

涂保华, 胡茜, 张艺, 等. 基于不同类型秸秆制备的生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(6): 1374-1380.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.06.015

基于不同类型秸秆制备的生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响

涂保华, 胡茜, 张艺, 符菁, 肖娴, 孙悦, 赵远

(常州大学环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 为了探究不同种类生物炭配施化肥对土壤温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放的影响, 本研究采用盆栽和大田试验, 以小麦秸秆炭(WBC)、水稻秸秆炭(RBC)、玉米秸秆炭(CBC)为试验材料, 在配施化肥的条件下, 对各处理的土壤温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量和土壤 pH 值进行分析。结果表明: 与施用常规肥料(CK)相比, 在盆栽试验中添加生物炭可以显著降低土壤中 CH_4 、 N_2O 的排放量, 增加 CO_2 排放量, WBC、RBC 和 CBC 处理的 CH_4 排放量分别降低了 46.05%、44.82% 和 39.62%, N_2O 排放量分别降低了 17.20%、27.96%、26.88%, CO_2 排放量分别增加了 22.04%、17.83% 和 25.29%, 大田试验结果与盆栽试验结果总体相似。与 CK 相比, 添加生物炭可以显著降低全球变暖潜能值(GWP), 降低温室效应的影响。同时添加生物炭可以提高土壤的 pH 值, 水稻生育前期增幅尤为明显。

关键词: 生物炭; 温室气体; 全球变暖潜能值(GWP); 稻田

中图分类号: S511; S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2019)06-1374-07

Effects of biochar based on different types of straw on greenhouse gas emission from paddy soil

TU Bao-hua, HU Qian, ZHANG Yi, FU Jing, XIAO Xian, SUN Yue, ZHAO Yuan

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to explore the effects of different biochar combined with fertilizer on the emissions of soil greenhouse gases (CO_2 , CH_4 and N_2O), the pot and field experiments were conducted. Using wheat straw biochar (WBC), rice straw biochar (RBC) and corn straw biochar (CBC) as materials, the emissions of soil greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) and soil pH were analyzed under the conditions of chemical fertilizer application. The results showed that compared with conventional fertilizer (CK), the application of biochar in pot experiment could significantly reduce CH_4 and N_2O emissions and increase CO_2 emissions. The emission of CH_4 treated by WBC, RBC and CBC decreased by 46.05%, 44.82% and 39.62% respectively, the emission of N_2O decreased by 17.20%, 27.96% and 26.88% respectively, and the emission of CO_2 increased by 22.04%, 17.83% and 25.29% respectively. The trend of these indices in field experiment and pot experiment was comparable. Compared with the control, the application of biochar could dramatically reduce the global warming potential (GWP), and decrease the impact of the greenhouse effect. The application of biochar could improve the soil pH value, especially at the early growth stage of rice.

Key words: biochar; greenhouse gas; global warming potential value (GWP); paddy

收稿日期: 2019-07-07

基金项目: 常州市科技支撑计划(社会发展)项目(CE20175060); 国家科技支撑计划项目(2015BAC02B02-01)

作者简介: 涂保华(1968-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 副教授, 主要从事土壤修复研究。(E-mail) thh@cczu.edu.cn

通讯作者: 赵远, (E-mail) zhaoyuan@cczu.edu.cn

全球气候变暖是当今人类面临的世纪难题之一, 在过去的几十年内, 地球的地表温度呈现梯度增长, 南北极冰川融化, 海平面上升, 这都是由温室气体

体的持续加大排放导致的,温室气体主要以 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 为主^[1-2]。除了工业来源,温室气体的第二大来源就是农田生态系统,特别是农业集约化的进行,对土壤肥力的过度利用,土壤中有机碳含量逐年降低,以 CO_2 和 CH_4 的形式排入大气^[2]。 CH_4 和 N_2O 是重要的温室气体,单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势在 100 年时间尺度上分别为 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[3]。近年来,有研究结果表明,生物炭由于其独特的结构组分,对土壤中 CH_4 和 N_2O 温室气体的排放有一定的抑制作用,增强土壤作为 CH_4 和 N_2O 汇的作用^[4]。生物炭本身具有 pH 值高、孔隙度高、比表面积大等特点,将其施入土壤后能够对土壤的理化性质(含氧量、通气性、持水性和吸附性等)产生影响^[5],进而影响土壤中碳、氮循环功能性微生物(产甲烷古菌、甲烷氧化菌、硝化细菌和反硝化细菌)的活性、结构和丰度,导致 CH_4 和 N_2O 的产生、氧化和传输过程发生变化,抑制 CH_4 和 N_2O 的产生和排放^[6]。土壤的酸碱度在很大程度上对土壤肥力和作物产量有直接影响,是用来评价土壤的重要指标之一。有研究结果^[7]显示,高温厌氧条件下制备的生物炭为碱性,其中含有大量的金属阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等),与土壤中的铝离子以及质子进行离子交换,从而提高土壤碱性。生物炭作为一种土壤改良剂施入稻田,可以有效提高土壤中阳离子的交换容量(5%~20%),提高土壤 pH 值,改善酸性土壤的生物生存环境^[8]。

国内外学者对生物炭的固碳减排作用已经做了大量研究,不过由于原料来源不同,试验条件不同,导致试验结果有所差异,若想生物炭在农业上推广应用,则还需以当地的作物秸秆制备生物炭在当地土壤环境下进行实践。长江流域除了种植水稻外,还种植小麦和玉米,用其秸秆作为原料制备的生物炭对土壤养分、土壤固碳减排效应、土壤微生物群落结构以及丰度均有不一样的影响^[9]。因此,开展不同类型的生物炭在稻田土壤中的应用研究,对农业固碳减排和废弃物资源化的利用具有重要意义。

本研究在常州大学丹阳水稻试验基地,以水稻、玉米、小麦 3 种作物秸秆为生物炭原材料,通过盆栽试验和大田试验分析施加生物炭后,土壤的固碳减排效应在水稻不同生育时期的变化,对比分析 3 种作物秸秆生物炭对稻田土壤的固碳减排效应,以期生物炭在改善土壤肥力和固碳减排效应方面的研

究提供理论支撑,为生物炭的农业应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽供试土壤采自大田试验附近的稻田,土壤为黄黏土,全氮含量 1.19 g/kg,全磷含量 0.64 g/kg,全钾含量 1.44 g/kg,有机碳含量 18.85 g/kg,碱解氮含量 101.5 mg/kg,速效磷含量 44.9 mg/kg,土壤容质量为 1.12 g/kg,pH 值 6.43。供试水稻品种为当地种植面积较大的南粳 5055,生物炭由南京勤丰秸秆科技有限公司提供,包括水稻秸秆炭、玉米秸秆炭、小麦秸秆炭,在 500 ℃、缺氧条件(加热速率为 15 ℃/min,2 h)下制备,其中生物炭的全量元素情况如表 1 显示。

表 1 生物炭的元素含量

Table 1 Element content of biochar

生物炭种类	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	有机碳含量 (g/kg)
水稻秸秆炭	0.612 8	1.993	27.147	537.97
玉米秸秆炭	1.105 0	1.833	14.460	518.11
小麦秸秆炭	0.457 7	1.851	23.567	567.41

盆栽试验采用的装置实际为一套自行设计的便携式静态箱,主要由底座和采气桶 2 个部分组成,圆桶的顶端有凹槽,其深度为 5 cm,直径为 3 cm,可以在采气时利用水封达到密闭的作用。采气桶直径为 30 cm,高为 70 cm,采气桶顶部固定有风扇和温度传感器,用于确保采气时混合密闭环境中气体试验的准确性,温度传感器可以测定采样时密闭环境的温度。在采气桶中部有气孔,利用软管、针筒以及三通阀来确保气体采集顺利进行。

大田试验所使用的静态箱与盆栽试验使用的静态箱原理类似,在插秧前将一个 90 cm×90 cm 的底座埋入土壤中,顶部凹槽露出土壤表面,水稻生长前期由于植株较矮只用采气箱(长、宽均为 90 cm,高 50 cm)进行温室气体采集,待植株顶部可以接触到采气箱顶部风扇时,将预制好的中通中继箱先放置在底座上,然后再继续使用采气箱采集气体。

1.2 试验设计

本试验主要分为 2 部分,分别为盆栽试验和大田试验。盆栽试验于 2017 年 4 月至 11 月在常州大学知行楼北侧空地地进行,试验共设 4 个处理,分别为施

用常规肥料对照(CK)、添加水稻秸秆炭处理(RBC)、添加玉米秸秆炭处理(CBC)、添加小麦秸秆炭处理(WBC),生物炭施用量均为3%,每组重复3次。取6 kg土进行自然风干,破碎后过20目筛,与生物炭均匀混合,放置到直径为30 cm,深度为40 cm的PVC材质的圆盆内,重复3次。所有处理正常施肥,施用1.89 g尿素、1.71 g磷酸二氢钾、0.50 g氯化钾作为基肥,后期分别在分蘖期和抽穗期按110 mg/kg的量追施尿素。采用人工插秧,密度为每盆3穴,每穴2~3株,淹水管理,在分蘖末期晾晒一次。

大田试验于2017年4月至11月在江苏省丹阳市珥陵镇(N31°51'53.64", E119°35'27.47")进行,小区面积为20 m²(5 m×4 m),共12个小区。与盆栽试验处理相同,生物炭施用量为3%,一次性加入并且人工搅拌均匀,施肥量参考丹阳当地施肥习惯。各个小区间由宽30 cm、高40 cm田埂覆膜隔开,在试验区东侧和西侧分别修建了一条引水渠和排水渠,确保每个小区间不会发生水体交换。

1.3 土壤温室气体和pH值测定

测定的土壤温室气体主要包括CO₂、CH₄和N₂O,由北京多伦特科技有限公司测定,利用火焰离子检测器(FID)测定CO₂和CH₄含量,使用电子捕获检测器(ECD)检测N₂O含量。通过测定稻田土壤整个生长季CO₂、CH₄、N₂O的排放规律及其累积排放量,探究施加不同生物炭对稻田土壤温室气体排放的影响。

采集作物不同生长期0~20 cm表层土壤,通过测定土壤pH值分析生物炭对土壤酸碱性的影响。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Microsoft Excel 2016软件进行整理,用Origin 2017软件做图,利用SPSS 18.0统计分析软件进行相关性分析,LSD法进行显著性检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

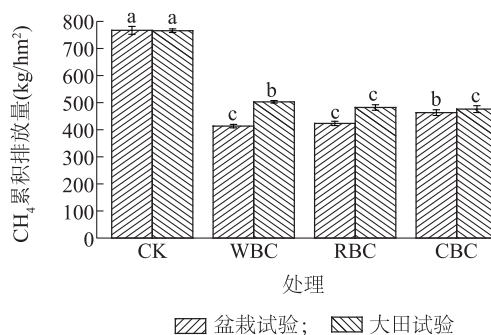
2.1 生物炭对土壤中CH₄排放的影响

图1显示,与施用常规肥料对照(CK)相比,添加不同生物炭处理的土壤CH₄累积排放量均显著降低($P<0.05$)。土壤CH₄的排放主要受到3个方面影响,一方面是CH₄的产生量,添加生物炭会增加土壤中碳库汇入,使得土壤有机质含量显著地上升,为

土壤生物和微生物提供大量的碳源,因此会提高CH₄的产生速率和产生量^[10];另一方面是CH₄的消耗量,甲烷氧化菌以CH₄为碳源,在好氧条件下消耗CH₄,添加生物炭势必会造成土壤容质量降低,土壤透气性以及孔隙度增加,促进甲烷氧化菌的代谢,从而造成甲烷消耗量的增加^[11];最后一方面是植物的传输作用,相同条件下植物发育越旺盛土壤排放的CH₄量越多^[12],在对排放通量的分析中也可以看出,2次排放高峰期分别对应着水稻的分蘖期和返青期,而且分蘖期的CH₄排放量峰值显著高于返青期($P<0.05$)^[13]。

在盆栽试验中,CK的CH₄累积排放量为767.04 kg/hm²,小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理的CH₄累积排放量分别为413.85 kg/hm²、423.24 kg/hm²、463.14 kg/hm²,与CK相比分别降低了46.05%、44.82%和39.62%。因此,在盆栽内施用生物炭可以有效降低土壤中CH₄的累积排放量,减少部分温室气体的排放^[14-16]。

在大田试验中,CK的土壤CH₄排放量显著高于生物炭处理,并且RBC与CBC处理的CH₄排放量差异不显著(图1)。这可能是由于水稻秸秆和玉米秸秆的热解温度相似,生物炭中的结构组成相似,孔隙度以及比表面积相近。



CK:常规肥料对照;RBC:添加水稻秸秆炭处理;CBC:添加玉米秸秆炭处理;WBC:添加小麦秸秆炭处理。图中不同小写字母表示相同试验的不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图1 盆栽试验和大田试验土壤中CH₄累积排放量

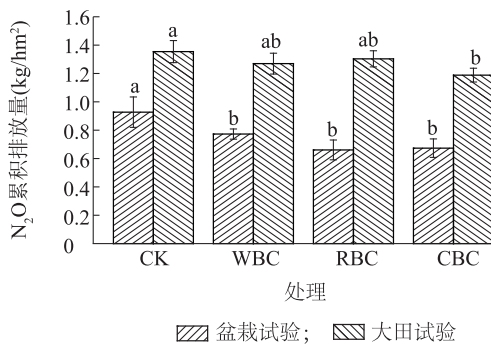
Fig.1 Cumulative emissions of CH₄ from soil in field experiment and pot experiment

2.2 生物炭对土壤中N₂O排放的影响

图2显示,在盆栽试验中,添加生物炭后土壤中N₂O累积排放量显著降低($P<0.05$),其中水稻秸秆炭处理效果最明显,其次分别是玉米秸秆炭处理、小

麦秸秆炭处理。施用小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理的土壤 N_2O 累积排放量分别为 0.77 kg/hm^2 、 0.67 kg/hm^2 、 0.68 kg/hm^2 ,与 CK 相比分别降低了 17.20%、27.96%、26.88%。说明添加生物炭对土壤 N_2O 减排具有积极意义,各生物炭处理的最终效果不同,对于土壤中施用何种生物炭的具体操作还需与实际生产情况相结合,因地制宜,就地取材更重要。

对大田试验中土壤 N_2O 的累积排放量进行计算,结果(图 2)显示,生物炭施入大田后对 N_2O 排放的抑制作用没有盆栽试验那么好,而且生物炭的种类对 N_2O 气体累积排放量影响不大。



CK、RBC、CBC、WBC 见图 1 注。图中不同小写字母表示相同试验的不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

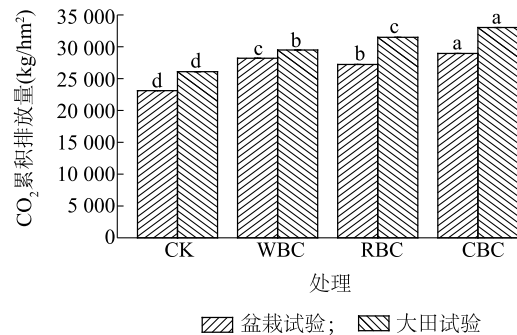
图 2 盆栽和大田试验土壤中 N_2O 累积排放量

Fig.2 Cumulative emissions of N_2O from soil in field experiment and pot experiment

2.3 生物炭对土壤中 CO_2 排放的影响

对盆栽试验土壤 CO_2 的累积排放量进行统计分析,结果(图 3)显示,添加生物炭会显著提高土壤中 CO_2 的累积排放量 ($P < 0.05$)。添加小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理的土壤中 CO_2 累积排放量与 CK 相比,分别增加了 22.04%、17.83% 和 25.29%。

对大田试验土壤中 CO_2 的累积排放量进行统计分析,结果(图 3)显示,添加生物炭会显著提高土壤中 CO_2 的累积排放量,各处理间差异显著,土壤中 CO_2 的累积排放量大表现为玉米秸秆炭处理 > 水稻秸秆炭处理 > 小麦秸秆炭处理 > CK。添加玉米秸秆炭、水稻秸秆炭和小麦秸秆炭处理的土壤中 CO_2 累积排放量与 CK 相比,分别提高了 26.59%、20.71%、13.06%。



CK、RBC、CBC、WBC 见图 1 注。图中不同小写字母表示相同试验的不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 盆栽和大田试验的土壤中 CO_2 累积排放量

Fig.3 Cumulative emissions of CO_2 from soil in field experiment and pot experiment

2.4 生物炭对全球变暖潜能值 (GWP) 的影响

对土壤温室气体的变化规律以及累积排放量进行研究,发现添加生物炭可以有效降低土壤中 CH_4 和 N_2O 的累积排放量,促进 CO_2 的排放。全球变暖潜能值 (GWP) 是一种温室气体辐射指数,其参照对象是 CO_2 ,将其他温室气体的效应与 CO_2 的效应进行比较,最终转化为同一指数,再进行对比。其中, CH_4 与 N_2O 的全球变暖潜能值分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍。

对水稻整个生长季温室气体的累积排放量进行换算,结果(表 2)显示,小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理的 GWP 均显著低于 CK ($P < 0.05$)。在盆栽试验中,水稻秸秆炭处理的 GWP 低于小麦秸秆炭和玉米秸秆炭处理。在大田试验中,与 CK 相比,稻田施用生物炭依然可以减少土壤温室气体的排放,降低 GWP。小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理间的 GWP 差异不显著。

表 2 各处理的温室气体综合增温潜势

Table 2 Total comprehensive warming potential of greenhouse gases in each treatment

处理组	全球变暖潜能值 (kg/hm^2)	
	盆栽试验	大田试验
CK	42 559.3±1 120a	45 631.1±459a
WBC	38 778.7±1 045c	42 443.3±938b
RBC	38 006.8±932c	43 287.4±1 102b
CBC	40 732.2±842b	43 927.3±634b

CK、RBC、CBC、WBC 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.5 生物炭对土壤 pH 值的影响

土壤中无时无刻地发生着各种化学反应和生物化学反应,导致土壤的酸碱性发生变化。过酸或者过碱的土壤环境均不利于作物生长,同时长时间的施肥会导致土壤板结、土壤 pH 值下降,使得土壤偏酸性,作物产量下降,因此,改良土壤酸碱性迫在眉睫^[17]。

2.5.1 盆栽试验土壤 pH 值 对采集的盆栽试验土壤样本进行 pH 值测定,结果(图 4)显示,生物炭施入土壤后会显著增加土壤 pH 值,从小麦秸秆炭、水稻秸秆炭和玉米秸秆炭处理的结果来看,添加生物炭后水稻移栽期的土壤 pH 值相对常规施肥对照分别提高了 0.30、0.35 和 0.33。随着生育进程的推进,土壤 pH 值呈下降的趋势,常规施肥对照、小麦秸秆炭处理、水稻秸秆炭处理和玉米秸秆炭处理水稻成熟期的土壤 pH 值相对于移栽期分别降低 2.78%、4.20%、4.17% 和 3.62%,降幅最大的为小麦秸秆炭处理,降幅最小的是常规施肥对照。成熟期土壤 pH 值从大到小依次为玉米秸秆炭处理>水稻秸秆炭处理>小麦秸秆炭处理>常规施肥对照,添加生物炭的试验组中土壤 pH 值最低的是小麦秸秆炭处理, pH 值为 6.91,依旧大于常规施肥对照移栽期土壤 pH 值(6.84)。添加生物炭处理的土壤 pH 值均显著高于同生育时期常规施肥对照的土壤 pH 值,说明添加生物炭均能提高土壤的 pH 值^[18-19]。

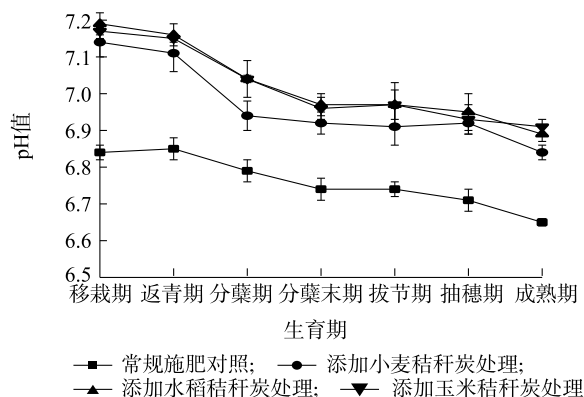


图 4 盆栽试验土壤水稻各生长期 pH 值的变化规律

Fig.4 Variation of soil pH value at different rice growth stages in pot experiment

2.5.2 大田试验土壤 pH 值 由盆栽试验结果可知,施用生物炭可以提高土壤 pH 值,而在时间尺度上,在水稻成熟期,添加生物炭处理的土壤 pH 值高于常

规施肥对照初始 pH 值。对大田试验采集的 7 个时期 28 个土壤样品进行 pH 值测定。结果(图 5)显示,大田试验中土壤 pH 值与盆栽试验中土壤 pH 值在时间尺度上的变化及同时期不同处理间的变化相似。在时间尺度上,各处理的土壤 pH 值均呈下降趋势,不过在水稻拔节期和抽穗期大田试验出现了少许的 pH 值上升现象,这可能是由外界环境因素导致的。施用生物炭后土壤的 pH 值提高,其中添加小麦秸秆炭、玉米秸秆炭、水稻秸秆炭处理的土壤 pH 值移栽期分别为 6.63、6.61、6.59。整个水稻生长季对照的土壤 pH 值下降了 0.10,小麦秸秆炭处理的土壤 pH 值下降了 0.19,水稻秸秆炭处理的土壤 pH 值下降了 0.18,玉米秸秆炭处理的土壤 pH 值下降了 0.13。在成熟期,添加生物炭处理的土壤 pH 值最低为 6.43,高于对照移栽期的土壤 pH 值(6.24)。从大田试验的结果来看,添加生物炭可以提高土壤 pH 值。

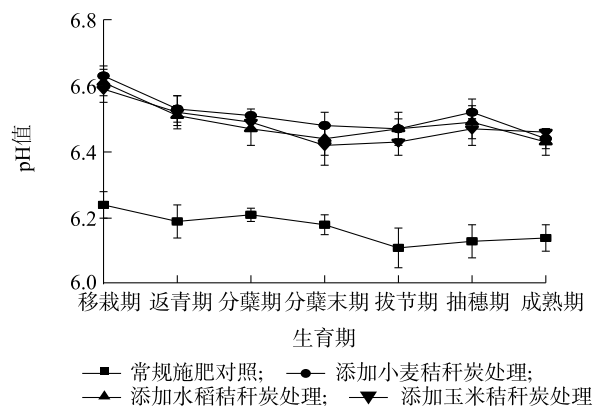


图 5 大田试验土壤水稻各生长期 pH 值的变化规律

Fig.5 Variation of soil pH value at different rice growth stages in field experiment

3 讨论

3.1 施用生物炭对盆栽试验和大田试验土壤中温室气体排放的影响

采集盆栽和大田试验的温室气体并对其进行分析,发现在盆栽和大田试验中施用生物炭可以降低土壤中 CH_4 和 N_2O 的排放,增强 CO_2 排放。生物炭之所以能够减少 N_2O 的排放量,一方面是生物炭的低密度和多孔隙结构特性增加了土壤的孔隙度和通气性,抑制厌氧条件下氮素微生物的反硝化作用,从而减少 N_2O 排放^[20]。土壤通气性改善,含氧量提高,可使土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 PO_4^{3-} 等离子被氧化,

使得硝化作用和反硝化作用的电子供应减少,从而限制了 N_2O 排放^[21-22]。另一方面,土壤通气性的增强还为微生物生长繁殖创造了条件^[23],使得好氧微生物大量繁殖,从而导致硝化菌和反硝化菌可用氮源减少,限制 N_2O 排放。生物炭改善了土壤的通气性,这改变了土壤反硝化细菌群落组成的多样性,从而影响 N_2O 的排放。此外,水稻秸秆生物炭的多孔性结构易吸附土壤铵态氮从而减少硝化菌的能源底物,抑制硝化作用^[24-26]。

有研究结果^[27-29]表明,添加生物炭会减少 CH_4 、 N_2O 的累积排放量,同时会增加土壤中 CO_2 的排放,这是因为土壤矿化产生 CO_2 ,复杂的有机物会被微生物分解成简单的有机物,部分碳就会变成 CO_2 释放到空气中,还有一部分 CO_2 来自植物的呼吸作用,当不透光的静态箱罩住取样区域,植物的呼吸作用会大于光合作用,土壤中的有机物被植物吸收利用,一部分转化为自身生长发育所需碳,另外一部分将以 CO_2 的形式释放^[30]。因此,添加生物炭提高了土壤微生物的活性以及群落结构多样性,同时对土壤有改良作用。在本试验中,3 种生物炭对土壤都有积极意义。

3.2 施用生物炭对 GWP 和土壤酸碱性的影响

生物炭的添加可以显著降低 GWP,降低温室效应的影响。对 GWP 换算后发现,与大田试验结果相比,盆栽试验中生物炭对土壤 GWP 的降低效应更明显,其中水稻秸秆生物炭和小麦秸秆生物炭的作用更加明显,在大田试验中,3 种秸秆生物炭处理间的 GWP 无显著差异。

施用生物炭可以提高土壤的 pH 值,在水稻生育前期增幅最明显,随着生育期的推进,生物炭中的碱性灰分被消耗,土壤的 pH 值开始下降,但是最终成熟期所有生物炭处理的土壤 pH 值仍高于对照移栽期土壤 pH 值,3 种生物炭提升 pH 值的效果基本相当。

生物炭之所以可以提高土壤的 pH 值,主要有以下 2 个原因,第一,高温厌氧制备的生物炭中含有大量的碱性基团,可以中和土壤中的酸性基团,提高 pH 值,其改善 pH 值的能力与碱性基团数量、大小基本一致;第二,生物炭中含有大量的金属阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),这里的阳离子可以与土壤中铝离子中的质子发生化学反应,从而降低铝离子浓度,提高盐基饱和度^[31],也有研究结果发现,生物炭的施

用可以有效增加土壤有机氮的矿化速率,通过矿化达到消耗质子的目的,调节土壤 pH 值^[32]。

从环保的角度考虑,生物炭配施化肥是调节农田生态系统温室气体排放的一种可行方式。

参考文献:

- [1] MELILLO J M, MCGUIRE A D, KICKLIGHTER D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [2] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 578-584.
- [3] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5): 1757-1765.
- [4] 王 军, 施 雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中 N_2O 产排的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 713-723.
- [5] 张向前, 侯国军, 张玉虎, 等. 不同产地水稻秸秆制备生物炭结构特征及其理化性质[J]. *环境工程*, 2017, 35(9): 122-126.
- [6] 姚玲丹, 程广焕, 王丽晓, 等. 施用生物炭对土壤微生物的影响[J]. *环境化学*, 2015(4): 697-704.
- [7] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from Ferrosol[J]. *Soil Research*, 2010, 48(7): 555-568.
- [8] 侯晓娜, 李 慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705-712.
- [9] 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 962-966.
- [10] 颜永毫, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭对土壤 N_2O 和 CH_4 排放影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(8): 140-146.
- [11] SHEN J, TANG H, LIU J, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 188(4): 264-274.
- [12] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1): 309-313.
- [13] 侯晓莉, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同稻秆处理方式下双季稻温室气体排放通量研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(5): 803-809.
- [14] 王长科, 罗新正, 张 华, 等. 全球增温潜势和全球温变潜势对主要国家温室气体排放贡献估算的差异[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 49-54.
- [15] 贾俊香, 熊正琴. 秸秆生物炭对菜地 N_2O 、 CO_2 与 CH_4 排放及土壤化学性质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 283-288.
- [16] FENG Y, XU Y, YU Y, et al. Mechanisms of biochar decreasing

- methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46: 80-88.
- [17] BASS A M, BIRD M I, KAY G, et al. Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 459-470.
- [18] 林珈羽, 张越, 刘沉, 等. 不同原料和炭化温度下制备的生物炭结构及性质[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(6): 3200-3206.
- [19] 俞映惊, 薛利红, 杨扬, 等. 生物炭对菜地土壤氮平衡及酸碱缓冲能力的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(12): 1947-1955.
- [20] YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181-188.
- [21] CLOUGH T J, BERTRAM J E, RAY J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 852-860.
- [22] SINGH B P, HATTON B J, BALWANT S, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [23] VERHOEVEN E, SIX J. Biochar does not mitigate field-scale N_2O emissions in a Northern California vineyard: an assessment across two years[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 27-38.
- [24] 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.
- [25] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 46-59.
- [26] 韩光明, 孟军, 曹婷, 等. 生物炭对菠菜根际微生物及土壤理化性质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(5): 515-520.
- [27] 赵远, 乔燕月, 周际海, 等. 红碱淖湖土壤退化的不同阶段酶活性研究[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(1): 8-14.
- [28] 贾俊香, 熊正琴. 秸秆生物炭对菜地 N_2O 、 CO_2 与 CH_4 排放及土壤化学性质的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 283-288.
- [29] ZHANG J, HUANG J S, LIU J, et al. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw and lignin and their biochars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 401-408.
- [30] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 93-99.
- [31] 李正兴, 李海福. 生物炭对土壤理化性质影响的国内外研究现状分析[J]. *农业开发与装备*, 2015(2): 61.
- [32] MCHENRY M P. Soil organic carbon, biochar, and applicable research results for increasing farm productivity under Australian agricultural conditions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(10): 1187-1199.

(责任编辑:王妮)