植物营养与肥料学报 2013,19(6):1428-1437
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0617

施肥对板栗林土壤 CH_4 吸收通量动态的影响

张蛟蛟,李永夫*,姜培坤,周国模,刘 娟
(浙江农林大学环境与资源学院,浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,
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: 为了探明无机肥和有机肥施用对板栗林地土壤 CH_4 吸收通量动态的影响,探讨板栗林地土壤 CH_4 通量与环境因子之间的关系,在浙江省临安市典型板栗林样地布置施肥试验。于 2011 年 6 月～2012 年 6 月期间,采用静态箱-气相色谱法测定了不施肥(CK)、无机肥(IF)、有机肥(OF)和有机无机混合肥(OIF)处理下土壤 CH_4 吸收通量的全年动态变化,并测定了土壤温度、土壤水分、水溶性有机碳(WSOC)和微生物量碳(MBC)含量。结果表明,板栗林土壤 CH_4 吸收通量呈现明显的季节性变化,最大值出现在 9 月,最小值出现在 2～3 月;施肥处理均显著抑制了土壤 CH_4 的吸收,具体表现为 IF、OF 和 OIF 处理下土壤 CH_4 年吸收量与 CK 处理[CH_4 3.09 kg/(hm^2·a)]相比分别减少了 7.0%、1.6% 和 4.4%。此外,施肥显著增加了土壤 WSOC 和 MBC 含量($P < 0.05$),且施肥使土壤碱解氮、铵态氮、硝态氮、全氮和有机质含量均有不同程度的增加。相关性分析表明,土壤 CH_4 吸收通量与土壤表层 5 cm 处温度之间呈显著正相关($P < 0.05$),但与土壤水分、MBC 含量之间没有显著相关性;土壤 CH_4 吸收与土壤 WSOC 含量之间(除 CK 处理外)均具有显著相关性($P < 0.05$)。因此,施肥引起土壤理化性质[如 NH_4^+-N、NO_3^--N、全氮(TN)、有机碳(SOC)等]和 WSOC 含量的改变可能是施肥显著抑制了板栗林土壤 CH_4 排放的主要原因。

关键词: 板栗林; CH_4 吸收通量; 施肥; 水溶性有机碳; 微生物量碳
中图分类号: S753.53;153.6+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)06-1428-10

Effects of fertilization on seasonal variations of soil CH_4 uptake fluxes in Chinese chestnut stands

ZHANG Jiao-jiao, LI Yong-fu*, JIANG Pei-kun, ZHOU Guo-mo, LIU Juan
(*School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A&F University/Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration/The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Lin'an, Zhejiang 311300, China*)

Abstract: To investigate the effects of inorganic and organic fertilizers on seasonal variation of CH_4 uptake flux in the soil of Chinese chestnut stands and to explore the relationships between the CH_4 uptake flux and various environmental factors, a field study including control(CK), inorganic fertilizer(IF), organic fertilizer(OF), and half organic plus half inorganic fertilizer(OIF) treatments was conducted in typical Chinese chestnut stands in Lin'an, Zhejiang Province. Soil CH_4 uptake fluxes were analyzed by static closed chamber/GC technique, and soil temperature, soil water content, WSOC and MBC concentrations were determined as well. Results showed that soil CH_4 uptake fluxes exhibited a strong seasonal pattern, with the maximum values in September and the minimum in February or March. Application of inorganic fertilizer significantly inhibited the soil CH_4 uptake($P < 0.05$), and annual accumulation of soil CH_4 uptake in IF, OF, and OIF treatments were 7.0%, 1.6%, and 4.4% lower than in CK [CH_4 3.09 kg/(ha·a)], respectively. In addition, fertilization significantly increased soil WSOC and MBC concentrations($P < 0.05$) and partly increased the concentrations of soil available nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, and soil organic matter. The correlation analysis showed that soil CH_4 uptake fluxes

收稿日期: 2013-04-06 **接受日期:** 2013-04-27
基金项目: 浙江省科技厅重点项目(2011C12019);国家自然科学基金项目(31170576);浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030)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

had a significant positive correlation with soil temperature at 5 cm depth ($P < 0.05$), but had no significant correlation with soil water content and soil MBC concentration in all treatments. Soil CH_4 uptake rate was correlated with soil WSOC concentration except in CK ($P < 0.05$). In conclusion, the change of soil physicochemical properties (NH_4^+-N, NO_3^--N, TN and SOC) and WSOC concentration caused by fertilization was probably the main reason for the inhibition of soil CH_4 uptake in Chinese chestnut stands induced by fertilization.

Key words: *Castanea mollissima*; CH_4 uptake flux; fertilization; water-soluble organic carbon (WSOC); microbial biomass carbon (MBC)

甲烷(CH_4)是第二大温室气体，对全球气候变暖的贡献达到 20% 左右，仅次于 CO_2 的贡献率 55%[1]。CH_4 虽在大气中存在年限较短，但百年尺度上单位质量的全球增温潜势(GWP)是 CO_2 的 25 倍左右[1]。森林土壤被认为是大气中 CH_4 重要的汇，其对大气中 CH_4 浓度变化的影响具有重要的意义，这在前人的研究中已有大量的报道[2-7]。如 Yan 等[2]在热带森林，陈匆琼等[3]在中亚热带米槠天然林，胡正华等[4]在北亚热带落叶阔叶林，刘慧等[5]在南亚热带马尾松林，孙向阳[6]在温带油松林，Fang 等[7]在寒带林地中研究土壤 CH_4 氧化(吸收)的报道。上述研究表明，森林植被类型、土壤性质(如 pH、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 等)、环境因子(温度、湿度和降雨量等)以及人为因素均会影响森林土壤对 CH_4 的氧化(吸收)。大量的研究表明[8-9]，人工经营措施可以改变森林土壤性质、土壤环境因子和微生物群落结构，但人工经营措施对森林生态系统土壤 CH_4 通量的影响至今还没有统一的结论。

施肥是人工林经营管理重要的手段之一，也是影响土壤 CH_4 排放(或吸收)的重要因素之一[10]。然而，施加氮肥或氮沉降对森林土壤 CH_4 吸收具有抑制、促进和没有影响三种不同的结论。如 Zhang 等[10]、Fender 等[11]和 Kim 等[12]的研究结果表明，增加氮肥或氮沉降对森林土壤具有明显的抑制作用；Veldkamp 等[13]研究发现，施加尿素对热带森林土壤 CH_4 吸收有明显的促进作用；Ambus 和 Robertson[14]也在温带加州铁杉林的研究中发现，施加硝酸铵对土壤具有明显的促进作用；Whalen 和 Reeburgh[15]研究却发现，施加硫酸铵对温带针叶林土壤 CH_4 吸收没有显著影响。上述研究结果之间的差异主要是由于森林类型、土壤性质以及水热条件等综合作用的差异引起的[12-15]。因此，如何准确评价施肥对森林土壤 CH_4 吸收的影响机理还比较困难，具有很大的不确定性，而且前人研究主要集中在粗放经营的人工林中，但对亚热带地区强度集约化经营经济林(特别是板栗林)土壤 CH_4 吸收相关研究尚鲜有报道。

板栗(*Castanea mollissima*)是我国重要的经济林树种，分布于全国 26 个省市。据报道[16]，到 2005 年底，我国板栗种植面积已达 125 万公顷，占到世界总种植面积的 38%，总产量达 82.5 万吨，约占世界总产量的 3/4。随着产业化结构调整，板栗林集约化经营模式普遍开展，其中施肥是提高板栗产量的重要手段[17]，而施肥对板栗林土壤 CH_4 通量的影响作用尚不明确。鉴于此，本试验以亚热带地区集约化经营板栗林为样地，利用静态箱-气相色谱法测定不同施肥条件下土壤 CH_4 吸收通量的季节性变化，并同时测定了土壤温度、土壤水分、WSOC 和 MBC 等指标。旨在探明不同施肥措施对板栗林土壤 CH_4 吸收通量的影响结果，探讨施肥引起的土壤环境因子变化与土壤 CH_4 吸收通量变化规律的相互关系，为深入研究影响土壤 CH_4 吸收通量的机制和准确估算亚热带地区人工林系统吸收甲烷的潜力提供理论基础与科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验区位于浙江省临安市青山湖镇(119° 86′ E, 30° 25′ N)，属于典型的亚热带季风气候，气候温和，四季分明。7 月为最热月，平均温度 28.1℃；1 月为最冷月，平均 3.4℃，年平均温度 16.4℃，雨量充沛，年均降水量为 1629 mm，年有效积温 5774 ℃，年日照时数 1774 h，无霜期 234 d。地形为低山丘陵区，海拔为 150 ～ 250 m，土壤类型为红壤(黄红壤亚类)。试验期间降水量和平均气温见图 1。本试验板栗林样地是由常绿阔叶林改造而来，林龄为 18 a，种植密度 540 plant/hm^2，采用中等强度的集约经营模式。每年 5 月下旬左右施肥，然后再翻耕。2011 年 3 月，在野外调研的基础上，选择经营措施一致、坡度与坡向一致的板栗林样地。在试验前，采集土壤样品，进行各小区土壤基本理化性质的测定[18]。　板栗林土壤基本理化性质为：有机质含量

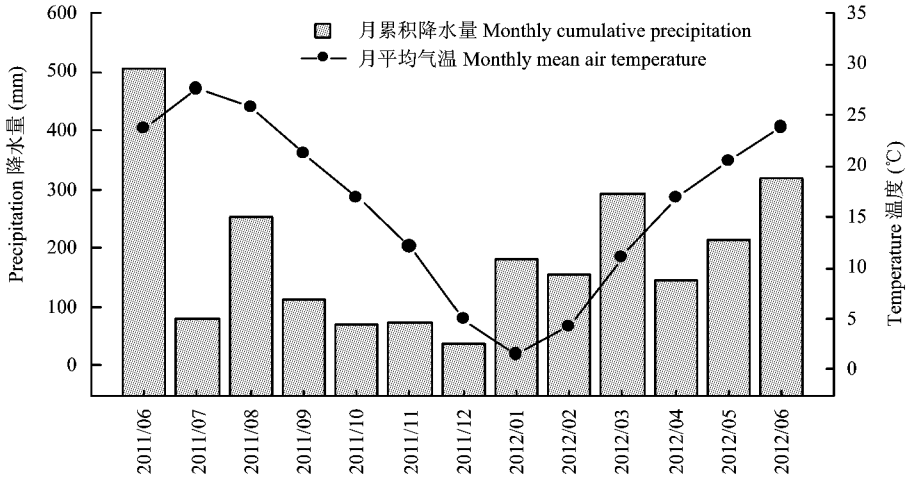

图1 试验期间月降水量和月平均温度

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

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,容重 1.14 g/cm^3。

1.2 研究方法

2011 年 5 月布置试验,设 4 种不同施肥处理:对照(不施肥 CK)、无机肥(IF)、有机肥(OF)和有机肥无机混合肥(1/2 无机肥和 1/2 有机肥 IOF),具体施肥量见表 1。试验用有机肥为商品有机肥(含 N 3%、$P_2O_5$1.8%、K_2O2.6%、C 35.1%),无机肥尿素(含 N 46.5%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。各施肥处理中肥料用量均以等氮量计算,有机肥处理中磷、钾不足部分用化学肥料补充。小区面积 256 m^2(16 m × 16 m),4 次重复,随机区组排列。每个试验小区间隔距离为 3 m。肥料于 6 月 3 日均匀撒施,并翻耕入土,对照小区只进行翻耕,同时进行静态箱的布置。于 2011 年 6 月到 2012 年 6 月进行采样,施肥后第 1 个月采样 2 次,随后每个月采样一次。野外采样时,选择晴天或多云天气,若遇到长时间阴雨天气则适当推迟几天。

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
CK	0	0	0	0
IF	0	188	488	135
OF	2906	0	52	9
OIF	1453	94	270	72

1.3 样品采集及测定方法

本研究采用静态箱-气相色谱法对板栗林土壤 CH_4 气体通量进行分析测定。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[19]。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。采样时间一般安排在上午 9:00 ~ 11:00 之间[20]。采样前一天,利用充气法进行气密性检查,选取气密性良好的气带进行野外气体采集。采样时,将顶箱插入底座凹槽中,并用适量的蒸馏水进行密封,盖好顶箱后,用 60 mL 注射器分别于 0、10、20、30 min 进行取样。采样时为了混匀箱内气体,注射器插入采集箱顶部硅胶孔后先来回抽动 2 ~ 3 次,然后再把抽出的 60 mL 气体注入真空袋中带回实验室测定。采气同时,测定 0—5 cm 土层土壤温度及大气温度,并采集 0—20 cm 土层土样,带回实

验室进行分析。气样利用岛津 GC－2014 气相色谱仪进行 CH_4 浓度的测定[21]。

土壤 CH_4 通量的计算公式[22]为

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

式中：F 为 CH_4 气体的排放通量；ρ 为标准状态下 CH_4 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 CH_4 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；P 和 T 为取样时的实际气压和气温。每月测定的土壤 CH_4 通量代表该月平均通量，通过累加可以计算出土壤 CH_4 的年累积量。

土壤水溶性有机碳（WSOC）含量的测定参照 Wu 等[23]的方法。土壤 MBC 含量的测定采用氯仿熏蒸直接提取法[24]。土壤 MBC 含量以熏蒸和未熏蒸土样 0.5 mol/L K_2SO_4 提取液中含碳量之差乘以系数得到，MBC ＝ 2.22 E_C，其中 E_C 为熏蒸土样与未熏蒸土样提取液中的碳含量之差[25]。

1.4　数据处理

本文中所有数据均为 4 次重复的平均值。用 Microsoft Excel 2003、Origin 8.0 和 SPSS 13.0 软件进行数据分析与作图，进行随机区组单因素方差分析（One-way ANOVA），采用新复极差法（DMRT）进行多重比较（$P < 0.05$），用 Pearson 相关分析法分析 CH_4 吸收通量和土壤温度及水分、WSOC、MBC 之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理对土壤理化性质的影响

由表 2 可知，施肥一年后，土壤 pH 值没有显著变化；施有机氮肥可以显著增加土壤碱解氮、全氮、有机质含量（$P < 0.05$）。此外，施无机氮肥对土壤硝态氮和铵态氮含量有明显的提高（$P < 0.05$）。

表 2　不同施肥处理对土壤基本理化性质的影响

Table 2　Effects of different fertilizer on soil physicochemical properties

处理 Treatment	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alk. N (mg/kg)	铵态氮 NH_4^+-N (mg/kg)	硝态氮 NO_3^--N (mg/kg)	pH
CK	26.70 b	1.82 b	97.16 b	2.52 b	2.05 b	4.67 a
IF	29.58 ab	1.99 b	97.55 b	2.88 a	2.37 a	4.65 a
OF	30.78 a	2.18 a	102.52 a	2.57 b	2.19 ab	4.72 a
OIF	31.22 a	2.19 a	101.88 a	2.59 b	2.33 a	4.69 a

2.2　大气月平均温度、降雨量、土壤温度及含水量的年动态变化特征

图 1 和图 2A 显示，在试验研究期间，5 cm 土层土壤温度与大气月平均温度之间有着相似的季节性变化规律，均表现为 6～8 月温度较高，12～2 月温度最低；5 cm 土层土壤温度变化幅度为 4.05～30.85℃，平均 18.10℃；4 种不同处理条件下，土壤含水量变化呈现较一致的季节性变化规律，变化幅度为 22.17%～34.86%，平均 28.74%（图 2B）。从图 1 和图 2B 可以看出，土壤含水量与月平均降雨量之间呈现显著的线性正相关（$P < 0.05$）。

2.3　土壤 CH_4 吸收通量、水溶性有机碳（WSOC）和微生物量碳（MBC）年动态变化特征

从图 3A 可以看出，板栗林土壤全年均表现为 CH_4 汇。不同施肥处理条件下，板栗林土壤 CH_4 吸收通量均呈现出强烈的季节性变化特征，最大值出现在初秋 9 月，最小值出现在冬末初春 2～3 月。对照（CK）、无机肥（IF）、有机肥（OF）和有机无机混合肥（OIF）4 个处理，土壤 CH_4 吸收通量最小值分别为 CH_4 9.73、9.50、10.03 和 9.42 μg/(m^2·h)，最大值分别为 CH_4 81.88、74.39、72.39 和 73.96 μg/(m^2·h)，年均 CH_4 吸收通量分别为 CH_4 35.23、31.84、33.96 和 32.88 μg/(m^2·h)。图 4 显示，IF、OF 和 OIF 处理板栗林土壤 CH_4 年累积吸收量分别为 CH_4 2.87、3.04 和 2.95 kg/(hm^2·a)，与 CK 处理［CH_4 3.09 kg/(hm^2·a)］相比分别减少了 7.0%、1.6% 和 4.4%。

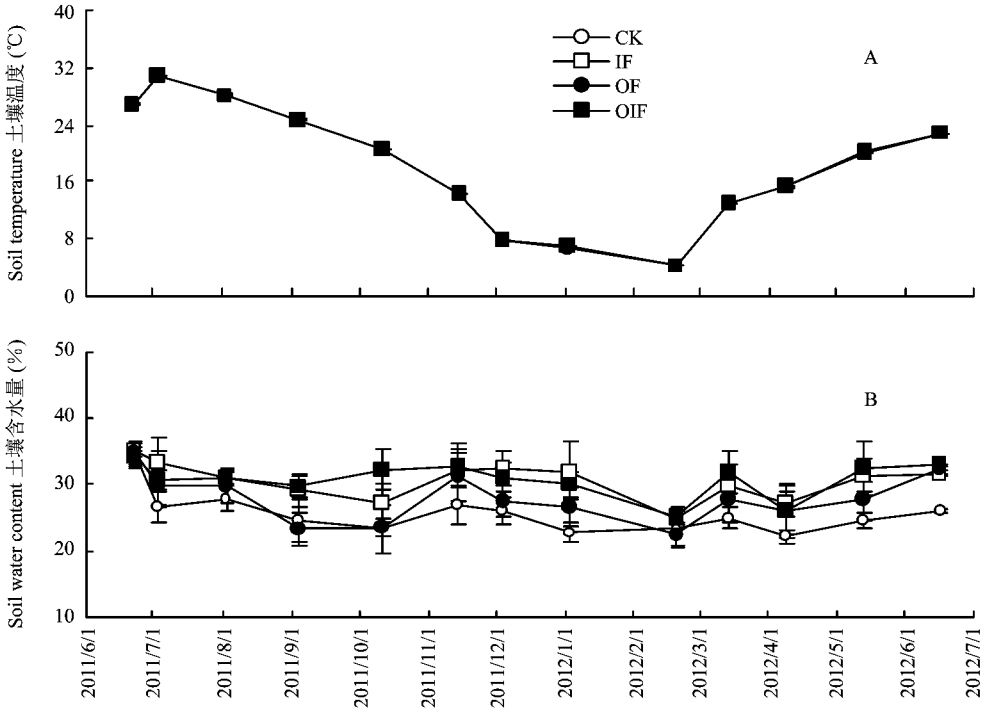

图2 土壤温度(5 cm 土层)和土壤含水量(0—20 cm)的年动态变化

Fig. 2 Season variations in soil temperature at 5 cm depth and soil moisture content of the 0–20 cm depth

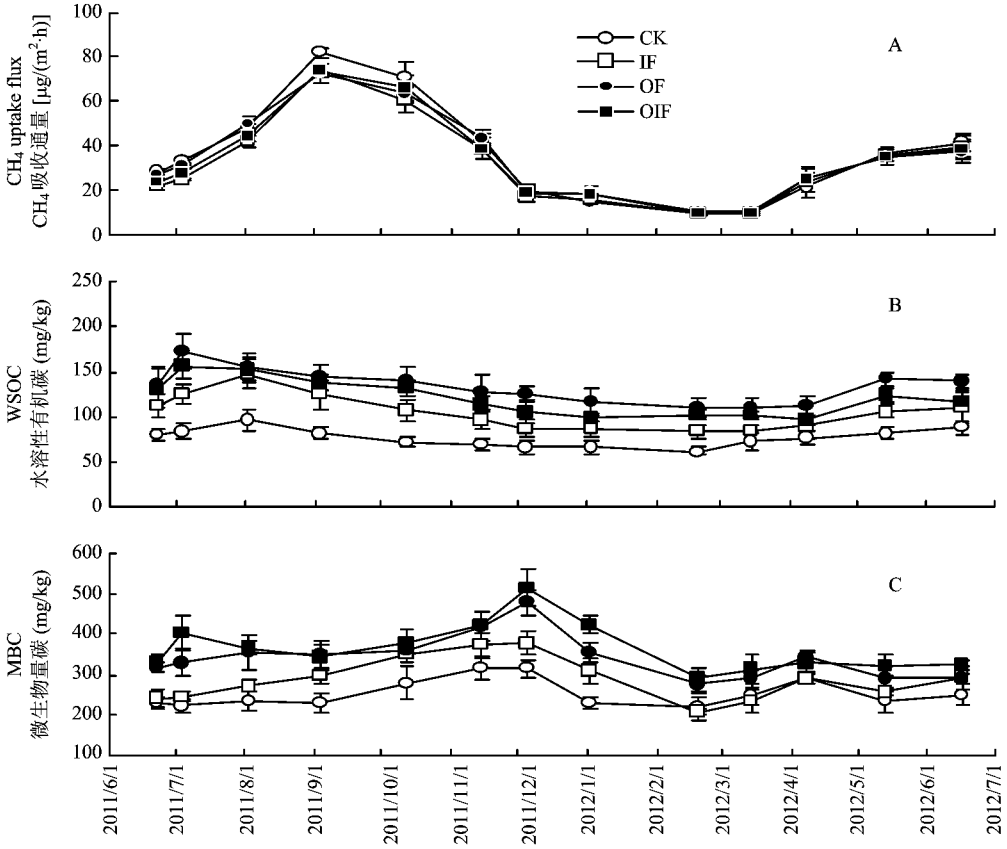

图3 板栗林土壤 CH_4 吸收通量(A)、水溶性有机碳(B)和微生物量碳(C)含量的季节变化规律

Fig. 3 Seasonal variations in soil CH_4 uptake rates(A), WSOC(B) and MBC(C) concentrations in Chinese chestnut stands

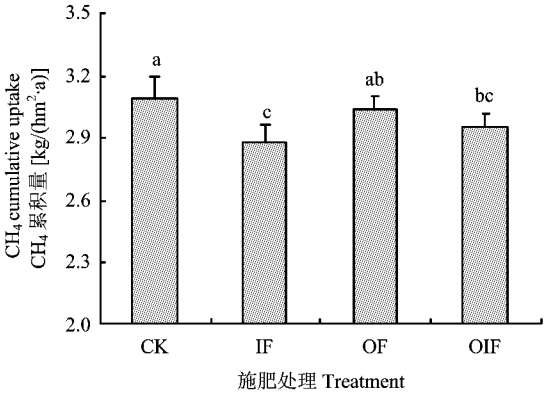

图 4　不同施肥处理对板栗林土壤 CH_4 年累积吸收量的影响

Fig. 4　Effect of different fertilizer treatments on soil CH_4 annual cumulative uptake in Chinese chestnut stands

[注(Note)：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 among treatments at the 5% level.]

土壤水溶性有机碳(WSOC)含量呈现出比较明显的季节性变化(图 3B)，基本上表现为土壤 WSOC 含量 7～8 月较高，2～3 月较低。CK、IF、OF 和 OIF 处理下，WSOC 含量的变化幅度分别为 62.02～96.13 mg/kg、84.47～147.88 mg/kg、109.76～173.04 mg/kg 和 96.73～157.03 mg/kg。土壤微生物量碳(MBC)含量的季节性特征，基本上峰值出现在 11～12 月，最小值出现在 2 月份(图 3C)。CK、IF、OF 和 OIF 处理下，土壤 MBC 含量变化幅度分别为 217.13～316.73 mg/kg、206.68～379.41 mg/kg、275.76～480.04 mg/kg 和 289.00～516.76 mg/kg。结合图 3B 和图 3C 可知，与 CK 相比，施肥均显著性提高板栗林土壤 WSOC 和 MBC 含量($P<0.05$)，WSOC 的年均含量 IF、OF 和 OIF 处理分别比 CK 增加了 37%、74% 和 58%，而 MBC 年均含量分别增加了 14%、35% 和 45%。

2.4　土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度、土壤含水量、WSOC 和 MBC 含量的相关性

土壤 CH_4 吸收通量与各环境因子的相关关系(表 3)显示，土壤 CH_4 吸收通量与 5 cm 土层土壤温度之间具有显著的相关性($P<0.05$)，随着温度的升高土壤 CH_4 吸收通量具有明显的增加趋势(图 2A 和图 3A)；土壤 CH_4 吸收通量与 WSOC 含量之间在施肥条件下具有显著的相关性，而不施肥条件下两者没有明显的相关性；然而，在不同处理条件下，土壤 CH_4 吸收通量与土壤含水量及 MBC 含量之间均没有明显的相关性。

表 3　土壤 CH_4 吸收通量与土壤 5 cm 温度、含水量、WSOC 和 MBC 含量的相关系数(r)($n=13$)

Table 3　Correlation between soil CH_4 uptake fluxes and soil temperature at 5 cm depth, soil water content, WSOC and MBC concentrations($n=13$)

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature	土壤含水量 Soil water content	水溶性有机碳 WSOC	微生物量碳 MBC
CK	0.588*	0.014	0.439	0.022
IF	0.532*	0.112	0.599*	0.364
OF	0.589*	0.128	0.568*	0.188
OIF	0.545*	0.256	0.567*	0.000

注(Note)：* —$P<0.05$

3　讨论

3.1　板栗林地土壤 CH_4 吸收通量的季节变化特征

本研究表明，板栗林地土壤 CH_4 吸收通量呈显著的季节性变化特征，表现为夏秋季高于冬春季，最大值出现在 9 月，最小值出现在 2、3 月，这与陈匆琼等[3]和刘玲玲等[26]在亚热带地区森林中的研究结果相似。但孙向阳[6]和 Fang 等[7]在温带林地研究中虽也发现 CH_4 吸收量表现为夏秋季高于冬春季，但最大值和最小值分别出现在夏季和冬季；而 Yan 等[2]和 Fang 等[7]在热带西双版纳地区森林中研究表明，土壤 CH_4 吸收速率最大值出现在旱季(10～3 月)，最小值出现在雨季(4～9 月)。这些差异主要是由于不同地带水热条件不同造成的结果。本研究中，相比温带森林，最大值有滞后现象出现在初秋 9 月，这可能是 6～8 月降雨较多一定程

度上抑制了土壤的通气性,影响了 CH_4 的吸收,而9月温度比较适宜,水分含量较少,土壤通气性良好,利于 O_2 和 CH_4 的扩散,为甲烷氧化菌生长提供了适宜的条件[3],进而土壤对 CH_4 氧化速率达到最大值。而在2月份,温度较低成为土壤氧化 CH_4 的限制因素,加之2～3月本研究地区降水量较多(图1),也限制了 CH_4 和 O_2 的传输,降低了 CH_4 的吸收速率,表现为其值最小。

3.2 板栗林地土壤 CH_4 的吸收量

本研究表明,在试验观察期间,板栗林土壤均表现为 CH_4 的汇,这与前人在森林生态系统中的研究结果一致[3-7]。本研究中,板栗林土壤 CH_4 年吸收量为 CH_4 2.98～3.41 kg/(hm^2·a),显著高于中国寒带[7]和温带森林[6-7]中土壤 CH_4 年均吸收量[分别为 CH_4 0.04 和 1.79～2.29 kg/(hm^2·a)],而且符合前人在中国其他亚热带地区[3,5,7]土壤 CH_4 年吸收量的范围[CH_4 2.98～5.15 kg/(hm^2·a)]。这表明在中国森林生态系统中土壤 CH_4 吸收量呈现出一定的地带性分布规律,并随着纬度的降低土壤 CH_4 吸收量呈增加的趋势。这可能是因为亚热带地区与寒带和温带相比温度较高,有利于土壤对大气中 CH_4 的吸收,但热带地区虽然温度很高,而其降雨量分配不平衡,雨季和干季明显,在雨季森林土壤有可能表现为 CH_4 的排放源[2,7],这说明土壤 CH_4 吸收可能是水热条件综合作用的结果。此外,不同森林植被类型、土壤质地、土壤基本性质及人为经营措施均会引起土壤 CH_4 吸收通量的差异[27-31]。

3.3 施肥对板栗林土壤 CH_4 吸收通量的影响

土壤增施氮肥或增加氮沉降对森林土壤 CH_4 吸收有着重要的影响。一般而言,施氮肥或氮沉降对森林土壤 CH_4 吸收有抑制作用[10-12,32-35](表4),这主要可能是因为施氮肥和氮沉降直接增加森林土壤中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量[10,36],而通常土壤吸收通量与土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量呈负相关关系[10-12];其次,土壤 CH_4 氧化速率(吸收速率)受到凋落物层厚度和 O_2 的影响,施氮肥可以增加土壤表面凋落物(或有机物),阻止大气中 CH_4 和 O_2 向土壤中传输,进而降低了土壤 CH_4 的氧化(吸收)速率[33];另外,也有可能是森林土壤施氮肥后,一定程度上增加了土壤 CH_4 产生菌的反应底物,抵消了一部分土壤 CH_4 的氧化,表现为土壤 CH_4 净吸收速率减弱[38]。本研究也有相似的结果,即添加无机氮肥处理对土壤 CH_4 吸收有明显的抑制作用,而有机肥处理对土壤 CH_4 也有一定的抑制作用但没有达到显著差异。这主要是由于板栗林地施肥增加了土壤表层有机物质含量(如有机质、WSOC、MBC 和全氮等),进而影响土壤表面的气体(CH_4 和 O_2)的传输;施加无机氮肥可以显著增加土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度(表2),对板栗林土壤 CH_4 吸收具有明显的抑制作用(图4);然而,有机肥处理对土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度没有显著影响,也表现出对土壤 CH_4 的吸收没有明显的抑制作用(图4)。但是,土壤施氮肥对森林土壤 CH_4 吸收的影响目前还没有统一的结论,如 Veldkamp 等[13]研究发现,施加尿素对热带森林土壤 CH_4 的吸收在短期内有明显的促进作用;Whalen 和 Reeburgh 研究发现[15],施加硫酸铵对温带针叶林土壤 CH_4 吸收没有显著的影响。这些结果的差异主要可能是因为森林类型、土壤性质、地带气候和经营措施的差异造成的[38-39]。一般认为,低氮水平对贫氮森林土壤 CH_4 的吸收氧化表现为促进作用,而高氮水平则多表现为抑制作用[13,38]。

3.4 土壤环境因子对板栗林土壤 CH_4 吸收的影响

土壤温度和土壤水分是影响土壤氧化吸收大气 CH_4 的重要环境因子[6-7]。一般认为,森林土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度之间呈现明显的正相关,与土壤水分之间呈负相关[5,7,27-28]。这主要是因为森林土壤中大部分甲烷氧化菌属于中温型菌[22],温度可以通过影响甲烷氧化酶的活性来影响土壤 CH_4 氧化速率,过高或过低都会抑制 CH_4 氧化,但当温度小于最适温度值时,CH_4 氧化速率会随着温度的升高而加快,并且这个最适值随着纬度的降低而升高[7]。土壤水分(湿度)主要是通过影响土壤通气性来改变土壤与大气中 O_2 和 CH_4 的传输扩散率,而且土壤湿度一定程度上也能影响甲烷氧化菌的活性,进而影响土壤 CH_4 的氧化速率[40],同时,CH_4 氧化速率随着厌氧程度的增加而减弱[37]。然而,本研究却发现,板栗林土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度之间具有明显的正相关性($P < 0.05$),但与土壤水分之间没有明显的相关性(表3)。陈匆琼等[3]在亚热带地区也发现土壤 CH_4 吸收随着土壤温度增加和水分增加分别呈现一定的增加和减弱趋势,但都没有明显的相关性。这一差异可能是因为在亚热带林地进行试验时,温度和水分不是单独影响 CH_4 的吸收通量,而是两者或多种因素共同影响[3,7]。

表 4　典型森林土壤 CH_4 吸收通量对施氮的响应

Table 4　Responses of CH_4 uptake to N fertilizer addition in typical forest soils

地点 Site	森林类型 Forest type	氮肥类型 N addition form	施氮水平 N level [N kg/(hm^2·a)]	CH_4 吸收通量 CH_4 uptake	参考文献 Reference
哥伦比亚 Columbia	温带美国黑松林 Temperate *Lodgepole Pine*	Urea	200	抑制 Inhibition	[32]
	温带加州铁杉 Temperate Western Hemlock	Urea	200	促进 Stimulation	
密歇根州 Michigan	温带黑松、铁杉和黄杉 Temperate *Pinus thunbergii P.*, *Pinaceae* and *Pseudotsuga sinensis D.*	NH_4NO_3	10～30	抑制 Inhibition	[14]
图林根州 Thuringia	温带阔叶林 Temperate broad leaf forest	KNO_3	200	抑制 Inhibition	[11]
阿拉加斯州 Alaska	温带北方针叶林 Temperate boreal *Coniferous forest*	$(NH_4)_2SO_4$	140～580	没有影响 Negligible effect	[15]
日本北部 Northern Japan	温带落叶松 Temperate Young Larch forest	NH_4NO_3	50	抑制 Inhibition	[12]
广东鼎湖山 Dinghushan	亚热带常绿阔叶林和马尾松林 Subtropical monsoon evergreen broadleaf forest and *Pinus Mas*soniana forest	NH_4NO_3	50～300	抑制 Inhibition	[34]
	亚热带针阔混交林 Subtropical mixed pine and broadleaf forest	NH_4NO_3	50～300	没有影响 Negligible effect	
广东鼎湖山 Dinghushan	亚热带季风常绿阔叶林 Subtropical monsoon evergreen broadleaf forest	NH_4NO_3	50～150	抑制 Inhibition	[10]
广东鼎湖山 Dinghushan	热带原始森林 Tropical old-growth forest	NH_4NO_3	150	抑制 Inhibition	[35]
巴拿马 Panama	热带低湿地和山林地雨林 Tropical lowland and montane forest	Urea	125	促进 Stimulation	[13]

土壤水溶性有机碳（WSOC）和微生物量碳（MBC）是土壤活性有机碳的重要指标[3,7]。大量研究表明，森林土壤 CH_4 吸收通量与 WSOC 含量之间没有明显的相关性[27,40-41]，本研究中板栗林在对照处理下也得到了相似的结论（表 2）。然而，在施肥处理条件下，土壤 CH_4 吸收通量却与 WSOC 含量呈现显著的正相关（$P < 0.05$）。这可能是因为施肥改变了土壤 WSOC 含量（图 3B），进而影响了两者之间的关系。本研究中，板栗林土壤 CH_4 吸收通量与 MBC 含量之间没有明显的相关性，这与前人在南亚热带[28]和温带[40]森林中的研究结果一致。这可能是因为土壤微生物量碳虽是土壤微生物生长的重要指标，但并不是土壤甲烷氧化菌的唯一限制因子[40]。

4　结论

板栗林地土壤 CH_4 吸收受到土壤环境因素（如温度、水分、WSOC、SOC、TN、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 等）和人为因素（如施肥）共同影响。板栗林地土壤 CH_4 吸收通量呈现明显的季节性变化，而且施加氮肥可以抑制土壤对 CH_4 的吸收，特别是无机氮肥。同时，施肥可以增加土壤活性有机碳含量，包括土壤水溶性有机碳和微生物量碳，进而影响板栗林土壤 CH_4 吸收。总之，只要是影响土壤 CH_4 产生和传输

过程的因素,最终都可能影响土壤甲烷的氧化(吸收)。但多种土壤环境因子及人为干扰对甲烷氧化菌和甲烷产生菌的影响机理至今还不十分明确。因此,今后应进一步对各种形态碳和氮对土壤 CH_4 产生及吸收(氧化)的影响机理做更深入的研究,这对准确评估经营措施对土壤 CH_4 产生和吸收的影响机制具有非常重要的意义。

参考文献:

[1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P *et al*. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[A]. Solomon S, Qin D, Manning M *et al*. Climate change 2007: the physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom, New York, USA: Cambridge University Press, 2007.

[2] 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]. J. Environ. Sci., 2008, 20: 207-215.

[3] 陈匆琼, 杨智杰, 谢锦升, 等. 中亚热带米槠天然林土壤甲烷吸收速率季节变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 17-22.
Chen C Q, Yang Z J, Xie J S *et al*. Seasonal variations of soil CH_4 uptake rate in Castanopsis carlesii forest in mid-subtropical China[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(1): 17-22.

[4] 胡正华, 张寒, 陈书涛, 等. 氮沉降对林带土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 892-897.
Hu Z H, Zhang H, Chen S T *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on N_2O and CH_4 fluxes of soil in forest belt[J]. China Environ. Sci., 2011, 31(6): 892-897.

[5] 刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区2种土地利用方式下地表 CH_4 和 N_2O 通量研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, 16(4): 304-314.
Liu H, Zhao P, Lin Y B *et al*. CH_4 and N_2O fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of south China[J]. J. Trop. Subtrop. Bot., 2008, 16(4): 304-314.

[6] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH_4 排放通量的研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 173-176.
Sun X Y. CH_4 emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing[J]. Soil. Environ. Sci., 2000, 9(3): 173-176.

[7] Fang H J, Yu G R, Cheng S L *et al*. Effects of multiple environmental factors on CO_2 emission and CH_4 uptake from old-growth forest soils[J]. Biogeosciences, 2010, 7: 395-407.

[8] Gulledge J, Hrywna Y, Cavanaugh C *et al*. Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soils[J]. FEMS Microbiol. Ecol., 2004, 49: 389-400.

[9] Mochizuki Y, Koba K, Yoh M. Strong inhibitory effect of nitrate on atmospheric methane oxidation in forest soils[J]. Soil Biol. Biochem., 2012, 50: 164-166.

[10] Zhang W, Mo J M, Zhou G Y *et al*. Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in southern China[J]. J. Geophy. Res., 2008, DOI: 10.1029/2007JD009195.

[11] Fender A C, Pfeiffer B, Gansert D *et al*. The inhibiting effect of nitrate fertilization on methane uptake of a temperate forest soil is influenced by labile carbon[J]. Biol. Fert. Soils, 2012, 48: 621-631.

[12] Kim Y S, Imori M, Watanabe M *et al*. Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in northern Japan[J]. Atmos. Environ., 2012, 46: 36-44.

[13] Veldkamp E, Koehler B, Corre M D. Indications of nitrogen-limited methane uptake in tropical forest soils[J]. Biogeosci. Discu., 2013, 10(3): 6007-6037.

[14] Ambus P, Robertson G P. The effect of increased N deposition on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes from unmanaged forest and grassland communities in Michigan[J]. Biogeochemistry, 2006, 79(3): 315-337.

[15] Whalen S C, Reeburgh W S. Effect of nitrogen fertilization on atmospheric methane oxidation in boreal forest soils[J]. Chemosph.-Glob. Change Sci., 2000, 2(2): 151-155.

[16] 程中平, 吴群, 黄俊斌, 等. 抗栗疫病板栗品种及优系鉴定[J]. 中国南方果树, 2011, 40(3): 40-43.
Cheng Z P, Wu Q, Huang J B *et al*. Primary identification of chestnut blight resistant Chinese chestnut cultivars and superior lines[J]. South China Fruits, 2011, 40(3): 40-43.

[17] 邬奇峰, 姜培坤, 王纪杰, 等. 板栗林集约经营过程中土壤活性碳演变规律研究[J]. 浙江林业科技, 2005, 9(5): 7-9.
Wu Q F, Jiang P K, Wang J J *et al*. Evaluation of soil active organic carbon after intensive management of Chinese chestnut forest[J]. J. Zhejiang For. Sci. Technol., 2005, 9(5): 7-9.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

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

[22] 刘实, 王传宽, 许飞. 4种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4075

-4084.
Liu S, Wang C K, Xu F. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China[J]. Acta Ecol. Sin., 2010, 30(15): 4075-4084.

[23] 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]. Can. J. Soil Sci., 2010, 90(1): 27-36.

[24] 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.

[25] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B *et al*. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation extraction-an automated procedure[J]. Soil Biol. Biochem., 1990, 22: 1167-1169.

[26] 刘玲玲, 刘允芬, 温学发, 等. 千烟洲红壤丘陵区人工针叶林土壤 CH_4 排放通量[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 431-439.
Liu L L, Liu Y F, Wen X F *et al*. CH_4 emission flux from soil of pine plantations in the Qian yanzhou red earth hill region of China[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2008, 32(2): 431-439.

[27] Li H F. Soil CH_4 fluxes response to understory removal and N-fixing species addition in four forest plantations in Southern China[J]. J. For. Res., 2010, 21(3): 301-310.

[28] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山主要森林生态系统地表 CH_4 通量[J]. 生态科学, 2006, 25(4): 289-293.
Zhou C Y, Zhou G Y, Wang Y H *et al*. The CH_4 uptake flux by soils of main forest ecosystems in Dinghushan[J]. Ecol. Sci., 2006, 25(4): 289-293.

[29] 曹裕松, 傅声雷, 旷远文, 胡文杰. 氮和磷增加对华南两种人工林土壤甲烷通量的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 53-58.
Cao Y S, Fu S L, Kuang Y W, Hu W J. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil CH_4 fluxes in two plantations in Southern China[J]. J. Jinggangshan Univ. (Nat. Sci.)[J]. 2010, 31(5): 53-58.

[30] Menyailo O V, Abraham W R, Conrad R. Tree species affect atmospheric CH_4 oxidation without altering community composition of soil methanotrophs[J]. Soil Biol. Biochem., 2010, 42: 101-107.

[31] Basiliko N, Khan A, Prescott C E *et al*. Soil greenhouse gas and nutrient dynamics in fertilized western Canadian plantation forests[J]. Can. J. For. Res., 2009, 39(6): 1220-1235.

[32] Gulledge J, Hrywna Y, Cavanaugh C *et al*. Effects of long-term nitrogen fertilization on the uptake kinetics of atmospheric methane in temperate forest soils[J]. FEMS Microbiol. Ecol., 2004, 49(3): 389-400.

[33] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.
Mo J M, Fang Y T, Xu G L *et al*. The short-term responses of soil CO_2 emission and CH_4 uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(4): 682-690.

[34] Zhang T, Zhu W, Mo J *et al*. Increased phosphorus availability mitigates the inhibition of nitrogen deposition on CH_4 uptake in an old-growth tropical forest, southern China[J]. Biogeosciences, 2011, 8: 2805-2813.

[35] 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 Soil, 2008, 306: 221-236.

[36] 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.

[37] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4914-4923.
Chen S L, Fang H J, Yu G R *et al*. The primary factors controlling methane uptake from forest soil and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review[J]. Acta Ecol. Sin., 2012, 32(15): 4914-4923.

[38] 王智平, 胡春胜, 杨居荣. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 305-309.
Wang Z P, Hu C S, Yang J R. Effect of inorganic nitrogen on CH_4 oxidation in soils[J]. Chin. J. Appl. Ecol, 2003, 14(2): 305-309.

[39] 邓湘雯, 杨晶晶, 陈槐, 等. 森林土壤氧化(吸收)甲烷研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 577-583.
Deng X W, Yang J J, Chen H *et al*. Advances in the research of methane oxidation in forest soils[J]. Ecol. Environ., 2012, 21(3): 577-583.

[40] Xu X K, Luo X B. Effect of wetting intensity on soil GHG fluxes and microbial biomass under a temperate forest floor during dry season[J]. Geoderma, 2012, 170: 118-126.

[41] Ullah S, Frasier R, King L *et al*. Potential fluxes of N_2O and CH_4 from soils of three forest types in Eastern Canada[J]. Soil Biol. Biochem., 2008, 40: 986-994.