

张斯梅, 顾克军, 张传辉, 等. 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻产量形成和氮素吸收利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 360-367.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.02.008

麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻产量形成和氮素吸收利用的影响

张斯梅^{1,2,3}, 顾克军², 张传辉², 顾东祥², 段增强¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏 南京 210014; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了探明麦秸全量还田下合理的氮肥施用方案, 以南粳 9108 为材料, 设置了不施氮对照(CK)、施氮量[常量施氮(300 kg/hm²), A₁, 减量 20% 施氮(240 kg/hm²), A₂]和氮肥运筹(基蘖氮肥: 穗氮肥 = 6: 4, B₁, 基蘖氮肥: 穗氮肥 = 7: 3, B₂)处理, 分析了麦秸全量还田下减氮施肥及不同氮肥运筹对粳稻产量形成和氮素吸收利用的影响。结果表明, A₁ 水平下粳稻分蘖中期、拔节期地上部干物质积累量均值高于 A₂ 水平; 提高基蘖氮肥比例有利于粳稻地上部干物质的累积。A₂ 水平下粳稻平均产量较 A₁ 水平仅降低 110.08 kg/hm², 差异不显著; A₁ 和 A₂ 水平下 B₂ 处理粳稻产量均高于 B₁ 处理, 但差异不显著。A₁ 水平下分蘖中期、拔节期以及分蘖中期至拔节期生育阶段氮素积累量均值高于 A₂ 水平, 提高基蘖氮肥比例使粳稻分蘖中期、拔节期氮素积累量增加。与 A₁ 水平相比, A₂ 水平粳稻氮肥偏生产力、氮肥农学利用率均显著提高, 氮肥生理利用率、氮肥表观利用率有所提高但不显著。综合来看, 麦秸全量还田条件下, 在常规施氮量的基础上减量 20%, 氮肥适当前移, 可实现粳稻产量水平保持稳定的同时, 提高氮肥农学利用率和偏生产力。

关键词: 秸秆还田; 减氮施肥; 产量; 氮肥利用效率

中图分类号: S511.2⁺20.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2023)02-0360-08

Effects of reduced nitrogen fertilization on yield formation and nitrogen uptake and utilization of *japonica* rice under total wheat straw returning

ZHANG Si-mei^{1,2,3}, GU Ke-jun², ZHANG Chuan-hui², GU Dong-xiang², DUAN Zeng-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To explore the reasonable nitrogen fertilizer application scheme under total wheat straw returning, no nitrogen application was set as control (CK), an interaction experiment with two nitrogen application rates, 300 kg/hm² (A₁) and 240 kg/hm² (A₂), and two nitrogen application regimes, the proportion of base-tillering nitrogen fertilizer to panicle nitrogen fertilizer 6: 4 (B₁) and 7: 3 (B₂), was conducted with Nanjing 9108 as the experimental material, and the effects of reduced

nitrogen fertilization and different nitrogen fertilizer management on yield formation and nitrogen uptake and utilization of *japonica* rice were analyzed. The results showed that mean dry matter accumulation in the shoots at the middle tillering and jointing stages under A₁ level was higher than that under A₂ level. Increasing the proportion of base-tillering nitrogen fertilizer was beneficial to the

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2019377); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(18)1002]

作者简介: 张斯梅(1981-), 女, 江苏赣榆人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事作物栽培生理生态及秸秆资源化利用研究。
(E-mail) zhangsimei929@sina.com

通讯作者: 段增强, (E-mail) zqduan@issas.ac.cn

aboveground dry matter accumulation of *japonica* rice. The average yield of *japonica* rice under A_2 level was only 110.08 kg/hm² lower than that under A_1 level, and the difference was not significant. The yield in B_2 treatment was higher than that in B_1 treatment under A_1 and A_2 levels. The mean value of nitrogen accumulation under A_1 level was higher than that under A_2 level in the middle tillering stage, jointing stage and the growth stage from the middle tillering stage to the jointing stage. Increasing the proportion of base-tillering nitrogen fertilizer increased the nitrogen accumulation of rice in the middle tillering stage and jointing stage. Compared with A_1 level, the partial factor productivity of nitrogen fertilizer and the agronomic utilization rate of nitrogen fertilizer of *japonica* rice at A_2 level were significantly increased, and the physiological utilization rate of nitrogen fertilizer and the apparent utilization rate of nitrogen fertilizer were increased but not significantly. In general, under the condition of total wheat straw returning to field, reducing 20% of nitrogen application rate on the basis of conventional nitrogen application rate and appropriately advancing nitrogen fertilizer could achieve stable yield of *japonica* rice and improve agronomic utilization rate and partial productivity of nitrogen fertilizer.

Key words: straw returning; nitrogen reduction; yield; nitrogen use efficiency

中国农作物秸秆资源量位居世界第一,2019年全国农作物秸秆总产生量已逾 9×10^8 t^[1-2]。农作物秸秆中含有作物生长所需的大量和中微量营养元素,是一种重要的可再生资源^[3-5]。秸秆全量还田不仅能够培肥地力,而且可减少化肥施用量,降低化肥过量投入对环境的不利影响^[6]。中国的氮肥生产量和消费量在全球位列第一^[7-9],水稻单位面积氮肥平均用量较世界平均用量高出75%左右^[10],而氮肥利用率仅为30%~35%,远远低于世界平均水平^[11]。氮肥过量投入直接造成水稻生产经济效益降低,同时还因氮肥淋失导致农业面源污染、水体富营养化等不良后果。因此,将秸秆还田与氮肥施用综合起来考虑,在氮肥适当减量的同时,调整基肥与穗肥的比例,对于实现水稻高产稳产和氮肥利用效率提高至关重要。

前人关于秸秆还田、施氮量、氮肥运筹对水稻产量^[12-16]和氮素吸收利用^[17-19]的影响做了许多研究。裴鹏刚等^[20]研究认为,水稻秸秆还田耦合施氮有利于增加粳型杂交水稻穗数,进而提高其产量。朱从海等^[21]研究了麦秸全量还田下不同施氮量的产量效应,结果表明水稻产量随施氮量的增加呈先升后降的趋势。胡雅杰等^[22]麦秸全量还田的研究结果表明,在常规施氮量基础上增加施氮量,水稻增产不显著且氮肥利用效率降低,改进氮肥运筹可增加水稻穗数、产量和氮肥利用效率。王建明等^[23]发现,半量和全量麦秸还田后水稻有效穗数均下降,氮肥适当前移可缓解秸秆还田的这种不利作用。迄今为止,针对稻麦轮作体系麦秸全量还田条件下,减氮施肥与氮肥运筹对水稻产量形成与氮素吸收利用的影响研究较少。因此,本试验以南粳9108为材料,研究了麦秸全量还田下减量施氮与氮肥运筹对水稻干

物质积累、产量与其构成因素、氮素吸收利用的影响,以期对稻麦轮作体系秸秆还田利用与高效养分管理模式构建提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 供试材料与试验地点

南粳9108是江苏省农业科学院培育的优良食味粳稻品种^[24]。本研究选用南粳9108作为试验材料,2019年在江苏省农业科学院试验基地(32°02'N,118°52'E)进行栽培试验。5月11日播种,湿润育秧,6月4日移栽。前茬作物为小麦,小麦籽粒收获后秸秆全量旋耕还田,还田量约为6 000 kg/hm²。试验地0~20cm土层土壤有机质含量为19.23 g/kg,碱解氮含量为80.65 mg/kg,有效磷含量为20.14 mg/kg,速效钾含量为87.51 mg/kg。

1.2 试验设计

试验以不施氮肥为对照(CK),设置了施氮量(常量施氮,300 kg/hm², A_1 ;减量20%施氮,240 kg/hm², A_2)和氮肥运筹(基肥:穗肥=6:4, B_1 ;基肥:穗肥=7:3, B_2)的互作试验,共CK、 A_1B_1 、 A_1B_2 、 A_2B_1 和 A_2B_2 5个处理。随机区组设计,重复3次。小区面积20 m²,小区间筑埂并在埂上覆膜隔肥,每个小区单独排灌。试验用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%)。基肥于移栽前施用,分蘖肥于栽插后7 d施用,穗肥分别于倒4叶和倒2叶抽出时等量施用,基肥氮用量与分蘖肥氮用量相同。磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量分别为90 kg/hm²和120 kg/hm²,磷肥全部作为基肥一次性施入,钾肥按基肥与穗肥5:5施用。秧苗移栽时寸水活棵,

分蘖期浅水灌溉,收获前 7 d 左右断水。其他管理措施均按当地生产进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部干物质积累量测定 分别在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期,根据各小区茎蘖数平均值取代表性植株 3 穴带回室内,去除根部,冲洗干净后,分叶片、茎鞘和穗部,先 105 ℃ 杀青,再 75 ℃ 烘干至恒质量。测定各器官干物质质量,算得地上部干物质积累量。

1.3.2 产量及其构成因素测定 在水稻成熟期,采用五点法调查有效穗数,并按成穗数均值取 5 穴,考察结实率、每穗粒数,称量千粒质量,各小区实收计产。

1.3.3 植株氮含量测定 将分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期水稻植株各部分干样粉碎,以凯氏定氮法测定植株各器官含氮量。

1.4 数据计算与分析

按以下公式^[25-27]进行数据的计算:

氮素积累量 (kg/hm^2) = 某生育期地上部干物质质量 \times 氮含量

阶段氮素积累量 (kg/hm^2) = 后一生育期氮素积累量 - 前一生育期氮素积累量

阶段氮素积累比例 = 阶段氮素积累量 / 全生育期氮素积累量 $\times 100\%$

氮素转运量 (kg/hm^2) = 抽穗期叶片和茎鞘氮素积累量 - 成熟期叶片和茎鞘氮素积累量

氮素转运率 = 氮素转运量 / 抽穗期叶片和茎鞘氮素积累量 $\times 100\%$

氮素转运对籽粒氮的贡献率 = 氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量 $\times 100\%$

氮肥生理利用率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / (施氮区植株氮素积累量 - 不施氮区植株氮素积累量)

氮肥农学利用率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量

氮肥表观利用率 = (施氮区植株氮素积累量 - 不施氮区植株氮素积累量) / 施氮量 $\times 100\%$

百千克籽粒吸氮量 (kg) = 植株氮素积累量 / 籽粒产量 $\times 100$

数据的整理采用 Microsoft Excel 2016 进行,统计分析运用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行,使用 LSD

法进行多重比较(显著性水平为 $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻产量及其构成因素的影响

不同处理粳稻产量及其构成因素方差分析结果(表 1、表 2)表明,麦秸全量还田下,有效穗数在施氮量间差异极显著,每穗粒数和千粒质量在施氮量间差异显著,产量及其构成因素在氮肥运筹间、施氮量和氮肥运筹互作间差异不显著。不同施氮量间进行比较, A_2 水平平均产量较 A_1 水平仅降低 110.08 kg/hm^2 , 差异不显著。 A_1 和 A_2 水平下, B_2 处理粳稻产量均高于 B_1 处理,差异未达显著水平。可见氮肥减量 20% 粳稻产量仍保持在较高水平,且提高基肥氮占施氮量的比例有利于获得较高的籽粒产量。进一步分析不同处理的产量构成因素, A_1 水平单位面积有效穗数均值显著高于 A_2 水平,但每穗粒数和千粒质量低于后者,两者的结实率相当; A_1 和 A_2 水平下, B_2 处理有效穗数、每穗粒数均高于 B_1 处理,差异不显著。而 B_1 处理和 B_2 处理间的结实率和千粒质量相当。可见,麦秸全量还田条件下,适当提高基肥氮比例,可有效缓解秸秆全量还田对水稻前期生长的抑制效应,有利于穗数形成和穗粒数提高,保持水稻产量稳定。

2.2 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻地上部干物质积累的影响

由表 3 可以看出,麦秸全量还田条件下,施氮对粳稻地上部干物质积累影响较大。氮肥施用处理在粳稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期的地上部干物质积累量较 CK 显著增加, A_1 处理各关键生育期地上部干物质积累量均值高于 A_2 处理。分蘖中期和拔节期, A_1 和 A_2 水平下 B_2 处理粳稻地上部干物质积累量均高于 B_1 处理,其中 $A_1 B_2$ 处理粳稻地上部干物质积累量显著高于 $A_1 B_1$ 处理,分别提高了 10.58% 和 7.55%,而 $A_2 B_2$ 处理粳稻地上部干物质积累量较 $A_2 B_1$ 处理有所增加但差异不显著。抽穗期和成熟期, A_1 和 A_2 水平下 B_2 处理的粳稻地上部干物质积累量均高于 B_1 处理,但差异均未达显著水平。说明麦秸全量还田条件下,在常规施氮量基础上减量 20%,粳稻生长后期地上部干物质积累量保持稳定,氮肥适当前移有利于地上部干物质积累。

表 1 不同处理南粳 9108 产量及其构成因素

Table 1 Yield and its components of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²) | 每穗粒数 (粒) | 结实率 (%) | 千粒质量 (g) | 产量 (kg/hm ²) |
|-------------------------------|---|-------------|------------|-------------|-----------------------------|
| CK | 226.93c | 117.99b | 94.22a | 26.07a | 6 071.94b |
| A ₁ B ₁ | 324.07ab | 131.11ab | 91.80a | 24.81b | 9 500.05a |
| A ₁ B ₂ | 331.21a | 133.80ab | 92.51a | 25.04b | 9 890.18a |
| A ₂ B ₁ | 307.96b | 140.47a | 91.36a | 25.28b | 9 418.57a |
| A ₂ B ₂ | 316.09ab | 143.52a | 92.26a | 25.42ab | 9 751.50a |

CK:不施氮对照; A₁:常量施氮(300 kg/hm²); A₂:减量 20%施氮(240 kg/hm²); B₁:基蘖氮肥:穗氮肥=6:4; B₂:基蘖氮肥:穗氮肥=7:3; 同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

表 2 产量和产量构成因素的方差分析

Table 2 Variance analysis of yield and its components

| 变量 | F 值 | | | | |
|----------|----------|--------|------|--------|------|
| | 有效穗数 | 每穗粒数 | 结实率 | 千粒质量 | 产量 |
| 施氮量 | 20.84 ** | 6.91 * | 0.04 | 8.35 * | 0.36 |
| 氮肥运筹 | 4.98 | 0.63 | 0.24 | 1.59 | 3.89 |
| 施氮量×氮肥运筹 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.09 | 0.02 |

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

表 3 不同处理南粳 9108 地上部干物质积累量

Table 3 Aboveground dry matter accumulation of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 地上部干物质积累量(kg/hm ²) | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------|------------|------------|
| | 分蘖中期 | 拔节期 | 抽穗期 | 成熟期 |
| CK | 1 027.27c | 2 510.60c | 6 625.27b | 11 178.10b |
| A ₁ B ₁ | 1 607.82b | 3 516.06b | 10 983.34a | 18 956.21a |
| A ₁ B ₂ | 1 777.89a | 3 781.36a | 11 513.72a | 19 528.15a |
| A ₂ B ₁ | 1 525.19b | 3 293.45b | 11 103.94a | 18 810.67a |
| A ₂ B ₂ | 1 674.81ab | 3 433.97b | 11 386.23a | 19 328.17a |

同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK、A₁、A₂、B₁、B₂见表 1 注。

2.3 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻氮素吸收积累的影响

2.3.1 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻氮素积累量的影响 从表 4 可以看出,麦秸全量还田下施氮处理粳稻各关键生育期氮素积累量显著高于 CK,不同施氮处理间氮素积累量亦存在差异。在常规施氮量基础上减量 20%,粳稻各关键生育期氮素积累量均值都有所下降,其中分蘖中期和拔节期下降幅度较大,分别降低了 8.19%和 9.11%。A₁和 A₂水平下,与 B₁处理相比,B₂处理粳稻各关键生育期氮素积累量均有所增加,其中分蘖中期和拔节期差异显著;分蘖中期 B₂处理粳稻氮素积累量较 B₁处理分别提高了 10.69%和 12.74%,拔节期则分别提高了

11.45%和 13.46%。

2.3.2 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻氮素阶段吸收积累的影响 从表 5 可以看出,与 CK 相比,施氮处理粳稻各生育阶段氮素积累量显著提高。在常规施氮量基础上减量 20%,粳稻分蘖中期至拔节期、拔节期至抽穗期和抽穗期至成熟期阶段氮素积累量均值下降,其中分蘖中期至拔节期氮素积累量显著降低。分蘖中期至拔节期阶段,A₁和 A₂水平下 B₂处理的氮素积累量均高于 B₁处理,分别高出 12.25%和 14.28%,差异达显著水平。拔节期至抽穗期和抽穗期至成熟期,A₁和 A₂水平下,B₁处理的氮素积累量与 B₂处理差异不显著。

表 4 不同处理南粳 9108 氮素积累量

Table 4 Nitrogen accumulation of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 氮素积累量 (kg/hm ²) | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--------|---------|---------|
| | 分蘖中期 | 拔节期 | 抽穗期 | 成熟期 |
| CK | 18.13c | 35.22c | 72.24b | 100.12b |
| A ₁ B ₁ | 36.01b | 69.97b | 150.76a | 207.96a |
| A ₁ B ₂ | 39.86a | 77.98a | 155.20a | 212.50a |
| A ₂ B ₁ | 32.74b | 63.00b | 143.85a | 200.27a |
| A ₂ B ₂ | 36.91a | 71.48a | 147.70a | 204.01a |

同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK、A₁、A₂、B₁、B₂见表 1 注。

表 5 不同处理南粳 9108 氮素阶段积累量

Table 5 Periodical nitrogen accumulation of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 分蘖中期-拔节期 | | 拔节期-抽穗期 | | 抽穗期-成熟期 | |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| | 氮素积累量 (kg/hm ²) | 占总吸氮量比例 (%) | 氮素积累量 (kg/hm ²) | 占总吸氮量比例 (%) | 氮素积累量 (kg/hm ²) | 占总吸氮量比例 (%) |
| CK | 17.09c | 17.10 | 37.02b | 37.09 | 27.88b | 27.73 |
| A ₁ B ₁ | 33.97b | 16.34 | 80.79a | 38.86 | 57.20a | 27.48 |
| A ₁ B ₂ | 38.13a | 17.96 | 77.22a | 36.36 | 57.30a | 26.90 |
| A ₂ B ₁ | 30.25b | 15.12 | 80.86a | 40.45 | 56.42a | 28.06 |
| A ₂ B ₂ | 34.57a | 16.99 | 76.22a | 37.41 | 56.30a | 27.49 |

同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK、A₁、A₂、B₁、B₂见表 1 注。

2.4 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻抽穗期至成熟期氮素转运的影响

表 6 显示,施氮各处理粳稻抽穗期至成熟期的氮素转运量、氮素转运率和对籽粒的贡献率均高于不施氮肥对照,其中氮素转运量和对籽粒的贡献率差异达显著水平。与 A₁处理相比,A₂处理氮素转运量均值降低了 6.88 kg/hm²,而氮素转运率和对籽粒氮的贡献率有所提高但差异未达显著水平。A₁和 A₂水平下,B₂处理的氮素转运量、氮素转运率和对籽粒氮的贡献率较 B₁处理均有所增加。

2.5 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻氮肥利用率的影响

由表 7 可知,在常规施氮量基础上减量 20%,氮肥利用效率有所提高。A₂处理的氮肥生理利用率、农学利用率、偏生产力和表观利用率均高于 A₁处理,其中氮肥农学利用率和偏生产力差异达显著水平;A₂水平下的百千克籽粒吸氮量低于 A₁水平,B₁和 B₂处理下分别降低了 0.17 kg 和 0.16 kg。A₁和 A₂水平下,B₂处理的氮肥生理利用率、农学利用率和偏生产力较 B₁处理均有所增加,而百千克籽粒吸氮量有所降低。

表 6 不同处理南粳 9108 氮素转运

Table 6 Nitrogen translocation of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 氮素转运量 (kg/hm ²) | 氮素转运率 (%) | 对籽粒氮的贡献率 (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------|
| CK | 23.70b | 31.02a | 37.12b |
| A ₁ B ₁ | 51.51a | 36.72a | 49.52a |
| A ₁ B ₂ | 52.91a | 36.95a | 49.74a |
| A ₂ B ₁ | 44.75a | 40.64a | 54.03a |
| A ₂ B ₂ | 45.90a | 41.01a | 54.39a |

同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。CK、A₁、A₂、B₁、B₂见表 1 注。

3 讨论

3.1 麦秸全量还田下减氮施肥对水稻产量及其构成因素的影响

前人关于秸秆还田对水稻产量及其构成因素影响的研究报道不少,大多认为秸秆还田可致水稻增产^[28-30]。虽然秸秆还田后会抑制水稻前期生长,使单位面积有效穗数有所减少,但后期秸秆释放养分而表现出对水稻生长发育明显的促进效应,总体上有利于水稻产量形成^[31]。氮肥施用可增加水稻有

表 7 不同处理南粳 9108 氮肥利用效率

Table 7 Nitrogen use efficiency of Nanjing 9108 under different treatments

| 处理 | 氮肥生理利用率 (kg/kg) | 氮肥农学利用率 (kg/kg) | 氮肥偏生产力 (kg/kg) | 氮肥表观利用率 (%) | 百千克籽粒吸氮量 (kg) |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------|------------------|
| A ₁ B ₁ | 31.77a | 11.43b | 31.67b | 35.95a | 2.19a |
| A ₁ B ₂ | 34.15a | 12.73b | 32.97b | 36.53a | 2.15a |
| A ₂ B ₁ | 37.30a | 13.94ab | 39.24a | 37.63a | 2.02a |
| A ₂ B ₂ | 39.46a | 15.33a | 40.63a | 37.46a | 1.99a |

同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。A₁、A₂、B₁、B₂见表 1 注。

效穗数,但施氮量过多,易导致群体过大,每穗粒数减少和结实率降低,不仅不能显著提高水稻产量,甚至可能导致减产^[22,32]。水稻生产中,为了追求高产,农民常盲目增加氮肥投入量,导致施氮量过大。本试验结果显示,麦秸全量还田条件下,在常规施氮量基础上减量 20%,粳稻产量仅降低了 1.14%,与常量施氮处理间差异不显著。减量 20%施氮处理粳稻产量没有显著降低的原因在于单位面积有效穗数虽然减少,但每穗粒数和千粒质量增加。秸秆还田条件下,刘红江等^[33]在太湖地区的研究结果表明,在当地习惯施氮量基础上减量 10%处理水稻产量稳定,减量 20%处理产量显著降低。在本试验条件下,减量 20%施氮仍能保持粳稻稳产。造成上述差异的原因可能是试验地区和品种不同,栽培管理措施等也会影响水稻产量的形成。因此,秸秆还田条件下,适当减少施氮量仍可使水稻产量维持在较高水平。由于本文减氮施肥仅设置了减量 20%处理,继续减少施氮量对水稻产量的影响有待进一步研究。

秸秆还田后,土壤微生物分解秸秆需要消耗氮素,易导致水稻前期氮素供应不足;后期秸秆释放氮素,促进水稻生长发育,因此秸秆还田下的氮肥运筹应与秸秆不还田条件下有所差异。胡雅杰等^[22]研究认为,麦秸还田条件下调整基蘖氮肥与穗氮肥的分配,氮肥适当前移,显著增加水稻穗数,并提高机插超级粳稻产量。李晓峰等^[34]研究发现,小麦秸秆全量还田下,随基蘖氮肥占比的提高,水稻产量先升高后降低,基蘖肥占比为 70%时水稻产量达最高水平。韩上等^[32]秸秆还田条件下的田间试验结果表明,氮肥前移可使水稻获得较高产量。本研究中,常量施氮和减量 20%施氮下,氮肥运筹由 6:4 调整为 7:3,粳稻产量都有所提高,其原因在于氮肥前移可导致有效穗数和每穗粒数增加,而结实率和千粒质

量基本不变。可见,秸秆还田条件下,氮肥适当前移,有利于穗数形成和每穗粒数提高,使水稻产量保持稳定。

因此,麦秸全量还田条件下,适当减少施氮量和提高基蘖氮肥比例,可有效缓解秸秆还田对水稻前期生长的抑制效应,促进水稻分蘖早发多发,增加单位面积有效穗数,提高每穗粒数,最终实现水稻高产稳产。

3.2 麦秸全量还田下减氮施肥对水稻氮素吸收利用的影响

本试验结果表明,氮肥施用促进了粳稻的氮素吸收与积累,减量 20%施氮处理各时期氮素积累量低于常量施氮处理,其中分蘖中期和拔节期氮素积累量下降幅度较大,粳稻生长后期降低幅度相对较小,与前人研究结果^[22,35]基本一致。胡雅杰等^[22]麦秸还田下的研究结果显示,增加氮肥施用量,水稻生长前期氮素积累量显著增加,成熟期氮素积累量增加不明显。张刚等^[35]研究发现,秸秆还田下加大氮肥投入量可使水稻氮素积累量显著增加。本研究中,麦秸全量还田条件下,提高基蘖氮肥比例使粳稻各时期氮素积累量增加。胡雅杰等^[22]麦秸还田下的研究结果显示,氮肥前移可显著促进水稻生长前期的氮素吸收和累积,成熟期氮素积累量增加。王建明等^[23]研究认为,随着氮肥中基蘖肥占比的提升,麦秸还田后水稻氮素累积量呈上升的趋势。可见,秸秆还田条件下,氮肥前移可为水稻返青分蘖提供充足的氮素,一定程度上缓解了秸秆腐解对水稻前期生长的不利作用。尹彩侠等^[26]研究结果表明,与不施氮肥对照相比,施氮处理水稻的氮素转运量和氮素转运率显著提高,施氮促进了氮素向籽粒的转移。吴龙龙等^[25]研究认为,与常规施氮相比,减氮 20%处理水稻齐穗期-灌浆期氮素转运量下降,对穗部氮的贡献率减小,而氮素转运率升高。李晓

芸^[36]研究表明,随施氮量的增加,叶片和茎鞘氮素转运量均增加,氮素转运率下降,氮素转运对穗部的贡献率总体上呈降低趋势。本试验研究结果表明,秸秆全量还田条件下,施氮提高了粳稻抽穗期至成熟期的氮素转运量、氮素转运率和对籽粒氮的贡献率,减量 20% 施氮处理氮素转运量较常量施氮处理有所下降而氮素转运率和对籽粒氮的贡献率有所提高;提高基肥氮比例可使氮素转运量、氮素转运率和对籽粒氮的贡献率有所增加。

刘红江等^[33]试验结果表明,太湖地区在习惯施氮量基础上减量 10%,水稻氮肥农学利用率、偏生产力和生理利用率均有所提升。本研究中,麦秸全量还田下,减量 20% 施氮处理粳稻氮肥农学利用率、偏生产力较常量施氮处理显著提高,氮肥生理利用率和表观利用率虽有所提高但不显著,百千克籽粒吸氮量则有所降低,这与刘红江等^[33]的研究结果相似。本研究结果还显示,麦秸全量还田下,无论是常量施氮处理还是减量 20% 施氮处理,氮肥运筹由 6:4 调整为 7:3,粳稻氮肥生理利用率、农学利用率和偏生产力均有所增加,百千克籽粒吸氮量有所降低,这与李晓峰等^[34]的研究结果吻合。李晓峰等^[34]秸秆全量还田下的试验结果表明,基肥氮与穗肥的运筹比例为 7:3 时,水稻氮肥利用效率最高。

综上,麦秸全量还田条件下,适当减少施氮量,氮肥前移,可提高氮肥利用效率。秸秆还田初期土壤微生物迅速繁殖需要消耗氮素,适当提高基肥氮比例有利于水稻前期氮素的吸收和累积;水稻生长中后期秸秆腐解释放氮素,协调了水稻全生育期的氮素吸收,使得氮肥利用效率提高。

4 结论

麦秸全量还田下,减量 20% 施氮处理粳稻产量与常量施氮处理差异不显著,提高基肥氮比例有利于粳稻生长前期地上部干物质积累提高。减量 20% 施氮处理氮素积累量低于常量施氮处理,提高基肥氮比例使粳稻分蘖中期至拔节期氮素积累量增加。减量 20% 施氮处理粳稻氮肥农学利用率和偏生产力显著提高,氮肥生理利用率和表观利用率有所提高但不显著,百千克籽粒吸氮量降低不显著。可见,麦秸全量还田条件下,在常规施氮量基础上减量 20%,氮肥适当前移,能在保持粳稻产量水平稳

定的基础上,提升氮肥农学利用率和偏生产力。

参考文献:

- [1] 张斯梅,杨四军,顾克军,等. 稻麦轮作系统麦秸全量还田后不同耕整方式的作业效率与成本分析[J]. 农业开发与装备, 2020(12): 32-34.
- [2] 高利伟,马林,张卫峰,等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
- [3] 江永红,宇振荣,马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213.
- [4] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等. 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): 579-594.
- [5] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 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.
- [6] 顾焱明. 施氮对关中灌区秸秆还田小麦生长和秸秆腐解规律的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [7] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [8] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [9] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [10] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 156: 1-11.
- [11] 汪军,王德建,张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270.
- [12] 张军,董啸波,葛梦婕,等. 不同地力水平下超级稻高产高效适宜施氮量及其机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 261-272.
- [13] 张洪程,王秀芹,戴其根,等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800-806.
- [14] 钱银飞,张洪程,李杰,等. 施氮量对机插杂交粳稻徐优 403 产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 522-528.
- [15] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等. 氮肥用量对双季稻产量和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1279-1286.
- [16] 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.
- [17] ZENG X M, HAN B J, XU F S, et al. Effects of modified fertilization technology on the grain yield and nitrogen use efficiency of midseason rice[J]. Field Crops Research, 2012, 137: 203-212.
- [18] 江立庚,曹卫星,甘秀芹,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37

- (4): 490-496.
- [19] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(5): 757-764.
- [20] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等. 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.
- [21] 朱从海,蔡爱琴,严 军,等. 小麦秸秆还田后施氮量对机插水稻产量的影响[J]. 中国稻米,2011,17(4): 32-34.
- [22] 胡雅杰,朱大伟,邢志鹏,等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1): 12-22.
- [23] 王建明,杨建忠,何晓艳,等. 小麦秸秆还田条件下氮肥运筹对水稻产量、品质和氮素利用的影响[J]. 江苏农业科学,2010(6): 124-126.
- [24] 王才林,张亚东,朱 镇,等. 优良食味梗稻新品种南梗 9108 的选育与利用[J]. 江苏农业科学,2013,41(9): 86-88.
- [25] 吴龙龙,虞轶俊,田 仓,等. 干湿交替灌溉下施氮模式对水稻光合产物和氮转运的影响[J]. 中国水稻科学,2022,36(3): 295-307.
- [26] 尹彩侠,李 前,孔丽丽,等. 减氮增锌对水稻产量、氮素吸收及土壤无机氮的影响[J]. 江西农业学报, 2020, 32(11): 60-64.
- [27] 黄 恒,姜恒鑫,刘光明,等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2021,47(11): 2232-2249.
- [28] 管方圆,刘 琛,傅庆林,等. 添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响[J]. 农业工程学报,2022,38(2): 223-230.
- [29] 王娟娟,胡珈玮,狄 霖,等. 秸秆还田与氮肥运筹对水稻不同生育期土壤细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(6): 1460-1470.
- [30] 王子阳,陈婉华,袁 伟,等. 长期秸秆还田与耕作方式对水稻产量及品质的影响[J]. 中国稻米,2021,27(3): 17-20.
- [31] 陈新红,韩正光,叶玉秀,等. 麦草全量机械还田对机插水稻产量和生长特性的影响[J]. 西北农业学报,2013,22(8): 38-41.
- [32] 韩 上,武 际,李 敏,等. 秸秆还田条件下氮肥运筹对作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(3): 23-28.
- [33] 刘红江,郑建初,郭 智,等. 太湖地区氮肥减量对水稻氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(11): 2960-2965.
- [34] 李晓峰,程金秋,梁 健,等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插梗稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2017,43(6): 912-924.
- [35] 张 刚,王德建,俞元春,等. 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.
- [36] 李晓芸. 甬优中熟粳梗杂交稻产量形成及氮肥响应特征[D]. 扬州: 扬州大学,2018.

(责任编辑:石春林)