

秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响

屈忠义¹ 高利华¹ 李昌见² 张娜¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 通过大田试验, 采用静态暗箱-气象色谱法研究玉米农田不施生物炭(C0), 施生物炭分别为 15 t/hm²(C15)、30 t/hm²(C30)和 45 t/hm²(C45)后温室气体(CO₂、CH₄和 N₂O)的排放特征, 并估算 CH₄和 N₂O的综合增温潜势(GWP)及排放强度(GHGI)。结果表明: 添加生物炭显著降低 CO₂和 N₂O的季节累积排放总量, 与 C0处理相比, CO₂最大降幅为 24.6%(C15), N₂O最大降幅为 110.35%(C45), 且其随着生物炭施用量的增加而降低; CH₄的季节累积排放总量由小到大依次为: C15、C30、C0、C45, 其中, C15处理较 C0处理降低幅度最大为 259.62%, 添加生物炭同时也降低 CH₄和 N₂O的综合增温潜势(GWP)及排放强度(GHGI), 处理 C15、C30和 C45的 GWP值较对照 C0分别降低 88.2%、123.2%和 109.9%, GHGI分别降低 88.86%、121.60%和 100.03%。施用适量的生物炭可以有效增加玉米产量, 处理 C15、C30和 C45的增幅分别为 6.28%、7.27%和 1.69%。处理 C30显著降低 CH₄和 N₂O的综合增温潜势及其排放强度, 并且产量的增幅最大。因此, 在当前玉米农田管理措施下, 生物炭施用量为 30 t/hm²时可实现玉米增产和固碳减排的目标。

关键词: 玉米; 秸秆生物炭; 温室气体; 综合增温潜势

中图分类号: S154.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0111-08

Impacts of Straw Biochar on Emission of Greenhouse Gas in Maize Field

Qu Zhongyi¹ Gao Lihua¹ Li Changjian² Zhang Na¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A field experiment was conducted by using the static chamber-gas chromatography method to analyze the emission behavior of greenhouse gas (CO₂, CH₄ and N₂O), and estimate the global warming potentials (GWP) of CH₄ and N₂O and the greenhouse gas intensity (GHGI) through different straw biochar application treatments in a maize field, including none biochar application (C0), biochar application rate of 15 t/hm²(C15), 30 t/hm²(C30) and 45 t/hm²(C45). Results showed that biochar application can significantly decrease the seasonal emissions of CO₂ and N₂O. The emissions of CO₂ and N₂O were decreased with the increase of biochar application rate, and the maximum decreases of CO₂ and N₂O emission were 24.6% (C15) and 110.35% (C45), respectively, compared with those of C0. The seasonal CH₄ emission followed a decreasing order of C15, C30, C0 and C45, in which the maximum decrease of CH₄ emission for C15 was 259.62% compared with that of C0. Biochar application can also decrease the comprehensive temperature increasing potentials (GWP) and the emission intensity (GHGI) of CH₄ and N₂O. The GWP of C15, C30 and C45 were reduced by 88.2%, 123.2% and 109.9%, respectively, and the GHGI were reduced by 88.86%, 121.60% and 100.03%, respectively, compared with those of C0. In addition, biochar application was able to increase maize yield. Compared with that of C0, the maize yield increases were 6.28%, 7.27% and 1.69% for C15, C30 and C45, respectively. The experiment demonstrated that C30 reached the most decrease of GWP and GHGI and

收稿日期: 2016-04-06 修回日期: 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161038)和内蒙古自治区科技厅应用项目(201501061)

作者简介: 屈忠义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事区域水土环境和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

increase of maize yield. Therefore, biochar application with a rate of 30 t/hm² can achieve the purposes of yield increase, carbon fixation and emission reduction under the current maize filed management measures.

Key words: maize; straw biochar; greenhouse gas; comprehensive temperature increasing potentials

引言

科学研究和观测数据表明,全球气候正在发生以变暖为主要特征的变化,而大量排放的温室气体是当前全球气候变化的主要因素^[1]。大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 是最主要的温室气体,对温室效应的贡献率近 80%^[2]。农田土壤是温室气体重要排放源^[3],据估计,大气中每年有 5%~20% 的 CO₂、15%~30% 的 CH₄、80%~90% 的 N₂O 来源于土壤^[4]。近年来,随着生物炭在土壤改良和大气碳汇等方面的应用^[5-7],在农业土壤中施用生物炭可能是减缓温室气体排放的有效途径之一。

生物炭是农林废弃物、动植物残体等生物质在缺氧或无氧条件下经高温热裂解形成的稳定的富碳产物。国内外研究发现,土壤中添加生物炭对土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放有显著影响。张斌等^[8]发现在施氮肥条件下,施用生物炭可抑制稻田的 N₂O 排放量,降幅达 66%,并且 40 t/hm² 的施炭量处理效果更好,持续效应更长;SHENBAGAVALLI 等^[9]发现生物炭能抑制温室气体的释放,其中 CO₂ 和 N₂O 的效果最明显;KARHU 等^[10]得出添加生物炭增加 CH₄ 的平均累积吸收量,增幅达 96%,但是对 CO₂ 和 N₂O 的影响不显著;生物炭对农田温室气体排放的影响程度因土壤质地^[11-12]、生物炭制备材料^[13]、施用量^[14]和作物种类^[15]等不同而异。我国对生物炭的研究较国外晚,更多是研究其在土壤改善和作物增产^[16-19]等方面的应用,随着生物炭技术的发展及对环境问题的重视,生物炭对农田温室气体排放的影响逐渐受到重视,然而目前生物炭在温室气体方面的研究大部分集中于南方稻田^[8,15,20-21]和室内试验^[14,22-23],北方农田的研究较少涉及。

玉米是内蒙古河套灌区主要农作物之一,每年的废弃秸秆大部分都被直接焚烧,对环境造成严重的影响,如果能将其应用到生物炭固碳减排技术中,不仅能够解决环境污染问题,而且可以促进资源的可持续利用。本文以秸秆生物炭为试验材料进行田间试验,探究不同秸秆生物炭施用量对农田温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放的影响规律,并估算 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势(GWP)及其排放强度(GHGI),从而深化生物炭对内蒙古地区农业环境

保护的理論意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 5—10 月份在内蒙古河套灌区临河区双河镇进步村九庄农业合作社(107°18'E、40°41'N,海拔高度 1 041~1 043 m)进行。该地属于中温带半干旱大陆性气候,云雾少、降水量少、风大气候干燥,多年年均降水量 140 mm 左右,平均气温 6.8℃,昼夜温差大,日照时间长(平均日照时数 3 229.9 h),无霜期 130 d 左右,地势东高西低,地面坡降 1/6 000。

1.2 供试材料

供试生物炭为辽宁金和福农业开发有限公司的玉米秸秆生物炭产品。供试土壤和生物炭基础理化性状见表 1。

表 1 供试土壤和生物炭基础理化性状

Tab.1 Soil and biochar physicochemical properties before initiation of experiment

参数	土壤	生物炭
pH 值(土水质量比 1:2.5)	8.5	9.04
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	318.5	
有机质质量比/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14.473	925.74
碱解氮质量比/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	65.89	159.15
速效磷质量比/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5.3	394.18
速效钾质量比/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	184	783.98
C 质量分数/%		47.17
N 质量分数/%		0.71
H 质量分数/%		3.83
碳氮比(C/N)/%		67.03

1.3 试验设计

将生物炭施于土壤表层,用旋耕机将生物炭与耕层土壤均匀混合。采用单因素 3 水平设计,1 个空白对照即不施生物炭(C0)和 3 个生物炭处理,生物炭施用量分别为 15 t/hm²(C15)、30 t/hm²(C30)、45 t/hm²(C45),每个处理 3 个重复,共 12 个试验小区,每个小区面积为 90 m²(15 m×6 m)。供试作物为玉米,品种为西蒙 6 号,株距 30 cm,行距 60 cm,种植密度为 56 667 株/hm²。基肥施用量:磷酸二胺 450 kg/hm²,复合肥 337.5 kg/hm²。共追施尿素(N 质量分数 46.67%)375 kg/hm²(在拔节前、中、后期追肥 3 次,抽雄期 1 次,灌浆期 1 次,共 5 次,每次

75 kg/hm²)。灌水方式为膜下滴灌,灌水时间通过张力计控制,灌水下限为 -25 kPa,灌水定额 225 m³/hm²。

1.4 样品采集分析与数据处理

1.4.1 样品采集分析

2015 年在玉米生长季 6 月 20 日—9 月 24 日选择晴天进行静态暗箱—气相色谱法进行温室气体通量(CO₂、CH₄、N₂O)定位观测。静态箱(地箱尺寸为 40 cm × 40 cm × 15 cm,顶箱尺寸为 40 cm × 40 cm × 40 cm)由厚 1.0 mm 的不锈钢制成。播种后选取每个试验小区的中间 4 行,在行与行的中间位置安放地箱,每个试验小区 3 个地箱(3 个重复),地箱内无植株,并保证地箱内的土壤不受扰动。采样周期大约为 15 d,选择晴天并在上午 09:00—11:00 完成采样,采用 30 min 罩箱时间,即每个采样箱分别在扣箱 0、10、20、30 min 后抽取气体。抽气工具为 60 mL 医用注射器,抽取气体 40 ~ 60 mL 转存于气体采样袋内。同时记录采样时间、采样时箱内始末气温,并通过数字式地温计测量 10 cm 地温。

采完气体后在 7 d 内用 Agilent 6820 气相色谱仪分析 CO₂、CH₄ 和 N₂O 浓度。该系统使用 CA-5 气体样品进样仪,一次进样可同时分析气体中的 CO₂、CH₄ 和 N₂O,其中,CO₂ 和 CH₄ 采用单阀单柱进样分离器路,共用同一个检测器即氢火焰离子化检测器(FID),温度为 250℃;N₂O 采用双阀双柱自动进样、反吹、分离和切换气路,单独使用电子捕获检测器(ECD),温度为 330℃。高纯 N₂ 作为载气,柱箱温度 55℃。

箱体内所测样品的浓度(C_s) 计算式^[24]为

$$C_s = A_s C_o / A_o \quad (1)$$

式中 C_o ——标气浓度

A_s ——所测样品峰面积

A_o ——标气峰面积

温室气体排放通量(F) 计算式^[24]为

$$F = \frac{\Delta m}{A \Delta t} = \frac{\rho V \Delta c}{A \Delta t} = \rho H \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 ρ ——箱内气体密度

Δm 、 Δc —— Δt 时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化

A 、 V 、 H ——采样箱底面积、体积、气室高度

$\frac{\Delta c}{\Delta t}$ ——箱内气体浓度变化

当 F 为负值时表示吸收, F 为正值时表示排放。气体通量计算过程中,通过公式中引入箱内温度和气压值,对气体浓度进行校正。

温室气体累积排放量(E_c) 计算式^[20]为

$$E_c = 24 \times 0.01a \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] + \frac{F_1 + F_n}{2} \right\} \quad (3)$$

式中 n ——玉米生长季观测次数

F_i 、 F_{i+1} ——第 i 、 $i+1$ 次采样时温室气体排放通量,mg/(m²·h)或 μg/(m²·h)

t_{i+1} 、 t_i ——第 $i+1$ 、 i 次采样的时间间隔,d

a ——转换系数(由于采样期间的天数小于玉米生长季(播种到收获)天数,此系数将其转换为玉米生长季天数),取 132/88

综合增温潜势(GWP)是将各种温室气体的增温潜势换算为 CO₂ 排放当量。100 a 时间尺度的综合增温效应计算式^[19]为

$$GWP = 295 E_{c-N_2O} + 28 E_{c-CH_4} \quad (4)$$

式中 E_{c-N_2O} ——N₂O 的季节累积排放量,kg/hm²

E_{c-CH_4} ——CH₄ 的季节累积排放量,kg/hm²

温室气体排放强度(GHGI)是单位经济产出的 CO₂ 排放当量,计算式^[19]为

$$GHGI = GWP/Y \quad (5)$$

式中 Y ——单位面积的产量,t/hm²

1.4.2 数据分析与处理

数据通过 Microsoft Excel 2003 进行整理并作图,使用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析、相关性分析,采用 LSD 方法进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭处理 CO₂ 的排放通量特征

如图 1 所示,从总的趋势来看,各处理土壤 CO₂ 的排放通量均呈先上升后降低的趋势,前期(6 月 20 日—7 月 6 日)各生物炭处理土壤的 CO₂ 排放通量高于对照 C0,之后各生物炭处理土壤的 CO₂ 排放通量基本低于对照(除 8 月 7 日处理 C30 和 9 月 5 日处理 C45 外),表明生物炭在施用前期对土壤 CO₂ 的排放通量有明显的促进作用,在施用中后期具有一定的抑制作用。C0 处理的 CO₂ 排放通量变化范围介于 9.240 ~ 223.101 mg/(m²·h) 之间;处理 C15 的变化范围介于 -1.175 ~ 190.237 mg/(m²·h) 之间;处理 C30 的变化范围介于 -7.780 ~ 213.265 mg/(m²·h) 之间;处理 C45 的变化范围介于 -69.315 ~ 218.343 mg/(m²·h) 之间。处理 C0、C15、C30 和 C45 的 CO₂ 季节平均排放通量分别为 1.692、1.275、1.395、1.318 kg/(hm²·h),与对照 C0 相比,处理 C15、C30 和 C45 分别降低了 24.6%、

17.6%、22.1%，不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。由此可见，添加生物炭可以抑制土壤 CO_2 的排放，其中处理 C15 的效果最好。

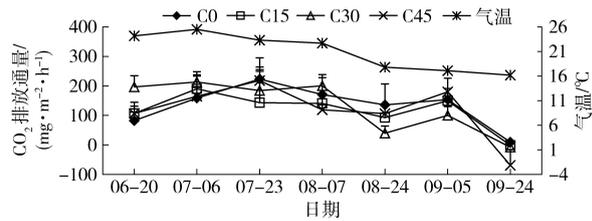


图1 不同处理土壤 CO_2 排放通量季节动态变化

Fig.1 Seasonal variation of soil CO_2 emission flux for different treatments

通过皮尔逊相关性分析发现，土壤 CO_2 的排放通量与土壤温度 (10 cm) 呈极显著正相关 (表 2)。

表 2 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放通量与土壤温度的相关性分析

Tab.2 Relevant relationships between CO_2 , CH_4 , N_2O fluxes and soil temperature

项目	CO_2 排放通量		CH_4 排放通量		N_2O 排放通量	
	r	P	r	P	r	P
土壤温度 (10 cm)	0.730**	0.001	0.506*	0.046	0.225	0.402

注：** 表示在 $P < 0.01$ 水平 (双侧) 上显著相关，* 表示在 $P < 0.05$ 水平 (双侧) 上显著相关。 r 表示相关系数。

2.2 不同生物炭处理 CH_4 的排放通量特征

图 2 中，正值表示土壤向大气释放 CH_4 ，负值表示土壤吸收大气 CH_4 。由图可知，前期 6、7 月份大气温度较高，随之土壤温度也较高，各处理的土壤 CH_4 排放通量均较大，变化剧烈，而此阶段正是玉米拔节和抽雄期，玉米生长较快，说明作物生长较快的时期土壤 CH_4 排放通量较高，后期由于大气温度逐渐降低，土壤 CH_4 排放通量变化逐渐趋于平缓，表明灌浆和成熟期土壤 CH_4 排放通量较低。处理 C0、C15、C30 和 C45 的土壤 CH_4 排放通量变化范围分别为 $-38.88 \sim 17.77 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-70.09 \sim 13.26 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-52.52 \sim 0.00 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $43.89 \sim 74.12 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。处理 C0、C15、C30 和 C45 的土壤 CH_4 季节平均排放通量分别为 $-61.642 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-221.680 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-173.834 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 、 $12.281 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，与对照相比，处理 C15、C30 的 CH_4 季节平均排放通量分别减少 259.62% 和 182.01%，处理 C45 的 CH_4 季节平均排放通量增加 119.92%，不同处理间差异显著。由此可知，处理 C15、C30 促进了土壤对 CH_4 的吸收，而 C45 却增加了 CH_4 的排放，因此，土壤适量添加生物炭有助于生长季土壤 CH_4 的吸收，处理 C15 和 C30 对 CH_4 的减排效果较好。

通过皮尔逊相关性分析发现，土壤 CH_4 排放通量与土壤温度 (10 cm) 具有一定的正相关性 (表 2)。

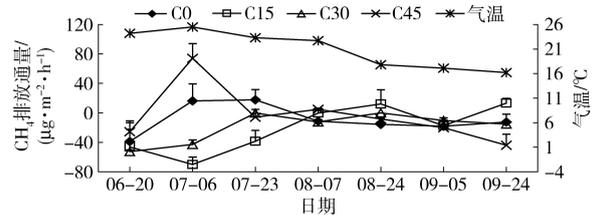


图 2 不同处理土壤 CH_4 排放通量季节动态变化

Fig.2 Seasonal variation of soil CH_4 emission flux for different treatments

2.3 不同生物炭处理 N_2O 的排放通量特征

图 3 中，正值表示土壤向大气释放 N_2O ，负值表示土壤吸收大气 N_2O ，对照处理的土壤 N_2O 排放通量均为正值，生物炭处理的土壤 N_2O 排放通量有正有负，表明施用生物炭对土壤 N_2O 的排放产生一定的抑制作用。各生物炭处理土壤 N_2O 的排放前期抑制效果较弱后期逐渐增强，可能是因为生物炭对土壤的改善是一个缓慢的过程。处理 C0、C15、C30 和 C45 的土壤 N_2O 排放通量变化范围分别为 $1.79 \sim 20.58 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-7.16 \sim 15.61 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-15.87 \sim 9.18 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-27.57 \sim 6.94 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。随着生物炭施入量的增加，土壤 N_2O 季节平均排放通量逐渐减小，抑制效应持续增强。处理 C0、C15、C30 和 C45 的土壤 N_2O 季节平均排放通量分别为 106.065 、 30.549 、 -8.857 、 $-10.981 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ ，与对照相比，处理 C15、C30 和 C45 的土壤 N_2O 季节平均排放通量分别减少 71.20%、108.35%、110.35%。

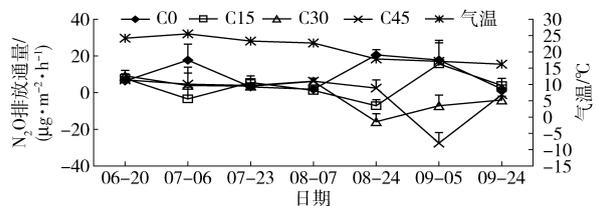


图 3 不同处理土壤 N_2O 排放通量季节动态变化

Fig.3 Seasonal variation of soil N_2O emission flux for different treatments

通过皮尔逊相关性分析得出，土壤 N_2O 的排放通量与土壤温度不具有相关性 (表 2)。

2.4 生物炭对玉米产量和土壤温室气体综合排放的影响

2.4.1 温室气体累积排放量和综合增温潜势

如表 3 所示，对于 CO_2 和 N_2O ，与对照处理 C0 相比，施用生物炭后 2 种气体的季节累积排放总量均减少，处理 C15、C30、C45 分别下降 24.7%、17.6%、22.1 和 71.1%、108.3%、110.4%，差异性显著。说明添加适量生物炭对土壤 CO_2 和 N_2O 的

排放有一定的抑制作用。对于 CH_4 , 处理 C0、C15 和 C30 的季节累积排放总量均为负值, 土壤表现为对 CH_4 的吸收, 且处理 C15 和 C30 吸收量高于对照 C0, 分别高出 260% 和 182.6%, 但是处理 C45 的季节累积排放总量为正值, 土壤表现为对 CH_4 的排放, 与对照 C0 相比, 促进 CH_4 的排放, 各处理差异性显著, 因此适量的施加生物炭有助于土壤对 CH_4 的吸收。

表 3 不同处理土壤温室气体排放总量、GWP、产量和 GHGI

Tab. 3 Soil greenhouse gas emission amount, GWP, production and GHGI for different treatments

处理	产量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	温室气体季节累积排放总量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			100 a GWP($\text{N}_2\text{O} + \text{CH}_4$)/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	GHGI/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
		CO_2	N_2O	CH_4		
C0	14.166 ^b	5360.904 ^a	0.336 ^a	-0.195 ^a	95.250 ^a	6.724
C15	15.056 ^a	4038.770 ^b	0.097 ^b	-0.702 ^b	11.283 ^b	0.749
C30	15.204 ^a	4419.148 ^c	-0.028 ^b	-0.551 ^c	-22.129 ^c	-1.455
C45	14.413 ^b	4174.782 ^d	-0.035 ^c	0.039 ^d	-9.394 ^d	-0.002

注: 同列数值后不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

2.4.2 玉米产量和温室气体排放强度

如表 3 所示, 随着生物炭施入量的增加, 玉米产量先增加后减小, 产量由高到低为: C30、C15、C45、C0。与对照相比, 处理 C15、C30 和 C45 的玉米产量增幅分别为 6.28%、7.27%、1.69%, 由此得知, 在土壤中施用适量的生物炭可以显著提高玉米产量, 其中处理 C30 的效果最佳。

适量的生物炭添加可以有效地降低玉米农田的温室气体排放强度。根据玉米产量和 GWP 计算出 GHGI, GHGI 越低, 表明单位经济产出的温室气体排放量越低。如表 3 所示, 各处理中温室气体排放强度最低的 C30, 为 -1.455 kg/t , 其次为 C45 (-0.002 kg/t)、C15 (0.749 kg/t), 3 个生物炭处理均低于对照 C0 (6.724 kg/t), 且各处理间差异显著, 其中处理 C30、C45 和 C15 的温室气体排放强度相比对照 C0 分别降低 121.60%、100.03%、88.86%。

3 讨论

3.1 生物炭对 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放通量的影响

研究发现施用生物炭均不同程度地抑制了土壤 CO_2 的排放通量, 其中施入 15 t/hm^2 的效果最好。相关分析显示, 土壤 CO_2 排放通量与土壤温度 (10 cm) 呈极显著正相关, 这是因为土壤温度在一定程度上影响土壤微生物呼吸速率, 且具有一定的正相关性^[25-26], 而浅层土壤温度受大气温度影响较大, 因此, 土壤 CO_2 的排放通量与大气温度规律一致, 均呈先增加后下降的趋势。6月20日和7月6日各生物炭处理 CO_2 的排放通量高于对照处理 C0, 一方面可能是因为施用的生物炭本身携带了大量的

根据各处理 N_2O 和 CH_4 的季节排放总量, 计算出 100 a 尺度下 CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势(表 3), 处理 C15、C30 和 C45 的 GWP 值均小于对照处理 C0, 其中处理 C30 和 C45 的 GWP 值为负值, 不具有增温效应。处理 C15、C30 和 C45 的综合增温潜势相比对照 C0 分别降低 88.2%、123.2%、109.9%, 各处理间差异显著, 表明施用生物炭可以降低 GWP 值, 其中, 处理 C30 降幅最大。

易被土壤微生物利用的有机质, 从而提高土壤微生物的活性、增强呼吸作用^[27-29], 另一方面可能是因为较低温度裂解生物炭含有不完全转化的纤维素、半纤维素等糖类物质, 这些不稳定的糖类物质极易为土壤微生物利用, 降低生物炭的固碳潜力, 促进土壤 CO_2 释放^[22,30], 也可能是生物炭中的更多不稳定成分更易被矿化^[22,30-31]。因为生物炭处理土壤 CO_2 季节平均排放通量均小于对照, 因此 7 月 6 日之后生物炭处理总体上表现为抑制 CO_2 的排放, 这可能是因为后期生物炭促进一些难以被土壤微生物分解的大分子物质形成, 如土壤腐殖质、碳水化合物、酯族、芳烃等^[23,32], 从而降低微生物对有机碳的利用量, 降低微生物量^[33], 使土壤内碳矿化受到一定地抑制^[25], 导致碳矿化速率降低^[28], 最终降低土壤 CO_2 的排放量。因此, 生物炭对土壤 CO_2 的抑制作用是一个长期的效应, 在长时间尺度内, 生物炭可以起到固碳减排的作用。

CH_4 的排放是土壤中产 CH_4 菌和 CH_4 氧化菌综合作用的结果^[34]。通过相关性分析知, CH_4 的吸收或释放通量与土壤表层温度 (10 cm) 呈正相关, 这与马秀芝等^[24]的研究结果一致, 这可能是因为土壤温度影响土壤微生物的活性和相关酶的活性。与对照相比, 生物炭处理 C15 和 C30 显著抑制了土壤 CH_4 的平均排放通量, 原因可能是生物炭本身巨大的比表面积和复杂的结构, 施入土壤后, 减小土壤的容重、改善土壤的通气性和持水能力, 为 CH_4 氧化菌提供充足的氧气和生存条件, 促进 CH_4 的氧化^[34-35], 破坏了产 CH_4 菌的厌氧环境^[21,36-37]。较高生物炭施用量 (45 t/hm^2) 增加了 CH_4 的平均排放

通量,这与ZHANG等^[38]的研究结果一致,一方面可能是因为较高的外加碳源改变了微生物的群落和活性,减弱CH₄的氧化速率,从而增加CH₄的净排放;另一方面可能是因为较高的生物炭处理含有较高的铵态氮^[39],参与CH₄氧化的关键酶是CH₄单氧化酶,而较高浓度的氨与CH₄氧化菌对这种酶的竞争将导致CH₄氧化菌的生长受到抑制,使CH₄的氧化量降低^[40],从而增加CH₄的排放量。

土壤N₂O的形成主要是在土壤微生物的参与下,通过硝化与反硝化作用产生。通过相关性分析知,N₂O的排放通量与土壤表层温度(10 cm)不具有相关性,原因可能是试验区的地温变化范围在硝化与反硝化作用的适宜温度范围内,或者其他的因素对N₂O排放影响更大。LIU等^[41]通过研究指出随着生物炭施用量的增加,生物炭对土壤N₂O的减排效果逐渐增强,这与本文研究结果一致。出现这种现象的原因为:生物炭施入土壤后,降低土壤的容重,改善土壤的通气性,且生物炭本身较高的C/N值抑制氮素微生物的转化与反硝化作用^[36]。生物炭增大土壤的阳离子交换量,加上生物炭本身巨大的比表面积,可以吸附更多容易导致N₂O增排的NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和磷酸盐^[42-43]。生物炭含有的某些成分抑制NO₃⁻-N向N₂O转化关键酶的活性,或者是促进N₂O向N₂转化还原酶的活性^[44-45],最终减少土壤N₂O的排放。

3.2 生物炭对玉米产量和土壤温室气体综合排放的影响

勾芒芒等^[16]和李昌见等^[46]发现施入生物炭后提高了番茄的产量,这与本文的研究结果一致,因为生物炭施入土壤后可以改善土壤的理化性质,进而提高土壤的水肥利用效率,最终提高作物产量。CH₄和N₂O是重要的温室气体,单位质量CH₄和

N₂O的全球增温潜势在100 a时间尺度上分别为CO₂的25倍和298倍,本研究发现,添加生物炭后均显著降低了CH₄和N₂O的综合增温效应,张斌等^[8]研究也得出,施用生物炭可显著降低CH₄和N₂O的综合增温效应。施用生物炭后显著地降低CH₄和N₂O的排放强度,其中处理C30的GHGI最小,原因是处理C30的CH₄和N₂O的综合增温潜势最小,产量最大。因此,综合考虑环境效益和经济效益,30 t/hm²的生物炭施用量是比较合适的选择。

4 结论

(1)添加适量的生物炭有效地降低了玉米农田土壤CO₂、N₂O和CH₄的季节累计排放总量。与对照C0相比,处理C15、C30和C45的CO₂季节累积排放总量分别降低24.7%、17.6%、22.1%,N₂O季节累积排放总量分别降低71.1%、108.3%和110.4%。当添加45 t/hm²的生物炭,增加了土壤CH₄的季节累积排放总量,而添加15、30 t/hm²的生物炭有效地降低了土壤CH₄的季节累积排放总量,说明适量的添加生物炭能够有效地降低玉米农田土壤CH₄的季节累积排放总量。

(2)相比对照C0,施用适量的生物炭显著降低了玉米农田土壤CH₄和N₂O的综合增温潜势(GWP),处理C15、C30和C45的GWP值相比对照C0分别降低88.2%、123.2%、109.9%,添加30 t/hm²生物炭的效果较好。

(3)施用适量的生物炭有效地提高了玉米产量、显著地降低了温室气体排放强度(GHGI)。处理C15、C30和C45与对照C0相比,分别增产6.28%、7.27%、1.69%,GHGI分别降低88.86%、121.60%、100.03%,综合考虑,添加30 t/hm²的生物炭是比较合适的生物炭施用量。

参 考 文 献

- 1 国家发展和改革委员会. 国家应对气候变化规划(2014—2020年)[R]. 2014.
- 2 KIEHL J T, TRENBERTH K E. Earth's annual global mean energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(2): 197-208.
- 3 IPCC. Climate change 2007: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- 4 IPCC. Special report on emissions scenarios, working group III, intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 5 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 Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1-7. (in Chinese)
- 6 吴创之, 周肇峰, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91-99. WU Chuangzhi, ZHOU Zhaoqiu, YIN Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91-99. (in Chinese)
- 7 王典, 张祥, 姜存仓, 等. 生物质炭改良土壤及对作物效应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 963-967. WANG Dian, ZHANG Xiang, JIANG Cuncang, et al. Biochar research advances regarding soil improvement and crop response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 963-967. (in Chinese)

- 8 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.
ZHANG Bin, LIU Xiaoyu, PAN Genxing, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(23): 4844–4853. (in Chinese)
- 9 SHENBAGAVALLI S, MAHIMAIRAJA S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil[J]. International Journal of Advanced Biological Research, 2012, 2(2): 249–255.
- 10 KARHU K, MATTILA T, BERGSTR M I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 140(1–2): 309–313.
- 11 何飞飞, 荣湘民, 梁运姗, 等. 生物炭对红壤菜田土壤理化性质和 N₂O、CO₂ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1893–1900.
HE Feifei, RONG Xiangmin, LIANG Yunshan, et al. Effects of biochar on soil physicochemical properties and N₂O, CO₂ emissions from vegetable-planting red soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(9): 1893–1900. (in Chinese)
- 12 EL-MAHROUKY M, EL-NAGGAR A H, USMAN A B, et al. Dynamics of CO₂ emission and biochemical properties of a sandy calcareous soil amended with conocarpus waste and biochar[J]. Pedosphere, 2015, 25(1): 46–56.
- 13 LIU Y X, YANG M, WU Y M, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930–939.
- 14 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 生物黑炭对旱地土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放及其环境效益的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3615–3624. (in Chinese)
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Effects of biochar on CO₂, CH₄, N₂O emission and its environmental benefits in dryland soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3615–3624. (in Chinese)
- 15 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095–1103.
LI Lu, ZHOU Ziqiang, PAN Xiaojian, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1095–1103. (in Chinese)
- 16 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 137–140.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137–140. (in Chinese)
- 17 赵迪, 黄爽, 黄介生. 生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 136–143.
ZHAO Di, HUANG Shuang, HUANG Jiasheng. Effects of biochar on hydraulic parameters and shrinkage-swelling rate of silty clay[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 136–143. (in Chinese)
- 18 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128–134.
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 128–134. (in Chinese)
- 19 郭刚. 不同施肥模式下施用生物黑炭对雨养旱地土壤性质、玉米生长和温室气体排放影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
WU Gang. Effect of biochar amendment of soil properties corn growth and greenhouse gas emissions from rain-fed dry land under different fertilization mode[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 20 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3121–3127.
WANG Cong, SHEN Jianlin, ZHENG Liang, et al. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 3121–3127. (in Chinese)
- 21 秦晓波, 李玉娥, WANG Hong, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 226–233.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, WANG Hong, et al. Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in South China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 226–233. (in Chinese)
- 22 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 CO₂ 释放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 95–98.
KE Yuejin, HU Xueyu, YI Qing, et al. Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO₂ release in arable soil[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 95–98. (in Chinese)
- 23 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1795–1799.
HUA Li, JIN Susu, LUO Jingjing. Effect of bio-char on the micro-environment characteristics and humus in soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(11): 1795–1799. (in Chinese)
- 24 马秀枝, 张秋良, 李长生, 等. 寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2151–2153.
MA Xiuzhi, ZHANG Qiuliang, LI Changsheng, et al. Temporal variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix*

- gmelinii* forest in Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2151–2153. (in Chinese)
- 25 刘艳. 模拟增温对农田土壤呼吸、硝化及反硝化作用的影响[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
LIU Yan. Effects of simulated warming on soil respiration, nitrification and denitrification in a crop land[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 26 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 等. 大气 CO₂ 体积分数升高环境温度与土壤水分对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 950–956.
KOU Taiji, ZHU Jianguo, XIE Zubin, et al. The effects of temperature and soil moisture on soil respiration in the cropland under elevated pCO₂[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 950–956. (in Chinese)
- 27 JONES D L, MURPHY D V, KHALID M, et al. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8): 1723–1731.
- 28 SMITH J L, COLLINS H P, BAILEY V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2345–2347.
- 29 BRUUN E W, AMBUS P, EGSGAARD H, et al. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 73–79.
- 30 BRUUN E W, HAUGGAARD-NIELSEN H, IBRAHIM N, et al. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(3): 1182–1189.
- 31 ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(6): 1169–1179.
- 32 CROSS A, SOHI S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(10): 2127–2134.
- 33 章明奎, Bayou W D, 唐红娟. 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): 129–131.
ZHANG Minghui, BAYOU W D, TANG Hongjuan. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 129–131. (in Chinese)
- 34 MER J L, ROGER P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(1): 25–50.
- 35 KARHU K, MATTILA T, BERGSTROM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 140(1): 309–313.
- 36 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): 395–419.
- 37 FENG Y, XU Y, YU Y. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 46: 80–88.
- 38 ZHANG A F, LIU Y M, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant and Soil, 2012, 351(1–2): 263–275.
- 39 刘玮晶, 刘焯, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962–968.
LIU Weijing, LIU Ye, GAO Xiaoli, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5): 962–968. (in Chinese)
- 40 胡荣桂. 氮肥对旱地土壤甲烷氧化能力的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 74–77.
HU Ronggui. Effects of fertilization on the potential of methane oxidation in upland soil[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 74–77. (in Chinese)
- 41 LIU X Y, QU J J, LI L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N₂O emission in rice paddies? —across site field experiment from South China[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 168–173.
- 42 MIZUTA K, MATSUMOTO T, HATATE Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal [J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 255–257.
- 43 花莉, 唐志刚, 解井坤. 生物质炭对农田温室气体排放的作用效应及其影响因素探讨[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1068–1073.
HUA Li, TANG Zhigang, XIE Jingkun, et al. Effect and its influencing factors of biochar on agricultural greenhouse gases emissions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1068–1073. (in Chinese)
- 44 RONDON M A, MOLINA D, HURTADO M, et al. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through biochar amendments to unfertile tropical soils[C]//Proceedings of the 18th World Congress of Soil Science, 2006: 138–168.
- 45 YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M, et al. Effect of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(2): 181–188.
- 46 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2187–2193.
LI Changjian, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2187–2193. (in Chinese)