

# 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

彭志芸 向开宏 杨志远 唐源 谌洁 张宇杰 何艳 严田蓉 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 温江 611130; \*通讯联系人, E-mail: majunp2002@163.com)

## 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

PENG Zhiyun, XIANG Kaihong, YANG Zhiyuan, TANG Yuan, SHEN Jie, ZHANG Yujie, HE Yan, YAN Tianrong, SUN Yongjian, MA Jun\*

(Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Wenjiang 611130, China; \*Corresponding author, E-mail: majunp2002@163.com)

**Abstract:** 【Objective】It is very important to reveal the effects of straw returning and nitrogen fertilizer management on nitrogen accumulation, transport, nitrogen use efficiency and grain yield of direct seeded hybrid rice under wheat/rape-rice rotation. 【Methods】A two-factor split zone design was adopted with Yixiangyou 2115, three-line hybrid rice with high quality, as material. The experiment was carried out simultaneously in paddy fields with wheat or rape stubble. The treatment was completely the same. The main area was wheat /rape straw returning to the field ( $M_1$ ) and zero straw returning( $M_0$ ), with sub-plot of four nitrogen fertilizer managements: zero nitrogen control( $N_0$ ), basal fertilizer: fertilizer for tillering: fertilizer for flower promotion: fertilizer for flower preservation=1:0:0:0( $N_1$ ), 3:3:2:2( $N_2$ ), 2:2:3:3( $N_3$ ), respectively. The nitrogen accumulation of each organ of main growth stage of direct seeded hybrid rice were measured, as well as grain yield. 【Results】The results showed that under the two rotation methods, nitrogen fertilizer management had significant or highly significant regulatory effects on nitrogen accumulation in main growth stage, nitrogen transportation of stem, sheath, leaves after full heading and nitrogen use efficiency of direct seeded hybrid rice. Straw returning significantly increased nitrogen accumulation, nitrogen transport of stem, sheath, leaves and nitrogen use efficiency in the middle and late stages of hybrid rice with wheat /rape stubble manuring. The agronomic use efficiency, partial productivity and apparent utilization efficiency of nitrogen fertilizer increased by 34.96%/28.76%, 2.52%/2.61% and 31.91%/22.30%, respectively. Meanwhile, the nitrogen accumulation at various growth stage and yield of direct seeded hybrid rice with rape straw returning were better than those of wheat straw returning, and the grain yield increased by 481 kg/hm<sup>2</sup>(5.22%). It could effectively increase the rate of nitrogen accumulation in each stage of direct seeded hybrid rice, promote the transportation of nitrogen from stem, sheath and leaves to panicle in productive stage and nitrogen accumulation amount of rice plant at mature stage had obvious advantage and high nitrogen use efficiency (nitrogen agronomic use efficiency, partial productivity and apparent nitrogen use efficiency in paddy field with wheat /rape stubble returning reached 17.87 kg·kg<sup>-1</sup>/17.85 kg·kg<sup>-1</sup>, 67.27 kg·kg<sup>-1</sup>/71.28 kg·kg<sup>-1</sup>, 74.93%/75.05%) under  $M_1N_2$ ,  $M_0N_3$ . 【Conclusion】Under  $M_1N_2$  the nitrogen absorption and utilization efficiency together with the grain yield were effectively improved, rape straw returning in particular.

**Key words:** wheat /rape-rice rotation; direct seeded hybrid rice; straw returning to field; nitrogen fertilizer application; nitrogen accumulation; nitrogen use efficiency; yield

**摘 要:** 【目的】探明秸秆还田和氮肥管理对麦/油后直播杂交稻氮素积累、转运、氮肥利用效率及籽粒产量的影响。【方法】选用优质三系杂交稻宜香优 2115, 采用二因素裂区设计, 麦、油茬田同步开展试验, 处理完全一致。主区为麦/油秸秆全量翻埋还田( $M_1$ )和秸秆不还田(对照,  $M_0$ ), 副区设 4 个氮肥管理, 即不施氮对照( $N_0$ )、 $m$  基肥 :

收稿日期: 2019-04-25; 修改稿收到日期: 2019-06-19。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0301706; 2017YFD0301701; 2016YFD0300506); 四川省育种攻关专项(2016NY20051)。

$m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{促花肥}} : m_{\text{保花肥}}$  比例分别为 1:0:0:0( $N_1$ )、3:3:2:2( $N_2$ )、2:2:3:3( $N_3$ )，测定了直播杂交稻主要生育时期各器官的氮素积累量及籽粒产量。【结果】结果表明，两种轮作方式下，氮肥管理对直播杂交稻主要生育时期的氮素积累、齐穗后茎鞘、叶片的氮素转运及稻株氮素利用效率均存在显著或极显著的调控效应。秸秆还田显著提高麦/油茬杂交稻中后期的氮素积累量、茎鞘和叶片的氮素转运量以及氮肥利用效率，其中，氮肥农学利用率、氮肥偏生产力及氮肥表观利用率较秸秆不还田分别提高了 34.96%/28.76%、2.52%/2.61% 和 31.91%/22.30%。同时，油菜秸秆还田下直播杂交稻各生育时期氮素积累和产量较麦秆还田表现更好，籽粒产量提高 481 kg/hm<sup>2</sup>(5.22%)。M<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理、M<sub>0</sub>N<sub>3</sub> 处理下，直播杂交稻各阶段的氮素积累速率明显加大，促进结实期茎鞘和叶片的氮素向穗部转运，成熟期稻株氮素积累量优势明显且有较高的氮素利用效率(麦/油茬稻氮肥农学利用率、偏生产力和表观利用率分别达 17.87 kg·kg<sup>-1</sup>/17.85 kg·kg<sup>-1</sup>、67.27 kg·kg<sup>-1</sup>/71.28 kg·kg<sup>-1</sup>、74.93%/75.05%)，最终实现高产。【结论】在麦/油-稻轮作下秸秆全量还田，配合 N<sub>2</sub> 氮肥管理，可有效提高直播杂交稻氮素吸收、利用效率，增加籽粒产量，尤以油菜秸秆还田的效果更好。

**关键词：**麦/油-稻轮作；直播杂交稻；秸秆还田；氮肥运筹；氮素积累；氮素利用效率；产量

**中图分类号：**S143.1; S511.048

**文献标识码：**A

**文章编号：**1001-7216(2020)01-0057-12

水稻是重要的粮食作物之一，贡献了全球粮食总产量的 40%，养活了我国 60% 以上的人口<sup>[1]</sup>。作物秸秆是一种丰富的绿色有机肥源。前人研究表明，秸秆还田后在微生物和酶的共同作用下进行腐解<sup>[2, 3]</sup>，不仅能改善土壤物理性质，还能释放氮、磷、钾等营养元素培肥土力，促进作物养分吸收，提高粮食产量<sup>[4]</sup>。常勇等<sup>[5]</sup>研究同样显示，秸秆还田能增加土壤有机质、速效磷和速效钾含量，促进水稻对土壤氮、磷、钾的吸收，可提高肥料当季利用效率。麦/油-稻轮作是西南地区主要的稻田种植模式，随着直播稻技术的发展，麦/油后直播水稻，有利于解决茬口紧张，降低水稻生产成本，提高水稻种植的经济效益<sup>[6]</sup>。前人对麦-稻、油-稻等不同水旱轮作模式研究较多。如胡美华等<sup>[7]</sup>研究发现，冬季种植马铃薯、油菜、紫云英作物与冬闲相比能调节和改善土壤肥力，促进水稻增产。董建江等<sup>[8]</sup>发现，与单季稻相比，麦-稻轮作土壤有机质和碱解氮含量和土壤 pH 值均明显下降，速效磷和速效钾含量无显著差异；油-稻轮作土壤 pH 值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量均无显著差异，其中土壤速效钾含量有提高的趋势；同时，与单季稻相比，麦-稻轮作下水稻产量有所降低，而油-稻轮作水稻产量基本持平。刘闯等<sup>[9]</sup>研究认为，不同水旱轮作模式中，水稻季中氮肥、磷肥、钾肥偏生产力差异不明显，后茬作物中肥料偏生产力具有明显差异。但目前有关麦、油茬对水稻季的土壤肥力、氮素吸收利用效率及稻谷产量等的影响缺乏系统比较，尤其是四川盆地麦、油后直播稻。

氮肥是水稻生产中的重要调控因素，我国肥料用量高，利用效率低等现象普遍存在。调查研究显示，我国单季水稻氮肥用量平均约为 180 kg/hm<sup>2</sup>，比世界平均水平高出 75% 左右，氮肥利用率仅为 30%~35%，部分地方甚至不足 20%，明显低于世界

平均水平<sup>[10]</sup>。大量研究表明，根据水稻需肥规律合理分配氮肥能够增加水稻产量，并提高氮素利用效率<sup>[11, 12]</sup>。因此，针对以上现象，本研究通过麦-稻、油-稻轮作模式的比较，研究两种模式下的前茬秸秆还田与氮肥管理对直播稻氮素吸收利用的互作效应，以期明确麦/油-稻轮作下，直播稻的需肥特性及稻株氮素吸收利用特点，筛选出麦、油秸秆还田下的最佳氮肥管理模式，为水稻轻简化绿色栽培的合理施肥提供相关理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

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(三系中粳优质杂交稻，全生育期 157 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%)。水稻生育期间试验区气象数据由四川省气象局提供(图 1)。

### 1.2 试验设计

试验采用两因素裂区设计，麦茬、油茬田同期播种。主区为两种秸秆处理方式，即秸秆不还田(M<sub>0</sub>，对照)、秸秆全量翻埋还田(M<sub>1</sub>)；裂区设 4 种氮肥管理模式：不施氮(N<sub>0</sub>，对照)、底肥一道清(N<sub>1</sub>)、常规施氮模式( $m_{\text{基肥}} : m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{促花肥}} : m_{\text{保花肥}}$  比例为 3:3:2:2, N<sub>2</sub>)、氮肥后移模式( $m_{\text{基肥}} : m_{\text{分蘖肥}} : m_{\text{促花肥}} : m_{\text{保花肥}}$  比例为 2:2:3:3, N<sub>3</sub>)。

小麦/油菜籽粒收获后秸秆经机器粉碎至 10 cm 左右，旋耕整田时全量翻耕还田(小麦、油菜秸秆还田量分别为 5300 kg/hm<sup>2</sup>、5483 kg/hm<sup>2</sup>)，不还田(M<sub>0</sub>)处理将秸秆移除田间。水稻浸种后于 5 月 15 日采用人工模拟机械精量穴直播进行湿润直播，行

表 1 试验田耕层土壤(0-20 cm)化学性质  
Table 1. Chemical properties of topsoil (0-20 cm) in the experimental field.

土壤肥力 Soil fertility	有机质 Organic matter /(g kg <sup>-1</sup> )	速效氮 Available N/(mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P/(mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/(mg kg <sup>-1</sup> )
麦茬田 Field with wheat stubble returning	31.36	92.39	16.74	187.43
油茬田 Field with rape stubble returning	39.49	102.59	17.47	226.76

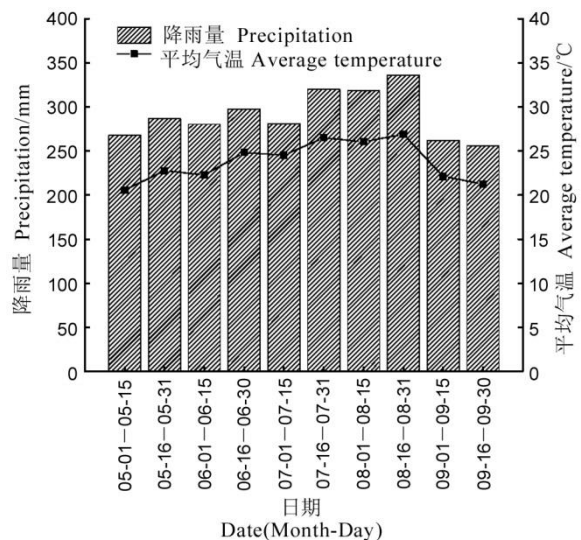


图 1 试验区水稻生育期平均气温和降雨量  
Fig. 1. Mean temperature and precipitation during rice growth period in the experimental area.

间距为 25 cm×20 cm，播量为 3~5 粒/穴。总氮肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>，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 75 kg/hm<sup>2</sup>，全作底肥，钾肥 150 kg/hm<sup>2</sup>，按  $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}$  为 1:1 施用。每处理 3 次重复，小区面积为 15 m<sup>2</sup>，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相关的栽培措施均按照常规管理进行。

1.3 测定项目和方法

于水稻拔节期、齐穗期和成熟期各小区选择生长一致且具有代表性的稻株 3 株，分茎、叶和穗(抽穗期和成熟期)，105℃下杀青 30 min，在 80℃下烘干至恒重，称重后粉碎过筛(孔径 0.2 mm)，采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮，用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量。计算器官氮素积累量、氮素积累总量、氮素阶段积累量及积累速率、氮素收获指数、茎鞘(叶)氮素转运量、茎鞘(叶)氮素转运率、茎鞘(叶)氮素贡献率、穗氮增加量、氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率。并于水稻成熟时每小区去除边行后，按实收株数计产。

1.4 数据计算

氮素阶段积累量(kg hm<sup>-2</sup>)=后一生育时期单位面积氮素积累量-前一生育时期单位面积氮素积累量；

氮素阶段积累速率(kg hm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>)=某生育阶段单位面积单位时间内氮素积累量；

氮素收获指数(%)=(穗氮素积累量/地上部氮素积累量)×100%；

茎鞘(叶片)氮素转运量(kg)=齐穗期茎鞘(叶片)氮素积累量-成熟期地上部分茎鞘(叶片)氮素积累量；

茎鞘(叶片)氮素转运率(%)=[茎鞘(叶片)氮素转运量/齐穗期茎鞘(叶片)氮素积累量]×100%；

茎鞘(叶片)氮素贡献率(%)=[茎鞘(叶片)氮素转运量/成熟期穗部氮素积累量]×100%；

穗氮增加量(kg hm<sup>-2</sup>)=成熟期穗部氮素积累量-齐穗期穗部氮素积累量；

氮素干物质生产效率(kg kg<sup>-1</sup>)=成熟期单位面积植株干物质质量/地上部分氮素积累量；

氮素稻谷生产效率(kg kg<sup>-1</sup>)=实际产量/地上部分氮素积累量；

氮肥农学利用率(kg kg<sup>-1</sup>)=[(施氮区产量-空白区产量)/施氮量]×100%；

氮肥偏生产力(kg kg<sup>-1</sup>)=施氮区产量/施氮量；

氮肥表观利用率(%)=[(施氮区植株氮素积累量-空白区植株氮素积累量)/施氮量]×100%。

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel、DPS 6.5 及 Origin 9.0 处理系统分析数据。

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杂交稻主要生育时期稻株氮素含量及收获指数的影响

氮肥管理对各生育时期氮素积累、籽粒产量及麦茬直播杂交稻的氮素收获指数均有极显著影响，秸秆处理显著影响麦茬稻拔节期的氮素积累量、氮素收获指数和油茬稻齐穗期的氮素积累量，在麦茬

表 2 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻主要生育时期稻株氮含量、产量和氮素收获指数的影响  
Table 2. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management under wheat/rape-rice rotation on nitrogen content, yield and nitrogen harvest index of rice plants in main growing periods of hybrid rice.

处理 Treatment		氮素积累 N accumulation/(kg hm <sup>-2</sup> )			籽粒产量 Grain yield/(kg hm <sup>-2</sup> )	氮素收获指数 N harvest index/%
		拔节期 Jointing	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity		
麦-稻轮作 Wheat-rice rotation system						
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	31.9±3.02 c	74.71 ±3.22 d	91.46±8.45 d	7 790±194.56 b	74.20±0.39 a
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	64.94±5.11 a	110.17±3.16 c	127.02±5.21 c	9 309±224.33 a	69.20±1.31 b
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	45.68±2.23 b	144.22±8.23 b	164.00±1.88 b	9 641 ±255.94 a	70.76±1.56 b
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	42.58±4.40 b	161.05±8.44 a	183.72±9.85 a	9 761 ±335.64 a	67.44±1.23 c
	均值 Average	46.28±1.18	122.54±1.85	141.55±5.68	9 125 ±213.92	70.40±0.23
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	21.95±2.37 d	70.64±6.53 d	85.92±1.30 d	7 409±292.20 c	75.40±0.96 a
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	49.26±2.94 a	125.31 ±4.15 c	143.29±5.30 c	9 489±307.61 b	68.43±1.22 b
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	40.41 ±6.82 b	170.87±11.52 a	198.32±10.10 a	10 090±472.87 a	68.79±1.14 b
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	31.59±1.44 c	155.88±6.69 b	179.02±4.90 b	9 855±256.02 ab	70.23±0.82 b
	均值 Average	35.8±2.29	130.68±5.08	151.64±4.66	9 211±52.75	70.71 ±0.13
F 值 F value	M	27.32 <sup>*</sup>	4.14	2.85	0.31	19.78 <sup>*</sup>
	N	59.44 <sup>**</sup>	212.74 <sup>**</sup>	509.66 <sup>**</sup>	75.57 <sup>**</sup>	29.84 <sup>**</sup>
	M×N	1.71	7.70 <sup>**</sup>	23.54 <sup>**</sup>	1.99	4.03 <sup>*</sup>
油菜-稻轮作 Rape-rice rotation system						
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	32.30±1.05 c	85.99±3.10 c	101.65±10.80 c	8 253±289.03 c	71.87±0.92 a
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	60.22±2.61 a	117.92±1.25 b	137.64±7.71 b	9 331 ±390.09 b	69.24±3.87 a
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	54.56±9.61 a	165.46±7.71 a	186.94±20.61 a	10 227 ±461.31 a	69.03±15.03 a
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	43.25±2.8 b	175.40±8.41 a	197.48±11.80 a	10 411±109.19 a	67.84±2.76 a
	均值 Average	47.58±3.79 a	136.19±0.46 b	155.93±2.84 a	9 555±255.56	69.49±2.76
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	35.90±9.77 b	90.68±2.40 c	102.79±2.13 c	8 015±286.33 c	70.61±1.69 a
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	54.74±8.55 a	140.52±9.99 b	158.76±14.04 b	9 588±460.12 b	67.61±12.13 a
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	53.99±7.31 a	182.76±5.54 a	215.36±7.50 a	10 693±275.95 a	67.67±4.04 a
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	48.98±1.73 a	176.66±10.91 a	199.79±5.20 a	10 473±168.37 a	67.09±1.32 a
	均值 Average	48.40±4.32	147.66±2.94	169.17±0.95	9 692±106.85	68.24±1.35
F 值 F value	M	0.09	62.95 <sup>*</sup>	13.73	0.52	1.59
	N	19.44 <sup>**</sup>	173.79 <sup>**</sup>	86.47 <sup>**</sup>	78.60 <sup>**</sup>	1.47
	M×N	1.10	2.56	1.82	1.46	0.02

M<sub>0</sub>—秸秆不还田; M<sub>1</sub>—秸秆全量还田; N<sub>0</sub>—不施氮肥; N<sub>1</sub>—底肥一道清; N<sub>2</sub>—*m* 基肥 : *m* 分蘖肥 : *m* 促花肥 : *m* 保花肥 比例为 3 : 3 : 2 : 2; N<sub>3</sub>—*m* 基肥 : *m* 分蘖肥 : *m* 促花肥 : *m* 保花肥 比例为 2 : 2 : 3 : 3; 氮肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。平均数±标准误 (*n*=24)。不同小写字母表示差异达到 0.05 水平, \*、\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 (LSD 检验)。下同。

M<sub>0</sub>, No straw returning; M<sub>1</sub>, Straw returning to the field in full amount; N<sub>0</sub>, Zero nitrogen application; N<sub>1</sub>, All for basal fertilizer; N<sub>2</sub>, Basal fertilizer : tillering fertilizer : fertilizer for flower promotion : fertilizer for flower preservation 3 : 3 : 2 : 2; N<sub>3</sub>, Basal fertilizer : tillering fertilizer : fertilizer for flower promotion : fertilizer for flower preservation 2 : 2 : 3 : 3; The amount of nitrogen fertilizer is 150 kg/hm<sup>2</sup>. Mean ± Standard error (*n*=24). Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level; \* and \*\* indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively (LSD test). The same as below.

稻齐穗期和成熟期氮素积累、氮素收获指数有显著或极显著互作效应 (表 2)。

除麦茬稻拔节期氮素积累量和油茬稻氮素收获指数较低外, 各时期氮素积累量、籽粒产量及麦茬稻氮素收获指数秸秆还田处理较不还田均有所提高。其中, 成熟期麦、油茬直播杂交稻氮素积累量较不还田增加 12.81%-20.93%、1.12%-15.34%, 产量提高 0.96%-4.66%、0.6%-4.56%。相对麦茬稻, 油茬稻主要生育时期的氮素积累及产量较高, 但收

获指数偏低, 其中, 成熟期氮素积累量、产量在秸秆还田下分别高出麦茬稻 11.56%、5.22%, 秸秆不还田下高出 10.16%、4.71%。就氮肥管理而言, 拔节期直播杂交稻氮素积累表现为 N<sub>1</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>, 齐穗、成熟期氮素积累及产量因秸秆处理不同而趋势各异。秸秆不还田时表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>, 秸秆还田则为 N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>。氮素收获指数在各处理间无显著差异(除麦茬稻无秸秆还田处理外), 不施氮肥处理的氮素收获指数最大, 与其他处理差异显著。

表 3 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻主要生育阶段氮素积累量及积累速率的影响  
Table 3. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management under wheat/rape-rice rotation on nitrogen accumulation amount and rate in main growth stages of hybrid rice.

处理 Treatment	氮素积累量 N accumulation amount/(kg hm <sup>-2</sup> )			氮素积累速率 N accumulation rate/(kg hm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		
	播种-拔节	拔节-齐穗	齐穗-成熟	播种-拔节	拔节-齐穗	齐穗-成熟
	SS-JS	JS-FHS	FHS-MS	SS-JS	JS-FHS	FHS-MS
麦-稻轮作 Wheat-rice rotation system						
M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	31.90±3.02 c	42.81±2.01 c	16.74±6.05 a	0.60±0.06 c	1.07±0.05 c	0.42±0.15 c
M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	64.94±5.11 a	45.23±7.75 c	16.86±2.87 a	1.23±0.10 a	1.13±0.19 c	0.42±0.07 bc
M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	45.68±2.23 b	98.54±10.38 b	19.78±1.54 a	0.86±0.04 b	2.46±0.26 b	0.49±0.20 ab
M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	42.58±4.45 b	118.47±12.79 a	22.67±5.05 a	0.80±0.08 b	2.96±0.32 a	0.57±0.13 a
均值 Average	46.28±1.18	76.26±2.01	19.01±4.98	0.87±0.02	1.91±0.05	0.52±0.12
M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	21.95±2.37 d	48.70±5.99 c	15.27±5.96 c	0.41±0.04 d	1.22±0.15 c	0.38±0.15 c
M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	49.26±2.94 a	76.05±6.15 b	17.98±4.15 bc	0.93±0.06 a	1.90±0.15 b	0.45±0.10 c
M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	40.41±6.82 b	130.46±12.49 a	27.45±3.12 a	0.76±0.13 b	3.26±0.31 a	0.69±0.21 a
M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	31.59±1.44 c	124.29±7.20 a	23.14±7.29 ab	0.60±0.03 c	3.11±0.18 a	0.58±0.18 b
均值 Average	35.80±2.29	94.87±5.13	20.96±4.19	0.68±0.04	2.37±0.13	0.48±0.10
F 值 F value	M	27.32 <sup>*</sup>	20.42 <sup>*</sup>	27.32 <sup>*</sup>	20.41 <sup>*</sup>	0.57
	N	59.44 <sup>**</sup>	104.77 <sup>**</sup>	59.45 <sup>**</sup>	104.77 <sup>**</sup>	5.66 <sup>**</sup>
	M×N	1.71	3.95 <sup>*</sup>	1.71	3.95 <sup>*</sup>	1.52
油菜-稻轮作 Rape-rice rotation system						
M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	32.30±1.05 c	53.68±2.12 c	15.67±1.03 a	0.61±0.02 c	1.34±0.05 c	0.39±0.19 b
M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	60.22±2.61 a	57.70±1.37 c	19.72±6.46 a	1.14±0.05 a	1.44±0.03 c	0.49±0.16 a
M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	54.56±9.61 a	110.90±15.93 b	21.48±3.00 a	1.03±0.18 a	2.77±0.4 b	0.54±0.35 a
M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	43.25±2.80 b	132.15±10.48 a	22.08±3.40 a	0.82±0.05 b	3.30±0.26 a	0.55±0.09 a
均值 Average	47.58±3.79	88.61±6.28	19.74±2.42 a	0.90±0.07	2.22±0.16	0.49±0.06
M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	35.90±9.77 b	54.77±11.05 c	12.11±0.47 b	0.68±0.18 b	1.37±0.28 c	0.30±0.01 d
M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	54.74±8.55 a	85.78±10.40 b	18.24±6.45 b	1.03±0.16 a	2.14±0.26 b	0.46±0.16 c
M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	53.99±7.31 a	128.78±11.40 a	32.60±5.64 a	1.02±0.14 a	3.22±0.28 a	0.81±0.14 a
M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	48.98±1.73 a	127.68±10.30 a	23.13±6.12 ab	0.92±0.03 a	3.19±0.26 a	0.58±0.15 b
均值 Average	48.40±4.32	99.25±60.00	21.52±3.59	0.91±0.08	2.48±0.15	0.54±0.09
F 值 F value	M	0.09	3.66	0.09	3.66	0.58
	N	19.44 <sup>**</sup>	90.38 <sup>**</sup>	19.44 <sup>**</sup>	90.38 <sup>**</sup>	8.55 <sup>**</sup>
	M×N	1.10	3.79 <sup>*</sup>	1.10	3.79 <sup>*</sup>	3.41

SS-JS, Sowing stage–jointing stage; JS-FHS, Jointing stage–heading stage; FHS-MS, Heading stage–maturity stage. The same as below.

2.2 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻主要生育时期氮素积累量及积累速率的影响

随直播杂交稻生育期推进，其阶段氮素积累量和积累速率呈先增大后减小的趋势，拔节至齐穗期氮素积累速率最快，积累量最大，其积累比例在麦、油茬稻中秸秆还田下分别为 61.21%、57.71%，不还田处理下分别为 51.76%、55.29%(表 3)。氮肥管理对各阶段的氮素积累量及速率均有显著或极显著的影响(除油茬稻齐穗至成熟阶段的氮素积累量外)。秸秆处理显著影响麦茬直播杂交稻齐穗前的氮素积累量及速率，两者互作对麦/油茬稻株拔节-成熟期的氮素积累量及积累速率均有显著或极显著影响。相比秸秆不还田，还田时除麦茬稻播种至拔节阶段的氮素积累及积累速率较低外，其余处理下

直播杂交稻的氮素积累量及积累速率均较高，其中拔节至齐穗、齐穗至成熟期的积累量在麦茬田下分别增加 24.40%、10.26%，油茬田下分别增加 12.01%、9.02%。整个生育期油茬稻较麦茬稻氮素积累速率、积累量平均高出 10.40%、10.89%。从氮肥处理来看，拔节前的氮素积累量及速率趋势表现为 N<sub>1</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>，拔节后氮素积累量和速率因秸秆处理而异。在秸秆不还田时，稻株氮素积累量和积累速率随穗肥比例增大而增大，秸秆还田下则表现先增大后减小的趋势。

2.3 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻主要生育时期各器官氮素积累量的影响

从表 4 可见，氮肥管理对各时期各器官的氮素积累量的影响达极显著水平。秸秆处理在麦茬稻拔

表 4 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻主生育时期各器官氮素积累量的影响

Table 4. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management under wheat/rape-rice rotation on nitrogen accumulation in various organs during main growth period of hybrid rice.

处理 Treatment		茎鞘 Stem-sheath			叶 Leaf			穗 Panicle	
		拔节期	齐穗期	成熟期	拔节期	齐穗期	成熟期	齐穗期	成熟期
		Jointing	Full heading	Maturity	Jointing	Full heading	Maturity	Full heading	Maturity
麦-稻轮作 Wheat-rice rotation system									
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	11.53±0.98 c	23.10±0.98 d	12.95±0.49 d	20.38±2.50 c	35.10±3.21 c	10.65±1.95 d	16.51±0.28 c	67.86±6.21 d
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	20.06±1.46 a	38.32±2.72 c	22.41±3.50 c	44.88±3.68 a	50.92±2.89 b	16.74±1.71 c	20.92±2.20 b	87.87±3.01 c
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	15.00±1.46 b	44.94±0.36 b	26.49±1.56 b	30.67±1.36 b	71.03±1.8 a	21.48±3.71 b	28.25±3.70 a	116.03±1.24 b
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	13.79±2.62 b	53.82±5.63 a	32.14±1.71 a	28.79±2.05 b	78.88±1.66 a	27.65±1.85 a	28.34±1.52 a	123.93±7.51 a
	均值 Average	15.10±1.00	40.05±2.00	23.50±1.14	31.18±0.23	58.98±1.37	19.13±1.42	23.51±0.70	98.92±3.86
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	7.15±1.20 c	21.87±2.30 d	11.61±0.32 c	14.79±1.44 c	34.41±4.23 c	9.53±0.91 c	14.37±0.60 d	64.77±4.38 d
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	16.00±1.01 a	41.49±1.78 c	25.93±2.37 b	33.26±2.39 a	63.16±3.49 b	19.27±2.45 b	20.66±0.93 c	98.09±5.39 c
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	14.48±2.77 a	58.14±3.31 a	33.14±0.80 a	25.93±4.08 b	77.10±12.29 a	28.16±2.47 a	35.62±1.98 a	136.49±8.98 a
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	9.66±1.04 b	51.39±1.69 b	27.37±1.12 b	21.93±2.18 b	75.20±4.85 a	25.93±1.09 a	29.29±1.99 b	125.73±3.67 b
	均值 Average	11.82±0.68	43.22±0.65	24.51±0.70	23.98±0.63	62.47±5.04	20.72±0.50	24.99±0.78	106.27±3.52
F 值 F value	M	11.56	11.73	1.38	47.69*	1.69	2.44	3.14	2.98
	N	29.12**	157.55**	133.76**	64.46**	52.94**	71.56**	79.21**	247.33**
	M×N	1.74	10.14**	12.60**	1.92	1.78	4.71*	5.97**	8.03**
油菜-稻轮作 Rape-rice rotation system									
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	12.55±4.05 b	27.83±2.59 c	16.04±2.70 c	19.76±3.97 c	39.15±3.20 c	12.50±0.56 c	19.00±2.23 c	73.12±8.54 c
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	18.89±1.34 a	38.20±4.09 b	24.89±0.68 b	41.33±1.78 a	57.74±4.69 b	17.56±2.23 b	21.99±1.52 b	95.19±5.00 b
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	18.64±3.14 a	61.38±1.44 a	33.67±3.77 a	35.91±6.48 a	73.67±9.29 a	26.07±2.68 a	30.13±2.02 a	127.20±16.74 a
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	15.30±0.57 ab	63.25±3.52 a	34.99±2.42 a	27.95±2.24 b	82.02±8.01 a	28.45±2.82 a	30.40±1.10 a	134.04±11.28 a
	均值 Average	16.34±2.19	47.66±2.26	27.40±0.69	31.24±1.68	63.15±2.71	21.14±0.46	25.38±0.11	107.39±3.91
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	12.61±5.01 b	26.66±3.89 c	16.36±0.47 c	23.30±4.80 b	44.91±3.68 c	13.88±2.66 c	19.10±2.79 c	72.55±6.67 c
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	18.19±2.91 a	49.65±4.93 b	28.37±0.79 b	36.55±6.47 a	67.69±4.32 b	23.94±3.00 b	23.18±2.21 b	106.45±1.25 b
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	18.79±2.34 a	64.76±0.84 a	40.43±2.46 a	35.19±5.08 a	83.78±3.89 a	29.39±3.21a	34.23±2.63 a	145.54±4.45 a
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	16.28±0.93 a	63.33±5.59 a	37.20±1.89 a	32.70±0.91 a	81.59±7.14 a	28.59±3.98a	31.74±1.53 a	134.00±7.85 a
	均值 Average	16.47±1.17	51.10±2.10	30.59±0.64	31.94±3.21	69.49±3.99	23.95±1.79	27.06±1.01	114.63±1.93
F 值 F value	M	0.01	17.42*	17.48*	0.18	21.80*	9.59	8.24	11.24
	N	6.88**	148.62**	98.32**	19.73**	63.66**	37.61**	49.09**	54.67**
	M×N	0.10	3.99*	1.90	1.62	1.17	1.36	0.73	1.27

节期叶片和油荳稻齐穗期茎鞘/叶片、成熟期茎鞘氮素积累量有显著调控效应，两者互作对油荳稻齐穗期茎鞘、麦荳稻齐穗期茎鞘及成熟期各器官的氮素积累有显著或极显著影响。秸秆还田较不还田降低了麦荳稻拔节期的茎鞘、叶片的氮素积累量，但能有效提高麦(油)荳稻齐穗期和成熟期各器官的氮素含量。其齐穗和成熟期的茎鞘、叶片、穗较不还田提高 7.92%、5.92%、6.30%(7.22%、10.04%、6.62%)和 4.30%、8.31%、7.43%(11.64%、13.29%、6.74%)。油荳稻主要生育时期各器官氮素含量均高于麦荳稻，其中成熟期茎鞘、叶片、穗在秸秆不还田和还田下平均高出麦荳稻 16.60%、10.51%、8.56%、24.81%、15.59%、7.87。就氮肥管理而言，不同秸秆处理下麦、油荳直播杂交稻各时期各器官氮素含量对其响应有较大差异。拔节期麦荳稻各器官氮素

含量随穗肥比例提高呈递减趋势，油荳稻秸秆不还田处理有相同规律，还田下各器官氮素含量无显著差异。齐穗期和成熟期麦、油荳直播杂交稻各器官氮素含量趋势一致，无秸秆还田表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>，秸秆还田下为 N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>。

2.4 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻齐穗至成熟期氮素转运的影响

茎鞘的氮素转运量、转运率及对穗部氮素的贡献率均小于叶片(表 5)。氮肥管理对两种轮作模式下直播杂交稻的茎鞘、叶片的氮素转运量、转运率、贡献率均有显著或极显著影响(麦荳稻茎鞘氮素贡献率除外)，秸秆处理显著影响麦荳稻茎鞘、油荳稻叶的氮素转运量及穗部氮素增加量，在麦荳稻的叶片氮素转运、油荳稻的茎鞘氮素转运和穗部增加量有显著或极显著互作效应。秸秆还田下麦/油荳稻茎

表 5 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻茎鞘(叶片)齐穗至成熟期氮素转运的影响  
Table 5. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management under wheat/rape-rice rotation on nitrogen transport from stem sheath (leaf) during full heading-mature stage of hybrid rice.

处理 Treatment		茎鞘 Stem-sheath			叶 Leaf			穗部氮增加量
		氮素转运量	氮素运转率	贡献率	氮素转运量	氮素运转率	贡献率	Panicle N increment
		Transfer amount of N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	Transfer rate of N/%	Contribution rate/%	Transfer amount of N/(kg·hm <sup>-2</sup> )	Transfer rate of N/%	Contribution rate/%	/(kg·hm <sup>-2</sup> )
麦-稻轮作 Wheat-rice rotation system								
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	10.15±1.41 c	43.84±1.82 a	15.10±1.99 b	24.45±1.25 c	69.83±0.80 a	36.12±1.77 c	51.35±0.78 d
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	15.91±2.28 b	41.64±3.08 a	18.08±1.23 a	34.18±1.42 b	67.31±2.31 b	38.96±1.67 b	66.95±1.97 c
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	18.45±1.54 ab	41.05±2.44 a	15.90±1.31 ab	49.55±1.47 a	69.08±1.90 ab	42.72±2.36 a	87.78±3.04 b
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	21.68±2.23 a	40.05±3.39 a	17.44±2.55 a	51.24±0.84 a	64.97±1.71 c	41.47±1.15 a	95.59±5.03 a
	均值 Average	16.55±0.67	41.65±1.31	16.63±0.75	39.85±0.40	67.80±1.39	39.82±0.92	75.42±0.99
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	10.25±2.35 c	46.45±1.11 a	15.82±1.36 b	24.88±1.91 c	72.12±2.34 a	38.39±1.85 b	50.41±0.64 c
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	15.57±1.75 b	37.37±1.70 b	16.01±1.13 b	43.89±2.02 b	69.30±1.45 a	44.61±1.77 a	77.43±2.65 b
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	25.00±1.70 a	42.93±2.36 a	18.46±1.48 ab	48.41±2.47 a	62.18±2.68 c	35.29±2.66 c	100.87±1.74 a
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	24.02±2.11 a	46.70±2.98 a	19.15±2.20 a	49.28±1.52 a	65.49±1.02 b	39.24±1.52 b	96.44±2.18 a
	均值 Average	18.71±0.34	43.36±1.18	17.36±0.56	41.61±0.90	67.27±1.15	39.38±1.22	81.29±1.09
F 值	F value	M	128.48**	88.54*	8.27	7.41	0.16	24.07*
		N	43.68**	5.61*	2.40	269.54**	16.85**	6.93**
		M×N	3.18	5.03*	1.79	14.00**	11.04**	14.92**
油菜-稻轮作 Rape-rice rotation system								
	M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	11.79±1.87 b	42.10±1.40 b	16.64±2.08 b	26.66±0.92 d	67.99±2.17 ab	36.59±1.50 c	54.11±2.49 d
	M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	13.31±2.08 b	34.29±3.48 c	14.17±2.34 b	40.17±0.77 c	69.57±0.92 a	42.20±3.23 a	73.20±2.47 c
	M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	27.71±0.79 a	45.17±0.61 a	22.21±2.15 a	47.60±3.09 b	64.17±2.38 c	38.44±2.77 bc	96.80±3.48 b
	M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	28.26±1.22 a	44.70±0.98 a	21.13±0.89 a	53.57±0.93 a	65.23±2.00 bc	39.95±1.69 ab	103.91±5.48 a
	均值 Average	20.27±1.26	41.57±0.77	18.54±0.38	42.00±1.05	66.74±0.64	39.29±0.42	53.45±3.10
	M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	10.31±2.08 c	38.01±0.50 b	14.22±4.76 b	31.03±2.71 c	69.19±2.48 a	42.75±1.71 a	53.45±3.10 d
	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	20.95±0.37 b	42.55±1.81 a	20.24±1.66 a	43.75±3.20 b	64.37±2.61 b	41.97±1.38 a	83.27±1.66 c
	M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	26.13±1.51 a	37.55±0.41 b	16.73±2.11 ab	54.39±4.11 a	64.90±1.95 b	37.42±1.06 b	111.31±2.09 a
	M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	24.33±2.47 a	40.80±1.74 a	19.15±1.18 a	53.00±1.18 a	65.03±2.59 b	39.54±0.90 ab	102.26±1.66 b
	均值 Average	20.43±0.36	39.73±0.48	17.58±1.46	45.54±1.43	65.87±1.14	40.42±0.52	87.57±1.00
F 值	F value	M	0.08	6.44	1.90	30.55*	0.71	7.55
		N	132.37**	6.52**	4.48*	125.85**	3.83*	3.72*
		M×N	14.37**	23.07**	5.87*	2.40	2.45	3.63*

鞘、叶片的氮素转运量及穗部氮素增加量较不还田增加了 13.05%/0.79%、4.42%/8.43% 及 7.78%/6.78%。秸秆还田提高麦茬稻茎鞘的氮素转运量及转运效率,叶片的氮素运转率及贡献率有所下降;油茬稻茎鞘、叶片的氮素转运率相比不还田时有所降低,但贡献率显著增加。油茬稻较麦茬稻茎鞘、叶片的氮素转运量及贡献率有所增加,但转运率有所下降,穗部氮增加量在秸秆还田、不还田时较麦茬稻平均高出 7.73%、8.74%。随穗肥比例提高,直播杂交稻茎鞘、叶片的氮素转运量及穗部的氮素增加量在秸秆不还田时表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>,还田下则为 N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>。麦、油茬稻茎鞘、叶片的氮素运转率和贡献率变化规律较复杂,总体来说,N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理下均有较好的氮素转运效率。

2.5 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率的影响

氮肥管理对直播杂交稻氮素利用效率各指标均有显著或极显著调控效应,秸秆处理对麦茬稻的氮肥农学利用率、表观利用率和油茬稻的氮肥利用效率(除氮素稻谷生产效率外)有显著或极显著影响,对麦茬稻的氮素干物质生产效率、氮肥表观利用率和油茬稻氮肥表观利用率互作效应显著(表 6)。秸秆还田处理稻株氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率较不还田在麦/油茬下分别增加 34.96%/28.76%、2.52%/2.61%和 31.91%/ 22.30%,氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率则相对降低 3.60%/4.17%和 5.14%/4.97%。油茬直播杂交稻较麦茬稻氮肥偏生产率和氮肥表观利用率在秸秆

表 6 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率的影响  
Table 6. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer management under wheat/rape-rice rotation on nitrogen utilization rate of hybrid rice.

处理 Treatment	氮素干物质生产效率 NBPE/(kg kg <sup>-1</sup> )	氮素稻谷生产效率 NGPE/(kg kg <sup>-1</sup> )	氮肥农学利用率 NAE/(kg kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产率 NPP/(kg kg <sup>-1</sup> )	氮肥表观利用率 NAUE/%
麦-稻轮作 Wheat-rice rotation system					
M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	154.9±10.83 a	115.58±12.77 a			
M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	126.76±1.24 b	105.99±3.48 b	10.12±1.28 b	62.06±1.50 b	23.71±3.69 c
M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	108.62±0.36 c	83.09±2.20 c	12.34±0.85 ab	64.27±1.71 ab	48.36±4.41 b
M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	99.49±0.47 d	79.06±7.47c	13.14±1.22 a	65.07±2.24 a	61.51±1.11 a
均值 Average	122.44±2.69	95.93±6.3	11.87±0.26	63.80±1.47	44.53±2.19
M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	156.93±4.34 a	114.39±4.57 a			
M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	114.09±3.65 b	97.01±7.88 b	13.86±0.29 b	63.26±2.05 b	38.25±2.89 c
M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	98.05±2.48 c	74.16±6.24 c	17.87±5.10 a	67.27±3.15 a	74.93±7.42 a
M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	103.05±0.55 c	78.43±2.82 c	16.31±2.95 ab	65.70±1.71 ab	62.07±3.77 b
均值 Average	118.03±0.88	91.00±3.45	16.02±2.54	65.41±0.71	58.42±2.20
F 值 F value	M	5.12	0.78	116.07**	99.43**
	N	183.22**	72.64**	5.54*	6.03*
	M×N	5.04*	1.22	0.73	150.09**
油菜-稻轮作 Rape-rice rotation system					
M <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	150.63±1.36 a	113.64±9.79 a			
M <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	119.73±5.64 b	98.07±1.11 b	7.19±0.69 b	62.21±2.60 b	23.99±6.68 c
M <sub>0</sub> N <sub>2</sub>	98.70±4.82 c	81.58±13.54 c	13.16±2.36 a	68.18±3.08 a	56.86±13.97 b
M <sub>0</sub> N <sub>3</sub>	95.09±6.39 c	78.01±6.15 c	14.38±2.33 a	69.40±0.73 a	63.89±14.44 a
均值 Average	116.04±1.07	92.82±2.51	11.58±1.08	66.60±1.71	48.25±7.71
M <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	144.97±1.35 a	110.49±4.65 a			
M <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	106.41±13.50 b	90.68±8.48 b	10.49±1.21 b	63.92±3.07 b	37.32±10.78 c
M <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	94.56±4.78 b	73.52±3.26 c	17.85±3.56 a	71.28±1.84 a	75.05±3.73 a
M <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	98.87±2.31 b	78.16±1.13 c	16.38±3.03 a	69.82±1.12 a	64.66±2.09 b
均值 Average	111.20±1.50	88.21±1.33	14.91±1.84	68.34±0.56	59.01±2.04
F 值 F value	M	27.45*	6.84	8.60*	70.22*
	N	42.23**	24.57**	34.58**	52.15**
	M×N	0.90	0.34	1.08	37.11**

NBPE, Nitrogen use efficiency for biomass production; NGPE, N use efficiency for grain production; NPP, Partial productivity of applied nitrogen; NAE, Nitrogen agronomic efficiency; NAUE, Nitrogen apparent use efficiency.

还田/不还田下平均增加 4.48%/4.39%、1.01%/8.36%，氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率和氮肥农学利用率相对降低 6.14%/5.42%、3.16%/3.42%和 7.44%/2.50%。从氮肥管理来看，氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率在秸秆不还田下表现为 N<sub>0</sub>>N<sub>1</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>，还田时趋势为 N<sub>0</sub>>N<sub>1</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>。氮肥农学利用率、氮肥偏生产率及氮肥表观利用率在秸秆不还田时表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>，还田下则为 N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>。

2.6 秸秆还田与氮肥管理下麦/油荏直播杂交稻主要生育阶段氮素积累、转运与氮素积累利用及产量的关系

由相关性分析可知，麦/油-稻轮作下直播杂交稻拔节后氮素积累及茎鞘、叶片的氮素转运量与产

量、氮素积累总量、穗部增加量及氮肥利用效率呈显著或极显著正相关(表 7)。以麦荏稻拔节期与齐穗期植株氮素积累及油荏稻叶片氮素转运与产量、氮素积累总量和氮肥利用率相关性较高，相关系数为 0.73\*\*~0.94\*\*。而拔节前直播稻氮素积累与产量、氮素积累总量和穗部增加量呈正相关，与氮肥利用效率呈负相关。

3 讨论

3.1 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播杂交稻氮素吸收、转运的影响

氮素的充分供应是水稻获得高产的重要前提和基础。直播稻氮素吸收特性主要与其群体茎蘖数



表 7 秸秆还田与氮肥管理下麦/油茬直播杂交稻主要生育阶段氮素积累、转运与氮素积累利用及产量的相关性  
Table 7. Correlation of nitrogen accumulation in main growth stages, transport, nitrogen accumulation and utilization and yield under wheat/oil rice-rotation hybrid rice under straw returning and nitrogen fertilizer management.

处理 Treatment	指标 Index	生育期 Growth stage	植株部位 Plant part	产量 Yield	氮素积累总量 Total N accumulation	穗部增加量 N increase in panicle	氮肥表观利用率 NAUE
麦茬田 Paddy field with wheat stubble returning	氮素积累量 N accumulation	播种-拔节 SS-JS	植株 Whole plant	0.48 <sup>*</sup>	0.22	0.18	-0.78 <sup>**</sup>
		拔节-齐穗 JS-FHS	植株 Whole plant	0.74 <sup>**</sup>	0.94 <sup>**</sup>	0.95 <sup>**</sup>	0.94 <sup>**</sup>
	氮素转运量 N translocation	齐穗-成熟 FHS-MS	植株 Whole plant	0.46 <sup>*</sup>	0.59 <sup>**</sup>	0.58 <sup>**</sup>	0.45
		齐穗-成熟 FHS-MS	茎鞘 Stem-sheath	0.80 <sup>**</sup>	0.89 <sup>**</sup>	0.86 <sup>**</sup>	0.79 <sup>**</sup>
		齐穗-成熟 FHS-MS	叶片 Leaf	0.76 <sup>**</sup>	0.85 <sup>**</sup>	0.88 <sup>**</sup>	0.63 <sup>**</sup>
油茬田 Paddy field with rape stubble returning	氮素积累量 N accumulation	播种-拔节 SS-JS	植株 Whole plant	0.50 <sup>*</sup>	0.46 <sup>*</sup>	0.41	-0.51 <sup>*</sup>
		拔节-齐穗 JS-FHS	植株 Whole plant	0.86 <sup>**</sup>	0.91 <sup>**</sup>	0.90 <sup>**</sup>	0.85 <sup>**</sup>
	氮素转运量 N translocation	齐穗-成熟 FHS-MS	植株 Whole plant	0.68 <sup>**</sup>	0.71 <sup>**</sup>	0.54 <sup>*</sup>	0.63 <sup>**</sup>
		齐穗-成熟 FHS-MS	茎鞘 Stem-sheath	0.80 <sup>**</sup>	0.85 <sup>**</sup>	0.75 <sup>**</sup>	0.74 <sup>**</sup>
		齐穗-成熟 FHS-MS	叶片 Leaf	0.89 <sup>**</sup>	0.92 <sup>**</sup>	0.78 <sup>**</sup>	0.73 <sup>**</sup>

和群体质量的动态变化有关<sup>[14]</sup>，在氮素吸收和积累方面，相对于手栽稻和机插稻，直播稻拔节期前氮素吸收速率和积累量大，拔节期至成熟期的氮素吸收速率和积累量小，对氮素吸收呈现“前强后弱”的特点<sup>[15, 16]</sup>。而本研究发现，在拔节至齐穗期直播杂交稻的氮素积累量最大，积累速率也最快，其积累比例在麦、油茬直播杂交稻秸秆还田/不还田下分别高达 61.21%/51.76%、57.71%/55.29%，其次是播种至拔节期，齐穗后氮素吸收积累能力较弱。主要原因可能是受前茬作物影响，麦、油后直播水稻播期较常规直播栽培有所推迟，温光条件改变影响稻种出苗，尤其是秸秆还田影响出苗速度<sup>[17]</sup>，前期群体数量不大，因而拔节前的氮素吸收量较小。在麦/油秸秆还田下直播栽培水稻应适当提高播种量以保证足够的出苗率。秸秆还田能显著提高直播稻齐穗期和成熟期的氮素积累量，促进结实期茎鞘(辅)、叶片(主)的氮素向穗部转运，显著提高穗部氮素增加量(麦/油茬直播杂交稻分别提高 7.78%/6.78%)，成熟期穗部氮素含量较秸秆不还田分别高出 7.43%/6.74%，最终表现为直播杂交稻氮素积累和产量的协同提高(表 2)。这与裴鹏刚等<sup>[18]</sup>研究表明秸秆还田显著提高水稻中后期的氮素积累量，从而提高水稻产量结果一致。

相较麦茬稻，油茬稻主要生育时期各器官氮素吸收量均较大，齐穗后茎鞘、叶片的氮素转运量也比麦茬稻高出 9.19%、9.44%，虽然转运率和氮素收获指数较低，但成熟期仍然有较高的氮素积累量

和产量(油茬稻较麦茬稻在秸秆还田/不还田下分别增加 11.56%/10.16%、5.22%/4.71%)、张维乐等<sup>[19]</sup>研究也有相同结论。这可能与油茬田基础肥力较高(表 1)以及秸秆全量还田下油菜秸秆养分释放量较大有关。朱芸等<sup>[20]</sup>通过麦-稻、油-稻周年养分收支比较得出油菜季因有较多落叶，其养分归还量明显高于小麦季，这也是油茬田较麦茬田基础肥力高的主要原因。武际等<sup>[21]</sup>通过栽培模式和不同秸秆还田互作研究发现，秸秆翻埋还田时，相较小麦秸秆，油菜秸秆的腐解速率在试验周期内均较快，且试验结束时腐解率提高 3.97%~4.09%，同时碳释放率高于小麦秸秆。Sarkera 等<sup>[22]</sup>研究也证实，油菜秸秆比小麦秸秆更有利于促进有机碳的矿化和速效氮素的释放。董建江等<sup>[8]</sup>通过不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响研究发现，与单季稻种植相比，麦稻轮作水稻产量显著降低，油稻轮作水稻产量基本与之持平。本研究进一步证实了前人研究结果，在油-稻轮作模式下，较高的基础肥力配合油菜秸秆还田后较好的养分释放可促进直播稻的氮素积累，从而进一步提高籽粒产量。

本研究结果还显示，秸秆还田下随穗肥比例增大，直播杂交稻氮素积累量呈先增大后减小的趋势，在 N<sub>2</sub> 处理下氮素积累量和籽粒产量较高，而秸秆不还田下以 N<sub>3</sub> 处理最佳。说明秸秆还田下增加基肥的施用比例有助于直播稻氮素积累及产量的提高，这与严奉君等<sup>[23]</sup>的移栽稻秸秆还田下氮肥运筹结果一致。可见，虽直播稻分蘖能力较移栽

稻强<sup>[24]</sup>,但在秸秆还田下,基肥施用比例也不宜过低。在  $N_2$  处理下,麦/油荏直播稻群体构建合理,植株氮素吸收速率快,氮素积累量大,齐穗后茎鞘、叶片的转运量高,从而协调出较好的氮素积累量和籽粒产量。秸秆还田下氮肥前移过多或后移过多均不利于直播杂交稻氮素的吸收与积累。本研究底肥一道清处理( $N_1$ )虽拔节期氮素积累快,积累量大,但后期氮素供应不足,齐穗后植株氮素积累能力较弱(成熟期麦/油荏稻氮素积累量较  $N_2$ 、 $N_3$  少 27.75%/26.28%、19.96%/20.54%)。氮肥后移处理( $N_3$ )前期氮肥施用过少,秸秆腐解易与微生物争氮,影响水稻氮素吸收(拔节期麦/油荏稻较  $N_1$ 、 $N_2$  处理氮素积累量少 35.87%/10.52%、21.83%/9.28%),导致群体构建不足,后期氮素积累量亦不高,与张祖建等<sup>[25]</sup>研究的直播稻均衡施肥结论一致。

### 3.2 麦/油-稻轮作下秸秆还田与氮肥管理对直播稻氮素利用效率的影响

秸秆作为一种绿色有机肥源,还田后能培肥地力,促进作物对养分的吸收,提高氮素利用效率和作物产量<sup>[26]</sup>。张刚等<sup>[27]</sup>的研究表明,秸秆还田处理下氮肥农学效率和氮肥表观利用率较单施氮肥分别提高 1.4~3.4 kg/kg 和 1.8%~4.2%。陈立冬等<sup>[28]</sup>也认为,秸秆还田耦合氮肥管理能够促进水稻对氮素的吸收,提高氮素利用效率,减少氮素损失,氮肥吸收利用率最高可达 49%。本研究显示,秸秆还田能有效提高直播杂交稻氮肥利用效率,配合基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=3:3:2:2 的氮肥管理能显著提高其拔节至齐穗期氮素积累量和氮素吸收速率,促进茎秆和叶片的氮素转运至穗部,氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥表观利用率均有所提高,麦(油)荏杂交稻分别较  $N_1/N_3$  提高了 28.93%/9.56%、6.34%/2.39%、95.90%/20.72%(70.16%/8.97%、11.51%/2.09%、101.10%/16.07%)。油荏稻的氮肥偏生产力和表观利用率较麦荏稻在秸秆还田/不还田下高出 4.39%/4.48% 和 8.35%/1.01%,但氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率和氮肥农学利用率却相对较低。主要是因为还田秸秆种类及土壤肥力不同导致<sup>[29]</sup>。戴志刚等<sup>[30]</sup>通过对不同秸秆还田养分释放特征试验发现,经过 124 天的腐解,小麦/油菜秸秆的碳、氮、磷释放率分别为 66.58%/52.54%、49.26%/57.83%、59.93%/67.32%,钾在培养 12 d 后释放率均达到 98%。油菜较小麦秸秆养分释放量更多,更能培肥地力,促进稻株对氮肥的吸收利用。相关性分析表明(表 7),提高拔节后的植株氮素积累,促进茎鞘、叶片的氮素

转运,有利于提高籽粒产量、氮素吸收总量和氮肥利用率,其中以拔节至齐穗期的氮素积累量以及叶片氮素转运量提高水稻对氮肥吸收利用效果较好( $r=0.73^{**} \sim 0.94^{**}$ )。

## 4 结论

氮肥管理对直播杂交稻的氮素积累及利用效率均有显著或极显著影响,秸秆还田显著提高水稻拔节后氮素积累量及氮素农学利用率、偏生产力和表观利用率。麦/油-稻轮作下均能通过秸秆还田配合合理的氮肥管理提高直播杂交水稻氮肥利用效率。综合考虑,以油菜秸秆还田配施基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥=3:3:2:2 的氮肥运筹能最大限度的提高肥料利用效率和水稻籽粒产量。

### 参考文献:

- [1] Yang Y, Peng Q, Chen G X, Li, Wu C H. *OsELF3* is involved in circadian clock regulation for promoting flowering under long-day conditions in rice[J]. *Molecular Plant*, 2013, 6(1): 202-215.
- [2] Ji B Y, Hu H, Zhao Y L, Mu X Y, Liu K, Li C H, Simón M R, Takamizo T. Effects of deep tillage and straw returning on soil microorganism and enzyme activities[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(1): 451493.
- [3] Becker R, Bubner B, Remus R, Wirth S, Ulrich A. Impact of multi-resistant transgenic *Bt* maize on straw decomposition and the involved microbial communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 73(1): 9-18.
- [4] Yuan L, Zhang Z C, Cao X H, Zhu S C, Zhang X, Wu L G. 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.
- [5] 常勇, 黄忠勤, 周兴根, 孙克新, 周润楠, 丁震乾, 王波, 李小珊. 不同麦秸还田量对水稻生长发育、产量及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(20): 47-51.  
Chang Y, Huang Z Q, Zhou X G, Sun K X, Zhou J N, Ding Z Q, Wang B, Li X S. Effects of different wheat straw returning quantity on growth, yield and quality of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2008, 46(20): 47-51. (in Chinese with English abstract)
- [6] Mishra 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.
- [7] 胡美华, 王华英, 黄国洋, 梁银娜, 陈能阜. 浙江省菜稻轮作模式应用现状、存在的问题与发展对策[J]. *中国瓜菜*, 2016, 29(2): 52-56.

- Hu M H, Wang H Y, Huang G Y, Liang Y N, Chen N F. Application status, existing problems and development countermeasures of vegetable and rice rotation mode in Zhejiang Province[J]. *Chinese Gourd*, 2016, 29(2): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [8] 董建江, 邵伏文, 张林, 姜超强, 祖朝龙. 不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 509-514.
- Dong J J, Shao F W, Zhang L, Jiang C Q, Zu C L. Effects of different tillage modes on soil physical and chemical properties and economic benefits of paddy fields[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 509-514. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘闯, 陈防, 刘毅, 李志国, 张过师, 谢娟. 3种水旱两熟轮作制养分运筹研究进展[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(36): 198-204.
- Liu C, Chen F, Liu Y, Li Z G, Zhang G S, Xie J. Research progress on nutrient management in rotation system of three types of drought and flood[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(36): 198-204. (in Chinese with English abstract)
- [10] Zhang M, Yao Y L, Tian Y H, Ceng K, Zhao M, Zhao M, Yin B. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2018: 227.
- [11] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Zhong X H, Zou Y B, Yang J C, Wang G H, Liu Y Y, Hu R, Tang Q Y, Cui K H, Zhang F S, Dobermann A. Improving nitrogen fertilization in rice by sitespecific N management: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 649-656.
- [12] 张耗, 薛亚光, 杨建昌. 水稻高产与养分高效利用的限制因素与栽培技术[J]. *中国稻米*, 2013, 19(4): 5-7.
- Zhang H, Xue Y G, Yang J C. Limiting factors and cultivation techniques of high yield and nutrient efficient utilization of rice[J]. *China Rice*, 2013, 19(4): 5-7. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李杰, 张洪程, 董洋阳, 倪晓诚, 杨波, 龚金龙, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 不同生态区栽培方式对水稻产量、生育期及温光利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2661-2672.
- Li J, Zhang H C, Dong Y Y, Ni X C, Yang B, Gong J L, Chang Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Effects of cultivation methods in different ecological zones on rice yield, growth period and temperature and light utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13): 2661-2672. (in Chinese with English abstract)
- [14] 卢燕. 直播密度对水稻不同类型品种综合生产力的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- Lu Y. Effects of direct seeding density on comprehensive productivity of different rice varieties[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王春雨, 余华清, 何艳, 郭长春, 张绍文, 杨志远, 马均. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1792-1801.
- Wang C Y, Yu H Q, He Y, Guo C C, Zhang S W, Yang Z Y, Ma J. Effects of sowing and planting method and nitrogen application amount on nitrogen utilization characteristics and yield of indica hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2017, 25(12): 1792-1801. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐国伟, 翟志华, 杨久军, 王贺正, 陈明灿. 秸秆还田量对直播稻苗期生长和土壤的影响[J]. *广东农业科学*, 2015, 42(19): 1-7.
- Xu G W, Zhai Z H, Yang J J, Wang H H, Chen M C. Effects of straw mulching amount on growth and soil of direct seeding rice seedling stage[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2015, 42(19): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [17] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 胡志华, 金千瑜. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 282-290.
- Pei P G, Zhang J H, Zhu L F, Hu Z H, Jin Q Y. Effects of straw mulching on photosynthetic characteristics, nitrogen absorption and yield formation of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(3): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张维乐, 戴志刚, 任涛, 周先竹, 王忠良, 李小坤, 丛日环. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(7): 1254-1266.
- Zhang W L, Dai Z G, Ren T, Zhou X Z, Wang Z L, Li X K, Cong R H. Effects of straw mulching and nitrogen fertilization on crop yield and nutrient absorption and utilization in different drought and water rotation systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1254-1266. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 李小坤, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 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, Li X K, Ren T, Cong R H, Lu J W. Differences in annual nutrient budget of oil-rice and wheat-rice rotation systems in the Yangtze River basin[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2019, 25(1): 64-73. (in Chinese with English abstract)
- [20] 武际, 郭熙盛, 王允青, 许征宇, 鲁剑巍. 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.
- Wu J, Guo X S, Wang Y Q, Xu Z Y, Lu J W. Characteristics of decomposition of rape and wheat straw under different rice cultivation modes and straw returning methods[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16): 3351-3360. (in Chinese with English abstract)

- [21] Sarker J R, Singh B P, Cowie A L, Fang Y Y, Collins D, Dougherty W J, Singh B K. Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2018, 116: 22-38.
- [22] 严奉君, 孙永健, 马均, 徐徽, 李玥, 杨志远, 蒋明金, 吕腾飞. 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.  
Yan F J, Sun Y J, Ma J, Xu H, Li Y, Yang Z Y, Jiang M J, Lu T F. Effects of straw mulching and nitrogen fertilization on root growth and nitrogen utilization of hybrid rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2015, 21(1): 23-35. (in Chinese with English abstract)
- [23] 许轲, 唐磊, 张洪程, 郭保卫, 霍中洋, 戴其根, 魏海燕, 韦还和. 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, Guo B W, Huo Z Y, Dai Q G, Wei H Y, Wei H H. Effects of different mechanical direct seeding methods on tillering characteristics and yield of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 43-52. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张祖建, 谢成林, 谢仁康, 郎有忠, 杨岚, 张菊芳, 朱庆森. 苏中地区直播水稻的群体生产力及氮肥运筹的效应[J]. *作物学报*, 2011, 37(4): 677-685.  
Zhang Z J, Xie C L, Xie R K, Lang Y Z, Yang L, Zhang J F, Zhu Q S. Population productivity and nitrogen management effect of direct seeding rice in Suzhong area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(4): 677-685. (in Chinese with English abstract)
- [25] Xu Y Z, Nie L X, Buresh R J, Huang J L, Cui K H, Xu B, Gong W H, Peng S B. Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management[J]. *Field Crops Research*, 2009: 115(1): 79-84.
- [26] 张刚, 王德建, 俞元春, 王灿, 庄锦贵. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 877-885.  
Zhang G, Wang D J, Yu Y C, Wang C, Zhuang J G. Effects of straw mulching and nitrogen fertilizer application on rice yield, nitrogen fertilizer utilization and nitrogen loss[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2016, 22(4): 877-885. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈立冬. 秸秆还田条件水肥耦合对水稻生长及土壤总氮流失的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.  
Chen L D. Effects of water and fertilizer coupling on rice growth and soil total nitrogen loss under straw mulching conditions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张学林, 周亚男, 李晓立, 侯小畔, 安婷婷, 王群. 氮肥对室内和大田条件下作物秸秆分解和养分释放的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(10): 1746-1760.  
Zhang X L, Zhou Y N, Li X L, Hou X P, An T T, Wang Q. Effects of nitrogen fertilizer on decomposition and nutrient release of crop straws under indoor and field conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(10): 1746-1760. (in Chinese with English abstract)
- [29] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 鲁明星, 杨文兵, 高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276.  
Dai Z G, Lu J W, Li X K, Lu M X, Yang W B, Gao X Z. Nutrient release characteristics of straw returning from different crops to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272-276. (in Chinese with English abstract)