

生物质炭和腐殖质对稻田土壤 CH₄和 N₂O 排放的影响

陈 峰^{1,2}, 刘 娟^{1,2}, 郑梅群^{1,2}, 姜培坤^{1,2}, 吴家森^{1,2}, 李永夫^{1,2}, 李松昊³

(1.浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室,浙江 临安 311300;2.浙江农林大学
浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,浙江 临安 311300;3.杭州市临安区农林技术推广中心,浙江 临安 311300)

摘要:为探讨生物质炭与腐殖质单独施用与配合施用对稻田土壤 CH₄和 N₂O 气体排放以及水稻产量的影响。以浙江临安潜育性水稻土的稻田系统为研究对象,设置 2 个水稻秸秆生物质炭添加水平(0,20 t/hm²)和 3 个腐殖质水平(0,0.6,1.2 t/hm²),共 6 个处理,分别为:(1)B0F0(对照,不添加生物质炭和腐殖质);(2)B0F1(腐殖质用量为 0.6 t/hm²);(3)B0F2(腐殖质用量为 1.2 t/hm²);(4)B1F0(生物质炭用量为 20 t/hm²);(5)B1F1(生物质炭和腐殖质用量分别为 20,0.6 t/hm²);(6)B1F2(生物质炭和腐殖质用量分别为 20,1.2 t/hm²),研究生物质炭和腐殖质输入对水稻产量、稻田 CH₄和 N₂O 气体排放的影响。结果表明:(1)与 B0F0 相比,单独施用生物质炭和腐殖质或生物质炭与腐殖质配施均降低了土壤 CH₄累积排放量,但增加了土壤 N₂O 累积排放量;(2)生物质炭处理对 GWP(global warming potential)和 GHGI(greenhouse gas intensity)没有显著影响($P>0.05$),腐殖质处理显著降低了 GWP 和 GHGI($P<0.05$),生物质炭和腐殖质对 GWP 和 GHGI 存在显著交互作用($P<0.05$);(3)与 B0F0 相比,单独施用生物质炭和腐殖质或者生物质炭与腐殖质配施均能在一定程度上减少单位水稻产量的温室气体排放强度(GHGI),B0F2 处理的 GHGI 最低,表明单施腐殖质处理(腐殖质用量为 1.2 t/hm²)稻田土壤的减排效果和环境效应最好。研究结果为进一步探讨稻田土壤固碳减排提供数据支撑和理论依据。

关键词: 生物质炭; 腐殖质; 温室气体; 综合温室效应; 温室气体强度

中图分类号:S511.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)01-0368-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.047

Effects of Biochar and Humus on CH₄ and N₂O Emissions in Paddy Field

CHEN Feng^{1,2}, LIU Juan^{1,2}, ZHENG Meiqun^{1,2}, JIANG Peikun^{1,2},

WU Jiasen^{1,2}, LI Yongfu^{1,2}, LI Songhao³

(1.State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300;
2.Zhejiang Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystem and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University,
Lin'an, Zhejiang 311300; 3.Lin'an Agricultural Technology Extension Centre, Lin'an, Zhejiang 311300)

Abstract: To evaluate the effects of single and combined application of biochar and humus on CH₄ and N₂O emission in paddy field and rice yield, taking the paddy field system of gleyic paddy soil in Lin'an, Zhejiang Province as the research object, two addition levels of rice straw biochar (0 and 20 t/hm²) and three addition levels of humus (0, 0.6 and 1.2 t/hm²) were set in the experiment, and a total of six treatments were carried out, which were B0F0 (control, without biochar or humus), B0F1 (humus dosage of 0.6 t/hm²), B0F2 (humus dosage of 1.2 t/hm²), B1F0 (biochar dosage of 20 t/hm²), B1F1 (the amounts of biochar and humus were 20 t/hm² and 0.6 t/hm², respectively), B1F2 (the amounts of biochar and humus were 20 t/hm² and 1.2 t/hm², respectively). Effects of biochar and humus addition on rice yield, CH₄ and N₂O emissions in rice fields were studied. The results showed that: (1) Compared with B0F0, application of biochar and humus alone or combination all reduced cumulative CH₄ emission and increased cumulative emission of N₂O in soil. (2) Biochar treatment had no significant effect on GWP (global warming potential) and GHGI (greenhouse gas intensity) ($P>0.05$). Humus treatment significantly decreased GWP and GHGI ($P<0.05$). Biochar and humus had significant interaction on GWP and GHGI ($P<0.05$). (3) Compared with B0F0, the application

收稿日期:2021-06-29
资助项目:浙江省重点研发计划项目(2019C02008-03);国家自然科学基金项目(31700540)
第一作者:陈峰(1994—),男,硕士研究生,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail:chenfengzafu@126.com
通信作者:刘娟(1978—),女,副教授,硕士生导师,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail:liujuan@zafu.edu.cn

of biochar and humus alone or the combined application could reduce greenhouse gas emission intensity (GHGI) per unit rice yield to a certain extent. The GHGI of B0F2 treatment was the lowest, indicating that the application of humus alone (the amount of humus was 1.2 t/hm^2) had the best emission reduction effect and environmental effect. The results could provide data support and theoretical basis for further discussion on carbon sequestration and emission reduction in paddy soil.

Keywords: biochar; humus; greenhouse gas; GWP; GHGI

2013 年 IPCC 的第 5 次评估报告^[1]指出,气候变化及其应对问题是当今国际社会极为关注的重大全球性问题。 CH_4 和 N_2O 作为最主要的温室气体,其单位质量的增温潜势分别是 CO_2 的 25,298 倍^[1]。稻田是农田土壤主要的 CH_4 排放源,全球稻田 CH_4 排放量为 $25\sim 50 \text{ Tg/a}$,约占全球人为总排放的 $12\%\sim 26\%$ ^[2]。由于化学氮肥的大量施用,增加了农田土壤氧化亚氮(N_2O)的排放,稻田 N_2O 排放约占农田 N_2O 排放的 11% ^[3]。水稻是我国主要粮食作物,国内约有 65% 以上的人口以稻米为主食^[4],中国稻田面积约占世界水稻总面积的 23%,位居世界第二^[5]。因此,如何减少稻田 CH_4 和 N_2O 排放是我国乃至世界的研究热点。

生物质炭(biochar)是植物生物质在无氧或缺氧的条件下经高温热解产生的一类高度芳香化、富含碳的难溶性固态物质,具有高稳定性和强吸附性的特点^[6]。农田土壤中施用生物质炭增加了土壤有机碳含量和稳定性,对土壤 C、N 循环和温室气体排放产生重要影响^[7-9]。通过整合分析方法(meta-analysis)对我国农田土壤生物质炭的研究^[10]表明,生物质炭施用显著降低了农田土壤 N_2O 排放量、稻田 CH_4 排放量和 GWP,平均降低幅度分别为 14%,15%,16%。生物质炭中存在一些易降解的有机碳成分,为产甲烷菌提供了底物,施用生物质炭增加了稻田 CH_4 排放^[7]。

腐殖质是动植物遗骸经过微生物的分解和转化,以及地球化学的一系列过程积累起来的一类有机物质,其对土壤有机质和作物产量具有重要影响^[11-12]。陈佳等^[11]在盐碱地的试验结果表明,与对照相比,单施腐殖质、复合肥和腐殖质配施土壤有机质分别增加了 35%,61%。张沁怡等^[12]研究发现,腐殖质添加显著增加了水稻产量,当腐殖质用量为 1,10,100 kg/hm^2 时,水稻产量分别增加了 10%,13%,8%。农田土壤添加腐殖质的研究多集中于其对作物生长和产量的影响,但腐殖质施用对稻田土壤温室气体排放的研究较少。少数农田土壤腐殖质添加的研究^[13]表明,腐殖质添加促进了土壤 N_2O 排放,对 CH_4 排放没有显著影响。

本文以浙江临安潜育性水稻土的稻田系统作为

研究对象,研究生物质炭与腐殖质单独施用与配合施用对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 气体排放以及水稻产量的影响,为进一步探讨稻田土壤固碳减排提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点为浙江省杭州市临安区於潜镇,地处浙江省西北部,属于亚热带季风性气候。全年平均降水量约为 1 614 mm,降雨大多发生在 4—10 月,年平均降水日 158 天,全年平均气温 16.6°C ,年平均无霜期 241 天,年日照时间达 1 900 h 以上,土壤类型属于潜育性水稻土,试验开始前的种植制度为稻—麦轮作。试验期间(2020 年 7—11 月)累积降水量 777 mm,月平均气温 25.7°C 。试验前 0—20 cm 耕作层土壤理化性质为:pH(H_2O)5.61,有机碳和全氮分别为 19.2,1.34 g/kg,碱解氮、速效钾、有效磷分别为 100.03,131.04,19.50 mg/kg,容重 1.02 g/cm^3 ,阳离子交换量(CEC)13.3 cmol/kg。

生物质炭购自江苏华丰农业生物工程有限公司,为工厂储存的水稻秸秆生物质炭,温度为 600°C 热解炭化得到,其基本性质为:pH(H_2O)8.51,有机碳 140.9 g/kg,全氮 5.9 g/kg,容重为 0.26 g/cm^3 ,CEC 为 25.3 cmol/kg。腐殖质购自安徽无为县花卉肥料厂,其 pH(H_2O)7.71,有机碳含量 32.5 g/kg,腐殖质含量 20%~40%。生物质炭和腐殖质在施加前均过 2 mm 筛处理。

1.2 试验设计

本试验为 2 因素(生物质炭和腐殖质)不同添加水平的田间小区试验。生物质炭添加水平分别为 0, 20 t/hm^2 ,腐殖质添加水平分别为 0,0.6,1.2 t/hm^2 。6 个处理分别为:B0F0(对照,不添加生物质炭和腐殖质);B0F1 和 B0F2(不添加生物质炭,腐殖质添加量分别为 0.6 和 1.2 t/hm^2);B1F0、B1F1 和 B1F2(生物质炭添加量均为 20 t/hm^2 ,腐殖质添加量分别为 0, 0.6,1.2 t/hm^2),每个处理 3 次重复。试验共 18 个小区,每个小区大小为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,随机排列。为了防止串水串肥,小区田埂用黑色塑料膜包裹,每个小区设

独立的灌排水口。

供试水稻品种为“嘉丰优 2 号”，水稻于 7 月 12 日移栽，行、株距为 24 cm×24 cm，11 月 15 日收获。水稻生长前期保持淹水，分蘖期后排水晒田，晒田期为 8 月 16—31 日，之后恢复灌溉，保持土壤湿润，后期逐渐排干水分。所有处理的施肥量、施肥方式、田间病虫害管理措施同当地农户习惯常规管理一致。水稻施氮肥(以 N 计)、磷肥(以 P_2O_5 计)、钾肥(以 K_2O 计)分别为 270, 75, 150 kg/hm²，基肥(7 月 11 日)和分蘖肥(7 月 24 日)的氮肥用量均为 135 N kg/hm²，基肥采用当地农民常用复合肥(N : P_2O_5 : K_2O 为 17 : 10 : 17)，追肥采用尿素(含氮量 46%)和氯化钾。基肥撒施于土壤表层并均匀翻耕，追肥均匀撒施于土壤表层。生物质炭和腐殖质于 7 月 11 日一次性施加到土壤 0—20 cm 耕作层，手工充分混匀。

1.3 样品采集与测定

采用静态箱—气相色谱法对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放通量进行测定。样品的采集从水稻移栽开始至水稻收获，约 1 周采集 1 次样品，追肥后相应地增加取样频率。水稻插秧前每个小区布置 1 个静态箱底座。静态箱为组合式，由顶箱、箱体和基座 3 部分组合而成，制作材料为 PVC 硬塑料板，顶箱的尺寸为 0.5 m×0.5 m×0.5 m，在顶箱侧面中心有采气孔，采样前用橡胶塞进行密封；基座的尺寸规格为 0.5 m×0.5 m×0.2 m。气体采样时间安排在上午 9:00—11:00。采样前 1 天，检查气袋的密封性，并对气袋进行抽真空。每次采样前将底座注满水防止采样时底座漏气，接着将顶箱放入基座凹槽中。然后利用 60 mL 注射器从橡胶密封塞处插入静态箱中进行气体的采集，采样时间分别为盖上顶箱后的 0, 10, 20, 30 min，抽取好气样后立即注入气袋。后期等到水稻长到一定高度，每次采样前先将箱体放入基座凹槽中，然后将顶箱放入箱体凹槽中采气。为确保箱体内气体密度均匀，顶箱内部装有个小风扇，取样前 10 min 开启使箱内气体混匀。采样结束后，利用岛津 GC-2014 气相色谱仪(SHIMADZU, GC-2014, 日本)对气体样品的浓度进行测定， CH_4 由火焰离子化检测器(FID)分析，温度为 200 ℃，载气为高纯氢气和氧气。 N_2O 由电子捕获检测器(ECD)分析，温度为 250 ℃，载气为高纯氮气。

每次采集气体样品的同时，采集 0—20 cm 土层的土壤样品，带回实验室后，先除去可见的石块和根系，放在 4 ℃冰箱备用。参考鲁如坤^[14]的试验方法，对样地土壤基本性质进行测定：分别采用 pH 计法

(土水比 1 : 2.5)、重铬酸钾—外加热法、碱解扩散法、 $HCl-NH_4F$ 浸提—钼锑抗比色法、乙酸铵浸提—火焰光度计法、环刀法、凯氏定氮法、乙酸铵交换法测定土壤 pH、土壤总有机碳、土壤碱解氮、土壤有效磷、速效钾、容重、全氮、阳离子交换量。

2020 年 11 月 15 日水稻收获，每个小区实打实收，人工收割脱粒，测定含水量，计算水稻产量(kg/hm²)。

1.4 数据处理

土壤 N_2O 和 CH_4 排放通量的计算公式为：

$$F = \rho \frac{V P}{A P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_i}{d_i}$$

式中： F 为 CH_4 、 N_2O 的排放通量(mg/(m²·h))； ρ 为标准状态下 CH_4 、 N_2O 气体的密度(mg/m³)； A 为静态箱的底面积大小，即采集土壤表面积(m²)； V 为静态箱内的空间体积(m³)； dC_i/d_i 为单位时间静态箱内 CH_4 、 N_2O 气体浓度的变化量($\mu L/(m^3 \cdot h)$)； T_0 为标准状态下的空气的绝对温度(℃)； P_0 为标准状态下的气压(kPa)； T 为取样时静态箱内空气的绝对温度(℃)； P 为大气压(kPa)。

土壤 N_2O 和 CH_4 累积排放通量的计算公式为：

$$M = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5}$$

式中： M 为 CH_4 、 N_2O 累积排放量(kg/hm²)； F 为土壤 CH_4 、 N_2O 排放通量(mg/(m²·h))； i 为采样次数； t 为采样时间； n 为总测定次数； $t_{i+1} - t_i$ 为 2 次采样时间的间隔天数(d)。

在 100 年时间尺度上， CH_4 和 N_2O 的 GWP 分别为 CO_2 的 25, 298 倍^[1]，因此，全球增温潜势 GWP (CO_2 —eq kg/hm²) 计算公式为：

$$GWP = M(CH_4) \times 25 + M(N_2O) \times 298$$

式中：GWP 为综合温室效应(CO_2 —eq kg/hm²)； $M(CH_4)$ 为 CH_4 水稻生长期累积排放量(kg/hm²)； $M(N_2O)$ 为 N_2O 水稻生长期累积排放量(kg/hm²)。

温室气体强度 GHGI 计算公式为：

$$GHGI = GWP / W$$

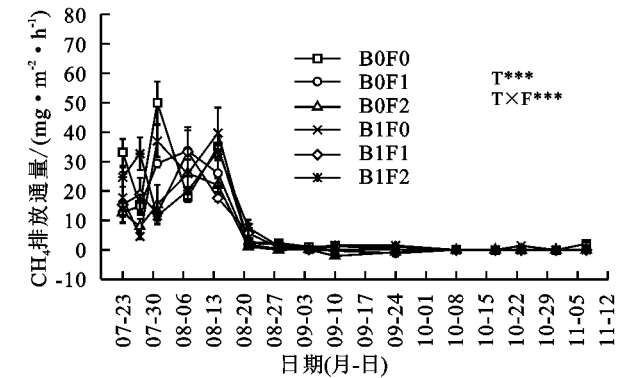
式中：GHGI 为温室气体强度(CO_2 —eq kg/kg)； W 为水稻产量(kg/hm²)。

利用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，Origin 2017 软件作图。不同处理及时间变化对温室气体排放通量的影响采用重复测量方差分析(repeated measures ANOVA)，生物质炭和腐殖质对 CH_4 、 N_2O 气体累积排放量、水稻产量、GWP 和 GHGI 的影响采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)，用 LSD 多重检验法检验不同处理间差异的显著性。本文中所有数据均是 3 次重复的平均值±标准误差。除特殊说明外，显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 CH₄ 排放通量和累积排放量

由图 1 可知,不同处理水稻生长周期内 CH₄ 排放通量均呈现了显著的时间分异规律($P<0.01$)。水稻生长期间 B0F0、B0F1、B0F2、B1F0、B1F1 和 B1F2 的 CH₄ 平均排放通量分别为 10.76,7.84,5.49,8.74,7.10,8.98 mg/(m²·h)。生物质炭处理对土壤 CH₄ 排放通量没有显著影响($P>0.05$),腐殖质显著影响 CH₄ 排放通量($P<0.05$)。各处理 CH₄ 排放的峰值均出现在水稻生长前期,B0F0 峰值在 7 月 31 日出现,峰值为 50.02 mg/(m²·h),B0F1、B0F2 和 B1F1 峰值均出现在 8 月 7 日,分别为 33.67,26.03,33.34 mg/(m²·h),B1F0 和 B1F2 的峰值均出现在 8 月 14 日,分别为 39.70,33.56 mg/(m²·h)。



注:误差线表示标准误差($n=3$);T、F、B 分别为采样时间、腐殖质处理、生物质炭处理;图柱上方不同大写字母表示同一生物质炭施用量水平下腐殖质施用量不同对甲烷累积排放量的影响差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一腐殖质施用量水平下生物质炭施用量不同对甲烷累积排放量的影响差异显著($P<0.05$)。下同。

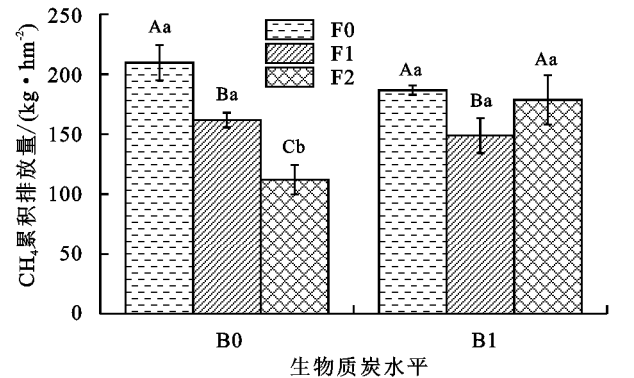
图 1 生物质炭和腐殖质对稻田 CH₄ 排放通量和累积排放量的影响

表 1 生物质炭和腐殖质对稻田 CH ₄ 、N ₂ O 累积排放量、水稻产量、GWP 和 GHGI 的双因素方差分析				
变量	显著水平	生物质炭	腐殖质	生物质炭×腐殖质
CH ₄ 累积排放量	F	2.650	26.883	20.561
	P	0.130	<0.01	<0.01
N ₂ O 累积排放量	F	0.774	4.547	20.318
	P	0.396	<0.05	<0.01
产量	F	0.766	3.279	0.554
	P	0.399	0.073	0.589
GWP	F	2.225	24.429	18.470
	P	0.162	<0.01	<0.01
GHGI	F	0.581	9.492	10.579
	P	0.461	<0.01	<0.01

2.2 N₂O 排放通量和累积排放量

由图 2 可知,不同处理水稻生长周期内 N₂O 排放通量均显示了显著的时间分异规律($P<0.01$)。水稻生长期间 B0F0、B0F1、B0F2、B1F0、B1F1 和 B1F2 的 N₂O 排放通量的均值分别为 0.018,0.044,0.034,0.042,0.034,0.039 mg/(m²·h),生物质炭和

由表 1 可知,双因素方差分析的结果表明,生物质炭处理对 CH₄ 累积排放量没有显著影响($P>0.05$),腐殖质处理显著降低 CH₄ 累积排放量($P<0.05$),腐殖质和生物质炭之间对 CH₄ 累积排放量存在显著交互作用($P<0.01$)。在 B0 水平下,添加腐殖质减少了 CH₄ 累积排放量,与 B0F0 相比,B0F1 和 B0F2 的 CH₄ 累积排放量分别降低了 22.8%,46.6%。在 B1 水平下,与 B1F0 相比,B1F1 和 B1F2 的 CH₄ 累积排放量分别降低了 20.3%,4.3%,B1F2 与 B1F0 之间的差异未达显著水平($P>0.05$)。在 F0 和 F1 水平下,施加生物质炭对 CH₄ 累积排放量均呈下降趋势,但处理间未达差异显著水平($P>0.05$)。在 F2 水平下,与 B0F2 处理相比,B1F2 处理的 CH₄ 累积排放量显著增加了 59.5%($P<0.05$)(图 1)。



注:误差线表示标准误差($n=3$);T、F、B 分别为采样时间、腐殖质处理、生物质炭处理;图柱上方不同大写字母表示同一生物质炭施用量水平下腐殖质施用量不同对甲烷累积排放量的影响差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一腐殖质施用量水平下生物质炭施用量不同对甲烷累积排放量的影响差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 生物质炭和腐殖质对稻田 CH₄ 排放通量和累积排放量的影响

腐殖质处理对 N₂O 排放通量均没有显著影响($P>0.05$)。各处理 N₂O 排放主要出现在水稻生长前期,各处理 N₂O 排放通量出现峰值的时间为:B0F0、B1F0 和 B1F2 的峰值均出现在 7 月 31 日,分别为 0.076,0.332,0.367 mg/(m²·h),B0F1 和 B0F2 的峰值均出现在 8 月 14 日,分别为 0.353,0.180 mg/(m²·h),B1F1 的峰值在 7 月 27 日出现,峰值为 0.202 mg/(m²·h)。

由表 1 可知,双因素方差分析结果表明,生物质炭处理对 N₂O 累积排放量没有影响($P>0.05$),腐殖质处理显著影响了 N₂O 的累积排放量($P<0.05$),生物质炭和腐殖质对 N₂O 累积排放量存在显著的交互作用($P<0.01$)。在 B0 水平下,添加腐殖质增加了 N₂O 累积排放量,与 B0F0 相比,B0F1 和 B0F2 的 N₂O 累积排放量分别显著增加了 164.9%,86.9% ($P<0.05$);在 B1 水平下,添加腐殖质减少了 N₂O 累积排放量,与 B1F0 相比,B1F1 和 B1F2 的 N₂O 累积排放量分别显著降低了 28.9%,31.5% ($P<0.05$)。在 F0 水平下,施加生物质炭显著增加了 N₂O 累积排放量($P<0.05$),与 B0F0 相比,B1F0 的 N₂O 累积排放量

显著增加了 114.1% ($P<0.05$); 在 F1 水平下, 与 B0F1 相比, B1F1 的 N_2O 累积排放量降低了 42.5%

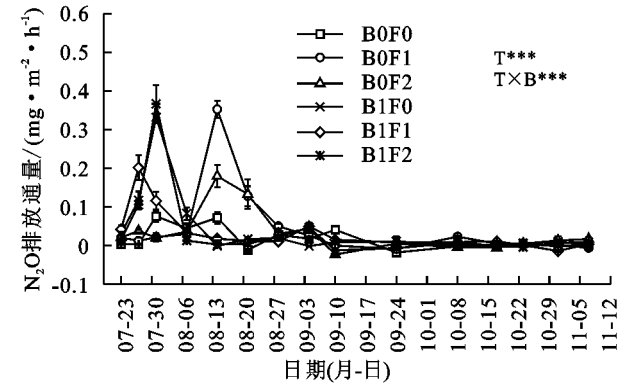


图 2 生物质炭和腐殖质对稻田 N_2O 排放通量和累积排放量的影响

2.3 水稻产量

由表 1 可知, 生物质炭和腐殖质对水稻产量均没有显著影响 ($P>0.05$), 生物质炭与腐殖质对水稻产量没有显著交互作用 ($P>0.05$)。B0F0、B0F1、B0F2、B1F0、B1F1 和 B1F2 的平均产量分别为 10 307, 9 197, 9 483, 10 148, 9 651, 9 875 kg/hm² (图 3)。

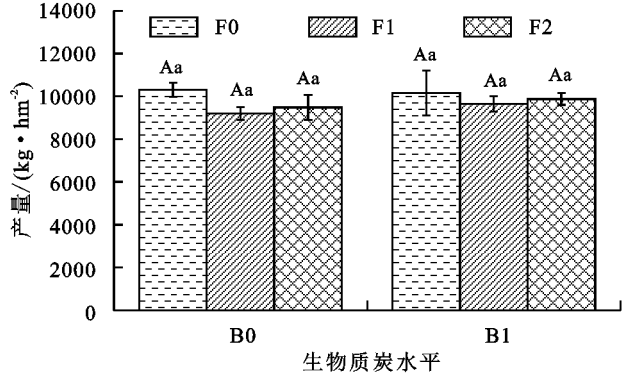


图 3 生物质炭和腐殖质对水稻产量的影响

2.4 GWP 和 GHGI

生物质炭对 GWP 没有显著影响 ($P>0.05$), 腐殖质处理显著降低了 GWP ($P<0.05$), 生物质炭和腐殖质对 GWP 存在显著的交互作用 ($P<0.05$) (表 1)。水稻生长期间 B0F0、B0F1、B0F2、B1F0、B1F1 和 B1F2 的 GWP 分别为 5 362, 4 363, 3 024, 4 923, 3 902, 4 641 CO₂-eq kg/hm² (图 4)。

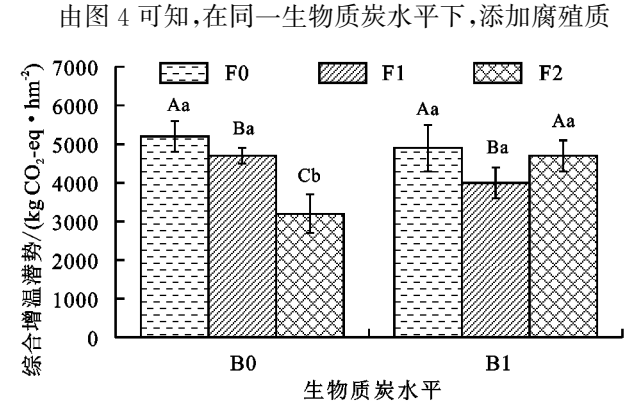
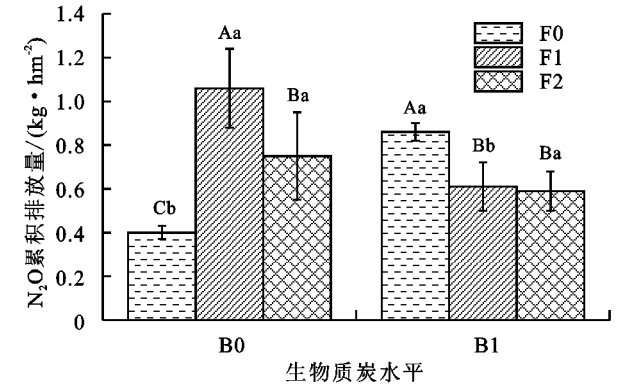


图 4 生物质炭和腐殖质对 GWP 和 GHGI 的影响

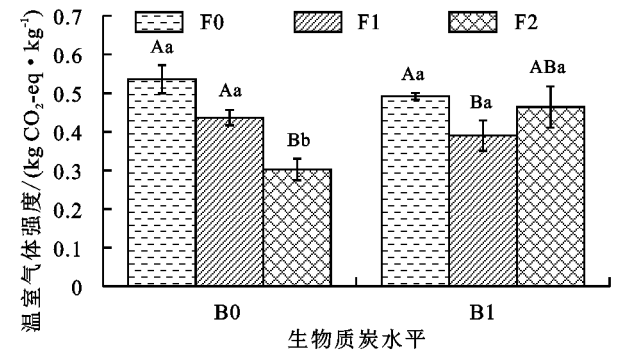
($P<0.05$); 在 F2 水平下, 施加生物质炭对 N_2O 累积排放量没有显著影响 ($P>0.05$) (图 2)。



有减少 GWP 的趋势。在 B0 水平下, 与 B0F0 相比, B0F1 和 B0F2 的 GWP 分别降低了 18.6%, 43.6% ($P<0.05$); 在 B1 水平下, 与 B1F0 相比, B1F1 和 B1F2 的 GWP 降低了 20.7% ($P<0.05$), 5.7%, B1F2 与 B1F0 的差异未达显著水平 ($P>0.05$)。在 F0 和 F1 水平下, 施加生物质炭有降低 GWP 的趋势, 但处理间差异未达显著水平 ($P>0.05$); 在 F2 水平下, 与 B0F2 处理相比, B1F2 的 GWP 显著增加了 53.5% ($P<0.05$)。

生物质炭处理对 GHGI 没有显著影响 ($P>0.05$), 腐殖质处理显著降低了 GHGI ($P<0.05$), 生物质炭和腐殖质之间对 GHGI 的影响存在显著交互作用 ($P<0.05$) (表 1)。水稻生长期间 B0F0、B0F1、B0F2、B1F0、B1F1 和 B1F2 的 GHGI 分别为 0.52, 0.48, 0.32, 0.49, 0.41, 0.47 CO₂-eq kg/kg (图 4)。

由图 4 可知, 在同一生物质炭水平下, 添加腐殖质均有减少 GHGI 的趋势。在 B0 水平下, 与 B0F0 相比, B0F2 的 GHGI 降低了 38.4% ($P<0.05$), B0F1 没有显著影响 ($P>0.05$); 在 B1 水平下, 与 B1F0 相比, B1F1 的 GHGI 降低了 17.3% ($P<0.05$), B1F2 没有显著影响 ($P>0.05$)。在 F0 和 F1 水平下, 施加生物质炭有降低 GHGI 的趋势, 但处理间差异未达显著水平 ($P>0.05$), 在 F2 水平下, 与 B0F2 相比, B1F2 的 GHGI 显著增加了 46.4% ($P<0.05$)。



3 讨论

3.1 生物质炭和腐殖质对 CH_4 排放的影响

本研究中,在 F0 和 F1 水平下,生物质炭均呈现了降低 CH_4 排放的趋势,但处理之间差异未达显著水平。蒋晨等^[15]通过稻田试验研究了 3 种类型的生物质炭(稻秆炭、麦秆炭、竹炭)对 CH_4 排放的影响发现,与对照相比,3 种类型的生物质炭均显著降低 CH_4 排放。刘成等^[10]通过利用整合分析方法(Meta-analysis)对我国农田土壤生物质炭的研究表明,生物质炭施用显著降低了稻田甲烷(CH_4)排放量,平均降低幅度为 15.2%。生物质炭减少 CH_4 排放的原因可能是既增加了产甲烷菌,也增加了甲烷氧化菌,并且对甲烷氧化菌的增高比例显著高于对产甲烷菌的增高比例,从而降低了 CH_4 排放^[16]。但在 F2 水平下,添加生物质炭显著增加了 CH_4 累积排放量,说明生物质炭对 CH_4 累积排放量受腐殖质输入水平的影响,当腐殖质用量增加时, CH_4 累积排放量增加。本研究中,双因素方差分析结果表明,腐殖质和生物质炭对土壤 CH_4 排放存在显著交互作用,可能是较高量的腐殖质刺激并加强了微生物活性,但相关机理尚需进一步研究。

腐殖质是动植物遗骸经过微生物分解、转化和地球化学形成的有机物质^[12]。本研究中,在 B0 和 B1 水平下,添加腐殖质均降低了 CH_4 累积排放量,其原因可能是腐殖质通常会作为电子受体限制 CH_4 的排放^[17]。也有少数相关研究^[13]表明,尽管腐殖质的施用为 CH_4 产生提供了丰富的底物,但由于试验样地较高的盐分含量抑制了 CH_4 排放,导致腐殖质施用对 CH_4 排放没有影响。

3.2 生物质炭和腐殖质对 N_2O 排放的影响

生物质炭的施用可通过改变土壤的孔隙性和微生物活性,从而影响 N_2O 的排放。本研究中,在 F0 水平下,添加生物质炭显著增加了 N_2O 累积排放量,这与已有的研究^[18]结果一致。Shen 等^[18]通过湖南长沙典型的双季稻田研究发现,与对照相比,添加小麦秸秆制成的生物质炭增加了 N_2O 排放。 N_2O 排放增加的原因可能包括:(1)生物质炭能增加土壤氨氧化菌的数量,从而促进土壤硝化过程及相应的 N_2O 产生^[19];(2)生物质炭改善土壤的通气性,更多的 O_2 可能干扰到 N_2O 还原酶,从而导致 N_2O 增加^[18]。但在 F1 和 F2 水平下,添加生物质炭则降低了 N_2O 累积排放量,说明生物质炭对 N_2O 累积排放量受腐殖质加入水平的影响,可能是生物质炭和腐殖质对 N_2O 累积排放量存在交互作用,使得反硝化作用的

底物减少,从而降低 N_2O 的排放,其作用的机理需要进一步研究。

少数腐殖质添加的研究^[13]表明,腐殖质增加了 N_2O 排放量,在无氮肥施用下,添加腐殖质增加了 N_2O 累积排放量 35%;在氮肥施用条件下,添加腐殖质增加了 N_2O 累积排放量 4%。本试验中,在 B0 水平下,添加腐殖质显著增加了 N_2O 累积排放量,原因是腐殖质施入后增加了土壤氧化还原电位,土壤氧化还原电位与 N_2O 排放呈显著正相关^[13]。在 B1 水平下,由于受腐殖质和生物质炭交互作用的影响,添加腐殖质则降低了 N_2O 累积排放量,也说明腐殖质对 N_2O 累积排放量受生物质炭加入水平的影响。

3.3 生物质炭和腐殖质对水稻产量的影响

产量是水稻生长的重要指标,可直观体现肥料肥效。本试验中,生物质炭和腐殖质处理对水稻产量均没有显著影响,这与已有研究^[20-21]结果一致。张斌等^[20]通过稻田试验发现,在施氮肥处理下,施用生物质炭对水稻产量没有显著影响。曲晶晶^[21]通过早晚稻试验研究发现,与不添加生物质炭 C0(0 t/hm²)相比,施用 2 种水平的生物质炭 C1(20 t/hm²)、C2(40 t/hm²)对早稻产量均无显著影响。Liu 等^[22]根据整合国内外已经发表的试验数据发现,生物质炭对水稻产量的影响受到作物类型、土壤性质、生物质炭类型等因素的控制,与小麦和玉米相比,生物质炭施用对水稻增产作用非常有限。由于当地土壤肥力较高(土壤略呈微酸性,有机质和有效钾较丰富)^[20]、水肥条件好、外源物质(生物质炭和腐殖质)不易产生增产效应。

3.4 生物质炭和腐殖质对 GWP 和 GHGI 的影响

GWP 常被用来比较不同温室气体对气候的潜在效应,GHGI 表示农业中生产单位产量的粮食对气候的影响^[23]。本研究中,在 F0 和 F1 水平下,生物质炭有降低 GWP 和 GHGI 的趋势,F2 水平下,生物质炭显著增加了 GWP 和 GHGI,表明生物质炭对 GWP 和 GHGI 的影响受腐殖质处理的影响,二者之间存在显著交互作用。但综合生物质炭和腐殖质双因素的方差分析结果表明,生物质炭对 GHGI 和 GWP 没有显著影响,腐殖质显著降低了 GWP 和 GHGI 与已有研究^[13,24]结果一致。蓝兴福等^[24]通过稻田研究发现,与对照相比,添加 8 t/hm² 的生物质炭对早晚稻的 GWP 没有显著影响。Sun 等^[13]通过稻田试验研究发现,氮肥配施腐殖质能在一定程度上降低 GHGI。本试验中,B0F2 处理的 GWP 和 GHGI 均最低,表明单施腐殖质处理(腐殖质用量为 1.2 t/hm²)时稻田土壤的减排效果和环境效应最好。

4 结 论

稻田生态系统作为重要的农业温室气体排放源,单独施用生物质炭和腐殖质或生物质炭与腐殖质配施均降低了土壤 CH_4 累积排放量,增加了土壤 N_2O 累积排放量,在一定程度上减少了单位水稻产量的温室气体排放强度。单独添加腐殖质处理(腐殖质用量为 1.2 t/hm^2)对 GWP 和 GHGI 降低幅度最大,因此,在今后的研究中应更加关注腐殖质对稻田土壤固碳减排效果和环境效应,为实现我国农业碳中和碳达峰提供参考。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernment Panel on Climate Change [M]. UK: Cambridge University Press, 2013; e1535.
- [2] 尉海东. 稻田甲烷排放研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 6-10.
- [3] 薛建福, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 1-9.
- [4] 陈凤霞, 吕杰, 史元, 等. 我国稻米质量安全生态环境的现状 & 发展对策[J]. 生态经济, 2015, 31(2): 109-112.
- [5] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7668-7678.
- [6] 史明, 胡林潮, 黄兆琴, 等. 生物质炭的加入对土壤吸附菲能力以及玉米幼苗对菲吸收量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 912-916.
- [7] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. Field Crops Research, 2012, 127: 153-160.
- [8] 肖欣娟, 夏建国, 马黛玉, 等. 茶渣生物质炭对茶园土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 294-300.
- [9] 周际海, 陈晏敏, 袁颖红, 等. 秸秆与生物质炭施用对土壤温室气体排放的影响差异[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 248-254.
- [10] 刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 等. 基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 696-706.
- [11] 陈佳, 姜增明, 费云鹏, 等. 复合肥与腐殖酸配施对盐碱地改良及棉花生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2015(10): 54-57.
- [12] 张沁怡, 李文蔚, 阳晶, 等. 腐殖酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究[J]. 云南农业大学学报, 2015, 30(2): 185-191.
- [13] Sun L Y, Ma Y C, Liu Y L, et al. The combined effects of nitrogen fertilizer, humic acid, and gypsum on yield-scaled greenhouse gas emissions from a coastal saline rice field[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(19): 19502-19511.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000, 146-226.
- [15] 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.
- [16] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 80-88.
- [17] Heitmann T, Goldammer T, Beer J, et al. Electron transfer of dissolved organic matter and its potential significance for anaerobic respiration in a northern bog [J]. Global Change Biology, 2007, 13(8): 1771-1785.
- [18] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 188(4): 264-274.
- [19] Sánchez-García M, Roig A, Sánchez-Monedero M A, et al. Biochar increases soil N_2O emissions produced by nitrification-mediated pathways[J]. Frontiers in Environmental Science, 2014, 2(2): e25.
- [20] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844-4853.
- [21] 曲晶晶. 生物质炭稻田施用下的土壤固碳减排效应及其对水稻生产力的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [22] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1): 583-594.
- [23] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments [J]. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2196-2210.
- [24] 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 等. 炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 489-498.