

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.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.010

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

胡中泽¹, 衣政伟¹, 王安¹, 杨大柳¹, 张岳芳², 陈留根², 王显¹

(1. 江苏省农业科学院泰州农科所, 江苏 泰州 225300; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 氨挥发是稻田氮肥损失的主要途径, 研究紫云英还田对稻田氨挥发和水稻产量的综合影响对于合理利用绿肥以及稻田化肥减量有重要意义。本研究以稻麦轮作常规施氮(M)为对照, 在紫云英旺长期(F1)、始花期(F2)、盛花期(F3)和初荚期(F4)翻压还田并减少稻季 20% 的化学氮肥用量, 研究了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。结果表明, 水稻生长期氨挥发损失总量随紫云英翻压还田时期的推迟呈先增加后减少的趋势, 处理间无显著差异, 但均较对照显著减少。F3、F4、F2 处理的水稻产量较高, 显著高于 F1 处理, 但与对照的差异均未达到显著水平。F1、F2、F3、F4 处理间氨挥发排放强度无显著差异, 但均显著低于对照。不同翻压还田时期造成了紫云英干物质质量和氮素养分还田量的差异, 最终影响了稻田氨挥发和水稻产量; 减少化学氮肥的投入可以有效降低稻田氨挥发。说明, 紫云英还田应选择在盛花期至初荚期进行, 并减少稻季 20% 的化学氮肥用量, 可在确保水稻高产前提下降低氨挥发排放强度。

关键词: 紫云英; 还田时期; 稻田; 氨挥发

中图分类号: S551+.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)05-1160-07

Effects of different incorporation stages of Chinese milk vetch residue on ammonia volatilization loss and yield of rice

HU Zhong-ze¹, YI Zheng-wei¹, WANG An¹, YANG Da-liu¹, ZHANG Yue-fang², CHEN Liu-gen², WANG Xian¹

(1. Institute of Taizhou Agricultural Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Taizhou 225300, China; 2. Key Lab of Agro-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Ammonia volatilization is the main way of nitrogen loss in rice field. It is significant to study the comprehensive effects of incorporation of Chinese milk vetch residue on ammonia volatilization and rice yield for rational utilization

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300206); 泰州农业科学院科技研发推广项目(TNY201919); 江苏省重点研发计划项目(BE2019378)

作者简介: 胡中泽(1987-), 男, 江苏兴化人, 硕士, 助理研究员, 从事农业科技服务、大田作物研究等工作。(E-mail) huzhongze@126.com

通讯作者: 王显, (E-mail) 43850149@qq.com

of green manure and reduction of chemical fertilizer in the rice field. In this study, the effects of nitrogen fertilizer reduction on ammonia volatilization and rice yield were studied under the condition of nitrogen fertilizer reduction by setting four different incorporation stages of Chinese milk vetch residue at rapid growth stage (F1), initial flowering stage (F2), full bloom stage (F3) and initial pod stage (F4) combining a 20% reduction of nitrogen ap-

plication rate. The conventional nitrogen application under rice-wheat rotation (M) was set as control. The results showed that the total amount of ammonia volatilization loss increased first and then decreased with the delay of incorporation stages of Chinese milk vetch residue during rice season. There was no significant difference in the total amount of ammonia volatilization loss among different treatments, but it was significantly reduced compared with the control. The rice yield of F3, F4 and F2 treatments was higher than that of F1 treatment, but there was no significant difference with the control. The ammonia volatilization intensity of F1, F2, F3 and F4 treatments was significantly lower than that of M treatment. The difference of dry matter and nitrogen accumulation of Chinese milk vetch was caused by different stages of residue incorporation, which ultimately affected the ammonia volatilization and rice yield. Reducing the application rate of chemical nitrogen fertilizer can effectively reduce the ammonia volatilization. It is suggested that Chinese milk vetch residue should be incorporated from the full bloom stage to the initial pod stage combining a 20% reduction of nitrogen application rate, which can reduce the intensity of ammonia volatilization under the premise of ensuring high yield of rice.

Key words: Chinese milk vetch; stages of residue incorporation; rice field; ammonia volatilization

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,大量施用化学肥料尤其氮肥是获得水稻高产稳产的重要措施^[1-4]。氨挥发是稻田氮肥损失的主要途径,约占氮肥施用量的13.2%~47.0%,不仅降低了肥料的利用效率,也造成了环境污染^[5-7]。研究结果表明,气候条件、土壤特性等均对氮肥施用后稻田氨挥发产生影响,农业措施(如水分管理、绿肥还田等)也是重要影响因素^[8]。胡安永等^[9]研究发现,紫云英还田后水稻生长季氨挥发总量为9.9~21.2 kg/hm²,占氮肥施用量的7.1%~8.3%;谢志坚等^[10]的研究结果显示,紫云英还田后稻季氨挥发总量为79.8~93.4 kg/hm²,占氮肥施用量的21.9%~25.7%;俞巧钢等^[11]的研究结果表明,紫云英还田后稻季氨挥发总量为17.0~26.3 kg/hm²,比纯施化肥减少29.9%~54.7%。紫云英是中国南方稻区的主要绿肥作物,翻压还田能有效改善土壤理化性状,有利于后茬作物水稻高产稳产^[12-13]。最近的研究结果表明,在氮肥减施20%甚至40%的条件下,紫云英还田处理的水稻产量不减或略有增加^[14-17]。翻压还田时期显著影响紫云英干物质积累和氮素养分还田量^[18],但其对水稻生长季氨挥发和水稻产量的影响鲜有报道^[19]。因此,本研究以稻麦轮作常规施氮为对照,在紫云英旺长期、始花期、盛花期和初荚期翻压还田并减少稻季20%的化学氮肥用量,综合评价紫云英不同时期还田部分替代化肥对稻田氨挥发及水稻产量的影响,旨在为稻田绿色生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019-2020年在江苏省农业科学院泰州

农业科学研究所试验地(119°59'38"E,32°32'23"N)进行。土壤类型为重壤质黑黏土,试验前土壤pH为6.4,有机质含量为32.8 g/kg,全氮含量为1.9 g/kg,速效氮含量为110.7 mg/kg,速效磷含量为6.9 mg/kg,速效钾含量为100.3 mg/kg。

1.2 试验设计

于2019年10月20日水稻收获后撒播紫云英,紫云英播种量45 kg/hm²,种植紫云英期间不施肥。设置4个翻压还田时期处理,分别为旺长期(F1,4月5日)、始花期(F2,4月17日)、盛花期(F3,4月29日)和初荚期(F4,5月5日),以稻麦轮作常规施氮(M)为对照,麦季施纯氮270 kg/hm²、P₂O₅75 kg/hm²、K₂O75 kg/hm²,小区面积为12 m²,每个处理重复3次。供试水稻品种为南粳9108,于5月7日浸种,5月10日育秧,6月1日移栽,行株距为30.0 cm和11.1 cm,每穴3苗。M处理施纯氮270 kg/hm²,F1、F2、F3和F4处理氮肥减量20%(即施纯氮216 kg/hm²)。氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=3:3:4施用。所有处理均施P₂O₅75 kg/hm²,K₂O75 kg/hm²,磷肥全部基施,钾肥按基肥:穗肥=5:5施用。不同处理稻季氮素养分投入量见表1。试验采用的氮肥种类为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。

1.3 测定项目和计算方法

1.3.1 氨挥发测定方法 氨挥发收集采用Zhao等^[20]的密闭室抽气法。收集装置由真空泵、密闭室、洗气瓶、节流阀等组成。密闭室为底部开放的圆柱形有机玻璃,内径14 cm,高15 cm。将密闭室嵌入移栽的2行水稻中间表层土壤中,内部留有8~10 cm高的空间。罩子顶部开有2个孔,其中1个是直径为25

mm 进气孔,连接进气管口到 2.5 m 高处,以减少田面交换空气对稻田氨挥发测定的影响;另一个为采气孔,与盛有 2% 硼酸的吸收瓶相连,吸收瓶再与真空泵相连。通过流量计将室内换气次数设置为 1 min 15~

20 次。抽气时段为上午 (8:00–10:00) 和下午 (14:00–16:00),抽气结束后将氨吸收液带回实验室测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。以这 4 h 的通量值作为每天氨挥发的平均通量计算全天的氨挥发量。

表 1 水稻生长季氮素养分投入量

Table 1 Nitrogen input in rice growing season

处理	化学氮投入量 (kg/hm^2)	秸秆氮还田量		氮投入总量 (kg/hm^2)
		秸秆干物质质量(t/hm^2)	秸秆含氮量(kg/hm^2)	
F1	216	1.47d(紫云英)	41.77d	257.77
F2	216	1.91c(紫云英)	74.68c	290.68
F3	216	4.57a(紫云英)	163.79a	379.79
F4	216	4.13b(紫云英)	138.43b	354.43
M	270	4.16b(小麦)	23.40e	293.40

F1、F2、F3、F4 分别表示紫云英旺长期(4月5日)、始花期(4月17日)、盛花期(4月29日)和初荚期(5月5日)翻压还田。M 为对照,表示轮作常规施氮。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

1.3.2 氨挥发相关计算 氨挥发通量计算公式:

$$F = (C \times V \times 6 \times 10^{-6}) / (\pi \times r^2 \times 10^{-4}) \quad (1)$$

式中, F 表示氨挥发速率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; C 表示吸收液中硼酸质量浓度, g/L ; V 表示稀硫酸吸收液体积; 6 表示换算为 1 d 排放通量; 10^{-6} 表示将 g 转换为 kg 和 ml 转换为 L ; r 表示收集氨挥发的密闭室半径; 10^{-4} 表示将 m^2 转换为 hm^2 。

氨挥发损失率计算公式:

$$R = F_w / f \quad (2)$$

式中, R 表示氨挥发损失率,%; F_w 表示氨挥发排放总量, kg/hm^2 ; f 表示化学氮肥施氮量, kg/hm^2 。

氨挥发排放强度计算公式:

$$Q_{\text{NH}_3} = E / Y \quad (3)$$

式中, Q_{NH_3} 为氨挥发(以氮计)排放强度, kg/t ; E 为单位面积氨挥发(以氮计)排放总量, kg/hm^2 ; Y 为单位面积水稻产量, t/hm^2 。

1.3.3 紫云英质量和水稻产量的测定 于旺长期、始花期、盛花期和初荚期在每个小区选定长势均匀的 1 m^2 样方,测定紫云英干物质质量,半微量蒸馏法测定全氮含量。于水稻成熟期在每个小区选定长势均匀的 2 m^2 样方,调查单位面积穗数、每穗粒数、结实率和千粒质量,计算水稻产量(14%含水量)。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 进行整理和作图,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析,采用 LSD 法($P<0.05$)进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 紫云英干物质质量和氮素养分还田量

随着紫云英翻压还田时期的推迟,其干物质质量和氮素养分还田量呈先增加后减少的趋势(表 1),处理间的差异均达显著水平,以 F3 处理紫云英氮素养分还田量($163.79 \text{ kg}/\text{hm}^2$)为最高。从表 1 还可以看出,紫云英翻压还田处理(F1、F2、F3 和 F4)的氮素养分还田量比 M 处理小麦秸秆氮素养分还田量($23.40 \text{ kg}/\text{hm}^2$)增加 $18.37 \sim 140.39 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。说明紫云英还田能显著增加秸秆氮素养分还田量,以盛花期为最佳。

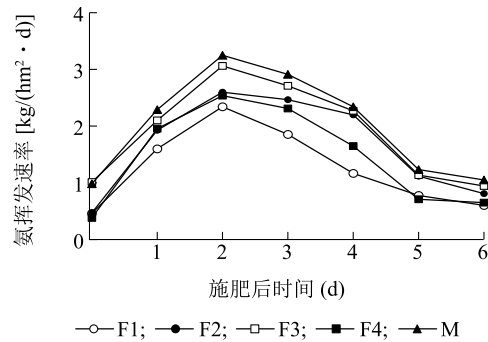
2.2 施肥后稻田氨挥发动态变化

由图 1 可以看出,不同处理施用基肥后土壤氨挥发排放速率动态变化基本一致,均呈先上升后降低的趋势,排放峰值出现在施肥后第 2 d, F1、F2、F3、F4、M 处理施用基肥后的排放峰值依次为 $2.34 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.60 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $3.06 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.54 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $3.25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, M 处理和 F3 处理的差异不显著,但均显著高于其他处理,排放峰值过后氨挥发速率逐步下降。不同处理施用基肥后氨挥发平均排放速率差异明显,表现为 $M > F3 > F2 > F4 > F1$ 。

不同处理施用分蘖肥后氨挥发排放速率动态变化较为一致(图 2),均在分蘖肥施用后第 1 d 达到排放峰值 [$3.82 \sim 4.59 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$],以 M 处理的排放峰值为最大,峰值过后各处理排放速率迅速下降,15 d 后排放速率较小且处理间基本无差

异。施分蘖肥后,不同紫云英翻压时期处理间氨挥发平均排放速率差异不显著,但均显著低于 M 处理。

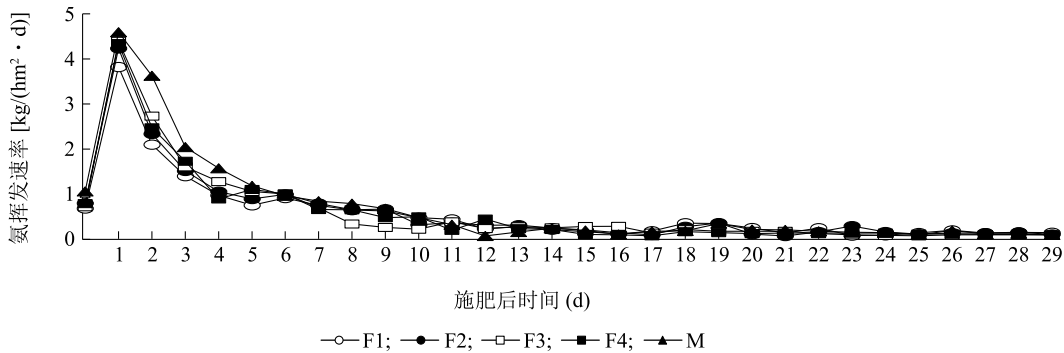
由图 3 可知,施用穗肥后,不同处理土壤氨挥发排放速率在施肥当天较低,随后快速上升,在施肥后第 2 d 排放速率达到峰值,处理间差异不显著。F1、F2、F3、F4、M 处理排放速率峰值依次为 $2.79 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.86 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.87 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.77 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $3.02 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,排放峰值过后各处理氨挥发排放速率快速下降,12 d 后排放量较少且处理间基本无差异。



F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。

图 1 施用基肥后不同处理氨挥发速率

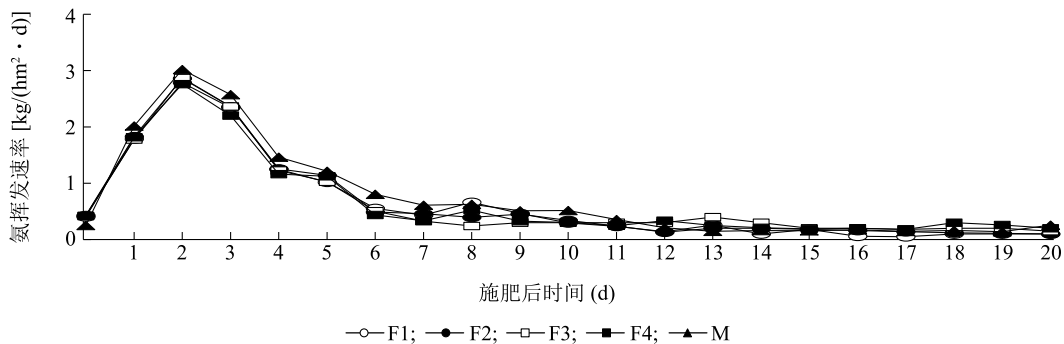
Fig.1 Ammonia volatilization rate after application of basal fertilizer



F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。

图 2 施用分蘖肥后不同处理氨挥发速率

Fig.2 Ammonia volatilization rate after topdressing at the tillering stage



F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。

图 3 施用穗肥后不同处理氨挥发速率

Fig.3 Ammonia volatilization rate after application of panicle fertilizer

2.3 氨挥发排放量和排放损失率

由表 2 可知,稻季氨挥发排放总量表现为 $M > F3 > F2 > F4 > F1$,4 个紫云英还田处理的氨挥发排放总量较 M 处理显著减少,减排 14.85%~27.77%,F3 处理氨挥发排放总量显著大于 F1 处理,F3 处理与 F4 处理差异不显著。氨挥发排放损失率以 F1 处理

为最低,除与 F4 处理差异不显著外,显著低于其他处理,F2、F3、F4、M 处理间氨挥发排放损失率的差异不显著。

从不同施肥阶段氨挥发累积排放量占全生育期的比例来看,以施用分蘖肥后为最高,达 37.18%~41.68%。F1、F2、F3、F4、M 处理施分蘖肥后氨挥发

累积排放量分别为 12.24 kg/hm²、13.22 kg/hm²、12.87 kg/hm²、12.70 kg/hm² 和 16.36 kg/hm², 4 个紫云英还田处理较 M 处理显著减少氨挥发排放总量 3.14~4.12 kg/hm²。说明减少施用分蘖肥后氨挥发是降低水稻生长季氨挥发排放总量的有效途径。

2.4 水稻产量与氨挥发排放强度

由表 3 可知, F1、F2、F3、F4、M 处理的水稻产量分别为 8.78 t/hm²、9.45 t/hm²、9.78 t/hm²、9.47 t/hm² 和 9.25 t/hm², F3 处理与 F2、F4 处理的水稻产量差异不显著, 但显著高于 M 处理, M 处理的产

量显著高于 F1 处理。说明紫云英适期翻压还田是维持水稻高产的关键。

氨挥发排放强度表示单位籽粒产量的氨挥发损失量, 是评价环境效应的重要指标之一。由图 4 可知, F1、F2、F3、F4、M 处理氨挥发排放强度分别为 3.35 kg/t、3.51 kg/t、3.54 kg/t、3.34 kg/t 和 4.40 kg/t, 以 M 处理氨挥发排放强度最大, 显著高于其他处理, 紫云英翻压还田处理间无显著差异。与 M 处理相比, F1、F2、F3、F4 处理氨挥发排放总量显著降低, 表明化学氮肥减施 20% 后紫云英翻压还田可显著降低氨挥发排放强度。

表 2 不同处理氨挥发损失量

Table 2 Ammonia volatilization loss in different treatments

处理	基肥		分蘖肥		穗肥		排放总量 (kg/hm ²)	排放损失率 (%)
	累积排放量 (kg/hm ²)	占排放总量 比例 (%)	累积排放量 (kg/hm ²)	占排放总量 比例 (%)	累积排放量 (kg/hm ²)	占排放总量 比例 (%)		
F1	7.21d	24.55c	12.24b	41.68a	9.92b	33.78a	29.37c	13.60b
F2	9.70bc	29.29b	13.22b	39.92ab	10.20b	30.80ab	33.12bc	15.33a
F3	11.35ab	32.78a	12.87b	37.18b	10.40b	30.04b	34.62b	16.03a
F4	8.51cd	26.93c	12.70b	40.19ab	10.39b	32.88ab	31.60bc	14.63ab
M	12.18a	29.96b	16.36a	40.24ab	12.12a	29.81b	40.66a	15.06a

F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 不同处理水稻产量及产量构成

Table 3 Yield and yield components of rice under different treatments

处理	穗数 ($\times 10^4$ 个, 1 hm ²)	穗粒数 (个)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)
F1	314.40b	124.65a	91.67a	25.73c	8.78c
F2	319.66b	125.49a	92.07a	26.03bc	9.45ab
F3	339.74a	126.22a	92.99a	26.19b	9.78a
F4	340.21a	126.86a	93.28a	26.78a	9.47ab
M	336.59a	125.98a	92.60a	25.99bc	9.25b

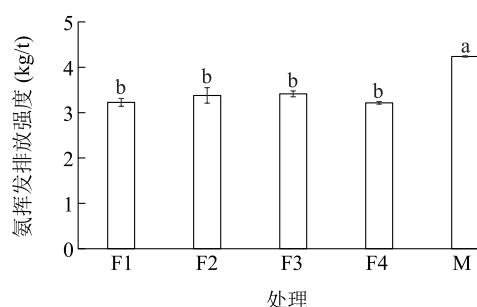
F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 紫云英翻压还田对稻季氨挥发的影响

本研究结果表明, 紫云英翻压还田并减少稻季化学氮肥用量 20%, 比稻麦轮作常规施氮处理减少氨挥发损失 14.85%~27.77%, 这与俞巧钢等^[11]的研究结果基本一致。本研究中紫云英盛花期和初荚期还田处理的化学氮肥用量比稻麦轮作常规施氮处理化学氮肥用量少 20%, 而加上秸秆还田的养分含量, 其总氮投入量比稻麦轮作常规施氮处理增加

86.39 kg/hm²、61.03 kg/hm², 氨挥发排放总量却减少 6.04 kg/hm²、9.06 kg/hm², 进一步证实了氮素来源对稻田氨挥发有显著影响^[8], 但紫云英翻压还田减少氨挥发的机理有待深入研究。本研究所有处理不同施肥阶段氨挥发累积排放量占全生育期的比例均以施分蘖肥后为最高, 说明降低施用分蘖肥来减少氨挥发对于水稻全生育减排的重要性。本研究中稻季紫云英还田处理的氨挥发排放总量为 29.37~34.62 kg/hm², 占氮肥施用量的 13.60%~16.03%, 结果高于胡安永等^[9]定位试验 5 年后的观测值, 即



F1、F2、F3、F4、M 见表 1 注。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理对氨挥发排放强度的影响

Fig.4 Effects of different treatments on emission intensity of ammonia volatilization

氨挥发排放总量 $9.90 \sim 21.20 \text{ kg/hm}^2$ (占氮肥施用量的 $7.10\% \sim 8.30\%$), 但明显低于谢志坚等^[10]在盆栽条件下的试验结果 (氨挥发排放总量 $79.80 \sim 93.40 \text{ kg/hm}^2$, 占氮肥施用量的 $21.90\% \sim 25.70\%$), 说明试验条件自身也是影响稻田氨挥发的重要因素。紫云英翻压还田以旺长期翻压处理稻田氨挥发排放总量为最低, 始花期、盛花期和初荚期翻压处理稻田间差异不显著, 处理间氨挥发的差异与秸秆氮素养分还田量密切相关, 在紫云英始花期后翻压还田, 后茬水稻季氨挥发排放总量并没有随紫云英氮素养分积累的明显提高而显著增加。

3.2 紫云英还田对水稻产量及氨排放强度的影响

众多研究结果表明, 在化学氮肥减施 $20\% \sim 40\%$ 的条件下, 紫云英还田可以保证水稻不减产或增产^[14-17], 甚至在氮肥减施 60% 条件下仍能显著增产^[21], 这可能与较高的紫云英鲜草还田量 (45 t/hm^2) 有关, 陈静蕊等^[15]的研究结果显示, 在氮肥减施 20% 或 40% 的条件下水稻产量随紫云英还田量的增加而增加, 这表明, 紫云英还田量的多少可能决定了氮肥的减施效果。从本研究紫云英不同翻压还田时期对水稻产量的影响来看, 在氮肥减施 20% 的条件下, 还田时期过早 (旺长期) 显著降低水稻产量, 始花期、盛花期和初荚期翻压还田较对照稻麦轮作常规施氮处理均有不同程度增产潜力, 其中盛花期翻压还田处理的水稻产量与对照稻麦轮作常规施肥处理差异达到了显著水平。本研究的结果和陈静蕊等^[15]的研究结果一致, 即在化学氮肥减施 20% 的条件下, 增加紫云英还田量有利于提高水稻产量。因此, 生产实践中往往选择紫云英干物质质量和氮

素养分含量最高的盛花期作为翻压还田的最佳时期^[18]。综合水稻产量, 本研究采用“氨挥发排放强度”这一指标来评价不同处理对氨挥发排放的影响。研究结果表明, 紫云英翻压还田时期处理间无显著差异, 较稻麦轮作常规施氮处理降低氨挥发排放强度 $19.42\% \sim 24.03\%$, 说明在化学氮肥减施 20% 后, 紫云英翻压还田可有效降低氨挥发排放强度。

4 结论

本研究结果表明, 紫云英不同时期翻压还田造成了干物质质量和氮素养分还田量的差异, 影响了稻季氨挥发和水稻产量。随着紫云英翻压还田时期的推迟, 其氮素养分还田量、水稻产量、氨挥发量均呈先增加后减少的趋势。与对照稻麦轮作常规施氮处理相比, 紫云英还田处理显著降低稻季氨挥发量和氨挥发排放强度, 始花期至初荚期还田有利于提高水稻产量。综合分析不同翻压时期秸秆氮素养分积累量、水稻产量和氨挥发损失量, 建议在本试验条件下紫云英还田时期选择在盛花期至初荚期, 同时配施化学氮肥 (纯氮) 216 kg/hm^2 , 能有效保证水稻高产, 同时缓解水稻生产对环境的负面影响。本研究结果还表明紫云英还田对稻田氨挥发有明显减排作用, 但其减排机制有待深入研究。

参考文献:

- [1] 史琛, 金涛, 陈春兰, 等. 中国粳稻全要素生产率增长的时空分异格局[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1575-1582.
- [2] 康楷, 刘丽华, 郑桂萍, 等. 不同叶面肥对寒地粳稻产量及品质的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(3): 558-564.
- [3] 王薇, 张耀玲, 郝兴顺, 等. 不同增效剂与氮肥减量配施在水稻上的应用效果[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 84-87.
- [4] 王琳, 管永祥, 陈震, 等. 不同种类绿肥养分积累比较及其对水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1139-1143.
- [5] YANG W L, QUE H L, WANG S W, et al. High temporal resolution measurements of ammonia emissions following different nitrogen application rates from a rice field in the Taihu Lake Region of China [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113489.
- [6] YANG Y, LI N, NI X Y, et al. Combining deep flooding and slow-release urea to reduce ammonia emission from rice fields [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118745.
- [7] 邢月, 沙之敏, 卑志钢, 等. 不同施肥方式对稻田氨挥发特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 313-318.
- [8] 杨国英, 郭智, 刘红江, 等. 稻田氨挥发影响因素及其减排措

- 施研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1912-1919.
- [9] 胡安永, 孙 星, 刘 勤, 等. 太湖地区不同轮作方式对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 275-279.
- [10] 谢志坚, 涂书新, 徐昌旭, 等. 紫云英还田对单季稻田氨挥发的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(8): 1576-1584.
- [11] 俞巧钢, 叶 静, 符建荣, 等. 不同有机物料还田对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2011(4): 908-909, 913.
- [12] 杨滨娟, 黄国勤, 王 超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1209-1216.
- [13] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461.
- [14] 周 兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 减量施肥下紫云英与稻草协同还田利用对双季稻产量和经济效益的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 469-474.
- [15] 陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 280-287.
- [16] 程会丹, 鲁艳红, 聂 军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1259-1270.
- [17] 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.
- [18] 焦 彬, 顾荣申, 张学上, 等. 中国绿肥[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 王 琳, 管永祥, 陈 震, 等. 不同种类绿肥养分积累比较及其对水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1139-1143.
- [20] ZHAO X, ZHOU Y, WANG S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76: 1068-1078.
- [21] 王建红, 曹 凯, 张 贤. 紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 888-896.

(责任编辑: 陈海霞)