

不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响

王欣欣^{1,2}, 邹平^{1*}, 符建荣¹, 邵玲玲¹, 俞巧钢¹, 殷建祯¹, 叶静¹

(1. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:以来源于竹材废弃物的生物炭为试验材料, 采集宁绍平原典型稻田土壤进行水稻盆栽试验, 探究不同竹炭施用量条件下生物炭对稻田温室气体排放的影响。研究表明: 与空白对照处理相比, 来源于竹材废弃物的生物质经炭化后还田对稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 排放有显著的抑制作用, 且减排效果随着竹炭施用量的增加而增强, 生物炭处理的水稻产量亦比空白和常规施肥处理有所提高。施用竹炭条件下, CH_4 和 N_2O 季节累积排放量比对照处理分别降低了 58.2%~91.7% 和 25.8%~83.8%; 相对常规施肥处理而言, 降低幅度分别高达 64.3%~92.9% 和 72.3%~93.9%。这可能是由于竹炭所包含的有机碳高度芳香化而具有生物化学和热稳定性, 同时竹炭有很大的比表面积和表面吸附能, 竹炭的施用可能改善了水稻土理化特性并抑制相关微生物的活性, 从而降低了稻田温室气体排放。

关键词: 竹炭; 水稻盆栽; 甲烷; 氧化亚氮

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)01-0198-07 doi:10.11654/jaes.2014.01.026

Effects of Bamboo Biochar Amendments on Methane and Nitrous Oxide Emission from Paddy Soil

Wang Xin-xin^{1,2}, Zou Ping^{1*}, Fu Jian-rong¹, Shao Ling-ling¹, Yu Qiao-gang¹, Yin Jian-zhen¹, Ye Jing¹

(1. Institute of Environment, Resource, Soil & Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Biochar has been shown to improve soil physical, chemical and microbiological properties, and thus may inhibit greenhouse gas emission from soils. A pot experiment was conducted to investigate the impact of bamboo biochar applications on methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emission from a paddy soil collected from Ningshao plain, Zhejiang Province. The experimental results showed that applying bamboo-char significantly reduced the emission of methane and nitrous oxide compared with the control. There was a positive relationship between the emission and biochar rates. Rice yield was higher in the biochar treatments than in both the control and traditional fertilization treatments. In the biochar treatments, the total seasonal emissions of CH_4 and N_2O decreased by 58.2%~91.7% and 25.8%~83.8%, respectively, compared with the control; and by 64.3%~92.9% and 72.3%~93.9%, respectively, compared with the traditional fertilization. Our data suggest that biochar from manufacture wastes could be used to reduce greenhouse gas emission.

Keywords: bamboo-biochar; rice; methane; nitrous oxide

水稻生产是世界上最重要的粮食生产之一, 也是一种最可持续的农业利用方式。我国稻田面积仅次于印度, 居世界第二。然而, 随着人类文明的进程, 全球气候变化日益加剧, 研究发现稻田生态系统对温室效

应的贡献巨大。据 IPCC^[1]估计, 全球稻田每年排放的 CH_4 量约 60 Tg, 占全球总排放量的 20% 以上。国内外关于稻田温室气体排放、尤其在 CH_4 和 N_2O 的排放方面已经展开了一定的研究工作^[2-5]。尽管通过合理的水肥管理、选择优良品种、施用长效或控释肥、提高氮肥利用率和使用生物抑制剂等能有效减少温室气体排放^[6-9], 但是稻田对温室气体排放量的贡献率依然很大, 温室气体排放的控制仍然是农业环境保护领域急需突破的技术难题。近年来, 研究发现^[10], 生物质经炭化后具有较大的比表面积、良好的吸附性、多孔性、大

收稿日期: 2013-04-09

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFA91190); 国家自然科学基金项目(41201233); 国家公益性行业科研专项(201003059); 浙江省自然科学基金项目(LQ12D01003)

作者简介: 王欣欣(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事生物炭减排温室气体研究。E-mail: wangxin871211@163.com

* 通信作者: 邹平 E-mail: pzou@mail.zaas.ac.cn

量的表面负电荷等特点,可以改善土壤的物理和化学特性以及微生物环境,提高营养物质的利用率,进而有效抑制农田的温室气体排放^[11-13]。

浙江省是竹子的主要产地之一,每年在生产加工过程中都会产生大量的废弃物,任意的堆弃造成土壤和水体环境的严重污染。如果能将其应用到生物炭减排技术中来,不仅能解决环境污染问题,而且可以促进资源的可持续利用。本研究以来源于竹材废弃物的生物炭为试验材料,采集宁绍平原典型稻田土壤进行水稻盆栽试验,探究不同竹炭施用量对稻田温室气体 CH₄ 和 N₂O 排放以及土壤理化性质的影响,从而揭示生物炭在稻田生态系统中的作用,为农业环境保护提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

试验所用土壤采自浙江省绍兴市孙端镇(北纬 29°42′02″,东经 120°46′39″)长期耕种的水稻田,该地位于杭州湾南岸绍兴城区东北约 14 km,年平均气温 18.1 ℃。供试土壤添加生物炭之前的基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

pH 值	有机碳/%	全氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹
6.42	1.96	2.25	39.84	84.52

1.2 供试生物炭

供试生物炭选用竹炭,原材料在 350 ℃下制得,基本理化性状见表 2。

表 2 供试生物炭的基本理化性状

Table 2 Physical and chemical properties of the tested biochar

pH 值	含碳量/%	填充密度/g·cm ⁻³	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	总孔容积/cm ³ ·g ⁻¹	全氮含量/g·kg ⁻¹	全磷含量/g·kg ⁻¹	全钾含量/g·kg ⁻¹
9.80	68.70	0.56	17.20	0.16	6.9	0.3	5.2

表 3 盆栽实验各处理及施肥方案

Table 3 Treatments and fertilization scheme for the rice pot experiment

处理	简称	生物炭用量/kg	尿素总用量/g	一水合磷酸二氢钙/g	氯化钾/g	尿素基肥/g	尿素追肥/g
空白	CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
常规施肥	TT	0.00	6.14	1.68	2.51	3.68	2.46
竹炭 4%	BC1	1.49	6.14	1.68	2.51	3.68	2.46
竹炭 8%	BC2	2.98	6.14	1.68	2.51	3.68	2.46
竹炭 12%	BC3	5.37	6.14	1.68	2.51	3.68	2.46

1.3 试验设计

试验在浙江省农业科学院实验区的玻璃温室中进行。所用容器为直径 39 cm、高 39 cm 的 PVC 圆形桶,上置采气箱,是定制的与下桶相配的密闭罩(依据静态箱原理),其上装有温度传感器和采气装置。每个处理装盆前先将对应的生物炭混入土壤中,分层压实装入桶中,使其尽量与田间自然条件下容重保持一致。每桶总重 37.3 kg,土层厚 25 cm,然后淹水,使其达到田间最大持水量,并保持水层 5 cm 左右。3 d 后施入相应的肥料(尿素追肥于 10 d 后进行),备用。供试水稻品种为秀水 9 号,来自同期进行的大田育苗,7 月 26 日将 60 株长势一致的幼苗移栽至盆内,每盆 4 株;11 月 30 日收获。实验过程中,除了排水期,每日浇水 1 次,保持淹水 3~5 cm。水稻移栽 7 d 后开始采集气体。

本试验采用单因素、3 水平设计。设置了 3 个生物炭水平(4%、8%、12%),5 个处理,3 次重复,共 15 盆。各处理的施肥方案见表 3。盆的摆放位置按照随机分布原则加以设置。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 样品采集

箱法是测量农田生态系统碳氮痕量气体排放最常用的方法^[14],是对微气象学方法上局限性的必要补充,特别是适用于多处理多重小区,可同时测定多种气体,具有灵活、易操作、易维护、低成本(仅为微气象法的 1/5~1/3)的特点,使其在碳氮排放规律、机理以及减排技术试验等研究所迫切需要的多处理试验中更突显优越性^[15]。箱法又分为静态箱法和动态箱法,本研究采用静态箱-气相色谱测定技术。每个处理的 3 次重复同时进行采样。采样时将密闭罩置于下桶

上方,用橡胶带密封,使箱内空气不与外界交换。密闭箱形成后立即开始采集气体。由于不能实时对样品进行分析,用 100 mL 的注射器将气体打入铝箔材质的标准气体样品袋备测。采样工作一般在当地时间 9:00—11:00 进行,具体采样时间为关箱后的 0、10、20 min,每次抽取 60 mL。在采样的同时记录箱内温度和土表温度以及土下 5 cm 的温度。根据植物生长季节可设计不同的采样频率。在插秧初期,一般每周 1 次;生长后期可降低频率,每隔 10 d 或半个月分析 1 次即可;施肥后要相应地增加取样频率。

本试验气体样品的采集从 2012 年 8 月 5 日开始,连续监测到 11 月 25 日,开始约 1 周采集 1 次气体样品,到后期根据情况 10~15 d 采集 1 次,施肥后相应地增加取样频率,同时记录相关环境和植物参数。

1.4.2 样品分析

应用气相色谱仪(安捷伦 6820)分析气样中微量气体(CH_4 和 N_2O)的浓度。对两种气体成分的分析采用相互独立的进样和分离系统,其中 CH_4 采用的是单阀单柱进样、分离系统,使用 FID 检测器; N_2O 采用的是双阀双柱自动进样、反吹、分离和切换系统,使用 ECD 检测器。

根据浓度随时间的变化速率计算土壤的气体释放通量。计算公式为^[16]:

$$F = \rho \times H \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \times t$$

式中: F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为 CH_4 和 N_2O 在标准状态下的密度,其值分别是 0.714 、 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为采样箱高度, m ; dc/dt 为采样过程中箱内 CH_4 和 N_2O 浓度变化率(可将两个气样浓度值经线性回归分析得出); T 为采样箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为扣箱时间, h 。

累积排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),是指在水稻一个生长季内温室气体总排放量,是各种气体日排放通量的叠加。

土壤有机碳、全氮、有效磷、速效钾等测定方法参考《土壤农化分析》^[17]。

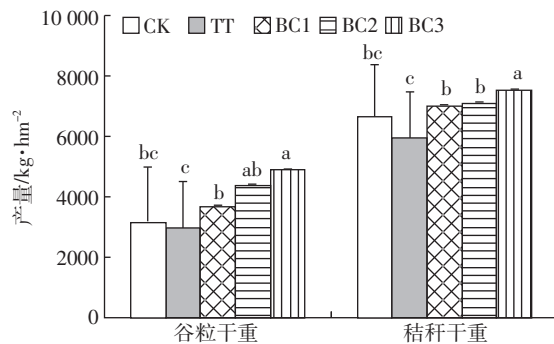
1.5 数据处理

本研究采用 DPS v7.05 和 Excel 2003 对实验数据进行分析。

2 结果与讨论

2.1 生物炭的输入对水稻产量的影响

收割水稻并按照不同试验处理分别统计水稻产量,各处理换算为大田产量的结果如图 1 所示。由图



不同小写字母表示 $P=0.05$ 时有显著差异

Bars with different letters indicate significant difference at $P < 0.05$

图 1 不同处理水稻产量

Figure 1 Rice yields in different treatments

1 可知,与常规处理相比,添加竹炭对水稻干谷重和秸秆干重均有增产效果,且随着竹炭施用量的增加而增加。3 个竹炭处理的谷粒干重分别比常规处理增加 24.5%、47.3%和 63.7%。

研究表明,生物炭可以通过改善土壤的理化性状来提高作物产量^[18]。生物炭富含碳,而且具有与土壤颗粒形成团聚体的活性功能^[19],团聚体结构则有利于碳的稳定持留^[20]。因此,施用生物炭一方面有利于团聚体的形成和稳定,另一方面受益于团聚体的物理保护作用从而利于其长期固持。生物炭的孔隙结构使得其施入土壤后能降低土壤容重^[21],增加土壤孔隙度,本研究结果也得出相同的结论(详见 2.2.1)。生物炭具有很大的比表面积和表面吸附能,能提高对营养元素的吸附能力和增加养分有效性^[22]。此外,增产还取决于生物炭的理化性质、土壤条件和作物类型^[13,23]。分析本研究中水稻增产的原因,试验所用竹炭的 N、P、K 含量分别是 6.9 、 0.3 、 $5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,那么 3 个水平的竹炭处理分别投入 N、P、K 量为:4% (10.3 gN 、 0.4 gP 、 7.8 gK)、8% (20.6 gN 、 0.9 gP 、 15.6 gK)、12% (37.1 gN 、 1.6 gP 、 27.9 gK)。试验结束后测定各处理土壤中有效养分的含量可知,竹炭处理的有效性氮磷钾含量均高于常规处理。由此说明竹炭一方面改善土壤的物理性状,另一方面作为肥料投入大量有效养分,通过提供和储存营养元素并改善土壤的理化性质来促进植物的生长。生物炭中所闭蓄的养分以植物可利用的形式存在,在土壤淹水后其中的养分释放到土壤中被水稻所利用,从而促进水稻的生长,最终提高产量。

2.2 生物炭的输入对温室气体排放规律的影响

2.2.1 生物炭对 CH_4 排放规律的影响

有研究表明施用生物炭能抑制 CH_4 排放^[11-12],如 Liu 等^[12]在实验室内淹水培养条件下分别添加竹炭和

秸秆炭,发现添加生物炭可减少 CH_4 排放幅度高达 51.1%~91.2%,这与本文研究结果一致。试验中水稻生长季 CH_4 排放通量见图 2 所示。与空白对照处理相比,常规施肥处理增加了 CH_4 的排放通量,而各竹炭处理则抑制了 CH_4 的排放,而且随着施用量的增加而增强。常规施肥处理 CH_4 排放通量为 $0.35\sim 21.37 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,均值为 $9.64 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;对照处理 CH_4 排放通量为 $0.32\sim 30.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,均值为 $8.15 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;而 3 个水平的竹炭处理(BC1、BC2 和 BC3)的排放通量均值分别仅为 3.29 、 1.39 、 $0.70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。淹水初期 CH_4 排放量较低,可能因为土壤还呈氧化环境, Eh 较高抑制了 CH_4 的产生^[24]。随淹水时间增长, CH_4 排放量显著增加。在我们捕捉到的有限的数中,整个水稻生长季稻田 CH_4 排放通量的峰值出现在 8 月 28 日,处于温度最高、水稻生长最旺盛的分蘖期,这个峰值可能是由于水稻的高效传输造成的;10 月初进入成熟期,田面水被排干, CH_4 排放量迅速下降,后期几乎无排放。从图中可见,施加生物炭对 CH_4 整个排放过程都有很好的抑制作用。

稻田 CH_4 排放是产生和氧化两个过程的综合结果。产甲烷菌在厌氧条件下利用田间植株根际的有机物质转化产生 CH_4 ,而与此同时,水稻根际的甲烷氧化菌对 CH_4 进行氧化。因此,通过减少 CH_4 的产生和增加其氧化,即可实现稻田 CH_4 的减排目的。生物质炭输入对稻田 CH_4 累积排放量的影响如表 4 所示。由表 4 可以看出,生物质炭输入对稻田 CH_4 排放具有显著的抑制作用,且随着添加量的增加排放量降低。3 个竹炭添加处理(BC1、BC2 和 BC3) CH_4 累积排放量分别比空白对照降低 58.2%、79.9%和 91.7%,比常规施肥处理降低 64.3%、82.9%和 92.9%。其原因可能是

施加生物质炭增加了土壤孔隙度:一方面,由于产甲烷菌是严格厌氧细菌,土壤通气性良好的情况下,产甲烷菌活性受到抑制;另一方面,土壤孔隙度增大,氧气容量增加,为甲烷氧化菌的生长提供了条件,大量 CH_4 通过扩散进入氧化区域时被甲烷氧化菌氧化^[12]。本试验初期,生物炭与土壤混匀后,所有处理设定的土壤容重均为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。种植一季后各处理土壤容重分别是: $1.24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (CK)、 $1.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (TT)、 $1.16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (BC1)、 $1.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (BC2)、 $1.11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (BC3)。由此可以看出,对照处理与常规处理的容重几乎没有变化,而与对照相比,施加竹炭的处理容重均显著减小,土壤孔隙度增加。也有研究表明^[25],生物炭的施加不会抑制产甲烷菌,反而会刺激它的生长,只是由于对甲烷氧化菌的刺激作用大于产甲烷菌,从而起到减少 CH_4 排放的作用。

然而,Zhang 等^[26]从稻田定位试验中发现,在施加高水平($40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的小麦秸秆炭时, CH_4 排放量反而增加 34%。还有研究表明^[27],土壤有机质不仅是产甲烷菌的重要底物,有机质含量的增加还会降低土壤

表 4 水稻生长季 CH_4 和 N_2O 累积排放量

Table 4 Cumulative emissions of methane and nitrous oxide during rice growing season

处理	$\text{CH}_4/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$\text{N}_2\text{O}/\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$
CK	179.0AB	533.4B
TT	209.8A	1 428.8A
BC1	74.8BC	396.0BC
BC2	35.9C	169.7BC
BC3	14.9C	86.6C

注:不同大写字母表示在 $P=0.01$ 情况下有极显著差异。

Note: Means with different letters indicate significant difference at $P<0.01$.

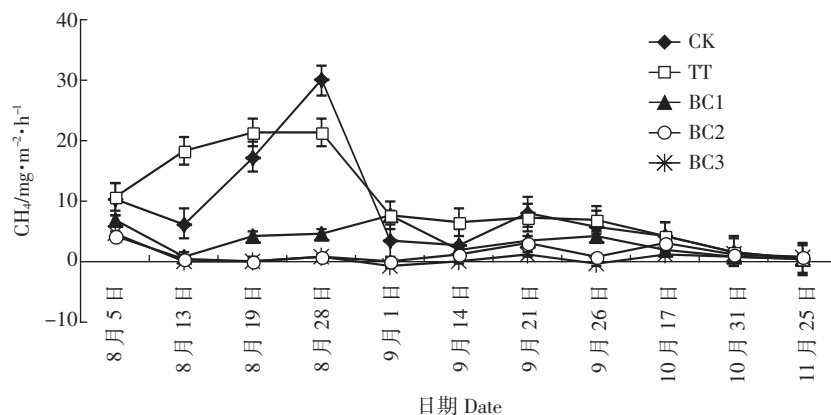
图 2 水稻生长季 CH_4 排放通量

Figure 2 Methane emission flux during rice growing season

Eh 以及加速 CH₄ 释放,进而增加 CH₄ 的产生和排放。本试验中所用的基础土有机碳含量是 1.96%,种植一季后的空白处理有机碳含量为 2.12%,常规施肥处理有机碳含量为 2.29%。与对照相比,3 个生物炭处理有机碳含量分别增加至 4.30%(BC1)、8.11%(BC2)和 9.39%(BC3)。对其差异性检验结果显示,3 个竹炭处理与空白和常规处理相比,均有显著增加。增加的有机碳可能来源于竹炭,竹炭富含的有机碳,因其碳组分的高度芳香化而具有生物化学和热稳定性,被认为是一种化学及生物“惰性”物质^[28],可长期保存于环境中而不易被矿化,同时由于其稳定性,可能并不能作为土壤中产甲烷菌的底物被利用。因此,实验数据显示并未促进 CH₄ 的产生和排放。生物炭输入对 CH₄ 排放量的影响目前尚无定论,施用生物炭对 CH₄ 排放量影响的差异性可能与生物炭种类、施用量及肥力状况和土壤类型等因素有关^[29-30]。

2.2.2 生物炭对 N₂O 排放规律的影响

研究表明,施用生物炭对减少 N₂O 排放具有积极作用^[13,31]。Yanai 等^[32]发现用生物炭改善土壤可使 N₂O 排放减少 89%。Wang 等^[33]通过对两种水稻土进行厌氧培养发现,在 60 d 的培养期内添加生物炭,N₂O 排放量降低幅度可达 73.1%。试验中稻田 N₂O 排放通量如图 3 所示。常规施肥处理和对照处理 N₂O 的平均排放通量分别为 552.49、225.58 μg·m⁻²·h⁻¹;而 3 个水平的竹炭处理(BC1、BC2 和 BC3)的排放通量均值分别仅为 185.84、88.02、38.65 μg·m⁻²·h⁻¹。从图 3 可以看出,第一次显著排放发生在淹水初期,可能与施肥有关;淹水后期几乎检测不到明显的排放。10 月初水面落干,N₂O 排放量迅速升高。然而,由于每日进行实地

采样在现有条件下不可实现,可能导致排放高峰被遗漏,图中的高峰也许并不是整个生长季内的排放高峰,但从中也可以看出排放的基本规律。从表 4 中显示的水稻生长季 N₂O 累积排放量来看,3 个竹炭处理均可显著降低稻田 N₂O 的排放量,且效果随着施加量的增加而增强。3 个竹炭处理比常规施肥 N₂O 累积排放量分别降低 72.3%(BC1)、88.1%(BC2) 和 93.9%(BC3)。Spokas 等^[31]研究了木炭在不同施用量下温室气体(CO₂、N₂O 和 CH₄)排放状况,发现上述温室气体的减排总量与生物炭施用量呈显著正相关,这与本试验的结果一致。

Zwieten 等^[13]认为在培养实验中所观察到的 N₂O 排放量降低,主要归因于生物质表面吸附 NO₃⁻ 的量增加。也有研究指出^[34],生物炭可能是催化反硝化过程中氧化亚氮向氮气转化(N₂O→N₂),从而减少 N₂O 排放。

此外,pH 值也可能会影响 CH₄ 和 N₂O 的生成和排放,因为 pH 值是影响微生物菌群的重要环境因素之一。生物炭的 pH 值一般大于 9,针对添加生物炭后土壤 pH 值如何变化这一问题,本实验分别于试验前与试验中对土壤 pH 值进行了测定,结果如表 5 所

表 5 试验期间土壤 pH 值变化
Table 5 Changes of soil pH during the experiment

处理	pH 值		
	试验前	淹水 3 d	淹水 7 d
CK	6.42	6.91	6.57
TT		6.49	6.22
BC1		7.27	6.64
BC2		7.28	6.85
BC3		7.14	7.02

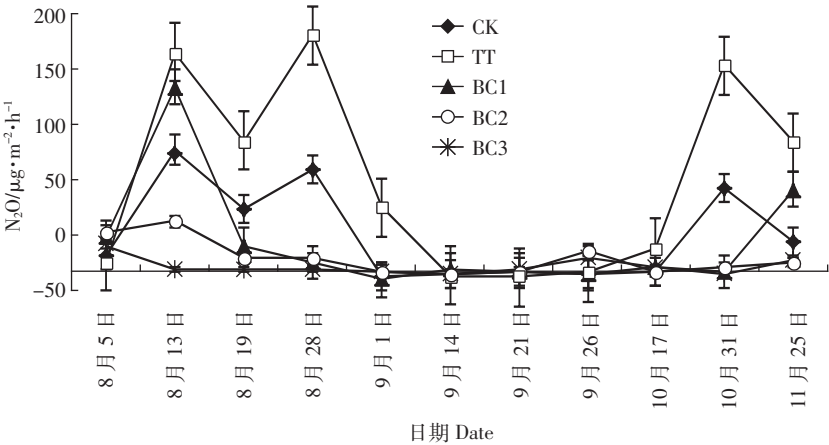


图 3 水稻生长季 N₂O 排放通量
Figure 3 Nitrous oxide emission flux during rice growing season

示。试验前的原始土样 pH 值为 6.42, 然后按处理加入相应的肥料, 淹水后 3、7 d 分别测定其 pH 值, 可发现盆栽土壤在淹水状态下其 pH 值均趋于中性, 据此可以初步认为本实验中 pH 值对 CH_4 和 N_2O 的生成和排放的影响不明显。

大量实验数据显示, CH_4 和 N_2O 呈现出此消彼长的排放关系, 直接原因是土壤水分状况^[35]。本研究也得到相似的结果: 淹水期 CH_4 排放增加, N_2O 排放很少, 而进入成熟期田面落干几乎检测不到 CH_4 排放, N_2O 却大量排放。

3 结论与展望

(1) 研究中施加竹炭的处理与常规处理相比都有增产的效果。这是由于竹炭作为肥料可增加土壤肥力, 通过提供和储存有效营养元素并改善土壤的理化性质来促进植物的生长。

(2) 与空白对照处理相比, 常规化肥的施用导致稻田温室气体(CH_4 和 N_2O)排放增加, 而竹炭对稻田温室气体排放有显著的抑制作用, 且随着施用量的增加而增强。常规处理的 CH_4 、 N_2O 季节累积排放量分别比对照处理增加了 17.2%、167.9%。而施用竹炭条件下, CH_4 和 N_2O 季节累积排放量比对照处理分别降低了 58.2%~91.7%和 25.8%~83.8%; 相对常规施肥处理而言, 降低幅度更是高达 64.3%~92.9%和 72.3%~93.9%。

(3) 分析竹炭减排的原因, 可能是施加竹炭降低了土壤容重, 土壤孔隙度增高, 氧气容量增加使得产甲烷菌活性受到抑制, 而甲烷氧化菌加强氧化, 综合作用降低了 CH_4 排放; 从长远影响来看, 生物炭由于其生物化学和热稳定性, 代替常规化肥施入土壤后可长期保持稳定而不易被矿化, 从而减少 CH_4 排放。而 N_2O 排放量降低, 可能是由于其大的比表面积吸附 NO_3^- 的量增加。受水分状况的影响, CH_4 和 N_2O 呈现出此消彼长的排放关系。

我国每年产生大量的农林废弃物, 造成土壤环境和水体的大面积污染, 生物炭技术是近年来研究发现的一个废弃物资源化利用的有效途径。生物炭进入土壤生态系统后会影响到土壤生物地球化学过程, 具有减少温室气体排放的效果, 但结果仍具有较大不确定性。现有研究结论多源自短期培养试验, 基于田间的长期效应还有待进一步研究。而且, 生物炭由于其原材料的不同, 以及制作条件的不同, 其性质有很大差别, 并且由于施用量、土壤类型、肥力状况等差异, 生

物炭的环境效应还不明确。本研究是在特定的宁绍平原青紫泥上进行的实验, 结果表明生物炭在青紫泥水稻土上具有减排的效果。那么, 在将来的研究中, 应充分考虑土壤类型、生物炭类型以及施用量等因素的影响, 探究在不同条件下生物炭的减排效果。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2006 IPCC guide-lines for national greenhouse gas inventories[M]. Japan:IGES, 2006.
- [2] Zheng X, Huang Y, Wang Y, et al. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2):219-227.
- [3] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):143-148.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7):143-148.
- [4] 马 静, 徐 华, 蔡祖聪, 等. 稻田甲烷氧化研究方法进展[J]. 土壤, 2007, 39(2):153-156.
MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong, et al. Advances on methods to quantify methane oxidation in paddy fields[J]. *Soils*, 2007, 39(2):153-156.
- [5] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5):629-632.
XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(5):629-632.
- [6] 黄 耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5):722-732.
HUANG Yao. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5):722-732.
- [7] 汪长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(5):663-669.
WANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. Advances in the research on methane emission from paddy fields and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):663-669.
- [8] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社, 2001:19-31.
WANG Ming-xing. Methane emission in China's rice paddy[M]. Beijing:Science Press, 2001:19-31.
- [9] Nadine Jäger, Claus Florian Stange, Bernard Ludwig, et al. Emission rates of N_2O and CO_2 from soils with different organic matter content from three long-term fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47:483-494.
- [10] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5):1719-1730.
- [11] Rondon M A, Lehmann J, Ramirez J, et al. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar addi-

- tions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(6):699-708.
- [12] Liu Yu-xue, Yang Min, Wu Yi-min, et al. Reducing CH₄ and CO₂ e-missions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2011, 11(6):930-939.
- [13] Zwieten V L, Kimber S, Morris S, et al. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from ferrosol[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7):555-568.
- [14] 李 晶, 王明星, 王跃思, 等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. *大气科学*, 2003, 27(4):740-749.
- LI Jing, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4):740-749.
- [15] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高影响稻田-大气 CO₂ 净交换的静态暗箱法观测研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10):1240-1244.
- ZHENG Xun-hua, XU Zhong-jun, WANG Yue-si, et al. Determination of net exchange of CO₂ between paddy fields and atmosphere with static poaque-chamber-based measurements[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10):1240-1244.
- [16] 程 琨, 潘根兴, 罗 婷. 测土配方施肥固碳减排计量方法指南[M]. 北京:中国标准出版社, 2012:45.
- CHENG Kun, PAN Gen-xing, LUO Ting. A guide to the methodology for quantifying carbon sequestration and reduction in greenhouse gas emission under recommended fertilization project[M]. Beijing:China Standards Press, 2012:45.
- [17] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analytical methods[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [18] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1-2):81-84.
- [19] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [20] 王欣欣, 符建荣, 邹 平, 等. 长期植稻年限序列水稻土团聚体有机碳分布特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3):719-724.
- WANG Xin-xin, FU Jian-rong, ZOU Ping, et al. Distribution characteristics of aggregates organic carbon in a paddy soil chronosequence[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):719-724.
- [21] 何绪生, 耿增超, 余 雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):1-7.
- HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):1-7.
- [22] Laird D A, Fleming P D, Karlen D L, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4):436-442.
- [23] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F, et al. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize cowpea and peanut and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52:489-495.
- [24] 黄明蔚. 稻麦轮作农田生态系统温室气体排放及机制研究[D]. 上海:华东师范大学, 2007.
- HUANG Ming-wei. Emission process of greenhouse gases and its mechanism from the paddy-wheat rotation agro-ecosystem[D]. Shanghai:East China Normal University, 2007.
- [25] Feng You-zhi, Xu Yan-ping, Yu Yong-chang, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46:80-88.
- [26] Zhang A-feng, Cui Li-qiang, Pan Gen-xing, 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, 138(4):469-475.
- [27] Neue H U, Wassmann R, Lal R S, et al. Factors affecting methane emission from rice fields[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30:1751-1754.
- [28] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2):403-427.
- [29] Zou Jian-wen, Huang Yao, Zheng Xun-hua, et al. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41:8032-8042.
- [30] Zwieten V L, Singh B, Joseph S, et al. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil[M]//Lehmann J, Joseph S (eds). *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. UK, Earths can Press, 2009:227-249.
- [31] Spokas K A, Koskinen W C, Baker J M, et al. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption degradation of two herbicides in a minnesota soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(4):574-581.
- [32] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term incubation experiments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2):181-188.
- [33] Wang J, Zhang M, Xiong Z, et al. Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8):887-896.
- [34] Liesch A M, Weyers S L, Gaskin J W, et al. Impact of two different biochar on earth worm growth and survival[J]. *Annals of Environmental Science*, 2010(4):1-9.
- [35] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 N₂O 和 CH₄ 排放[J]. *大气科学*, 1997, 21(2):231-237.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 22(2):231-237.