

不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 日排放特性

宋 敏<sup>1,2,3,4</sup>, 齐 鹏<sup>1,2,3</sup>, 蔡立群<sup>1,2,3</sup>, 张仁陟<sup>1,2,3</sup>, Stephen Yeboah<sup>1,2,3,5</sup>,  
武 均<sup>1,2,3</sup>, 王旭燕<sup>1,2,3</sup>, 潘占东<sup>1,2,3</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;  
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 广东医科大学, 广东 东莞 523808;  
5. CSIR – Crops Research Institute, Kumasi, 999064, Ghana)

**摘 要:** 在陇中黄土高原干旱半干旱区, 采用小区定位试验与室内盆栽模拟试验相结合的方法, 对不同生物质炭输入水平下旱作黄绵土 N<sub>2</sub>O 的日排放通量及其影响因子进行连续观测, 并确定 1 天中不同生物质炭处理水平下的最佳观测时间。结果表明: 6 个生物质炭输入水平处理下(0、10、20、30、40、50 t·hm<sup>-2</sup>), 旱作黄绵土全天表现为 N<sub>2</sub>O 的排放源; 无生物质炭添加处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量均显著高于其他各处理, 随输入水平增加呈 U 型变化规律, 当生物质炭输入水平为 30 t·hm<sup>-2</sup> 时, 更有利于 N<sub>2</sub>O 气体的增汇减排; 各处理 N<sub>2</sub>O 日总排放通量均在白天所占比例最高; 温度是环境因子相对稳定条件下 N<sub>2</sub>O 气体排放的主要影响因子, N<sub>2</sub>O 的排放与地表温度及 10 cm 土层地温呈不同程度的正相关关系; 10 cm 土层地温与生物质炭输入量呈显著正相关关系; N<sub>2</sub>O 气体的最佳同期观测时间为 8:00—9:00。

**关键词:** 黄绵土; 生物质炭; N<sub>2</sub>O 排放  
**中图分类号:** X171.3      **文献标志码:** A

Diurnal variations of N<sub>2</sub>O gases emission in loessial soil under biochar application

SONG Min<sup>1,2,3,4</sup>, QI Peng<sup>1,2,3</sup>, CAI Li-qun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ren-zhi<sup>1,2,3</sup>, Stephen Yeboah<sup>1,2,3,5</sup>,  
WU Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Xu-yan<sup>1,2,3</sup>, PAN Zhan-dong<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University Lanzhou, Gansu 730070, China;  
2. Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science Lanzhou, Gansu 730070, China;  
3. Gansu Province Research Center of Water-saving Agricultural Engineering Technology Lanzhou, Gansu 730070, China;  
4. Guangdong Medical University, Dongguan, Guangdong 523808, China;  
5. CSIR – Crops Research Institute, Kumasi, 999064, Ghana)

**Abstract:** Biochar is a carbon-rich solid product by heating of biomass in an oxygen-limited environment. Biochar application is supposed to have the potential for greenhouse gas mitigation. The aim of this study was to determine the effects of biochar on nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions. The treatments consisted of six different biochar levels, including TT (0 t·hm<sup>-2</sup>), BT1 (10 t·hm<sup>-2</sup>), BT2 (20 t·hm<sup>-2</sup>), BT3 (30 t·hm<sup>-2</sup>), BT4 (40 t·hm<sup>-2</sup>), and BT5 (50 t·hm<sup>-2</sup>), with a randomized complete block design with three replications. Soil moisture and temperature were measured as well as N<sub>2</sub>O. The results showed that the N<sub>2</sub>O fluxes had significant difference in diurnal variations among biochar treatments. The loessial soil is a source of N<sub>2</sub>O emission, and similarly the the loessial soil of the other biochar treatments. The N<sub>2</sub>O flux emission of soil without biochar input was significantly higher than other treatments. With the increase in the application rate, the accumulate flux emission of N<sub>2</sub>O showed a “U” type change pattern, and the rate of 30 t·hm<sup>-2</sup> showed the better depression effect on N<sub>2</sub>O gas emission. The total daily emission fluxes of N<sub>2</sub>O in each treatment were the highest in the daytime. The combination of water and heat caused by the biochar might be the main cause of the different of the whole day N<sub>2</sub>O gas emission. Temperature is the main influence factor of N<sub>2</sub>O gas emission under the condition of relatively stable environment. The soil temperature in 10 cm depth increased with increasing the application rate of biochar. The optimal observation duration of the N<sub>2</sub>O gas is 8 a.m. to 9 a.m.

**Keywords:** loessial soil; biochar; N<sub>2</sub>O emission

收稿日期: 2016-04-20  
基金项目: 甘肃省自然科学基金(No. 145RJZA204); 省部共建国家重点实验室培育基地开放基金课题(GSCS-2012-13)  
作者简介: 宋 敏(1987—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学、生态环境效应。E-mail: 153405328@qq.com。  
通信作者: 蔡立群, 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为农业生态学。E-mail: cailq@gsau.edu.cn。

$\text{N}_2\text{O}$  作为导致全球变暖的主要温室气体之一, 不仅对温室气体总排放的贡献率达 20%<sup>[1]</sup>, 而且  $\text{N}_2\text{O}$  可与平流层中的臭氧反应生成  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_2$ , 是臭氧层破坏的重要元凶, 也是许多光化学反应过程的重要参与者<sup>[2]</sup>, 减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放已成为国际社会共同关注的问题。农业活动产生的  $\text{N}_2\text{O}$  占大气中  $\text{N}_2\text{O}$  的 70%<sup>[3-4]</sup>, 农田土壤作为  $\text{N}_2\text{O}$  的重要排放源<sup>[5]</sup>, 改良农田土壤性质, 提高农田固氮减排能力, 减少农业源  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 对于缓解全球气候变化、遏制环境恶化具有重要的意义。

生物质炭是在厌氧或无氧条件下, 经高温热解 (350℃ ~ 600℃) 产生的一种多孔富碳、高度芳香化难溶性的固态物质, 具有稳定性强、比表面积大、吸附能力强的特点<sup>[6]</sup>, 生物质炭作为一种土壤改良剂输入土壤后, 一方面可改善土壤结构, 增加土壤碳库贮量, 提高土壤肥力<sup>[7]</sup>, 另一方面可通过其高孔隙度吸附氮素物质, 或其本身的降解过程及其对土壤理化性质的改变直接或间接地影响氮素循环中固氮菌、硝化菌、反硝化菌的活性及多样性, 继而对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放产生影响<sup>[8]</sup>。在河南商丘玉米地的试验发现, 生物质炭的添加降低了 10.7% ~ 41.8% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量<sup>[9]</sup>。Spokas 等<sup>[10]</sup> 也发现不同生物质炭输入量均能在一定程度上抑制土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 但生物质炭输入量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的线性关系不明显。而郭艳亮等<sup>[11]</sup> 在半干旱地区的研究则表明, 生物炭在短期内对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放没有显著影响。可见, 生物质炭对农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的作用机制尚不清楚<sup>[12]</sup>, 且主要侧重于季节排放特征的研究, 生物质炭输入情况下的日变化动态研究鲜见报道。

本文采用田间小区定位试验与盆栽实验相结合的方法, 通过田间与盆栽模拟观测结果的对比分析, 研究不同生物质炭输入水平下, 陇中黄土高原旱作黄绵土  $\text{N}_2\text{O}$  气体全天连续排放特征及温度对  $\text{N}_2\text{O}$  气体通量的影响, 在时间尺度上探讨生物质炭输入水平差异可能导致的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  气体通量差异, 以期对生物质炭处理下的旱作农田  $\text{N}_2\text{O}$  温室气体观测确定最佳时间, 科学估计生物质炭对  $\text{N}_2\text{O}$  的减排效益, 为合理应用生物质炭、减少  $\text{N}_2\text{O}$  气体排放、缓解全球气候变暖、遏制环境恶化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及材料

田间实验设在定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学旱农试验站, 该区位于甘肃省中部偏南的陇中

黄土高原半干旱丘陵沟壑区, 为典型的雨养旱作农业区。区内平均海拔 2 000 m 左右, 日照时数 2 300 h, 年平均太阳辐射 594.9  $\text{KJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 年均气温 6.5℃, 无霜期 149 d, 年均降水量 390.99 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 80% 保证率的降水量为 365 mm, 变异系数 24.3%, 干燥度 2.53。土壤为典型的黄绵土, 土质绵软, 土层深厚, 质地均匀, 储水性能良好。土壤 pH 值为 8.36, 土壤平均容重为 1.17  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 凋萎含水率 7.3%, 饱和含水率 21.9%, 有机质含量为 12.01  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮 0.76  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 1.77  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。室内盆栽模拟试验设在甘肃省干旱生境作物学重点实验室温室, 供试土壤于 2015 年 3 月播前取自田间实验地, 以保持土壤理化性状一致, 试验用 PVC 培养盆 (直径 16.7 cm, 高 18 cm), 每盆装土 3.53 kg。

供试春小麦品种为‘定西 35 号’, 生育期 130 d 左右。供试生物质炭为金和福农业科技股份有限公司生产的玉米秸秆生物质炭, 生物炭基本性质: pH 值 9.21, C 含量 532.8  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , N 含量 10.4  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , P 含量 2.6  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Ca 含量 8  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , K 含量 5.1  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 实验设计

田间试验设置 6 个生物质炭水平处理, 3 次重复, 试验小区面积为 16.8  $\text{m}^2$  (2.8 m × 6 m), 各处理分别为 TT (0  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、BT1 (10  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、BT2 (20  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、BT3 (30  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、BT4 (40  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、BT5 (50  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 各小区采用完全随机区设计, 播前耕后按小区图依次均匀撒入土壤后翻埋于耕层土壤 (15 cm 左右)。春小麦播种量为 187.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 行距为 20 cm, 播深 7 cm。各处理施用氮素与磷肥水平一致, 施纯 N 105  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (尿素, 46% N), 纯  $\text{P}_2\text{O}_5$  105  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (过磷酸钙, 含 14% 的  $\text{P}_2\text{O}_5$ )。在播种同时按照试验设计一次性施肥, 不再追肥。2015 年 3 月下旬播种, 7 月底收获。

室内盆栽模拟试验与田间试验保持一致, 设 6 个生物质炭水平处理, 3 次重复, 各处理施用氮素与磷肥水平与田间施用水平一致, 播前将土壤与生物炭和肥料充分混匀后装盆。试验于 2015 年 4 月开始, 7 月中下旬结束, 每盆播小麦 16 粒 (小麦发芽率为 98%, 按 187.5  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  播种)。水分管理: 保持田间持水量的 70% ~ 80%, 用重量法补足水分, 以保证小麦正常生长发育。

### 1.3 气体采集与样品分析

1.3.1 气体样品采集  $\text{N}_2\text{O}$  采用静态暗箱密闭法收集气体样品<sup>[13]</sup>。根据实验地气候特征、春小麦生育期状况以及以往季节性变化研究结果<sup>[14]</sup>, 采样时

间选取水肥、气候等外部环境因素相对稳定的7月中下旬进行。根据气象报告,此次日变化测定日期定为22—23日,本次日变化观测天气状况为多云转晴,占本月份天气状况的70.97%,为本月份代表性天气。采样时间从16:00开始,到次日17:00结束,每隔4h取样1次。根据气象观测记录,气温、风力级别、地下5cm土壤温度、空气湿度、土壤湿度等影响温室气体通量的环境要素大致为7月份的平均水平,可代表本月份总体情况。盆栽试验日变化测定时间定为7月24—25日,采样时间相同,以确保盆栽试验与田间试验数据的可比性与一致性。

田间试验采样箱为圆柱形,包括底座和顶箱,由1mm厚304K薄的不锈钢板制成,顶箱直径38cm,高35cm,底座内径36.5cm,高16cm,上端有密封凹槽,播种后将底座栽入各处理小区中间,整个采样期不移动;箱体外围覆铝箔反光保温膜,顶部留有一个胶塞测温口,用于采样时插入温度计记录箱内温度;箱体内部装有风扇用于混匀气体;箱体一侧安装三通阀采样孔,用于注射器采样。采样时,将顶箱嵌入底座凹槽加水密封,插入温度计并接通风扇电源后立即用注射器分别采集0、10、20min的气体样品,分别注入150ml铝塑复合气袋中带回实验室进行实验室分析。

盆栽试验采样箱与田间采样箱相似,为密闭式PVC箱,由1mm厚PVC管制成,箱高40cm,直径16.5cm,顶端用PVC板密封。顶部留有一个胶塞测温口,用于采样时插入温度计记录箱内温度;箱体内置风扇,用于混匀气体;PVC箱侧壁正中间开孔,装有自动封闭式胶垫采气阀门。采样时,将PVC采样箱扣于PVC盆内与PVC盆内壁及土壤紧贴,确保空气与外界隔离。先打开内置风扇,待箱内空气搅匀,立即用注射器从采气阀门分别采集0、10、20min的气体样品,分别注入150ml铝塑复合气袋中带回实验室进行分析。

**1.3.2 气体样品分析** 气体浓度采用安捷伦7890A型气相色谱仪进行分析。色谱柱:ParkQ 15m×0.53mm×25μm。N<sub>2</sub>O采用后检测器(u)ECD(检测温度300℃,柱温45℃),载气为高纯N<sub>2</sub>,气体排放通量 $F$ 计算公式:

$$F = \frac{C_2 \times V \times M_0 \times 273/T_2 - C_1 \times V \times M_0 \times 273/T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4} \quad (1)$$

式中, $F$ 为气体排放通量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $A$ 为取样箱底面积( $\text{m}^2$ ); $V$ 为采样箱体积( $\text{m}^3$ ); $M_0$ 为气体分子量; $C_1, C_2$ 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前

箱内温室气体的体积浓度( $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ );273为摄氏温度转换为绝对温度; $T_1, T_2$ 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(K), $t_1, t_2$ 为测定开始和结束的时间(h)。

N<sub>2</sub>O气体累积排放量( $M$ )计算公式如下:

$$M = \sum (F_{N+1} + F_N) \times 0.5 \times (t_{N+1} - t_N) \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中, $M$ 为全天气体累积排放量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $F$ 为气体排放速率( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ); $N$ 为采样次数, $t$ 为相邻两次采样的时间间隔(h)。

不同生物质炭输入水平下旱作黄绵土一天中各个时刻温室气体排放通量的矫正系数计算公式如下<sup>[15-16]</sup>:

$$C_i = \frac{F_{avg}}{F_i}$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , $n$ 为一天中进行观测的次数,各次观测之间的时间相等; $C_i$ 为矫正系数; $F_{avg}$ 为温室气体日平均排放通量; $F_i$ 为第 $i$ 次观测的温室气体排放通量。

**1.3.3 同期观测数据** 实验小区各设地温计,采样同时同步观察记录地表及地下10cm处的土壤温度。

## 1.4 数据整理与分析

试验原始数据用Microsoft Office Excel 2010整理后,利用SPSS17.0软件进行显著性和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 通量日变化

由图1可知,不同生物质炭处理水平下田间试验(a)与盆栽实验(b)的N<sub>2</sub>O排放通量均表现出随地表温度变化的明显日变化规律,各处理N<sub>2</sub>O通量变化特征基本一致,呈昼高夜低的变化趋势,且各时段排放通量均保持较高水平。16:00—4:00随温度的降低,各处理N<sub>2</sub>O通量逐渐降低,5:00以后各处理N<sub>2</sub>O排放通量开始上升。在12:00—13:00时段,各处理表现出N<sub>2</sub>O排放峰,达到其一天排放通量的峰值,在4:00—5:00出现排放低谷,其中田间试验排放通量波动范围为0.0523~0.4308  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,盆栽试验排放通量波动范围为0.1219~0.4042  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,说明温度变化对N<sub>2</sub>O排放通量影响较大。

由图2可以看出,旱作黄绵土土壤N<sub>2</sub>O的日累积通量为排放通量,各处理累积排放通量与一元二次方程拟合度较高,累积排放通量随生物质炭输入

水平的提高先减小后增加。田间试验各处理下 N<sub>2</sub>O 全天累积排放通量的大小次序为:TT>BT1>BT5>BT2>BT3>BT4,盆栽实验各处理下 N<sub>2</sub>O 全天累积排放通量的大小次序为:TT>BT5>BT1>BT4>BT2>BT3,且盆栽实验各处理累积排放通量均高于田

间试验各处理累积排放通量。其中,田间与盆栽试验 TT 处理累积排放通量均最大,分别为 0.0577、0.0694 kg·hm<sup>-2</sup>,田间试验 BT4 累积排放通量最小,为 0.0334 kg·hm<sup>-2</sup>,盆栽试验 BT3 累积排放通量最小,为 0.0454 kg·hm<sup>-2</sup>。

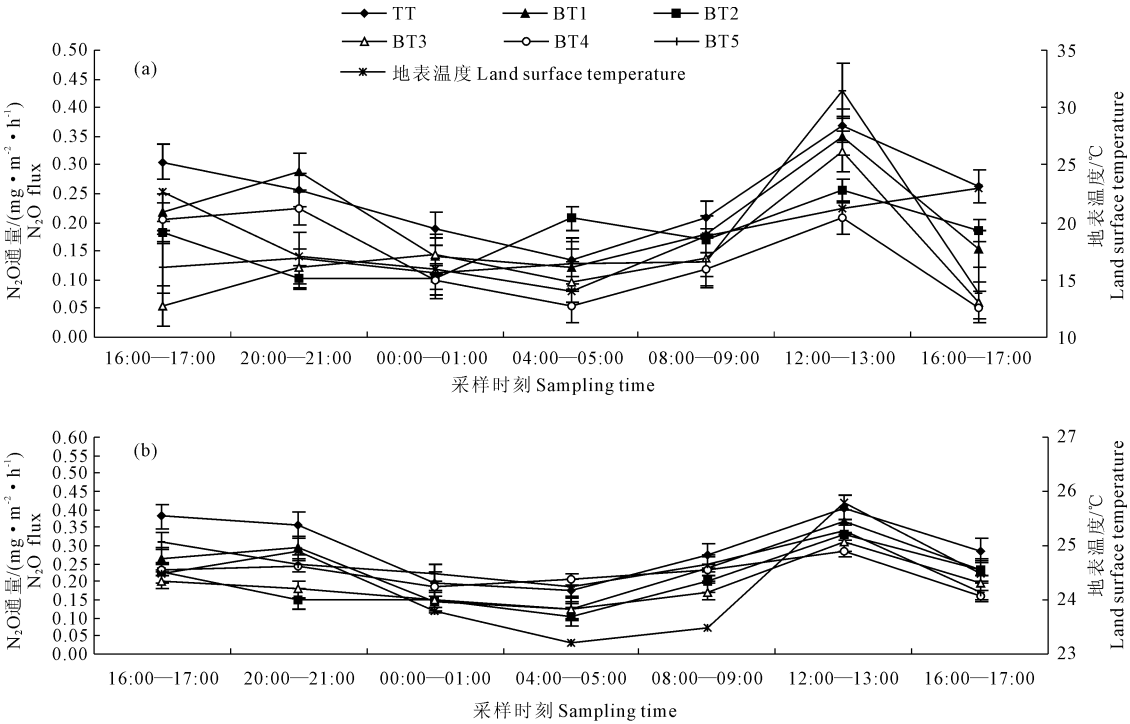
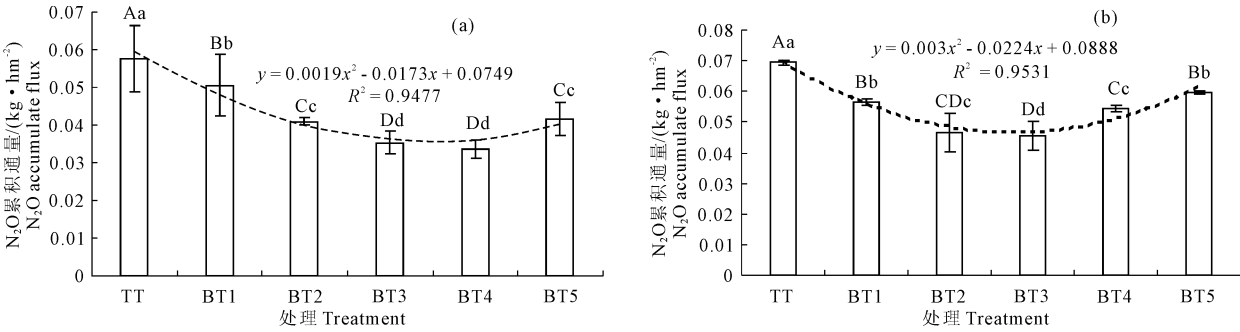


图 1 田间(a)与盆栽(b)试验不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 通量日变化

Fig.1 Diurnal variation of soil N<sub>2</sub>O fluxes in different biochar application rate in loessial soil of field (a) and pot experiment (b)



注:不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著,不同大写字母在 0.01 水平上差异显著,下同。

Note: different lowercase letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  level and uppercase letters  $P < 0.01$  level, the same below.

图 2 田间(a)与盆栽(b)试验不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 日累积总通量

Fig.2 Histogram of N<sub>2</sub>O accumulate flux in different rates of biochar in loessial soil of field (a) and pot experiment (b) in whole day

2.2 不同生物质炭输入水平对黄绵土 N<sub>2</sub>O 的日平均通量的影响

由于全天各时段的气体通量只能反映相应时段的排放或吸收状况,且环境因子变化差异亦有可能引起通量变化出现偏差,本文通过对全天气体平均通量进行核算,对整个全天各处理下的 N<sub>2</sub>O 平均通量进行方差分析和多重比较(表 1),来估算全天内

各处理对 N<sub>2</sub>O 气体影响。

由表 1 可知,6 种处理下,田间与盆栽试验 N<sub>2</sub>O 排放通量表现出明显的规律性变化,TT 处理 N<sub>2</sub>O 平均排放通量均极显著高于其他各处理排放通量,随输入水平增加呈 U 型变化规律。其中,BT3 的 N<sub>2</sub>O 排放通量低于其他各处理,说明在生物质炭输入量小于 30 t·hm<sup>-2</sup>时,N<sub>2</sub>O 排放通量随生物质炭输入量

的增加而减小,当输入量超过 30 t·hm<sup>-2</sup>时,N<sub>2</sub>O 排放通量反而表现出增加趋势,但高水平生物质炭处理之间的排放通量增加幅度较小。张斌<sup>[17]</sup>在旱地土壤温室气体排放的研究结果表明,当生物质炭添加量为 40 t·hm<sup>-2</sup>时,N<sub>2</sub>O 减排效应较好,与本研究结果接近。

表 1 不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 的通量日平均值/(mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)

| Table 1 Means of N <sub>2</sub> O flux of different biochar application in loessial soil |                                                                          |                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 处理<br>Treatment                                                                          | 田间试验 N <sub>2</sub> O 通量<br>N <sub>2</sub> O flux of<br>field experiment | 盆栽试验 N <sub>2</sub> O 通量<br>N <sub>2</sub> O flux of<br>pot experiment |
| TT                                                                                       | 0.2465 ± 0.0089Aa                                                        | 0.2706 ± 0.0009Aa                                                      |
| BT1                                                                                      | 0.2072 ± 0.0083Bb                                                        | 0.2200 ± 0.0009Bb                                                      |
| BT2                                                                                      | 0.1726 ± 0.0011Cc                                                        | 0.1845 ± 0.0061CDc                                                     |
| BT3                                                                                      | 0.1344 ± 0.0029Dd                                                        | 0.1732 ± 0.0046Dd                                                      |
| BT4                                                                                      | 0.1378 ± 0.0024Dd                                                        | 0.1927 ± 0.0010Cc                                                      |
| BT5                                                                                      | 0.1628 ± 0.0043Cc                                                        | 0.2211 ± 0.0007Bb                                                      |

表 2 N<sub>2</sub>O 气体通量与地表温度、10 cm 地温的相关性分析

| Table 2 Correlation analysis between N <sub>2</sub> O fluxes and land surface temperature, soil temperature of 10 cm depth |                  |                               |                            |                                         |                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| N <sub>2</sub> O                                                                                                           | 处理<br>Treatments | 地表温度 Land surface temperature |                            | 10cm 地温 Soil temperature of 10 cm depth |                            |
|                                                                                                                            |                  | 相关方程                          | 相关系数 R                     | 相关方程                                    | 相关系数 R                     |
|                                                                                                                            |                  | Correlation equation          | Coefficient of correlation | Correlation equation                    | Coefficient of correlation |
| 田间<br>Field                                                                                                                | TT               | $y = 0.0174x - 0.0825$        | 0.780 *                    | $y = 0.0481x - 0.6469$                  | 0.972 **                   |
|                                                                                                                            | BT1              | $y = 0.0082x + 0.0515$        | 0.342                      | $y = 0.0005x + 0.1984$                  | 0.012                      |
|                                                                                                                            | BT2              | $y = 0.0062x + 0.056$         | 0.393                      | $y = 0.0114x - 0.0347$                  | 0.515                      |
|                                                                                                                            | BT3              | $y = 5E - 05x + 0.1334$       | 0.002                      | $y = 0.0076x - 0.0104$                  | 0.223                      |
|                                                                                                                            | BT4              | $y = 0.0058x + 0.0289$        | 0.269                      | $y = 0.0107x - 0.0689$                  | 0.331                      |
|                                                                                                                            | BT5              | $y = 0.0065x + 0.0394$        | 0.189                      | $y = 0.0007x + 0.1493$                  | 0.012                      |
| 盆栽<br>Pot                                                                                                                  | TT               | $y = 0.0874x - 1.8285$        | 0.869 *                    | $y = 0.0942x - 1.797$                   | 0.784 *                    |
|                                                                                                                            | BT1              | $y = 0.0851x - 1.8305$        | 0.904 **                   | $y = 0.0977x - 1.9475$                  | 0.796 *                    |
|                                                                                                                            | BT2              | $y = 0.0651x - 1.3842$        | 0.779 *                    | $y = 0.0861x - 1.7278$                  | 0.771 *                    |
|                                                                                                                            | BT3              | $y = 0.0598x - 1.2623$        | 0.898 *                    | $y = 0.0692x - 1.3834$                  | 0.857 *                    |
|                                                                                                                            | BT4              | $y = 0.0269x - 0.4318$        | 0.581                      | $y = 0.0332x - 0.5449$                  | 0.557                      |
|                                                                                                                            | BT5              | $y = 0.0455x - 0.8584$        | 0.657                      | $y = 0.0499x - 0.8999$                  | 0.598                      |

注: \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: \* correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). \*\* correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

2.4 不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 排放通量的最佳观测时间及回归分析

由图 1 可见,温室气体的排放通量存在较大的时间变异性,具有明显的日变化特征。由图 3 可以看出 N<sub>2</sub>O 排放通量的矫正系数随时间的变化,矫正系数是指各时段温室气体的平均排放通量与某时段温室气体排放通量的比值,即某一时段排放通量矫正系数越接近于 1,该时段的排放通量就越接近于

2.3 不同生物质炭输入水平下黄绵土 N<sub>2</sub>O 通量日变化与地表温度、10 cm 地温的关系

由表 2 可知,田间试验 TT 处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量与地表温度及 10 cm 的地温呈显著正相关关系,其余处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与地表温度及 10 cm 的地温均呈不显著正相关;盆栽实验 TT、BT1、BT2、BT3 的 N<sub>2</sub>O 排放通量与地表温度及 10 cm 的地温均表现出显著正相关关系,其余处理呈正相关但不显著,说明 N<sub>2</sub>O 日排放通量随地表温度及 10 cm 地温的升高而升高,生物质炭的输入对土壤温度具有一定的维持作用,降低温度的变化幅度。为进一步确定生物质炭输入水平对 10 cm 土层地温的影响,通过生物质炭输入量与各时段不同处理 10 cm 土层的平均温度进行回归分析可知,生物质炭输入水平与 10 cm 土层土壤温度呈显著正相关关系( $R > 0.8, P < 0.05$ ),说明 10 cm 土层地温随生物质炭输入水平的提高而升高。但当生物质炭输入量超过一定水平时,由此导致的土壤理化性质及水热组合对 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响效应超过温度因子的效应。

日平均排放通量。由图 3 可得,田间(a)与盆栽(b)试验的 N<sub>2</sub>O 排放通量矫正系数,均在 8:00—9:00 时较为接近于 1,说明 8:00—9:00 是三种温室气体同期观测的最佳时间,可以作为后续研究中的代表性观测时间,以科学估计温室气体排放在相应季节的排放通量。

同时,通过对最佳时段的平均排放通量与日排放总量进行回归分析(图 4),对最佳时段的代表性

做进一步验证,结果表明,田间(a)与盆栽(b)试验的  $N_2O$  在这一时间段的平均排放量与日排放总量的相关系数分别达到 0.993 ( $P < 0.01$ ), 0.936 ( $P < 0.01$ ),均达到极显著水平,说明不同处理水平下,各

气体这一时间段的排放量均具有很强的代表性,可作为生物质炭处理条件下旱作农田春小麦田温室气体研究的最佳取样时间段。

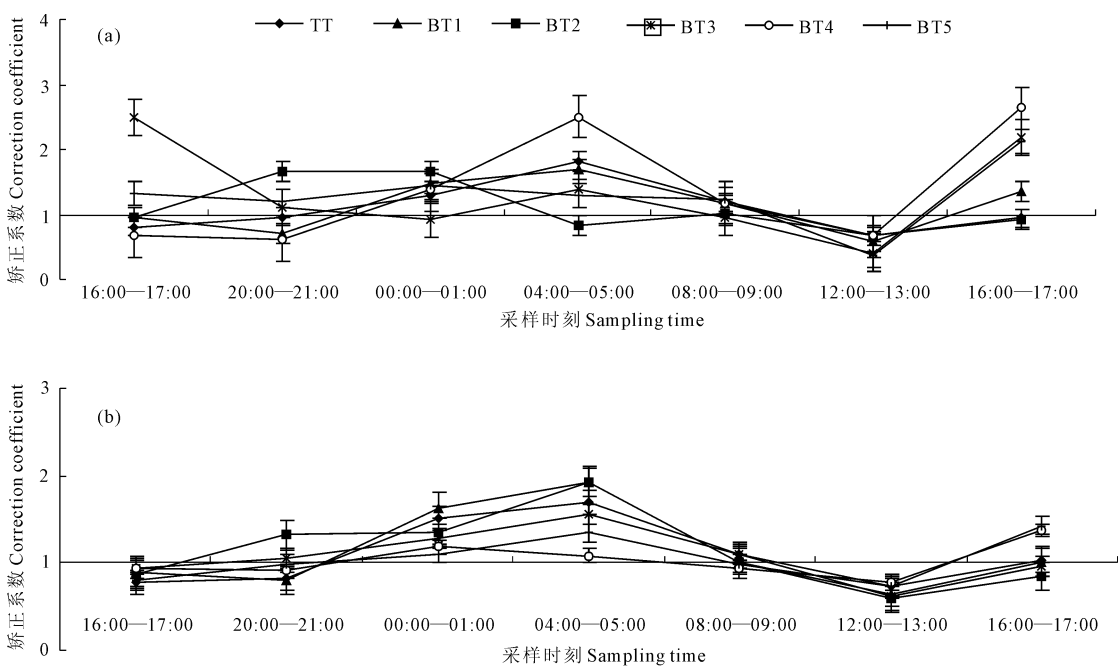


图 3 田间(a)、盆栽(b)试验  $N_2O$  修正系数随时间的分布

Fig.3 Diurnal variation of correction coefficient of  $N_2O$  fluxes of field (a) and pot experiment (b)

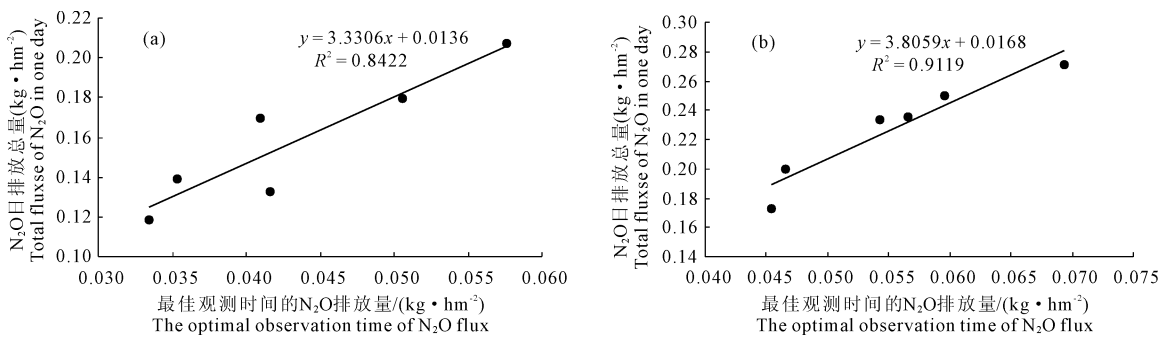


图 4 田间(a)、盆栽(b) $N_2O$  最佳观测时间排放通量与日排放总量的回归分析

Fig.4 The regression analysis between the optimal observation time and the daily total fluxes of  $N_2O$  of field (a) and pot experiment (b)

2.5 不同生物质炭输入水平下黄绵土  $N_2O$  日排放通量的昼夜变化

由图 5 可以看出,田间试验  $N_2O$  白天排放通量平均达 56.85%,盆栽试验  $N_2O$  白天排放通量平均达 56.58%,各处理  $N_2O$  昼夜排放规律比较一致,无论是田间试验还是盆栽实验,各处理  $N_2O$  日总排放通量均在白天所占比例最高,这与温度变化一致,进一步印证了温度变化是影响旱作黄绵土  $N_2O$  排放的主要因子。

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究表明,农田生物质炭的添加对  $N_2O$  的增汇减排具有积极的作用<sup>[10,17-18]</sup>,但结论并不一致,这可能是由于生物质炭来源、制备过程以及土壤差异等因素所导致的<sup>[11,19-20]</sup>不同生物质炭输入水平下的  $N_2O$  日排放规律及其观测时间分析的田间试验与盆栽实验对比研究鲜见报道。

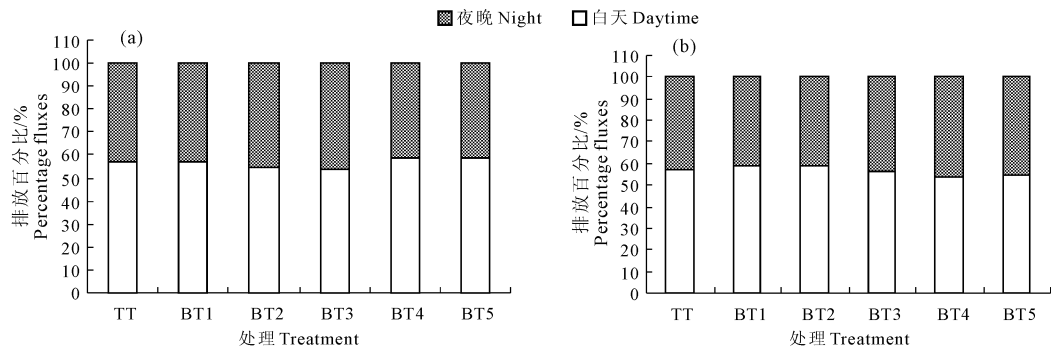


图 5 田间(a)与盆栽(b)N<sub>2</sub>O 日通量的百分比分布

Fig. 5 The percent distribution of N<sub>2</sub>O daily fluxes of field (a) and pot experiment (b)

本研究结果显示:在各个时段,田间试验与盆栽实验旱作黄绵土 N<sub>2</sub>O 通量均表现为累积排放通量,旱作黄绵土为 N<sub>2</sub>O 的排放源,这与刘博<sup>[13]</sup>,段翠青<sup>[21]</sup>、宋敏<sup>[22]</sup>等的日变化研究结果以及王旭燕等<sup>[23]</sup>的季节变化研究结果一致。与 TT 处理相比,5 种生物质炭输入水平处理下的 N<sub>2</sub>O 排放通量均表现出不同程度的降低,说明生物质炭的输入有利于降低旱作黄绵土 N<sub>2</sub>O 气体的排放,且当生物质炭输入水平为 30 t·hm<sup>-2</sup>时,生物质炭对旱作黄绵土 N<sub>2</sub>O 气体的减排效应较好,原因可能是生物质炭输入土壤后,其巨大的比表面积和孔隙度改善了土壤的通气状况<sup>[24]</sup>,增加了土壤的通气性<sup>[10]</sup>,提高了土壤阳离子交换量,吸附固定了土壤的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sup>[18]</sup>,使反硝化作用的底物减少,抑制了硝化过程的进行,从而减少了 N<sub>2</sub>O 的产生,也有可能是因为土壤 O<sub>2</sub> 的增加,减少了硝化过程第二阶段以及反硝化过程中 N<sub>2</sub>O 的产生<sup>[24]</sup>。但是,在反硝化过程中,N<sub>2</sub>O 还原酶(Nos)对 O<sub>2</sub> 的敏感度较其他酶要高得多,当生物质炭输入量过高时,通氧量的增加可能造成反硝化过程进行到 N<sub>2</sub>O 时停止,引发 N<sub>2</sub>O 排放增加<sup>[12]</sup>,这可能是生物质炭高水平输入下的 BT5 处理较 BT3 减排百分比变小的原因。

与以往研究一致<sup>[13,21,25-28]</sup>,本研究结果表明,在土壤水分及天气情况等因子相对稳定的条件下,温度是 N<sub>2</sub>O 日排放通量规律性变化的主要影响因子,且 N<sub>2</sub>O 排放通量随温度升高而升高。其中,TT 处理 N<sub>2</sub>O 排放通量与地表温度及 10 cm 土层温度表现出显著正相关关系,其余各处理亦表现为不同程度的正相关关系,且与高水平生物质炭输入处理相比较,低水平生物质炭输入处理下的 N<sub>2</sub>O 排放通量与地表温度及 10 cm 土层温度的相关性更为显著。这可能是不同水平的生物质炭输入土壤后,一方面对温度造成影响,生物质炭输入水平与 10 cm 土层

土壤温度表现出显著正相关关系,且不同水平的生物质炭输入量对温度的效用强度不同,另一方面不同水平的生物质炭输入量还改变了土壤的理化性质及水分情况,形成不同的水热组合,由此导致 N<sub>2</sub>O 排放通量对地表温度的响应程度以及对 10 cm 土层土壤温度的维持能力产生差异,当生物质炭输入超过一定量时,温度因子对 N<sub>2</sub>O 通量的日变化规律的控制作用减弱。

通过比较,田间试验与盆栽试验结果基本一致,盆栽试验结果规律性更为明显,这可能是因为室内盆栽试验避免了田间风速等其他影响因子影响的结果。与田间试验 N<sub>2</sub>O 排放通量相比,盆栽试验 N<sub>2</sub>O 排放通量偏高,这可能主要由室内盆栽温度偏高所导致。

此外,本研究通过对各时段 N<sub>2</sub>O 排放通量校正系数分析发现,8:00—9:00 时段田间及盆栽试验旱作黄绵土的 N<sub>2</sub>O 排放通量均较为接近一天中 N<sub>2</sub>O 排放的平均值,且与排放累积量良好相关,因此可作为该生长期旱作黄绵土 N<sub>2</sub>O 排放通量的季节性连续取样观测时段,这与田慎重等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。

3.2 结论

(1) 6 种处理水平下,旱作黄绵土全天表现为 N<sub>2</sub>O 的排放源。无生物质炭添加处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量均极显著高于其他各处理排放通量,随输入水平增加呈 U 型变化规律,当生物质炭输入水平为 30 t·hm<sup>-2</sup> 时,更有利于 N<sub>2</sub>O 气体日排放通量的增汇减排。

(2) 各处理 N<sub>2</sub>O 日总排放通量均在白天所占比例最高。

(3) 地表温度及地下 10 cm 土壤的温度与 N<sub>2</sub>O 排放通量呈不同程度的正相关关系,是影响 N<sub>2</sub>O 排放通量的主要因子;10 cm 土层地温与生物质炭输

入量呈显著正相关关系;生物质炭输入土壤后形成的水热及土壤结构组合可能是不同生物质炭处理 N<sub>2</sub>O 排放通量产生差异的主要原因。

(4) 由矫正系数随时间的分布情况及排放总量与最佳时间的排放通量的回归分析可见, 8:00—9:00 是 N<sub>2</sub>O 的最佳观测时间,可作为旱作农田黄绵土 N<sub>2</sub>O 气体观测时间。

参 考 文 献:

[1] Verge X P C, Kimpe C D, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2007, 142(2):255-269.

[2] Delgada J A, Mosier A R. Mitigation alternatives decrease nitrous oxide emission and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux [J]. *J Environ Qual*, 1999, 28(6):1105-1111.

[3] 张翰林,吕卫光,郑宪清,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3):302-308.

[4] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4):966-975.

[5] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B , et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2011, 19(4):966-975.

[6] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1):309-313.

[7] 李 力,刘 娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(8):1411-1421.

[8] 潘逸凡,杨 敏,董 达,等.生物质炭对土壤氮素循环的影响及其机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9):2666-2673.

[9] 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*, 2011, 351(1 - 2):263-275.

[10] Spokas K A, Reicosky D C. 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.

[11] 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,等.生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(9):3393-3400.

[12] 朱永官,王晓辉,杨小茹,等.农田土壤 N<sub>2</sub>O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, 35(2):792-800.

[13] 刘 博,黄高宝,高亚琴,等.免耕对旱地春小麦成熟期 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放日变化的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(1):82-87.

[14] 孙成胜,张仁陟,张 军,等.丰雨年旱作农业区不同耕作措施麦豆地 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的排放[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(3):196-204.

[15] 田慎重,宁堂原,迟淑筠,等.不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. *生态学报*, 2012, 32(3):879-888.

[16] 马 静,徐 华,蔡祖聪,等.水稻植株对稻田 CH<sub>4</sub> 排放日变化的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(6):859-862.

[17] 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.

[18] 王欣欣,邹 平,符建荣,等.不同竹炭施用量对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1):198-204.

[19] 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.

[20] 刘玉学,王耀锋,吕豪豪,等.生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8):2166-2172.

[21] 段翠清,张仁陟,蔡立群,等.保护性耕作对黄土高原旱地春小麦成熟期农田温室气体通量日变化的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(21):35-40.

[22] 宋 敏,蔡立群,齐 鹏,等.不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放日变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(10):1300-1309.

[23] 王旭燕,张仁陟,蔡立群,等.不同施氮处理下旱作农田土壤 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11):3655-3661.

[24] Lukas V Z, Singh B, Joseph S, et al. Biochar and Emissions of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases from Soil. in *Biochar for Environmental Mangement*[M]. London: Earthscan, 2009.

[25] 李晓密,伦小秀.施肥与不施肥措施下小麦田的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放日变化特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(1):178-182.

[26] 徐文彬,刘维屏,刘广深.温度对旱田土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1):1-8.

[27] 郑循华,王明星,王跃思,等.温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5):1-15.

[28] 蒋静艳,黄 耀.农业土壤 N<sub>2</sub>O 排放的研究进展[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(1):51-54.