

杜光辉, 张琳, 丁丽, 等. 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及氮素营养平衡的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6): 1012-1019.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.007

紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及氮素营养平衡的影响

杜光辉¹, 张琳¹, 丁丽¹, 聂良鹏¹, 史鹏飞¹, 吕玉虎¹, 张丽霞¹, 潘兹亮¹, 孙全东²

(1. 信阳市农业科学院, 河南 信阳 464001; 2. 信阳市农业农村局, 河南 信阳 464001)

摘要: 紫云英与水稻秸秆联合还田是减肥增效的重要举措, 通过试验研究紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及氮素营养平衡的影响, 以期为豫南稻区合理利用紫云英与水稻秸秆提供理论依据。氮肥设计按照常规施用量的 60% 氮 (N0.6)、100% 氮 (N) 2 个水平; 水稻秸秆采取留高茬还田 (St)、不还田 2 种方式; 绿肥采取种植并翻压紫云英 (Mv, 22 500 kg/hm²)、冬闲 2 种模式; 以冬闲和水稻秸秆不还田不施肥作空白对照 (CK), 共 10 个处理, 研究紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量、水稻地上部氮积累量、土壤氮含量、氮肥利用率及土壤氮素表观盈亏量的影响。结果表明, 紫云英与水稻秸秆联合还田配施 60% 氮肥 (MvStN0.6) 的水稻产量较冬闲田水稻秸秆不还田 100% 氮肥 (N)、紫云英或水稻秸秆还田配施等量氮肥处理 (MvN0.6, StN0.6) 分别显著增加 4.77%、6.49%、23.48%。紫云英还田处理的水稻地上部氮积累量均显著高于其他等量氮肥处理。与冬闲田水稻秸秆不还田 100% 氮肥处理相比, 紫云英还田配施 100% 氮肥处理显著增加水稻土壤碱解氮含量, 减氮处理中仅 MvStN0.6 处理显著增加了土壤全氮含量。紫云英与水稻秸秆联合还田配施氮肥处理较冬闲田水稻秸秆不还田配施等量氮肥的氮肥表观利用率均显著提高, MvStN0.6 处理较 N0.6 处理显著增加了氮肥实际利用率。不同处理土壤氮素表观盈亏量差异较大, 为 -67~69 kg/hm²。综合来看, 紫云英与水稻秸秆联合还田配施 60% 氮肥可有效增加水稻地上部氮的积累, 提高水稻的收获指数和氮肥实际利用率, 进而增加水稻产量, 降低氮肥面源污染。

关键词: 紫云英; 水稻秸秆; 产量; 氮积累; 氮素表观盈亏量

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-1012-08

Effects of co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with nitrogen fertilizer reduction on rice yield and nitrogen nutrition balance

DU Guanghui¹, ZHANG Lin¹, DING Li¹, NIE Liangpeng¹, SHI Pengfei¹, LYU Yuhu¹, ZHANG Lixia¹, PAN Ziliang¹, SUN Quandong²

(1. Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang 464001, China; 2. Xinyang Agricultural and Rural Bureau, Xinyang 464001, China)

Abstract: The combined returning of Chinese milk vetch and rice straw is an important measure to reduce fertilizer and increase efficiency. The effects of combined application of Chinese milk vetch and rice straw with nitrogen fertilizer reduction on rice yield and nitrogen nutrition balance were

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家绿肥产业技术体系项目 (CARS-22)

作者简介: 杜光辉 (1992-), 男, 河南罗山人, 硕士研究生, 研究实习员, 从事土壤肥料与绿肥研究。 (E-mail) dugh1992@163.com

通讯作者: 吕玉虎, (E-mail) 18736046075@163.com

studied to provide theoretical basis for rational utilization of Chinese milk vetch and rice straw in the south of Henan province. Nitrogen fertilizer was applied at two levels of 60% nitrogen (N0.6) and 100% nitrogen (N). Rice straw was returned to the field with high stubble (St) and

not returned to the field. Two modes of green manure were adopted: planting and rolling Chinese milk vetch (Mv, 22 500 kg/hm²) and winter fallow. The treatment of winter fallow, no straw returning and no fertilization was used as a blank control (CK). In this study, a total of 10 treatments were used to study the effects of co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with nitrogen fertilizer reduction on rice yield, rice aboveground nitrogen accumulation, soil nitrogen content, nitrogen use efficiency and soil nitrogen apparent profit and loss. The results showed that the rice yield in the treatment of Chinese milk vetch and rice straw combined with 60% nitrogen fertilizer (MvStN0.6) was significantly increased by 4.77%, 6.49% and 23.48%, respectively, compared with that in the treatments of winter fallow + rice straw not returning + 100% nitrogen fertilizer (N), Chinese milk vetch or rice straw returning with the same amount of nitrogen fertilizer (MvN0.6, StN0.6). The aboveground nitrogen accumulation of rice in Chinese milk vetch returning treatments was significantly higher than that in other equal nitrogen fertilizer treatments. Compared with the treatment of winter fallow + rice straw not returning + 100% nitrogen fertilizer, the treatment of Chinese milk vetch returning + 100% nitrogen fertilizer significantly increased the content of alkali-hydrolyzable nitrogen in paddy soil. In the nitrogen reduction treatments, only the MvStN0.6 treatment significantly increased the soil total nitrogen content. The apparent nitrogen use efficiency in the treatment of co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with nitrogen fertilizer was significantly higher than that in the treatment of winter fallow + rice straw not returning + equal nitrogen fertilizer, and the actual nitrogen use efficiency in MvStN0.6 treatment was significantly higher than that in N0.6 treatment. The apparent profit and loss of soil nitrogen under different treatments varied greatly, ranging from -67 kg/hm² to 69 kg/hm². In summary, the co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with 60% nitrogen fertilizer can effectively increase the accumulation of nitrogen in the aboveground part of rice, improve the harvest index of rice and the actual utilization rate of nitrogen fertilizer, thereby increasing rice yield and reducing nitrogen fertilizer non-point source pollution.

Key words: Chinese milk vetch; rice straw; yield; nitrogen accumulation; apparent profit and loss of nitrogen

水稻作为中国最重要的粮食作物之一,有着悠久的种植历史,水稻生长环境的长期安全稳定是水稻高产稳产的前提,也是保障中国粮食安全的基本条件。氮素是水稻生长必需的大量营养元素之一,合理施用氮肥是提高水稻产量的重要举措,但氮肥的长期过量施用,不仅浪费氮肥资源、制约水稻产量和品质的提高^[1],而且会造成水稻土耕作层受损、农田面源污染等突出问题^[2],不利于农业可持续发展。

近些年,绿肥种植、翻压已成为稻田土壤改良、培肥地力的重要举措之一^[3],紫云英是一种优质的冬闲田绿肥作物,长期翻压还田后能够提升水稻土活性,增加水稻土养分,为水稻的高产稳产提供保障^[4-6],还可以充分利用冬闲田的光热水气等自然资源。此外,紫云英盛花期景观也是乡村旅游新兴项目,是实现农旅融合,促进乡村振兴的重要方式^[7]。水稻秸秆作为水稻的重要产物之一,含有丰富的氮、磷、钾等营养元素,水稻秸秆还田能够有效增加土壤有机质,提升土壤养分^[8]。绿肥与水稻秸秆是中国水稻土重要的有机物料,联合还田能够有效改善土壤碳氮比,提升微生物活性^[9-10],为水稻高产稳产及绿色可持续发展提供有利条件。前人针对绿肥与水

稻秸秆联合还田对减施氮肥及水稻产量的影响做了大量研究,但对其联合还田氮素营养平衡的研究还较少,本文旨在通过研究紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及氮素营养平衡的影响,为豫南冬闲田稻区氮肥合理施用和稻田绿色高效可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

定位试验位于信阳市农业科学院陆庙试验园区(32°24'N, 114°17'E),该地地处淮河以南,地势平坦,灌溉方便,旱涝保收。本定位试验起于2018年,供试土壤为水稻土(耕层土壤质地为黏壤土),试验前耕层土壤(0~20 cm) pH 值为6.7,有机质含量21.0 g/kg,全氮含量1.15 g/kg,碱解氮含量110.90 mg/kg,全磷含量0.41 g/kg,有效磷含量12.50 mg/kg,全钾含量10.80 g/kg,速效钾含量95.30 mg/kg。

1.2 试验材料

供试紫云英品种为信紫1号,在紫云英翻压前取地上部鲜草,测得翻压时鲜草水分含量为90%,干草氮含量为3.55%。供试水稻品种为万象优

111。

1.3 试验设计

定位试验共设置 10 个处理,分别为:(1)冬闲+水稻秸秆不还田+不施氮肥(CK);(2)冬闲+水稻秸秆不还田+常规施氮量(N);(3)冬闲+水稻秸秆不还田+60%常规施氮量(N0.6);(4)绿肥+水稻秸秆不还田+不施氮肥(Mv);(5)绿肥+水稻秸秆不还田+常规施氮量(MvN);(6)绿肥+水稻秸秆不还田+60%常规施氮量(MvN0.6);(7)冬闲+水稻秸秆还田+常规施氮量(StN);(8)冬闲+水稻秸秆还田+60%常规施氮量(StN0.6);(9)绿肥+水稻秸秆还田+常规施氮量(MvStN);(10)绿肥+水稻秸秆还田+60%常规施氮量(MvStN0.6),每个处理重复 3 次,并进行区组排列。小区面积为 20 m²(4 m×5 m),小区间筑水泥埂,各小区埂宽 20 cm,排水沟宽 30 cm。本试验周期为 2020 年 9 月至 2021 年 9 月,水稻秸秆于 2020 年 9 月水稻收获后采取高留茬形式(40 cm)还田,种植紫云英小区于 2020 年 8 月 31 日水稻收获前套种,紫云英在盛花期经取样称重量后于 2021 年 4 月 20 日原位翻压还田,5 月 20 日进行水稻插秧,栽插行距分别为 30 cm 和 25 cm 宽窄行,株距为 15 cm,1 hm² 共计 3.0×10⁵ 穴。水稻常规施肥为纯 N 量 180 kg/hm²、P₂O₅ 量 90 kg/hm²、K₂O 量 126 kg/hm²。钾肥(氯化钾,K₂O 含量 60%)按基肥和穗肥各 50%施用;氮肥(尿素,N 含量 46%)按基肥 50%、分蘖肥 30%、穗肥 20% 比例施用;磷肥(过磷酸钙,P₂O₅ 含量 12%)全部作基肥施用。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 植株样采集与分析 紫云英盛花期,各种植绿肥小区随机采取紫云英植株 10 株,105 ℃ 下杀青 30 min,65 ℃ 烘干后测其生物量,然后再粉碎测氮含量。

在 2021 年水稻收获期,每小区随机取 5 穴水稻植株测定水稻籽粒和秸秆的生物量,同时测定植株各部分的氮含量。每个小区单收,晒干后测水稻产量。

水稻产量构成因数的测定:成熟期调查株高、有效穗数、穗粒数(实粒数和秕粒数)、千粒重,计算结实率。

1.4.2 土壤采集与分析 水稻成熟期依据 5 点采样法用内径 20 mm 的土钻,采集耕层土壤,混匀风干,过筛,备用。土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土

壤碱解氮用扩散法测定^[11]。

1.5 计算公式与统计方法

(1)收获指数(HI,g/g)=单株产量(g)/单株生物量(g)。

(2)水稻氮积累量=水稻干物质质量×水稻氮含量÷1 000。

(3)氮肥表观利用率=(施氮区水稻吸氮量-不施氮区水稻吸氮量)÷施氮量×100%;氮肥实际利用率=(施氮区植株吸氮量-不施氮区植株吸氮量)÷(施氮量+紫云英固氮量+还田秸秆含氮量)×100%。

(4)土壤氮素表现盈亏量=N 输入量-N 输出量。

紫云英固氮量=紫云英地上部氮积累量×80%^[12]。

氮损失量=氮挥发量+氮淋失量+氮径流量+氧化亚氮排放量^[13]。

氮挥发量(N,kg/hm²)=2.97+0.16x(x:氮肥施入量)^[13]。

氮淋失量(N,kg/hm²)=6.03e^{0.004 8x}(x:氮肥施入量-地上部氮含量)^[13]。

氮径流量(N,kg/hm²)=8.69e^{0.007 7x}(x:氮肥施入量-地上部氮含量)^[13]。

氧化亚氮排放量(N,kg/hm²)=0.74e^{0.011x}(x:氮肥施入量-地上部氮含量)^[13]。

试验数据采用 Microsoft Excel 2013、SAS 9.4、Graph Pad Prism5.0 进行处理分析及绘图,并通过 Duncan's 多重比较验证 0.05 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及农艺性状的影响

紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻产量及农艺性状的影响如表 1 所示。与 CK 相比,紫云英或水稻秸秆还田配合氮肥施用均能够大幅度提高水稻株高、有效穗,提高幅度分别在 14%~20%、14%~34%,氮肥的投入或紫云英的翻压还田能够为水稻前期生长提供养分,促进水稻生长及分蘖,为水稻高产提供先决条件。与 N 处理相比,StN 处理未能够明显提高水稻株高。

水稻产量是结实率、千粒重、有效穗及穗粒数等多种因素共同作用的结果。从表 1 可见,与施氮肥

处理相比,紫云英或水稻秸秆还田配合氮肥施用均能够提高水稻穗粒数,紫云英或水稻秸秆翻压能够持续为水稻提供养分,确保水稻生长后期不因脱肥而造成减产。紫云英或水稻秸秆的投入造成水稻结实率出现一定程度下降,这表明水稻穗密度过大会降低水稻结实率。

不同处理水稻产量存在明显差异(表1)。与CK相比,紫云英或水稻秸秆还田配合氮肥施用均大幅度提升水稻产量,提升幅度在32.9%~66.1%;与N处理相比,同等施氮水平下紫云英或水稻秸秆的翻压还田能够显著提高水稻产量,提升幅度为2.9%~6.1%;与N0.6相比,同等施氮水平下紫云英

翻压还田能够大幅度提高水稻产量,提高幅度为17.8%,而同等施氮水平下单独水稻秸秆还田未见明显差异。不同处理水稻收获指数为0.53~0.57,受施肥影响较大。

2.2 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻地上部氮累积量的影响

紫云英与水稻秸秆还田及相关施肥处理显著增加了水稻地上部不同部分氮累积量(图1)。与CK相比,不同处理显著提高了水稻籽粒氮累积量1.6~3.3倍;不同处理显著提高了秸秆氮累积量1.5~2.8倍;不同处理显著提高了水稻地上部氮累积量1.5~3.1倍。

表1 不同处理水稻产量及农艺性状

Table 1 Rice yield and agronomic traits under different treatments

处理	有效穗 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	株高 (cm)	每穗实粒数 (粒)	每穗总粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	收获指数(HI) (g/g)
CK	280e	105.9e	158.0b	199.4d	79.25a	26.25ab	6 107f	0.56bc
N	364ab	122.6bc	149.2d	195.5d	76.39b	26.75a	9 564c	0.55cd
N0.6	322d	120.8d	158.9b	199.6d	79.58a	26.64ab	7 990de	0.54d
Mv	320d	122.0c	158.9b	213.7b	74.41bc	26.54ab	7 821e	0.55bc
MvN	376a	126.2a	154.7bc	207.5bc	74.56bc	26.14b	9 952ab	0.53e
MvN0.6	358b	124.0b	158.9b	212.7b	74.71c	26.32ab	9 409c	0.57a
StN	342c	124.2ab	171.4a	224.0a	76.56bc	26.33ab	9 841b	0.55cd
StN0.6	325d	121.1cd	158.0b	209.6bc	75.39bc	26.41ab	8 115d	0.56b
MvStN	376a	126.8a	155.0c	207.1c	74.88cd	26.41ab	10 143a	0.53e
MvStN0.6	362ab	124.6ab	149.3cd	204.0cd	73.13cd	26.18ab	10 020ab	0.56bc

CK:冬闲+水稻秸秆不还田+不施氮肥;N:冬闲+水稻秸秆不还田+常规施氮量;N0.6:冬闲+水稻秸秆不还田+60%常规施氮量;Mv:绿肥+水稻秸秆不还田+不施氮肥;MvN:绿肥+水稻秸秆不还田+常规施氮量;MvN0.6:绿肥+水稻秸秆不还田+60%常规施氮量;StN:冬闲+水稻秸秆还田+常规施氮量;StN0.6:冬闲+水稻秸秆还田+60%常规施氮量;MvStN:绿肥+水稻秸秆还田+常规施氮量;MvStN0.6:绿肥+水稻秸秆还田+60%常规施氮量。同一列不同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

从图1可以看出,MvStN、MvStN0.6、MvN处理籽粒氮累积量较高,分别达到122 kg/hm²、114 kg/hm²、110 kg/hm²;其他处理籽粒氮累积量在37.5 kg/hm²至91.2 kg/hm²之间。紫云英还田配合氮肥减施处理籽粒氮累积量显著高于紫云英不还田单一减量施氮肥处理。从图1可以看出,不同处理水稻秸秆氮累积量为15.6~45.0 kg/hm²,且MvStN、MvStN0.6、MvN处理水稻秸秆氮累积量较高。

从图1可以看出,不同处理地上部氮累积量为53.2~165.6 kg/hm²,MvStN、MvN、MvStN0.6处理较高,分别达到165.6 kg/hm²、153.2 kg/hm²、150.4 kg/hm²,且紫云英还田配合氮肥处理显著高于紫云

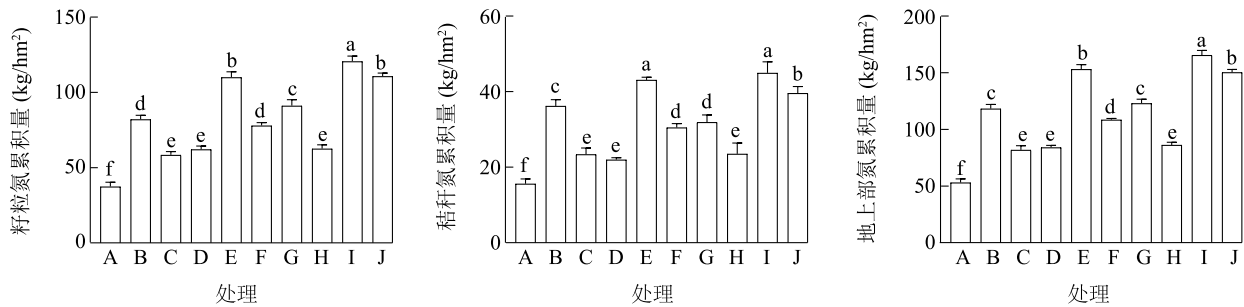
英不还田单一等量施氮肥处理。MvStN0.6处理地上部氮累积量较N处理与MvN0.6处理分别显著增加了18.6%、28.5%,紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施极大促进了水稻对氮的吸收利用。

2.3 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻土氮含量的影响

与CK相比,紫云英或水稻秸秆还田及相关施肥处理均可显著增加水稻土碱解氮及全氮的含量(图2),紫云英或水稻秸秆还田配施氮肥是水稻土氮素营养长期稳定的关键。从图2可以看出,不同处理土壤碱解氮含量在81 mg/kg至155 mg/kg之间,与N处理相比,紫云英配合氮肥

处理均显著增加了水稻土碱解氮含量,水稻秸秆还田配施氮肥处理碱解氮含量无显著差异。从图 2 可以看出,不同处理水稻土全氮含量为 0.79~1.34 g/kg,与 N 处理相比,减氮处理中仅

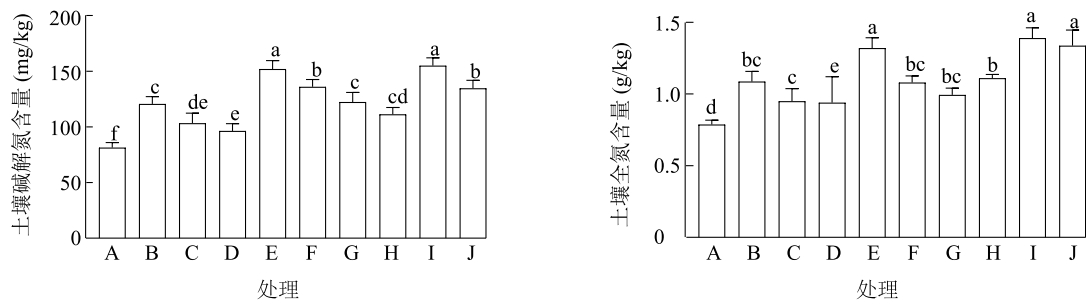
MvStN0.6 处理显著增加了土壤全氮含量,紫云英或水稻秸秆还田配合氮肥减施处理土壤全氮含量均与 N 处理无显著差异。



A: CK; B: N; C: N0.6; D: Mv; E: MvN; F: MvN0.6; G: StN; H: StN0.6; I: MvStN; J: MvStN0.6。CK、N、N0.6、Mv、MvN、MvN0.6、StN、StN0.6、MvStN、MvStN0.6 见表 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 1 不同处理水稻地上部氮积累量

Fig.1 Aboveground nitrogen accumulation of rice under different treatments



A: CK; B: N; C: N0.6; D: Mv; E: MvN; F: MvN0.6; G: StN; H: StN0.6; I: MvStN; J: MvStN0.6。CK、N、N0.6、Mv、MvN、MvN0.6、StN、StN0.6、MvStN、MvStN0.6 见表 1 注。图柱上不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同处理水稻土氮含量

Fig.2 Nitrogen content of paddy soil under different treatments

2.4 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对水稻氮肥利用率的影响

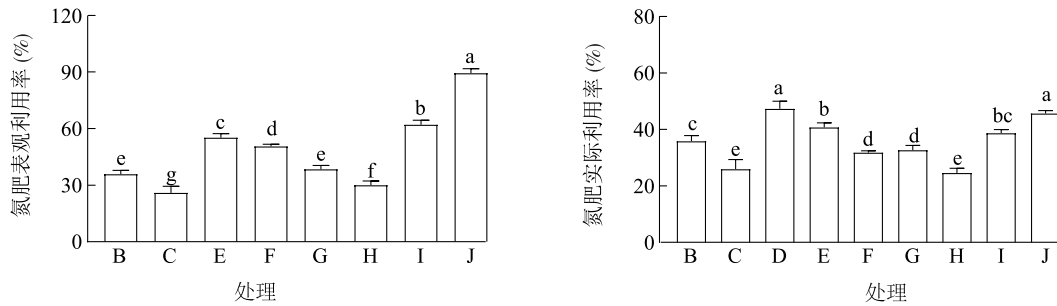
从图 3 可以看出,氮肥表观利用率为 25%~89%,N0.6 处理氮肥表观利用率最低,为 25%,MvStN0.6 处理氮肥表观利用率最高,为 89%;紫云英还田或紫云英与水稻秸秆联合还田能够显著提高水稻氮肥表观利用率,与 N 处理相比,MvStN0.6、MvStN、MvN、MvN0.6 处理均显著提高了氮肥表观利用率,分别提升了 250%、173%、154%、141%,紫云英还田较大幅度提升了氮肥表观利用率。

从图 3 可以看出,氮肥实际利用率为 26%~47%,Mv 处理氮肥实际利用率最高,为 47%;与 N 处理相比,Mv、MvStN0.6 处理显著提高了氮肥实际

利用率,分别提高了 131%、127%。

2.5 紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施对土壤氮素表观盈亏量的影响

紫云英与水稻秸秆还田配合氮肥减施情况下,不同处理土壤氮素表观盈亏量如表 2 所示。CK 以及 Mv、N0.6 处理出现不同程度的亏损,且 CK、Mv 处理亏损量较大,分别达到 67 kg/hm²、32 kg/hm²;其他处理均表现出不同程度的盈余,盈余量为 6~69 kg/hm²且 MvStN 处理盈余量最大,达到 69 kg/hm²。从养分输入来看,秸秆还田为土壤提供 23~39 kg/hm²氮素,紫云英还田为土壤提供 64 kg/hm²的氮,是土壤氮素来源的重要组成部分,是实现土壤氮素盈余或平衡的重要举措。



B; N; C; N0.6; D; Mv; E; MvN; F; MvN0.6; G; StN; H; StN0.6; I; MvStN; J; MvStN0.6。N、N0.6、Mv、MvN、MvN0.6、StN、StN0.6、MvStN、MvStN0.6 见表1注。图柱上不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图3 不同处理氮肥利用率

Fig.3 Nitrogen use efficiency under different treatments

表2 不同处理土壤氮素表观盈亏量

Table 2 Apparent profit and loss of soil nitrogen under different treatments

处理	氮素输入 (kg/hm ²)				氮素输出 (kg/hm ²)				表观盈亏量 (kg/hm ²)
	氮肥	紫云英	秸秆	总氮投入量	稻谷	秸秆	氮损失	总氮输出量	
CK	0	0	0	0	38	16	14	67	-67
N	180	0	0	180	82	36	55	174	6
N0.6	108	0	0	108	58	23	39	121	-13
Mv	0	64	0	64	62	22	12	96	-32
MvN	180	64	0	244	110	43	50	204	40
MvN0.6	108	64	0	172	78	31	36	144	28
StN	180	0	28	208	91	32	55	178	30
StN0.6	108	0	23	131	63	24	38	124	7
MvStN	180	64	39	283	121	45	49	214	69
MvStN0.6	108	64	38	210	111	40	32	182	28

CK、N、N0.6、Mv、MvN、MvN0.6、StN、StN0.6、MvStN、MvStN0.6 见表1注。

3 讨论

水稻秸秆留高茬为紫云英苗期生长营造良好的环境^[14],与紫云英联合还田能够有效调节土壤碳氮比,丰富有机物料种类,影响土壤微生物多样性及代谢活性,对水稻产量及土壤氮素营养的平衡具有十分重要的意义^[15-17]。本研究结果表明,配施氮肥减少条件下,紫云英还田及紫云英与水稻秸秆联合还田处理均显著提高了水稻产量,而水稻秸秆还田对水稻产量的提升幅度不明显,这可能是因为紫云英固氮活磷富钾的特性,为水稻提供充足的养分,而水稻秸秆的氮磷钾含量不高,另外紫云英还田后快速腐解,释放养分快^[18],而水稻秸秆C含量/N含量过高,腐解时间长,养分释放较慢^[19],这与朱强等^[20]在减氮50%情况下紫云英还田的水稻产量高于水稻秸秆还田的研究结果一致。紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施的增产效益显著高于紫云英单

独还田和水稻秸秆单独还田,一方面可能是紫云英与水稻秸秆联合还田调节土壤C含量/N含量,改善土壤微环境^[21];另一方面留高茬为紫云英生长提供较好生长环境,促进紫云英根系生长,增加紫云英根瘤菌数量,提升固氮能力^[22]。紫云英还田或紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥全量施用,水稻收获指数显著低于其他处理,可能是氮素的过量施用造成水稻茎叶旺长,株高增加,生物量增大,氮肥从茎叶向籽粒转移率低,造成水稻收获指数偏低^[23]。紫云英与水稻秸秆联合还田配施氮肥具有较好的增产效果,这也与周国朋等^[24]的研究结果一致。

地上部养分积累量能够直观反映出干物质的生产与分配,水稻对养分的吸收利用及转运,直接或间接影响水稻产量^[25]。王慧等^[26]研究结果表明,紫云英种植与还田能够改善水稻土生态环境,调整水稻土供肥特性,显著提升水稻对养分的吸收及转运。杨滨娟等^[27]研究结果表明,水稻秸秆还田能够有效

提升水稻土有机质以及活性氮、磷、钾的含量,为水稻后期生长提供充足养分。本研究结果表明,与 CK 相比,紫云英或水稻秸秆还田配合氮肥均能大幅度提升水稻地上部的氮积累量。CK 土壤氮亏损,土壤氮含量低,影响水稻生长及氮的吸收;N0.6 处理与 Mv 处理可能是因为氮养分投入低,土壤氮出现一定亏损,而 StN0.6 处理可能是水稻秸秆腐解速率慢^[19],造成水稻前期供氮不足,水稻有效穗及穗粒数偏低,成熟期干物质积累量偏低;MvN 处理氮养分投入大,地上部氮积累量却与 MvStN0.6 处理无显著差异,可能是过高的氮肥供应造成水稻前期地上部旺长,影响水稻根系的发育与生长,后期贪青晚熟,影响干物质向籽粒转移^[28-29]。综合来看,MvStN 处理地上部氮积累量显著提升是紫云英与水稻秸秆联合还田的作用效果。

水稻土是水稻汲取养分的介质,其氮含量是评价土壤肥沃度的重要指标^[30-31]。碱解氮作为土壤有效氮可以直接被水稻吸收利用,能够直观反映出土壤的供氮能力。本研究发现,与氮肥处理相比,仅紫云英或紫云英与水稻秸秆联合还田配施氮肥处理显著提高土壤碱解氮含量,而水稻秸秆还田配施氮肥处理碱解氮含量差异不显著,可能是水稻秸秆 C 量占比高,微生物腐解消耗土壤有效氮^[32],从而降低了土壤碱解氮的含量,紫云英的种植能够为土壤带来大量根瘤菌,通过固氮作用降低土壤有效氮的流失,提升土壤碱解氮含量^[33]。Mbuthia 等^[34]研究发现,豆科绿肥原位种植并翻压后土壤活性养分得到明显提升,本研究结果与其研究结果相似。单施氮肥处理土壤总氮含量显著低于同水平下紫云英或紫云英与水稻秸秆联合还田配施氮肥处理,可能是因为长期水稻种植,稻谷和秸秆将土壤中的大量氮素带走,紫云英或水稻秸秆还田所携带的氮养分通过微生物腐解再次释放到土壤中且不易流失,相反,单施尿素能够短期大幅度提高土壤氮含量,但肥效短、易流失,不利于土壤氮的积累。

氮肥利用率及土壤氮素表观盈亏量是判断土壤氮平衡及农田可持续发展的重要参考指标,也是合理施用氮肥,控制氮肥流失,降低氮肥施用造成面源污染的重要依据^[35]。本研究发现,与等量施氮处理相比,紫云英与水稻秸秆联合还田配施氮肥处理增加氮投入量的同时有效降低氮的损失。一方面可能是紫云英携带的大量根瘤菌残留在土壤作用的结

果;另一方面可能是紫云英与水稻秸秆联合还田改善水稻土生态环境,调节土壤碳氮比,腐解秸秆的微生物量增加,消耗了部分易流失的活性氮,降低土壤氮的损失。从氮肥利用率来看,紫云英与水稻秸秆联合还田配合氮肥减施能够有效提升水稻对氮肥的吸收利用。紫云英与水稻秸秆联合还田改善水稻土环境,持续为土壤提供氮素供应,促进氮素循环,降低氮肥流失,显著提高氮肥利用率^[36-37]。

综合水稻产量及农田可持续发展考虑,在豫南地区紫云英与水稻秸秆联合还田配合 60% 氮肥能够稳定水稻产量,提升水稻土氮素可持续供应能力,降低氮的流失,为粮食安全提供有力保障。但土壤氮素依然有盈余,氮肥实际利用率依然有提升潜力。且本试验设计未改变磷、钾肥的投入,后续将通过土壤磷、钾变化,探索磷、钾肥减施措施,明确紫云英与水稻秸秆联合还田与化肥减施比例,改善水稻土耕层生态环境,进一步降低肥料投入,实现减肥增效,确保本研究区域水稻稳产及稻田可持续发展,为区域粮食安全及清洁高效生产提供更多理论参考。

4 结 论

在豫南稻区,在秸秆留高茬还田条件下,种植并翻压紫云英配施适量氮肥可有效增强水稻土氮肥可持续供应能力,提升水稻对氮的吸收利用,增加水稻地上部氮的积累,提高水稻收获指数和氮肥实际利用率,进而增加水稻产量,降低氮肥面源污染。氮肥投入量过大造成水稻土氮损失较多,盈余过大,水稻收获指数低,氮肥利用率低,出现增肥不增产现象。本研究结果表明紫云英与水稻秸秆联合还田配合 60% 氮肥处理在减少氮肥施用量的同时,可满足水稻生长需要,实现水稻高效清洁生产。

参考文献:

- [1] 黄 晶,刘立生,马常宝,等. 近 30 年中国稻区氮素平衡及氮肥偏生产力的时空变化[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(6):987-998.
- [2] 宋大平,陈 巍,高彦征. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(6):1144-1151.
- [3] ANNA P, EDWARD W. Effects of catch crops cultivated for green manure and mineral nitrogen fertilization on soil enzyme activities and chemical properties[J]. Geoderma,2012,189-190.
- [4] 高嵩涓,周国朋,曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(12):2115-2126.

- [5] 胡中泽,衣政伟,王安,等. 紫云英不同时期还田部分替代化肥对氨挥发及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(5):1160-1166.
- [6] GAO S J, ZHOU G P, CHANG D N, et al. Southern China can produce more high-quality rice with less N by green manuring[J]. Resources, Conservation & Recycling,2023,196:107025.
- [7] 李忠义,唐红琴,韦彩会,等. 乡村振兴战略下绿肥产业持续发展的SWOT分析与路径研究——以广西壮族自治区为例[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(7):165-174.
- [8] 季诗域,王旭东,石思博,等. 稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1181-1188.
- [9] 王吕,崔月贞,吴玉红,等. 绿肥稻秆协同还田下氮肥减量的增产和培肥短期效应[J]. 作物学报,2022,48(4):952-961.
- [10] ANSARI M A, CHOUDHURY B U, LAYEK J, et al. Green manuring and crop residue management: effect on soil organic carbon stock, aggregation, and system productivity in the foothills of Eastern Himalaya (India)[J]. Soil and Tillage Research,2022,218:105318.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:44-49.
- [12] 林多胡,顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州:福建科学技术出版社,2008:46-51,69-84.
- [13] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature,2014,514:486-490.
- [14] 周影,王琳,魏启舜,等. 稻茬高度影响轮作紫云英生长及还田效应[J]. 土壤,2021,53(5):977-982.
- [15] 黄璐,李廷亮,李顺,等. 旱地冬小麦夏闲期种植不同豆科绿肥对还田养分和土壤有机碳、氮组分的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(12):2335-2343.
- [16] 万水霞,唐杉,蒋光月,等. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J]. 草业学报,2016,25(6):109-117.
- [17] LIANG H, LI S, ZHANG, et al. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system[J]. Soil & Tillage Research,2022,220:105369.
- [18] 程会丹,鲁艳红,聂军,等. 土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(3):448-456.
- [19] 麦逸辰,卜容燕,韩上,等. 添加不同外源氮对水稻秸秆腐解和养分释放的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(22):210-219.
- [20] 朱强,张静,郭再华,等. 稻草和紫云英联合还田下施氮水平对水稻产量及土壤氮素形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(12):2177-2183.
- [21] 王飞,王利民,何春梅,等. 紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增效中的作用[J]. 土壤,2022,54(3):455-463.
- [22] 杨璐. 紫云英种植及与稻草协同利用的减肥效应和紫云英固氮调控机制[D]. 北京:中国农业科学院,2019.
- [23] 曹娜,熊强强,陈小荣,等. 不同施氮量对晚稻抵御抽穗扬花期低温的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(8):2566-2574.
- [24] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报,2017,33(23):157-163.
- [25] 李成伟,龚松玲,曹培,等. 不同季节生态型水稻植株干物质积累及产量的比较[J]. 江苏农业科学,2022,50(5):96-101.
- [26] 王慧,张琳,常单娜,等. 豫南紫云英水稻轮作区减施不同比例氮肥对水稻养分吸收和转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(7):1194-1207.
- [27] 杨滨娟,黄国勤,徐宁,等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报,2014,34(13):3779-3787.
- [28] 邓中华,明日,李小坤,等. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响[J]. 土壤,2015,47(1):20-25.
- [29] 马艳芹,钱晨晨,邓丽萍,等. 紫云英配施氮肥对双季稻产量、干物质质量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报,2017,31(12):2399-2407.
- [30] 李国齐,吴汉. 免耕与秸秆还田对直播稻产量及水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(9):945-951.
- [31] 陈苏春,胡静博,肖梦华,等. 农村生活再生水灌溉调控对稻田养分的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(4):411-418.
- [32] ZHOU G P, CAO W D, BAI J S, et al. Non-additive responses of soil C and N to rice straw and hairy vetch (*Vicia villosa* Roth L.) mixtures in a paddy soil[J]. Plant and soil,2019,436(1/2):229-244.
- [33] ZHOU C H, ZHAO Z K, PAN X H, et al. Integration of growing milk vetch in winter and reducing nitrogen fertilizer application can improve rice yield in double-rice cropping system[J]. Rice Science,2016,23(3):132-143.
- [34] MBUTHIA L W, ACOSTA-MARTÍNEZ V, DEBRUYN J, et al. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity; implications for soil quality[J]. Soil Biology & Biochemistry,2015,89:24-34.
- [35] 张玉铭,孙宏勇,李红军,等. 环渤海低平原农田生态系统养分循环与平衡研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(8):1035-1048.
- [36] FAN Q Y, XU C X, ZHANG L, et al. Application of milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) with reduced chemical fertilizer improves rice yield and nitrogen, phosphorus, and potassium use efficiency in southern China[J]. European Journal of Agronomy,2023,144:126762.
- [37] 张济世,张琳,丁丽,等. 紫云英还田与化肥减量配施对土壤氮素供应和水稻生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(10):1793-1803.

(责任编辑:蒋永忠)