

文章编号: 1674-7054(2022)03-0300-09



# 生物炭及与秸秆联用对我国热带地区 稻田土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的影响

袁新生, 赵炎, 唐瑞杰, 胡天怡, 朱启林, 汤水荣, 伍延正, 孟磊

(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

**摘要:** 为了研究添加生物炭、秸秆、生物炭与秸秆联用对热带地区稻田温室气体排放的影响, 通过盆栽培养试验, 设常规施肥(CK)、常规施肥配施 40 t·hm<sup>-2</sup> 椰糠生物炭(B)、常规施肥配施 3 t·hm<sup>-2</sup> 水稻秸秆(C)、常规施肥配施 40 t·hm<sup>-2</sup> 椰糠生物炭加 3 t·hm<sup>-2</sup> 水稻秸秆(B+C)4 个处理, 采用静态箱-气相色谱法监测整个水稻种植季 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放, 估算全球增温潜势(GWP)并测定收获后作物产量。结果表明, 相比 CK 处理, B、C 和 B+C 处理的 N<sub>2</sub>O 累计排放量分别降低 21.43%、21.89% 和 14.77%; B 处理的 CH<sub>4</sub> 累计排放量降低 38.21%, 而 C 和 B+C 处理的 CH<sub>4</sub> 累计排放量分别增加 14.63% 和 19.85%; C 和 B+C 处理显著增加 GWP, 而 B 处理显著降低 GWP; 单独添加生物炭减排效果最佳。与 CK 相比, B、C 处理的单株水稻产量分别增加 5.22%、8.76%, 而 B+C 处理的单株水稻产量降低 18.39% ( $P < 0.05$ )。因此, 在我国热带地区稻田, 单独施用 40 t·hm<sup>-2</sup> 生物炭, 可以实现温室气体减排和增产, 值得在田间推广应用。

**关键词:** 生物炭; 温室气体; 热带地区; 秸秆还田

**中图分类号:** X 53; S 511 **文献标志码:** A

**引用格式:** 袁新生, 赵炎, 唐瑞杰, 等. 生物炭及与秸秆联用对我国热带地区稻田土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的影响 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(3): 300-308. DOI: [10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.03.014](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.2022.03.014)

据 IPCC 报告, 全球尺度温度水平在 2017 年相比工业革命前上升了约 1 °C, 若不采取必要措施, 预计 2030—2052 年期间将增温 1.5 °C<sup>[1]</sup>。全球变暖主要与大气中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 等温室气体的浓度升高有关。自工业革命以来, 大气中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 的浓度分别增加了 150%、40%、20%。CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 作为 2 种重要的温室气体, 百年尺度的全球增温潜势(GWP)是 CO<sub>2</sub> 的 25 倍和 265 倍<sup>[2]</sup>, 农田土壤作为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的主要人为排放源, 分别占据全球人为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量的 50% 和 60%<sup>[3-4]</sup>, 其产生主要受气候类型、施肥模式、作物类型和种植制度等多种因素影响<sup>[5]</sup>。增加土壤碳固定是一种减少温室气体排放潜力很大的策略<sup>[6]</sup>。

海南热带地区雨热同期, 稻田干湿交替现象频发而易于 N<sub>2</sub>O 产生, 随之 CH<sub>4</sub> 排放可能受到影响而降低<sup>[7]</sup>。然而, 海南全年高温、降雨充沛的条件有利于土壤和作物碳代谢, 可能增加 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[8]</sup>。田伟等<sup>[9]</sup>对琼北晚稻田的原位监测发现热带地区稻田 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放分别达到 50.6 ~ 175.7、0.44 ~ 3.40 kg·hm<sup>-2</sup>; WELLER 等<sup>[10]</sup>在菲律宾洛斯巴尼奥斯国际试验站对水稻-水稻、水稻-玉米轮作长期监测发现, CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放分别达到 46.5 ~ 288.2、1.5 ~ 8.0 kg·hm<sup>-2</sup>; 石生伟等<sup>[11]</sup>研究表明, 我国非热带地区典型水稻种植区相同灌溉模式下 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放分别为 84 ~ 144、0.6 ~ 2.07 kg·hm<sup>-2</sup>, 表现出热带地区稻田高 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征。因

收稿日期: 2022-03-07

修回日期: 2022-04-11

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC049, 320RC493); 海南省自然科学基金青年基金项目(320QN196); 国家自然科学基金项目(41671243)

第一作者: 袁新生(1995-), 男, 海南大学热带作物学院 2019 级硕士研究生. E-mail: [1347389908@qq.com](mailto:1347389908@qq.com)

通信作者: 伍延正(1987-), 男, 讲师. 研究方向: 热区土壤氮循环过程. E-mail: [wyz198712@163.com](mailto:wyz198712@163.com); 孟磊(1973-), 男, 教授. 研究方向: 土壤碳氮循环及耕地改良. E-mail: [menglei94@sohu.com](mailto:menglei94@sohu.com)

此,需迫切探求我国热带地区 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 减排的有效措施。生物炭作为一种新型土壤改良剂,因其具有丰富多孔结构、比表面积大、对矿态氮吸附能力强及提升土壤 pH 等特性而被广泛应用于温室气体减排研究<sup>[12]</sup>。因此,农田生态系统添加生物炭被认为是最具潜力的减排措施之一,减排潜力可达 0.7 Gt C-eq·a<sup>[13]</sup>。大量研究表明,生物炭能通过改善土壤理化性质而减少温室气体排放<sup>[8, 14-15]</sup>,但也有研究表明,生物炭会显著增加温室气体排放<sup>[16]</sup>,或影响不显著<sup>[17]</sup>。作物秸秆还田被认为是补充土壤养分和降低温室气体排放的措施<sup>[18-19]</sup>;张杏雨等<sup>[20]</sup>综述中表明,秸秆还田能降低、或者增加温室气体排放。许多研究结果表明,单独施入秸秆或生物炭,对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响成相反趋势<sup>[18, 21]</sup>,如秸秆在稻田中施用易促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[22]</sup>,而生物炭能提高土壤 pH 和土壤孔隙度,有利于 CH<sub>4</sub> 氧化,则会减少 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[15]</sup>。生物炭大多呈碱性,施入土壤可能会促进 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 产生导致硝态氮含量增加而不利于氮素的保持;有研究表明,秸秆添加能有效固定土壤中矿态氮含量,从而减少氮素损失和 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[22]</sup>,但也有研究表明,在高含水量或大量添加秸秆条件下,秸秆好氧分解会导致氧气含量降低,这在高硝态氮背景下利于促进反硝化过程造成损失而非促进硝态氮固定<sup>[23]</sup>,生物炭作为一种能提高土壤孔隙度的改良剂,施用生物炭有利于无机氮的固定而抑制反硝化过程<sup>[24]</sup>。因此,秸秆和生物炭联用或许能同时达到增产、减少氮素损失和温室气体排放的目的。以往研究大多集中于单施秸秆或者生物炭<sup>[14, 18]</sup>,以及在旱地中联合施用<sup>[23, 25-26]</sup>,少有生物炭和秸秆联用在水稻田中对温室气体排放影响的研究。在生物炭施用情况下秸秆还田会对稻田温室气体排放带来何种影响尚不明确。生物炭施用情况下若能进行秸秆还田,对生物质资源循环利用具有重要意义。基于此,本研究以稻-菜轮作体系土壤为基础,采用盆栽培养的方法,设置常规对照、添加生物炭、添加水稻秸秆以及生物炭与秸秆联用 4 个处理,监测整个水稻种植季 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放。并通过测定水稻收获后土壤微生物量碳、微生物量氮(MBC/MBN)、作物产量和估算 GWP,综合探究生物炭、秸秆、生物炭与秸秆联用对温室气体排放和水稻产量的影响,以为田间生产提供指导。

## 1 材料与方法

**1.1 供试土壤** 供试土壤取自海南省澄迈县西岸村(19°55' N, 109°57' E)稻菜轮作田块的土壤,在水稻季结束后采集。该区域属典型热带季风气候,年均温、降雨量分别为 23.80 °C、1 786.10 mm。试验土壤为滨海沉积物母质发育的水稻土,质地为砂壤土。土壤经风干后去除石砾和植物根系并过 2 mm 筛,土壤背景理化值分别为:土壤 pH 5.90,有机碳含量 15.66 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量 116.93 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量 167.50 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 74.94 mg·kg<sup>-1</sup>,砂粒 61.70%,粉粒 20.5%,黏粒 17.80%。

**1.2 试验设计** 盆栽试验选用水稻品种为‘特优 808’,育苗 20 d 进行移栽。试验共设计 4 个处理,每个处理设置 4 个平行并按随机区组排列,分别为常规施肥处理(CK);常规施肥处理基础上添加 40 t·hm<sup>-2</sup> 生物炭处理(B);常规施肥处理基础上添加 3 t·hm<sup>-2</sup> 水稻秸秆处理(C);常规施肥处理基础上添加 40 t·hm<sup>-2</sup> 椰糠生物炭+3 t·hm<sup>-2</sup> 水稻秸秆处理(B+C)。水分管理按照淹水-晒田 1 周-复水-收获前保持湿润进行。于 2020-05-19,按各处理将准备好的土壤、生物炭和秸秆混匀装入盆栽装置,每盆栽土 5 kg,并加水至土壤孔隙含水量(WFPS) 60% 进行活化。5 月 26 日活化完成后淹水 5 cm 并将秧苗移栽入盆中,隔天第 1 次采集气体。6 月 5 日进行第 1 次施肥,分别施尿素 0.49 g、过磷酸钙 0.85 g、氯化钾 0.30 g;6 月 30 日施第 2 次肥,分别施尿素 0.33 g、过磷酸钙 0.56 g、氯化钾 0.20 g,各处理施肥方案一致。试验期间各项农事管理措施一致。

供试生物炭由椰糠在 600 °C 下厌氧热解制成,pH 9.7、全碳含量为 676.78 g·kg<sup>-1</sup>、全氮含量为 5.03 g·kg<sup>-1</sup>、碳氮比为 134.49、比表面积为 5.84 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>;水稻秸秆经烘箱烘干粉碎机粉碎过 2 mm 筛备用。

**1.3 样品采集与测定** 气体样品采集采用密闭静态暗箱观测法,盆栽装置外围安装采气底座(53 cm×53 cm),边缘设置宽 2.5 cm 的蓄水槽用于密封。用白色 PVC 板制作采气箱(50 cm×50 cm×100 cm)用于气体样品采集。箱体外部包裹泡沫塑料保温层,以防箱内升温过快、箱顶侧边设有温度

计接口和带三通阀的采气口。采气前向底座凹槽内适量灌水以形成密闭环境,后将采样箱扣于底座凹槽上计时采气。采气时先用 100 mL 针管反复抽动几次使箱体内空气混匀,后于 0、10、20、30 min 抽取 60 mL 气体注入提前抽真空的 20 mL 顶空瓶(Nichiden-rika Glass Co. Ltd.)。采气时间为上午 08:00—11:00,常规采气频率为 1 周 1 次,施肥后加密采样 1 次。所采气样带回实验室用气相色谱仪(岛津 GC-2014)进行分析,  $N_2O$  检测器为电子捕获检测器(ECD),载气为氩甲烷;  $CH_4$  检测器为氢焰电离检测器(FID),载气为高纯氮,检测器温度 300 °C。标准气体由中国计量科学研究院提供。

采气当天用便携式 Eh 计(Bante 220)测定土壤 Eh 和土壤温度;土壤微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸— $K_2SO_4$  提取法进行测定<sup>[27]</sup>;土壤 pH 采用 pH 计(雷磁 PHS-3C)进行测定;土壤  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^- -N$  含量,用 2 mol·L KCl 浸提—连续流动分析仪(Proxima 1022/1/1, 爱利安斯科学仪器公司,法国)进行测定,土壤其他基本性质测定方法参考鲍士旦《土壤农化分析》<sup>[28]</sup>。

1.4 数据处理与分析  $CH_4$  和  $N_2O$  排放通量计算公式:

$$F = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times h,$$

式中,  $F$  为气体排放通量,  $F_{N_2O}$  单位为  $\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ,  $F_{CH_4}$  单位为  $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ;  $\rho$  为标准状态下  $CH_4$ -C 和  $N_2O$ -N 的密度/ $(kg \cdot m^{-3})$ ;  $h$  为采样箱高度/m;  $\Delta c/\Delta t$  为采样过程中箱内气体摩尔分数变化速率;  $T$  为采样时箱内平均温度/°C。

累积排放量( $f$ ,  $kg \cdot hm^{-2}$ )计算公式如下:

$$f = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right],$$

式中,  $n$  和  $i$  为采样次数,  $t$  为采样天数/d。

100 a 尺度的农田土壤直接排放的  $N_2O$ 、 $CH_4$  增温潜势( $GWP_{GHGS}$ ,  $CO_2$ -eq,  $kg \cdot hm^{-2}$ )计算公式<sup>[2]</sup>:

$$GWP_{GHGS} = f_{N_2O} \times 265 + f_{CH_4} \times 25,$$

使用 SPSS 23.0 进行皮尔森相关分析和单因素方差分析和 Origin2018 绘图。处理间差异采用 Duncan 多重比较法;  $P < 0.05$  为显著水平。

## 2 结果与分析

2.1 不同处理土壤理化性质变化 种植前期,各处理土壤 Eh 均维持在较低水平且低于 -150 mV,其中 B+C 处理明显低于其他处理;移栽 1 月进行晒田后,土壤 Eh 逐渐升高至 30 mV 左右;复水后 Eh 逐渐下降并总体维持在 -120 mV 上下波动直至收获。各处理 Eh 变化趋势一致(图 1-a); CK、B、C 和 B+C 4 个处理 Eh 均值分别为 -114.38、-109.78、-117.06 和 -121.86 mV。5 cm 土壤温度各处理温差在 2 °C 内且趋势一致(图 1-b)。

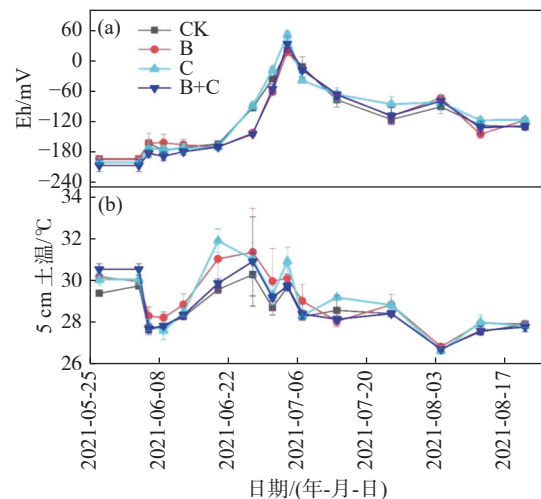


图 1 土壤 Eh(a)和土壤 5cm 土温(b)变化

土壤  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^- -N$  含量变化如图 2 所示。各处理土壤  $NH_4^+-N$  在第 1 次施肥后升高, C 处理峰值最低、B 和 B+C 处理峰值高于 CK 处理,后随时间延续下降,晒田期后 B、C 和 B+C 处理  $NH_4^+-N$  含量均明显低于 CK 处理(图 2-a)。土

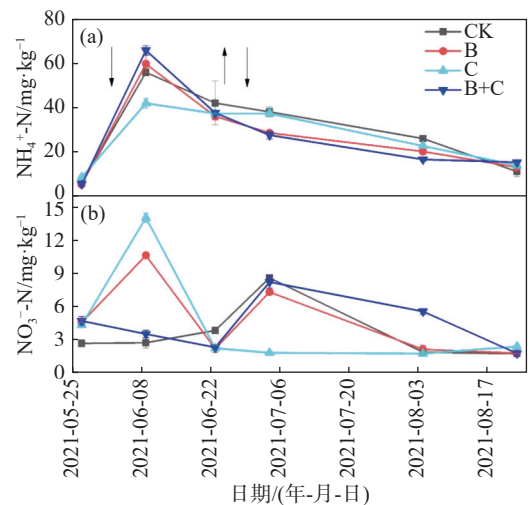


图 2 不同处理土壤  $NH_4^+-N$ (a)和  $NO_3^- -N$ (b)变化  
↓代表施肥;↑代表晒田,下同。

壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在 2 次施肥后各处理响应不同, 第 1 次施肥后 B+C 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量下降、其他处理升高, 但 B、C 和 B+C 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量逐渐低于 CK 处理; 晒田期后 B 和 C 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均明显低于 CK 处理且 C 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量一直维持在最低水平, 而 B+C 处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量明显高于 CK 处理并逐渐下降到最低水平(图 2-b)

**2.2 不同处理对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量及累计排放量的影响** 观测期内各处理 CH<sub>4</sub> 通量为 0.1 ~ 25.0 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(图 3-a)。第 1 次施肥后, 相比其他处理, B+C 处理对 CH<sub>4</sub> 排放通量响应较快, 一直处于上升趋势直至晒田期前夕出现峰值; CK、B 和 C 处理第 1 次施肥后对 CH<sub>4</sub> 排放通量响应较慢, 并且峰值较小, 添加生物炭处理峰值最低; 晒田管理明显抑制 CH<sub>4</sub> 排放通量, 各处理在晒田期 CH<sub>4</sub> 排放通量直线下降, 晒田期结束复水进行第 2 次施肥后各处理出现第 2 个峰值, B+C 处理 CH<sub>4</sub> 排放通量最高; 大量 CH<sub>4</sub> 排放出现在水稻种植孕穗期至收获期, 各处理 CH<sub>4</sub> 排放通量呈上升趋势于收获前回降。CK、B、C 和 B+C 4 个处理 CH<sub>4</sub> 累计排放分别为 106.16、66.29、121.69 和 129.52 kg·hm<sup>-2</sup>; 相比 CK 处理, B 处理显著降低 CH<sub>4</sub> 排放 37.56%、C 和 B+C 处理分别显著增加 CH<sub>4</sub> 排放 14.63% 和 22.01%(*P*<0.05)(图 4-a)。

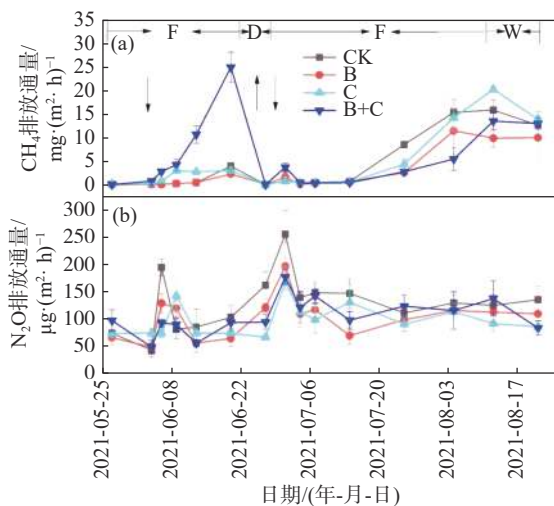


图 3 不同处理 CH<sub>4</sub>(a) 和 N<sub>2</sub>O(b) 排放通量 F 表示淹水; D 表示晒田; W 表示湿润。

观测期内各处理 N<sub>2</sub>O 排放通量在 49.0 ~ 256.3 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 之间, 晒田期各处理排放通量升高, 在施肥后出现峰值、且第 2 次峰值较第 1 个高(图 3-b)。CK 处理的 2 次排放峰值均最高且其 N<sub>2</sub>O 排放通量在整个种植期维持在较高水平。

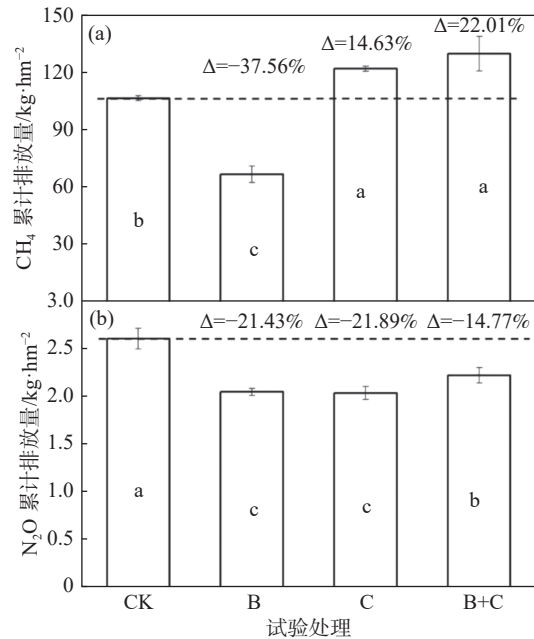


图 4 不同处理 CH<sub>4</sub>(a) 和 N<sub>2</sub>O(b) 累计排放量

不同字母表示有显著差异, *P*<0.05; Δ 表示处理与对照处理 CK 的比较, 下同。

CK、B、C 和 B+C 4 个处理 N<sub>2</sub>O 累计排放分别为 2.61、2.05、2.04 和 2.22 kg·hm<sup>-2</sup>。相比 CK 处理, B、C 和 B+C 处理分别显著减少了 N<sub>2</sub>O 累计排放 21.43%、21.89% 和 14.77%, B、C 处理 N<sub>2</sub>O 累计排放显著低于 B+C 处理(*P*<0.05)(图 4-b)。

**2.3 不同处理对产量和 GWP 的影响** 收获后, CK、B、C 和 B+C 4 个处理单株水稻产量分别为 57.87、60.90、62.94 和 47.23 g/株; B 和 C 处理分别显著增加单株水稻产量 5.22%、8.76%, B+C 处理显著降低单株水稻产量 18.39%(图 5-a)(*P*<0.05)。

CK、B、C 和 B+C 4 个处理 GWP 分别为 3.35、2.18、3.58 和 3.77 t CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-2</sup>; B 处理显著降低 GWP 34.74%、而 C 和 B+C 处理分别显著增加 GWP 7.08% 和 12.69%(图 5b)(*P*<0.05)。

**2.4 不同处理对生物量的影响** 收获后, CK、B、C 和 B+C 4 个处理单株水稻生物量分别为 140.57、156.38、163.80 和 141.77 g·株<sup>-1</sup>; B 和 C 处理分别显著增加水稻生物量 11.25% 和 16.53%(*P*<0.05), B+C 处理增加水稻生物量 0.85% 但不显著(图 6)。

**2.5 不同处理土壤微生物量碳和微生物量氮变化** 水稻收割后对土壤微生物量碳、微生物量氮进行了测定。相比 CK 处理, B 处理显著提高土壤微生物量碳(MBC)含量 10.52%、C 处理显著降低土壤微生物量碳(MBC)含量 7.18%(*P*<0.05), 而

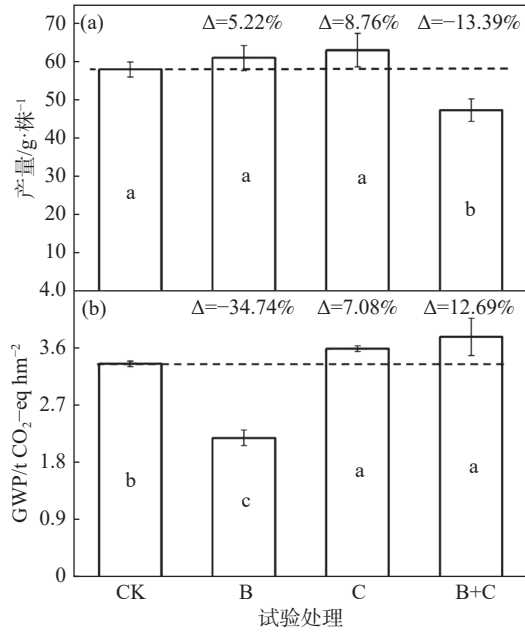


图 5 不同处理产量(a)和 GWP(b)

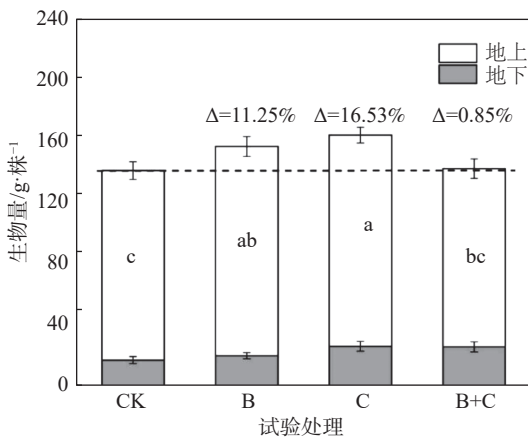


图 6 不同处理地下、地上和总生物量

灰色部分表示地下生物量、空白部分表示地上生物量、灰色加空白部分表示总生物量。

表 1 不同处理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量与 Eh、5 cm 土温的相关性

处理	CH <sub>4</sub> 排放通量				N <sub>2</sub> O排放通量			
	Eh	5 cm土温	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	Eh	5 cm土温	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
CK	-0.025	-0.540**	-0.071	-0.519**	0.566**	-0.094	-0.165	0.286
B	0.056	-0.453**	-0.337	-0.624**	0.385**	-0.067	0.275	0.309
C	-0.026	-0.540**	-0.359	-0.286	0.466**	-0.242	0.502*	0.567*
B+C	-0.247	-0.160	-0.158	-0.690**	0.590**	-0.164	-0.147	0.541**

注：“\*”表示 0.05 水平显著，“\*\*”表示 0.01 水平显著。

### 3 讨论

3.1 不同处理对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 CH<sub>4</sub> 在农田生态系统中有 2 种产生途径,一种是土壤产

B+C 处理土壤微生物量碳(MBC)含量提高 5.32% 但不显著(图 7-a)。与 CK 处理相比, B 处理土壤微生物量氮含量与 CK 相当,而 C 和 B+C 处理分别显著降低土壤微生物量氮(MBN)含量 12.89% 和 6.26%(P<0.05)(图 7-b)。

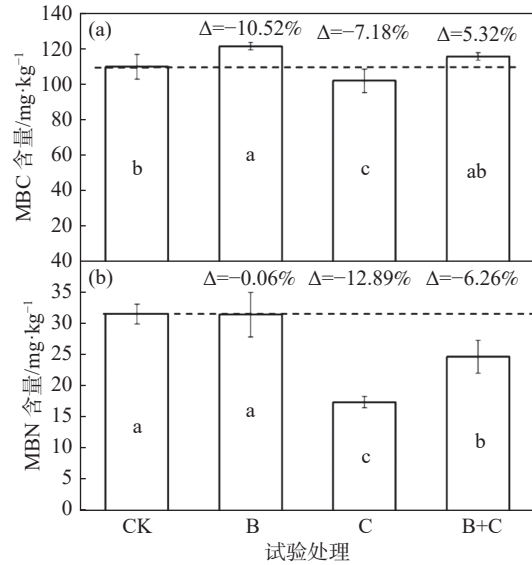


图 7 不同处理土壤微生物量碳(a)和氮(b)含量

2.6 不同处理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量与 Eh、5 cm 土温和土壤矿态氮的相关性 相关性分析结果表明,各处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 Eh 呈极显著正相关 (P<0.01)、而与 5 cm 土温相关性不显著, C 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 显著相关、B+C 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 极显著相关; CK、B 和 C 处理 CH<sub>4</sub> 排放通量与 5 cm 土温呈极显著负相关,而 B+C 处理与 5 cm 土温相关性不显著,除 C 处理以外,各处理 CH<sub>4</sub> 排放通量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 极显著负相关(表 1)。

甲烷菌利用微生物分解有机酸产生 CH<sub>4</sub>, 另一种是有机物在细菌分解下直接产生的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 被还原<sup>[5]</sup>。同时甲烷消耗受到甲烷氧化菌的调控;产甲烷菌和甲烷氧化菌同时受碳源、土壤 pH、Eh 以

及土温等因子直接或间接影响<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,相比 CK 处理,B 处理显著降低、C 和 B+C 处理显著增加  $\text{CH}_4$  排放(图 4-a)。施用生物炭一方面会增强土壤孔隙度而增加土壤好氧状态,从而抑制产甲烷菌的活性<sup>[29]</sup>;另一方面,有助于吸附大量  $\text{CH}_4$  为甲烷氧化菌提供碳源而促进  $\text{CH}_4$  氧化<sup>[30]</sup>,这使得 B 处理  $\text{CH}_4$  排放通量始终低于 CK 处理而减少  $\text{CH}_4$  累计排放(图 3-a)。C 处理由于秸秆腐解,会为产甲烷菌提供充沛碳源而促进  $\text{CH}_4$  大量排放<sup>[31-32]</sup>;MBC 对土壤有机质的形成至关重要<sup>[33]</sup>,而 C 处理显著降低了 MBC 含量,因此,秸秆添加可能使微生物的周转加快而增加对有机质的消耗导致  $\text{CH}_4$  排放增加。B+C 处理由于秸秆添加和生物炭自身部分不稳定性碳会为产甲烷菌提供丰富的碳源而促进  $\text{CH}_4$  排放;同时,B+C 处理的水稻产量和地上部分生物量最低也会导致 B+C 处理从秸秆向根际输送的氧气减少,使土壤更易处于厌氧状况<sup>[33-34]</sup>(图 6),这有利于  $\text{CH}_4$  的产生而并非抑制  $\text{CH}_4$  的氧化<sup>[35]</sup>,故其  $\text{CH}_4$  排放最高。土壤 Eh 作为反映土壤氧化还原条件的重要指标,当 Eh 处于  $-250 \sim -150$  mV 时, $\text{CH}_4$  排放量会随着土壤 Eh 的降低而呈指数增加<sup>[18]</sup>,B+C 处理在晒田期前土壤 Eh 一直处于  $-170$  mV 以下且始终维持在最低水平(图 1-a)。HU 等<sup>[36]</sup>研究表明,硝态氮含量增加会提高甲烷氧化菌活性;本研究结果表明, $\text{CH}_4$  排放通量与  $\text{NO}_3^-$ -N 极显著负相关(表 1),前期 B 和 C 处理提高了  $\text{NO}_3^-$ -N 含量有利于甲烷氧化菌活性而降低  $\text{CH}_4$  排放通量,B+C 降低  $\text{NO}_3^-$ -N 含量则增加  $\text{CH}_4$  排放通量,进入晒田期后,C 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 含量始终最低,而  $\text{CH}_4$  排放通量逐渐高于 CK 处理导致  $\text{CH}_4$  排放增加(图 2-b、图 3-a)。

农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  产生主要来自硝化、反硝化过程,同时反硝化过程完全进行也会使  $\text{N}_2\text{O}$  转化为  $\text{N}_2$ ,受施肥、土壤水分、pH、碳源等因素的影响<sup>[37-38]</sup>。一般认为,WFPS 在 30%~60% 间时,硝化作用是产生  $\text{N}_2\text{O}$  的主要来源;而当 WFPS 高于 70% 时, $\text{N}_2\text{O}$  的产生则主要来源于反硝化作用<sup>[38]</sup>。本研究中,相比 CK 处理,B、C 和 B+C 处理均显著降低了  $\text{N}_2\text{O}$  排放(图 4-b)。水稻移栽后由于存在返青期且苗较小,虽作为喜铵作物但对铵态氮的实际需求不高<sup>[39]</sup>;第 1 次施肥后出现  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰值,B、C 和 B+C 处理排放低于 CK 处理,由于前期反硝化可能较弱<sup>[37]</sup>,且 B 和 C 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放

低于 CK 处理,导致 B 和 C 处理硝态氮含量残留较高,B+C 处理前期硝态氮含量较低而后期升高可能是前期被微生物固定、后期经微生物矿化而升高<sup>[40]</sup>(图 2-b);第 2 次施分蘖肥后,此时水稻需大量吸收铵态氮用于生长,B 和 C 处理更高的水稻生物量表明对铵态氮吸收更多(图 6),使土壤铵态氮含量低于 CK 处理,硝化过程铵底物减少导致硝态氮含量较低(图 2-b),水稻吸收氮导致硝化和反硝化底物降低使  $\text{N}_2\text{O}$  排放减少<sup>[24]</sup>,生物炭对矿态氮的吸附也会进一步使硝化和反硝化底物减少而降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放。同时,分蘖期后 C 处理硝态氮含量最低、且显著降低了 MBN 含量(图 7-b),表明秸秆添加会促进反硝化过程使土壤硝态氮更多地以  $\text{N}_2$  形式消耗掉、且不利于土壤微生物对无机氮的固定,从而使  $\text{N}_2\text{O}$  排放降低<sup>[23]</sup>。相比 CK 处理,B+C 处理降低铵态氮而增加了硝态氮含量(图 2),前述分析表明 B+C 处理根际泌氧较低而更易处于厌氧状态,也显著降低了 MBN 含量(图 7-b),且相比 CK 处理有更多的碳源,这有利于反硝化彻底进行,而使反硝化过程产物更多以  $\text{N}_2$  而并非  $\text{N}_2\text{O}$  的形式排放<sup>[41]</sup>,从其两次施肥后  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰值最低可得到证实(图 3-b)。B+C 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著高于 B 和 C 处理,可能因为 B+C 处理水稻产量和地上生物量要低于其他 2 个处理导致后期对氮的吸收减少,因此,在进入晒田期后 B+C 处理硝态氮含量明显高于 B 和 C 处理而使反硝化底物充沛(图 2),同时,生物炭对矿态氮的吸附以及秸秆所提供丰富的碳源有利于反硝化进行<sup>[12,18]</sup>,使反硝化过程产物大部分以  $\text{N}_2$  形式排放的同时存在一部分  $\text{N}_2\text{O}$  排放。

### 3.2 不同处理对产量和全球增温潜势的影响

本研究结果表明,相比 CK 处理,B+C 处理降低了单株水稻、而 B 和 C 处理显著增加单株产量(图 5),B 和 C 处理结果与 LIU 等<sup>[42]</sup> 研究结果相似。生物炭处理可能由于改善土壤理化性质而有利于土壤氮素固持和作物养分持续吸收<sup>[17]</sup>,进而促进作物生长以实现增产(图 6)。秸秆添加处理由于秸秆在腐解后产生的有机质和有效养分可以促进水稻生长发育而增加水稻生物量(图 6),进而增加水稻产量<sup>[43]</sup>。本研究中,生物炭与秸秆联用减产可能由于生物炭对矿态氮的吸附以及秸秆提供大量碳源,有利于反硝化的进行从而导致土壤氮素损失而不利于作物的生长<sup>[12,18]</sup>;同时生物炭与秸秆

联用易于形成土壤厌氧条件致使秸秆腐解分泌更多的有机酸<sup>[18]</sup>,有机酸对作物的毒害作用抑制水稻生长从而降低水稻产量。DUAN等<sup>[23]</sup>两年田间研究也表明,相比单施生物炭或者秸秆,生物炭与秸秆联用降低作物产量和地上总生物量,相比单施生物炭减产达到显著水平。因此,相比生物炭与秸秆联用,单施生物炭或者秸秆可能更有利于作物生长和增产。

研究表明,相比CK处理,B处理显著降低水稻增温潜势(GWP),而C和B+C处理增加了GWP(图5-b),这与DUAN等<sup>[23]</sup>研究结果一致。本研究中,生物炭处理由于显著降低CH<sub>4</sub>累计排放37.56%和N<sub>2</sub>O累计排放21.43%(图4),从而显著降低了GWP。C和B+C处理对N<sub>2</sub>O累计排放分别显著降低21.89%和14.77%,但是对CH<sub>4</sub>累计排放则分别显著增加14.63%和22.01%,由于CH<sub>4</sub>累计排放量远高于N<sub>2</sub>O累计排放(图4),CH<sub>4</sub>排放增加部分对GWP的贡献高于N<sub>2</sub>O累计排放降低对GWP的影响。因此,生物炭单独添加降低增温潜势的效果更好。

## 4 结论

(1)在我国热带地区稻田土壤中,施用40 t·hm<sup>-2</sup>生物炭可有效实现温室气体减排、增加作物产量的目的。

(2)在我国热带地区稻田土壤中,施用3 t·hm<sup>-2</sup>秸秆能够有效提升作物产量,但会增加全球增温潜势、且不利于无机氮的固定。

(3)在我国热带地区稻田土壤中,生物炭与秸秆联用会增加CH<sub>4</sub>累计排放和全球增温潜势,同时,不利于作物生长和提高作物产量,因此,在施用40 t·hm<sup>-2</sup>生物炭的情况下不适合再进行秸秆还田处理。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of climate-change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [3] ZHOU M, WANG X, WANG Y, et al. A three-year experiment of annual methane and nitrous oxide emissions from the subtropical permanently flooded rice paddy fields of China: emission factor, temperature sensitivity and fertilizer nitrogen effect [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250: 299 – 307.
- [4] ASHIQ W, NADEEM M, ALI W, et al. Biochar amendment mitigates greenhouse gases emission and global warming potential in dairy manure based silage corn in boreal climate [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114869.
- [5] 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 等. 优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 5182 – 5190.
- [6] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Greenhouse Gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789 – 813.
- [7] XING G, ZHAO X, XIONG Z Q, et al. Nitrous oxide emission from paddy fields in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 45 – 50.
- [8] 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 等. 椰糠生物炭对热区双季稻田N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3931 – 3942.
- [9] 田伟, 伍延正, 孟磊, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2426 – 2434.
- [10] WELLER S, JANZ B, JORG L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 432 – 448.
- [11] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 等. 中国稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及减排整合分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2923 – 2936.
- [12] RIBAS A, MATTANA S, LLURBA R, et al. Biochar application and summer temperatures reduce N<sub>2</sub>O and enhance CH<sub>4</sub> emissions in a Mediterranean agroecosystem: Role of biologically-induced anoxic microsites [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 1075 – 1086.
- [13] SMITH P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1315 – 1324.
- [14] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 等. 生物炭与氮肥施用对双季稻田温室气体排放的影响[J]. *中国稻米*, 2021, 27(1): 20 – 26.
- [15] HUANG Y, WANG C, LIN C, et al. Methane and nitrous oxide flux after biochar application in subtropical acidic paddy soils under tobacco-rice rotation [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 17277.
- [16] LIU X, REN J, ZHANG Q, et al. Long-term effects of biochar addition and straw return on N<sub>2</sub>O fluxes and the related functional gene abundances under wheat-maize

- rotation system in the North China Plain [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 135: 44 – 55.
- [17] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469 – 475.
- [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: 264 – 274.
- [19] 桑琳. 增温及秸秆施用对农田土壤呼吸及酶活性的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [20] 张杏雨, 李思宇, 余锋, 等. 作物秸秆还田对稻田温室气体排放效应的研究进展 [J]. *杂交水稻*, 2021, 36(5): 1 – 7.
- [21] ZHANG A, CHENG G, HUSSAIN Q, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China [J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 45 – 54.
- [22] WANG J, CHEN Z, XU C, et al. Organic amendment enhanced microbial nitrate immobilization with negligible denitrification nitrogen loss in an upland soil [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117721.
- [23] DUAN M, WU F, JIA Z, et al. Wheat straw and its biochar differently affect soil properties and field-based greenhouse gas emission in a Chernozemic soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, 56(7): 1023 – 1036.
- [24] LIU X, MAO P, LI L, et al. Impact of biochar application on yield-scaled greenhouse gas intensity: A meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 969 – 976.
- [25] 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 等. 对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1569 – 1580.
- [26] WU Q, LIAN R, BAI M, et al. Biochar co-application mitigated the stimulation of organic amendments on soil respiration by decreasing microbial activities in an infertile soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(6): 793 – 807.
- [27] 吴金水, 林启美. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [29] 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*, 2011, 46: 80 – 88.
- [30] STEINBEISS S, GLEIXNER G, ANTONIETTI M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1301 – 1310.
- [31] WANG W, CHEN C, WU X, et al. Effects of reduced chemical fertilizer combined with straw retention on greenhouse gas budget and crop production in double rice fields [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 55(1): 89 – 96.
- [32] HUANG S, SUN Y N, YU X C, et al. Interactive effects of temperature and moisture on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> production in a paddy soil under long-term different fertilization regimes [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(3): 285 – 294.
- [33] WEI L, GE T, ZHU Z, et al. Paddy soils have a much higher microbial biomass content than upland soils: A review of the origin, mechanisms, and drivers [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2022, 326: 107798.
- [34] CHEN H H, LI X C, HU F, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis [J]. *Global change biology*, 2013, 19(10): 2956 – 2964.
- [35] WANG H, YU L F, ZHANG Z H, et al. Molecular mechanisms of water table lowering and nitrogen deposition in affecting greenhouse gas emissions from a Tibetan alpine wetland [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(2): 815 – 829.
- [36] HU A, LU Y. The differential effects of ammonium and nitrate on methanotrophs in rice field soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 31 – 38.
- [37] 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 等. 不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 65(2): 3943 – 3952.
- [38] 曹文超. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键过程及影响因素 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1781 – 1798.
- [39] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 507 – 515.
- [40] NOVAK J M, BUSSCHER W J, WATTS D W, et al. Short-term CO<sub>2</sub> mineralization after additions of biochar and switchgrass to a Typic Kandudult [J]. *Geoderma*, 2010, 154(3-4): 281 – 288.
- [41] WU Y, LI Y, WANG H, et al. Response of N<sub>2</sub>O emissions to biochar amendment on a tea field soil in subtropical central China: A three-year field experiment [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 318: 107473.
- [42] LIU J, JIANG B S, SHEN J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 311: 107286.
- [43] 房秋娜. 外源碳氮和秸秆还田对土壤酶活性和碳组分及水稻产量的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.



## Effect of biochar and its combined application with straw on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in paddy field soils in tropical China

YUAN Xinsheng, ZHAO Yan, TANG Ruijie, HU Tianyi,  
ZHU Qilin, TANG Shuirong, WU Yanzheng, MENG Lei  
(College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** Effective measures of greenhouse gas emission mitigation in paddy field in tropical China are still unclear. In order to explore the effect of biochar, straw amendment and the mixture of biochar and straw on greenhouse gas emission in paddy fields in tropical China, a pot experiment was conducted, and four treatments were arranged, including conventional fertilizer application as control (CK), conventional fertilizer application plus 40 t·hm<sup>-2</sup> of biochar (B), conventional fertilizer application plus 3 t·hm<sup>-2</sup> of rice straw (C), conventional fertilizer application plus 40 t·hm<sup>-2</sup> of biochar + 3 t·hm<sup>-2</sup> of rice straw (B+C). Static chamber-gas chromatography was used to monitor CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions for estimation of global warming potential (GWP), and the crop yield was measured after harvest. The results showed that compared with CK Treatments B, C and B+C significantly reduced the cumulative N<sub>2</sub>O emissions by 21.43%, 21.89%, and 14.77%, respectively, but only Treatment B significantly reduced the cumulative emission of CH<sub>4</sub> by 38.21%, while Treatments C and B+C significantly increased the cumulative emission of CH<sub>4</sub> by 14.63% and 19.85%, respectively. Meanwhile, Treatments C and B+C significantly increased GWP, while Treatment B significantly decreased GWP ( $P < 0.05$ ), which indicated that Treatment B had better greenhouse gas emission mitigation effect as compared to the other treatments. Treatments B and C significantly increased rice yield per plant by 5.22% and 8.76%, respectively, while Treatment B+C significantly decreased rice yield per plant by 18.39%. Thus, application of 40 t·hm<sup>-2</sup> of biochar in the paddy fields in tropical China is recommended to achieve greenhouse gas emission reduction and yield increase.

**Keywords:** biochar; greenhouse gas; tropical region; straw returning

(责任编辑:罗启香 责任编辑:钟云芳)