

# 秸秆和生物炭添加对关中地区玉米—小麦轮作 农田温室气体排放的影响

陈 静<sup>1,2</sup>, 张建国<sup>1,2</sup>, 赵 英<sup>1,2</sup>, 张阿凤<sup>1,2</sup>, 成 功<sup>1,2</sup>, 冯 浩<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与  
农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为探讨玉米—小麦轮作农田秸秆和生物炭添加的固碳减排效应,以关中地区典型玉米—小麦轮作农田为研究区域,采用静态暗箱—气相色谱法监测了秸秆和生物炭添加后土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的动态变化。设常规施肥(N)、施基肥和添加 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆还田(NS)、施基肥和添加 4 t/hm<sup>2</sup> 生物炭(NBC<sub>low</sub>)、施基肥和添加 8 t/hm<sup>2</sup> 生物炭(NBC<sub>high</sub>)和对照(CK)既不施肥也不施有机物料 5 个处理。结果表明:(1) 与 N 处理相比,NS 处理的农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量没有显著变化,添加生物炭降低了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  年排放总量,NBC<sub>low</sub> 和 NBC<sub>high</sub> 处理分别降低了 13.21% 和 23.75%。(2) 与 N 处理相比,NS 处理的农田土壤  $\text{CO}_2$  年排放总量增加了 44.07%,添加 8 t/hm<sup>2</sup> 生物炭降低了  $\text{CO}_2$  年排放总量,NBC<sub>high</sub> 处理降低了 9.94%。(3) 与 N 处理相比,NS 处理的  $\text{CH}_4$  年排放总量增加了 42.32%。NBC<sub>low</sub> 和 NBC<sub>high</sub> 处理  $\text{CH}_4$  年排放总量分别增加了 76.38% 和 73.23%。(4) 秸秆还田和生物炭添加均提高了作物产量,与 N 处理相比,NS、NBC<sub>low</sub> 和 NBC<sub>high</sub> 处理的年产量分别提高了 13.73%、20.37% 和 7.56%;NBC<sub>high</sub> 处理比 NBC<sub>low</sub> 处理年产量降低了 10.64%;与 N 处理相比,NS、NBC<sub>low</sub> 和 NBC<sub>high</sub> 处理的小麦产量分别提高了 22.36%、25.41% 和 14.06%;NS、NBC<sub>high</sub> 处理的玉米产量分别提高了 5.40% 和 15.50%。(5) 添加生物炭降低了净增温潜势,与 N 处理相比,NBC<sub>low</sub> 和 NBC<sub>high</sub> 处理分别降低了 33.59、48.33 t/hm<sup>2</sup>,单位产量的净增温潜势分别降低了 2.53、4.21 t/t。综上所述,添加 4 t/hm<sup>2</sup> 生物炭更有利于玉米—小麦轮作农田系统的固碳减排和产量的提高。

**关键词:**秸秆还田; 生物炭添加; 玉米—小麦轮作; 温室气体; 净增温潜势; 关中地区

中图分类号:S314

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0170-09

## Effects of Straw and Biochar Amendment on Greenhouse Gases Emission in Wheat-Maize Rotation Cropland in Guanzhong Area

CHEN Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianguo<sup>1,2</sup>, ZHAO Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Afeng<sup>1,2</sup>, CHENG Gong<sup>1,2</sup>, FENG Hao<sup>2,3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University,

Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in

Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. Institute of Water and Soil

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to reveal the effects of straw and biochar amendment on greenhouse gases (GHG) emission and crop yield, the farmland ecosystem of maize-wheat rotation in Guanzhong Plain of China was taken as the study area. The annual GHG emissions ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{N}_2\text{O}$ ) from a wheat-maize rotation system with straw and biochar amendment were monitored using the static opaque chamber and gas chromatography technique. Five field treatments in the study including conventional fertilization (N), fertilization and 4 t/hm<sup>2</sup> straw (NS) amendment, fertilization and 4 t/hm<sup>2</sup> biochar (NBC<sub>low</sub>) amendment, fertilization and 8 t/hm<sup>2</sup> biochar (NBC<sub>high</sub>) amendment. CK was without straw, biochar and fertilizer. The results showed that: (1) compared with N treatment, annual  $\text{N}_2\text{O}$  emission decreased by 13.21% and 23.75% under NBC<sub>low</sub> and NBC<sub>high</sub> treatment, respectively, and no significant difference was observed under straw application; (2) compared with N treatment, annual  $\text{CO}_2$  emission increased by 44.06% under NS treatment, but decreased by 9.94%

收稿日期:2017-08-09

修回日期:2017-08-25

资助项目:国家 863 项目(2013AA102904);国家自然科学基金(41301305);西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(2014YB062, 2452015355)

第一作者:陈静(1991—),女,陕西延安人,硕士研究生,研究方向:农田土壤温室气体排放。E-mail:rongchujing@163.com

通信作者:张建国(1981—),男,山东菏泽人,副教授,博士,研究方向:土壤水盐运移、荒漠化防治、干旱区生态与环境。E-mail:zhangjianguo@nwsuaf.edu.cn

under NBC<sub>high</sub> treatment; (3) compared with N treatment, annual CH<sub>4</sub> emission increased by 42.32%, 76.38% and 73.23%, respectively, under NS, NBC<sub>low</sub> and NBC<sub>high</sub> treatment; (4) yield increased by 13.73%, 20.37% and 7.56%, respectively, under NS, NBC<sub>low</sub> and NBC<sub>high</sub> treatment as compared to N treatment, and decreased by 10.64% under NBC<sub>high</sub> treatment as compared to NBC<sub>low</sub> treatment; (5) the NGWP decreased by 33.59 t/hm<sup>2</sup> and 48.33 t/hm<sup>2</sup>, respectively, under NBC<sub>low</sub> and NBC<sub>high</sub> treatment as compared to N treatment, and the NGHGI decreased by 2.53 t/t and 4.21 t/t, respectively, under NBC<sub>low</sub> and NBC<sub>high</sub> treatment as compared to N treatment. In summary, it is concluded that biochar application of 4 t/hm<sup>2</sup> can be used as an effective management to carbon sequestration and increase crop yields under the wheat-maize rotation system in Guanzhong Area.

**Keywords:** straw amendment; biochar application; maize-wheat rotation; greenhouse gases; net global warming potential; Guanzhong Area

温室气体排放所引起的全球变暖和气候异常是当今国际社会关注的焦点问题之一。据预测,到 2050 年我国平均气温将增加 1.5~2.8℃<sup>[1]</sup>。研究发现,大气中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的浓度平均每年分别增加 0.28%, 0.31%和 0.51%<sup>[2]</sup>,而由人类活动造成的温室气体排放是重要因素<sup>[3]</sup>。其中,农业是最重要的温室气体来源。而良好的管理措施可以使农业减排潜力大幅度提升<sup>[4]</sup>。所以探讨如何通过合理的农作措施来减少温室气体排放,对于减缓气候变暖有重要意义。

秸秆还田是一种在我国广为提倡的可持续秸秆资源利用方式,秸秆不仅含有大量养分,能提高土壤有机质含量<sup>[5]</sup>,还可以改善土壤物理性质,提高土壤微生物活性<sup>[6]</sup>,更好地培肥土壤,进而可能影响农田温室气体排放。但是同时秸秆还田后土壤中含有大量腐殖质和未完全腐熟的秸秆,为病原菌创造了适宜的生存条件,使田间土壤的病原菌数量不断累积增加,从而增加作物根部病害的发生概率<sup>[7-8]</sup>。故我们用作物秸秆制成的生物炭代替秸秆添加入土壤,可以使秸秆资源得到有效利用,且生物炭具有多孔的结构,施入土壤后可以增加表层土壤孔隙度及土壤水分的渗透性<sup>[9]</sup>,提高养分有效性和 pH 值,减少土壤养分的淋失,同时改变土壤微生物丰度和群落结构,改变土壤无机氮的有效性,改变土壤 N<sub>2</sub>O 释放速率,进而对土壤碳氮循环产生影响,使土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的排放发生变化<sup>[10]</sup>。故作物秸秆和生物炭的农业利用是全球学者的研究热点。国内外学者针对水稻和小麦农田温室气体排放及其影响因素做了大量研究<sup>[11-14]</sup>,而关于玉米—小麦轮作农田有机物料添加对农田温室气体排放影响的研究相对较少。本文对小麦秸秆、生物炭添加后关中地区典型玉米—小麦轮作农田土壤温室气体排放通量进行为期一年的系统监测,并分析温室气体排放与作物秸秆和生物炭添加后土壤温度、土壤含水量间的关系,进而探讨作物秸秆

和生物炭添加对玉米—小麦轮作农田净增温潜势的影响,以期寻求科学的农田管理措施来降低温室气体排放,为农田固碳减排提供科学依据。

1 试验设计

1.1 研究区概况

试验于 2015 年 6 月至 2016 年 5 月在位于陕西关中平原中部的杨陵区西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站进行。研究区属于暖温带湿润季风气候区,海拔 521 m,年均降水量 487.3 mm,且主要集中于 7—10 月份,年均气温 14.56℃,属于典型的夏玉米—冬小麦一年两熟旱作农业种植区。试验站内地形平整,土层深厚,土壤质地为中壤土,其基本理化性质如表 1 所示。

表 1 试验地基本土壤理化性质

层次/ cm	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	田间 持水量/%	全氮 含量/%	有机碳含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	黏粒 含量/%	石砾 含量/%
0—20	1.27	22.17	1.16	7.18	27.91	0.66

1.2 试验材料

试验所用的添加物为小麦秸秆和生物炭。供试的生物炭购买于三利新能源有限公司,由小麦秸秆以 20℃min 的升温速率在 350~550℃无氧条件下热解 6 h。生物炭的全碳和全氮含量分别为 48.96%和 1.07%,K、Ca 和 Mg 的含量分别是 0.16%,1.01%和 0.62%。小麦秸秆进行粉碎后还田。其中,小麦秸秆的全碳和全氮含量分别为 37.78%和 0.76%,由于生物炭的粒径大小不一,为了保证粒径大小一致,故要过 5 mm 筛备用。

1.3 试验处理

试验设常规施肥(N)、常规施肥和秸秆还田(NS)、常规施肥和生物炭处理(NBC<sub>low</sub>)、常规施肥和生物炭加倍处理(NBC<sub>high</sub>)和对照处理(CK),一共 5 个处理。每个处理设置 3 个重复,共 15 个小区,小区面积为 5 m×2 m=10 m<sup>2</sup>,每个小区之间有 0.5 m 宽

的保护行,采用随机区组设计。除 CK 外,其他各小区玉米分别施用基肥为 225 kg N/hm<sup>2</sup> 的尿素和 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup> 的磷酸二氢钙,小麦分别施用基肥为 120 kg N /hm<sup>2</sup> 的尿素和 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup> 的磷酸二氢钙和 50 kg K<sub>2</sub>O /hm<sup>2</sup>。基肥、秸秆、生物炭于玉米和小麦种植之前进行旋耕翻入耕层土壤,追肥为

30 kg N/hm<sup>2</sup> 于返青期前施加。作物品种分别为玉米(秦龙 14)和小麦(小偃 22),玉米于 2015 年 6 月 11 日播种,2015 年 10 月 8 日收获,小麦于 2015 年 10 月 13 日播种,2016 年 5 月 20 日收获。播种量为 12.5 kg/hm<sup>2</sup>。采样箱底座里不播种作物,此外,保证底座里与底座外的处理一致。试验各处理如表 2 所示。

表 2 玉米—小麦试验处理分布表

编号	处理	说明	作物行距
CK	空白对照	不施基肥,不添加有机物料	小麦行距 30 cm
N	常规施肥	施尿素、磷酸二氢钙和 K <sub>2</sub> O	
NS	施基肥和秸秆还田	秸秆用量为 4 t/hm <sup>2</sup>	玉米株距 30 cm,行距 40 cm
NBC <sub>low</sub>	施基肥和生物炭处理	生物炭的用量为 4 t/hm <sup>2</sup>	
NBC <sub>high</sub>	施基肥和生物炭加倍处理	生物炭的用量为 8 t/hm <sup>2</sup>	

1.4 温室气体采集与测定

气体采集采用静态暗箱法。采样箱为泡沫和 PVC 材料包裹的不锈钢箱(50 cm × 50 cm × 50 cm),箱内装有采样管口和电扇,电扇可以使箱内气体混合均匀。在玉米和小麦种植之前把静态暗箱的底座(50 cm×50 cm)放入各试验小区的作物行间,要使底座边缘与地表在一条水平线上。安放好后整个玉米—小麦轮作生长季底座不再移动。采样时在底座水槽内加水,以保证静态箱内气密性良好,再将采样箱放置在不锈钢底座上。采样时间为每天 8:00—14:00,施肥及下雨后适当加测。

采集气样过程中同时用温度计测定采样箱内气温和大气温度,用地温计测定采样箱内 0—5 cm 土壤温度,并用 TDR 土壤水分速测仪在每个小区随机测 3 个点的土壤体积含水量,取平均值。

采集的气体用气相色谱分析仪(7890B,安捷伦科技有限公司,中国)检测样品中 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的浓度。测定 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的浓度所用检测器为氢火焰离子化检测器(FID),测定 N<sub>2</sub>O 的浓度的检测器为电子捕获检测器(ECD),载气为高纯氮气。排放通量由式(1)求得,加权平均与作物生长期天数的乘积求全生长期 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放总量。

$$F=H\frac{MP}{R(273+T)}\frac{dc}{dt}\tag{1}$$

式中:F 为气体排放通量[μg/(m<sup>2</sup> · h)];H 为采集箱子的高度(cm);M 为气体的摩尔质量(g/mol);P 为气体密度(g/L);R 为普适气体常数[8.314 (Pa · m<sup>3</sup>)/(mol · K)];T 为采样时箱内平均气温(℃);dc/dt 为气体排放速率(μl/L · min)。

1.5 土壤有机碳测定

于 2016 年 5 月小麦收获后采集 0—20 cm 土层样本,混匀后风干,过 0.5 mm 筛备用。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法测定<sup>[15]</sup>。土

壤有机碳封存率(SOCSR)的计算公式如下<sup>[16]</sup>：  
$$SOCSR=(SOC_t-SOC_0)/1\times\gamma\times(1-\delta_{2\text{ mm}}/100)\times20\times10^{-1}\tag{2}$$

式中:SOCSR 为土壤有机碳封存率[t/(hm<sup>2</sup> · a)];SOC<sub>t</sub> 和 SOC<sub>0</sub> 分别为 2016 年 6 月和 205 年 6 月土壤有机碳含量(g/kg);γ 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);δ<sub>2 mm</sub> 为 0 表示 20 cm 土层石砾含量(%);20 为表层土厚度(cm)。

1.6 净增温潜势计算

净增温潜势(NGWP)的计算公式如下<sup>[17]</sup>：  
$$NGWP=34\times S_C+298\times S_N-44/12\times SOCSR\tag{3}$$

式中:NGWP 以 CO<sub>2</sub>-C(kg/hm<sup>2</sup>)表示;S<sub>C</sub> 和 S<sub>N</sub> 分别为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放总量。

单位产量的净增温潜势(NGHGI)的计算公式如下<sup>[18]</sup>：

$$NGHGI=NGWP/yield\tag{4}$$

式中:NGHGI 以 CO<sub>2</sub>-C 表示(t/t);yield 为整个玉米表示小麦轮作周期内总的产量(t/hm<sup>2</sup>)。

1.7 数据分析

所有试验数据均采用 3 次重复的平均值。采用 Microsoft Excel 和 SPSS 7.0 统计软件对数据进行处理和相关性分析,采用 Duncan 法对数据进行显著性分析(α=0.05),应用 OriginPro 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 秸秆和生物炭添加对玉米—小麦农田土壤温室  
气体排放通量的影响

各处理玉米和小麦土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的变化规律基本一致(见图 1B)。小麦生长期各处理 N<sub>2</sub>O 排放通量的最高值均集中出现在小麦施肥播种后,不同处理之间的值由大到小依次为:N>NBC<sub>high</sub>>NBC<sub>low</sub>>CK>NS,其中最大值和最小值分别为 64.66 μg / (m<sup>2</sup> · h),29.96 μg/(m<sup>2</sup> · h)。在 4 月出现小高峰,

可能是由于施加追肥所致。玉米生长期各处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率的最高值也均集中出现在玉米施肥播种后, 不同处理之间的值由大到小依次为:  $\text{N} > \text{NS} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{CK}$ 。其中最大值和最小值分别为  $67.98 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $16.95 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。与  $\text{N}$  处理相比, 秸秆和生物炭施用降低了农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的最高值。

玉米和小麦整个生长期不同处理  $\text{CO}_2$  排放通量与温度变化基本一致, 也呈先降后升的趋势(图 1C)。受温度的影响, 小麦各处理土壤  $\text{CO}_2$  排放通量均在越冬期出现最低值, 平均温度  $1.75^\circ\text{C}$ , 平均排放通量由大到小依次为:  $\text{CK} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{NS} > \text{N}$ 。其中最高值和最低值分别为:  $46.00 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,  $33.28 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。返青期后温度升高,  $\text{CO}_2$  随之升高, 各个处理在抽穗期排放通量达到最高, 平均温度  $2^\circ\text{C}$ , 平均排放通量由大到小依次为:  $\text{NS} > \text{N} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{CK}$ , 其中最大值和最小值分别为:  $152.7$  和  $108.32 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。玉米各处理土壤  $\text{CO}_2$  排放通量均在收获期出现最低值。平均温度  $20^\circ\text{C}$ , 平均排放通量由大到小依次为:  $\text{NS} > \text{CK} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{N}$ , 最大值和最小值为:  $\text{NBC}_{\text{low}}$ ,  $142.93, 110.60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。除了常规施肥处理, 玉米其余各处理在 8 月出现最高值, 分别为:  $\text{CK}$ ,  $334.80 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\text{NS}$ ,  $398.69 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\text{NBC}_{\text{low}}$ ,  $300.91 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\text{NBC}_{\text{high}}$ ,  $318.44 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。常规施肥处理在施肥播种后为最高值, 为  $279.50 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。秸秆还田增加了  $\text{CO}_2$  排放通量最高值和最低值。

$\text{CH}_4$  排放通量整体较少(图 1D)。小麦生长期不同处理  $\text{CH}_4$  排放通量的均值由大到小依次为:  $\text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{NS} > \text{N} > \text{CK}$ 。其中最大值和最小值分别为:  $13.40, 18.06 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。秸秆还田和生物炭添加增加了  $\text{CH}_4$  平均排放通量。与温度变化一致, 玉米不同处理  $\text{CH}_4$  排放通量最高值分别出现在 8 月和 9 月, 由大到小分别为:  $\text{NBC}_{\text{high}} > \text{NS} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{N} > \text{CK}$ , 秸秆还田和生物炭添加增加了  $\text{CH}_4$  排放通量最高值。其中最大值和最小值分别为  $735.66$  和  $106.16 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。排放通量最低值即吸收速率最高值, 由大到小分别为:  $\text{N} > \text{NBC}_{\text{low}} > \text{NBC}_{\text{high}} > \text{NS} > \text{CK}$ , 其中最小值和最大值分别为  $395.04, 658.95 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.2 秸秆和生物炭添加对农田土壤温室气体的排放总量的影响

与  $\text{CK}$  处理相比, 其他各个处理的农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放总量的差异均显著(表 3)。与  $\text{N}$  处理相比,

$\text{NBC}_{\text{low}}$  和  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的小麦生长期农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量分别降低了  $16.92\%$  和  $29.23\%$ 。与  $\text{N}$  处理相比,  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的玉米生长期农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量降低了  $16.92\%$ 。与  $\text{N}$  处理相比,  $\text{NBC}_{\text{low}}$  和  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的  $\text{N}_2\text{O}$  的年排放总量分别降低了  $12.16\%$  和  $23.53\%$ ,  $\text{NS}$  处理的  $\text{N}_2\text{O}$  年排放总量没有显著差异(表 4)。

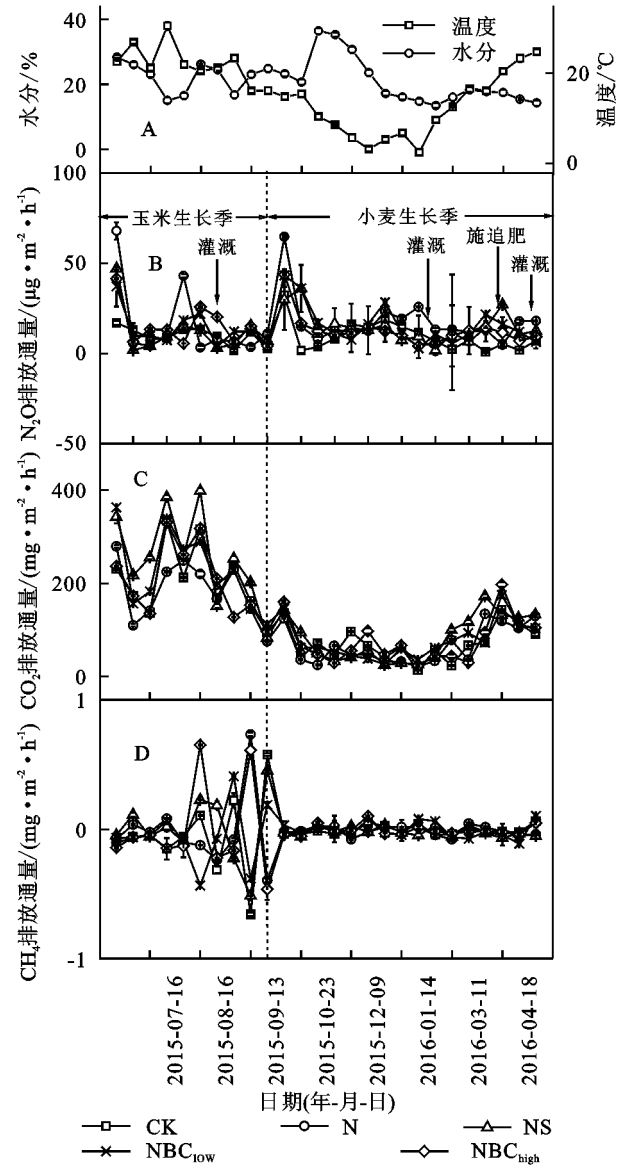


图 1 玉米—小麦生长期不同处理  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放通量与  $\text{CK}$  处理相比, 其他各个处理的农田土壤  $\text{CO}_2$  的排放总量的差异均显著(表 3)。与  $\text{N}$  处理相比,  $\text{NS}$  处理的小麦生长期农田土壤  $\text{CO}_2$  排放总量提高了  $28.69\%$ 。而与  $\text{NS}$  处理相比,  $\text{NBC}_{\text{low}}$  和  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的小麦生长期农田土壤  $\text{CO}_2$  的排放总量分别降低了  $25.32\%$  和  $29.28\%$ 。与  $\text{N}$  处理相比,  $\text{NS}$  处理和  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的玉米生长期农田土壤  $\text{CO}_2$  排放总量分别提高了  $61.07\%$ , 降低了  $0.99\%$ 。而与  $\text{NS}$  处理相比,  $\text{NBC}_{\text{low}}$  和  $\text{NBC}_{\text{high}}$  处理的玉米生长期农田土壤

CO<sub>2</sub> 的排放总量分别降低了 39.67%和 44.74%。与 N 处理相比,NS 处理的 CO<sub>2</sub> 年排放总量增加了 44.07%,NBC<sub>high</sub>处理的 CO<sub>2</sub> 年排放总量降低了 9.94%,且差异均显著。NBC<sub>low</sub>处理的 CO<sub>2</sub>年排放总量与 N 处理相比无显著差异(表 4)。

不同处理之间农田土壤 CH<sub>4</sub> 的排放总量均为负,故为 CH<sub>4</sub> 的汇,且普遍较少(表 3)。与 N 处理相

比,NS 处理的小麦生长期 CH<sub>4</sub> 的排放总量提高了 38.03%,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理分别提高了 77.47%和 66.20%。与 N 处理相比,NS 处理的玉米生长期 CH<sub>4</sub> 排放总量提高了 47.58%,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理分别提高了 75.00%和 82.14%。与 N 处理相比,NS,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的 CH<sub>4</sub>a 排放总量分别显著提高了 42.32%,76.38%和 73.23%(表 4)。

表 3 玉米和小麦生长期不同处理温室气体排放总量

处理	玉米生长期温室气体排放总量			小麦生长期温室气体排放总量		
	N <sub>2</sub> O/(kg·hm <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> /(t·hm <sup>2</sup> )	CH <sub>4</sub> /(kg·hm <sup>2</sup> )	N <sub>2</sub> O/(kg·hm <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> /(t·hm <sup>2</sup> )	CH <sub>4</sub> /(kg·hm <sup>2</sup> )
CK	0.23±0.01d	4.00±0.07b	-0.23±1.31b	0.34±0.02d	4.74±0.04b	-0.29±0.23b
N	0.54±0.04ab	3.67±0.06c	-0.56±0.38d	0.65±0.11a	4.06±0.11c	-0.71±0.51e
NS	0.47±0.01a	5.92±0.73a	-0.29±0.12c	0.66±0.03a	5.23±0.44a	-0.44±0.22d
NBC <sub>low</sub>	0.50±0.05a	3.57±0.68c	-0.14±0.15a	0.54±0.05b	3.90±0.11c	-0.16±0.33a
NBC <sub>high</sub>	0.45±0.01c	3.27±0.36d	-0.10±0.10a	0.46±0.10c	3.69±0.04cd	-0.24±0.76b

注:不同小写字母表示处理间有显著差异( $p<0.05$ ),下同。

2.3 秸秆和生物炭添加对玉米和小麦产量的影响

与 CK 处理相比,其他各个处理玉米和小麦产量的差异均显著(图 2)。与 N 处理相比,NS,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的小麦产量分别提高了 14.06%~25.4%,其中 NBC<sub>low</sub>处理的小麦产量最高,比 N 处理提高了 25.4%。NBC<sub>high</sub>处理比 NBC<sub>low</sub>处理产量降低了 9.05%。与 N 处理相比,NS 和 NBC<sub>low</sub>处理玉米产量分别提高了 5.40%和 15.50%。NBC<sub>high</sub>处理的产量差异不显著。NBC<sub>high</sub>处理比 NBC<sub>low</sub>处理产量降低了 12.32%。与 N 处理相比,NS,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的年产量分别提高了 7.56%~20.37%,其中 NBC<sub>low</sub>处理的年产量最高,比 N 处理提高了 20.37%。NBC<sub>high</sub>处理比 NBC<sub>low</sub>处理年产量降低了 10.64%。

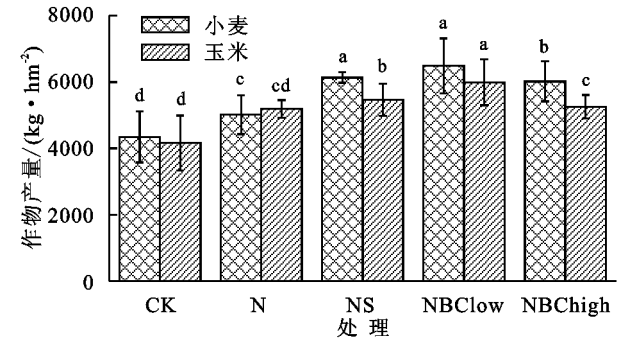


图 2 不同处理的作物产量

2.4 土壤有机碳固定和净增温潜势

玉米—小麦轮作周期后,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的 0~20 cm 有机碳含量与 CK 处理的差异显著(图 3)。与 CK 处理相比,N,NS,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理有机碳含量分别增加了 3.23%~69.25%。与 N 处理相比,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理有机碳含量分别增加

了 36.5%和 63.96%,NS 处理与 N 处理的差异不显著。各个处理有机碳封存率(SOCSR)为 1.24~5.66 t/hm<sup>2</sup>(表 4)。与 CK 处理相比,NS,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的有机碳封存率的差异均显著。与 N 处理相比,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的有机碳封存率分别提高了 9.6,13.17 t/hm<sup>2</sup>,NS 处理与 N 处理的差异不显著。

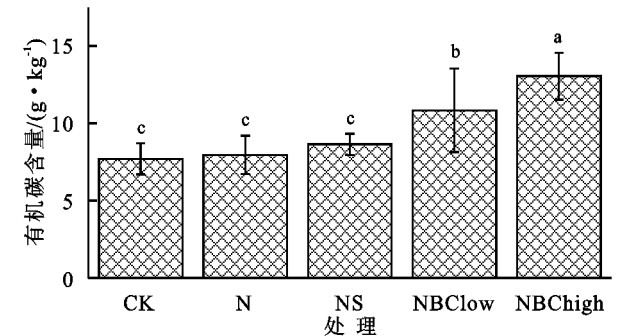


图 3 不同处理土壤(0~20 cm)有机碳含量的变化

净增温潜势用来表示不包括 CO<sub>2</sub> 的增温效应,由于 CO<sub>2</sub> 排放来自秸秆分解及土壤呼吸,包含在土壤有机碳变化量中,农田土壤不视为温室气体排放源,故本研究用净增温潜势(NGWP)来评价不同有机物料添加对全球变暖的相对影响<sup>[19]</sup>(表 4)。其值均为负表示玉米—小麦轮作农田土壤固碳是温室气体排放的汇。与 CK 处理相比,其余各个处理的净增温潜势均有显著差异。与 N 处理相比,NBC<sub>low</sub>和 NBC<sub>high</sub>处理的净增温潜势分别降低了 33.59,48.33 t/hm<sup>2</sup>,NS 处理与 N 处理的差异不显著。单位产量的净增温潜势分别降低了 2.53,4.21 t/t,NS 处理与 N 处理的差异不显著。

表 4 年温室气体排放总量和净增温潜势

处理	CH <sub>4</sub> / (kg · hm <sup>-2</sup> )	N <sub>2</sub> O / (kg · hm <sup>-2</sup> )	CO <sub>2</sub> / (t · hm <sup>-2</sup> )	SOCSR / (t · hm <sup>-2</sup> )	NGWP / (t · hm <sup>-2</sup> )	NGHGI / (t · t <sup>-1</sup> )
CK	-0.53±1.55b	0.57±0.04d	8.75±0.12b	1.24±0.82d	-4.38±0.56a	-0.52±0.02a
N	-1.27±0.91d	1.19±0.06a	7.74±0.17c	2.49±0.60cd	-8.82±3.27b	-0.96±0.34b
NS	-0.74±0.35c	1.13±0.02ab	11.15±1.19a	4.57±1.88c	-16.45±8.64bc	-1.41±0.22b
NBClow	-0.30±0.50a	1.04±0.07b	7.48±0.80c	11.65±2.31b	-42.41±17.19c	-3.40±1.35c
NBChigh	-0.34±0.86a	0.91±0.02c	6.97±0.71d	15.66±2.34a	-57.14±17.45d	-5.07±1.16d

3 讨论

3.1 秸秆和生物炭添加对温室气体排放的影响

本研究结果表明, 秸秆还田增加了土壤 N<sub>2</sub>O 排放量, 生物炭添加降低了土壤 N<sub>2</sub>O 排放量。裴淑玮等的研究表明, 添加秸秆可以增加土壤的 N<sub>2</sub>O 排放总量<sup>[20]</sup>, 但是本研究表明, 与常规施肥处理相比, 小麦生长期添加 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆土壤的 N<sub>2</sub>O 排放总量降低了 3.85%, 添加 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆土壤 N<sub>2</sub>O 年排放总量没有显著降低。这与众多学者的研究<sup>[21-23]</sup> 结果一致。这可能和土壤性质, 秸秆 C/N, 当地气候有关<sup>[24]</sup>。其中裴淑玮等的研究中还田的秸秆含氮量为 0.48%, 本研究中所使用的秸秆含氮量为 0.76%, 秸秆 C/N 不同, 故添加秸秆对农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量的影响不同。N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度呈正相关关系, 和土壤含水量呈负相关关系, 但相关性不显著(表 5)。有研究表明 N<sub>2</sub>O 排放主要与施肥活动有关<sup>[25-27]</sup>。由于土壤温度和土壤含水量的不同, 故添加秸秆对农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量的影响不同。Xiang 等研究表明添加生物炭略微减少了土壤中 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[28]</sup>。本研究中, 与常规施肥处理相比, 添加 4 t/hm<sup>2</sup>, 8 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭处理的土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量均显著降低, 且添加 8 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭的土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量显著低于其他处理。可能由于生物炭对土壤中硝化菌和反硝化菌的活性产生影响, 使其失活或钝化<sup>[29]</sup>; 其次生物炭吸附土壤中的营养元素或有机物质, 将其包被于生物炭的孔隙内, 从而抑制其分解<sup>[30]</sup>, 综合起来影响了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放。

本试验研究表明, 秸秆还田可以增加土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量, 添加 8 t/hm<sup>2</sup> 生物炭显著降低土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量。还田的秸秆和添加的生物炭可以为土壤微生物提供碳源和氮源, 进而影响农田土壤温室气体的排放<sup>[31]</sup>。与常规施肥处理相比, 添加 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆处理, 小麦和玉米生长期 CO<sub>2</sub> 的排放总量均增加了。秸秆还田之后, 土壤可溶性有机碳含量以及微生物量增加, 故而土壤 CO<sub>2</sub> 排放量增加<sup>[32]</sup>。有研究表

明, 添加生物炭没有显著影响农田土壤 CO<sub>2</sub> 的排放总量<sup>[33]</sup>。我们的研究结果表明, 添加 8 t/hm<sup>2</sup> 生物炭的 CO<sub>2</sub> 排放总量降低了 9.94%, 且差异显著。也有研究<sup>[34-37]</sup> 表明, 生物炭添加抑制了旱地土 CO<sub>2</sub> 排放。可能与当地的气候条件以及土壤的黏粒含量有关<sup>[33]</sup>。生物炭把大气中的 CO<sub>2</sub> 固定到土壤有机碳库<sup>[38]</sup>, 有机碳封存率增加, CO<sub>2</sub> 排放量就降低(表 5)。且生物炭中高度芳香族物质含量较高, 生物炭比土壤有机碳中非生物炭分降解速度慢<sup>[39]</sup>。CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度呈显著正相关关系, 与土壤含水量呈负相关(表 5)。这与董玉红等<sup>[27]</sup> 的研究结果一致。温度升高可以提高有机质分解速率, 故促进 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[40]</sup>。生物炭添加增加了农田土壤持水性, 故会降低 CO<sub>2</sub> 排放量(表 5)。与施用 4 t/hm<sup>2</sup> 秸秆相比, 施用 4 t/hm<sup>2</sup>, 8 t/hm<sup>2</sup> 生物炭, 小麦生长期土壤 CO<sub>2</sub> 的排放总量分别降低了 25.32% 和 29.28%。玉米生长期土壤 CO<sub>2</sub> 的排放总量分别降低了 39.67% 和 44.74%。因为秸秆经过热解之后转化为更为稳定的生物炭, 不利于微生物的分解利用<sup>[39]</sup>。

旱地土普遍是 CH<sub>4</sub> 的汇<sup>[19]</sup>。本研究结果表明, 秸秆还田和添加生物炭有利于增加 CH<sub>4</sub> 排放量。众多研究表明秸秆还田会促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[41-43]</sup>。这与本研究结果相似。有机碳封存率增加, CH<sub>4</sub> 排放量增加(表 5)。主要原因是秸秆还田为产甲烷菌活动提供了丰富的碳源, 使产甲烷菌生长活动有了充足的基质, 同时, 土壤微生物的活动又使土壤中的氧被快速消耗, 加速土壤氧化还原电位下降, 为产甲烷菌活动创造了适宜的环境条件<sup>[41]</sup>, 就会增加土壤 CH<sub>4</sub> 排放。CH<sub>4</sub> 排放通量与土壤温度和土壤含水量均呈正相关关系(表 5), 这主要由于温度升高可以促进有机质的分解速率和产甲烷菌菌群的活性, 土壤含水量增加使土壤透气性降低, 甲烷菌活性增强<sup>[40]</sup>。从而有利于 CH<sub>4</sub> 的排放, 秸秆还田增加了农田土壤温度和持水量, 则 CH<sub>4</sub> 排放量增加。众多研究发现<sup>[44-45]</sup>, 生物炭添加会增加旱地土 CH<sub>4</sub> 排放。这与本研究结果一致。可能是由于添加生物炭后, 生物炭本身含有的可溶性

有机碳可被微生物分解,为  $\text{CH}_4$  的产生提供了底物,从而有利于增加  $\text{CH}_4$  排放,降低了  $\text{CH}_4$  吸收<sup>[45-46]</sup>。且有机碳封存率增加, $\text{CH}_4$  排放量增加(表 5)。

表 5 各影响因子与土壤  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放通量的相关性

影响因子	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$
土壤温度	0.024	0.055	0.710**
土壤含水量	-0.011	0.023	-0.012
有机碳封存率	0.119	0.572*	-0.540*

注: \*\* 表示  $p < 0.01$  显著相关; \* 表示  $p < 0.05$  显著相关。

### 3.2 秸秆和生物炭的添加与玉米和小麦产量的关系

本研究结果表明,添加秸秆还田和添加生物炭可以提高玉米和小麦总产量。这与游东海等<sup>[47]</sup>的研究结果一致。可能由于秸秆还田可以提高土壤持水性,提高玉米和小麦的水分利用效率<sup>[47]</sup>。也有研究表明,施用秸秆对小麦—水稻轮作系统的产量没有显著影响<sup>[48]</sup>。这可能与土壤性质,作物种类和秸秆还田类型有关<sup>[49]</sup>。生物炭施用促进了作物根系生长,增多土壤孔隙度,增加根系与土壤的接触面积<sup>[50-51]</sup>。添加  $8 \text{ t/hm}^2$  生物炭玉米和小麦的产量显著低于添加  $4 \text{ t/hm}^2$  生物炭处理,这与许多学者<sup>[52-53]</sup>的研究结果相似。因为施炭量过高会降低土壤中氮肥的有效性,从而导致作物产量降低<sup>[54]</sup>。因此,合理的秸秆还田量和生物炭施加量对于作物稳产、高产极为重要。对于关中玉米—小麦轮作农田,为保证作物更高的产量,生物炭施加量为  $4 \text{ t/hm}^2$  是合适的。

### 3.3 秸秆和生物炭添加对净增温潜势的影响

本研究用不包括  $\text{CO}_2$  的增温效应的净增温潜势来综合评价作物秸秆和生物炭添加的差异。结果表明,添加秸秆使得土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放总量显著增加, $\text{N}_2\text{O}$  排放总量减少,而有机碳含量没有显著影响。添加生物炭显著增加了土壤  $\text{CH}_4$  排放总量,降低了  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放总量,增加了土壤有机碳含量。这与柯跃进等<sup>[38]</sup>的研究结果一致。与常规施肥处理相比,添加  $4 \text{ t/hm}^2$  秸秆处理的净增温潜势降低了  $7.63 \text{ t/hm}^2$ ,单位产量的净增温潜势降低了  $0.55 \text{ t/t}$ 。这与裴淑玮等<sup>[17]</sup>的研究结果不一致。本研究中由于秸秆还田减少了  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量,对有机碳含量没有显著影响,且增加了作物产量,故降低了净增温潜势。添加  $4 \text{ t/hm}^2$ ,  $8 \text{ t/hm}^2$  生物炭处理的净增温潜势分别降低了  $33.59, 48.33 \text{ t/hm}^2$ ,单位产量的净增温潜势分别降低了  $2.53, 4.21 \text{ t/t}$ 。这与众多研究<sup>[35,55]</sup>结果一致。由于生物炭添加降低了  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放总量,且增加了土壤有机碳含量和作物产量<sup>[56]</sup>。

## 4 结论

(1) 秸秆还田增加了  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  排放总量,对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量没有显著影响。添加生物炭降低了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  年排放总量,增加了  $\text{CH}_4$  排放总量,添加  $8 \text{ t/hm}^2$  生物炭显著降低了  $\text{CO}_2$  排放总量。

(2) 秸秆还田和添加生物炭均提高了玉米和小麦的产量,且添加  $4 \text{ t/hm}^2$  生物炭的产量显著高于添加  $8 \text{ t/hm}^2$  生物炭处理的产量。

(3) 与常规施肥处理相比,添加  $4 \text{ t/hm}^2$ ,  $8 \text{ t/hm}^2$  生物炭处理的净增温潜势分别降低了  $33.59, 48.33 \text{ t/hm}^2$ ,单位产量的净增温潜势分别降低了  $2.53, 4.21 \text{ t/t}$ 。秸秆还田处理的净增温潜势和单位产量的净增温潜势与常规施肥处理相比差异均不显著。

### 参考文献:

- [1] Kimball B. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming[M]. Oxford, UK: Global Change Biology, 2010, 11(11): 2041-2056.
- [2] WMO. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2012[J]. WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2013, 9: 1-4.
- [3] Yuan Z, Qian Y K, Jindian Q I, et al. The Potential Impacts of Warmer-Continent-Related Lower-Layer Equatorial Westerly Wind on Tropical Cyclone Initiation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(2): 333-343.
- [4] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Encyclopedia of Language & Linguistics, 2007, 12(1): 171-175.
- [5] Ginting D, Kessavalou A, Eghball B, et al. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(1): 23-32.
- [6] 李成芳,寇志奎,张枝盛,等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2362-2367.
- [7] 宋鹏飞,毛培,李鸿萍,等. 秸秆还田对夏玉米主要害虫发生程度的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(3): 334-338, 347.
- [8] 杨丽娟,魏锋,李江伟,等. 秸秆还田对小麦病害的影响及防治[J]. 种业导刊, 2013(7): 24-25.
- [9] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. The Science of Nature, 2001, 88(1): 37-41.
- [10] 张燕辉,夏人杰. 生物炭还田对固碳减排、 $\text{N}_2\text{O}$  排放及

- 作物产量的影响研究进展[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(10): 86-88.
- [11] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2765-2770.
- [12] 丁洪, 王跃思, 王德禄. 东北黑土中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的排放量[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 720-723.
- [13] Verhoeven E, Six J. Biochar does not mitigate field-scale  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in a Northern California vineyard: An assessment across two years[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 191(15): 27-38.
- [14] Huang M, Yang L, Qin H, et al. Quantifying the effect of biochar amendment on soil quality and crop productivity in Chinese rice paddies[J]. *Field Crops Research*, 2014, 154(3): 172-177.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Xiong Z, Liu Y, Zhen W, et al. Differences in net global warming potential and greenhouse gas intensity between major rice-based cropping systems in China [J]. *Sci. Rep.*, 2015, 5: 17774.
- [17] 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 Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. *Computational Geometry*, 2013, 18(2): 95-123.
- [18] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1584-1598.
- [19] 成功, 陈静, 刘晶晶, 等. 秸秆/生物炭施用对关中地区小麦—玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 792-801.
- [20] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 407-414.
- [21] 牛东, 潘慧, 丛美娟, 等. 氮肥运筹和秸秆还田对麦季土壤温室气体排放的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(12): 1667-1673.
- [22] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(3): 170-175.
- [23] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 552-556.
- [24] 李静, 冯淑怡, 陈利根, 等. 秸秆还田对稻田温室气体排放的影响: Meta 分析: 以长江中下游地区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 91-100.
- [25] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 玉米秸秆不同还田方式下麦田温室气体排放特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 176-181.
- [26] Zou J, Huang Y, Lu Y, et al. Direct emission factor for  $\text{N}_2\text{O}$  from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(26): 4755-4765.
- [27] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913-918.
- [28] Xiang J, Liu D, Ding W, et al. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 52-58.
- [29] 颜永毫, 王丹丹, 郑纪勇. 生物炭对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(8): 140-146.
- [30] Lu W, Ding W, Zhang J, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 76(1): 12-21.
- [31] Zhang A, Cui L, Pan G, 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 & Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [32] Xia L, Wang S, Yan X. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 118-127.
- [33] Liu S, Zhang Y, Zong Y, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 8(2): 392-406.
- [34] 高雪. 城镇有机垃圾热解生物炭改良土壤与减排温室气体研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2014.
- [35] 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 & Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [36] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased  $\text{CH}_4$  uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 309-313.
- [37] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [38] 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  $\text{CO}_2$  释放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 93-99.
- [39] Liu Q, Liu B, Ambus P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment: a case study in a Chinese rice cropping system. [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2016, 8(1): 148-159.
- [40] Elisabeth J. The effects of land use, temperature and water level fluctuations on the emission of nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) carbon dioxide [D]. Reykjavik: University of Ice-Land, 2008.
- [41] 王海候, 沈明星, 陆长婴, 等. 不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 758-763.
- [42] 张岳芳, 陈留根, 朱普平, 等. 秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1647-1653.
- [43] Malghani S, Gleixner G, Trumbore S E. Chars produced by slow pyrolysis and hydrothermal carbonization vary in carbon sequestration potential and greenhouse gases emissions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 62(5): 137-146.
- [44] Zhang A F, Bian R, Hussain Q, et al. Change in net global warming potential of a rice-wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 173(8): 37-45.
- [45] 章明奎, Walelign, Bayou, 等. 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): 127-131.
- [46] Knoblauch C, Maarifat A A, Pfeiffer E M, et al. Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(9): 1768-1778.
- [47] 游东海, 田霄鸿, 把余玲, 等. 小麦—玉米轮作体系中秸秆还田方式对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 167-172.
- [48] Xia L, Wang S, Yan X. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 118-127.
- [49] Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2015, 8(3): 512-523.
- [50] Cornelissen G, Kukulska Z, Kalaitzidis S, et al. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [51] 程效义, 孟军, 黄玉威, 等. 生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2): 218-223.
- [52] 张娜, 李佳, 刘学欢, 等. 生物炭对夏玉米生长和产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1569-1574.
- [53] 唐春双, 杨克军, 李佐同, 等. 生物炭对玉米茎秆性状及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 93-97.
- [54] 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.
- [55] 刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 205-212.
- [56] 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 111-118.

(上接第169页)

- [32] 姜逢清, 胡汝驥, 李珍. 青藏铁路沿线 1966—2004 年冻结与融化指数的变化趋势[J]. 地理学报, 2007, 62(9): 935-945.
- [33] Ropelewski C F, Janowiak J E, Halpert M S. The analysis and display of real time surface climate data [J]. Monthly Weather Review, 1985, 113(6): 1101-1106.
- [34] 程炳岩, 谢晓丽, 朱业玉, 等. 降水概率模型在旱涝监测评价中的应用研究[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 20-25.
- [35] 杨方. 基于农业灾情的农业旱灾等级划分研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [36] 刘瑞娟, 张万昌, 裴洪芹. 淮河流域土壤侵蚀与影响因素关系分析[J]. 中国水土保持, 2010, 2010(5): 29-32.
- [37] 胡续礼, 姜小三, 潘剑君, 等. GIS 支持下淮河流域土壤侵蚀的综合评价[J]. 土壤, 2007, 39(3): 404-407.
- [38] 杨太明, 许莹, 孙喜波, 等. 安徽省夏玉米干旱天气指数保险产品的设计及应用[J]. 气象, 2016, 42(4): 450-455.
- [39] 高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及旱涝时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101-109.