

# 竹叶及其生物质炭输入对板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 通量的影响

肖永恒<sup>1</sup>, 李永夫<sup>1,2\*</sup>, 王战磊<sup>1</sup>, 姜培坤<sup>1,2</sup>, 周国模<sup>1,2</sup>, 刘娟<sup>1,2</sup>

(1 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300;

2 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江临安 311300)

**摘要:**【目的】氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)是温室气体的主要组成部分,其增温效应极强,陆地生态系统是 N<sub>2</sub>O 的主要排放源之一。人工林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,但目前关于经营措施对人工林生态系统土壤 N<sub>2</sub>O 通量的影响研究较少。本文研究了竹叶及其生物质炭输入对板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响,为调控亚热带人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量提供理论基础与科学依据。【方法】定位试验于 2012 年 7 月~2013 年 7 月在浙江省临安市三口镇典型板栗林区进行,设对照、输入竹叶、输入生物质炭 3 个处理,利用静态箱-气相色谱法测定板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 通量的动态变化以及土壤温度、土壤含水量、水溶性有机碳(WSOC)、水溶性有机氮(WSON)、微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。【结果】不同处理条件下,板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均呈显著的季节性变化特征,最高值出现在 7 月,最低值出现在 1 月。与对照相比,竹叶处理的土壤 N<sub>2</sub>O 年平均通量和年累积排放量分别增加了 17.2% 和 12.8%,而生物质炭处理的土壤 N<sub>2</sub>O 年平均通量和年累积排放量分别降低了 27.4% 和 20.5%。竹叶处理的土壤 WSON、MBN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量增加 12.4%、19.1%、8.3% 和 13%,而生物质炭处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别降低了 14.1% 和 18%。在对照、竹叶以及生物质炭处理条件下,板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度(表层 5 cm 处)和 WSOC 含量均有显著相关性( $P < 0.05$ ),与土壤 MBC 含量均无显著相关性。竹叶处理土壤 N<sub>2</sub>O 通量与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 及 WSON 含量均有显著相关性( $P < 0.05$ )。【结论】在不同处理条件下,板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均呈现明显的季节性变化特征,表现为夏季高、冬季低。输入竹叶可显著增加板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量,而输入生物质炭 N<sub>2</sub>O 排放通量显著降低;输入竹叶和生物质炭可能是通过影响土壤碳库与氮库特征而影响土壤 N<sub>2</sub>O 的排放通量。

**关键词:** 板栗林; N<sub>2</sub>O 通量; 生物质炭; 竹叶

中图分类号: S753.53<sup>+</sup>2; S153.6<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)03-0697-10

## Effects of bamboo leaves and their biochar additions on soil N<sub>2</sub>O flux in a Chinese chestnut forest

XIAO Yong-heng<sup>1</sup>, LI Yong-fu<sup>1,2\*</sup>, WANG Zhan-lei<sup>1</sup>, JIANG Pei-kun<sup>1,2</sup>, ZHOU Guo-mo<sup>1,2</sup>, LIU Juan<sup>1,2</sup>

(1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is the main component of greenhouse gases, and its warming effect is extremely strong. Terrestrial ecosystem is one of the main sources of N<sub>2</sub>O emissions. Plantation ecosystem is an important component of the terrestrial ecosystem, but effects of management practices on soil N<sub>2</sub>O flux in the plantation ecosystem are seldom studied. The objective of this study was to investigate effects of bamboo leaves and their biochar addition on seasonal variation in N<sub>2</sub>O flux in the soils of Chinese chestnut stands and to provide a theoretical basis and scientific evidence for the modulation of the soil N<sub>2</sub>O efflux in the plantation ecosystem.

收稿日期: 2015-01-05 接受日期: 2015-03-27 网络出版日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470626); 浙江省科技厅重点项目(2011C12019); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030)资助。

作者简介: 肖永恒(1990—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事森林生态系统碳循环与固碳减排方面的研究。

E-mail: xiaoyonghengzafu@163.com. \*通信作者 Tel: 0571-63740889, Email: yongfuli@zafu.edu.cn

**【Methods】** An experiment was established in the Chinese chestnut forest in Shankou Township, Lin'an City, Zhejiang Province in the period from July, 2012 to July, 2013. The treatments included control, application of bamboo leaves (Leaf), and application of biochar (Biochar). Soil  $N_2O$  fluxes were analyzed by static closed chamber/GC technique, and soil temperature, the contents of soil water, water soluble organic carbon (WSOC), water soluble organic nitrogen (WSON), microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN),  $NH_4^+$ -N, and  $NO_3^-$ -N were determined as well. **【Results】** Soil  $N_2O$  flux exhibits a strong seasonal pattern, with the maximum value in July and the minimum in January, regardless of the treatments. Compared to the control, the annual average flux and annual cumulative value of soil  $N_2O$  emission under the Leaf treatment are increased by 17.2% and 12.8%, respectively, while they are decreased by 27.4% and 20.5%, respectively under the Biochar treatment. In comparison with the Control, the concentrations of soil WSON, MBN,  $NH_4^+$ -N and  $NO_3^-$ -N under the Leaf treatment are increased by 12.4%, 19.1%, 8.3%, and 13%, respectively, while the concentrations of soil  $NH_4^+$ -N and  $NO_3^-$ -N are decreased by 14.1% and 18%, respectively under the Biochar treatment. An exponential relationship between soil temperature and the  $N_2O$  flux is observed regardless of the treatment. The soil  $N_2O$  flux correlates to soil temperature and WSOC concentration ( $P < 0.05$ ) but not to soil MBC concentration. Under the Leaf treatment, the soil  $N_2O$  flux correlates to  $NH_4^+$ -N,  $NO_3^-$ -N and WSON concentrations ( $P < 0.05$ ). **【Conclusions】** Regardless of the treatment, the soil  $N_2O$  flux in the Chinese chestnut forest shows significant seasonal variation, with the high value in the summer and low value in the winter. The soil  $N_2O$  emission in the Chinese chestnut stand is increased under the Leaf treatment, but decreased under the Biochar treatment, and the changes in the soil  $N_2O$  emission caused by the additions of bamboo leaves and their biochar are probably attributed to the changes in soil C and N pools caused by adding bamboo leaves and their biochar.

**Key words:** Chinese chestnut forest;  $N_2O$  flux; biochar; bamboo leaf

氧化亚氮( $N_2O$ )作为温室气体的主要组成部分,其浓度正在持续上升。 $N_2O$ 在大气中的增温效应极强,以百年为尺度单位,单位质量的 $N_2O$ 增温效应是 $CO_2$ 的298倍<sup>[1]</sup>,因此,降低大气中 $N_2O$ 浓度对于缓解全球温室效应的不断加剧趋势以及维持全球生态平衡具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。陆地生态系统是 $N_2O$ 气体的主要排放源之一,以往对陆地生态系统土壤 $N_2O$ 通量的研究大多集中在农田,但对人工林生态系统土壤 $N_2O$ 通量的研究较少。目前,全世界人工林面积已达2.27亿公顷<sup>[3]</sup>,研究人工林生态系统的 $N_2O$ 排放通量对于减缓全球气候变暖的趋势以及增加陆地生态系统的碳汇功能具有重要的理论意义与实践价值<sup>[1, 3-4]</sup>。

板栗(*Castanea mollissima*)是中国重要的经济树种之一。目前我国板栗林面积已达125万公顷,占全世界板栗林面积的38%<sup>[5]</sup>。为了提高板栗林产量和经济收益,经营者一般会对板栗林进行集约化管理。目前,板栗林的集约经营管理措施主要包括施用化肥、林地翻耕及去除林下植被等。虽然集约经营措施可以显著提高板栗林的产量,在短时间内得到经济效益的最大化,但是长期集约经营会对板栗林生态系统产生负面影响,如土壤碳储量

和土壤微生物活性显著降低,土壤肥力下降,水土流失现象增加等<sup>[6]</sup>进而严重影响了板栗林的可持续经营。

生物质炭是一种新型材料,是由生物质在高温、厌氧条件下热裂解而成的多孔炭质固体,具有高度热稳定性和易吸附性的特点,其输入土壤后可以改变土壤理化特性、土壤肥力等,从而影响土壤温室气体的排放<sup>[7-9]</sup>。由于生物质炭材质、热解温度以及土壤类型和施用时间等都会对生物质炭的生态功能产生影响,因此,目前国内外对生物质炭影响土壤温室气体排放方面的研究结果也不尽一致<sup>[10]</sup>。Scheer等<sup>[9]</sup>研究表明,输入生物质炭可以显著减少草地土壤 $N_2O$ 的排放通量。张斌等<sup>[11]</sup>的研究结果也表明,生物质炭的输入显著降低了水稻土 $N_2O$ 的排放通量。Wu等<sup>[12]</sup>研究发现,输入小麦秸秆生物质炭也减少了土壤 $N_2O$ 的排放通量。而Spokas等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,低剂量生物质炭的输入对土壤 $N_2O$ 排放无显著影响,高剂量生物质炭的输入显著降低了土壤 $N_2O$ 排放。以往有关生物质炭输入对土壤 $N_2O$ 排放通量的研究主要集中于农田土壤<sup>[11, 14]</sup>,而有关生物质炭输入对人工林土壤 $N_2O$ 排放通量的影响研究在国内外尚鲜有报道。本研究

拟以板栗人工林为研究对象, 研究竹叶及其生物质炭处理对土壤 N<sub>2</sub>O 排放、土壤碳库以及氮库特征的影响, 并探讨不同处理条件下板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 通量与环境因子之间的关系, 为调控亚热带人工林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量提供理论基础与科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究的试验区位于浙江省临安市三口镇葱坑村 (30° 14' N, 119° 42' E)。该地区年平均气温 15.8℃, 有效积温 5760℃, 无霜期 236 d, 年日照时数 1930 h, 年均降水量 1424 mm, 是典型的亚热带湿润性季风气候。在本试验研究期间 (2012 年 7 月~2013 年 7 月), 该研究区的月平均温度和月累计降水量情况如图 1 所示。试验样地为板栗林, 该地区海拔为 150~200 m, 位于典型江南低山丘陵地区, 土壤类型为黄红壤。该地区是在天然常绿阔叶林基础上经人工改造而成的板栗林, 林龄为 21 年, 种植密度 520 plant/hm<sup>2</sup>, 平均胸径为 14.6 cm。板栗林样地实行典型的集约经营管理模式, 每年 5 月份进行施肥, 施肥后进行地表翻耕, 林下留有少量灌木与杂草。

2012 年 6 月, 进行野外调研, 在研究区中选择符合本试验要求且长势良好的板栗林地作为试验样地。在进行试验处理前, 采集试验区的土壤样品。试验区土壤有机碳含量 15.63 g/kg、全氮 1.64 g/kg、碱解氮 82.18 mg/kg、有效磷 6.84 mg/kg、速效钾 79.5 mg/kg、pH 值 4.52。砂粒含量 296 g/kg, 粉粒含量 397 g/kg, 粘粒含量 307 g/kg。

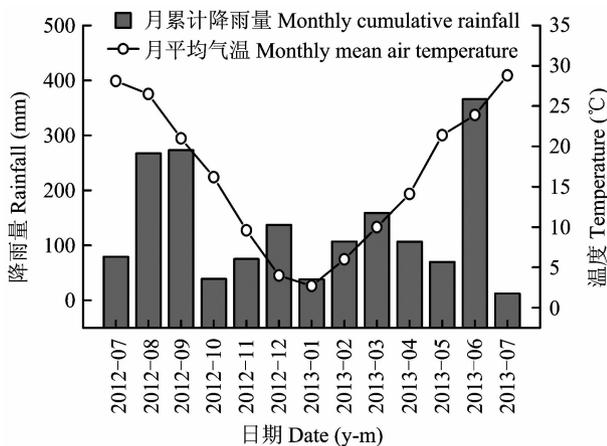


图 1 试验期间月累积降水量和月平均温度

Fig. 1 Monthly cumulative rainfall and mean air temperature during the experimental period

### 1.2 试验设计

2012 年 7 月, 在板栗林地上布置试验处理。试验设 3 个处理: 1) 对照 (不进行处理); 2) 竹叶处理; 3) 生物质炭处理。每个处理 3 次重复, 小区面积 96 m<sup>2</sup> (8 m × 12 m), 随机分布, 每个试验小区内 有 8~9 棵板栗树, 试验小区之间的间隔距离为 3 m。施入生物质炭的处理, 其生物质炭由浙江布莱蒙农业科技股份有限公司生产, 该生物质炭是由竹叶在缺氧环境中经 500℃ 热裂解制备而成。施入竹叶的处理, 其竹叶与生物质炭所用竹叶采样区和采集时间均相同。竹叶和竹叶生物质炭的含碳量分别为 447 和 648 g/kg, 施入量分别为 7.25 和 5.00 t/hm<sup>2</sup>, 竹叶和生物质炭两个处理的碳施入量相同。竹叶和生物质炭经过烘干粉碎过 2 mm 筛, 并于 2012 年 7 月 29 日采用撒施的方法施入, 并对 20 cm 表层土壤进行翻耕。翻耕后在每个小区布置 1 个静态箱。在试验处理后的第 1、4、7、14、21、28、35、42、49、56、63 d 进行气体样品采集, 随后每半月采集样品一次, 两个月后每月采集一次, 至 12 个月。每次采样时选择晴朗天气。土壤样品每月采集一次, 在小区以五点法采样。

### 1.3 样品的采集与测定

1.3.1 气体样品的采集与测定 土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的测量方法为静态箱—气相色谱法。采样箱为组合式 PVC 塑料板箱, 由箱盖和底座两部分组成, 箱盖的规格为 30 cm × 30 cm × 30 cm, 底座的规格为 0.3 m × 0.3 m × 0.1 m, 采气孔在箱盖顶部中心。采样气袋为铝箔材质的密闭性气袋, 由大连光明化工设计研究院生产。在天气晴朗的上午 9:00~11:00 进行采样。采样前, 首先将适量蒸馏水倒入底座的凹槽中, 以确保箱盖与底座完全密闭, 然后将箱盖插入底座的凹槽中。用 50 mL 注射器在采样箱顶部的采气孔插入, 为确保箱体内存空气密度均匀, 抽气打气进行 3~4 次, 然后分别于 0、10、20 和 30 min 采集气样, 抽完气后立即注入相应编号的气袋。

采取样品结束后, 在 24 h 内利用岛津 GC-2014 气相色谱仪测定 N<sub>2</sub>O 浓度<sup>[28]</sup>。

土壤 N<sub>2</sub>O 通量的计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_t}{d_t} \quad (1)$$

式(1)中,  $F$  为被测气体的 N<sub>2</sub>O 排放通量 [N<sub>2</sub>O μg/(m<sup>2</sup> · h)];  $\rho$  为标准状态下被测气体的密度 (μg/m<sup>3</sup>);  $A$  为箱体底面积 (m<sup>2</sup>);  $V$  为箱体体积

( $\text{m}^3$ );  $\frac{dC_t}{d_t}$  为单位时间取样箱内被测气体浓度的变化量( $\text{h}^{-1}$ );  $T_0$  和  $P_0$  分别为标准状态下的空气绝对温度和气压;  $T$  和  $P$  为取样时的静态箱内空气绝对温度和大气压。

土壤  $\text{N}_2\text{O}$  累积通量的计算公式如下:

$$M_g = \sum_{i=1}^n (R_{i+1} + R_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5} \quad (2)$$

式(2)中,  $M_g$  为  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量 [ $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $R$  为土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量 [ $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ],  $t$  为采样时间,  $i$  为采样次数,  $n$  为总测定次数,  $t_{i+1} - t_i$  为两次采样的间隔天数。

1.3.2 土壤样品的采集与测定 在采集气体样品的同时,利用曲管温度计测定土壤 5 cm 表层的温度,并采集静态箱底座 1.5 m 半径范围内 0—20 cm 土层土壤。土壤样品带回实验室后过 2 mm 筛,称取 20 g 新鲜土样采用烘干法测定土壤含水量。土壤水溶性有机氮(WSON)、水溶性有机碳(WSOC)的测定参考 Jones 和 Willett<sup>[16]</sup> 的方法,利用有机碳分析仪(TOC -  $V_{\text{CPH}}$ , 岛津公司)测定滤液中 WSON、WSOC 的含量;土壤微生物量氮(MBN)、微生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸法提取,有机碳分析仪(TOC -  $V_{\text{CPH}}$ , 岛津公司)测定滤液中 MBN、MBC 的含量;

土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量用 2 mol/L KCl 浸提,离子色谱仪测定。

#### 1.4 数据处理

试验数据均为 3 次重复的平均值。利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件进行数据处理与统计分析, Origin 8.0 软件作图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)对不同数据组之间的差异进行比较,显著性水平设为  $\alpha = 0.05$ 。一元线性回归分析法分析土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤温度、土壤含水量、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、WSOC、WSON、MBC 和 MBN 含量之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 竹叶及其生物质炭输入对土壤氮库动态变化的影响

由图 2a 可见,土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量表现出明显的季节变化,呈春夏高、秋冬低。土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的变化幅度在对照,竹叶以及生物质炭处理下分别为 1.99 ~ 4.90、2.16 ~ 5.48 和 2.22 ~ 4.40 mg/kg; 土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的年均值在对照,竹叶以及生物质炭处理下分别为 3.69、4.00 和 3.17 mg/kg。与对照相比,土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量年均值在生物质炭处理下降低了 14.1%,该指标在竹叶处理下升高了 8.3%。

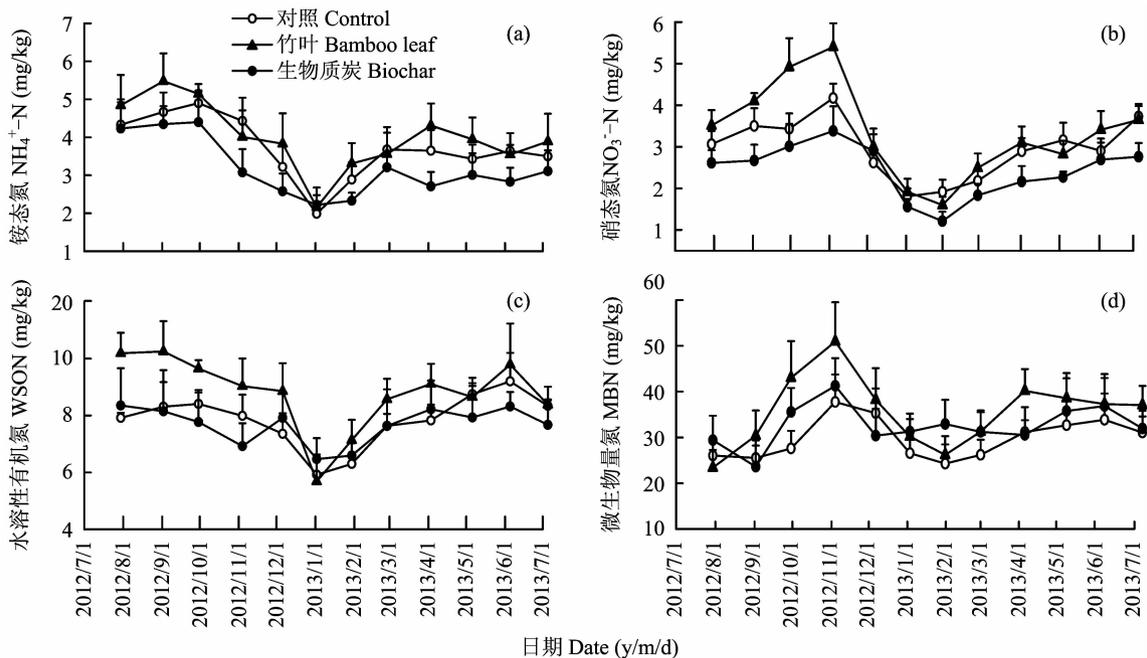


图 2 板栗林土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  (a)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  (b)、WSON (c) 及 MBN (d) 的季节动态变化

Fig. 2 Seasonal variations in soil  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration (a),  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentration (b), soil water soluble organic N (WSON) concentration (c), and microbial biomass N (MBC) (d) in a Chinese chestnut plantation

由图 2b 可见, 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量具有明显的季节性变化, 生物质炭处理下在 1~2 月份出现最小值, 为 1.21 mg/kg, 竹叶处理下在 10~11 月份出现最大值, 为 5.40 mg/kg。在对照、竹叶和生物质炭处理下, 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在不同处理方式下差异性明显 ( $P < 0.05$ )。竹叶和生物质炭处理下土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量的年均值分别为对照处理的 1.13 和 0.82 倍。

图 2c 显示, 土壤 WSON 含量表现为秋、冬较低, 春、夏较高, 与气温的变化略呈正相关。对照、竹叶和生物质炭处理的土壤 WSON 含量年均分别为 7.83、8.77 和 7.66 mg/kg, 最高值分别为 9.20、10.25 和 8.35 mg/kg, 最低值分别为 5.92、5.68 和 6.47 mg/kg。与对照相比, 竹叶处理的土壤 WSON 含量显著增加 ( $P < 0.05$ ), 而生物质炭处理无显著影响。竹叶和生物质炭处理的土壤 WSON 含量的年均值分别比对照增加了 12% 和 -2.1%。

图 2d 可见, 土壤 MBN 含量随季节的变化明显, 春、秋季节较高, 冬夏季节较低。土壤 MBN 含量在对照、竹叶和生物质炭处理下的年均值分别为 29.84、35.55 和 32.57 mg/kg。与对照相比, 竹叶处理土壤 MBN 含量显著增加 ( $P < 0.05$ ), 而与生物质炭处理无显著差异。

## 2.2 竹叶及其生物质炭输入对土壤 N<sub>2</sub>O 通量的影响

由图 3 可以看出, 板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 通量随季节的变化明显, 在夏季 7 月份出现峰值, 在冬季 1 月份出现谷值。在试验初期对样地进行处理后, 竹叶处理的土壤 N<sub>2</sub>O 通量明显增加 (7~9 月份), 并在 8 月 5 日出现最大值 N<sub>2</sub>O 65.44 μg/(m<sup>2</sup>·h), 生物质炭处理显著降低土壤 N<sub>2</sub>O 通量 ( $P < 0.05$ ), 在 1 月 30 日出现最低值, 半月后各处理均呈降低趋势。2012 年 12 月~2013 年 6 月, 土壤 N<sub>2</sub>O 通量对照和竹叶处理与生物质炭处理均无显著差异, 2013 年 7 月, 竹叶与生物质炭处理之间出现显著差异, 而与对照之间无显著差异。通过图 3 和图 4 可以看出, 对照、竹叶和生物质炭的土壤 N<sub>2</sub>O 通量的年均值分别为 N<sub>2</sub>O 33.05、38.75 和 23.97 μg/(m<sup>2</sup>·h), 与对照相比, 土壤 N<sub>2</sub>O 年平均通量和年累积排放量在竹叶处理下分别增加了 17.2% 和 12.8%, 在生物质炭处理下分别降低了 27.5% 和 20.5%。结合图 3 和图 4 及以上分析可知, 竹叶处理的土壤 N<sub>2</sub>O 年均通量和年累积排放显著增加, 生物质炭处理显著降低 ( $P < 0.05$ )。

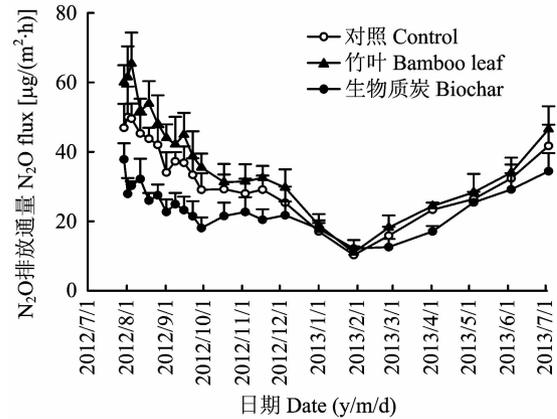


图 3 竹叶及其生物质炭输入对板栗土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量季节变化特征的影响

Fig. 3 Effects of bamboo leaves and their biochar additions on the seasonal variation of soil N<sub>2</sub>O flux in a Chinese chestnut plantation

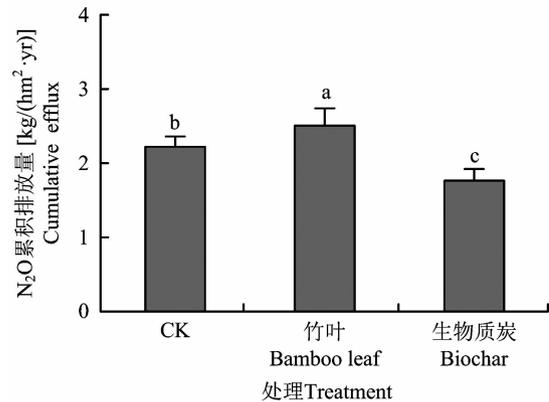


图 4 竹叶及其生物质炭输入对板栗林土壤 N<sub>2</sub>O 年累积排放量的影响

Fig. 4 Effects of bamboo leaves and their biochar additions on annual cumulative soil N<sub>2</sub>O flux in a Chinese chestnut plantation

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 水平 Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.]

## 2.3 土壤 N<sub>2</sub>O 通量与土壤环境因子的关系

从表 1 可以看出, 对照、竹叶和生物质炭处理的土壤 N<sub>2</sub>O 通量与土壤温度 (0—5 cm)、WSOC 含量之间均有明显的正相关性 ( $P < 0.05$ ), 而与土壤 MBC 和 MBN 含量之间均没有明显的相关性 ( $P > 0.05$ )。在对照处理的土壤 N<sub>2</sub>O 通量与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量呈极显著的相关性 ( $P < 0.01$ ), 与 WSON 含量呈显著的相关性 ( $P < 0.05$ )。竹叶处理的土壤 N<sub>2</sub>O 通量与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、WSON 含量均呈显著的相关性 ( $P < 0.05$ )。生物质炭处理的土壤 N<sub>2</sub>O 通量与土壤含水量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。

表 1 板栗林土壤  $N_2O$  排放通量与 0—5 cm 土层各环境因子之间的相关性 ( $n = 12$ )Table 1 Relationships between soil  $N_2O$  flux and soil environmental factors of 0—5 cm soil depth

土壤环境因子 Environmental factor	对照 Control	竹叶 Bamboo leaf	生物质炭 Biochar
温度 Soil temperature	$y = 1.2666x + 7.8713$ ( $R^2 = 0.866, P < 0.01$ )	$y = 1.6539x + 5.8622$ ( $R^2 = 0.840, P < 0.01$ )	$y = 0.6401x + 11.247$ ( $R^2 = 0.632, P < 0.01$ )
水分 Soil moisture	$y = -0.0834x + 54.564$ ( $R^2 = 0.114, P > 0.05$ )	$y = -0.0634x + 54.886$ ( $R^2 = 0.041, P > 0.05$ )	$y = -0.0698x + 42.786$ ( $R^2 = 0.201, P < 0.05$ )
铵态氮 $NH_4^+ -N$	$y = 7.0562x + 1.4723$ ( $R^2 = 0.298, P > 0.05$ )	$y = 9.9447x - 7.9666$ ( $R^2 = 0.420, P < 0.05$ )	$y = 3.6601x + 11.039$ ( $R^2 = 0.121, P > 0.05$ )
硝态氮 $NO_3^- -N$	$y = 9.9157x - 1.6885$ ( $R^2 = 0.469, P < 0.01$ )	$y = 6.9054x + 8.8689$ ( $R^2 = 0.321, P < 0.05$ )	$y = 6.6496x + 6.5513$ ( $R^2 = 0.277, P > 0.05$ )
水溶性碳 WSOC	$y = 0.403x - 24.684$ ( $R^2 = 0.373, P < 0.05$ )	$y = 0.4945x - 48.503$ ( $R^2 = 0.734, P < 0.01$ )	$y = 0.2835x - 15.749$ ( $R^2 = 0.392, P < 0.05$ )
水溶性氮 WSON	$y = 6.948x - 26.872$ ( $R^2 = 0.391, P < 0.05$ )	$y = 7.0951x - 30.418$ ( $R^2 = 0.462, P < 0.05$ )	$y = 6.1434x - 24.413$ ( $R^2 = 0.254, P > 0.05$ )
微生物量碳 MBC	$y = -0.0011x + 27.881$ ( $R^2 = 0.00002, P > 0.05$ )	$y = -0.0265x + 42.369$ ( $R^2 = 0.016, P > 0.05$ )	$y = 0.0375x + 9.0953$ ( $R^2 = 0.025, P > 0.05$ )
微生物量氮 MBN	$y = 0.412x + 15.246$ ( $R^2 = 0.030, P > 0.05$ )	$y = -0.1311x + 36.501$ ( $R^2 = 0.005, P > 0.05$ )	$y = -0.0162x + 23.175$ ( $R^2 = 0.00008, P > 0.05$ )

注 (Note): WSOC—Water soluble organic carbon; WSON—Water soluble organic N; MBC—Microbial biomass C; MBN—Microbial biomass N.

### 3 讨论

#### 3.1 竹叶及其生物质炭输入对土壤 $N_2O$ 通量的影响

从试验结果可以看出,新鲜竹叶的输入明显增加了土壤  $N_2O$  年均排放量和累积排放量 ( $P < 0.05$ ) (图 3 和图 4)。Cheng 等<sup>[17]</sup>通过室内培养试验研究了小麦秸秆输入对黑钙土  $N_2O$  的影响,其研究结果与本试验相符。Li 等<sup>[18]</sup>的研究结果也表明,水稻秸秆输入增加了土壤  $N_2O$  的排放。新鲜竹叶的输入增加土壤  $N_2O$  通量的原因可能为: 1) 新鲜竹叶输入土壤后增加了土壤孔隙,为土壤硝化微生物的生长提供较好的生长环境<sup>[17-18]</sup>; 2) 新鲜竹叶的输入增加了土壤有机质含量,为硝化反应提供了大量的反应底物,反应过程中释放热量从而提高了其反应速率,增加了土壤  $N_2O$  排放<sup>[21]</sup>。但是 Wu 等<sup>[12]</sup>通过黑钙土室内培养试验则发现,输入小麦秸秆后,土壤  $N_2O$  通量并没有显著增加,反而呈现下降趋势。以上的不同研究结果说明,输入不同材质的生物质炭材料对土壤  $N_2O$  排放通量影响不同,并且此影响还会因试验样地位置及其管理方式、测定方法以及

试验的研究时间等因素的不同而呈显著差异。

从试验结果可以看出,输入生物质炭明显降低了土壤  $N_2O$  年均排放量和累积排放量 (图 3 和图 4)。这与前人<sup>[7-9]</sup>的研究结果一致,并且 Wu 等<sup>[12]</sup>的研究结果发现,生物质炭的输入量与土壤  $N_2O$  的排放量呈反比;Spokas 等<sup>[13]</sup>研究了木屑生物质炭输入对土壤温室气体排放的影响,结果表明低剂量生物质炭输入对土壤  $N_2O$  排放量无显著影响,而高剂量生物质炭输入显著降低  $N_2O$  排放。输入生物质炭可以降低土壤  $N_2O$  排放量的原因可能为: 1) 生物质炭的输入增加了土壤孔隙,使得土壤通气性提高,促进了有氧环境的形成,抑制了厌氧微生物的生长,最终降低了土壤  $N_2O$  排放通量<sup>[12-19]</sup>; 2) 生物质炭具有多孔的芳香性结构和不易降解的特征,吸附了大量的土壤酶,影响了硝化和反硝化反应的进行,使得  $N_2O$  排放通量降低<sup>[7-8]</sup>; 3) 生物质炭可以修改根部区域的植物和微生物的共生关系,从而影响土壤微生物群落功能,使得  $N_2O$  排放通量降低。由本研究结果可知,在试验初期阶段,生物质炭处理下的土壤  $N_2O$  排放速率明显低于对照,而经过半年后,生物质炭和对照两种处理下的  $N_2O$  排放无显著差

异。Karhu 等<sup>[20]</sup> 和 Cheng 等<sup>[17]</sup> 研究也发现在试验处理半年后生物质炭和对照处理无显著差异。这种结果可能是由于生物质炭较高的固碳特性, 在短时间内起到了吸附效果, 但随着时间的推移, 吸附能力逐渐下降, 与对照处理无显著差异。相反, Clough 等<sup>[21]</sup> 研究发现, 生物质炭与牛尿混合后输入明显增加了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。以上结果表明, 生物质炭类型和用量是影响土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量的主要因子, 而试验样地土壤类型以及其他环境因素也会对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量产生显著影响<sup>[17, 20-21]</sup>。

### 3.2 竹叶及其生物质炭输入对土壤氮库的影响

土壤氮库一般包括无机氮库和有机氮库。土壤无机氮库的主要指标为土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 是土壤无机氮库的重要元素, 在土壤中能够被植物直接吸收利用, 在土壤氮循环中起着非常重要的作用<sup>[5]</sup>。本试验结果表明, 土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量在竹叶处理下分别增加了 8.3% 和 13% ( $P < 0.05$ ), 而在生物质炭处理下两者则分别降低了 14.1% 和 18% ( $P < 0.05$ ) (图 2)。输入竹叶和生物质炭对土壤有机氮库产生不同影响的原因可能有: 1) 竹叶分解促进可溶性有机氮化合物的降解, 从而提高了土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量<sup>[17-18]</sup>; 2) 由于生物质炭吸附了土壤中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 从而使其在土壤中的浓度降低<sup>[17]</sup>。土壤有机氮库的重要组成部分为土壤 WSON 和 MBN, 土壤 WSON 和 MBN 在森林生态系统氮循环中起着至关重要的作用<sup>[5, 22]</sup>。由本试验结果可见, 土壤 WSON 和 MBN 含量在竹叶处理下显著增加 ( $P < 0.05$ ), 在生物质炭处理下无显著变化 (图 2)。以上结果的主要原因可能为: 1) 竹叶的分解提高了土壤有机氮含量, 并为土壤微生物提供了良好的生存环境, 为其分解提供了反应底物<sup>[23-24]</sup>; 2) 生物质炭输入提高了土壤 pH 值, 抑制土壤微生物的生长, 降低了土壤 WSON 和 MBN 含量, 但生物质炭在溶解过程中会分解出少量的有机氮化合物, 从而导致土壤 WSON 和 MBN 含量在生物质炭处理下没有显著变化<sup>[25]</sup>。

### 3.3 土壤环境因子对土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 通量的影响

竹叶或者生物质炭的输入会对土壤温度、土壤含水量等土壤环境因子产生影响<sup>[26-27]</sup>。本试验结果表明, 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量与土壤温度 (表层 5 cm 处) 具有显著的相关性 (表 1), 这与 Scheer 等<sup>[9]</sup> 对生物质炭 (由牧场废弃物在 550℃ 经 45 分钟热裂解而制成) 输入草地对土壤温室气体排放的影响和 Liu 等<sup>[4]</sup> 开展的环境因素影响硬叶林土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的

研究结果相符。因为在较高的土壤温度下土壤微生物活性增强, 从而使土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增加。然而, Karhu 等<sup>[20]</sup> 在生物质炭输入土壤的短期试验研究中发现, 生物质炭和对照处理下土壤温度与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量均无相关性。以上不同效果可能是由于土壤质地、土壤水分、样地类型和管理措施等的不同造成的<sup>[9, 20]</sup>。

土壤含水量是影响土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率的重要因素, 主要表现在土壤水分可以影响土壤孔隙和养分传输, 从而影响土壤中的反硝化反应, 从而对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放速率产生影响<sup>[9, 20]</sup>。在本试验中, 生物质炭处理的土壤含水量与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量具有显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 而对照和竹叶处理与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量没有显著的相关性。Saarnio 等<sup>[28]</sup> 在研究生物质炭 (在较低温度条件下慢速热解而成) 输入对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量影响的研究也发现类似的结果。其主要原因可能是, 生物质炭的输入增加了土壤孔隙结构并提高了土壤含水量, 从而增强了土壤含水量与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量的相关性<sup>[28]</sup>。而 Tang 等<sup>[29]</sup> 的研究表明, 在松树林以及不对林下调落物进行处理的混合林中, 土壤含水量与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量均没有显著相关性, 而在常绿阔叶林以及去除林下调落物的混合林中均具有显著相关性。造成这种差异的原因可能是植被特征、林地类型、集约管理程度等的不同所致<sup>[29]</sup>。

以往的研究结果表明, 土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放具有显著的相关性<sup>[30-31]</sup>。但在本试验中, 土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量仅在竹叶处理下具有显著的相关性 (表 1), 而在生物质炭处理下无显著相关性。造成这种结果的原因可能是输入竹叶增加了土壤有机质等, 从而提高了土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量; 而由于生物质炭的吸附作用, 使得土壤中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量降低, 从而降低了其相关性<sup>[30-31]</sup>。

从本研究结果可以看出, 竹叶处理的土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的含量显著增加, 生物质炭处理显著降低 (图 2b)。对照处理的土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量具有显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 竹叶处理的相关性极显著 ( $P < 0.01$ ), 而生物质炭处理与之没有显著相关性。Castaldi 等<sup>[31]</sup> 研究也发现生物质炭处理下的土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量没有显著差异, 这与本试验结果相符。Muhammad 等<sup>[32]</sup> 则发现在作物残余物和氮肥混合输入的样地中, 土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量具有极显著的正相关。造成以上结果的原因

可能是输入竹叶后,随着竹叶的分解增加了土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的含量,而输入生物质炭后,吸附了土壤中的  $\text{NO}_3^-$ -N,土壤无机氮的含量下降,从而使其与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的相关性降低<sup>[30-31]</sup>。

在本研究中,竹叶处理的土壤 WSON 和 MBN 含量显著增加,生物质炭处理二者无显著差异(图 2c、d)。土壤 WSON 与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量在对照和竹叶处理中具有显著相关性,而在生物质炭处理上无显著相关性( $R^2=0.254$ ,  $P > 0.05$ )。造成以上结果的原因可能是竹叶的输入提高了土壤有机碳的含量,同时增加了土壤 C/N 比,因此土壤有机氮的含量提高;而生物质炭的输入虽然提高了土壤的固碳潜力,但由于其不易分解,因此使土壤 WSON 的含量降低<sup>[31]</sup>,其与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的相关性也明显降低。土壤 MBN 含量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量无显著相关性(表 1)。但在 Muhammad 等<sup>[32]</sup>研究中发现,在土壤中输入作物残余物,土壤 MBN 与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量具有显著负相关,而 Lou 等<sup>[33]</sup>在水稻田的研究中发现,输入作物残余物后,土壤 MBN 与  $\text{N}_2\text{O}$  通量具有显著正相关。以上研究结果存在的差异可能是因为土壤质地、土壤水分、样地类型等的不同,导致土壤矿化氮的速率不同,从而引起土壤氮库的差异所致<sup>[32-33]</sup>。

本研究结果表明,竹叶和生物质炭处理的土壤 WSOC 和 MBC 含量均比对照显著增加(图 2),这与前人<sup>[26, 34]</sup>的研究结果一致。生物质炭和竹叶处理的土壤 WSOC 与  $\text{N}_2\text{O}$  通量具有显著的正相关。Lin 等<sup>[35]</sup>和张蛟蛟等<sup>[36]</sup>也发现类似的情况。其原因可能是生物质炭具有不稳定成分,在试验过程中增加了土壤 WSOC 含量,土壤 WSOC 作为土壤重要的碳源,其含量的增加为土壤微生物提供了充足的养分和反应底物,提高了微生物活性,进而促进了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[35-36]</sup>。但是 3 种处理的土壤 MBC 含量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量均没有显著的相关性(表 1),这与张蛟蛟等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。但 Dabek-Szreniawska 等<sup>[37]</sup>对壤质沙土和 Lou 等<sup>[33]</sup>对水稻田的研究结果却与本试验结果相反,可能与研究的土壤质地以及生物质炭的材质等因素的不同有关。Muhammad 等<sup>[32]</sup>的研究发现,添加作物残余物后,土壤 MBC 与  $\text{N}_2\text{O}$  通量具有显著负相关。Lin 等<sup>[35]</sup>研究表明,水稻田、林地和丘陵山地的土壤 MBC 与  $\text{N}_2\text{O}$  通量均具有显著正相关,而在土壤含水量较低的果树林地(低于 32%)中二者则无显著的相关性。

上述研究表明,土壤 MBC 虽对土壤微生物的生长有显著影响,但可能不是影响土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的主要因素<sup>[4, 18]</sup>。土壤 WSOC 和 MBC 含量对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响会因土壤质地、水分状况、林地类型和管理措施等不同而有所不同<sup>[26, 32, 34]</sup>。

## 4 结论

在对照、竹叶和生物质炭处理下,板栗林土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量均呈现出明显的季节性变化特征,表现为夏、秋季节高,冬、春季节低。竹叶处理的板栗林土壤  $\text{NO}_3^-$ -N、WSOC、WSON、MBC 和 MBN 含量以及  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量显著增加,而生物质炭处理的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量以及  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量则显著降低。上述结果表明,输入竹叶和生物质炭可能是通过影响土壤碳库与氮库特征而影响土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量。由于生物质炭的类型和施用量等因素会显著影响土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量,其机理尚不明确。因此,今后将继续深入研究不同类型生物质炭以及不同施用量对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响,从土壤化学、微生物学等角度分析生物质炭输入对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响机理,从而为利用生物质炭输入技术减少人工林生态系统温室气体排放提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [R/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>. 2007-11-17.
- [2] 付晓青,李勇. 土壤氧化亚氮排放时空变异性及其方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 724-730.  
Fu X Q, Li Y. Spatiotemporal variability of soil nitrous oxide emission and its study methods: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 724-730.
- [3] Li Y F, Zhang J J, Chang S X, et al. Converting native shrub forests to Chinese chestnut plantations and subsequent intensive management affected soil C and N pools[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 312: 161-169.
- [4] Liu X, Chen C R, Wang W J, et al. Soil environmental factors rather than denitrification gene abundance control  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in a wet sclerophyll forest with different burning frequency[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 292-300.
- [5] 商素云,李永夫,姜培坤,等. 天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 659-665.  
Shang SY, Li Y F, Jiang P K, et al. Effects of the conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools [J]. Chinese Journal of Applied

- Ecology, 2012, 23 (3): 659–665.
- [6] 赵明, 孟京辉, 陆元昌. 我国人工林近自然经营的可行性与必要性[J]. 河北林果研究, 2013, 28 (2): 136–139.  
Zhao M, Meng J H, Lu Y C. The necessity and feasibility of Close-to-Nature Forest management for planation in China [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2013, 28 (2): 136–139.
- [7] Rogovska N, Laird D, Cruse R, *et al.* Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75 (3): 871–879.
- [8] Kammana C, Ratering S, Eckhard C, *et al.* Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41 (4): 1052–1066.
- [9] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, *et al.* Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia [J]. Plant and Soil, 2011, 345: 47–58.
- [10] Sohi S, Krull E, Lopez-Capel E, *et al.* A review of biochar and its use and function in soil [M]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 47–82.
- [11] 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, 23: 4844–4853.  
Zhang B, Liu X Y, Pan G X, *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, 23: 4844–4853.
- [12] Wu F, Jia Z, Wang S, *et al.* Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49: 555–565.
- [13] 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: 574–581.
- [14] Zhang A F, Bian R J, Hussain Q, *et al.* Chang in net global warming potential of a rice-wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China [J]. Ecosystem & Environment, 2013, 173: 37–45.
- [15] 李永夫, 姜培坤, 刘娟, 等. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响 [J]. 林业科学, 2010, 46 (12): 166–170.  
Li Y F, Jiang P K, Liu J, *et al.* Effect of fertilization on water-soluble organic C, N and emission of greenhouse gases in the soil of *Phyllostachys edulis* stands [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46 (12): 166–170.
- [16] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 991–999.
- [17] Cheng Y, Cai Z C, Chang S X, *et al.* Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N<sub>2</sub>O production in a cultivated Black Chernozem [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48: 941–946.
- [18] Li F, Cao X, Zhao L, *et al.* Short-term effects of raw rice straw and its derived biochar on greenhouse gas emission in five typical soils in China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 59 (5): 800–811.
- [19] Case S, Menamara N P, Reay D S, *et al.* The effect of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from a sandy loam soil—the role of soil aeration [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 125–134.
- [20] Karhu K, Mattila T, Bergstrom 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 & Environment, 2011, 140: 309–313.
- [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 Biology & Biochemistry, 2010, 74: 852–860.
- [22] 罗献宝, 张颖清, 徐浩, 等. 温带阔叶红松林表层土壤活性碳、氮库的季节动态 [J]. 生态与农村环境学报, 2012, 26 (1): 42–46.  
Luo X B, Zhang Y Q, Xu H, *et al.* Seasonal dynamics of soil active carbon and nitrogen pools in surface soil of temperate broad-leaved and Korean pine mixed forest [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 26 (1): 42–46.
- [23] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用 [J]. 生态学报, 2001, 21 (1): 136–142.  
Li S Q, Li S X. Effects of organic materials on maintaining soil microbial biomass nitrogen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (1): 136–142.
- [24] 闫德智, 王德建. 添加秸秆对土壤矿质氮量、微生物氮量和氮总矿化速率的影响 [J]. 土壤通报, 2012, 43 (3): 631–636.  
Yan D Z, Wang D J. Nitrogen mineralization of <sup>15</sup>N labeled straw added into the paddy soils in Tai-hu region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (3): 631–636.
- [25] 秦华, 李国栋, 叶正钱, 等. 集约种植雷竹林土壤细菌群落结构的演变及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2010, 21 (10): 2645–2651.  
Qin H, Li G D, Ye Z Q, *et al.* Evolution of soil bacterial community in intensively managed *Phyllostachys praecox* stand and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (10): 2645–2651.
- [26] Zavalloni C, Alberti G, Biasiol S, *et al.* Microbial mineralization of biochar and wheat straw mixture in soil: A short-term study [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 50: 45–51.
- [27] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S. Influence of biochars on flux of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from Ferrosol [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48 (7): 555–568.
- [28] Saario S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly

- affects  $N_2O$  emissions via soil moisture and plant N uptake[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 99–106.
- [29] Tang X L, Liu S G, Zhou G Y, *et al.* Soil-atmospheric exchange of  $CO_2$ ,  $CH_4$ , and  $N_2O$  in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 546–560.
- [30] 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.
- [31] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, *et al.* Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes [J]. *Chemosphere*, 2011, 85: 1464–1471.
- [32] Muhammad W, Vaughan S M, Dalal R C, *et al.* Crop residues and fertilizer nitrogen influence residue decomposition and nitrous oxide emission from a Vertisol [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47 (1): 15–23.
- [33] Lou Y, Ren L, Li Z. Effect of rice residues on carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a paddy soil of subtropical China [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, 178: 157–168.
- [34] 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 & Biochemistry*, 2012, 46: 73–79.
- [35] Lin S, Iqbal J, Hu R, *et al.* Differences in nitrous oxide fluxes from red soil under different land uses in mid-subtropical China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146: 168–178.
- [36] 张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 等. 施肥对板栗林土壤  $N_2O$  通量动态变化的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (16): 4939–4948.
- Zhang J J, Li Y F, Jiang P K, *et al.* Effect of fertilization on the dynamic of soil  $N_2O$  fluxes in Chinese chestnut stands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (16): 4939–4948.
- [37] Dabek-Szreniawska M, Balashov E. Seasonal changes in labile organic matter, mineral nitrogen, and  $N_2O$  emission in a loamy sand Orthic Luvisol cultivated under three management practices [J]. *International Agrophysics*, 2007, 21(2): 127.