植物营养与肥料学报 2014,20(5):1262-1270
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0523

施肥对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响

陈雪双,刘 娟*,姜培坤,周国模,李永夫,吴家森
(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)

摘要:【目的】N_2O 是重要的温室气体,其增温潜势是 CO_2 的 298 倍,而且破坏臭氧层。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,占全球陆地面积的 33%,森林土壤 N_2O 排放对全球气候变化有重大的影响。山核桃(*Carya cathayensis*)是非常重要的经济林,是山核桃主产区农民的主要经济来源。近年来,农民采取施用无机肥和有机肥等措施来提高山核桃产量,但施肥对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响尚不清楚,本文以不施肥作为对照(CK),研究单施有机肥(Organic fertilizer, OF)、单施化肥(Inorgnaic fertilizer, IF)、有机无机肥配施(Organic fertilizer and Inorgnaic fertilizer, OIF)对山核桃林地土壤 N_2O 气体排放的影响。**【方法】**利用静态箱-气相色谱法对山核桃林地土壤 N_2O 排放通量进行了为期 1 年的测定。采样箱为组合式,即由底座、顶箱组成,均用 PVC 板做成,面积为 30 cm×30 cm,高度为 30 cm。气体样品采集频率基本为每月 1 次,采集气体时,将采集箱插入底座凹槽(凹槽内径和深度均为 5 cm)中,用蒸馏水密封,分别于关箱后 0、10、20、30 min 采集,用注射器抽样 60 mL 置于气袋,带回实验室用岛津 GC-2014 气相色谱仪进行测定,检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器温度为 250℃。**【结果】**山核桃林地不同施肥土壤 N_2O 排放通量均呈现明显的季节性变化,以夏季最高、冬季最低。土壤 N_2O 的排放通量在 N - 0.021 ~ 0.161 mg/(m^2·h)之间变化,不同处理土壤 N_2O 年累积排放量依次为单施有机肥 > 单施化肥 > 有机无机肥配施 > 对照,对应值分别为 N 2.17、2.01、1.94 和 0.94 kg/(hm^2·a)。与对照相比,施肥处理显著增加 N_2O 的排放($P<0.05$),但是各施肥处理 N_2O 排放量之间的差异不显著。单施有机肥和有机无机肥配施处理土壤 N_2O 排放通量与土壤水溶性有机碳含量和微生物量碳呈显著相关关系($P<0.05$),而单施化肥和对照则无显著相关性。土壤 N_2O 排放通量与地下 5 cm 处土壤温度均显著相关($P<0.05$),而土壤 N_2O 排放与土壤含水量间没有显著相关性。**【结论】**施肥显著促进了山核桃林地土壤 N_2O 排放,不同施肥处理之间山核桃林地土壤 N_2O 排放无显著差异。添加有机肥引起土壤水溶性有机碳和微生物碳的增加可能是有机肥增加山核桃林地土壤 N_2O 排放速率的主要原因之一。

关键词:山核桃;N_2O 排放;施肥;水溶性有机碳;微生物量碳
中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2014)05-1262-09

Effects of fertilization on soil N_2O flux in Chinese *Carya cathayensis* stands

CHEN Xue-shuang, LIU Juan*, JIANG Pei-kun, ZHOU Guo-mo, LI Yong-fu, WU Jia-sen
(*Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China*)

Abstract:【Objectives】N_2O is a potent greenhouse gas with global warming potentials (GWP) 298 times greater than that of carbon dioxide (CO_2) on a 100-year horizon. Moreover, increasing atmospheric N_2O is an important factor in stratospheric ozone depletion. As an important component of terrestrial ecosystems, forest ecosystems constitute about 33% of the global land surface, emitting between N_2O-N 2.4-5.7 Tg/yr into the atmosphere. *Carya cathayensis* is one of the popular nut food tree species in subtropical China. To achieve maximum yield and economic return, chemical and organic fertilizers have been applied in recent years. However, there is little information on the effects of management practices on soil N_2O emissions. The objective of this study was to

收稿日期:2013-07-23 **接受日期:**2013-11-28
基金项目:浙江省重大科技专项(2011C12019);国家自然科学基金(30972356);浙江省科技创新团队项目(2012R10030-11);浙江农林大学人才启动基金(2351000981,2044010005);浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室开放基金(KFJJ2012002)。
作者简介:陈雪双(1988—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事土壤资源与生态环境方面研究工作。E-mail: lolitachen2013@126.com
* 通信作者 Email: liujuan@zafu.edu.cn; ljuan1978@126.com

evaluate the effects of fertilizer application (OF, OIF, IF, CK) on soil N_2O emission from *Carya cathayensis* orchards in subtropical China. **【Methods】** A close-chamber method and gas chromatography techniques were used to determine effluxes of N_2O in the four replicate plots of each plot. The static chamber consisted of a permanently installed base box (0.3 m × 0.3 m × 0.1 m) with a U-shaped groove (50 mm wide and 50 mm deep) at the top of edge to hold a removable cover box (0.3 m × 0.3 m × 0.3 m). Both the base and cover boxes were made of dark polyvinyl chloride (PVC) panels, as thick as 5 mm. Prior to gas sampling, the cover box was placed on the base and the groove was filled with distilled water to a depth of 20 mm, acting as an air seal. Gas samples were taken with 60 ml plastic syringes attached to a 3-way stopcock at 0, 10, 20, and 30 minutes following chamber closure, then injected into evacuated bags made of inert aluminium-coated plastic. N_2O concentration in the samples was analysed in the laboratory using gas chromatography equipped with a electron capture detector (ECD). The temperature of detector was 250℃. **【Results】** The results showed that N_2O fluxes from soil under different fertilization treatments exhibited a strong seasonal pattern, with the maximum values being observed during the summer while the minimum values were observed during the winter. N_2O emissions were between N −0.021 ~ 0.161 mg/(m^2 · h), the calculated annual emissions of N_2O were OF > IF > OIF > CK, N 2.17 kg/(ha · a) >2.01 kg/(ha · a) > 1.94 kg/(ha · a) > 0.94 kg/(ha · a). It was interesting to note that fertilization treatments increased significantly the emissions of soil N_2O ($P < 0.05$) compared with the control. However no significant difference was observed between the fertilizer treatments. Additionally, the content of the WSOC and MBC from the OIF and OF treatments had a significant correlation with the emissions of the soil N_2O ($P < 0.05$), but there was no significant correlation between the content of the WSOC and MBC from the IF and CK treatments and the emission of the soil N_2O. There was a significant positive relationship between soil N_2O emission and the soil temperature at 5 cm depth. No significant correlation was found between soil N_2O flux and soil moisture. **【Conclusions】** Fertilizer application enhanced soil N_2O emission. There was no significant difference between OF, OIF and IF. The increase of soil water soluble organic carbon and microbial biomass carbon caused by organic fertilizer applied might be one of the main reasons that enhanced soil N_2O emission.

Key words: *Carya cathayensis*; N_2O flux; fertilization; water soluble organic carbon; microbial biomass carbon

N_2O 是仅次于 CO_2 的主要温室气体之一,单分子 N_2O 的增温效应约是 CO_2 的 298 倍,以每年 0.25% 的速率增加,对气候变暖的贡献率约为 7%,森林土壤是其主要排放源[1]。土壤中 N_2O 排放主要来源于土壤微生物的硝化和反硝化作用[2]。硝化作用是土壤中的 NH_4^+-N(或 NH_3)在好气微生物作用下氧化为硝酸盐的过程,这一过程的主要产物为 NO_3^-,也常有微量的 N_2O 产生。反硝化作用是指微生物在厌氧条件下的硝酸呼吸过程,是土壤中氮素转化的最主要过程之一,在这一过程中,反硝化微生物将 NO_3^-、NO_2^-,或者 N_2O 作为呼吸过程的末端电子受体,并将其还原为 NO_2^-、NO、N_2O 或者是 N_2[3]。影响土壤硝化和反硝化作用的诸多因素同时影响土壤 N_2O 的排放,例如施肥、温度、水分、水溶性有机碳、微生物量碳等[4-7,9],这些因子对森林生态系统(特别是人工林)土壤 N_2O 排放的影响已有报道,发现不同施肥处理对土壤 N_2O 的排放影响不一。Zhang 等[8]研究表明常绿阔叶林中氮增加后土壤 N_2O 排放显著提高。李永夫等[7]研究发现亚热带毛竹林地单施尿素对 N_2O 排放有显著影响,而施过磷酸钙和氯化钾处理对 N_2O 排放无显著影响,随着施肥量的增加,N_2O 排放速率呈显著增加趋势。张蛟蛟等[9]研究发现板栗林土壤施肥处理显著提高土壤 N_2O 年均通量和年累积量。因此研究不同施肥处理对森林土壤 N_2O 排放的影响具有重要的意义。

山核桃(*Carya cathayensis*)是世界上最重要的木本油料树种之一,其具有重要的经济价值和营养价值。浙江省山核桃产量占全国山核桃总产量的 70% 以上,在山核桃主产区,山核桃收入占到了农民收入的 60% ~ 70%[10],山核桃是当地经济支柱产业和农民的主要收入来源。近年来,农民为了提高山核桃产量,在生产中采取去除林下杂草、施用化肥等经营措施[11-12],这些措施有可能导致土壤温室气体排放的变化。因此,本研究以浙江临安集约化经

营山核桃林为研究对象,研究了不同施肥处理对山核桃林地土壤 N_2O 排放规律的影响,为准确评价施肥对山核桃林土壤 N_2O 排放的影响和山核桃林合理的施肥管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在浙江省临安市太湖源镇浪岭角村,地理坐标为(30°19′ N,119°35′ E),属中纬度北亚热带季风气候。全年降雨量平均 1628 mm,多年平均气温为 15.8℃,7 月为最热月,平均为 28.1℃,1 月为最冷月,平均为 3.4℃,极端高温和极端低温分别为 41.9℃ 和 -13.3℃,平均日照时数 1939 h,无霜期 234 d。土壤类型为板岩母质发育的红壤。山核桃林 0—20 cm 土壤基本理化性质如下: pH 4.69、容重 1.20 g/cm^3、有机质 17.19 g/kg、总氮 1.06 g/kg、碱解氮 126.46 mg/kg、有效磷 2.97 mg/kg、速效钾 88.7 mg/kg。

1.2 试验设计

2011 年 5 月,选择坡度和坡向基本一致的山核桃林地作为试验用林。试验设对照(CK, 不施肥)、单施无机肥(IF)、单施有机肥(OF)、有机无机肥配施(OIF,1/2 有机肥和 1/2 无机肥),每个处理设 4 次重复,共有 16 个小区,随机区组排列,每个小区面积为 400 m^2。试验中所有有机肥为商品有机肥(N 3%、P_2O_5 1.8%、K_2O 2.6%、C 35.1%),无机肥分别为尿素(N 46.5%)、过磷酸钙(P_2O_5 12%)、氯化钾(K_2O 60%)。肥料用量根据当地山核桃常规用量[13]。不同施肥处理的肥料用量均以等氮量计算,有机肥处理中,磷钾肥不足部分用过磷酸钙和氯化钾进行补充(表 1)。5 月底进行均匀撒施施肥,并翻耕入土,不施肥小区内只进行翻耕处理,同时进行静态箱的布置(每个小区 1 个)。

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 Treatments	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride
对照 CK	0	0	0	0
无机肥 IF	0	72	206	46
有机肥 OF	1120	0	38	0
有机无机肥配施 OIF	560	36	122	23

注(Note): CK—对照 Control; IF—单施无机肥 Inorganic fertilizer; OF—单施有机肥 Organic fertilizer; OIF—有机无机肥配施 Half organic plus half inorganic fertilizer.

1.3 取样方法

N_2O 通量采用静态箱-气相色谱法测定。采样箱为组合式,即由底座、顶箱组成,均用 PVC 板做成,面积为 30 cm×30 cm,高度为 30 cm。试验从 2011 年 7 月开始,2012 年 6 月结束。气体样品采集频率基本为每月 1 次,采集时间为上午 9:00 ~ 11:00,此时 N_2O 的排放量接近日平均量。采集气体时,将采集箱插入底座凹槽(凹槽内径和深度均为 5 cm)中,用适量的蒸馏水密封,分别于关箱后 0、10、20、30 min 采集,注射器来回抽动 2 ~ 3 次以混匀箱内气体,然后用注射器抽样 60 mL 置于大连光明化工设计研究院生产的铝箔采气袋(在测试前首先用充气法检查气密性,选取气密性良好的气袋进行实验),密封带回实验室。

在采集气体的同时,记录大气温度、地下 5 cm 土壤温度,并在每个小区采集 0—20 cm 土壤样品,充分混匀后带回实验室测定土壤水分含量、水溶性有机碳含量、微生物量碳。首次采样由于仪器设备原因导致土壤微生物量碳数据缺失。

1.4 测定方法

土壤 pH 值测定用 pH 计法(土水比 1:2); 总有机质含量用重铬酸钾-外加热法; 总氮用半微量凯氏定氮法; 碱解氮用碱解扩散法; 有效磷用 HCl-NH_4F 浸提—钼锑抗比色法,速效钾用乙酸铵浸提—火焰光度计法进行测定。

用岛津 GC-2014 测定气样中的 N_2O 浓度,N_2O 气体通过十通进样和四通切换阀,由电子捕获探测器(ECD)分析,温度为 250℃,载气为高纯氮气。

温室气体 N_2O 排放通量计算方法如下所示[7]:

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

式中：F 为被测气体排放通量；V 为箱体体积；A 为箱底底面积；dC_t/d_t 为单位时间取样箱内 N_2O 浓度的变化量。ρ 为标准状态下被测气体的浓度，1.25 kg/m^3；T_0 和 P_0 分别为标准状态下的空气绝对温度和气压(273K,1013hPa)；P 和 T 为测定时箱内的实际气压和气温。在观测期内大气压力变化较小，因此在计算过程中把采样时箱内的大气压力认为是标准状况下的大气压力。

N_2O 累积排放量计算方法如下所示[14]：

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中：M 为被测气体 N_2O 累积排放量；F 为 N_2O 排放通量；i 为样品数量；t 为采样时间。

土壤水溶性有机碳的测定参照 Wu 等[15]的方法进行，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。土壤微生物量碳参考 Vance 等[16]氯仿熏蒸法 -0.5 mol/L K_2SO_4 提取法提取测定。

1.5　数据分析

本文中所有数据均是 4 次重复的平均值，利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行分析处理。数据分析采取随机区组单因素方差分析(One-way ANOVA)，利用新复极差法(DMRT)在 $P<0.05$ 显著性水平下分析不同处理间的差异性。用线性回归评价土壤 N_2O 排放通量与土壤温度、土壤含水量、水溶性有机碳含量和微生物量碳之间的关系。

2　结果与分析

2.1　大气温度、降雨量、土壤温度及含水量的季节动态

如图 1A 和图 1B 所示，大气温度和地下 5 cm 处土壤温度的季节变化规律一致，均表现为 6～8 月温度较高，12～2 月温度最低。大气最高温为 28.7℃，最低温为 3.1℃，月平均温度为 16.3℃。地下 5 cm 处土壤月均温略低于大气温度。由图 1A 和图 1C 对比可知，不同施肥处理的土壤含水量变化与降雨量变化相似，夏季降水量较多，土壤含水量较高；冬季降水量较少，土壤含水量较低。由图 1C 知，试验期间不同施肥处理的土壤含水量变化规律相似，随季节变化而变化，夏季高于冬季，土壤含水量变化幅度为 24.75%～41.31%。

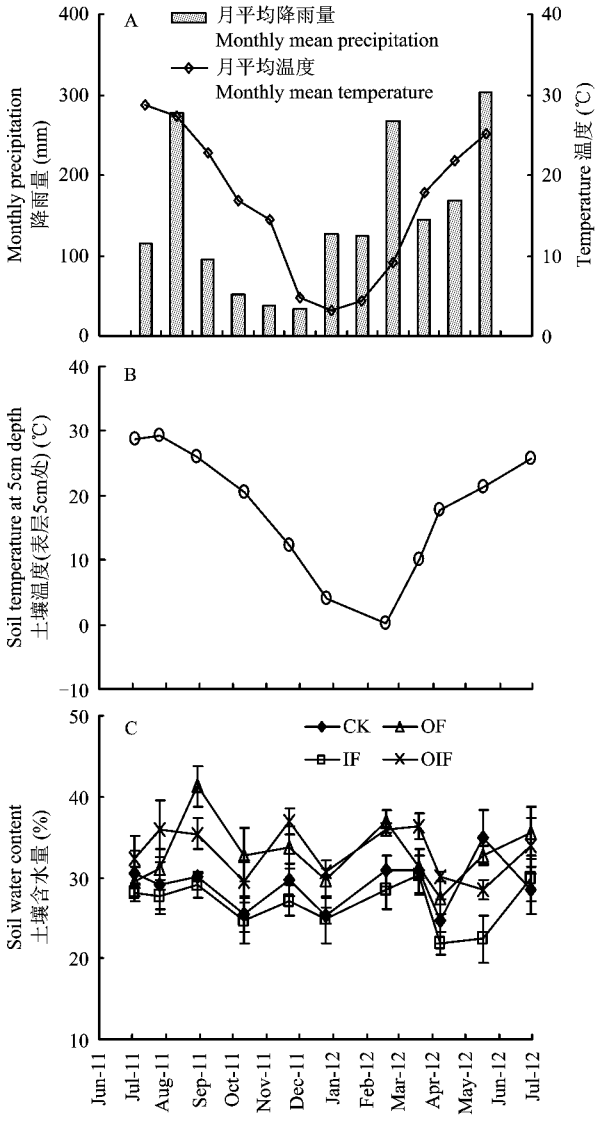

图 1　月均温度、降雨量、土壤温度(地下 5 cm)及土壤含水量的年动态变化

Fig. 1　Seasonal variations in monthly mean temperature, monthly precipitation, soil temperature at 5 cm depth and soil moisture content of the 0–20 cm depth

2.2　不同施肥处理山核桃林地土壤的 N_2O 排放通量动态变化

4 种施肥处理土壤 N_2O 排放通量均存在明显的季节变化，并呈现出相同的季节变化模式—夏季最高，冬季最低(图 2)。对照、单施有机肥、单施化肥和有机无机肥配施处理下，土壤 N_2O 的排放通量范围分别为 N -0.017～0.045、-0.021～0.136、-0.001～0.062、-0.016～0.161 mg/(m^2·h)。同时，施肥显著增加土壤 N_2O 平均通量和年累积量($P<0.05$)，表现为：与 CK 处理[平均通量和年累

积量分别为 N 0.014 mg/(m^2·h)和 0.94 kg/(hm^2·a)]相比,单施有机肥、单施化肥和有机无机肥配施处理土壤 N_2O 平均通量分别增加 78.03%、46.69%和 15.76%,而 N_2O 年累积量分别增加 131.05%、114.41%和 106.12%。

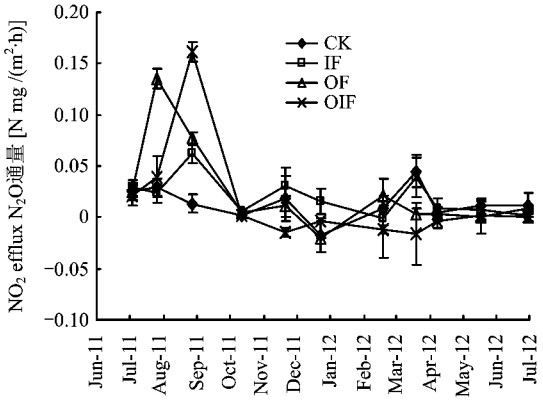

图2 不同施肥处理山核桃林地土壤 N_2O 排放通量

Fig. 2 Effect of different fertilizer treatments on N_2O flux in Chinese pecan stands soil

[注(Note):平均值±标准误($n=4$)(Mean ± s$\bar{x}$)($n=4$);CK—对照 Control;IF—单施无机肥 Inorganic fertilizer;OF—单施有机肥 Organic fertilizer;OIF—有机无机肥配施 Half organic plus half inorganic fertilizer.]

2.3 山核桃林地土壤水溶性碳和微生物量碳的动态变化

由图 3A 可知,不同施肥处理土壤水溶性有机碳(WSOC)含量的季节变化动态基本一致,且季节性变化明显,表现为 7～10 月含量较高、12～3 月含量较低。对照、单施有机肥、单施化肥和有机无机肥配施处理下土壤 WSOC 含量的变化幅度分别为 30.42 ～ 138.46 mg/kg、40.57 ～ 141.99 mg/kg、24.20～136.16 mg/kg、39～145.40 mg/kg。由图 3B 可见,不同施肥处理的土壤微生物量碳(MBC)含量变化具有一定的季节性特征,均在 8 月份达到最高,10 月份开始逐渐减少,之后变化平稳。对照、单施有机肥、单施化肥和有机无机肥配施处理下土壤 MBC 含量峰值均出现在 8 月份,分别为 813.50、897.87、816.88、1167.53 mg/kg;最小值分别为 123.99、148.48、136.35、150.06 mg/kg。添加有机肥和有机无机肥配施显著增加了土壤 SOC 和 MBC 含量($P<0.05$)。

2.4 土壤 N_2O 通量与土壤温度、含水量、水溶性碳含量和微生物量碳的相关性

不同施肥处理土壤 N_2O 通量与各因子的相关关系如表 2 所示,土壤 N_2O 通量与地下 5 cm 处土壤温度具有显著相关性($P<0.05$),与土壤含水量无显著相关性。单施有机肥和有机无机肥配施处理土壤 N_2O 通量与 WSOC 含量之间存在显著相关关系($P<0.05$);单施无机肥和对照的土壤 N_2O 排放通量则与 WSOC 含量无显著相关。施有机肥和有机无机肥配施处理土壤 N_2O 排放通量与 MBC 含量显著相关,对照处理则相关不显著。

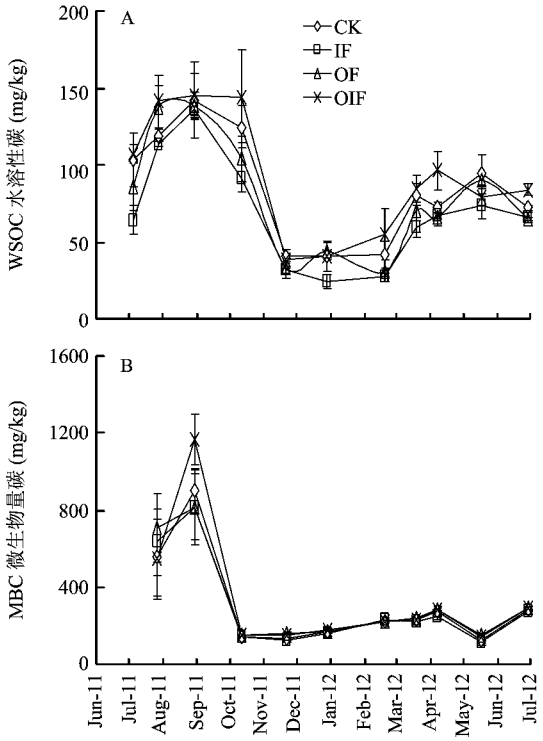

图3 不同施肥处理山核桃土壤水溶性有机碳和微生物量碳含量的动态变化

Fig. 3 Seasonal variations in the water soluble organic carbon and the microbial biomass carbon concentrations in Chinese pecan stands soil

[注(Note):平均值±标准误($n=4$)(Mean ± s$\bar{x}$)($n=4$).]

3 讨论

3.1 山核桃林地土壤 N_2O 排放特征

本研究表明,在试验观察期间,山核桃林土壤 N_2O 通量呈明显的季节变化,在 8 月份排放最高,达到 0.16 N mg/(m^2·h),冬春季节排放量较低,甚至出现负值。这与前人在森林生态系统中的研究结果相似[9,17],可能与土壤温度、水溶性碳和微生物量碳含量的季节性变化有关(图 1B 和图 3)。夏季气温高而多雨,此时土壤水分和矿态氮含量较高,水分增

表 2　土壤 N_2O 排放通量与土壤温度（地下 5 cm 处）、土壤含水量、水溶性碳和微生物量碳的相关性（R^2）

Table 2　Correlation between soil N_2O emission rates and soil temperature, soil water content, the water soluble organic carbon and the microbial biomass carbon

处理 Treatments	土壤温度 Soil temperature ($n=11$)	土壤含水量 Soil water content ($n=11$)	水溶性碳 WSOC ($n=11$)	微生物量碳 MBC ($n=10$)
对照 CK	0.3851*	0.2609	0.0851	0.0168
单施无机肥 IF	0.3661*	0.1937	0.0003	0.2649
单施有机肥 OF	0.3937*	0.0578	0.5235*	0.3958*
有机无机肥配施 OIF	0.4436*	0.0335	0.3892*	0.4439*

注（Note）：平均值 ± 标准误（$n=4$）（Mean ± s$\bar{x}$）（$n=4$）；CK—对照 Control；IF—单施无机肥 Inorganic fertilizer；OF—单施有机肥 Organic fertilizer；OIF—有机无机肥配施 Half organic plus half inorganic fertilizer.　* —$P<0.05$.

加时土壤酶活性增强，特别是硝化和反硝化细菌，硝化和反硝化作用加快最终导致 N_2O 排放增加[14]。而冬季温度较低雨水较少，硝化和反硝化细菌活性下降，进而造成土壤 N_2O 排放速率减弱[18]。

本试验中，山核桃林地土壤 N_2O 年累积排放量为 N 0.94 ～2.17 kg/(hm^2 · a)，与前人在其他亚热带地区[22-23]的研究结果一致，高于寒带、温带森林土壤 N_2O 年累积排放量 0.2 ～ 0.9 kg/(hm^2 · a)[19]、0.06 ～0.12 kg/(hm^2 · a)[20]，低于热带森林土壤 N_2O 年累积排放量 2.8 ～ 3.7 kg/(hm^2 · a)[21]，这可能是由于在不同纬度不同海拔地区不同雨热条件的差异会对土壤 N_2O 排放量造成明显的不同。但低于张蛟蛟等[9]在浙江临安地区板栗林[氮肥施入量为 87 kg/(hm^2 · a)]土壤 N_2O 排放量 1.91 ～ 3.68 kg/(hm^2 · a)，同时低于 Liu 等[14]在临安地区高度集约化毛竹林[氮肥施入量为 209 kg/(hm^2 · a)]土壤 N_2O 排放量 12.80 kg/(hm^2 · a)，同一地区板栗林和毛竹林的施氮量高于山核桃林，因此土壤 N_2O 累积排放量均高于本试验用地山核桃林[氮肥施入量为 34 kg/(hm^2 · a)]。这说明在相同纬度条件下，不同的施肥量、植被类型、土壤类型及估算方法会造成土壤 N_2O 排放量的不同。

3.2　不同施肥处理对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响

土壤 N_2O 排放通量与施肥活动密切相关，施肥可以为微生物活动提供大量的有效氮，促进由微生物参与硝化、反硝化、矿化及有机质的分解等过程，进而促进 N_2O 的排放[24]。本研究发现，施肥处理对土壤 N_2O 排放有明显的促进作用（$P<0.05$）（图 2），这与 Rachhpal 等[25]和 Jassal 等[26]的研究结果相似。原因可能是施加氮肥肥料能够为土壤微生物硝化提供有效氮源，同时促进土壤养分吸收，微生物频繁活动加强对土壤养分的利用，进而增加土壤 N_2O 排放，另外施肥促进作物生长，根系呼吸增强，消耗土壤中的 O_2 为反硝化细菌提供了局部厌氧环境，反硝化作用加快[26]。

另外本研究发现，土壤 N_2O 排放速率表现为单施有机肥高于对照及单施无机肥处理（图 2），这与张蛟蛟等[9]在板栗林土壤中的研究结果一致，这可能是由于与单施无机肥相比，有机肥的施入增加土壤水溶性有机碳的含量（图 3），为土壤提供充足的有机氮源，刺激了硝化、反硝化土壤微生物的生长，土壤 N_2O 的排放速率迅速增加[9,27]。这与李永夫等[7]在亚热带毛竹林地发现的单施尿素对 N_2O 排放速率的影响达到显著水平不同，可能是由于施氮肥种类、施氮量差异对土壤微生物的硝化和反硝化的影响不同引起的。

3.3　不同施肥处理下土壤环境因子对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响

本研究发现，地下 5 cm 处土壤温度与不同处理土壤 N_2O 排放通量均呈显著相关关系，且土壤 N_2O 排放随温度的升高而升高，这与 Sina 等[28]在温带林地中的发现相似。但是邓杰等[29]研究发现，亚热带森林生态系统生长季地表土壤 N_2O 通量与 5 cm 深土壤温度无显著相关关系（$P>0.05$），这可能是由于植被类型的差异，造成不同林分间土壤温度对地表 N_2O 通量的影响规律并不具有一致性。有研究发现，土壤 N_2O 排放通量与土壤水分含量呈正相关[30]。但本试验结果表明，山核桃林地土壤 N_2O

排放与土壤含水量无显著相关关系,可能是由于本试验区属于亚热带季风性湿润气候,全年降水丰富,土壤含水量变化幅度为24.75% ～41.31%,这与马秀芝等[31]研究的结果一致,因此该地区土壤水分不是土壤 N_2O 排放的主要限制因子。

土壤水溶性有机碳作为土壤活性有机碳,虽然它只占土壤总有机碳的较小部分,但在维持土壤养分和生物学肥力方面起着重要作用[32]。本研究发现,施用有机肥和有机无机肥配施的土壤水溶性有机碳含量明显增加,说明不同肥料处理对土壤水溶性有机碳含量的影响存在显著差异,有机肥相比化肥,不仅为微生物提供充分氮源,同时也提供充足碳源,刺激土壤微生物活动,增加微生物源的溶解性有机化合物[9]。单施有机肥和有机无机肥配施处理土壤 N_2O 排放通量与土壤水溶性碳含量呈显著正相关(表2),这可能是有机肥的添加增加土壤水溶性有机碳含量和土壤有机氮,硝化和反硝化作用底物增加,最终影响土壤 N_2O 增加。

本研究中土壤微生物量碳含量呈现明显的季节性变化,表现为7～8月最高。这可能是由于夏季雨热同期,为林下土壤创造了一个有利于土壤微生物活动的小环境,土壤微生物活性和数量增加,促进土壤有机质的矿化,因此夏季微生物量碳的累积量较高[33]。添加有机肥处理的微生物量碳含量显著高于对照处理,说明有机肥的适量添加可以显著提高土壤微生物量和微生物活性,改善土壤养分状况,提高土壤肥力,使得微生物量碳累积较多[22]。本试验结果表明,有机无机配施处理土壤 N_2O 排放通量与土壤微生物量碳含量呈显著相关,这可能是由于在施有机肥的基础上适量配施无机肥才能表现出显著的作用,且有机无机肥的配施增加了作物生物量和根茬[34],为土壤微生物提供了有机物,促进微生物生长,进而促进了土壤 N_2O 的排放。对照和单施无机肥处理土壤 N_2O 排放通量与土壤微生物量碳含量之间无显著相关性。这可能是由于施入化肥后土壤微生物量碳减少与微生物中的细菌、真菌和放线菌数量减少密切相关[35],而土壤微生物数量减少又会影响土壤 N_2O 的排放。

4 结论

1) 山核桃林地土壤 N_2O 排放具有明显的季节性变化特征,表现为夏季排放通量较高,冬季排放通量较低。

2)不同处理条件下,山核桃林地土壤 N_2O 排放与地下5 cm土壤温度呈显著相关,而与土壤水分无相关性。单施有机肥与有机无机肥配施处理土壤 N_2O 排放速率与土壤水溶性有机碳含量和微生物量碳有显著相关性,单施无机肥和对照处理则相关性不显著。

3)施肥显著增加山核桃林地土壤 N_2O 排放,不同施肥处理间没有显著差异。添加有机肥引起土壤水溶性有机碳和微生物量碳的增加可能是有机肥增加山核桃林地土壤 N_2O 排放速率的主要原因之一。

参 考 文 献:

[1] Intergovernmental panel on the climate change(IPCC). Climate change 2007: the physical science basis[R]. London, England: Cambridge University Press, 2007.

[2] Yashiro Y, Kadir W R, Okuda T *et al*. The effects of logging on soil greenhouse gas (CO_2, CH_4, N_2O) flux in a tropical rain forest, peninsular Malaysia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 799-806.

[3] Byrnes B H. Environmental effects of N fertilizer use an overview [J]. Fertilizer Research, 1990, 26: 209-215.

[4] 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 Biology and Biochemistry, 2013, 57: 292-300.

[5] Helena P, Iris P, Franz B *et al*. Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N_2O fluxes from a vegetable cropped loamy soil [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 150: 91-101.

[6] 于亚军,王小国,朱波.紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素[J].生态学报, 2012, 32(6): 1830-1838.
Yu Y J, Wang X G, Zhu B. N_2O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1830-1838.

[7] 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): 165-170.
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): 165-170.

[8] Zhang W, Mo J M, Yu G R *et al*. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition[J]. Plant and Soil, 2008, 306: 221-236.

[9] 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等.施肥对板栗林土壤活性碳库和温室气体排放的影响[J].植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 745-752.
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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 745-752.

[10] 黄兴召,黄坚钦,陈丁红,等.不同垂直地带山核桃林地土壤理化性质比较[J].浙江林业科技,2010,30(6):23-27.
Huang X Z, Huang J Q, Chen D H *et al*. Comparison on soil physical and chemical properties at different vertical zones of *Carya Cathayensis* stands[J]. Zhejiang Forestry Science and Technology, 2010, 30(6): 23-27.

[11] 张春苗,张有珍,姚芳,等.临安山核桃主产区土壤 pH 值和有效养分的时空变化[J].浙江农林大学学报,2011,28(6):845-849.
Zhang C M, Zhang Y Z, Yao F *et al*. Temporal and spatial variation of soil pH and nutrient availability for *Carya Cathayensis* orchards in Lin'an[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2011, 28(6): 845-849.

[12] 王艳艳,赵伟明,赵科理,等.海拔高度对山核桃林地土壤 pH 值和有效养分的影响[J].现代农业科技,2012,17:224-231.
Wang Y Y, Zhao W M, Zhao K L *et al*. Effects of altitude on pH and available nutrients in Chinese hickory orchards[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012, 17: 224-231.

[13] 黄程鹏,吴家森,许开平,等.不同施肥山核桃林氮磷径流流失特征[J].水土保持学报,2012,26(1):43-52.
Huang C P, Wu J S, Xu K P *et al*. Runoff losses of nitrogen and phosphorus under *Carya cathayensis* stand with different fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 43-52.

[14] Liu J, Jiang P K, Wang H L *et al*. Seasonal soil CO_2 efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262: 1131-1137.

[15] 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 Journal of Soil Science, 2010, 90(1): 27-36.

[16] Vance E D, Brookes P C, Jenkison D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.

[17] 李海防,夏汉平,傅声雷,等.剔除林下灌草和添加翅荚决明子对尾叶桉林土壤温室气体排放的影响[J].植物生态学报,2009,33(6):1015-1022.
Li H F, Xia H P, Fu S L *et al*. Emissions of soil greenhouse gases in response to understory removal and *Cassia alata* addition in an *Eucalypitus urophylla* plantation in Guangdong province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1015-1022.

[18] 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]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 1775-1779.

[19] Arnold K V, Weslien P, Nilsson M *et al*. Fluxes of CO_2, CH_4 and N_2O from drained coniferous forests on organic soils[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 210: 239-254.

[20] Eickenscheidt N, Brumme R. NO_x and N_2O fluxes in a nitrogen-enriched European spruce forest soil under experimental long-term reduction of nitrogen depositions[J]. Atmospheric Environment, 2012, 60: 51-58.

[21] Yan Y P, Sha L Q, Cao M *et al*. Fluxes of CH_4 and N_2O from soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20: 207-215.

[22] 顾韩,牟长城,张博文.火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响极其影响因素[J].生态学报,2012,32(24):7808-7817.
Gu H, Mu C C, Zhang B W, *et al*. Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from Alnus sibirica forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7808-7817.

[23] 苏王娟,付晓青,李勇,等.亚热带典型丘陵坡地马尾松林土壤 N_2O 的年通量特征[J].林业科学,2012,48(5):130-135.
Su W J, Fu X Q, Li Y *et al*. Annual nitrous oxide fluxes from the *Pinus massoniana* woodland in a typical hilly region of the southern subtropical China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5): 130-135.

[24] Sey B K, Whalen J K, Gregorich E G. Carbon dioxide and nitrous oxide content in soils under corn and soybean[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 931-938.

[25] Rachhpal S J, Black T A, 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.

[26] Jassal R S, Andrew B T, Roy R *et al*. Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration[J]. Geoderma, 2011, 162: 182-186.

[27] Akiyama H, Tsuruta H. Effect of chemical fertilizer from on N_2O, NO and NO_2 fluxes from Andisol field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 219-230.

[28] Sina Berger, Eunyoung Jung, Julia Kŏpp *et al*. Monsoon rains, drought periods and soil texture as drivers of soil N_2O fluxes-Soil drought turns East Asian temperate deciduous forest soils into temporary and unexpectedly persistent N_2O sinks[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57: 273-281.

[29] 邓杰,邓湘雯,黄志宏,等.4 种典型亚热带森林生态系统生长季地表 N_2O 通量特征[J].中国农学通报,2012,28(13):6-13.
Deng J, Deng X W, Huang Z H *et al*. Surface N_2O flux from 4 different typical forest stands in growing season in subtropical south China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(13): 6-13.

[30] Lin S, Iqbal J, Hu R *et al*. Difference in nitrous oxide fluxes from red soil under different land uses in mid-subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 136: 40-48.

[31] 马秀芝,张秋良,李长生,等.寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间差异[J].应用生态学报,2012,23(8):

2149-2156.
Ma X Z, Zhang Q L, Li C S *et al*. Temporal variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix gmelinii* forest in Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2149-2156.

[32] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13.
Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(1): 10-13.

[33] 陈涵贞, 苏德森, 吕新, 等. 武夷山常绿阔叶林土壤有机碳和微生物量碳的动态特征[J]. 农学学报, 2012, 38-42.
Chen H Z, Su D S, Lü X *et al*. Dynamic characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon of evergreen broad-leaved forest in Wuyi Mountain [J]. Journal of Agriculture, 2012: 38-42.

[34] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y *et al*. Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 277-282.

[35] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1093-1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y *et al*. Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1093-1099.