

网络出版时间:2018-07-30 17:12

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.02.017

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180730.1710.034.html>

秸秆还田下生物炭和硫酸铵对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响

韩自强, 宋 贺, 夏 炎, 车 钊, 王 军, 申田田, 武小亮, 董召荣

(安徽农业大学 农学院, 安徽 合肥 230036)

[摘 要] **【目的】**以江淮地区麦茬稻田为对象,研究秸秆还田下不同施肥处理对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响,并结合水稻产量计算不同处理综合温室效应(GWPs)和温室气体强度(GHGI)。**【方法】**试验采用裂区设计,主处理 2 个水平,为秸秆还田(S)和秸秆移除(NS),副处理 4 个水平,分别为不施氮肥(CK)、传统施肥(T0)、生物炭与尿素配施(T1)和单施硫酸铵(T2),共计 8 个处理,采用静态暗箱-GC 气相色谱法检测不同处理稻田 N_2O 和 CH_4 排放通量,测定土壤温度、湿度和无机氮含量,统计水稻产量,计算综合温室效应和温室气体强度。**【结果】**无论是秸秆还田还是移除条件下,除 CK 外,其他施肥处理的 N_2O 和 CH_4 排放通量都会在基肥和追肥施用后出现峰值。无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施和单施硫酸铵处理均能显著降低 N_2O 和 CH_4 累积排放通量。在秸秆还田和移除条件下,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施处理均会导致水稻产量显著降低,但会提高土壤 NO_3^- 含量,增加对周围水体污染的风险。在秸秆移除和还田条件下,与传统施肥处理相比,单施硫酸铵均能显著增加水稻产量,增幅分别为 12.27% 和 7.78%。与秸秆移除相比,秸秆还田条件下单施硫酸铵会显著促进 N_2O 排放,但显著降低 CH_4 的排放以及综合温室效应和温室气体强度。**【结论】**在目前秸秆还田造成 CH_4 排放增加的背景下,用硫酸铵替代尿素能显著降低 CH_4 排放,并提高水稻产量,降低综合温室效应,施用效果最佳。

[关键词] 秸秆还田; N_2O ; CH_4 ; 综合温室效应; 温室气体强度; 生物炭; 硫酸铵

[中图分类号] S343.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2019)02-0135-09

Effects of biochar and ammonium sulfate on N_2O and CH_4 emissions from paddy soil with straw returning application

HAN Ziqiang, SONG He, XIA Yan, CHE Zhao, WANG Jun, SHEN Tiantian,
WU Xiaoliang, DONG Zhaorong

(College of Agriculture, Anhui Agriculture University, Hefei, Anhui 230036, China)

Abstract: **【Objective】** This study analyzed effects of different fertilization treatments on N_2O and CH_4 emissions from rice in wheat stubble field in Jianghuai area and calculated the global warming potentials (GWPs) and greenhouse gas intensities (GHGI) combined with rice yields under straw returning application. **【Method】** The split plot design was adopted with a total of 8 treatments. Two main treatments consisted of straw application (S) and straw removal (NS) and four sub-treatments included no nitrogen fertilizer (CK), traditional fertilization (T0), black carbon and urea (T1) and ammonium sulfate (T2). The N_2O and CH_4 emission fluxes were monitored with a static chamber and gas chromatography method. The soil

[收稿日期] 2017-11-03

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2016YFD0300908-02);农业部-世界银行-全球环境基金气候智慧型重要粮食作物生产项目(WB Pro No. 144531/GEF Pro No. 5121);安徽农业大学创新训练项目(AH201510364004)

[作者简介] 韩自强(1992—),男,安徽郎溪人,硕士,主要从事耕作与农业生态系统研究。E-mail: hanzq218@163.com

[通信作者] 董召荣(1960—),男,安徽庐江人,教授,硕士,博士生导师,主要从事耕作与农业生态系统研究。

E-mail: d3030@163.com

temperature, humidity, inorganic nitrogen contents and rice yields under different fertilization treatments were measured and GWPs and GHGI were calculated. 【Result】 N_2O and CH_4 emissions peaked after basal and topdressing application under all treatments except CK regardless straw returning application. Compared to traditional treatments, the addition of biochar and ammonium sulfate effectively reduced N_2O and CH_4 emissions. Compared to T0, the addition of biochar significantly decreased rice yield and increased soil NO_3^- content and risk of NO_3^- pollution to surrounding water regardless straw returning. Compared to T0, ammonium sulfate significantly increased rice yield by 12.27% without straw returning and 7.78% with straw returning. Compared with straw removal, ammonium sulfate addition under straw application promoted N_2O emission but significantly reduced CH_4 emission, GWPs and GHGI. 【Conclusion】 With the increase of CH_4 emissions due to returning straw to paddy field, substitution of urea by ammonium sulfate was the best for reducing CH_4 emissions and GHGI, while increasing yield.

Key words: straw application; N_2O ; CH_4 ; global warming potential; greenhouse gas intensities; biochar; ammonium sulfate

N_2O 和 CH_4 是大气中重要的两种温室气体,在百年尺度内,它们的增温潜势分别是 CO_2 的 298 倍和 25 倍^[1]。农业活动对大气中 N_2O 和 CH_4 含量有重要的影响,占人类活动 N_2O 和 CH_4 排放总量的 84% 和 52%^[2]。我国是世界上最大的水稻生产国,水稻种植面积占世界水稻种植面积的 23%,稻田 N_2O 排放量占我国农田 N_2O 总排放量的 25%~35%^[3],稻田 CH_4 排放量约占我国 CH_4 总排放量的 17.93%^[4]。可见,稻田生态系统是大气中温室气体重要排放源,如何减少温室气体的排放是当前的研究热点。

自秸秆禁烧以来,秸秆直接粉碎还田已经成为我国秸秆资源化利用的主要方式^[5-6]。秸秆还田是增加土壤有机碳含量最直接的固碳方式之一,长期秸秆还田能够有效改善土壤理化性状,增加土壤微生物活性和土壤微生物量,并对 N_2O 和 CH_4 等温室气体排放产生显著影响^[7-9]。大量研究表明,秸秆还田会显著增加稻田 CH_4 排放量^[10-12],但对促进还是降低 N_2O 排放仍存在一定争议^[13-15],需要进一步研究。除秸秆外,外源性碳(如生物炭)直接添加也是土壤固碳的重要途径。生物炭具有比表面积大,吸附能力强且稳定性好等性质^[16]。稻田中添加生物炭能有效吸附水溶性有机碳,从而抑制 CH_4 的排放^[17-18]。此外,有机碳被吸附也会限制异养反硝化速率,从而降低 N_2O 排放。秸秆还田初期,土壤有机碳含量会增加^[19],可能也因此增加 CH_4 排放和促进反硝化进程,此时添加生物炭是否会影响土壤可溶性有机碳含量,进而影响 CH_4 和 N_2O 的排放,目前缺乏相关研究。在稻田 CH_4 监控中,硫酸盐常被认为会通过硫酸盐还原菌的基质竞争能力,抑制

产 CH_4 菌活性和 CH_4 排放^[20-22]。在秸秆还田、有机底物丰富的条件下,硫酸盐的添加是否仍能对 CH_4 排放起到显著抑制效果,目前尚不清楚。

本研究以江淮地区麦茬稻主产区安徽省怀远县水稻田为对象,在田间原位条件下,比较小麦秸秆还田和移除条件下,生物炭和硫酸铵对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响,评估不同处理的综合温室效应和温室气体强度,同时结合水稻产量性状,筛选最佳施肥方式,旨在为降低该地区稻田温室气体排放和低碳农业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2015 年 6 月开始在怀远县万福镇(117°04'E, 32°54'N)麦茬稻田进行。该地区属温带半湿润季风气候区,年平均气温 15.4℃,降雨量 900 mm,雨量充沛。试验田土壤质地为砂姜黑土,土壤类型为水稻土,常年进行稻麦轮作。试验田内土壤理化特性为:pH 值 6.68,有机质含量 16.19 g/kg,碱解氮含量 114.71 mg/kg,全磷含量 0.78 g/kg,有效磷含量 20.59 mg/kg,全钾含量 20.7 g/kg,速效钾含量 116 mg/kg。

试验所用的尿素(46% N)、硫酸铵(21% N)、磷肥(14% P_2O_5)、钾肥(60% K_2O)购自安徽省怀远县。稻壳生物炭由怀远县农委提供,具体制作过程为:通过生物质炭化设备,在 300℃ 下恒温裂解 4 h,冷却至室温。测定的稻壳生物炭理化性质为:碳含量 58.78%,pH 值 8.35,比表面积 79.02 m^2/g ,有机质含量 375.12 g/kg,全氮含量 7.81 g/kg,全磷含量 1.09 g/kg,全钾含量 11.50 g/kg。

1.2 试验设计和施肥管理

试验为裂区设计,主处理是秸秆还田处理,设小麦秸秆还田(S)和小麦秸秆移除(NS)2 个水平,其中小麦秸秆还田处理是在小麦收获后,以 7 500 kg/hm²为标准将秸秆打碎施入后,用旋耕机翻入 0~40 cm 土层中;秸秆移除处理是在小麦收获时,

将小麦秸秆全部移除,之后用旋耕机进行深翻。副处理是施肥处理,共设 4 个水平,分别为不施氮肥(CK)、传统施肥(T0)、生物炭与尿素配施(T1)、单施硫酸铵(T2)。共计 8 个处理,分别为 SCK、ST0、ST1、ST2、NSCK、NST0、NST1、NST2,详见表 1。

表 1 试验设计及不同处理肥料用量

Table 1 Experimental design and fertilization dosages in different treatments

主处理 Main treatment	副处理 Deputy treatment	尿素用量(N)/(kg·hm ⁻²) Urea dosage	生物炭用量/(t·hm ⁻²) Biochar consumption	硫酸铵用量(N)/(kg·hm ⁻²) Ammonium sulfate dosage
秸秆还田(S) Straw return	不施氮肥(CK) No nitrogen fertilizer(CK)	—	—	—
	传统施肥(T0) Traditional fertilization(T0)	310.5	—	—
	生物炭与尿素配施(T1) Black carbon and urea(T1)	310.5	450	—
	单施硫酸铵(T2) Ammonium sulfate(T2)	—	—	310.5
	不施氮肥(CK) No nitrogen fertilizer(CK)	—	—	—
	传统施肥(T0) Traditional fertilization(T0)	310.5	—	—
秸秆移除(NS) Straw removal	生物炭与尿素配施(T1) Black carbon and urea(T1)	310.5	450	—
	单施硫酸铵(T2) Ammonium sulfate(T2)	—	—	310.5

所有小区磷肥和钾肥施用量相同,其中磷肥(P₂O₅)78.75 kg/hm²,钾肥(K₂O)120 kg/hm²,都作为基肥和生物炭在整地时一次性施入。氮肥(尿素和硫酸铵)作为基肥和追肥分 2 次施入,施用日期分别在 2015-07-04 和 2015-08-15。水稻整季保持有水层。水稻品种为‘武香糯 2402’,采用机插秧方式于 7 月 5 日种植(种植的行距和株距 30 cm×13.3 cm)。每个处理设 3 个重复,小区面积为 15 m²(3 m×5 m)。为防止串肥,用塑料薄膜深入犁底层之下双面包裹形成土埂,土埂基宽 30 cm,埂高 20 cm。

1.3 样品采集与分析

采用静态暗箱-GC 气相色谱法测定稻田 N₂O 和 CH₄ 排放通量。共制作 3 个气体样品采集箱,用 5 mm 厚亚克力板,外层用 2 cm 厚泡沫板包裹。水稻生长期每个星期取 1 次样品,在施肥后增加取样频率。采样时间为 2015-07-08—2015-11-06。采样箱规格:水稻苗期使用(50×50×50) cm 箱体,水稻拔节 after 使用(50×50×80) cm 箱体。机插秧之后将不锈钢底座固定于土壤中,不锈钢底座规格为(50×50×10) cm,由水槽和刀口组成,采样时加水注入底槽加以密封,每次采样时间固定在上午 08:00—11:00。采样箱倒扣在底座之后 0,7,14,21 min 采气,用电子温度计测定并记录箱内温度。样

品用 Agilent7890A 气相色谱仪分析 N₂O 和 CH₄ 含量^[23],N₂O 和 CH₄ 排放通量的计算公式见式(1),用加权平均法计算水稻全生育期 N₂O 和 CH₄ 的累积排放通量^[24]。

$$F=\rho\times h\times (dc/dt)\times 273/(273+T)。$$
 (1)

式中:F 为 N₂O 或者 CH₄ 排放通量,μg/(m²·h)或 mg/(m²·h);ρ 为标准状态下气体密度,kg/m³;h 是采样箱的净高度,m;dc/dt 为单位时间内采样箱内气体含量的变化率,nL/(L·h)或 μL/(L·h);T 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃。

1.4 综合温室效应和温室气体强度的测定

在综合温室效应(global warming potential,GWPs)的估算中,N₂O 和 CH₄ 的排放量通过 GWPs 值转换成 CO₂ 的等效量。根据 IPCC 报告^[1],在 100 年时间尺度上,N₂O 和 CH₄ 的综合增温潜势分别是 CO₂ 的 298 和 25 倍,GWP (kg/hm²) 计算公式如下:

$$GWP=R_{CH_4}\times 25+R_{N_2O}\times 298。$$
 (2)

式中:R_{CH₄} 和 R_{N₂O} 分别是当地水稻 CH₄ 和 N₂O 的累积排放通量,kg/hm²。

温室气体强度(greenhouse gas intensity,GH-GI,kg/kg)是综合评价温室效应的指标,GHGI 表示农业生产中单位产量的粮食对气候的潜在影响,计算公式为:

$$GHGI = GWP / \text{作物产量}。 \quad (3)$$

1.5 土壤温湿度和无机氮含量测定

1.5.1 土壤温湿度 在每次取气同时用 Em 50 (American Decagon) 的灵敏型探针直接插入表层 (0~10 cm) 土壤,测定土壤温湿度。每个点测定 3 次,取平均值。

1.5.2 土壤无机氮含量 每次取气时,利用 5 点取样法在每个小区内随机选取 5 个点,用土钻取 0~10 cm 土层土壤样品。将土样用 1 mol/L KCl 溶液振荡浸提 1 h 后过滤,滤液用 AA3 型流动注射分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

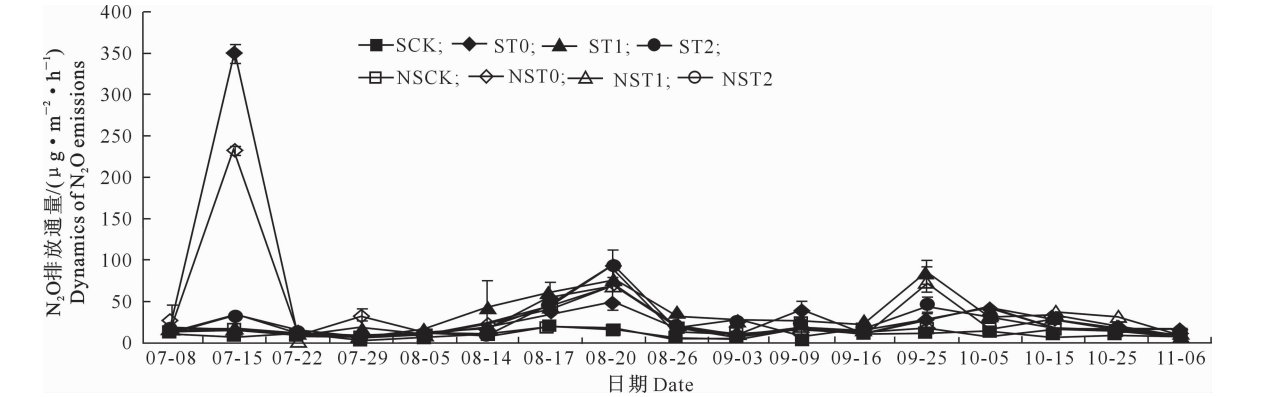
1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据计算和图表制作,采用 SPSS 19 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田 N₂O 排放的影响

从图 1 可以看出,无论是秸秆还田还是移除条件下,除了 CK 处理的 N₂O 排放平缓未出现峰值外,其他 3 种处理的 N₂O 排放通量均在施用基肥和追肥后出现峰值。



SCK. 秸秆还田+不施氮肥;ST0. 秸秆还田+传统施肥;ST1. 秸秆还田+生物炭和尿素配施;ST2. 秸秆还田+单施硫酸铵;NSCK. 秸秆移除+不施氮肥;NST0. 秸秆移除+传统施肥;NST1. 秸秆移除+生物炭和尿素配施;NST2. 秸秆移除+单施硫酸铵。下同
SCK. Straw return and no nitrogen fertilizer;ST0. Straw return and traditional fertilization;ST1. Straw return and black carbon and urea;ST2. Straw return and ammonium sulfate;NSCK. Straw removal and no nitrogen fertilizer;NST0. Straw removal and traditional fertilization;NST1. Straw removal and black carbon and urea;NST2. Straw removal and ammonium sulfate. The same below.

图 1 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田 N₂O 排放通量的影响

Fig. 1 N₂O emissions under different treatments in the whole rice season

对水稻季 N₂O 累积排放通量(表 2)分析可知,ST0 与 NST0、ST1 与 NST1 处理 N₂O 累积排放通量差异不显著,说明秸秆还田或移除对传统施肥处理和生物炭与尿素配施处理 N₂O 累积排放通量没有显著影响;但与秸秆移除相比,秸秆还田条件下,单施硫酸铵处理会使 N₂O 累积排放通量增加 0.23

kg/hm²。此外,无论秸秆还田还是移除条件下,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施处理和单施硫酸铵处理会显著降低稻田 N₂O 累积排放通量 ($P<0.05$)。双因素分析表明,秸秆还田和施肥处理的交互作用对 N₂O 排放的影响不显著 ($P>0.05$)。

表 2 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田 N₂O 和 CH₄ 累积排放通量的影响

Table 2 Cumulative emission variance of N₂O and CH₄ and double factors analysis in rice season kg/hm²

处理 Treatment	N ₂ O 累积排放通量 Cumulative N ₂ O emissions	CH ₄ 累积排放通量 Cumulative CH ₄ emissions	处理 Treatment	N ₂ O 累积排放通量 Cumulative N ₂ O emissions	CH ₄ 累积排放通量 Cumulative CH ₄ emissions
SCK	0.41±0.26 cd	2 495.59±78.58 f	NSCK	0.28±0.02 d	2 125.68±120.32 f
ST0	1.20±0.05 a	7 347.91±155.82 a	NST0	1.05±0.08 a	6 560.13±215.90 b
ST1	0.83±0.13 b	5 566.73±207.29 c	NST1	0.75±0.15 b	5 559.16±91.76 c
ST2	0.70±0.10 b	3 145.86±371.61 e	NST2	0.47±0.06 c	4 152.69±487.81 d

注:试验数据用“平均值±标准差”表示,n=3。同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 4 同。
Note: The data are “mean±standard deviation”,n=3. Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at $P<0.05$ among treatments. The same for Table 4.

2.2 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田 CH₄ 排放的影响

秸秆还田和移除条件下生物炭和硫酸铵对稻田 CH₄ 排放的影响见图 2。从图 2 可知,无论是秸秆还田还是移除条件下,除了 CK 的 CH₄ 排放通量变化幅度较小外,其他处理在施用基肥和追肥后均出现了峰值。对 CH₄ 的累积排放通量(表 2)进行分析可知,与秸秆移除相比,秸秆还田处理会显著增加传统施肥处理的 CH₄ 累积排放通量($P<0.05$),但对

生物炭与尿素配施和 CK 没有显著影响。与秸秆移除相比,秸秆还田条件下单施硫酸铵处理的 CH₄ 累积排放通量显著降低($P<0.05$)。无论是在秸秆还田还是移除条件下,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施和单施硫酸铵处理均能显著降低 CH₄ 累积排放通量,其中单施硫酸铵处理下降幅度最大。双因素分析表明,秸秆还田和施肥方式的交互作用对 CH₄ 的排放影响显著($P<0.05$)。

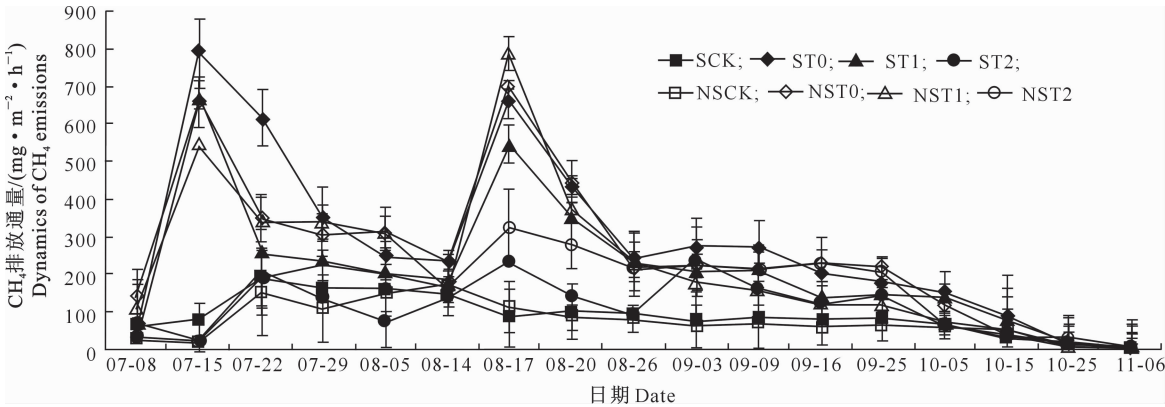


图 2 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田 CH₄ 排放通量的影响
Fig. 2 CH₄ emissions under different treatments in the whole rice season

2.3 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田土壤无机氮含量的影响

图 3 和图 4 为不同处理稻田土壤无机氮含量的变化。由图 3 和图 4 可知,无论秸秆还田与否,除 CK 无机氮含量波动较小外,其他处理无机氮含量

在施用基肥和追肥后均出现峰值,生物炭与尿素配施处理的无机氮含量均高于其他处理。与传统尿素处理(T0)相比,单施硫酸铵处理会增加土壤 NH₄⁺ 含量,降低 NO₃⁻ 含量。

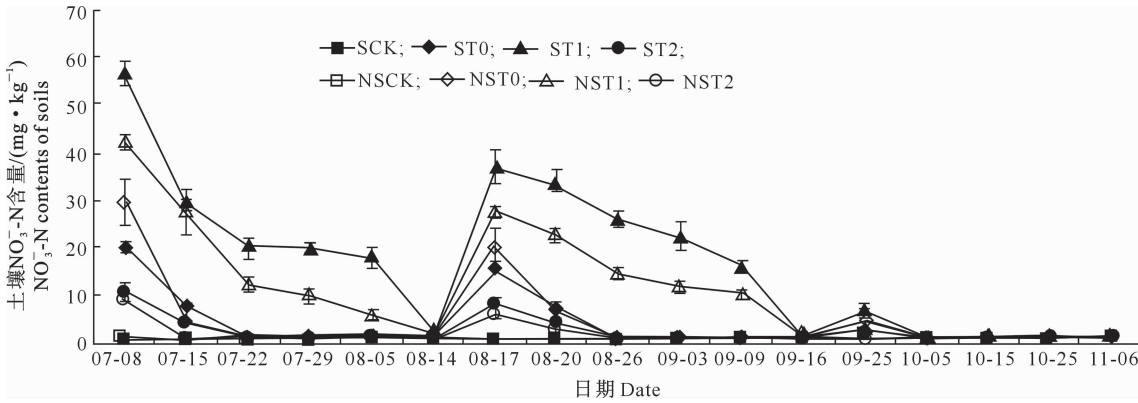


图 3 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田土壤 NO₃⁻-N 含量的影响
Fig. 3 NO₃⁻-N contents of paddy soils in the whole rice season

2.4 秸秆还田和移除下 N₂O 和 CH₄ 排放通量与土壤环境因子及无机氮的相关性

对各处理 N₂O、CH₄ 排放通量与土壤环境因子、土壤无机氮含量的相关性进行分析,结果见表 3。表 3 表明,ST1 和 NST1 处理 NH₄⁺-N 与 CH₄

排放通量的相关性达到极显著水平($P<0.01$), NST1 处理 NO₃⁻-N 与 CH₄ 排放通量的相关性达到显著水平($P<0.05$)。除 ST2 处理土壤温度与 CH₄ 排放通量相关性不显著外,其他处理土壤温度与 CH₄ 排放通量相关性达到显著或极显著水平。

NSCK 和 NST2 处理土壤湿度与 CH₄ 排放通量相关性达显著水平。土壤温、湿度和无机氮含量与 N₂O 排放通量相关性均不显著。

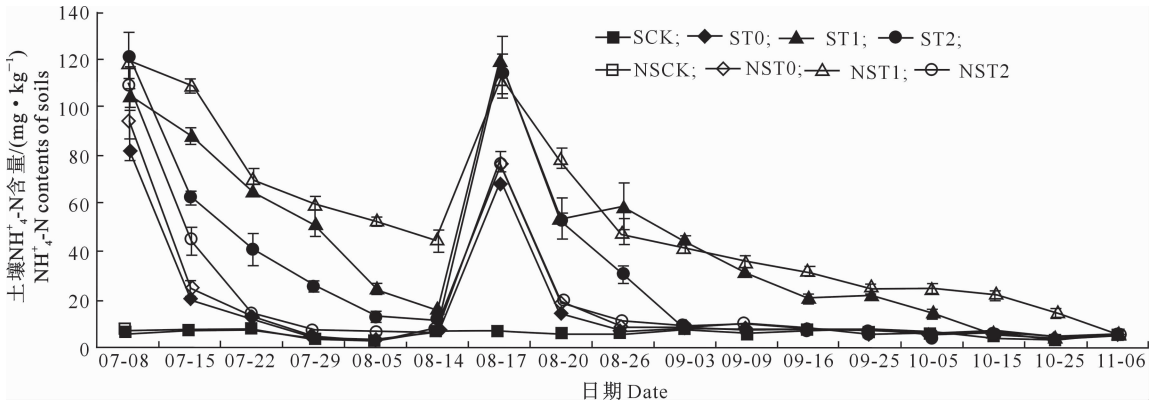


图 4 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对稻田土壤 NH₄⁺-N 含量的影响
Fig. 4 NH₄⁺-N contents of paddy soils in the whole rice season

N ₂ O 排放通量 N ₂ O emissions					CH ₄ 排放通量 CH ₄ emissions			
处理 Treatment	温度 Tem	湿度 Hum	硝态氮 Nitric nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	温度 Tem	湿度 Hum	硝态氮 Nitric nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen
SCK	−0.32	0.16	−0.04	0.25	0.84**	0.47	−0.34	0.10
ST0	0.26	−0.16	0.21	0.06	0.71**	0.29	0.25	0.21
ST1	0.12	0.11	0.16	0.18	0.63**	0.23	0.46	0.66**
ST2	−0.06	0.14	0.25	0.26	0.45	0.45	0.00	0.14
NSCK	0.17	−0.10	−0.33	0.40	0.71**	0.49*	−0.22	0.08
NST0	0.31	−0.28	0.09	0.11	0.70**	0.22	0.28	0.37
NST1	−0.17	−0.09	0.09	−0.02	0.68**	0.26	0.56*	0.76**
NST2	0.04	0.30	0.39	0.27	0.48*	0.53*	0.04	−0.08

注：“*”和“**”分别表示相关性达显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平。
Note: “*” and “**” indicate significant at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.5 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对水稻产量及综合温室效应、温室气体强度的影响

由表 4 可知,与秸秆移除相比,除 CK 外,在其他施肥处理下秸秆还田均能显著增加水稻产量。无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施处理会显著降低水稻产量,单施硫酸铵处理

却能显著增加水稻产量。无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施和单施硫酸铵处理均能显著降低 GWP 和 GHGI。与秸秆移除相比,秸秆还田条件下单施硫酸铵会降低 GWP、GHGI,但同时会显著增加水稻产量。

表 4 秸秆还田和移除下生物炭和硫酸铵对水稻产量及综合温室效应和温室气体强度的影响

处理 Treatment	产量/(kg·hm ^{−2}) Yield	综合温室效应/(kg·hm ^{−2}) GWP	温室气体强度/(kg·kg ^{−1}) GHGI
SCK	10 290.48±203.79 e	62 511.81±1 966.36 f	2.64±0.05 d
ST0	11 663.83±209.23 b	184 055.60±3 894.06 a	6.87±0.19 a
ST1	11 209.27±117.26 c	139 416.80±5 182.99 c	5.41±0.20 b
ST2	13 095.21±120.80 a	78 854.03±9 316.09 e	2.62±0.33 d
NSCK	10 580.62±290.63 de	53 226.23±3 013.63 f	2.19±0.15 d
NST0	11 064.20±217.77 c	164 316.60±5 406.71 b	6.46±0.21 a
NST1	10 687.01±174.89 d	139 232.20±2 255.99 c	5.67±0.13 b
NST2	11 924.96±104.61 b	103 958.00±12 197.79 d	3.80±0.46 c

3 讨论

3.1 添加生物炭和硫酸铵对稻田温室气体的影响

本研究发现,无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施和单施硫酸铵均能够显著降低 N_2O 累积排放通量。这可能是因为生物炭的比表面积大、吸附性强,从而增加对无机氮的吸附作用,减少反硝化底物,因此降低了 N_2O 的排放^[18]。但本研究发现,无论秸秆还田与否,生物炭与尿素配施处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量却显著高于其他处理,这与前人结果存在差异^[25]。可知添加生物炭未降低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,说明反硝化过程可能受到一定的抑制。造成这一现象的原因可能是高吸附性生物炭会增加土壤微生物可利用碳的吸附^[26],从而降低异养反硝化菌碳源供应量,抑制了反硝化进行和该过程中 N_2O 的排放。无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施会显著降低 CH_4 累积排放通量。这可能是因为生物炭提供了充足的碳源,补充了甲烷氧化菌的基质,从而可以将产生的 CH_4 氧化^[27],达到降低 CH_4 排放的目的。也有研究指出,稻田施用尿素能够降低产 CH_4 的潜力,而添加生物炭可以增加土壤 CEC^[28],从而能够提高土壤对氮素的吸附能力^[18]。

本研究中,无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,单施硫酸铵均能显著降低 N_2O 累积排放通量。这可能是因为 SO_4^{2-} 会对硝化和反硝化微生物产生影响^[29],在缺氧条件下,硫酸盐的存在会抑制反硝化微生物的活性,降低反硝化速率,进而降低温室气体 N_2O 的排放^[30]。张中杰等^[31]研究表明,添加硫酸铵会显著降低反硝化率和 N_2O 排放。此外本研究发现,无论秸秆还田与否,与传统施肥处理相比,添加硫酸铵还会显著降低 CH_4 的累积排放通量,可能原因是硫酸盐促进了硫酸还原菌的活性,竞争了产甲烷菌的基质,进而抑制了产甲烷菌的活性^[21-22]。与秸秆移除相比,秸秆还田条件下施用硫酸铵显著促进了 N_2O 排放,但显著降低了 CH_4 的排放。这可能是因为秸秆还田为土壤提供丰富的有机物料,增强了反硝化细菌的活性^[20]。

3.2 添加生物炭和硫酸铵对水稻产量的影响

本研究发现,无论是秸秆还田还是移除条件下,与传统施肥处理相比,生物炭与尿素配施处理未显著增加水稻产量,这与陈晨等^[32]的研究结果相反。一般认为,作物产量与添加生物炭土壤的肥力状况、土壤质地和 pH 值等有关。Jeffery 等^[33]研究表明,

在酸性和中性、中或差等质地土壤中施加生物炭,能够提高作物对营养物质的利用,进而能够显著提高作物产量。但在有机质含量较高土壤中添加生物炭可能会降低产量^[34]。本研究中的土壤有机质含量相对较高,添加生物炭(稻壳碳化)的矿质养分含量低、碳含量高。因此此类生物炭的施入会增大土壤的 C/N,进而降低养分有效性^[35]。本研究中,在秸秆还田和移除条件下,与传统施肥处理相比,单施硫酸铵处理均能显著提高水稻产量。这可能是因为添加硫酸铵处理会增加土壤 NH_4^+ 含量,并降低 NO_3^- 含量。水稻是喜铵作物,因此这将会促进水稻生长。有研究发现,施用硝酸铵会显著提高水稻叶片在灌浆期叶绿素含量和氮含量^[36],进而提高肥料利用率,从而促进了生物量的积累和产量增加。

4 结论

在江淮麦茬稻田区,无论是秸秆还田还是移除条件下,与传统施肥处理相比,单施硫酸铵处理均能显著增加水稻产量,并降低温室气体 N_2O 和 CH_4 的累积排放通量以及综合温室效应,施用效果最佳。

[参考文献]

- [1] Solomon S. IPCC: climate change the physical science basis [J]. American Geophysical Union, 2007, 9(1): 123-124.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2008, 363(1492): 789-813.
- [3] Xiong Z Q, Khalil M A K, Xing G, et al. Isotopic signatures and concentration profiles of nitrous oxide in a rice-based ecosystem during the drained crop-growing season [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015, 115(G2): 383-384.
- [4] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2013. National Development and Reform Commission for Climate Change. The People's Republic of China second national communications on climate change [M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2013.
- [5] 郑 侃, 陈婉芝, 杨宏伟, 等. 秸秆还田机械化技术与展望 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 9-13. Zheng K, Chen W Z, Yang H W, et al. Research and prospect of straw returning to field [J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 9-13.
- [6] 常志强, 何超波, 蔡海涛. 安徽省秸秆还田技术模式及完善措施 [J]. 农机科技推广, 2017(8): 39-42. Chang Z Q, He C B, Cai H T. Anhui Province straw technology field and improve the measures [J]. Agricultural Science and Technology Extension, 2017(8): 39-42.
- [7] 李秀青. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥

- 力的影响 [J]. 江西农业, 2017, 41(1): 24-25.
- Li X Q. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Jiangxi Agriculture, 2017, 41(1): 24-25.
- [8] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 291-296.
- Mu P, Zhang E H, Wang H N, et al. Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291-296.
- [9] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44.
- Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 40-44.
- [10] 王海候, 沈明星, 陆长婴, 等. 不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 758-763.
- Wang H H, Shen M X, Lu C Y, et al. Effect of patterns of straw returning to field on methane and nitrous oxide emissions during rice-growing season in a rice-wheat double cropping system [J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 30(4): 758-763.
- [11] 王小洪, 索龙, 季雅岚, 等. 添加几种秸秆并淹水对海南土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响 [J]. 环境科学学报, 2017, 30(10): 4004-4010.
- Wang X Q, Suo L, Ji Y L, et al. Effect of addition of several types of straws on N_2O and CH_4 emissions from soil under flooding condition in Hainan Province [J]. Journal of Environment Science, 2017, 30(10): 4004-4010.
- [12] 张卫红. 秸秆还田方式与水稻品种对双季稻 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- Zhang W H. The Impact of different straw returning forms and rice varieties on CH_4 and N_2O emission in a double rice field [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [13] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): 153-174.
- [14] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field [J]. Soil Research, 2007, 45(5): 359-367.
- [15] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2923-2936.
- Shi S W, Li Y E, Liu Y T, et al. Mitigation options of CH_4 and N_2O emissions from rice fields [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2923-2936.
- [16] 章明奎, Walegn D B, 唐红娟, 等. 生物质炭对土壤有机质活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 127-131.
- Zhang M K, Walegn D B, Tang H J, et al. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 127-131.
- [17] 蒋晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 184-191.
- Jiang C, Ma P X, Hu B G, et al. Effect of biochar returning to paddy field on CH_4 emission reduction [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 184-191.
- [18] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [19] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 240-246.
- Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, et al. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 240-246.
- [20] 郑立臣, 解宏图, 李维福, 等. 外源添加物对秸秆还田土壤中无机氮转化影响 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(S2): 275-277.
- Zheng L C, Xie H T, Li W F, et al. Effect of extraneous source supplement on inorganic nitrogen transformation in corn stalk-retuning soil [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(S2): 275-277.
- [21] 柳铮铮, 曾从盛, 钟春祺, 等. 酸沉降对泥炭地甲烷排放和碳循环的影响 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1799-1805.
- Liu Z Z, Zeng C S, Zhong C Q, et al. Effects of acid deposition on methane emission and carbon cycling in peatland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1799-1805.
- [22] 贾晓珊, 李顺义. 厌气混合培养中产甲烷菌和硫酸盐还原菌的动力学竞争: II. 动力学推定的结果及讨论 [J]. 中山大学学报自然科学版, 2004, 43(1): 92-97.
- Jia X S, Li S Y. Kinetic competition between methanogenic and sulfate-reducing bacteria in anaerobic cultures: II. results and discussion [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyateseni, 2004, 43(1): 92-97.
- [23] 李娜, 陈建中, 李宇飞. 湿地温室气体气相色谱分析及采样-进样技术研究进展 [J]. 分析测试技术与仪器, 2010, 16(4): 213-217.
- Li N, Chen J Z, Li Y F. Advances in GC analysis of wetland greenhouse gases and sampling-injection techniques [J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2010, 16(4): 213-217.
- [24] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(10): 84-89.
- Wang Y S, Liu G R, Wang Y H, et al. Simultaneous measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emission from terrestrial ecosys-

- tem with one improved gas chromatography [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4 (10): 84-89.
- [25] 张洪培. 生物炭对旱作农田 N_2O 排放及硝化作用的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Zhang H P. Effects of biochar on N_2O emissions and soil nitrification in dryland farming ecosystem [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [26] 黄 剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Huang J. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [27] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2): 827.
- [28] 陈红霞, 杜章留, 郭 伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2930-2934.
- Chen H X, Du Z L, Guo W, et al. Effects of biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and particulate matter content in farmland of North China Plain [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (11): 2930-2934.
- [29] 赵 维, 蔡祖聪. 氮肥品种对亚热带土壤 N_2O 排放的影响 [J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 248-254.
- Zhao W, Cai Z C. Effects of nitrogen fertilizer on N_2O emission from subtropical soil [J]. *Journal of Soil Science*, 2009, 46 (2): 248-254.
- [30] 魏 华, 韩 芸, 张晓明, 等. 缺氧环境下硫酸盐还原对反硝化过程影响的特性试验研究 [J]. *环境工程*, 2005, 23(5): 76-79.
- Wei H, Han Y, Zhang X M, et al. Experimental study on the effect of sulfate reduction on denitrification in anoxic environment [J]. *Environmental Engineering*, 2005, 23(5): 76-79.
- [31] 张中杰, 朱 波, 项红艳, 等. 氮肥施用对西南地区紫色土冬小麦 N_2O 释放和反硝化作用的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10): 2033-2040.
- Zhang Z J, Zhu B, Xiang H Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer for wheat on N_2O emission and denitrification in purple soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (10): 2033-2040.
- [32] 陈 晨, 王春隆, 周璐瑶, 等. 施用生物炭和硝化抑制剂对菜地 N_2O 排放和蔬菜产量的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(2): 287-294.
- Chen C, Wang C L, Zhou L Y, et al. Effects of biochar and nitrification inhibitors on N_2O emission and vegetable yield in vegetable field [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(2): 287-294.
- [33] Jeffery S, Fga V, Van V M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 144(1): 175-187.
- [34] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics [J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41.
- [35] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 1948-1955.
- Gao H Y, He X S, Chen X X, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [36] 潘达龙. 不同氮肥对水稻生长和产量的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- Pan D L. Influences of different nitrogen fertilizers on the growth and yield of rice [D]. Nanning: Guangxi University, 2015.