



刘梦红,李红宇,杜俊,陈柳,林晓影,赵海成,张悦,张巩亮. 秸秆还田与藁肥增氮对寒地水稻产量和氮素吸收、利用的影响[J]. 中国农业大学学报,2023,28(09): 49-59.

LIU Menghong, LI Hongyu, DU Jun, CHEN Liu, LIN Xiaoying, ZHAO Haicheng, ZHANG Yue, ZHANG Gongliang. Effect of straw returning and increasing nitrogen of tillering fertilizer on rice yield and nitrogen uptake and utilization in cold region[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(09): 49-59. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.05

## 秸秆还田与藁肥增氮对寒地水稻产量和氮素吸收、利用的影响

刘梦红<sup>1,2</sup> 李红宇<sup>1,2\*</sup> 杜俊<sup>3</sup> 陈柳<sup>3</sup> 林晓影<sup>4</sup> 赵海成<sup>1,2</sup> 张悦<sup>1</sup> 张巩亮<sup>1</sup>

- (1. 黑龙江八一农垦大学 农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,黑龙江 大庆 163319;  
2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室,黑龙江 大庆 163319;  
3. 北大荒集团 黑龙江富裕牧场有限公司,黑龙江 齐齐哈尔 161200;  
4. 北大荒集团 黑龙江八五四农场有限公司,黑龙江 鸡西 158100)

**摘要** 为明确秸秆还田同时增施氮肥对寒地水稻产量及氮素吸收利用的影响,采用盆栽试验,二因素完全随机试验设计,测定秸秆离田( $S_1$ )、还田( $S_2$ )和常规施氮( $N_1$ )、藁肥增氮( $N_2$ )处理的水稻产量、氮素积累量、氮素生产效率及氮素利用效率等指标。结果表明,在 $S_2$ 条件下,水稻生物产量和籽粒产量分别下降3.18%和3.90%,氮素积累量和穗部氮增加量分别减少9.34%和6.48%,氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率可分别提高6.87%和6.34%。相较(秸秆还田+常规施氮),(秸秆还田+藁肥增氮)处理的生物产量和籽粒产量分别增加4.60%和4.38%,氮素积累量和氮素穗部增加量分别提高13.69%和11.69%,氮素干物质生产效率下降7.98%。 $S_2$ 的氮素农学利用率、吸收利用率及偏生产力较 $S_1$ 分别降低8.54%、15.77%和3.93%,生理利用率较秸秆离田提高9.52%。秸秆还田和藁肥增氮二因素互作对水稻的氮素农学利用率、吸收利用率及偏生产力的影响达到极显著水平,(秸秆还田+常规施氮)的氮素农学利用率较(秸秆还田+藁肥增氮)提高5.53%,而氮素吸收利用率和偏生产力均无显著变化。因此,在秸秆还田( $S_2$ )条件下藁肥增氮( $N_2$ )可显著增加氮素积累量和穗部氮素含量,显著提高氮素农学利用效率,进而提高水稻生物产量和籽粒产量,是寒地实现水稻高产和氮肥高效利用的有效技术途径。

**关键词** 寒地水稻; 秸秆还田; 藁肥增氮; 氮肥利用率

中图分类号 S511.4+1

文章编号 1007-4333(2023)09-0049-11

文献标志码 A

## Effect of straw returning and increasing nitrogen of tillering fertilizer on rice yield and nitrogen uptake and utilization in cold region

LIU Menghong<sup>1,2</sup>, LI Hongyu<sup>1,2\*</sup>, DU Jun<sup>3</sup>, CHEN Liu<sup>3</sup>, LIN Xiaoying<sup>4</sup>,  
ZHAO Haicheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, ZHANG Gongliang<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing 163319, China;

2. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing 163319, China;

3. Beidahuang Group Heilongjiang Fuyu Pasture Co., Ltd., Qiqihar 161200, China;

4. Beidahuang Group Heilongjiang 854 Farm Co., Ltd., Jixi 158100, China)

**Abstract** To clarify the impact of straw returning to the field and increasing nitrogen fertilizer application on rice yield and nitrogen uptake and utilization in cold regions, a two-factor fully randomized pot experiment was designed. Rice yield, nitrogen accumulation, nitrogen production efficiency, and nitrogen utilization efficiency were measured under

收稿日期: 2022-10-25

基金项目: 中央支持地方高校改革发展资金人才培养项目(2022010006); 黑龙江省重点研发计划(GA21B002)

第一作者: 刘梦红(ORCID:0000-0002-6871-5091), 助理研究员, 主要从事植物营养研究, E-mail: ndsoil@163.com

通讯作者: 李红宇(ORCID:0000-0003-1016-3543), 教授, 主要从事水稻高产优质生理生态及遗传多样性研究, E-mail: ndrice@163.com

four different treatments including straw leaving the field ( $S_1$ ), returning to the field ( $S_2$ ), conventional nitrogen ( $N_1$ ) and tillering fertilizer increasing nitrogen treatments ( $N_2$ ). The results showed that: Under  $S_2$  condition, the biological yield and grain yield of rice respectively decreased by 3.18% and 3.90%, and the nitrogen accumulation and spike nitrogen increase respectively decreased by 9.34% and 6.48%, respectively. Nitrogen dry matter production efficiency and nitrogen rice production efficiency respectively increased by 6.87% and 6.34%. Under the condition of returning straw to the field, the biological yield and yield under the treatment of tillering fertilizer and nitrogen respectively increased by 4.60% and 4.38%. Compared with those under the conventional nitrogen application, the nitrogen accumulation and the increase of nitrogen spike respectively increased by 13.69% and 11.69%, and the nitrogen dry matter production efficiency decreased by 7.98%. Compared with  $S_1$ , the agronomic utilization efficiency, absorption utilization efficiency, and partial factor productivity of nitrogen in  $S_2$  respectively decreased by 8.54%, 15.77% and 3.93%. The physiological utilization efficiency increased by 9.52% compared to that of straw removed from the field. The effect of the interaction between the two factors of straw return and tiller fertilizer nitrogen increase on nitrogen agronomic utilization, absorption utilization and bias productivity reached a highly significant level. Under the condition of returning straw to the field, the nitrogen utilization efficiency of conventional nitrogen application increased by 5.53% compared with that of tiller fertilizer, and the absorption utilization efficiency and partial factor productivity did not change significantly. Therefore, the tiller fertilizer nitrogen enrichment ( $N_2$ ) under straw return ( $S_2$ ) conditions could significantly increase nitrogen accumulation and spike nitrogen content, significantly improve nitrogen agronomic use efficiency, and thus increase biological yield and rice yield. It is an effective technical approach to achieve high yield and efficient use of nitrogen fertilizer in cold regions of rice.

**Keywords** rice in cold region; straw return; tillering fertilizer increase nitrogen; nitrogen fertilizer utilization rate

秸秆是一种重要的可再生有机资源,含有作物生长发育所需的有机质、氮、磷、钾、钙、硫等养分<sup>[1-2]</sup>。据统计,我国每年作物秸秆量约为7亿t,其中水稻秸秆的占比约为29.0%。从秸秆养分资源量看,水稻大约占主要农作物秸秆养分资源总量的33.1%<sup>[3]</sup>。秸秆还田作为一种重要的秸秆利用方式,可在降低环境污染和农业资源浪费的前提下,实现土壤肥力和水稻产量的协同提高。秸秆直接还田可以提高土壤质量状况,增强土壤活性,提升土壤供肥能力<sup>[4-6]</sup>。杨竣皓等<sup>[7]</sup>研究结果表明,最适宜的秸秆还田量为半量还田,还田年限超过20年时增产效果显著。相比秸秆离田,秸秆还田可以显著提高玉米、水稻、小麦等粮食作物产量<sup>[8]</sup>。Ku等<sup>[9]</sup>研究表明,长期秸秆还田可使水稻产量增加9%。这可能与秸秆中含有大量的营养元素,可供给土壤微生物繁殖,从而显著优化土壤团聚体结构及提高土壤脲酶和相关转化酶活性有关<sup>[10]</sup>。张亚丽等<sup>[11]</sup>研究结果发现秸秆直接施入土壤会刺激微生物剧烈活动而固持一部分有效氮,造成与作物争氮的现象,需要配施适量的氮肥来解决微生物在分解秸秆的过程中与作物竞争土壤中氮素的矛盾,充分利用秸秆带入的氮素,调控水稻生育期氮肥合理施用。我国氮肥的当季利用率通常不超过40%,平均为32%,尤其在高产田中,大量氮肥的施用常伴随着更低的氮肥

利用率,造成氮肥大量损失<sup>[12]</sup>。秸秆还田会造成作物生长前期土壤供氮能力下降,对作物生长前期生长发育产生不利影响,应适当增加水稻生育前期氮投入量,以确保微生物对无机氮的固持不会影响水稻生长<sup>[13]</sup>。李录久等<sup>[14]</sup>研究认为,在秸秆还田条件下氮肥以基肥、分蘖肥和穗肥的质量比为6:2:2时稻谷产量和氮素利用效率最高。而李勇等<sup>[15]</sup>研究表明,与秸秆离田适宜氮肥运筹(基蘖氮肥:穗氮肥=5:5)相比,在秸秆全量还田下适当提高基蘖氮肥比例(基蘖氮肥:穗氮肥=6.5:3.5),可显著提高水稻氮素积累总量、水稻产量和氮素利用效率。严奉军等<sup>[16]</sup>研究认为在秸秆覆盖条件下,氮肥运筹以基肥、分蘖肥、穗肥质量比为3:3:4时的水稻干物质积累量最多,氮素利用率最高。

国内外学者已经对秸秆还田的方式、数量及秸秆还田对作物产量、生长等的影响进行了众多研究<sup>[17-18]</sup>,但是关于秸秆还田条件下寒地水稻的氮素积累和利用效率,尤其是秸秆还田配施氮肥对氮素利用率影响方面的研究尚不充分。本研究以‘垦粳8’为供试材料,在秸秆还田量为7500 kg/hm<sup>2</sup>条件下,比较了秸秆还田和秸秆离田条件下常规施氮、蘖肥增氮15%对寒地水稻产量和氮素吸收利用的影响,旨在明确秸秆还田同时增施氮肥对寒地水稻产量及氮素吸收利用的影响,以为寒地水稻秸秆和

氮素高效利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020—2021 年在黑龙江八一农垦大学校内实习实践基地(46. 587° N,125. 168° E)进行,该地区年日照时数 2 726 h,无霜期 143 d,年平均气温 4. 2 °C,夏季平均气温 23. 3 °C,年降水量 427. 5 mm,年蒸发量 1 635 mm。土壤类型为白浆土,试验土壤为取自黑龙江省兴凯湖农场的白浆土,碱解氮 134. 80 mg/kg、有效磷 20. 81 mg/kg、速效钾 72. 05 mg/kg、有机质 28. 98 g/kg、pH 6. 64。供试品种为‘垦粳 8’,生育期 142 d 左右,需≥10 °C 活动积温 2 650 °C 左右。

1.2 试验设计

采用二因素完全随机试验设计,S 因素为秸秆还田,2 水平,分别为秸秆离田(S<sub>1</sub>)和秸秆还田(S<sub>2</sub>);N 因素为施氮量,二水平,分别为常规施氮(N<sub>1</sub>)和分藁肥增氮 15%(简称藁肥增氮 N<sub>2</sub>)。同时,秸秆还田和秸秆离田处理分别设置无氮区。采用盆栽试验,盆钵规格为长×宽×高=80 cm×60 cm×28 cm,每处理种植 5 盆,每盆装粉碎混匀的白浆土 78 kg,第二年使用原盆土进行重复试验。氮肥采用尿素(N 含量 46. 4 g/100 g),分配比例为基肥:分藁肥:调节肥:穗肥=4:3:1:2。钾肥采用硫酸钾(K<sub>2</sub>O 含量 50 g/100 g),分配比例为基肥:穗肥=6:4;磷肥采用重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 43 g/100 g),作为基肥一次性施入。

4 月中旬播种,5 月 20 日左右移栽,9 月 25 日左右收获。移栽规格为每盆移栽 2 行,每行 8 穴,每穴 3 苗,行距 30 cm,穴距 10 cm。秸秆还田量按当地生产 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 计算,折算每盆还田秸秆量为 360 g。4 月中旬将风干秸秆粉碎为长度 7~10 cm 的小段,还田前 1 周泡田,整地时秸秆随底肥一起均匀施入盆栽中,使用搅浆机混匀,其他田间管理与常规农田管理方法一致。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 植株氮含量测定

齐穗期和成熟期每处理分别选取长势均匀的盆栽 1 盆,样品分成稻谷和秸秆两部分,装入纸袋放进烘箱于 105 °C 下杀青 30 min,80 °C 下烘干至恒重,分别用不锈钢碾槽和微型植物粉碎机粉碎并过 60 目筛。制备好的稻谷和秸秆样品各自用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,凯氏定氮法<sup>[19]</sup>测定氮含量。

氮的吸收利用效率参数计算公式如下:

单株氮素积累量=

植株地上部干物重×地上部含氮率

单株氮素表观转运量=

齐穗期氮素积累量-成熟期氮素积累量

氮素表观转运率=

氮素表观转运量/齐穗期氮素积累量×100%

氮素表观转运贡献率=

氮素表观转运量/成熟期穗部氮素积累量×100%

氮素干物质生产效率=

成熟期地上部干物重/地上部氮素总积累量

氮素稻谷生产效率=籽粒产量/地上部氮素总积累量

氮素收获指数=成熟期穗部氮素积累量/

植株地上部氮素积累总量×100%

氮肥吸收利用率=(施氮处理植株氮积累量-

不施氮处理植株氮积累量)/施氮量×100%

氮素农学利用率=(施氮处理籽粒产量-

不施氮处理籽粒产量)/施氮量

氮素生理利用率=(施氮处理籽粒产量-

不施氮处理籽粒产量)/(施氮处理植株氮积累量-

不施氮处理植株氮素积累量)

氮素偏生产力=

单位面积籽粒产量/单位面积施氮量

1.3.2 产量测定

成熟期,每处理根据平均茎数取样 8 穴,风干后分稻谷和稻草分别称量,计算籽粒产量和生物产量。

1.3.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7. 05 软件进行数据整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和施氮量对产量及生物产量的影响

由表 1 可知,2020 年秸秆还田(S<sub>2</sub>)的生物产量和籽粒产量分别较秸秆离田(S<sub>1</sub>)下降 4. 15% 和 5. 42%,2021 年 S<sub>2</sub> 与 S<sub>1</sub> 差异不显著,2 年平均生物产量和籽粒产量分别下降 3. 18% 和 3. 90%。藁肥增氮(N<sub>2</sub>)的生物产量和籽粒产量在各水平间差异不显著。2020 年秸秆还田与藁肥增氮二因素互作显著影响生物产量和籽粒产量,2021 年二因素互作不显著,2 年平均二因素互作显著或极显著(表 1)。秸秆离田(S<sub>1</sub>)条件下生物产量和籽粒产量在施氮量水平间差异均不显著,而秸秆还田(S<sub>2</sub>)条件下藁肥增氮(N<sub>2</sub>)的生物产量和产量分别较常规施氮(N<sub>1</sub>)增加 4. 60% 和 4. 38%(图 1)。

表 1 不同秸秆还田和藁肥增氮处理下生物产量和产量的比较

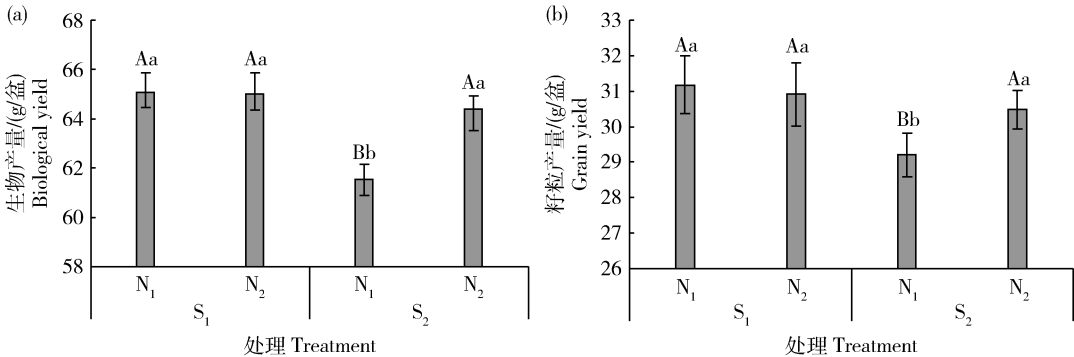
Table 1 Comparison of biological yield and grain yield under different straw returning and tillering fertilizer increased nitrogen

| 处理<br>Treatment  | 生物产量 Biological yield |            |            | 籽粒产量 Grain yield |            |            |
|------------------|-----------------------|------------|------------|------------------|------------|------------|
|                  | 2020 年                | 2021 年     | 平均 Average | 2020 年           | 2021 年     | 平均 Average |
| S <sub>1</sub>   | 64.08±0.36            | 65.99±0.83 | 65.04      | 32.82±0.22       | 29.27±0.59 | 31.05      |
| S <sub>2</sub>   | 61.42±0.81            | 64.52±1.21 | 62.97      | 31.04±0.43       | 28.64±0.56 | 29.84      |
| N <sub>1</sub>   | 62.22±1.23            | 64.41±1.29 | 63.32      | 31.66±0.79       | 28.72±0.69 | 30.19      |
| N <sub>2</sub>   | 63.29±0.66            | 66.10±0.58 | 64.69      | 32.20±0.43       | 29.20±0.47 | 30.70      |
| F <sub>S</sub>   | 40.82**               | 3.53       | 21.78**    | 54.47**          | 1.41       | 17.083**   |
| F <sub>N</sub>   | 6.59                  | 4.64       | 6.67       | 4.99             | 0.81       | 3.04       |
| F <sub>S×N</sub> | 7.76*                 | 5.04       | 10.84**    | 7.09*            | 2.90       | 7.04*      |

注:S<sub>1</sub>, 秸秆离田;S<sub>2</sub>, 秸秆还田;N<sub>1</sub>, 常规施氮;N<sub>2</sub>, 分蘖肥增氮 15%。\* 和 \*\* 分别表示  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平存在显著性差异。下同。

Note: S<sub>1</sub>, straw leaving; S<sub>2</sub>, straw returning; N<sub>1</sub>, conventional nitrogen fertilizer; N<sub>2</sub>, tiller fertilizer nitrogen enrichment.

\* and \*\* indicate significant differences at levels of 0.05 and 0.01, respectively. The same below.



不同大写或小写字母分别表示不同处理之间差异达到极显著( $P<0.01$ )和显著( $P<0.05$ )水平。下同。

Different uppercase and lowercase letters indicate extremely significant ( $P<0.01$ ) and significant ( $P<0.05$ ) between different treatments. The same below.

图 1 秸秆还田和藁肥增氮互作下水稻的生物产量(a)和籽粒产量(b)

Fig. 1 Biological yield (a) and grain yield (b) of rice under the interaction of straw returning and tillering fertilizer increasing nitrogen

2.2 秸秆还田和藁肥增氮对氮素干物质生产效率  
和稻谷生产效率的影响

由表 2 可知, 秸秆还田(S<sub>2</sub>)的氮素干物质生  
产效率显著或极显著高于秸秆离田(S<sub>1</sub>), 2020、  
2021 年及 2 年平均分别升高 9.52%、4.44% 和  
6.87%。2020 年和 2 年平均的氮素稻谷生产效  
率 S<sub>2</sub> 分别比 S<sub>1</sub> 高 8.06% 和 6.34%, 而 2021 年  
差异均未达到显著水平。相较常规施氮(N<sub>1</sub>), 藁  
肥增氮(N<sub>2</sub>)的干物质生产效率和稻谷生产效率  
分别显著和极显著下降。2020、2021 年及 2 年

平均的藁肥增氮(N<sub>2</sub>)干物质生产效率分别下降  
5.90%、6.70% 和 6.31%, 稻谷生产效率分别下  
降 5.88%、7.51% 和 6.66%。收获指数在水平  
间差异均不显著。

2 年平均结果表明, 秸秆还田与藁肥增氮二因  
素互作显著影响氮素干物质生产效率(表 2)。秸秆  
离田(S<sub>1</sub>)条件下, 藁肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮素干物质生  
产效率较常规施氮(N<sub>1</sub>)下降 4.50%; 秸秆还田(S<sub>2</sub>)条  
件下, 藁肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮素干物质生产效率下降  
7.98%(图 2)。

表 2 不同处理氮素干物质生产效率和稻谷生产效率的比较  
Table 2 Comparison of dry matter production efficiency and rice production efficiency in different treatments of nitrogen

| 处理<br>Treatment  | 干物质生产效率/(g/g) |             |             | 稻谷生产效率/(g/g) |            |            | 收获指数<br>Harvest index |            |
|------------------|---------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-----------------------|------------|
|                  | 2020 年        | 2021 年      | 平均 Average  | 2020 年       | 2021 年     | 平均 Average | 2020 年                | 2021 年     |
| S <sub>1</sub>   | 101.98±1.38   | 111.82±2.73 | 106.90±1.81 | 52.24±0.85   | 49.61±1.54 | 50.92±0.71 | 71.97±0.73            | 64.67±1.92 |
| S <sub>2</sub>   | 111.69±3.36   | 116.79±3.33 | 114.24±1.77 | 56.45±1.68   | 51.86±1.75 | 54.15±1.07 | 71.99±0.56            | 67.21±1.57 |
| N <sub>1</sub>   | 110.08±4.39   | 118.26±2.37 | 114.17±2.09 | 55.99±2.02   | 52.72±1.10 | 54.35±0.92 | 72.21±0.53            | 66.95±1.00 |
| N <sub>2</sub>   | 103.59±2.09   | 110.34±2.31 | 106.97±1.46 | 52.70±0.91   | 48.76±1.45 | 50.73±0.83 | 71.75±0.72            | 64.93±2.37 |
| F <sub>S</sub>   | 81.72**       | 6.71*       | 44.49**     | 41.13**      | 3.53       | 22.36**    | 0.00                  | 2.00       |
| F <sub>N</sub>   | 36.58**       | 17.01**     | 42.911**    | 25.12**      | 10.92*     | 28.14**    | 0.57                  | 1.25       |
| F <sub>S×N</sub> | 12.81**       | 0.14        | 4.31*       | 7.90*        | 0.01       | 2.07       | 3.02                  | 0.21       |

1.820

1.69

0.97

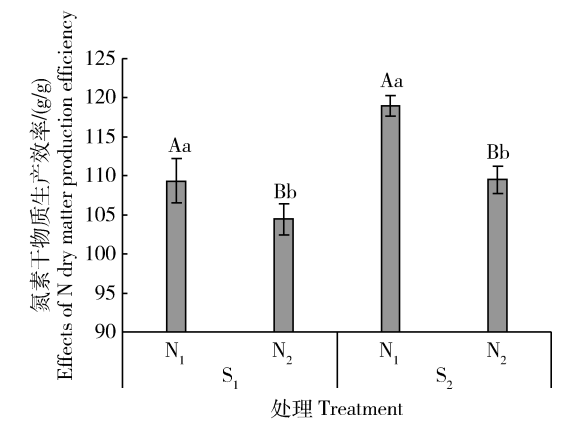


图2 秸秆还田和蘖肥增氮二因素交互下水稻的氮素干物质生产效率

Fig.2 Nitrogen dry matter production efficiency of rice under two-factor interaction between straw return and tiller fertilizer to increase nitrogen

2.3 秸秆还田和蘖肥增氮对氮素积累和转运的影响

由表3可知,2020和2021年秸秆还田(S<sub>2</sub>)的氮素积累量较秸秆离田(S<sub>1</sub>)分别降低12.24%和6.26%,2年平均秸秆还田(S<sub>2</sub>)的氮素积累量下降9.34%。2021年氮素表观转运量和表观转运贡献率在秸秆还田水平间差异分别达到显著或极显著水平,2020年和2年平均差异均不显著。2020年秸秆还田(S<sub>2</sub>)的穗部氮增加量下降10.26%,2021年差异不显著,2年平均下降6.48%。

2020和2021年蘖肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮素积累量分别较常规施氮(N<sub>1</sub>)增加7.56%和9.89%,2年平均蘖肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮素积累量增加8.80%。氮素表观转运量、表观转运贡献率和穗部增加量在蘖肥增氮水平间差异均不显著。

| 表3 不同处理氮素积累和转运的比较                                                         |                           |             |             |                                             |             |             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|---------------------------------------------|-------------|-------------|
| Table 3 Comparison of accumulation and transport under different nitrogen |                           |             |             |                                             |             |             |
| 处理<br>Treatment                                                           | 积累量/(g/盆)<br>Accumulation |             |             | 表观转运量/(g/盆)<br>Performance transport volume |             |             |
|                                                                           | 2020年                     | 2021年       | 平均 Average  | 2020年                                       | 2021年       | 平均 Average  |
|                                                                           |                           |             |             |                                             |             |             |
| S <sub>1</sub>                                                            | 0.629±0.010               | 0.591±0.018 | 0.610±0.009 | 0.210±0.025                                 | 0.171±0.011 | 0.191±0.011 |
| S <sub>2</sub>                                                            | 0.552±0.023               | 0.554±0.024 | 0.553±0.011 | 0.166±0.016                                 | 0.205±0.015 | 0.185±0.009 |
| N <sub>1</sub>                                                            | 0.569±0.034               | 0.546±0.018 | 0.557±0.013 | 0.172±0.013                                 | 0.185±0.010 | 0.179±0.006 |
| N <sub>2</sub>                                                            | 0.612±0.017               | 0.600±0.016 | 0.606±0.008 | 0.204±0.030                                 | 0.191±0.022 | 0.197±0.012 |
| F <sub>S</sub>                                                            | 109.601**                 | 9.023*      | 62.800**    | 5.273                                       | 6.094*      | 0.185       |
| F <sub>N</sub>                                                            | 34.595**                  | 19.165**    | 45.779**    | 2.855                                       | 0.150       | 2.558       |
| F <sub>S×N</sub>                                                          | 14.730**                  | 1.708       | 9.497**     | 0.959                                       | 0.759       | 0.083       |

| 处理<br>Treatment  | 表观转运贡献率/%<br>Performance transport contribution rate |            |            | 穗部增加量/(g/盆)<br>Spike increase |             |             |
|------------------|------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------------|-------------|-------------|
|                  | 2020年                                                | 2021年      | 平均 Average | 2020年                         | 2021年       | 平均 Average  |
|                  |                                                      |            |            |                               |             |             |
| S <sub>1</sub>   | 46.54±6.06                                           | 44.72±2.53 | 45.63±2.23 | 0.380±0.011                   | 0.268±0.014 | 0.324±0.018 |
| S <sub>2</sub>   | 41.79±3.78                                           | 55.03±3.02 | 48.41±2.58 | 0.341±0.016                   | 0.265±0.008 | 0.303±0.013 |
| N <sub>1</sub>   | 41.91±2.70                                           | 50.87±3.48 | 46.39±2.01 | 0.351±0.023                   | 0.264±0.007 | 0.307±0.015 |
| N <sub>2</sub>   | 46.43±6.64                                           | 48.88±4.89 | 47.65±2.81 | 0.371±0.008                   | 0.269±0.014 | 0.320±0.016 |
| F <sub>S</sub>   | 0.97                                                 | 11.66**    | 0.95       | 17.011**                      | 0.093       | 8.121*      |
| F <sub>N</sub>   | 0.88                                                 | 0.43       | 0.20       | 4.551                         | 0.204       | 2.893       |
| F <sub>S×N</sub> | 2.04                                                 | 0.06       | 1.17       | 8.709*                        | 1.391       | 7.74*       |

由图3可知,2年平均的秸秆还田与蘖肥增氮二因素互作对氮素积累量和穗部氮素增加量的影响分别达到显著和极显著水平(表3)。在秸秆离田(S<sub>1</sub>)和秸秆还田(S<sub>2</sub>)条件下,蘖肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮素

积累量分别高于常规施氮(N<sub>1</sub>)4.48%和13.69%。秸秆离田(S<sub>1</sub>)的穗部氮素增加量在不同施氮处理间差异不显著,秸秆还田(S<sub>2</sub>)的蘖肥增氮(N<sub>2</sub>)处理氮素穗部增加量较常规施氮(N<sub>1</sub>)升高11.69%。

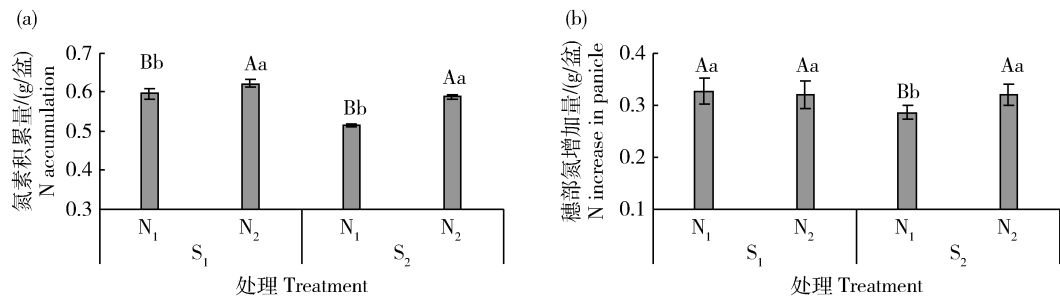


图 3 秸秆还田和蘖肥增氮二因素互作下水稻的氮素积累量(a)和穗部氮增加量(b)  
Fig. 3 Nitrogen accumulation (a) and spike nitrogen increase (b) of rice under the two-factor interaction between straw return and tiller fertilizer nitrogen increase

2.4 秸秆还田与蘖肥增氮对氮磷钾利用率的影响

由表 4 可知,秸秆还田(S<sub>2</sub>)的氮素农学利用率、吸收利用率及偏生产力分别较秸秆离田(S<sub>1</sub>)降低8.54%、15.77%和3.93%,生理利用率则升高9.52%。与常规施氮(N<sub>1</sub>)相比较,蘖肥增氮(N<sub>2</sub>)的氮肥吸收利用率升高10.63%,生理利用率和偏生产力分别显著或极显著降低10.63%和2.70%,农学利用率差异不显著。

表 4 不同处理氮肥利用率的比较  
Table 4 Comparison of utilization efficiency under different nitrogen fertilizer treatments

| 处理<br>Treatment  | 农学利用率/(kg/kg)<br>Agricultural utilization rate |            |            | 吸收利用率/%<br>Absorption utilization rate |            |            |
|------------------|------------------------------------------------|------------|------------|----------------------------------------|------------|------------|
|                  | 2020 年                                         | 2021 年     | 平均 Average | 2020 年                                 | 2021 年     | 平均 Average |
|                  |                                                |            |            |                                        |            |            |
| S <sub>1</sub>   | 19.38±0.42                                     | 16.67±0.83 | 18.03±0.51 | 47.46±1.15                             | 44.62±1.84 | 46.04±0.85 |
| S <sub>2</sub>   | 17.12±0.35                                     | 15.85±0.56 | 16.49±0.29 | 37.66±2.32                             | 39.90±2.51 | 38.78±1.20 |
| N <sub>1</sub>   | 18.32±1.02                                     | 16.32±0.89 | 17.32±0.55 | 40.77±4.36                             | 39.77±2.35 | 40.27±1.68 |
| N <sub>2</sub>   | 18.19±0.53                                     | 16.20±0.58 | 17.20±0.40 | 44.34±2.09                             | 44.75±1.92 | 44.55±0.96 |
| F <sub>S</sub>   | 55.84**                                        | 1.50       | 17.55**    | 111.50**                               | 9.38*      | 65.19**    |
| F <sub>N</sub>   | 0.18                                           | 0.03       | 0.11       | 14.76**                                | 10.49*     | 22.63**    |
| F <sub>S×N</sub> | 8.06*                                          | 2.98       | 7.52*      | 16.12**                                | 1.96       | 10.70**    |

| 处理<br>Treatment  | 生理利用率/(kg/kg)<br>Physiological use rate |            |            | 偏生产力/(kg/kg)<br>Partial factor productivity |            |            |
|------------------|-----------------------------------------|------------|------------|---------------------------------------------|------------|------------|
|                  | 2020 年                                  | 2021 年     | 平均 Average | 2020 年                                      | 2021 年     | 平均 Average |
|                  |                                         |            |            |                                             |            |            |
| S <sub>1</sub>   | 40.89±1.14                              | 37.48±2.11 | 39.19±0.96 | 41.40±0.68                                  | 36.93±0.99 | 39.17±0.79 |
| S <sub>2</sub>   | 45.82±2.34                              | 40.03±2.29 | 42.92±1.41 | 39.14±0.28                                  | 36.11±0.45 | 37.63±0.49 |
| N <sub>1</sub>   | 45.58±2.55                              | 41.14±1.58 | 43.36±1.21 | 40.82±1.02                                  | 37.03±0.89 | 38.92±0.73 |
| N <sub>2</sub>   | 41.13±1.06                              | 36.37±1.98 | 38.75±1.04 | 39.72±0.53                                  | 36.02±0.58 | 37.87±0.62 |
| F <sub>S</sub>   | 25.13**                                 | 2.03       | 13.43**    | 55.76**                                     | 1.50       | 17.55**    |
| F <sub>N</sub>   | 20.53**                                 | 7.15*      | 20.50**    | 13.19**                                     | 2.27       | 8.22*      |
| F <sub>S×N</sub> | 6.44*                                   | 0.03       | 1.16       | 8.06*                                       | 2.98       | 7.52*      |

由图4可知,秸秆还田与施氮量二因素交互显著或极显著影响氮素农学利用率、吸收利用率和偏生产力。秸秆离田( $S_1$ )条件下藁肥增氮( $N_2$ )处理的氮素农学利用率、氮素吸收利用率和偏生产力分

别较常规施氮( $N_1$ )降低6.08%、5.40%和5.13%。秸秆还田( $S_2$ )条件下藁肥增氮( $N_2$ )处理的氮素农学利用率较常规施氮( $N_1$ )增加5.53%,氮素吸收利用率、偏生产力差异不显著。

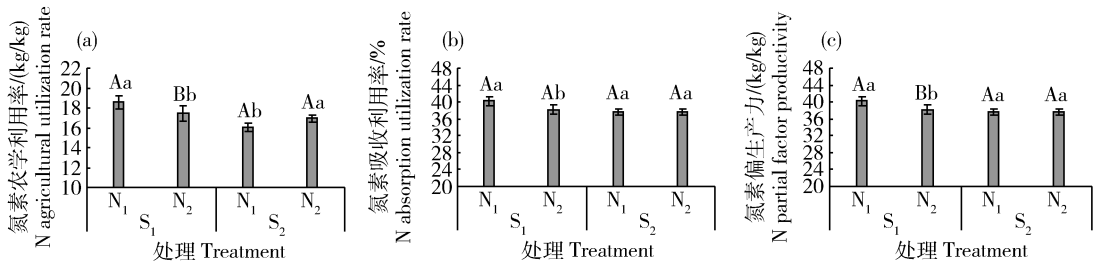


图4 秸秆还田与施氮量二因素交互下水稻的氮素农学利用率(a)、吸收利用率(b)和偏生产力(c)

Fig. 4 Nitrogen agronomic utilization (a), uptake utilization (b) and partial factor productivity (c) of rice under the two-factor interaction between straw return and nitrogen application

3 讨论

3.1 秸秆还田与藁肥增氮对水稻产量的影响

关于秸秆还田对水稻产量的影响已有大量研究,但研究结果不尽一致。吴立鹏等<sup>[20]</sup>研究认为秸秆还田配施氮肥可以增加黄河三角洲滨海盐碱地稻田土壤无机氮含量,进而实现增产。廖萍等<sup>[21]</sup>对江西省红壤稻田双季稻的研究结果显示,秸秆还田配施石灰条件下,早稻产量和氮素吸收分别增加10.7%和15.5%,晚稻分别增加18.7%和24.6%。李晓峰等<sup>[22]</sup>研究认为江苏省麦茬稻秸秆全量还田的氮肥分配比例以基藁氮肥与穗氮肥比例为7:3较为适宜。水稻秸秆还田主要通过增加单位面积有效穗数和每穗粒数实现增产<sup>[23]</sup>。也有研究认为秸秆还田使得水稻有效穗数、穗粒数和千粒重普遍下降,最终导致减产<sup>[24-25]</sup>。本研究结果表明,秸秆还田导致水稻减产3.90%,但秸秆还田与藁肥增氮二因素交互对水稻生物产量和籽粒产量增产效应均达极显著水平,秸秆还田配合藁肥增氮可实现增产4.38%,生物产量也表现出相似趋势。由此可见,前中期增氮,可缓解土壤微生物与水稻争氮的矛盾,是实现秸秆还田条件下水稻增产的必要措施。

3.2 秸秆还田与藁肥增氮对水稻氮素吸收利用的影响

氮素是作物干物质积累与光合作用的基础,作物在生长过程中对养分需求逐渐增加,但由于化肥施用后养分释放较快,能够满足作物生长前期对养分的需求,作物生长后期供氮能力下降,不能满足作

物生育后期对养分的需求<sup>[26]</sup>。国内外学者就秸秆还田能否代替一定的氮肥用量与提高氮肥利用率做了大量研究。赵颖等<sup>[27]</sup>研究表明,水稻秸秆还田配施肥料后氮肥表观利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力相较于单施肥分别提高6.00%、6.86 kg/kg、6.87 kg/kg。游来勇等<sup>[28]</sup>认为在稻麦轮作系统中,秸秆还田的水稻和小麦氮肥表观利用率和农学利用率均显著高于秸秆离田处理。秸秆还田主要通过提高氮肥利用率来改善农田生产环境,获得较高农业生产能力,有效的秸秆还田能为土壤中的微生物提供丰富的碳源,刺激微生物代谢,提高土壤肥力;同时矿化的秸秆组分能促进土壤氮循环和矿化,提高氮素有效性<sup>[29]</sup>。张媛媛等<sup>[30]</sup>研究结果显示秸秆还田配施氮肥增加了土壤含氮量,提高了土壤矿质氮的生物有效性,从而增加水稻对氮素的吸收,提高氮肥利用率。秸秆还田可丰富土壤生物多样性,提高了土壤微生物丰度,也出现了土壤微生物与水稻生育前期“争氮”现象<sup>[31]</sup>。因此,在水稻养分管理中,秸秆还田条件下配施适量的氮肥,可保证农田氮素平衡。本研究结果表明,秸秆还田条件下,氮素积累量、农学利用率、吸收利用率及偏生产力分别下降9.34%、8.54%、15.77%和3.93%,而秸秆还田配合藁肥增氮15%,氮素积累量和农学利用率分别提高13.69%和5.53%,氮素吸收利用率和偏生产力无显著变化。究其原因是秸秆还田下藁肥增氮提高了水稻总吸氮量,其中籽粒吸氮量增加幅度高于茎秆吸氮量,促使氮素由茎秆向籽粒迁移,从而提高了氮肥利用率;秸秆还田对土壤氮素矿化具有激发效

应,与常规施氮相比,秸秆还田下藁肥增氮增加了氮肥在土壤中的残留量,提高了土壤供氮潜力和供氮能力,有利于水稻对氮素的吸收。因此,秸秆还田条件下适当提高藁肥,能降低水稻生育前期因微生物分解秸秆争氮产生的胁迫,利于协调全生育期氮素吸收利用,提高水稻成熟期氮素积累量和氮素农学利用率。本研究仅是针对盆栽条件(白浆土)秸秆还田量 7 500 kg/hm<sup>2</sup> 下的研究结果,而在大田不同类型土壤或不同秸秆还田量下,藁肥增氮的适宜比例则需要进一步研究。

4 结 论

在盆栽秸秆全量还田(S<sub>2</sub>)条件下,由于水稻氮素积累量的下降幅度大于产量和生物产量,使得氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率不降反升,与秸秆离田(S<sub>1</sub>)相比,水稻植株的氮素农学利用率、吸收利用率及偏生产力显著下降,氮素生理利用率则显著提高。秸秆全量还田的同时增加分藁肥施氮量 15%(N<sub>2</sub>),可显著提高寒地水稻生物产量和籽粒产量,增加单株氮素积累量和穗部氮素含量,进而提高氮素农学利用效率,可实现培肥地力、氮素高效利用和水稻丰产。

参考文献 References

[1] 武际,郭照盛,鲁剑巍,王允青,许征宇,张晓玲. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 587-594  
Wu J, Guo X S, Lu J W, Wang Y Q, Xu Z Y, Zhang X L. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 587-594 (in Chinese)

[2] 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 crop residue decomposition and nutrient release under lab incubation and field conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(10): 1746-1760 (in Chinese)

[3] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,梁国庆,周卫. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21  
Song D L, Hou S P, Wang X B, Liang G Q, Zhou W. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21 (in Chinese)

[4] 葛选良,钱春荣,李梁,姜宇博,宫秀杰,吕国依. 秸秆还田配合施肥措施对玉米产量及耕层土壤质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 131-136

Ge X L, Qian C R, Li L, Jiang Y B, Gong X J, Lv G Y. Effects of straw returning cooperated with fertilizer practice on yield of maize and soil quality of tillage layer[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021(1): 131-136 (in Chinese)

[5] 闫雷,李思莹,孟庆峰,周丽婷,董天浩,戴建军,张宇飞,喇乐鹏. 秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(12): 58-67  
Yan L, Li S Y, Meng Q F, Zhou L T, Dong T H, Dai J J, Zhang Y F, La Y P. Effect of straw returning and organic manure on soil aggregate in black soil area[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(12): 58-67 (in Chinese)

[6] 周运来. 秸秆还田方式对土壤有机碳固定及作物产量的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017  
Zhou Y L. Effects of straw returning methods on soil organic carbon fixation and crop yield[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017 (in Chinese)

[7] 杨峻皓,骆永丽,陈金,金敏,王振林,李勇. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4415-4429  
Yang J H, Luo Y L, Chen J, Jin M, Wang Z L, Li Y. Effects of main food yield under straw return in China: A meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4415-4429 (in Chinese)

[8] 章力干,石心怡,王玉宝,杨欣润,余舫,江彤,常婷婷,马超. 秸秆还田对中国主要粮食作物病害影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 93-100  
Zhang L G, Shi X Y, Wang Y B, Yang X R, Yu F, Jiang T, Chang T T, Ma C. Meta-analysis for the impacts of straw return on the diseases of major grain crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 93-100 (in Chinese)

[9] Ku H H, Ryu J H, Bae H S, Jeong C, Lee S E. Modeling a long-term effect of rice straw incorporation on SOC content and grain yield in rice field[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(14): 1941-1954

[10] 李新悦,李冰,莫太相,王昌全,万艺媛,陈写畅,李和明. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3257-3266  
Li X Y, Li B, Mo T X, Wang C Q, Wan Y Y, Chen X C, Li H M. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus, and potassium in paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3257-3266 (in Chinese)

[11] 张亚丽,张娟,沈其荣,王金川. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1575-1578  
Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, Wang J C. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1575-1578 (in Chinese)

[12] Glass A D M. Nitrogen use efficiency of crop plants: Physiological constraints upon nitrogen absorption [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(5): 453-470

[13] 何虎,吴建富,曾研华,胡凯,黄山,曾勇军,潘晓华,石庆华. 稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 811-820  
He H, Wu J F, Zeng Y H, Hu K, Huang S, Zeng Y J, Pan X H, Shi Q

H. Effects of nitrogen management on yield and nitrogen utilization of double cropping late rice under total rice straw incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 811-820 (in Chinese)

[14] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 黄厚宽, 蒋荫娟. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 254-262

Li L J, Wang J J, Wu P P, Huang H K, Jiang Y X. Effect of different nitrogen application on rice yield and N uptake of white soil under wheat straw turnover[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 254-262 (in Chinese)

[15] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 邓九胜, 朱荣松, 朱彩云, 蒋新华, 白洁瑞. 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

Li Y, Cao H D, Chu Y Y, Deng J S, Zhu R S, Zhu C Y, Jiang X H, Bai J R. 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)

[16] 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, Lv T F. 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)

[17] Witt C, Cassman K G, Olk D C, Biker U, Liboon S P, Samson M I, Ottow J G. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems [J]. *Plant and Soil*, 2000, 225 (1-2): 263-278

[18] 徐国伟. 秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2007

Xu G W. Effects of planting methods, straw returning and field nitrogen management on rice yield and quality and their physiology [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007 (in Chinese)

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000

Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)

[20] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 魏立兴, 孙泽强, 刘盛林, 丁效东. 秸秆还田与优化施肥对稻田土壤碳氮含量及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(4): 158-166

Wu L P, Zhang S R, Lou J H, Wei L X, Sun Z Q, Liu S L, Ding X D. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer on soil C and N content and yield of rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(4): 158-166 (in Chinese)

[21] 廖萍, 刘磊, 何宇轩, 唐刚, 张俊, 曾勇军, 吴自明, 黄山. 施石灰和秸秆还田对双季稻产量和氮素吸收的互作效应[J]. *作物学报*, 2020, 46(1): 84-92

Liao P, Liu L, He Y X, Tang G, Zhang J, Zeng Y J, Wu Z M, Huang S. Interactive effects of Liming and straw incorporation on yield and nitrogen uptake in a double rice cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1): 84-92 (in Chinese)

[22] 李晓峰, 程金秋, 梁健, 陈梦云, 任红茹, 张洪程, 霍中洋, 戴其根, 许柯, 魏海燕, 郭保卫. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插粳稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6): 912-924

Li X F, Cheng J Q, Liang J, Chen M Y, Ren H R, Zhang H C, Huo Z Y, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Effects of total straw returning and nitrogen application on grain yield and nitrogen absorption and utilization of machine transplanted *Japonica* rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 912-924 (in Chinese)

[23] 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 returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(3): 282-290 (in Chinese)

[24] 张洪熙, 赵步洪, 杜永林, 谭长乐, 戴正元, 季红娟, 王宝和, 周长海. 小麦秸秆还田条件下轻简栽培水稻的生长特性[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(6): 603-609

Zhang H X, Zhao B H, Du Y L, Tan C L, Dai Z Y, Ji H J, Wang B H, Zhou C H. Growth characteristics of rice under simplified cultivation with wheat residue return[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(6): 603-609 (in Chinese)

[25] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 81-85

Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 81-85 (in Chinese)

[26] 刘楚桐, 陈松岭, 金鑫鑫, 徐志强, 叶旭红, 邹洪涛, 张玉龙. 控释氮肥减量配施对土壤氮素调控及夏玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 108-115

Liu C T, Chen S L, Jin X X, Xu Z Q, Ye X H, Zou H T, Zhang Y L. Effect of reducing and postponing controlled-release nitrogen application on soil nitrogen regulation and summer maize yield [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021(2): 108-115 (in Chinese)

[27] 赵颖, 周枫, 罗佳琳, 赵亚慧, 王宁, 于建光, 薛利红, 杨林章. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 937-944

Zhao Y, Zhou F, Luo J L, Zhao Y H, Wang N, Yu J G, Xue L H, Yang L Z. Effects of rice straw returning combined with fertilizer application on yield and nitrogen utilization of wheat[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 937-944 (in Chinese)

[28] 游来勇, 李冰, 王昌全, 杨娟, 白根川, 黄春. 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, Yang J, Bai G C, Huang C. 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 (in Chinese)

[29] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 郭瑞英. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526-535

Pan J L, Dai W A, Shang Z H, Guo R Y. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526-535 (in Chinese)

[30] 张媛媛, 李建林, 王春宏, 姜佰文. 氮素和生物腐解剂调控下稻草还田对水稻氮素积累及产量的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 435-438

Zhang Y Y, Li J L, Wang C H, Jiang B W. Effects of rice-straw return to field on nitrogen accumulation and yield of rice under the nitrogen manipulation and biological decomposing[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 435-438 (in Chinese)

[31] 李丽娜, 闫淋淋, 曹凑贵, 江洋, 汪金平. 稻虾共作系统中水稻生长及养分吸收对秸秆还田与投食的响应[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 8-16

Li L N, Yan L L, Cao C G, Jiang Y, Wang J P. Effects of straw returning and crayfish feeding on rice growth and nutrient uptake in rice-crayfish ecosystem[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 8-16 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅



**第一作者简介：**刘梦红，硕士，黑龙江八一农垦大学农学院助理研究员，主要从事植物营养方面研究。主持国家重点研发计划(2018YFD0300104-1)，参与国家重点研发计划、黑龙江省自然科学基金、黑龙江农垦总局重点专项等科研项目 5 项。先后获黑龙江省科技进步二等奖 2 项(第 5 名)和大庆市科技成果一等奖 1 项(第 3 名)，在《作物杂志》《河南农业科学》《安徽农业科学》发表第一作者论文 3 篇，合著著作 2 部，获第二发明人专利 3 项，参与制定地方标准 2 项。



**通讯作者简介：**李红宇，博士，黑龙江八一农垦大学教授，博士生导师，建三江水稻产业创新研究院院长，黑龙江水稻产业体系岗位专家，黑龙江省作物学会理事，主要从事寒地水稻高产生理生态及遗传多样性方面研究。主持中央支持地方高校改革发展资金人才培养项目(2022010006)，国家重点研发计划子课题(2017YFD0100506)，黑龙江省自然科学基金(C2015038)等项目。先后获得 2021 年黑龙江省科技进步二等奖、2020 年黑龙江农垦总局科技一等奖、2015 年大庆市科学技术一等奖。以第一作者及通讯作者在《作物学报》《中国水稻科学》《农业工程学报》等刊物发表研究论文 35 篇，出版专著 5 部，获发明专利 1 件，育成水稻新品种 3 个，制定地方标准 1 件。