

紫云英稻秆联合还田与氮肥减量对水稻产量及氨挥发的影响

王吕, 吴玉红, 秦宇航, 郝兴顺, 李硕, 淡亚彬, 崔月贞

引用本文:

王吕, 吴玉红, 秦宇航, 郝兴顺, 李硕, 淡亚彬, 崔月贞. 紫云英稻秆联合还田与氮肥减量对水稻产量及氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 462–472.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果

肖其亮, 朱坚, 彭华, 简燕, 纪雄辉

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2788–2800 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0318>

小麦秸秆还田条件下钾肥减量对水稻产量及养分利用的影响

朱远芃, 史燕捷, 管浩, 叶新新, 郜红建, 华胜, 王宜坤

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2596–2605 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0289>

紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻Cd迁移累积的影响

喻成龙, 汤建, 郑琴, 倪国荣, 谢志坚, 荣勤雷, 郭乃嘉, 王惠明, 周春火

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2554–2560 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0759>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 郜红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响

李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 段婧婧, 薛利红, 杨林章

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1623–1632 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0084>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王吕, 吴玉红, 秦宇航, 等. 紫云英稻秆联合还田与氮肥减量对水稻产量及氨挥发影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 462–472.

WANG L, WU Y H, QIN Y H, et al. Effects of rice stalk mulching combined with green manure retention and nitrogen reduction on rice yield and ammonia emission[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(2): 462–472.



开放科学 OSID

紫云英稻秆联合还田与氮肥减量对水稻产量及氨挥发的影响

王吕¹, 吴玉红¹, 秦宇航¹, 郝兴顺¹, 李硕^{2*}, 淡亚彬¹, 崔月贞¹

(1. 汉中市农业技术推广与培训中心, 陕西 汉中 723000; 2. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心/自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:为研究紫云英-水稻轮作体系中紫云英稻秆联合还田与氮肥减量配施对水稻产量和氨挥发的影响,连续两个轮作季(2019—2021年)在陕西汉中开展田间试验,试验设置4个处理:冬闲稻秆不还田+常规施氮处理,即对照处理(CK);冬作紫云英稻秆还田+常规施氮处理(GRN₁₀₀);冬作紫云英稻秆还田+氮肥减量20%处理(GRN₈₀);冬作紫云英稻秆还田+氮肥减量30%处理(GRN₇₀)。采用通气式氨挥发收集装置监测水稻生育期间氨挥发特征。结果表明:与CK相比,紫云英稻秆联合还田各处理可提高“黄华占”籽粒产量,产量由高到低的顺序为GRN₈₀、GRN₇₀、GRN₁₀₀,其中GRN₈₀和GRN₇₀处理相较于CK处理的年均增幅分别为7.66%和6.37%。冠层氨挥发主要发生在水稻施肥30 d以后,其中水稻抽穗期至成熟期挥发速率较大。土壤氨挥发主要发生在水稻施肥后16 d内,在施肥后第2天达到峰值,2020年和2021年分别为0.53 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.58 kg·hm⁻²·d⁻¹。与CK相比,GRN₈₀处理显著降低水稻全生育期冠层氨挥发累积量和单位产量氨挥发强度,二者分别下降58.73%和57.14%。紫云英稻秆联合还田较CK处理可显著降低水稻全生育期土壤氨挥发累积量和单位产量氨挥发强度,其值由高到低依次顺序为GRN₁₀₀、GRN₇₀、GRN₈₀。就水稻全生育期氨挥发累积量和单位产量氨挥发强度而言,紫云英稻秆联合还田较CK处理可显著降低2.88%~8.32%和5.26%~13.88%,其中GRN₈₀处理降幅最大。相关分析表明,田面水铵态氮浓度与各处理土壤氨挥发速率呈显著正相关,与GRN₈₀和GRN₇₀处理冠层氨挥发速率呈显著负相关。研究表明,紫云英和稻秆联合还田与氮肥减量20%或30%配施,可显著提高水稻产量,减少稻田氨挥发损失,是适宜汉中地区兼顾水稻高产和环境友好的栽培措施。

关键词:紫云英-水稻轮作;秸秆还田;氮肥减量;水稻产量;氨挥发

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0462-11 doi:10.11654/jaes.2023-0115

Effects of rice stalk mulching combined with green manure retention and nitrogen reduction on rice yield and ammonia emission

WANG Lü¹, WU Yuhong¹, QIN Yuhang¹, HAO Xingshun¹, LI Shuo^{2*}, DAN Yabin¹, CUI Yuezhen¹

(1. Hanzhong Agricultural Technology Extension and Training Center, Hanzhong 723000, China; 2. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Anhui Province Engineering and Technology Research Center of Intelligent Manufacture and Efficient Utilization of Green Phosphorus Fertilizer, Key Laboratory of JiangHuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Ministry of Natural Resources, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: A field experiment was conducted in Hanzhong, Shaanxi Province for two consecutive rotation seasons (2019—2021) to study

收稿日期:2023-02-21 录用日期:2023-04-21

作者简介:王吕(1993—),女,山西运城人,硕士研究生,从事植物营养与调控研究。E-mail:wanglv060693@163.com

*通信作者:李硕 E-mail:muzishiye9011@163.com

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2022ZDLNY02-06)

Project supported: Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China(2022ZDLNY02-06)

the integrated effect of milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) straw return with nitrogen reduction on rice yield and ammonia volatilization in milk vetch-rice rotation system. The four treatments were: no returning of rice straw in winter accompanied by conventional N application, namely, control (CK); co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw in winter accompanied by conventional N application (GRN₁₀₀); reducing 20% of N application rate based on the GRN₁₀₀ (GRN₈₀); and reducing 30% of N application rate based on the GRN₁₀₀ (GRN₇₀). A ventilation NH₃ volatilization collection device monitored the characteristics of ammonia (NH₃) volatilization during the rice growth periods. The results showed that: compared with the CK, the co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw in winter increased the grain yield of Huanghuazhan in the order of GRN₈₀ > GRN₇₀ > GRN₁₀₀. In particular, the average annual increase of GRN₈₀ and GRN₇₀ was 7.66% and 6.37%, respectively, relative to the CK. The NH₃ volatilization in the canopy mainly occurred after 30 days of fertilization, with a higher rate in the periods from the heading to maturity stage. The soil NH₃ volatilization occurred mainly within 16 days after fertilization and peaked on the second day after fertilization, which was 0.53 kg·hm⁻²·d⁻¹ and 0.58 kg·hm⁻²·d⁻¹ in 2020 and 2021, respectively. Compared with the CK, the GRN₈₀ significantly reduced both the accumulation value and intensity of canopy NH₃ volatilization by 58.73% and 57.14%, respectively, during the entire rice growth period. The accumulation value and intensity of soil NH₃ volatilization were also significantly reduced under the co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw in winter during the whole rice growth periods relative to the CK, with the order of GRN₁₀₀ > GRN₇₀ > GRN₈₀. In terms of the accumulation value and intensity of NH₃ volatilization during the entire rice growth period, compared with the CK, the co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw in winter significantly reduced them by 2.88%–8.32% and 5.26%–13.88%, respectively, with the highest reduction rate under the GRN₈₀. Correlation analysis showed that the NH₄⁺-N concentration in surface water was significantly positively correlated with soil NH₃ volatilization rate under every treatment, while it was significantly negatively correlated with the canopy NH₃ volatilization rate under GRN₈₀ and GRN₇₀. The research shows that the co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw in winter accompanied by reducing 20% or 30% N application rate based on the conventional N application rate, can significantly increase rice yield and reduce NH₃ volatilization. It thus may be a suitable rice cultivation strategy for high grain yields and environmental friendliness.

Keywords: Chinese milk vetch – rice rotation; straw return; nitrogen reduction; rice grain yield; ammonia volatilization

氮肥在保证粮食安全方面发挥着重要作用,但我国农田氮肥过量施用较为普遍,氮肥利用率低、氨挥发等引发的环境问题尤为突出。全球每年因施用化学氮肥和有机氮肥产生的氨挥发损失占氮肥施用量的23%和14%^[1]。氨挥发损失量的90%直接进入大气,造成大气氧化活性和空气中碱性物质含量增加,加剧大气污染^[2–3],如雾霾^[4]。同时大气中的氨还可以通过氮沉降的方式造成陆地生态系统氮超负荷,引起水体富营养化^[5],从而影响农田生态系统的稳定性。氨挥发是稻田土壤氮素损失的主要途径之一,占施氮量的10%~40%^[6],可影响稻田生态系统的生产力和水稻氮素利用率^[7]。农业产生的氨是氨排放的主要来源^[8],氮肥过量施用引起的氨挥发是大气氨的重要来源,农田氨减排已成为研究热点。因此,在保证粮食产量和氮肥高效利用的前提下,如何通过制定合理的施肥和栽培管理措施来减少稻田氨挥发损失,进而缓解稻田农业环境压力和减缓气候变化极其重要。

绿肥稻秆协同还田是南方稻区水稻绿色栽培的重要措施,大量研究表明紫云英稻秆联合还田可以培肥地力,提高水稻产量,节肥增效潜力大^[9]。有研究发现,秸秆还田能增加土壤有机质,有机质分解可产

生有机酸,其形成的腐殖质可以提高土壤吸附NH₄⁺的能力,同时其也降低了稻田土壤的pH值,进而抑制土壤氨挥发^[10]。也有研究发现,秸秆还田后形成的有机质,减少了土壤对铵态氮的固定,并且秸秆降解后产生的有机基团能够中和稻田水体中酸根离子,使水体pH值增加,从而对氨挥发起到促进作用^[11–12]。紫云英是一种优质的稻田冬闲绿肥,其根系通过共生固氮作用可增加土壤中的氮素^[13];冬闲种植紫云英能有效控制农田杂草并覆盖裸露的地面,减少水稻田氨挥发通量^[14]。紫云英还田还可为土壤微生物提供丰富的碳源和氮源类物质,促进土壤中无机氮的有机化过程,从而减少土壤中无机氮数量,最终降低氨挥发累积排放量^[15]。因此,紫云英生长期间能增加土壤养分循环中的氮素以及减少氮素的损失,进而增加土壤氮素含量。紫云英、稻秆还田可以提高土壤理化性状^[16–17],二者是稻田土壤重要的有机物料,目前有关绿肥稻秆联合还田的研究多关注土壤养分及水稻产量,而关于绿肥稻秆协同还田对土壤和冠层氨挥发的研究较少。有机无机配施可以减少稻田氨挥发风险^[18],因此明确稻秆与紫云英协同还田及替代部分氮肥后水稻增产趋势、土壤肥力和氨挥发变化特征,可为水稻减肥、减

排、增产和稻田地力提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019—2021年在陕西省汉中市农业技术推广与培训中心汉台区韩塘水稻综合试验基地进行,该区属亚热带湿润季风气候,年均气温14.0℃,年降雨量800~1 000 mm,空气湿度82%,水稻全生育期气象数据如图1所示。供试土壤类型为潜育型水稻土。水稻移栽前土壤理化性状为pH 5.19(水土比为2.5:1),有机质18.78 g·kg⁻¹,全氮1.25 g·kg⁻¹,全磷0.95 g·kg⁻¹,全钾14.16 g·kg⁻¹,速效磷35.32 mg·kg⁻¹,速效钾78.91 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设4个处理:(1)对照处理(CK),即冬闲稻秆不还田且常规施氮;(2)冬作紫云英稻秆还田+常规施氮(GRN₁₀₀);(3)冬作紫云英稻秆还田+氮肥减量20%(GRN₈₀);(4)冬作紫云英稻秆还田+氮肥减量30%(GRN₇₀)。每个处理重复3次,小区面积20 m²(4 m×5 m)。

2020年和2021年供试水稻品种均为“黄华占”,

两年供试紫云英品种均为“闽紫7号”,水稻常规施肥为纯氮180 kg·hm⁻²、K₂O 105 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²,磷钾肥一次性基施,氮肥基追比为7:3,减氮处理仅在基肥中减少相应比例。供试肥料为洋丰掺混肥料(N:P₂O₅:K₂O=19:19:19)、尿素(含N46%)和氯化钾(含K₂O 60%)。水稻收获后免耕播种紫云英,稻秆粉碎覆盖地表还田,翌年紫云英盛花期,将稻秆和紫云英联合翻压还田,每个处理紫云英盛花期翻压还田鲜草量为18 000 kg·hm⁻²。田间管理方式见表1,肥料用量、稻秆和紫云英还田量及氮含量见表2。

1.3 测定项目与方法

稻田土壤及冠层挥发的氨采用通气式氨挥发收集装置于田间原位采集^[9],将两块直径为15 cm、厚度为5 cm的海绵用0.8 mol·L⁻¹磷酸和0.7 mol·L⁻¹甘油的混合溶液浸泡后置于有机玻璃管(内径15 cm、高20 cm)中,装置安置在播种行上和播种行间用来吸收植物及土壤挥发的氨。水稻移栽后即安装装置,采样时间为9:00—12:00。水稻移栽后每隔2 d采样,15 d后视氨挥发量调整采样频率,遇雨天顺延,直至收获。海绵吸收液中的氨用1 mol·L⁻¹ KCl浸提,连续流动分析仪(AA3)测定。氨挥发速率和累积量计算方法均

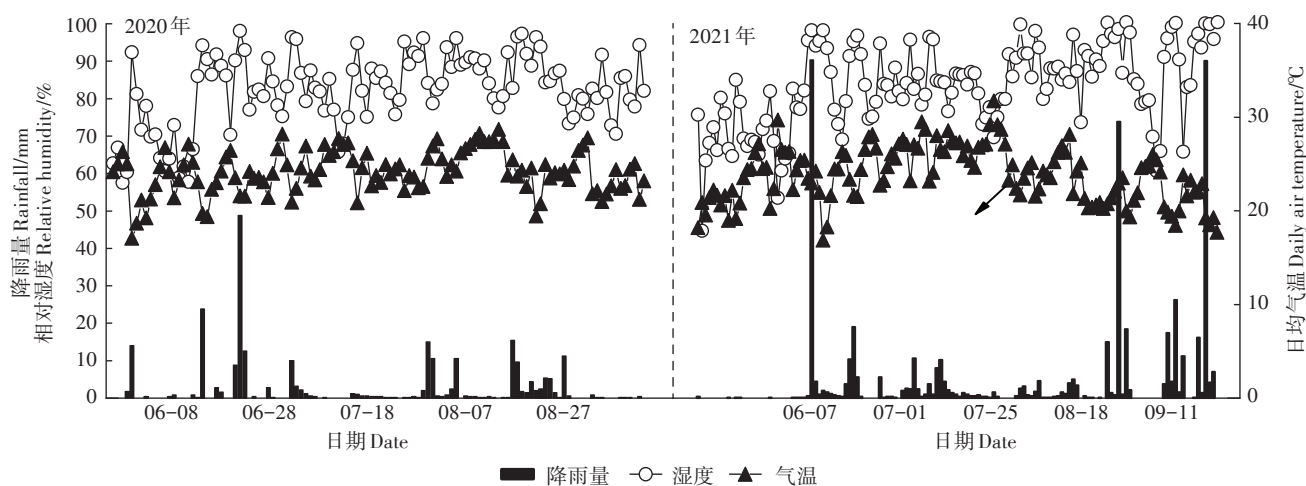


图1 2020年和2021年水稻季气温、相对湿度及降雨量

Figure 1 Rainfall, relative humidity and daily air temperature during 2020 and 2021 rice stage

表1 水稻和紫云英的田间管理

Table 1 Field management of rice and Chinese milk vetch

年份 Year	水稻 Rice				紫云英 Chinese milk vetch	
	播种时间 Sowing date	移栽时间 Transplanting date	基肥时间 Base fertilizer date	追肥时间 Topdressing date	播种时间 Sowing date	翻压时间 Incorporating date
2019—2020年	2020-04-10	2020-05-25	2020-05-25	2020-06-01	2019-09-28	2020-04-24
2020—2021年	2021-04-10	2021-05-26	2021-05-24	2021-06-03	2020-09-30	2021-04-26

表2 肥料施用量、稻秆紫云英还田量及氮含量

Table 2 Fertilizer application, straw yield and Chinese milk vetch return and nitrogen content

处理 Treatment	基肥用量 Base-manure amounts/(kg·hm ⁻²)			追肥(N)用量 Topdressing amounts/ (kg·hm ⁻²)	秸秆 Straw				紫云英 Chinese milk vetch			
	N	K ₂ O	P ₂ O ₅		2020年		2021年		2020年		2021年	
					还田量 Return amount/ (t·hm ⁻²)	氮含量 N content/ (g·kg ⁻¹)	还田量 Return amount/ (t·hm ⁻²)	氮含量 N content/ (g·kg ⁻¹)	还田量 Return amount/ (t·hm ⁻²)	氮含量 N content/ (g·kg ⁻¹)	还田量 Return amount/ (t·hm ⁻²)	氮含量 N content/ (g·kg ⁻¹)
CK	126	105	90	54	—	—	—	—	—	—	—	—
GRN ₁₀₀	126	105	90	54	18.15	8.18	17.07	10.10	18.00	30.31	18.00	31.83
GRN ₈₀	101	105	90	43	20.39	7.43	18.59	9.34	18.00	29.86	18.00	31.47
GRN ₇₀	88	105	90	38	18.54	7.67	17.22	8.52	18.00	28.73	18.00	30.26

参考文献[19]。水稻移栽后30 d采集田面水样品,采样时间与氮挥发采集时间一致。田面水pH采用便携式pH计测定,田面水铵态氮浓度采用连续流动分析仪(AA3)测定。

1.4 数据计算与处理

单位产量氮挥发强度(kg·t⁻¹)=单位面积氮挥发累积量(kg·hm⁻²)/单位面积作物产量(t·hm⁻²)^[20]。

数据应用Excel 2010和SAS 8.1统计分析软件进行处理,使用双因素完全随机区组设计方差分析和最小显著性差异法(LSD)对数据均值进行多重比较,使用Origin 2017绘图。

2 结果与分析

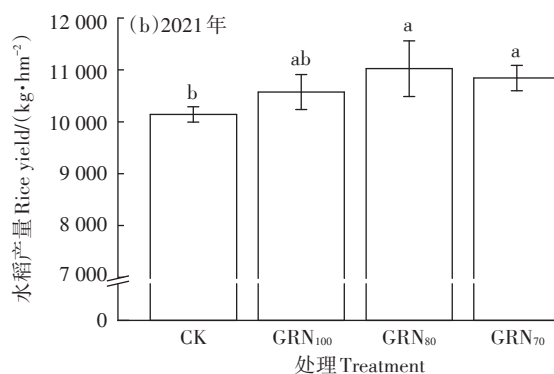
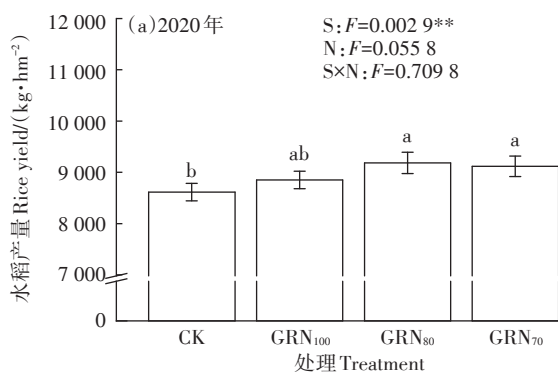
2.1 对水稻产量的影响

如图2所示,水稻产量年度间差异极显著($P<0.01$)。2020年和2021年水稻平均产量分别为8 942.75 kg·hm⁻²和10 645.74 kg·hm⁻²,2021年较2020年增产

19.04%。与CK相比,紫云英稻秆联合还田各处理提高了黄华占籽粒产量,产量由高到低的顺序为GRN₈₀>GRN₇₀>GRN₁₀₀,其中GRN₈₀和GRN₇₀处理显著高于CK($P<0.05$),两年平均增幅分别为7.66%和6.37%。

2.2 对水稻产量构成要素的影响

氮肥显著影响水稻有效穗、每穗实粒数和千粒质量,年度间有效穗、每穗实粒数和千粒质量差异显著或极显著,每穗实粒数和千粒质量受氮肥和年度交互作用影响显著(表3)。2019—2020年,紫云英秸秆协同还田下各处理间有效穗显著高于CK($P<0.05$),GRN₁₀₀处理每穗实粒数显著高于其他处理,增幅为22.76%~24.76%,GRN₈₀处理千粒质量显著高于CK,增幅为6.60%。2020—2021年,GRN₈₀处理有效穗显著高于其他各处理,增幅为7.00%~9.76%,GRN₁₀₀处理每穗实粒数显著高于CK,增幅为10.62%,GRN₈₀处理千粒质量显著高于CK,增幅为1.94%。两年度间,GRN₈₀处理可以显著提高水稻有效穗7.00%~29.32%



方柱上方不同小写字母表示处理间在5%水平差异显著,*: $P<0.05$;**: $P<0.01$;S:年度;N:氮肥;S×N:年度和氮肥的交互作用。下同。
Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 5% level,*: $P<0.05$;**: $P<0.01$;S:season;N:nitrogen;
S×N:interaction between annual and nitrogen fertilizer. The same below.

图2 水稻产量变化

Figure 2 Rice yield change

表3 不同处理对水稻产量构成因素的影响

Table 3 Changes in rice yield components under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	有效穗 Effective panicle/(10 ⁴ ·hm ⁻²)	每穗实粒数 Filled grain number per panicle	千粒质量 Thousand seed weight/g	结实率 Seed setting rate/%
2020年	CK	222.41±8.12c	141.30±0.17b	21.51±0.41b	95.83±0.64a
	GRN ₁₀₀	264.98±8.23ab	176.21±3.77a	22.12±0.63ab	94.88±1.21a
	GRN ₈₀	287.62±4.91a	141.24±7.03b	22.93±0.45a	94.84±0.65a
	GRN ₇₀	259.35±11.24b	143.54±11.89b	22.52±0.21ab	95.41±0.36a
2021年	CK	297.93±11.07b	153.16±8.63b	21.17±0.24b	96.07±0.14a
	GRN ₁₀₀	305.28±7.60b	169.44±12.70a	21.27±0.07ab	96.18±1.52a
	GRN ₈₀	326.65±4.05a	167.12±16.35ab	21.58±0.19a	96.46±0.62a
	GRN ₇₀	297.59±6.58b	167.86±13.35ab	21.31±0.16ab	96.19±1.00a
方差分析 ANOVA					
年度 Season(S)		*	*	**	NS
氮肥 Nitrogen(N)		**	**	**	NS
年度×氮肥 S×N		NS	*	*	NS

注:同列数据后不同小写字母表示同类因素的处理间差异显著($P<0.05$)。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; NS:无显著性。下同。
Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different between the treatments at the 0.05 probability level for the same factor. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; NS: no significance. The same below.

和千粒质量1.94%~6.60%,GRN₁₀₀可以显著提高每穗实粒数10.62%~24.76%。

2.3 对土壤和冠层氨挥发的影响

2020年土壤氨挥发主要发生在施肥后16 d内,且在施基肥(5月25日)和追肥(6月1日)后土壤氨挥发速率均波动较大(图3)。施基肥后第2天,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理土壤氨挥发速率分别为0.57、0.55 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.53 kg·hm⁻²·d⁻¹,均高于CK的0.48 kg·hm⁻²·d⁻¹。施追肥后第2天,CK和GRN₁₀₀处理土壤氨挥发速率均达到0.56 kg·hm⁻²·d⁻¹,高于GRN₈₀的0.53 kg·hm⁻²·d⁻¹和GRN₇₀的0.47 kg·hm⁻²·d⁻¹。施肥后16 d内,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理土壤氨挥发累积量分别为5.03、4.72 kg·hm⁻²和4.80 kg·hm⁻²,均低于CK的5.19 kg·hm⁻²,紫云英稻秆协同还田处理施肥

后16 d土壤氨挥发累积量占到施氮量的2.79%~3.81%。施肥16 d后,各处理土壤氨挥发速率有所波动,但波动较小,为0.06~0.23 kg·hm⁻²·d⁻¹。

2021年土壤氨挥发主要发生在施肥后16 d(图4),施基肥后2 d各处理土壤氨挥发速率达到峰值,表现为GRN₁₀₀>GRN₈₀>GRN₇₀>CK,其值分别为0.60、0.59、0.57 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.54 kg·hm⁻²·d⁻¹。施追肥后2 d,土壤氨挥发速率波动明显,GRN₁₀₀为0.54 kg·hm⁻²·d⁻¹,高于GRN₈₀和GRN₇₀。施肥后16 d内,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理土壤氨挥发累积量分别为6.46、5.98 kg·hm⁻²和5.49 kg·hm⁻²,全生育期分别为16.92、16.47 kg·hm⁻²和16.21 kg·hm⁻²,均低于CK的17.08 kg·hm⁻²。施肥16 d后土壤氨挥发速率在0.07~0.18 kg·hm⁻²·d⁻¹之间波动。

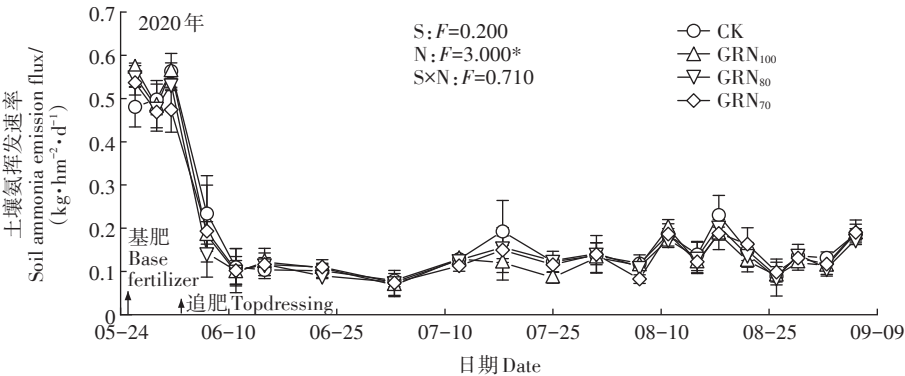


图3 2019—2020年土壤氨挥发速率变化

Figure 3 Changes of soil ammonia emission flux in 2019—2020

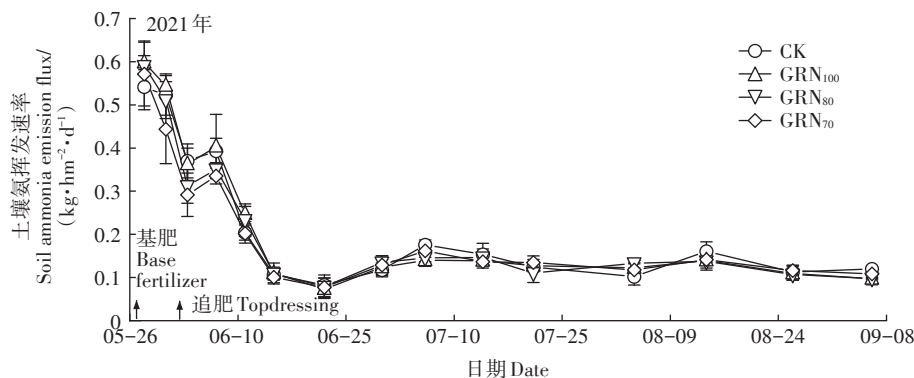


图4 2020—2021年土壤氨挥发速率变化

Figure 4 Changes of soil ammonia emission flux in 2020—2021

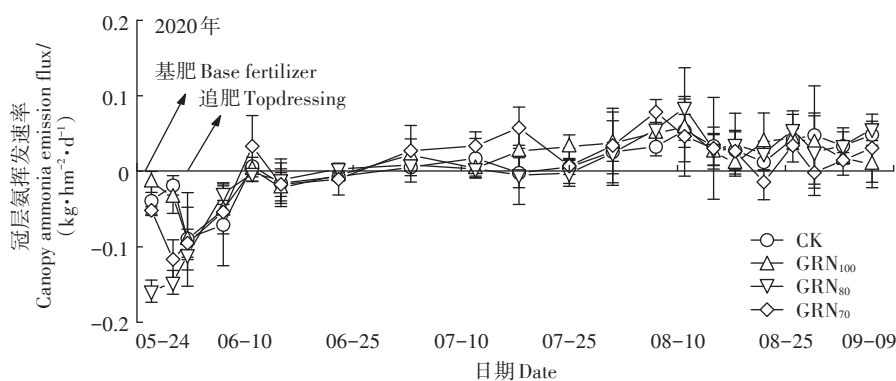


图5 2019—2020年冠层氨挥发速率变化

Figure 5 Changes of canopy ammonia emission flux in 2019—2020

冠层氨挥发速率随生育期的推进表现有所不同(图5)。在施肥后30 d内,各处理冠层氨挥发速率主要以负值为主,说明此阶段以氨吸收为主。施基肥后第2天,GRN₈₀处理冠层氨吸收速率达0.16 kg·hm⁻²·d⁻¹,高于其他各处理。施追肥后第2天,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理的冠层氨吸收速率分别为0.09、0.11 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.09 kg·hm⁻²·d⁻¹。施肥后15 d内,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理冠层氨吸收累积量分别为2.54、4.32 kg·hm⁻²和3.54 kg·hm⁻²,CK为2.84 kg·

hm⁻²。施肥30 d后冠层主要以氨气释放为主,从8月1日开始冠层氨挥发速率波动较为明显,此时期为水稻抽穗期。从水稻抽穗期至成熟期,GRN₁₀₀、GRN₈₀和GRN₇₀处理冠层氨释放量分别为4.16、4.95 kg·hm⁻²和3.72 kg·hm⁻²,CK为4.13 kg·hm⁻²。

2.4 对土壤、冠层及稻田氨挥发累积量和氨挥发强度的影响

如表4所示,2019—2020年紫云英稻秆协同还田下,与CK相比,GRN₈₀处理可以显著减少冠层氨挥发

表4 2019—2020年全生育期氨挥发累积量及单位产量氨挥发强度变化

Table 4 Changes in the accumulative ammonia volatilization throughout the growth with 2019—2020 stage

处理 Treatment	冠层 Canopy		土壤 Soil		稻田 Rice yield	
	氨挥发累积量 Accumulative canopy ammonia volatilization/ (kg·hm ⁻²)	单位产量氨挥发强度 Ammonia emission per unit area yield/(kg·t ⁻¹)	氨挥发累积量 Accumulative soil ammonia volatilization/ (kg·hm ⁻²)	单位产量氨挥发强度 Ammonia emission per unit area yield/(kg·t ⁻¹)	氨挥发累积量 Accumulative rice ammonia volatilization/ (kg·hm ⁻²)	单位产量氨挥发强度 Ammonia emission per unit area yield/(kg·t ⁻¹)
CK	0.63±0.35ab	0.07±0.04ab	17.40±0.73a	2.02±0.10a	18.03±0.38a	2.09±0.07a
GRN ₁₀₀	1.18±0.25a	0.13±0.03a	16.33±0.47b	1.84±0.09b	17.51±0.66ab	1.98±0.10ab
GRN ₈₀	0.26±0.48b	0.03±0.05b	16.28±0.36b	1.77±0.02b	16.53±0.81b	1.80±0.05c
GRN ₇₀	0.95±0.28ab	0.10±0.03a	16.32±0.21b	1.79±0.06b	17.27±0.10ab	1.89±0.03bc

($P<0.05$),降低冠层氨挥发累积量,CRN₈₀处理单位产量氨挥发强度也最低,为 $0.03\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 。紫云英稻秆协同还田各处理土壤氨挥发累积量在 $16.28\sim16.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,均显著低于CK($P<0.05$),降幅为 $6.15\%\sim6.44\%$,说明有机物料还田可以降低稻田土壤的氨挥发风险,单位产量土壤氨挥发强度在 $1.77\sim1.84\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 之间,显著低于CK。CRN₈₀处理稻田氨挥发累积量显著低于CK($P<0.05$),降幅为 8.32% ,CRN₈₀、CRN₇₀处理与CK相比均能显著减少单位产量氨挥发强度。2020—2021年,紫云英稻秆协同还田各处理土壤氨挥发累积量在 $16.12\sim16.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,土壤氨挥发强度在 $1.48\sim1.67\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 之间,且CRN₈₀、CRN₇₀处理显著低于CK($1.67\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$)。

2.5 对田面水 pH 和铵态氮浓度的影响

2020年和2021年水稻移栽后30 d田面水 pH 均表现出先降低后升高的趋势(图6),且在 $7.90\sim8.59$ 之间波动,各处理之间pH差异均不显著。

田面水铵态氮浓度在移栽后12 d内波动明显,施基肥和追肥后均出现明显波动(图7)。2019—2020年水稻移栽后第2天和第7天铵态氮浓度波动较为明显(图7a),且紫云英稻秆协同还田各处理田面水铵态氮浓度变化趋势均表现为 $\text{GRN}_{100}>\text{GRN}_{80}>\text{GRN}_{70}$,移栽后第2天 GRN_{100} 、 GRN_{80} 和 GRN_{70} 处理田面水铵态氮浓度分别为 15.55 、 $10.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第7天分别为 10.09 、 $8.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,移栽10 d之后各处理田面水铵态氮浓度变化幅度较小。2020—2021年度水稻移栽后第2天(图7b),紫云英稻秆协同还田各处理田面水铵态氮浓度变化趋势均表现为 $\text{GRN}_{100}>\text{GRN}_{80}>\text{GRN}_{70}$,铵态氮浓度分别为 16.44 、 $10.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,移栽第12天时分别为 5.85 、 $4.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,12 d后田面水铵态氮浓度波动较小。两年度间,田面水铵态氮浓度变动主要发生在水稻移栽后12 d内,且均表现为 $\text{GRN}_{100}>\text{GRN}_{80}>\text{GRN}_{70}$ 。

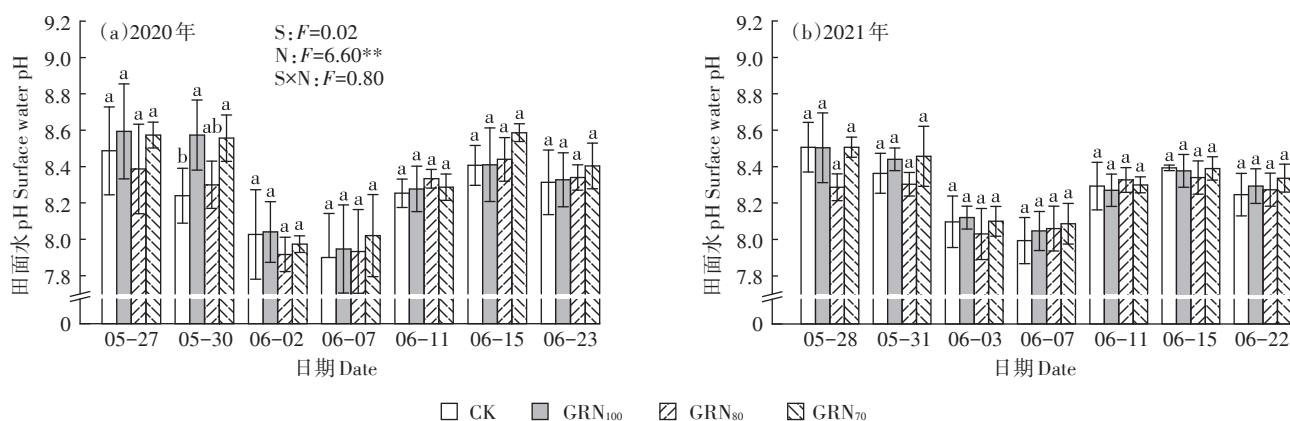


图6 水稻移栽后30 d田面水 pH 变化

Figure 6 Changes of paddy field water pH 30 days after rice transplanting

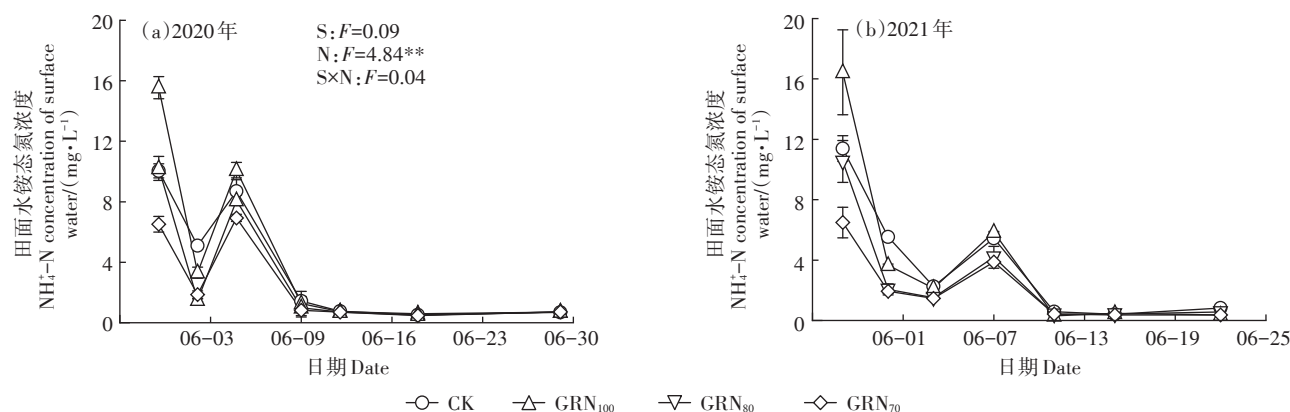


图7 水稻移栽后30 d田面水铵态氮浓度变化

Figure 7 Changes of surface water ammonium nitrogen concentration 30 days after rice transplanting

田面水pH与土壤和冠层氨挥发速率均无显著线性关系(图8a和图8c)。随着田面水铵态氮浓度的增加,各处理土壤氨挥发速率也增加(图8b),且均达到极显著水平($P<0.01$);GRN₈₀和GRN₇₀处理冠层氨挥发速率降低(图8d),分别达到极显著或显著水平。

3 讨论

3.1 紫云英稻秆协同还田对水稻产量的影响

紫云英-水稻轮作模式利用紫云英自身固氮为后茬水稻提供氮素进而增加水稻产量^[21],且在紫云英替代20%~40%化肥下,仍能保证水稻稳产^[22]。本研究中,紫云英稻秆协同还田下常规施氮处理可以显著提高水稻产量,减氮20%和30%处理水稻产量有所增加且并无减产趋势。两季水稻秸秆还田量均表现为减氮20%和30%处理高于常规施氮,且以减氮20%最多,平均高于常规施氮10.62%,氮投入量比常规施氮增加1.37%;紫云英还田量一致,常规施氮紫云英还田氮投入量比减氮20%增加1.32%,比减氮30%增加5.34%。秸秆还田的增产效应随还田年限的增加而增强^[23],因此减氮20%或30%的增产效应高

于常规施氮。紫云英稻秆协同还田水稻产量比冬闲-水稻轮作不施肥高2.76%~8.68%,两年水稻产量趋势一致,且与前人研究结果一致^[21,24],年度间水稻产量差异显著,2021年度水稻产量较2020年度增产17.74%~20.02%,这可能与灌浆期降雨量有关系,2020年度水稻灌浆期平均降雨量为66 mm,2021年度达146.8 mm,灌浆期低降雨量不利于籽粒灌浆结实,进而影响水稻产量。有研究表明,绿肥替代部分氮肥能有效促进水稻的生殖生长和营养生长,提高水稻分蘖能力,增加水稻有效穗和穗粒数,从而提高水稻产量^[25]。本研究中紫云英稻秆协同还田减氮20%可以显著提高两年度水稻有效穗7.00%~29.32%及千粒质量1.94%~6.60%,紫云英稻秆协同还田常规施氮可以显著提高水稻穗粒数10.62%~24.76%。有研究表明:随着施氮量的增加,作物产量表现为先增加后不变的趋势,而土壤氨挥发量增加^[7]。本研究中,紫云英稻秆协同还田下随着施氮量的增加,减氮处理水稻产量显著高于常规施氮处理,而土壤和稻田氨挥发量无显著差异,且减氮处理单位产量的土壤和稻田氨挥发强度均低于单施化肥。这可能是由于紫云英、稻秆等有

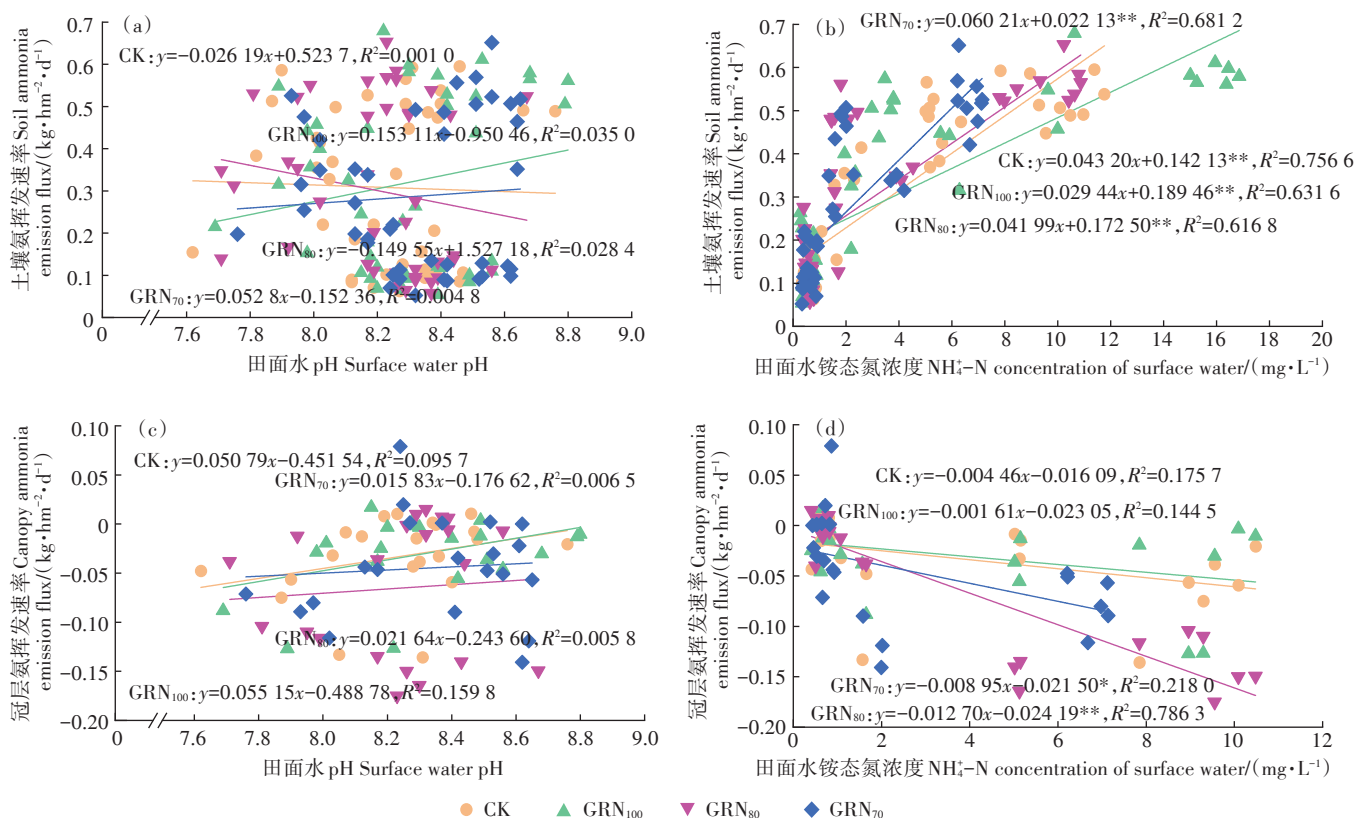


图8 氨挥发速率与田面水pH和铵态氮浓度的关系

Figure 8 Relationship between ammonia emission flux and surface water pH and NH₄⁺-N

机物料还田与无机化肥配施对土壤氮素供应的影响,提高了作物生育期前期对氮素养分的吸收,降低了氮素损失风险。紫云英稻秆协同还田减氮20%和30%可以增加水稻产量,减少土壤氨气挥发量,进而降低稻田氨挥发强度。

3.2 紫云英稻秆协同还田对氨挥发的影响

施基肥和分蘖肥时期是土壤氨挥发的主要时期^[26-27],施肥后一周内土壤氨挥发累积量上升较快^[7]。本研究中两年土壤氨挥发速率均在施基肥和分蘖肥后出现明显波动,且施基肥后15 d内紫云英稻秆协同还田处理土壤氨挥发累积量达 $4.80\sim 6.46\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全生育期的29.00%~38.49%,施氮量的2.79%~4.35%。谢志坚等^[14]发现紫云英配施氮肥比单施氮肥减少土壤氨挥发累积量17%,在本研究中两年绿肥稻秆协同还田减氮20%和30%的土壤氨挥发累积量比常规施氮减少2.95%~6.44%。这可能是因为有机无机肥配施可以调节土壤供氮,在作物生长前期通过微生物固定化学氮,减少无机氮投入过多引起的挥发损失^[28]。研究发现紫云英还田配合化肥减施与常规施肥相比能显著提高化学氮肥养分利用率,降低化学氮素损失及降低环境污染风险^[29]。这可能是因为尿素在脲酶的作用下被水解后,一部分在土壤溶液中以氨的形式挥发,而有机肥中的有机氮矿化分解时间较长,且分解过程产生的有机酸可降低土壤pH,其形成的腐殖质可增加土壤吸附力,从而抑制了氨的挥发^[30]。本研究中,两年度紫云英稻秆协同还田各处理稻秆还田氮投入量平均增加 $144.45\sim 162.55\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,紫云英还田氮含量平均增加 $530.91\sim 559.26\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。稻田有机物料的投入可以为土壤提供丰富的氮素,二者协同还田可以固定化学氮素从而减少无机氮的挥发损失。因此有机肥替代化学氮肥可以降低土壤氨挥发^[31]。施肥后30 d内(分蘖期)主要以冠层氨气吸收为主,绿肥稻秆协同还田在施基肥后30 d内冠层氨气吸收累积量达 $2.54\sim 4.32\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,抽穗期之后主要以氨气释放为主,这与前人研究结果相一致^[19],可能是因为施氮造成土壤氨挥发剧烈,叶片氨气补偿点低于空气中的氨浓度,从而引起冠层吸收氨气现象发生。因此绿肥、稻秆等有机物料还田替代部分化学氮肥可以减少土壤氨气释放,增加冠层氨气吸收,抵消对稻田氨挥发累积量的贡献。本研究中绿肥稻秆协同还田稻田氨挥发累积量均低于常规施氮,且减氮20%达到显著水平。施氮量、田面水pH和铵态氮浓度是影响稻田氨挥发的主要因子^[32-33],减少施氮量,

可以降低田面水pH和铵态氮浓度。本研究中绿肥稻秆协同还田下施基肥和分蘖肥后随着施氮量的增加,田面水铵态氮浓度也增加,这与前人研究结果相一致。田面水pH影响铵态氮向氨的转化和溶解在水中的氨向大气扩散的速率^[34]。本研究中两年水稻施肥后30 d内田面水pH变化对土壤和冠层氨挥发速率无显著影响,可能是因为田面水pH受多种因素的综合影响,如降雨、温度、灌溉等^[35]。氨挥发速率与田面水pH和铵态氮浓度显著正相关^[34],本研究中土壤氨挥发速率均与田面水铵态氮浓度呈极显著正相关($P<0.01$),绿肥稻秆协同还田减氮20%和30%处理冠层氨挥发速率与田面水铵态氮浓度显著正相关。因此有机物料还田替代部分氮肥可以通过减少田面水中铵态氮浓度来减少土壤和冠层氨气释放,进而减少对稻田氨挥发累积量的贡献。

4 结论

(1)紫云英稻秆联合还田且减氮20%和30%可以显著减少土壤氨气释放,增加施肥后30 d内冠层氨气吸收,降低水稻全生育期氨挥发累积量和单位产量氨挥发强度。田面水铵态氮浓度与土壤氨挥发速率极显著正相关,与冠层氨挥发速率显著负相关。

(2)紫云英稻秆联合还田且减氮20%和30%可以显著提高水稻产量,比常规施氮平均增产4.00%和2.77%,比单施化肥平均增产7.65%和6.37%。减氮20%可以显著提高水稻有效穗7.00%~29.32%和千粒质量1.94%~6.60%,常规施氮可以显著提高每穗实粒数10.62%~24.76%。减氮20%和30%可以显著减少土壤氨挥发量,降低稻田氨挥发强度。

参考文献:

- [1] 杨淑莉,朱安宁,张佳宝,等.不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J].干旱区研究,2010,27(3):415-421. YANG S L, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 415-421.
- [2] 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. YANG G Y, GUO Z, LIU H J, et al. Research progress on factors affecting ammonia volatilization and its mitigation measures in paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9): 1912-1919.
- [3] ZENG Y, TIAN S L, PAN Y P. Revealing the sources of atmospheric ammonia: a review[J]. *Current Pollution Reports*, 2018, 4(3): 189-197.
- [4] YI L, SCHWANDNER F M, SEWELL H J, et al. Observations of ammonia, nitric acid, and fine particles in a rural gas production region[J].

- Atmospheric Environment*, 2014, 48(2):80–89.
- [5] BOSCH-SERRA A D, YAGUE M R, TEIRA-ESMATGES M R. Ammonia emissions from different fertilizing strategies in Mediterranean rainfed winter cereals[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84(1):204–212.
- [6] SUN H J, DAN A, FENG Y F, et al. Floating duckweed mitigated ammonia volatilization and increased grain yield and nitrogen use efficiency of rice in biochar amended paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 237(12):124532.
- [7] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1):149–162. LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1):149–162.
- [8] ZHANG H L, LAL R, ZHAO X, et al. Chapter one—opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124:1–36.
- [9] 冯静琪, 曹卫东, 高嵩涓, 等. 稻草及氮调控对紫云英(*Astragalus sinicus* L.)生长和土壤性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10):1858–1869. FENG J Q, CAO W D, GAO S J, et al. Effects of rice straw returning and nitrogen regulation on the growth of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and soil properties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10):1858–1869.
- [10] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1):51–56. LI J M, XU M G, QIN D Z, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(1):51–56.
- [11] SUN H J, MING J, ZHANG H L, et al. Biochar application mode influences nitrogen leaching and NH_3 volatilization losses in a rice paddy soil irrigated with N-rich wastewater[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(16):2090–2096.
- [12] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. 环境科学, 2013, 34(1):27–33. WANG J, WANG D J, ZHANG G, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1):27–33.
- [13] 王艳秋, 高嵩涓, 曹卫东, 等. 多年冬种紫云英对两种典型双季稻田土壤肥力及硝化特征的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(2):180–189. WANG Y Q, GAO S J, CAO W D, et al. Fertility and nitrification characteristics of two typical paddy soils after application of milk vetch (*Astragalus sinicus*) for 8 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(2):180–189.
- [14] 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. XIE Z J, TU S X, XU C X, et al. Effects of chinese milk vetch on ammonia volatilization from single season rice fields in south China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8):1576–1584.
- [15] 董文旭, 吴天明, 胡春胜, 等. 华北山前平原农田氨挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5):1115–1121. DONG W X, WU D M, HU C S, et al. Ammonia volatilization and control mechanisms in the piedmont of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5):1115–1121.
- [16] 李峰, 周方亮, 黄雅楠, 等. 减施化肥下紫云英和秸秆还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(1):67–75. LI F, ZHOU F L, HUANG Y N, et al. Effects of Chinese milk vetch and straw returning on soil nutrient and active organic carbon under reduced application of chemical fertilizer[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(1):67–75.
- [17] 刘威, 秦自果, 耿明建, 等. 冬种绿肥和稻草全量还田对单季稻田土壤理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(4):55–61. LIU W, QIN Z G, GENG M J, et al. Effects of winter green manure planting and rice straw retention on soil physical and chemical properties from a mono-rice cultivation system[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4):55–61.
- [18] SHANG Q Y, GAO C M, YANG Y Y, et al. Ammonia volatilization in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5):715–725.
- [19] 景建元, 孙晓, 杨阳, 等. 施氮水平对冬小麦冠层氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2):401–408. JING J Y, SUN X, YANG Y, et al. Ammonia volatilization of winter wheat canopy under different nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2):401–408.
- [20] 郭刚, 袁漫漫, 曹哲伟, 等. 不同水氮管理条件下稻田氨挥发损失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5):651–658. WU G, YUAN M M, CAO Z W, et al. Ammonia volatilization under different water management and nitrogen schemes in a paddy field[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(5):651–658.
- [21] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 等. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11):1926–1937. WU Y H, WANG L, CUI Y Z, et al. Rice yield, quality, and soil fertility in response to straw incorporation and rotation pattern[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11):1926–1937.
- [22] 胡启良, 杨滨娟, 刘宁, 等. 绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6):16–26. HU Q L, YANG B J, LIU N, et al. Effects of application rates of nitrogen on rice yield, carbon and nitrogen, microbial community in soil under mixed sowing of green manure[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6):16–26.
- [23] HUANG S, ZENG Y, WU J, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:188–194.
- [24] 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. WANG L, CUI Y Z, WU Y H, et al. Effects of rice stalks mulching combined with green manure (*Astragalus sinicus* L.) incorporated into soil and reducing nitrogen fertilizer rate on rice yield and soil fertility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(4):952–961.
- [25] 刘思超, 唐利忠, 李超, 等. 不同混作方式绿肥替代部分基肥化学

- 氮肥对双季稻产量形成特性的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(5): 218–225. LIU S C, TANG L Z, LI C, et al. Impact of substitution of green manure under different mixed cropping modes to chemical N fertilizer on yield formation characters of double cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(5): 218–225.
- [26] YAO L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH_3 loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 254–266.
- [27] HE T H, LIU D Y, YUAN J J, et al. A two years study on the combined effects of biochar and inhibitors on ammonia volatilization in an intensively managed rice field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 264: 44–53.
- [28] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532–542. MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 532–542.
- [29] 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. CHEN J R, QIN W J, WANG S X, et al. Effects of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) incorporation on rice yield and nitrogen use efficiency in double-rice cropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 280–287.
- [30] 张奇, 徐娅玲, 姚莉, 等. 有机无机肥配施对川中紫色土丘陵区稻田氨挥发影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(4): 518–523. ZHANG Q, XU Y L, YAO L, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on ammonia volatilization from purple paddy field in the hilly area of central Sichuan[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, 39(4): 518–523.
- [31] XIA L L, LAM S K, YAN X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroeco-systems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(13): 7450–7457.
- [32] WANG S W, SHAN J, XIA Y Q, et al. Different effects of biochar and a nitrification inhibitor application on paddy soil denitrification: a field experiment over two consecutive rice-growing seasons[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593/594: 347–356.
- [33] 王书伟, 颜晓元, 单军, 等. 利用膜进样质谱法测定不同氮肥用量下反硝化氮素损失[J]. 土壤, 2018, 50(4): 664–673. WANG S W, YAN X Y, SHAN J, et al. Quantitative determination of N loss through denitrification under different N fertilizer application rates by membrane inlet mass spectrometry (MIMS) [J]. *Soils*, 2018, 50(4): 664–673.
- [34] 王书伟, 林静慧, 吴正贵, 等. 氮肥深施对太湖地区稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(12): 2002–2012. WANG S W, LIN J H, WU Z G, et al. The effects of nitrogen fertilizer deep placement on the ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12): 2002–2012.
- [35] 肖其亮, 朱坚, 彭华, 等. 秸秆与缓控释肥配施对双季稻田氨挥发的控制效果[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2788–2800. XIAO Q L, ZHU J, PENG H, et al. Effects of controlled release fertilizer combined with rice straw on ammonia volatilization from double-cropping rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2788–2800.

(责任编辑:李丹)