	1.60c	2.52ab	1.03a	2.53a	1.89a
	N_1	1.95b	2.31b	2.83a	0.45b	2.04a	2.04a
	N_2	1.23bc	3.77a	1.85ab	0.37b	2.08a	1.15a
	N_3	1.15c	2.60b	1.47b	0.79ab	1.98a	1.33a
均值 Average		1.93	2.57	2.17	0.66	2.16	1.60
F 值 F value	M	0.01	32.99*	28 419.33**	37.74*	0.28	1.19
	N	5.98**	18.19**	10.00**	6.68**	11.83**	0.27
	M×N	16.53**	6.97**	10.72**	8.15**	14.38**	1.32
$\text{P}_o\text{-M}_0$	N_0	2.60a	2.27b	2.96b	0.71a	2.23a	2.22a
	N_1	3.41a	2.07b	3.62b	0.84a	1.50b	2.45a
	N_2	2.61a	2.94a	3.45b	0.70a	2.67a	2.27a
	N_3	3.48a	3.10a	6.48a	0.74a	2.28a	1.99a
均值 Average		3.03	2.60	4.13	0.74	2.17	2.24
$\text{P}_o\text{-M}_1$	N_0	2.04a	1.84c	2.13b	1.09b	2.78a	1.34b
	N_1	1.27a	3.57a	5.28a	1.66a	1.38b	2.98a
	N_2	1.32a	3.48ab	2.50b	0.42c	2.07ab	1.74b
	N_3	1.65a	2.71b	1.50b	1.97a	1.38b	1.07b
均值 Average		1.57	2.90	2.85	1.29	1.90	1.79
F 值 F value	M	51.62*	2.45	4 549.93**	109.27**	1.79	6.84
	N	0.67	5.28*	9.77**	19.36**	6.70**	5.31*
	M×N	1.31	4.62	23.68**	15.49**	2.78**	3.38

较秸秆不还田低,2019年麦茬田0~10 cm 土层全氮含量较秸秆不还田差异减小。2年试验中油茬田土壤全氮含量在秸秆处理间差异较小。

就氮肥运筹而言,2018年麦(油)茬田0~10 cm 土层的全氮含量在秸秆不还田条件下拔节期以 N_1 处理较高,齐穗后 N_1 处理显著低于 N_2 、 N_3 处理,秸秆还田后麦茬田土层全氮含量在水稻各生育期表现为 N_2 处理低于 N_1 、 N_3 处理,油茬田各施氮处理差异不显著。2019年麦茬田秸秆还田后拔节期 N_1 处理全氮含量高于其他各处理,齐穗后各施氮处理全氮含量差异减小,油茬田土层全氮含量在水稻各生育期以 N_1 处理较高。2年试验中,麦(油)茬田>10~20 cm 土层全氮含量在水稻全生育过程中无明显变化规律,综合来看,各时期土层全氮含量以 N_1 处理

较高(表5~6)。

2.4 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对直播稻氮素积累的影响

从图2可见:较秸秆不还田,秸秆还田处理下除2018年麦茬田直播稻拔节期的氮素积累量较低外,其他时期的氮素积累量均有所提高,2018年麦茬田、油茬田直播稻成熟期氮素积累量较不还田提高7.13%、8.50%,2019年增至15.17%、17.12%。就氮肥运筹而言,2018年拔节期麦(油)茬直播稻氮素积累量表现为 $\text{N}_1 > \text{N}_2 > \text{N}_3$,2019年在秸秆未还田情况下表现趋势一致,在秸秆还田后以 N_2 处理氮素积累量更高。齐穗期和成熟期2年趋势一致,在秸秆不还田时氮素积累量呈 $\text{N}_3 > \text{N}_2 > \text{N}_1$ 变化趋势,秸秆还田后则表现为 $\text{N}_2 > \text{N}_3 > \text{N}_1$ 。

表5 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对稻田各土层全氮含量的影响(2018年)

Table 5 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on total nitrogen content in each soil layer of paddy field under wheat (rape)-rice rotation (2018)

处理 Treatment		0~10 cm 土层全氮含量 Total nitrogen content in the 0~10 cm soil layer			>10~20 cm 土层全氮含量 Total nitrogen content in the >10~20 cm soil layer		
		拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
P_w-M_0	N_0	1.67b	1.71ab	1.55b	1.42ab	1.48b	1.52ab
	N_1	1.91a	1.54b	1.42c	1.49ab	1.68a	1.63a
	N_2	1.85a	1.77a	1.88a	1.61a	1.53b	1.50b
	N_3	1.84a	1.81a	1.84a	1.37b	1.47b	1.39c
均值 Average		1.82	1.71	1.67	1.47	1.54	1.51
P_w-M_1	N_0	1.41c	1.45b	1.60b	1.29b	1.40a	1.37b
	N_1	1.79ab	1.83a	1.87a	1.29b	1.30a	1.52a
	N_2	1.71b	1.67ab	1.69b	1.58a	1.27a	1.41ab
	N_3	1.90a	1.67ab	1.70ab	1.33b	1.41a	1.21c
均值 Average		1.70	1.65	1.71	1.37	1.35	1.38
F 值 F value	M	212.84**	0.74	7.15	4.21	75.28*	32.88*
	N	31.84**	1.01	5.74*	4.69*	0.92	11.46**
	M×N	6.02**	2.84	11.98**	0.53	4.01*	0.36
P_o-M_0	N_0	1.82b	1.86a	1.63b	1.48b	1.51a	1.47b
	N_1	1.97a	1.63b	1.56b	1.49b	1.63a	1.70a
	N_2	1.99a	1.94a	1.84a	1.54ab	1.45a	1.50b
	N_3	1.86ab	1.94a	1.79a	1.64a	1.52a	1.28c
均值 Average		1.91	1.84	1.70	1.54	1.53	1.49
P_o-M_1	N_0	1.58b	1.78a	1.57b	1.46c	1.25c	1.19b
	N_1	1.95a	1.82a	1.83a	1.71a	1.79a	1.59a
	N_2	1.83a	1.74a	1.77a	1.58b	1.52b	1.49a
	N_3	1.88a	1.67a	1.83a	1.65ab	1.20c	1.25b
均值 Average		1.81	1.75	1.75	1.60	1.44	1.38
F 值 F value	M	5.07	9.42	0.79	0.62	1.26	12.96
	N	7.58**	0.67	4.20*	4.87*	8.40**	35.84**
	M×N	2.11	2.73	2.69	2.51	4.56*	4.75*

2.5 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对直播稻产量的影响

对比2年产量数据可知,2019年麦、油茬田直播稻较2018年减产448、352 kg/hm²(图3)。2018年麦、油茬田直播稻秸秆还田较不还田分别增产0.94%、1.43%,2019年增至6.60%、7.42%。对于氮肥运筹,麦(油)茬田直播稻在秸秆不还田时产量表现为 $N_3>N_2>N_1$,秸秆还田后产量表现为 $N_2>N_3>N_1$ 。

2.6 麦(油)-稻轮作下土壤无机氮与直播稻氮素积累及产量的关系

由相关性分析(表7)可知:麦-稻轮作模式下0~10 cm土层中拔节期铵态氮含量与稻株氮素积累总量及产量均呈显著正相关,齐穗期硝态氮含量、无机氮总含量与稻株氮素积累总量呈显著正相

关;>10~20 cm土层中仅拔节期硝态氮含量、无机氮总含量与稻株氮素积累总量呈显著或极显著负相关。油-稻轮作模式下0~10 cm土层中齐穗期硝态氮含量与稻株氮素积累总量及产量呈极显著正相关,成熟期铵态氮含量与稻株氮素积累总量及产量呈极显著负相关。

3 讨论

3.1 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对稻田氮素供应及稻株氮素吸收的影响作用

秸秆还田和化肥配施是提高土壤肥力的有效措施。王保君等^[14]研究表明,秸秆还田配施240 kg/hm²的氮肥后土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、总

表 6 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对稻田各土层全氮含量的影响(2019 年)

Table 6 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on total nitrogen content in each soil layer of paddy field under wheat (rape)-rice rotation (2019)

处理 Treatment		0~10 cm 土层全氮含量 Total nitrogen content in the 0~10 cm soil layer				>10~20 cm 土层全氮含量 Total nitrogen content in the >10~20 cm soil layer			
		播前 Before sowing	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	播前 Before sowing	拔节期 JS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
P_w-M_0	N_0	1.63c	1.77a	1.72b	1.72b	1.35a	1.08a	1.14a	1.32a
	N_1	1.76b	1.82a	1.80a	1.75ab	1.36a	1.34a	1.12a	1.41a
	N_2	1.91a	1.87a	1.74b	1.86a	1.24b	1.19a	1.36a	1.49a
	N_3	1.60c	1.77a	1.70b	1.83a	1.41a	0.99a	1.32a	1.49a
均值 Average		1.72	1.81	1.74	1.79	1.34	1.15	1.23	1.42
P_w-M_1	N_0	1.72ab	1.51c	1.51c	1.62b	1.00c	1.03b	0.88b	0.98b
	N_1	1.84a	2.05a	1.76a	1.89a	1.79a	1.56a	1.17ab	1.40a
	N_2	1.85a	1.79b	1.69b	1.80a	1.39b	1.42a	1.08ab	1.01b
	N_3	1.68b	1.76b	1.77a	1.82a	1.31b	1.41a	1.29a	1.15ab
均值 Average		1.77	1.78	1.68	1.78	1.37	1.35	1.10	1.13
F 值 F value	M	2.71	17.23	0.57	0.11	123.32**	19 683.97**	60.54*	19.19*
	N	7.98**	11.17**	22.12**	4.46*	23.11**	3.00	2.24	3.30
	M×N	0.89	7.34**	14.65**	1.98	23.12**	1.00	1.01	2.85
P_o-M_0	N_0	1.67b	1.94ab	1.84a	1.82a	1.57a	1.32b	1.77a	1.51b
	N_1	1.81b	2.03a	1.83a	1.88a	1.42b	1.67a	1.58b	1.75a
	N_2	2.03a	1.90b	1.84a	1.91a	1.65a	1.62a	1.53bc	1.56b
	N_3	1.72b	1.94ab	1.76b	1.88a	1.62a	1.38b	1.44c	1.50b
均值 Average		1.81	1.95	1.82	1.87	1.56	1.50	1.58	1.58
P_o-M_1	N_0	1.97ab	1.86b	1.82b	1.72c	1.50bc	1.32c	1.21c	1.34c
	N_1	2.12a	1.99a	1.84b	1.97ab	1.56ab	1.73a	1.39b	1.64a
	N_2	1.74c	1.87b	1.85ab	1.86b	1.67a	1.58b	1.25bc	1.54b
	N_3	1.90b	1.94ab	1.92a	1.98a	1.41c	1.40c	1.59a	1.60ab
均值 Average		1.93	1.92	1.86	1.88	1.53	1.51	1.36	1.53
F 值 F value	M	253.08**	2.15	1.46	1.03	12.07	0.15	163.22**	4.43
	N	2.11	4.02*	0.15	6.55**	5.74*	34.31**	1.90	31.10**
	M×N	8.31**	0.35	4.33*	2.99	5.77*	0.47	13.14**	9.06**

有机碳含量显著提高,而铵态氮、可溶性有机碳和微生物碳含量显著减少;刘玲玲^[15]研究也显示,秸秆还田配施氮肥后土壤铵态氮、硝态氮含量有所减少。本研究结果显示,麦-稻轮作模式下无机氮含量变化与上述研究一致,油-稻轮作模式下铵态氮含量有所增加。这可能与基础土壤肥力和秸秆还田种类有较大关系。在 2 种轮作模式下秸秆还田与不还田土壤全氮含量并无显著差异,但 2018、2019 年秸秆还田后麦(油)茬田直播稻的氮素积累总量较不还田提高了 7.13%(8.50%)、15.17%(17.12%)。说明在相同的氮肥施用量下,秸秆还田后能促进稻株对氮素的吸收利用,且秸秆还田后 2019 年试验结束时麦(油)茬田 0~10 cm 土层全氮含量较 2018 年

成熟期提高了 4.09%(7.43%)。可见,秸秆连续还田后能充实土壤氮库,提高稻株氮素吸收能力。这与秸秆还田后自身的养分释放^[16]以及能有效改善土壤结构、促进根系养分吸收^[17]有较大关系。

土壤氮素含量主要取决于外源氮素投入和地上部稻株群体的吸收量。本研究中,拔节期 0~10、>10~20 cm 土层总体上以氮肥前移(N_1)处理的无机氮及全氮含量较大,这与前期大量氮肥施入有关。前期氮肥大量施入不利于根系的下扎^[18],而其中后期未施入氮肥,导致拔节后的物质生产能力不强,进一步影响其根系对土壤氮素的吸收利用,因此, N_1 处理下 0~10 cm 土层铵态氮、硝态氮和全氮含量在水稻全生育期都维持在较高水平。林晶晶

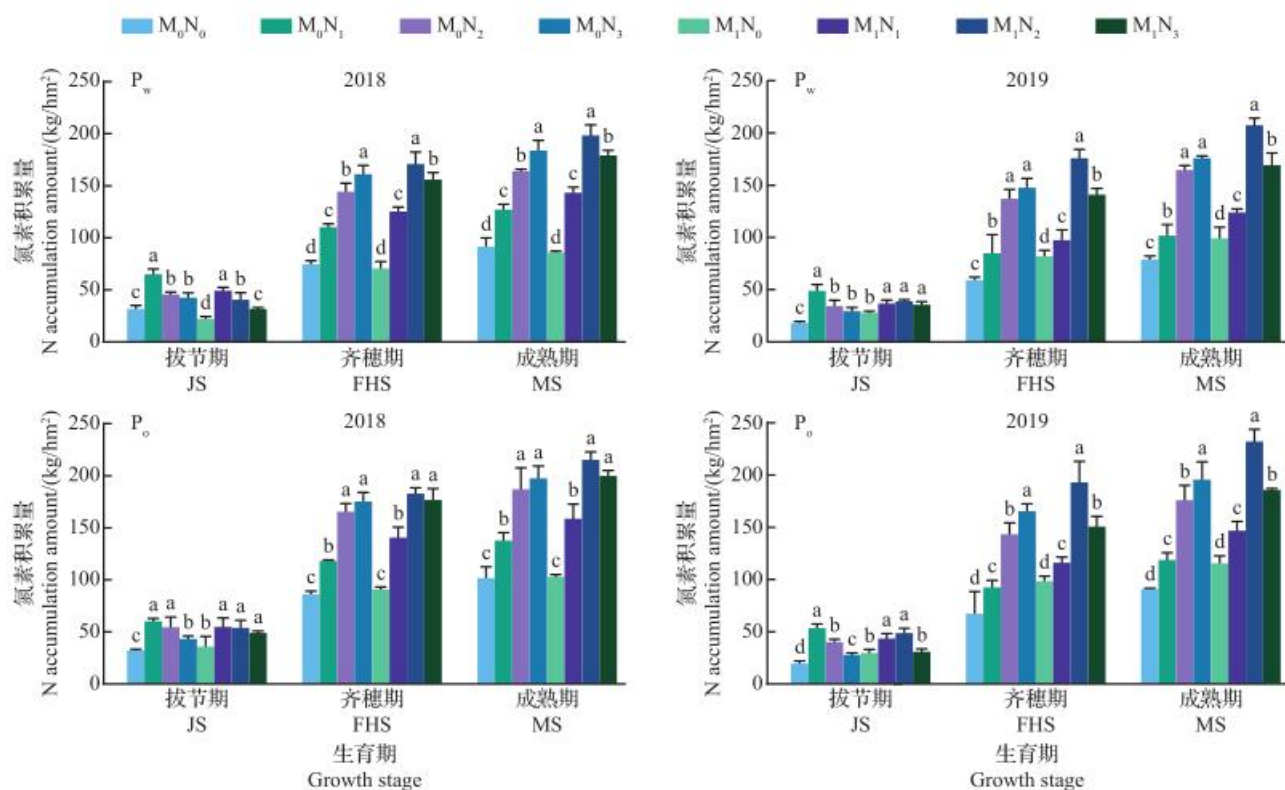


图2 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对直播稻氮素积累的影响

Fig. 2 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on nitrogen accumulation in direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation

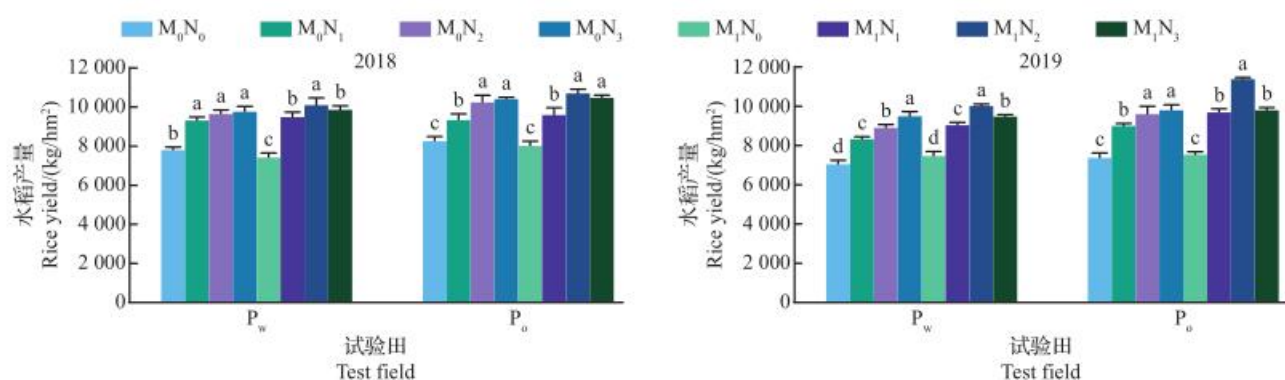


图3 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻产量的影响

Fig. 3 Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on yield of direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation

等^[19]指出,基肥对于稻株氮素吸收的贡献仅占4.13%~10.59%。可见,氮肥前移模式不利于稻株的氮素吸收,肥料浪费严重。白志刚^[20]研究认为,提高穗肥比例能减少氮素流失,且水稻全生育期氮

素积累量可提高9.10%~34.67%。本研究中,秸秆还田结合均衡施氮(N_2)处理的直播稻氮素积累量显著高于其他处理,与严奉君等^[21]的研究结果一致。

表7 麦(油)-稻轮作下0~20 cm土层无机氮含量与直播稻氮素积累总量及产量的相关性(2018年)

Table 7 Correlation between inorganic nitrogen contents in the 0–20 cm soil layer and total nitrogen accumulation, yield of direct seeding rice under wheat (rape)-rice rotation (2018)

土层 Soil layer/cm	指标 Index	生育期 Growth stage	麦-稻轮作 Wheat-rice rotation		油-稻轮作 Rape-rice rotation	
			稻株氮素积累总量 Total N accumulation in plants	产量 Yield	稻株氮素积累总量 Total N accumulation in plants	产量 Yield
0~10	铵态氮含量 NH_4^+-N content	拔节期 JS	0.47*	0.46*	0.04	0.04
		齐穗期 FHS	0.15	0.02	-0.24	-0.32
		成熟期 MS	-0.33	-0.06	-0.62**	-0.63**
	硝态氮含量 NO_3^--N content	拔节期 JS	-0.37	-0.34	-0.20	-0.13
		齐穗期 FHS	0.47*	0.33	0.62**	0.59**
		成熟期 MS	-0.13	-0.03	0.16	0.20
	无机氮总含量 Total inorganic nitrogen content	拔节期 JS	0.23	0.23	-0.08	-0.04
		齐穗期 FHS	0.44*	0.23	0.14	0.06
		成熟期 MS	-0.26	-0.05	-0.19	-0.17
>10~20	铵态氮含量 NH_4^+-N content	拔节期 JS	-0.37	-0.28	-0.15	-0.09
		齐穗期 FHS	0.07	-0.09	-0.03	0.00
		成熟期 MS	-0.05	-0.19	0.05	-0.02
	硝态氮含量 NO_3^--N content	拔节期 JS	-0.55**	-0.35	0.04	0.02
		齐穗期 FHS	0.13	-0.01	-0.13	-0.25
		成熟期 MS	-0.22	-0.13	-0.18	-0.07
	无机氮总含量 Total inorganic nitrogen content	拔节期 JS	-0.47*	-0.34	-0.13	-0.08
		齐穗期 FHS	0.13	-0.08	-0.09	-0.12
		成熟期 MS	-0.14	-0.21	-0.14	-0.07

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著和极显著相关。

Single asterisk (*) and double asterisks (**) indicate significant and extremely significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3.2 麦(油)-稻轮作下秸秆还田与氮肥运筹对直播稻产量的影响作用

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^[22-23]。本研究中2年试验结果显示,秸秆还田均能提高直播稻产量,且以第2年还田增产效果更好,再一次证实了前人的研究结果。本试验结果还显示,随氮肥后移量的提高,麦(油)茬直播稻产量在秸秆不还田情况下呈增大趋势,而秸秆还田后呈先增大后减小趋势。可见,在直播栽培水稻时,秸秆还田后氮肥后移量不宜太高,结合均衡施肥更利于直播稻产量的提高。

同时,本试验结果还表明,油-稻轮作模式下秸秆还田的增产效果较麦-稻轮作模式更佳,这可能与秸秆还田量和秸秆种类有较大关系。本研究2年秸秆还田量中油菜秸秆均大于小麦秸秆。武际等^[24]研究表明,油菜秸秆的腐解率及养分释放量均优于小麦秸秆;严奉君^[25]通过¹⁵N标记发现,油菜秸秆还

田后水稻对秸秆氮素吸收量较小麦秸秆还田后更高。由于本试验的麦-稻、油-稻轮作模式在不同田块间进行,模糊了不同田块间的土壤肥力差异,因此,后续有必要在同一土壤肥力条件下系统比较麦-稻、油-稻轮作周年作物养分吸收差异和产量形成,从而进一步指导农业生产。

3.3 麦(油)-稻轮作下土壤氮素供应与直播稻产量的关系

土壤中的无机氮是水稻可直接吸收利用的氮源之一,土壤氮素供应不足,无法满足水稻生长需要,会造成植株生长停滞,导致减产;而土壤氮素含量过高,则容易破坏土壤结构及养分保持,最终制约产量的提高^[26]。外源氮素的投入是决定土壤无机氮含量多少的主要原因,合理的氮肥施入能促进稻株氮素吸收,维持土壤氮素平衡^[27]。本试验中相关性分析结果表明,拔节期和齐穗期的土壤氮素供应有利于直播稻氮素吸收,提高产量。这可能是由于直播稻营养生长期群体质量大,群体吸氮量高^[28],故

对土壤氮素的需求大。表明在直播水稻生产中通过均衡施肥保障水稻拔节和齐穗期充足的氮素供应更利于产量的提升。

4 结论

在麦-稻和油-稻2种轮作模式下,秸秆还田均能提高齐穗期后直播稻的氮素积累量,但是土壤硝态氮和全氮含量较秸秆不还田处理有所降低。第2年秸秆还田后较第1年土壤全氮含量有所提高,配合均衡施氮模式能显著提高麦(油)茬直播稻的氮素积累总量,增产显著。因此,2种轮作模式均可在秸秆还田条件下,通过氮肥的均衡施用,实现直播稻的高产稳产,以油-稻轮作模式下增产效果更佳。

参考文献(References):

- [1] WACHENDORF C, LAMPE C, TAUBE F, et al. Nitrous oxide emissions and dynamics of soil nitrogen under ^{15}N -labeled cow urine and dung patches on a sandy grassland soil [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2008, 171(2): 171-180. DOI:10.1002/jpln.200625217
- [2] LIAO P, HUANG S, GESTEL N V, et al. Liming and straw retention interact to increase nitrogen uptake and grain yield in a double rice-cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 217-224. DOI:10.1016/j.fcr.2018.02.021
- [3] 严奉君. 秸秆覆盖与水氮管理对水稻产量与米质及土壤理化性质的影响[D]. 成都:四川农业大学,2015:4-6.
YAN F J. Effects of straw mulch and water-nitrogen fertilizer management on yield of rice, grain quality and the properties of soil[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015: 4-6. (in Chinese with English abstract)
- [4] 靳玉婷,李先藩,蔡影,等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学,2021, 42(8):3985-3996. DOI:10.13227/j.hjks.202012077
JIN Y T, LI X F, CAI Y, et al. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3985-3996. (in Chinese with English abstract)
- [5] BANAYO N P M C, BUENO C S, HAEFELE S M, et al. Site-specific nutrient management enhances sink size, a major yield constraint in rainfed lowland rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 224: 76-79. DOI:10.1016/j.fcr.2018.05.006
- [6] 吴玉红,陈浩,郝兴顺,等. 秸秆还田与化肥配施对油菜-水稻产量构成因素及经济效益的影响[J]. 西南农业学报, 2020,33(9):2007-2012. DOI:10.16213/j.cnki.scjas.2020.9.019
WU Y H, CHEN H, HAO X S, et al. Effect of straw returning combined with NPK fertilization on crop components, yield and economic benefits under rice-rape rotation[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(9): 2007-2012. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王允青,郭熙盛,戴明伏. 氮肥运筹方式对杂交水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2008(2):31-34.
WANG Y Q, GUO X S, DAI M F. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and yield of hybrid rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008(2): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [8] 布哈丽且木·阿不力孜,白志刚,黄洁,等. 氮肥运筹对不同类型水稻产量和氮素吸收的影响[J]. 中国稻米,2018,24(4): 64-67. DOI:10.3969/j.issn.1006-8082.2018.04.015
BUHARI J A, BAI Z G, HUANG J, et al. Effects of nitrogen fertilizer on yield and nitrogen uptake of different types of rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(4): 64-67. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李勇,曹红娣,储亚云,等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. 土壤,2010,42(4):569-573. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2010.04.022
LI Y, CAO H D, CHU Y Y, et al. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Soils*, 2010, 42(4): 569-573. (in Chinese with English abstract)
- [10] CHAUHAN B S, NAMUCO O S, OCAMPO L A L, et al. Weedy rice (*Oryza sativa* f. *spontanea*) problems and management in wet direct-seeded rice (*O. sativa* L.) in the Mekong Delta of Vietnam[J]. *Crop Protection*, 2015, 78: 40-47. DOI:10.1016/j.cropro.2015.08.016
- [11] MISSHRA A K, KHANAL A R, PEDE V O. Is direct seeded rice a boon for economic performance? Empirical evidence from India[J]. *Food Policy*, 2017, 73: 10-18. DOI:10.1016/j.foodpol.2017.08.021
- [12] 侯文峰,李小坤,李云春,等. 氮肥运筹对鄂南直播稻生长、产量及氮素吸收的影响[J]. 中国稻米,2014,20(5):22-26. DOI:10.3969/j.issn.1006-8082.2014.05.005
HOU W F, LI X K, LI Y C, et al. Effects of nitrogen application regime on the growth, yield and nitrogen uptake of direct-seeding rice in the south of Hubei Province[J]. *China Rice*, 2014, 20(5): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000: 42-56.
BAO S D. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 42-56. (in Chinese)
- [14] 王保君,程旺大,陈贵,等. 秸秆还田配合氮肥减量对稻田土壤养分、碳库及水稻产量的影响[J]. 浙江农业学报,2019,31(4):624-630. DOI:10.3969/j.issn.1004-1524.2019.04.15
WANG B J, CHENG W D, CHEN G, et al. Effect of straw returning and nitrogen reduction on soil nutrition, carbon pool and rice yield in rice field[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(4): 624-630. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘玲玲. 秸秆还田与施氮对土壤养分、微生物及水稻产量的影响[D]. 江苏,扬州:扬州大学,2018:33-40.

- LIU L L. Effects of straw return field and nitrogen application on soil nutrients, microorganisms and rice yield [D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2018: 33–40. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曾研华, 吴建富, 曾勇军, 等. 机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 454–462. DOI:10.3724/SP.J.1006.2018.00454
- ZENG Y H, WU J F, ZENG Y J, et al. Effects of straw incorporation with reducing chemical fertilizers on nutrient absorption and utilization and grain yield of double-cropping late rice under mechanical harvest[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 454–462. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李昊昱, 孟兆良, 庞党伟, 等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 893–903. DOI:10.3724/SP.J.1006.2019.81078
- LI H Y, MENG Z L, PANG D W, et al. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat–summer maize rotation farmland[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 893–903. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王超, 项超, 曲丽君, 等. 水稻氮吸收转运利用生理机制及耐低氮遗传基础研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 1–9.
- WANG C, XIANG C, QU L J, et al. The advance of physiological mechanism of nitrogen assimilation–transport and utilization, and genetic basis of low nitrogen tolerance in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 1–9. (in Chinese with English abstract)
- [19] 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ^{15}N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1424–1434. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01424
- LIN J J, LI G H, XUE L H, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1424–1434. (in Chinese with English abstract)
- [20] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 6.
- BAI Z G. Effects of N management strategy on N metabolism in rice plant and N use efficiency in paddy soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 6. (in Chinese with English abstract)
- [21] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 23–35. DOI:10.11674/zwyf.2015.0103
- YAN F J, SUN Y J, MA J, et al. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 23–35. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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. DOI:10.1016/j.fcr.2013.09.009
- [23] 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. DOI:10.13930/j.cnki.cjea.150237
- 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. (in Chinese with English abstract)
- [24] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351–3360. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2011.16.007
- WU J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16): 3351–3360. (in Chinese with English abstract)
- [25] 严奉君. 多元种植模式下秸秆还田对作物产量形成及秸秆与土壤养分协同利用的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2018: 185–188.
- YAN F J. Effects of straw returning on crop yield formation and synergistic utilization of straw and soil nutrients in multi-cropping system[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018: 185–188. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张彬, 魏文武. 不同供氮量对水稻土壤无机氮残留、氮平衡及产量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 566–570, 660. DOI:10.3969/j.issn.1000-2324.2019.04.006
- ZHANG B, WEI W W. Effects of different nitrogen supply levels on soil inorganic nitrogen residue, nitrogen balance and yield of rice[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(4): 566–570, 660. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 110–118. DOI:10.11674/zwyf.16099
- ZHANG J S, LI B, WANG C Q, et al. Effects of the blending ratio of controlled release nitrogen fertilizer and urea on soil nitrogen supply in the mid-late growing stage and yield of wheat and rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 110–118. (in Chinese with English abstract)
- [28] 彭志芸, 向开宏, 杨志远, 等. 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻氮素利用特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 57–68. DOI:10.16819/j.1001-7216.2020.9049
- PENG Z Y, XIANG K H, YANG Z Y, et al. Effects of straw returning to paddy field and nitrogen fertilizer management on nitrogen utilization characteristics of direct seeded hybrid rice under wheat/rape-rice rotation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(1): 57–68. (in Chinese with English abstract)