植物营养与肥料学报 2013,19(3):745-752
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0326

施肥对板栗林土壤活性碳库和温室气体排放的影响

张蛟蛟[1,2], 李永夫[1,2*], 姜培坤[1,2], 周国模[1,2], 刘 娟[1,2]
(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: 在浙江省临安市典型板栗林试验地,利用静态箱-气相色谱法测定了不同施肥条件下板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率,同时测定了土壤水溶性有机碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)含量。初步探讨了施肥对板栗林土壤活性碳库与温室气体排放速率的影响,以及土壤温室气体排放速率与活性碳库之间的关系。本试验设置不施肥(CK)、无机肥(IF)、有机肥 (OF)和有机无机混合肥(OIF, 1/2 无机肥和 1/2 有机肥)4 个施肥处理。结果表明,施肥 1 个月后,与不施肥(CK)处理相比,无机肥(IF)、有机肥(OF)和有机无机混合肥(OIF)处理下土壤 CO_2 排放速率分别增加了 87%、38%和 61%, N_2O 排放速率分别增加了 101%、67%和 95%; 而施肥 6 个月后,与 CK 处理相比,IF、OF 和 OIF 处理下土壤 CO_2 排放速率分别增加了 51%、43%和 64%, N_2O 排放速率分别增加了 21%、29%和 47%。同时,施肥显著增加板栗林土壤 WSOC 和 MBC 含量($P<0.05$)。此外,土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率与 WSOC 含量均呈显著正相关($P<0.05$),而与 MBC 含量没有显著的相关性。因此,施肥引起板栗林地土壤 WSOC 含量增加可能是导致板栗林地土壤温室气体排放增加的重要原因之一。

关键词: 施肥; 板栗林; 水溶性有机碳; 微生物量碳; 温室气体
中图分类号: S724 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)03-0745-08

Effect of fertilization on labile carbon pools and emissions of greenhouse gas in soils of Chinese chestnut stands

ZHANG Jiao-jiao[1,2], LI Yong-fu[1,2*], JIANG Pei-kun[1,2], ZHOU Guo-mo[1,2], LIU Juan[1,2]
(*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: Soil greenhouse gas (CO_2 and N_2O) emission rates were analyzed by the method of static closed chamber/GC technique, and soil labile organic carbon pools, including water-soluble organic carbon (WSOC) and microbial biomass carbon (MBC) concentrations, were determined as well in the typical Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) stands of Lin'an, Zhejiang Province. There were four different fertilizer treatments, including no fertilizer (CK), inorganic fertilizer (IF), organic fertilizer (OF), and half organic plus half inorganic fertilizer (OIF). The objectives of this study were to investigate the effects on soil CO_2 and N_2O emission rates and soil labile organic carbon pools in different fertilization treatments and reveal the relationships between greenhouse gas emissions and soil labile carbon pools. The results show that the fertilization could significantly increase emissions of CO_2 and N_2O in Chinese chestnut stands ($P < 0.05$). Compared with the CK treatment, the CO_2 emission rates in IF, OF, and OIF treatments are increased by 87%, 38%, and 61%, respectively, after one

收稿日期: 2012-11-12 **接受日期:** 2013-02-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(31170576); 浙江省科技厅重点项目(2011C12019); 浙江省重点科技创新团队(2010R50030); 浙江农林大学青年教师创新团队项目(2009RC04)资助。
作者简介: 张蛟蛟(1987—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事森林生态系统碳循环与固碳减排研究。E-mail: zhangjiaojiaozafu@163.com
*通信作者 Tel: 0571-63740889, E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

month of fertilization, and are increased by 51%, 43%, and 64%, respectively, after six months of fertilization. Meanwhile, the N_2O emission rates in IF, OF, and OIF treatments are increased by 101%, 67% and 95%, respectively, after one month fertilization, and are increased by 21%, 29%, and 47%, respectively, after six months of fertilization. Additionally, the fertilization could significantly increase the WSOC and MBC concentrations ($P < 0.05$). The soil CO_2 and N_2O emission rates have significant positive correlations with soil WSOC concentrations ($P < 0.05$), but have no significant correlations with soil MBC concentrations. We suggest that increasing soil WSOC concentration by fertilization may contribute to increase soil greenhouse gas emission in Chinese chestnut stands.

Key words: fertilization; *Castanea mollissima;* water-soluble organic carbon (WSOC); microbial biomass carbon (MBC); greenhouse gas

CO_2 和 N_2O 是引起全球气候变暖重要的温室气体，大气中 CO_2 和 N_2O 浓度每年以 0.5% 和 0.2% 的速度不断递增[1]。土壤不仅是 CO_2 排放的重要源和汇，也是 N_2O 排放的重要源[2]。同时，森林土壤是陆地生态系统中最大的碳贮存库，维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%[3-4]。人工林经营措施（包括耕作、施肥、灌溉及土地利用变化等管理措施）通过改变土壤理化性状来影响土壤温室气体的排放和碳库特征[5]。其中，施肥是人工林经营管理中最重要的调控手段之一。研究表明施肥对于土壤肥力的维持及作物产量与品质的提高具有非常重要的意义[6]，但施肥对土壤碳库和温室气体的排放的影响研究还没有定论。如 Mo 等[7]在亚热带森林的研究发现，土壤中施加氮肥，土壤呼吸速率减弱，土壤 CO_2 排放减少；而 Iqbal 等[6]在亚热带森林的研究结果表明，施用氮肥显著增加土壤温室气体排放；而 Lopez-Valdez 等[8]在太阳花的培养试验中发现，与不施肥处理相比，单施尿素处理对土壤 CO_2 排放速率没有显著影响。这是由于施肥对土壤温室气体排放的影响原因比较复杂造成的。因此，施肥对土壤温室气体排放和土壤碳库的影响还有待于进一步研究。

板栗（*Castanea mollissima*）是中国重要的经济林种，也是浙江省三大经济林种之一[9]。目前集约化经营是板栗林重要的经营方式，施肥是板栗林经营最重要的调控手段之一。虽有施肥增加板栗产量和土壤肥力的报道[10]，但施肥对板栗林土壤活性碳库与温室气体排放的影响还鲜有报道。因此，本试验利用静态箱－气相色谱法，测定了不同无机肥和有机肥处理下板栗林地土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率，同时测定了土壤水溶性有机碳（WSOC）和微生物量碳（MBC）含量。旨在探明不同施肥处理对板栗林土壤温室气体排放的影响，揭示土壤温室气体排放速率与土壤活性碳库特征之间的相互关系，为综合评价经济林生态系统的碳汇功能提供基础资料与科学依据。

1 试验与方法

1.1 试验地概况

试验地选择在浙江省临安市青山湖地区的天泽果园（119°86′ E、30°25′ N）。该地区属于典型亚热带季风气候，气候温和（近 10 年平均气温为 15.9 ℃），四季分明（七月最热，平均气温 28.1 ℃；1 月最冷，平均气温 3.4 ℃），雨量充沛（近 10 年年平均降水量为 1450 mm），年有效积温为 5774 ℃，年日照时数为 1774 h。研究区为低山丘陵地形，海拔为 150～250 m。样地土壤类型为红壤土类（黄红壤亚类），土壤有机质含量 25.7 g/kg、全氮 1.84 g/kg、碱解氮 98.32 mg/kg、有效磷 9.86 mg/kg、速效钾 101.2 mg/kg、pH 值 4.64（用常规方法测定[11]）。

试验样地的板栗林样地是由常绿阔叶林样地改造过来，林龄为 18 a，种植密度 540 plant/hm^2，平均胸径 14.1 cm，林下有少量灌木杂草等。采用中等强度的集约经营模式。每年 5 月的中下旬左右对板栗林进行施肥，肥料通过撒施的方式施于土壤表面，然后进行翻耕入土操作，翻耕深度一般为 30 cm。

1.2 试验设计

2011 年 5 月，在板栗林地选择地理条件（主要考察土壤类型、坡度与坡向）基本一致的区域作为试验样地，并布置施肥试验。试验共设置 4 个处理：1）不施肥（CK）；2）无机肥（IF）；3）有机肥（OF）；4）有机肥无机混合肥（OIF，1/2 无机肥和 1/2 有机肥）。各肥料处理的施氮量均为 N 87 kg/hm^2，有机无机混合肥处理的有机氮和无机氮比例为 1∶1，具体施肥量见表 1。试验中所使用的有机肥为浙江省德清东鑫复混肥料有限公司生产的商品有机肥（含

N 3%、$P_2O_5$1.8%、K_2O 2.6%、C 35.1%)。有机肥施用量以氮含量为标准进行计算,其中磷、钾不足的部分用化学磷肥(过磷酸钙)和化学钾肥(氯化钾)补充。试验小区面积为256 m^2(16 m × 16 m),4 次重复,采用随机区组设计,每个小区之间间隔距离为3 m。6 月3 日进行肥料处理,采用撒施的方法进行施肥,并翻耕入土。翻耕后,进行静态箱的布置(每个小区布置 1 个静态箱)。为了测定板栗林果实生长季前后土壤碳库和土壤温室气体排放的变化特征,将土壤和气体采样时间安排在7 月3 日(施肥后 1 个月)和 12 月 4 日(施肥后 6 个月)进行。测定板栗林样地土壤 CO_2 和 N_2O 的排放速率,并测定 WSOC 和 MBC 含量。

表 1　试验各处理肥料用量(kg/hm^2)

Table 1　The amount and composition of different fertilizer treatments

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride
不施肥 CK	0	0	0	0
无机肥 IF	0	188	488	135
有机肥 OF	2906	0	52	9
有机无机混合肥 OIF	1453	94	270	72

1.3　采样及测定方法

本试验采用静态箱 - 气相色谱法对温室气体(CO_2 和 N_2O)通量进行分析测定。采样气袋采用大连光明化工设计研究院生产的铝箔采气袋。采样箱为组合式,即由顶箱和底座两部分构成,制作材料均为 PVC 板,静态箱的规格尺寸为 30 cm × 30 cm ×30 cm[12]。采样时间一般在上午 9:00 ~ 11:00 之间[12]。采集气体前,首先用充气法检查气袋的气密性,选取气密性良好的气袋到野外进行气体取样。气体采样的操作步骤如下:将顶箱插入底座凹槽中,在底座凹槽中倒入适量蒸馏水,起到密封的效果。然后盖上顶箱,分别于 0、10、20、30 min 用 60 mL 注射器进行气体取样。采样时,为了使静态箱内气体充分混合均匀,先将注射器插入采集箱的硅胶孔来回抽动 2 ~ 3 次,随后再抽出 60 mL 空气注入真空气袋内,密封。采气体样同时,监测大气温度、地表和 5cm 土层温度,在各小区按五点取样法采集 0—20 cm 土样,最后将气样和土样一起带回实验室进行测定分析。气样中的 CO_2 和 N_2O 浓度利用岛津 GC - 2014 气相色谱仪进行测定[13]。温室气体排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{d_t}$$

式中:F 为被测气体的排放通量;ρ 为标准状态下被测气体的浓度;A 为箱体底面积;V 为箱体体积;$\frac{dC_t}{d_t}$ 为单位时间取样箱内被测气体浓度的变化量;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 为取样时箱内的实际气温和气压。

土壤质量含水量采用 105℃烘干法进行测定。土壤水溶性有机碳(WSOC)含量的测定方法参照 Wu 等[14]的方法。具体方法如下:称取 20 g 新鲜土样,按照水土比 2∶1 进行浸提,在 25 ℃下以 100 r/m振荡 0.5 h,于 8000 × g 离心 10 min 后通过 0.45 μm 滤膜过滤到塑料瓶中,然后用有机碳分析仪(TOC - V_{CPH},岛津公司)测定滤液中的有机碳含量。土壤微生物量碳(MBC)含量的测定采用氯仿熏蒸直接提取[15],对照土壤和熏蒸后土壤用 0.5 mol/L K_2SO_4 提取(土液比为 1∶5),滤液中的有机碳含量采用有机碳分析仪(TOC - V_{CPH},岛津公司)测定。土壤 MBC 含量 =(熏蒸土样含碳量 - 未熏蒸土样含碳量)/0.45,0.45 为换算系数。

1.4　数据处理

文中数据均为 4 次重复的平均值。试验数据采用单因素方差分析(One-way ANOVA),新复极差法进行多重比较(显著性水平 $P < 0.05$);用 Pearson 相关分析法分析土壤温室气体排放速率与 WSOC 和 MBC 含量的相关性。数据均用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 施肥对板栗林地土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率的影响

由图1可见,无论是7月份(施肥1个月后)还是12月份(施肥6个月后),与不施肥处理(CK)相比,施肥处理对板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 的排放速率均有显著性影响($P < 0.05$)。土壤 CO_2 的排放速率在同一施肥处理条件下,12月份与7月份相比下降了54%~64%。施肥1个月后,与CK处理[CO_2 排放速率为420.61 mg/(m^2·h)],IF、OF和OIF处理的土壤 CO_2 排放速率分别提高了87%、38%和61%。施肥6个月后,与CK处理[CO_2 排放速率为188.7 mg/(m^2·h)]相比,IF、OF和OIF处理下土壤 CO_2 排放速率分别增加了51%、43%和64%(图1A、图1B)。对于 N_2O 的排放,同一施肥处理条件下,12月份与7月份相比 N_2O 的排放速率下降了68%~81%。施肥1个月后,与CK处理[N_2O 排放速率为43.5 μg/(m^2·h)]相比,IF、OF和OIF处理下土壤 N_2O 排放速率分别增加了101%、67%和95%。施肥6个月后,与CK处理[13.9 μg/(m^2·h)]相比,IF、OF和OIF处理下土壤 N_2O 排放速率分别提高了21%、29%和47%(图1C、图1D)。

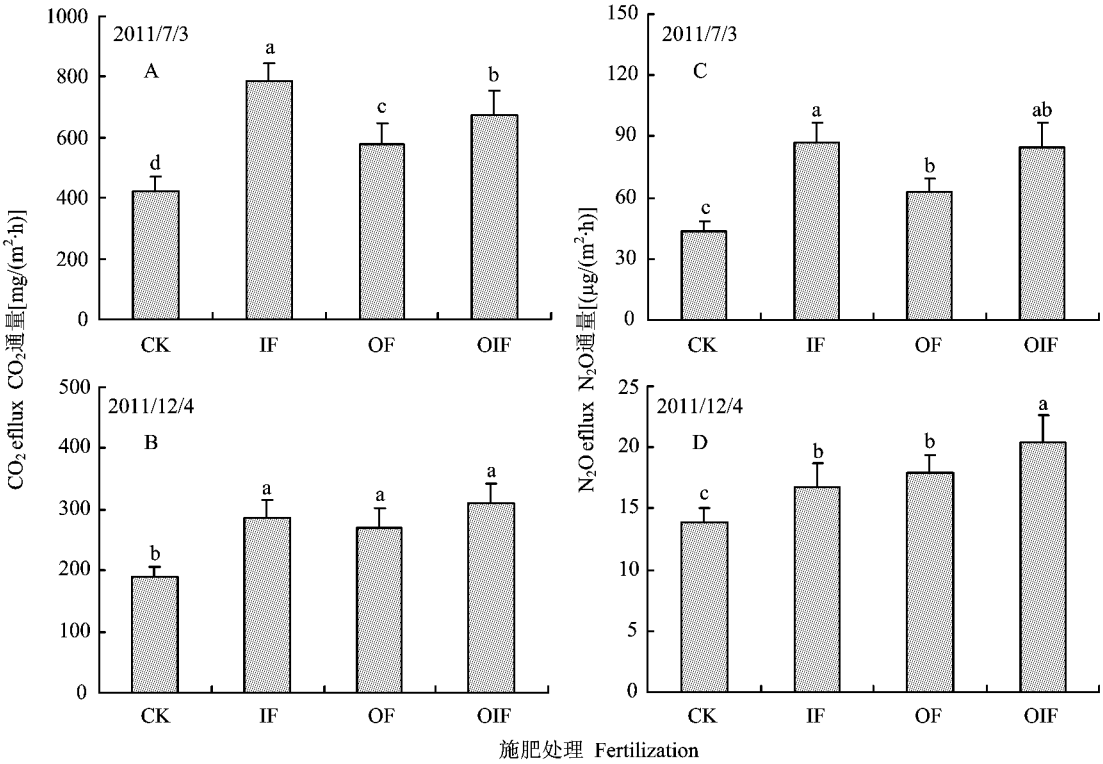

图1 不同施肥处理对板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 通量的影响

Fig.1 Effects of different fertilizer treatments on the CO_2 and N_2O fluxes from soils of Chinese chestnut stands

[注(Note):误差线表示标准差($n = 4$)Error bars show standard deviation ($n = 4$);柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level.]

2.2 施肥对板栗林地土壤水溶性有机碳和土壤微生物量碳的影响

从图2可以看出,与CK处理相比,施肥处理对土壤水溶性有机碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)均有显著性影响($P < 0.05$)。同一施肥处理下,12月份与7月份相比,WSOC含量减少了21%~32%。施肥1个月后,IF、OF和OIF处理下土壤WSOC含量分别为CK处理(83.7 mg/kg)的1.51、2.07和1.88倍,施肥6个月后,IF、OF和OIF处理分别为CK处理(65.73 mg/kg)的1.33、1.92和1.62倍(图2A、图2B)。同一施肥处理下土壤微生物量碳(MBC)含量,12月份与7月份相比增加了28%~54%。施肥1个月后,IF、OF和OIF处理土壤MBC含量分别是CK处理(220.7 mg/kg)的1.12、1.49和1.83倍(图4A);施肥6个月后,IF、OF和OIF处理分别是CK处理(316.1 mg/kg)的1.20、1.52

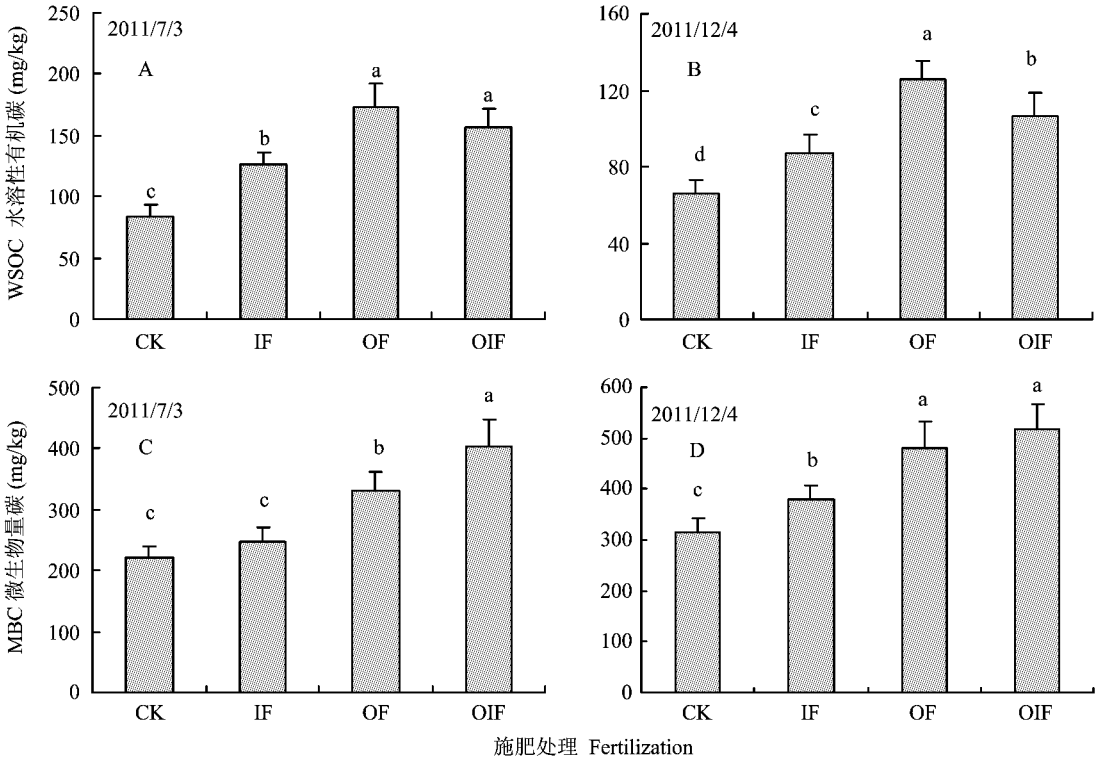

图 2　不同施肥处理对板栗林土壤水溶性有机碳和微生物量碳含量的影响

Fig. 2　Effects of different fertilizer treatments on the WSOC and MBC concentrations in Chinese chestnut stands

[注(Note):误差线表示标准差(n = 4)Error bars show standard deviation (n = 4);柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% levels, respectively.]

和 1.63 倍(图 2C、图 2D)。

2.3　板栗林地土壤水溶性有机碳、微生物量碳与温室气体排放的相关性

图 3 显示,土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率与 WSOC 含量呈显著正相关($P < 0.05$),而与 MBC 含量之间没有明显的相关性。

3　讨论

3.1　施肥对土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率的影响

本研究结果表明,同一施肥处理下,板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率在 7 月份明显高于 12 月份(图 1),这与前人的研究结果相一致[6,16]。这主要是因为土壤温度、土壤水分以及土壤底物(如水溶性有机碳、有机质及土壤氮等)的变化引起的[16-19]。由于夏季温度高,土壤微生物活性和根系活性强,微生物的呼吸和根系呼吸作用也较强,使土壤 CO_2 排放增加[16];另一方面,夏季植物生长迅速,根系分泌物增加,可溶性有机物质增加,进而使土壤 CO_2 和 N_2O 排放增加[16-17];也有可能是夏季土壤有机碳氮的矿化速率快,碳、氮营养的有效性增强,为微生物的生长繁殖提供了营养源和能源,进而产生更多的温室气体[17-18]。此外,亚热带地区夏季高温多雨,为微生物了提供适宜的生长环境,由此引起硝化作用增强,局部也有可能形成厌氧环境促进反硝化作用的进行,最终表现为土壤 N_2O 排放量增加[18]。反之,冬季温度低,土壤有机物质矿化速率降低,土壤水分减少,这些都会减弱温室气体的排放速率[17]。就不同施肥处理而言,本研究发现,施肥对板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 排放具有明显的促进作用($P < 0.05$)(图 1),与前人的研究结果一致[16,20]。其原因一方面是因为施用氮肥能为土壤微生物硝化作用提供足够的氮源,进而使硝化作用加强,N_2O 排放增加[20];另一方面,施肥可以提高土壤微生物利用碳源的效率,使土壤有机质矿化作用加快,从而增加了土壤 CO_2 的排放[21];此外,施肥可以促进植物快速生长,根系呼吸速率加快,进而表现为土壤 CO_2 排放的增加[16]。本研究还发现,施肥一个月后,三种施肥处理的土壤 CO_2 和 N_2O 排放存在显著差异,表现为无机肥处理的温室气体排放速率最高,有机无机混合肥次之,有机肥最低。这可能是由于无机肥(尿素)短期内容易被植物吸收利用,促进植物生长,进而使土壤呼吸作用加强[21];

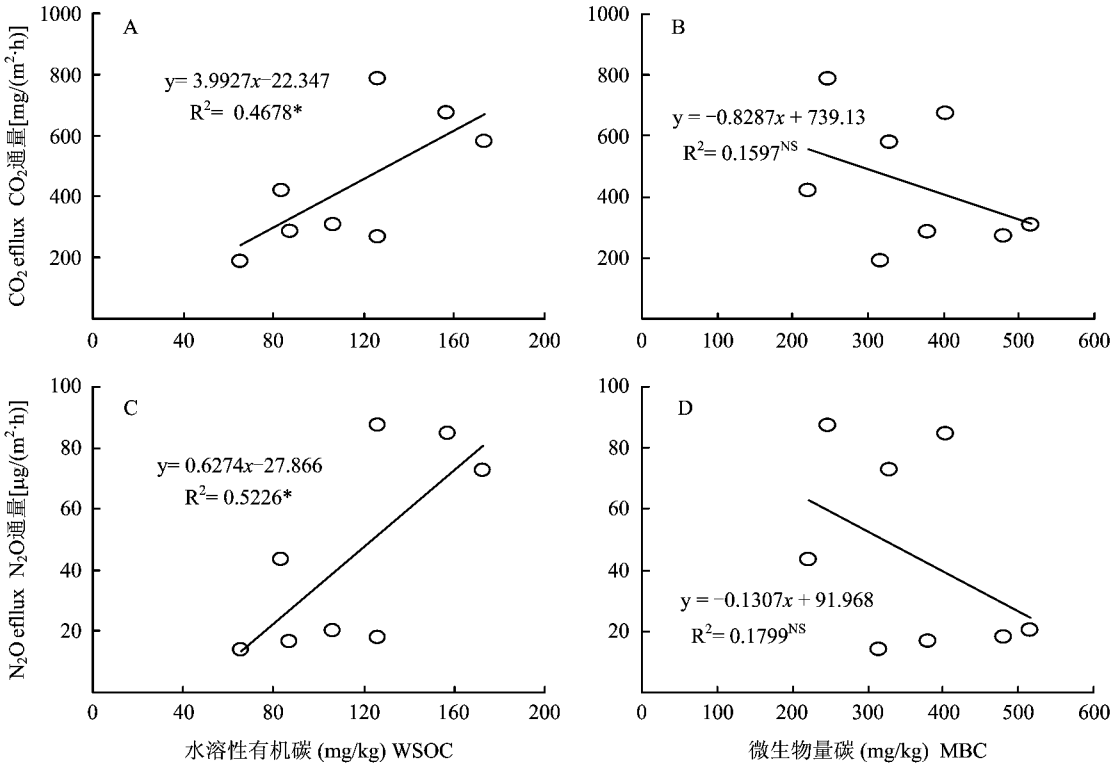

图3 板栗林地土壤 CO_2 和 N_2O 通量与水溶性有机碳和微生物量碳含量的相关性

Fig.3 Correlations between greenhouse gas (CO_2 and N_2O) fluxes and labile carbon (WSOC and MBC) pools in soils of Chinese chestnut stands

[注(Note): *—在5%水平显著 Significant at the 5%; NS—不显著 Not significant.]

同时,微生物可以迅速利用无机氮肥,其生长繁殖速度加快,一定程度上也增加了呼吸作用和反硝化作用[22-23];此外,尿素也可以在短时间内发生水解作用,进而使 N_2O 的排放量增加[23]。然而也有不少研究结果表明施肥对土壤温室气体排放速率没有显著影响[24],甚至降低了土壤呼吸速率[25],这种差异可能与施肥时间,肥料种类以及植被类型不同有关[6]。因此,施肥一个月后和施肥半年后板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 排放存在一定差异可能是由土壤温度、土壤水分、植物生长以及不同肥料性质的不同引起的。

3.2 施肥对土壤水溶性有机碳和微生物量碳的影响

土壤水溶性有机碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)是土壤中重要的活性有机碳指标。大量的研究表明,施肥可以显著增加土壤 WSOC 和 MBC 含量,且无机有机配施或有机肥处理明显比单纯施用无机肥显著提高 WSOC 和 MBC 含量[26-28],本研究也得出了相似的研究结论(图2)。造成这一结果的原因可能是,一方面肥料的输入促进了土壤微生物的生长繁殖,增加根系生物量及根系分泌物,使 WSOC 和 MBC 含量增加;另一方面,有机肥相比单施化肥而言,不仅为微生物提供了充分的氮源,同时也提供充足的碳源,刺激土壤微生物活动,增加了微生物源的溶解性有机化合物。此外,可能有机肥本身含有一定数量的溶解性有机化合物,进而增加了土壤水溶性有机碳和微生物量碳含量。而本试验研究中,与7月份相比,12月份土壤水溶性有机碳含量下降了,而微生物量碳含量却增加了,这与前人的研究结果一致[29]。这可能是由于温度的季节性变化引起的,如 Iqbal 等[29]研究结果表明,土壤水溶性有机碳与土壤温度正相关,同时,王国兵等[30]研究也表明土壤微生物量碳与土壤温度负相关。

3.3 土壤温室气体排放与土壤水溶性有机碳和微生物量碳的相关性

本研究结果表明,板栗林土壤 CO_2 和 N_2O 排放速率与土壤 WSOC 含量呈明显的正相关($P < 0.05$)(图3A,图3C),这与李永夫等[12]在毛竹林土壤以及 Iqbal 等[29]在果树与林地土壤中的研究结果相似。这可能是因为土壤 WSOC 含量也具有与温

室气体排放相似的季节性变化引起的[29]，WSOC 含量高时，可以为微生物生长提供充足的营养，促使微生物生长加快和活性增强，进而增加了微生物呼吸产生的 CO_2 和硝化菌与反硝化菌代谢产生的 N_2O[12,31]。但也有研究表明，稻田土壤 CO_2 排放与 WSOC 含量之间没有显著的相关性[32]。这主要是由于土壤类型、植被类型以及人工经营措施的不同造成的。本研究还发现，土壤 CO_2 排放速率与土壤 MBC 含量之间没有明显的相关性（图 3B），这与 Iqbal 等[29]在山地土壤中的研究结果一致。然而，李海防等[33]和葛高飞等[34]的研究却发现，土壤 CO_2 排放速率与 MBC 之间呈正相关。本研究中，板栗林地土壤 N_2O 排放速率与土壤 MBC 含量之间相关性不明显（图 3D），这和 Lin 等[35]在亚热带地区果园中的研究结果相似。但 Lin 等[35]在林地和山地土壤上的研究结果表明，土壤 N_2O 排放速率与土壤 MBC 含量之间具有显著相关性。这可能是由于土壤温室气体排放主要受到温度和 WSOC 的影响，从而掩盖了 MBC 对温室气体排放的影响作用[31,35]。总之，土壤温室气体排放是土壤因子和人为因素等综合影响的结果，如施肥、植物类型、土壤类型、微生物活性、微生物种类等因素的差异都会对温室气体排放产生不同的影响[33]。

4　小结

1）施肥措施不仅显著增加了板栗林地土壤温室气体（CO_2 和 N_2O）排放速率，也显著增加了板栗林地土壤水溶性有机碳和微生物量碳的含量。

2）板栗林土壤温室气体（CO_2 和 N_2O）排放速率与水溶性有机碳含量具有显著相关性，而与土壤微生物量碳含量的相关性不显著。

参 考 文 献：

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: the Physical Science Basis[R]. London, England: Cambridge University Press, 2007.

[2] Tang XL, 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 Biol., 2006, 12: 546-560.

[3] Cao M, Woodward. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their response to climate change[J]. Global Change Biol., 1998, 4: 185-198.

[4] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. Plant Cell Environ., 1999, 22: 715-740.

[5] 闫美芳，张新时，江源，等. 主要管理措施对人工林土壤碳的影响[J]. 生态学杂志，2010，29 (11)：2265-2271.
Yan M F, Zhang X S, Jiang Y *et al*. Effects of management practices on forest plantation soil carbon: a review[J]. Chin. J. Ecol., 2010, 29 (11): 2265-2271.

[6] Iqbal J, Hu R G, Lin S *et al*. CO_2 emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. Agric. Ecosys. Environ., 2009, 131: 292-302.

[7] Mo J M, Zhang W, Zhu W X *et al*. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. Global Change Biol., 2008, 14: 403-412.

[8] López-Valdez F, Fernández-Luqueño F, Luna-Suárez S *et al*. Greenhouse gas emissions and plant characteristics from soil cultivated with sunflower and amended with organic or inorganic fertilizers[J]. Sci. Total Environ., 2011, 412-413, 257-264.

[9] 姜培坤，徐秋芳，邬奇峰，等. 施肥对板栗林土壤养分和生物学性质的影响[J]. 浙江林学院学报，2007，24 (4)：445-449.
Jiang P K, Xu Q F, Wu Q F *et al*. Effects of fertilization on soil properties under Castanea mollissima plantation[J]. J. Zhejiang For. Coll., 2007, 24 (4): 445-449.

[10] 陈光水，杨玉盛，吕萍萍，等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. 生态学报，2008，28 (4)：1748-1760.
Chen G S, Yang Y S, Lü P P *et al*. Regional patterns of soil respiration in China's forests[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28 (4): 1748-1760.

[11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，1999. 146-226.
Lu R K. Analysis methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. 146-226.

[12] 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]. Sci. Silv. Sin., 2010, 46 (12): 166-170.

[13] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4, CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. Adv. Atmos. Sci., 2003, 20 (5): 842-844.

[14] Wu J S, Jiang P K, Chang S X *et al*. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China[J]. Canadian J. Soil Sci., 2010, 90 (1): 27-36.

[15] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 703-707.

[16] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z *et al*. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N_2O and CO_2 emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. Agric. Sci. Chi., 2011, 10 (11): 1748-1757.

[17] Lin S, Iqbal J, Hu R G *et al*. Nitrous oxide emissions from rape field as affected by nitrogen fertilizer management: A case study in Central China [J]. Atmos. Environ., 2011, 45: 1775-1779.

[18] Yan M F, Zhang X S, Jiang Y *et al*. Effects of management practices on forest plantation soil carbon: a review[J]. Chi. J. Ecol., 2010, 29 (11): 2265-2271.

[19] Peng Q, Dong Y, Qi Y *et al*. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration in temperate grassland in Inner Mongolia, China [J]. Environ. Earth Sci., 2011, 62: 1163-1171.

[20] 黄晶, 李冬初, 刘淑军, 等. 长期施肥下红壤旱地土壤 CO_2 排放及碳平衡特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3), 602-610.
Huang J, Li D C, Liu S J *et al*. Characteristics of soil CO_2 emission and carbon balance under long-term fertilization in red soil[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 10 (11): 1748-1757.

[21] Fisk M C, Fahey T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests[J]. Biogeochemistry, 2001, 53: 201-223.

[22] Meijide A, Cárdenas L M, Sánchez-Martín L *et al*. Carbon dioxide and methane fluxes from a barley field amended with organic fertilizers under Mediterranean climatic conditions [J]. Plant and soil, 2010, 328: 353-367.

[23] Jassal R S, Andrew Black T, Trofymow J A *et al*. Soil CO_2 and N_2O flux dynamics in a nitrogen-fertilized Pacific Northwest Douglas-fir stand[J]. Geoderma, 2010, 157: 118-125.

[24] López-Valdez F, Fernández-Luqueño F, Luna-Suárez S *et al*. Greenhouse gas emissions and plant characteristics from soil cultivated with sunflower and amended with organic or inorganic fertilizers[J]. Sci. Total Environ., 2011, 412-413: 257-264.

[25] Mo J M, Zhang W, Zhu W X *et al*. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. Global Change Biol., 2007, 14: 1-10.

[26] 吕美蓉, 李忠佩, 刘明, 等. 长期不同施肥处理对红壤水稻土微生物量氮周转的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45 (2): 275-282.
Lü M R, Li Z P, Liu M *et al*. Soil microbial biomass n turnover after long-term fertilization in paddy field[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45 (2): 275-282.

[27] 曹宏杰, 汪景宽. 长期不同施肥处理对黑土不同组分有机碳的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2012, 3: 39-41.
Cao H J, Wang J K. Effect of long-term fertilization on different fractions of organic carbon on Black soil[J]. Terr. Nat. Res. Study, 2012, 3: 39-41.

[28] 门倩, 海江波, 岳忠娜, 等. 化肥减量对玉米田土壤酶活性及微生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 6 (40): 133-140.
Men Q, Hai J B, Yue Z N *et al*. Effects on maize field soil enzyme activities and microbial biomass of chemical fertilizer reduction[J]. J. A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2012, 6 (40): 133-140.

[29] Iqbal J, Hu R G, Du L J, *et al*. Differences in soil CO_2 flux between different land use types in mid-subtropical China[J]. Soil Biol. Biochem., 2008, 40: 2324-2333.

[30] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 37-42.
Wang G B, Ruan H H, Tang Y F *et al*. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and Pinus taeda plantation in north subtropical area of China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(1): 37-42.

[31] Liu X, Chen C R, Wang W J *et al*. Soil environmental factors rather than denitrification gene abundance control N_2O fluxes in a wet sclerophyll forest with different burning frequency[J]. Soil Biol. Biochem., 2012, http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.009.

[32] 杜丽君, 金涛, 阮雷雷, 等. 鄂南4种典型土地利用方式红壤 CO_2 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2007, 28 (7): 1607-1613.
Du L J, Jin T, Ruan L L *et al*. CO_2 fluxes from red soil under four land use types in mid-subtropical, China [J]. Environ. Sci., 2007, 28 (7): 1607-1613.

[33] 李海防. 华南地区4种典型人工林土壤 CO_2 和 CH_4 通量研究[J]. 浙江林业科技, 2011, 31 (2): 6-12.
Li H F. Study on soil CO_2 and CH_4 fluxes in four typical plantations in Southern China [J]. J. Zhejiang For. Sci. Technol., 2011, 31 (2): 6-12.

[34] 葛高飞, 梁永超. 玉米生长过程中施肥对土壤呼吸和微生物量碳的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (18): 73-78.
Ge G F, Liang Y C. Effect of fertilization on soil respiration and microbial biomass carbon during maize growth period[J]. Chi. Agric. Sci. Bull., 2011, 27 (18): 73-78.

[35] Lin S, Iqbal J, Hu R G *et al*. Differences in nitrous oxide fluxes from red soil under different land uses in mid-subtropical China [J]. Agric. Ecosys. Environ., 2012, 136: 40-48.