

DOI: 10.5846/stxb201401120086

李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华. 施氮对桉树人工林生长季土壤温室气体通量的影响. 生态学报, 2015, 35(18): - .
Li R D, Zhang K, Su D, Lu F, Wan W X, Wang X K, Zheng H. Effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes in a *Eucalyptus* plantation during the growing season. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

施氮对桉树人工林生长季土壤温室气体通量的影响

李睿达^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 苏 丹^{1,2}, 逯 非¹, 万五星^{1,3}, 王效科¹, 郑 华^{1,*}

1 城市与区域生态国家重点实验室中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050016

摘要: 施肥是维持短期轮伐人工林生产量的重要手段, 为了提高肥料利用效率, 缓释氮肥逐渐成为广泛采用的氮肥种类。评估缓释肥施用对人工林生长季土壤温室气体通量的影响对于全面评估人工林施肥的环境效应具有重要意义。本研究以我国南方广泛种植的桉树林为对象, 采用野外控制实验研究了 4 种施氮处理 (对照 C: 0 kg/hm²; 低氮 L: 84.2 kg/hm²; 中氮 M: 166.8 kg/hm²; 高氮 H: 333.7 kg/hm²) 对土壤-大气界面 3 种温室气体 (CO₂、N₂O 和 CH₄) 通量的影响, 结果表明: (1) 4 种施氮水平下 CO₂ 排放通量、N₂O 排放通量和 CH₄ 吸收通量分别为 276.84—342.84 mg m⁻² h⁻¹、17.64—375.34 μg m⁻² h⁻¹ 和 29.65—39.70 μg m⁻² h⁻¹; 施氮显著促进了 N₂O 的排放 ($P < 0.01$), 高氮处理显著增加 CO₂ 排放和显著减少 CH₄ 吸收 ($P < 0.05$), 且 CO₂ 排放通量与 CH₄ 吸收通量随着施氮量的增加分别呈现增加和减少的趋势; (2) 生长季 CO₂ 和 N₂O 排放呈现显著正相关 ($P < 0.01$), CO₂ 排放和 CH₄ 吸收呈现显著负相关 ($P < 0.05$), N₂O 排放和 CH₄ 吸收呈现显著负相关 ($P < 0.01$); (3) 土壤温度和土壤水分是影响 CO₂、N₂O 排放通量和 CH₄ 吸收通量的主要环境因素。上述结果表明: 施用缓释肥显著增加了桉树林生长季土壤 N₂O 排放量, 且高氮处理还显著促进 CO₂ 排放和显著抑制 CH₄ 吸收, 上述研究结果可为人工林缓释肥对土壤温室气体通量评估提供参数。

关键词: 桉树人工林; 缓释氮肥; 温室气体通量

Effects of nitrogen application on soil greenhouse gas fluxes in a *Eucalyptus* plantation during the growing season

LI Ruida^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, SU Dan^{1,2}, LU Fei¹, WAN Wuxin^{1,2}, WANG Xiaoke¹, ZHENG Hua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

Abstract: Fertilization plays a vital role in maintaining the productivity of short-rotation plantations. *Eucalyptus* plantations are one of the fast-growing and high-yield plantations around the world and are numerous in south China. In order to improve nitrogen use efficiency, slow-release nitrogen fertilizers are being widely adopted. However, few studies have been done to assess the effect of slow-release fertilizer on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases (GHGs), such as carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O), and methane (CH₄). To clarify temporal changes of soil GHGs fluxes following slow-release N fertilizer application, field control trials with four levels of N application (Control: 0 kg/hm²; Low N: 84.2 kg/hm²; Medium N: 166.8 kg/hm²; High N: 333.7 kg/hm²) were initiated in a *Eucalyptus* plantation in Guangxi,

基金项目: 国家自然科学基金 (31170425); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-QN406); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05060102)

收稿日期: 2014-01-12; 网络出版日期: 2014-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

southern China. At the beginning of growing season, the nitrogen fertilizer, urea formaldehyde (a kind of slow-release fertilizer), was applied according to the local fertilization practice (once a year). Static chamber and gas chromatography techniques were used to quantify soil GHGs exchange monthly during the study period from May to November 2013. Environmental factors, such as soil temperature at 5 cm depth and soil water content at 10 cm depth, were synchronously monitored while the GHGs were collected. Before N application, no significant differences were observed for soil GHGs fluxes in all N application treatments. The results showed that (1) CO_2 emission fluxes, N_2O emission fluxes, and CH_4 absorption fluxes under four levels of nitrogen application were $276.84\text{--}342.84\text{ mg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$, $17.64\text{--}375.34\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ and $29.65\text{--}39.70\text{ }\mu\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$, respectively. Fertilization resulted in a remarkable but short increase in soil respiration over the first 2 to 3 months during the observation period, and the differences in soil respiration between the High N treatment and the control treatment were significant. Nitrogen application significantly increased the N_2O emission and persisted for 5 to 6 months after fertilization. Each N application treatment has a significant effect on N_2O emission. Moreover, High N treatment has a significantly negative effect on CH_4 oxidation. (2) During the growing season, CO_2 emission had a significantly positive correlation with N_2O emission ($P < 0.01$), and CH_4 uptake had a significantly negative correlation with both CO_2 emission and N_2O emission ($P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively). With the increase of the amount of fertilizer, the CO_2 emission fluxes increased and CH_4 oxidation fluxes decreased... (3) Soil temperature and soil water content were the main factors influencing soil respiration, N_2O emission, and CH_4 oxidation. Soil temperature and soil water content had significantly positive effects on CO_2 and N_2O emission fluxes, and soil temperature had significantly negative effects on CH_4 absorption fluxes. In conclusion, during the growing season in a *Eucalyptus* plantation, slow-release nitrogen application not only significantly increases soil N_2O emission, but also had significant effects on CO_2 emission and CH_4 oxidation after High N treatment. Our results can provide parameters for accurately assessing the effects of slow-release nitrogen application on GHGs fluxes in a *Eucalyptus* plantation.

Key Words: *Eucalyptus* plantation; slow-release nitrogen fertilizer; greenhouse gases fluxes

全球气温升高和人为导致的氮素累积是全球变化的两大根本因素。全球变暖与大气中 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 等温室气体浓度的升高密切相关。其中, CO_2 是大气中最主要的温室气体^[1]。从工业革命开始大气中的 N_2O 浓度急剧上升, 到目前 N_2O 向全球排放贡献了 8% 的温室气体^[2]。土壤微生物是产生 N_2O 的主要途径, 并随着添加氮肥的增加而增加。从 1860 年至 2055 年间 2.5% 的氮肥转化为 N_2O ^[3]。 CH_4 化学性质非常活跃, 参与改变大气的化学组成的活动^[4]。 CH_4 与对流层的羟基自由基反应, 减少羟基自由基的氧化能力, 消减大气污染物(如氟氯碳化物), 同时促进其他温室气体(O_3 , CO 和 CO_2) 的生成。在平流层, CH_4 与大气多种组分发生反应生成水蒸气, 继而破坏平流层臭氧。因此, 对温室气体产生和消耗机制的研究引起了广泛关注。

全球人工林约占森林总面积的 7%, 并以每年约 500 万公顷的速度增加^[5]。施肥是人工林提高木材产量、促进可持续经营的主要管理措施之一, 这一措施会改变人工林的生物化学循环并对全球温室效应产生极重要的反馈^[6]。因此, 研究施肥对人工林温室气体排放的影响, 对于提高肥料利用效率、减少环境污染^[7]和评估温室效应具有重要意义。外源氮的添加对土壤—大气界面温室气体通量的影响已获得了大量深入的研究^[8-9], 但不同地区、不同施氮措施导致氮肥对温室气体产生和消耗的影响存在极大争议, 难以获得一致的观点^[10-12]。尿素等速效氮肥作为基肥施用会显著增加 N_2O 排放^[13]同时抑制 CH_4 氧化^[14]。已有研究表明不同的施氮种类会造成温室气体排放的显著差异^[15]。如尿素和缓释氮肥对旱地玉米地土壤 CO_2 排放通量达到显著差异水平^[16], 不同的氮肥对土壤 CH_4 氧化速率也带来显著的差异^[17]。由于缓释氮肥在人工林的应用尚未完全展开, 因此深入研究缓释氮肥对人工林温室气体的影响显得越发重要和紧迫。

桉树是我国南方地区大面积种植的速生丰产树种, 桉树人工林紧紧依赖缩短轮伐时间和大量添加氮肥来提高木材的生产量。为提高肥料利用效率, 缓释氮肥正在逐渐代替速效氮肥被广泛采用^[18]。本文以桉树人

工林 3 种强度的缓释氮肥对土壤 3 种温室气体的动态变化进行比较研究,其目的是:(1)明确缓释肥及其施肥强度对 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体排放或吸收动态及量值的影响;(2)揭示生长季人工林土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体通量的相关关系;(3)研究环境因子对桉树林土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体的影响。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本研究样地位于我国广西省扶绥县国有东门林场(107°15′—108°00′ E, 22°17′—22°30′ N)。该地区属于北热带季风气候区,光热充足,雨热同季,夏湿冬干,年平均气温 21.2—22.3 °C, 1 月均温 13.2 °C, 7 月均温 27.9 °C。年降雨量 1100—1300 mm,主要集中在 6—8 月,占全年降雨量的 51.03%。研究区域土壤以砂页岩发育而成的赤红壤为主,pH 值在 4.0—6.0 之间。

1.2 试验设计

广西东门林场是亚洲最大的桉树基因库,主要经营以桉树为主的商品用材林。在广西东门林场选取林龄 2 年的桉树林样地 20 块,取样测定土壤养分状况,从 20 块样地中,选择代表平均肥力水平的样地开展施肥梯度实验。样地基本特征是:pH 值为 3.91,土壤总碳、总氮分别为 $(2.31 \pm 0.13) \text{ g/kg}$ 和 $(0.15 \pm 0.02) \text{ g/kg}$,速效钾为 $(88.85 \pm 11.1) \mu\text{g/g}$,土壤碳氮比为 15.57 ± 0.79 。样地平均坡度约为 10°,林木行距 4 m,株距 2 m,林下植被有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentos*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)、三叉苦(*Euodia lepta*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等,植被覆盖度为 60%。

结合当地施肥习惯和施肥强度,采用的施肥方式为穴施(距桉树树干基部 30—40 cm 处挖 10 cm 深的坑穴,放入肥料后,覆土),肥料种类为脲甲醛缓释氮肥(含氮量 38.5%,上海大洋生态有机肥有限公司),施氮时间为 2013 年 5 月 19 日。在桉树林样地中设置 4 个施氮梯度:对照(C:0 kg/hm²)、低氮(L:84.2 kg/hm²)、中氮(M:166.8 kg/hm²)和高氮(H:333.7 kg/hm²),其中中氮水平为东门林场常规施氮水平。每个样地包含 12 个 10 m×10 m 的样方,每个样方之间设置 5 m 缓冲带,每个施氮水平设置 3 个重复。

1.3 取样与样品分析

取样时间为 2013 年 5 月至 2013 年 11 月,根据气象条件,在桉树生长季取样 5 次。土壤温室气体通量测定采用静态箱—气相色谱法。为保证试验的平行性,每次采集气体样品时,均在同一点进行。采样前将地表凋落物清理干净。采样箱为组合式,由基座和顶箱(透明亚克力)两部分组成。基座(含水封槽):长×宽×高=41 cm×41 cm×5 cm;顶箱:长×宽×高=40 cm×40 cm×40 cm。箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀。采样时间为上午 9:00—11:00。采样时间为 30 min,每隔 10 min 用 QC—1S 型气体采样仪(北京市劳保所科技发展有限责任公司)每次抽取箱内气体 300 mL 于 500 mL 气体采样袋(大连海德科技有限公司)中。样品采集后及时带回实验室采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪(7890A GC System, USA)同时测定 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体浓度。

采用下列公式计算气体通量(单位时间内单位面积土壤表面气体质量的变化):

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中, F 为气体通量($\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), ρ 为标准状态下的气体密度(mg/m^3), V 为静态箱的体积(m^3), A 为静态箱横断面面积(m^2), $\Delta c / \Delta t$ 为 Δt 时间内静态箱内气体浓度变化速率($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), T 为空气温度(°C)。每个处理下的样地设置 3 个重复,测量所得的通量数据,对 4 个气样浓度进行线性回归,只有当回归系数 $R^2 > 0.80$ 时,才视为有效数据。

采集温室气体时,采用土壤温度水分测定仪(浙江托普仪器有限公司)同步测定静态箱附近 0—5 cm 深土壤温度(T_5)和 0—10 cm 深土壤含水量(W_{10})。

1.4 数据分析

所有数据分析和处理主要借助 SPSS 16.0 和 Sigma Plot 11.0 完成。采用双因素方差分析和 Duncan 多重

比较法检验不同采样时间和施氮处理之间各指标的差异显著性。采用 Spearman 相关研究法分析温室气体通量间及其与环境因子间的相关关系。采用线性回归建立施氮量与温室气体通量的关系。

2 结果

2.1 土壤温室气体排放时间动态

由图 1 可知,在桉树人工林的生长季过程中 CO₂和 N₂O 排放通量呈现出先剧烈增加后逐渐降低的趋势。双因素方差分析表明 CO₂排放在不同的采样时间,其差异达到极显著水平(表 1):CO₂排放通量在 6—8 月达到最高,其次是 9 月的通量值,10—11 月排放通量最低,这一阶段的 CO₂排放通量与施肥前的通量无显著性差异。N₂O 排放在不同采样时间也达到极显著性差异(表 1):N₂O 排放通量在 6 月底(施氮后 5 周)显著高于其他月份,8—9 月的通量显著高于 10—11 月。生长季后期,N₂O 排放通量与施肥前的通量无显著性差异。在生长季,时间对 CH₄吸收通量的影响并不显著(表 1)。

表 1 氮肥与时间对温室气体通量影响的双因素方差分析结果

Table 1 Results of two-way ANOVA of effects of Nitrogen fertilization and time on GHGs fluxes

处理 Treatment	CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	N ₂ O 排放通量 N ₂ O emission flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ 吸收通量 CH ₄ absorption flux/μg m ⁻² h ⁻¹
氮肥 Nitrogen fertilization	**	** *	*
时间 Time	** *	** *	n.s.
氮肥×时间 Nitrogen fertilization× Time	n.s	** *	n.s.

n.s.无显著性差异, * *P* < 0.05, ** *P* < 0.01, ** * *P* <0.001

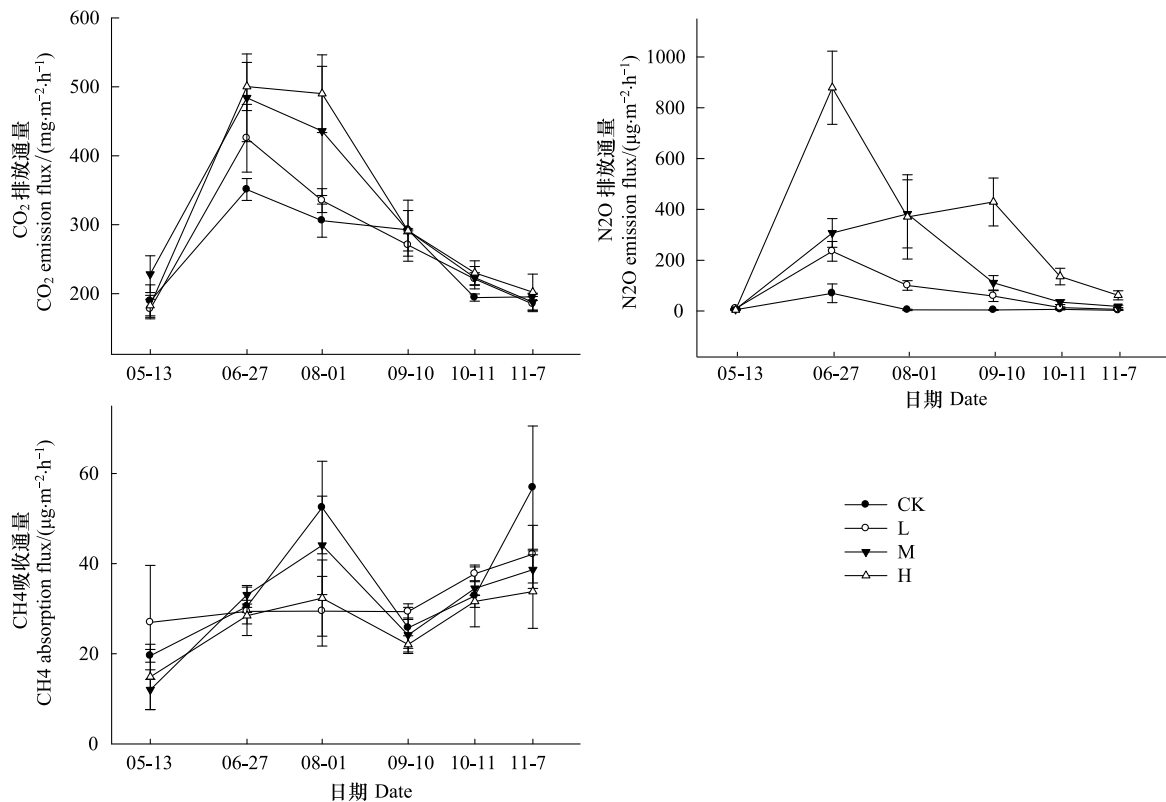


图 1 温室气体通量时间动态变化
Fig.1 Temporal dynamics of GHGs fluxes

2.2 施肥对土壤温室气体通量的影响

由表 2 可知,高氮处理下的 CO₂排放通量与对照处理差异显著($P<0.05$);各个施氮水平的 N₂O 排放通量均显著高于对照($P<0.05$);高氮处理下的 CH₄吸收通量与对照处理差异显著($P<0.05$)。CO₂、N₂O 的排放通量与施氮量呈现极显著的线性正相关(图 2, $P<0.001$),CH₄吸收通量与施氮量呈现极显著的线性负相关(图 2, $P<0.01$)。

表 2 不同施氮处理下的温室气体通量均值多重比较

Table 2 Duncan's multiple-range test for the means of soil-atmosphere fluxes of GHGs under different levels of nitrogen fertilization			
氮处理 N treatment	CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	N ₂ O 排放通量 N ₂ O emission flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ 吸收通量 CH ₄ absorption flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)
对照 CK	267.84±17.48 c	17.64±9.41 d	39.70±4.64 b
低氮 Low N	287.43±24.74 bc	82.90±23.72 c	33.91±2.42 ab
中氮 Medium N	324.45±37.47 ab	170.82±46.73 b	34.91±2.76 ab
高氮 High N	342.84±36.66 a	375.34±86.92 a	29.65±2.34 a

数据为平均值±标准误;a、b、c 表示用 Duncan 检验在 0.05 显著水平下的差异性

2.3 土壤温室气体间的相关关系

由表 3 可知,在桉树生长季土壤 CO₂与 N₂O 排放通量的相关系数为 0.662,达到了极显著正相关关系($P<0.01$)。土壤 CO₂排放吸收通量与 CH₄吸收通量的相关系数为-0.277,达到了显著负相关关系($P<0.05$)。土壤 N₂O 排放通量与 CH₄吸收通量的相关系数为-0.362,达到了极显著负相关关系($P<0.01$)。

2.4 环境因子对温室气体的影响

在生长季土壤温度平均值的变幅为 21.57—28.28℃,土壤含水量平均值的变幅为 9.15—16.11%。由表 2 可知,土壤温度显著影响了 3 种温室气体通量($P<0.01$):与 CO₂和 N₂O 排放呈正相关,并与 CH₄吸收呈负相关。土壤含水量与 CO₂和 N₂O 排放存在显著的正相关($P<0.01$ 和 $P<0.05$)。可见,土壤温度和含水量也是影响桉树人工林生长季温室气体排放通量的重要因素。

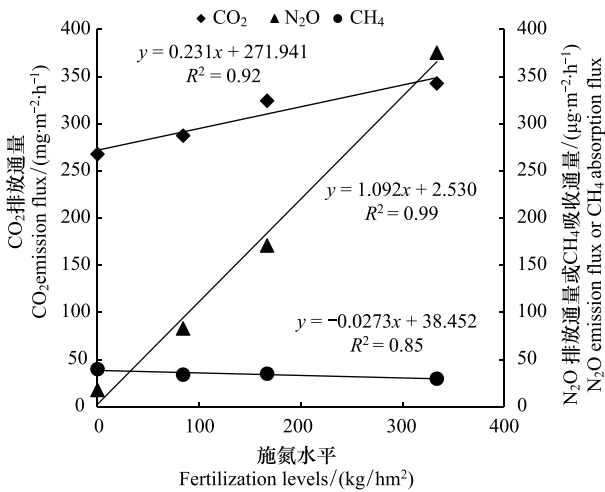


图 2 施氮水平对温室气体通量的影响
Fig.2 Effects of fertilization levels on GHGs fluxes

表 3 桉树人工林温室气体通量间及其与环境因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficiente of GHGs fluxes, and GHGs with environmental factors during <i>Eucalyptus</i> growing season			
温室气体通量及环境因子 GHGs fluxes and environmental factors	CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	N ₂ O 排放通量 N ₂ O emission flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ 吸收通量 CH ₄ absorption flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)
CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux/(mg m ⁻² h ⁻¹)	1.000		
N ₂ O 排放通量 N ₂ O emission flux/(μg m ⁻² h ⁻¹)	0.662 **	1.000	
CH ₄ 吸收通量 CH ₄ absorption flux/(μg m ⁻² h ⁻¹)	-0.277 *	-0.362 **	1.000
T ₅ /℃	0.736 **	0.720 **	-0.416 **
W ₁₀ /%	0.427 **	0.258 *	-0.009

数据为 Spearman 相关系数,** 表示在 0.01 显著水平下的差异性;* 表示在 0.05 显著水平下的差异性;T₅表示 0—5 cm 深土壤温度,W₁₀和 0—10 cm 深土壤含水量

3 结论与讨论

3.1 施氮对温室气体的影响

低氮、中氮和高氮处理下土壤的 CO_2 排放通量高于对照 7.3%, 21.1% 和 28.0%, 且高氮处理下的排放通量显著高于对照处理(表 1)。其主要原因可能有: (1) 施氮促进桉树人工林的生产量、根系或(和)微生物活性进而促进土壤呼吸^[8], 尤其在生长季根系呼吸能占土壤呼吸的相当高的比例^[19]。因此在本研究中发现土壤呼吸与施氮量呈现良好的正相关关系($R^2=0.92$), 随着施氮量的增加而逐渐增加, 并在高氮处理下与对照产生显著性差异(表 2, $P<0.05$); (2) 尿素水解: $((\text{NH}_2)_2\text{CO}+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow 2\text{NH}_4^++\text{CO}_2+2\text{OH}^-)$ 。Basiliko 等^[6] 研究发现尿素添加至土壤后会矿化并释放大量的 CO_2 。依据当地对桉树幼林的施肥习惯, 本次试验采用以尿素为主要速效成分的脲甲醛缓释肥料, 因此在本次试验中观测到 CO_2 排放通量在施氮后 5 周出现的峰值可能是由于脲甲醛中的尿素分解并释放了 CO_2 。这与 Jassal 等^[1] 研究结果类似: 土壤呼吸在施加缓效尿素后 6 周出现峰值, 在随后的 3 个月内 CO_2 排放通量逐渐减低。

N_2O 排放通量与氮肥施用量呈线性正相关(图 2, $P<0.01$)。这与 Kim 等在日本落叶松林添加不同梯度的 NH_4NO_3 溶液结果一致^[11]。氮添加后 N_2O 排放明显增加的原因可能有: (1) 土壤氮素供需不平衡。土壤微生物和植物对氮素的吸收低于肥料的释放量, 氮素在添加进入土壤后被硝化细菌和反硝化细菌利用产生了大量的 N_2O ^[20-22], 欧洲已有研究表明, 施加 NH_4NO_3 后 N_2O 的排放通量高出对照的 8 倍^[23]; (2) 氮的添加刺激桉树生长, 因此根系生物量累积增加, 有利于微生物从根部获取更多的碳源作为硝化和反硝化反应的底物并为微生物提供能量, 进而促进 N_2O 的排放^[24]; (3) 外源氮的输入刺激土壤营养元素的矿化分解, 更多可利用性矿化态氮释放进入土壤, 进一步造成氮素在短期内无法利用, 而以气态扩散或淋溶的形式流失^[25-26]。

与以往研究认为施氮缓解甲烷氧化菌氮限制^[27], 促进氨氧化细菌或好氧甲烷氧化菌的活性^[28] 不同。本研究发现高氮处理显著抑制 CH_4 吸收通量(表 2, $P<0.05$), 其原因可能是: 1) NH_4^+ 与 CH_4 竞争甲烷单加氧酶造成的抑制作用^[29-30]。2) NH_4^+ 氧化或 NO_3^- 还原过程中产生的羟胺(NH_2OH) 或亚硝酸盐(NO_2^-) 抑制 CH_4 吸收^[30]。3) 大量铵盐造成土壤渗透压胁迫也能抑制 CH_4 氧化^[31]。本次试验的结果与挪威^[32] 和瑞典^[9] 进行类似的施氮试验的结果一致, 证明在新造林的施肥初期, 氮添加对 CH_4 氧化存在负效应。

3.2 土壤温室气体间的相关关系

3.2.1 CO_2 排放与 N_2O 排放

在桉树人工林施肥条件下, 土壤 CO_2 排放与 N_2O 排放有显著的正相关关系(表 2, $P<0.01$)。这与在温室气体在自然条件的湿地^[33] 和草地^[34] 的类似研究结果一致。然而施氮后 CO_2 与 N_2O 的排放保持正相关的可能原因是: (1) 土壤微生物通过分解有机质获得基质和能量, 以促进氮的矿化分解和迁移转化, 因此硝化和反硝化反应与土壤有机质的矿化紧密相关^[33], 故 CO_2 与 N_2O 的排放存在显著正相关; (2) CO_2 与 N_2O 对氮添加的响应具有同向性。与认为施氮抑制土壤呼吸的研究结果不同, 本研究发现施氮处理下 CO_2 排放通量与施氮量存在良好的正相关关系(图 2), 这与莫江明等^[35] 在广东鼎湖山季风林模拟土壤 CO_2 排放对氮沉降的响应结果一致: 各个施氮水平均促进了土壤 CO_2 的排放量; (3) 植物和土壤通过蒸腾和蒸发作用形成根际干燥的土壤条件, 增加了根际氧气的扩散速率^[36], 有利于土壤有机质的分解和氮素的矿化转移, 进而促进了 CO_2 和 N_2O 排放。

3.2.2 CO_2 排放与 CH_4 吸收

本研究发现土壤 CO_2 排放通量与 CH_4 吸收通量存在显著的负相关(表 2, $P<0.05$)。Koschorreck 和 Conrad 的研究发现在有机质土层(O horizon) 具有大量新鲜的或部分分解的有机物质, CO_2 在该层达到最大值, 然而未观测到 CH_4 氧化^[37]。造成 CH_4 氧化与 CO_2 排放不同步或者呈现相反关系的原因可能是: (1) CH_4 氧化通常受到氮肥的抑制, 而氮肥对生长季的人工林土壤 CO_2 排放表现为促进作用; (2) 在微生境尺度上, CH_4 吸收速率的减少归因于土壤呼吸的增加进而引起的土壤氧气限制^[38]。土壤呼吸的大量产生造成土壤局部环境氧压

的减少,进而阻碍 CH_4 氧化。

3.2.3 N_2O 排放与 CH_4 吸收

桉树生长季 N_2O 排放通量与 CH_4 氧化通量之间存在显著正相关(表 2, $P < 0.01$),同时由图 1 可知,在生长季 N_2O 排放与 CH_4 吸收通量之间大致呈现相反的变化趋势。徐慧等^[39]在长白山不同土壤测定温室气体通量时发现,6—8 月间 N_2O 排放和 CH_4 吸收之间存在一种互为消长的关系。这可能是由于:(1)施肥使甲烷氧化细菌(*CH₄ oxidizing bacteria*)的相对活性由甲烷氧化菌(*methanotrophs*)主导转变为硝化细菌(*nitrifying bacteria*)主导^[13],而这一转变同时导致了土壤 CH_4 吸收量的减弱和 N_2O 排放的加强。因此,在桉树生长季 2 种温室气体表现相反的变化趋势(图 2);(2)土壤温度对 N_2O 和 CH_4 气体的影响相反。 N_2O 随着土壤温度的降低其排放通量显著逐渐降低(表 3, $P < 0.01$),而 CH_4 的吸收则与土壤温度呈现显著的负相关(表 3, $P < 0.01$)。

3.3 环境因子对温室气体的影响

在桉树人工林生长季,土壤呼吸表现出显著的季节性动态变化(表 1),与我国热带雨林或常绿阔叶林等森林生态系统中的观测结果一致^[40-41]。 CO_2 排放通量在生长季前期增加随着生长季的结束出现下降,这可能与 6—8 月降雨集中、气温较高有关(表 2)。在此期间,植物生长迅速且土壤微生物活性较强,分解有机质能力高于非生长季,因此土壤 CO_2 排放通量出现明显增加^{[24][42-43]}。

土壤温度和含水量是影响土壤 N_2O 排放的重要环境因子。硝化过程的最适温度为 25—35 °C^[36],与本次研究桉树林生长季的土壤温度在 21.57—28.28 °C 接近,这可能是本研究中土壤温度与 N_2O 排放相关性高的原因。当土壤处于饱和含水量以下,硝化作用产生的 N_2O 占总产生量的 61—98%,此时 N_2O 排放通量随着土壤含水量的增加而增加^[36],即硝化作用是产生 N_2O 的主导过程。由图 2 和表 3 可知,土壤温度、含水量和施氮对土壤 N_2O 排放均为

土壤温度主要通过影响甲烷氧化菌酶的活性影响土壤吸收 CH_4 ,由于 CH_4 氧化菌是中温性微生物,土壤吸收 CH_4 的最适温度为 20—30 °C^[44]。然而,本研究中人工林 6—11 月土壤平均温度在 21.57—28.28 °C,却发现 CH_4 吸收通量与土壤温度呈显著的负相关($P < 0.01$)。这可能由于其他因素,如施氮的影响掩盖了土壤温度对 CH_4 的实际影响。此外, CH_4 吸收与土壤含水量关系不显著($P > 0.05$),可能是由于研究区域土壤排水良好,土壤含水量在生长季处于较低水平(<20%)。这与陈勿琼等^[45]在中亚热带米槠天然林的结果类似。

研究表明,尽管施氮水平、土壤温度和土壤含水量 3 个因子均表现出与 CO_2 和 N_2O 的排放呈正相关,而与 CH_4 的吸收通量呈负相关(图 2,表 3),但土壤 3 种温室气体通量并非受到某单一因子的影响,而是受到施氮、土壤温度和土壤含水量等因子共同作用的结果。已有的研究结果也表明:土壤温度和含水量增加会导致森林土壤的 CO_2 和 N_2O 表现为排放源^[46]。本研究中,温室气体通量受施氮水平、土壤温度和土壤含水量 3 个因子共同作用的影响, CO_2 和 N_2O 排放通量以及 CH_4 吸收通量既在不同的施氮处理间呈现显著差异,也存在显著的时间动态规律。

参考文献(References):

- [1] Jassal R S, Black T A, Trofymow J, Roy R, Nesic Z. Soil CO_2 and N_2O flux dynamics in a nitrogen-fertilized Pacific Northwest Douglas-fir stand. *Geoderma*, 2010, 157(3): 118-125.
- [2] Harter J, Krause H M, Schuettler S, Ruser R, Fromme M, Scholten T, Kappler A, Behrens S. Linking N_2O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. *The ISME Journal*, 2014, 8(3): 660-674.
- [3] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 659-662.
- [4] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [5] Global Forest Resources Assessments (FRA). Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry Paper, 2010: 163-163.

- [6] Basiliko N, Khan A, Prescott C E, Roy R, Grayston S J. Soil greenhouse gas and nutrient dynamics in fertilized western Canadian plantation forests. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 2009, 39(6): 1220-1235.
- [7] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 2003, 10(2): 126-139.
- [8] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [9] Börjesson G, Nohrstedt H Ö. Short-and long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in three Swedish forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(2): 113-118.
- [10] Jäger N, Duffner A, Ludwig B, Flessa H. Effect of fertilization history on short-term emission of CO₂ and N₂O after the application of different N fertilizers - a laboratory study. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(2): 161-171.
- [11] Kim Y S, Imori M, Watanabe M, Hatano R, Yi M J, Koike T. Simulated nitrogen inputs influence methane and nitrous oxide fluxes from a young larch plantation in northern Japan. *Atmospheric Environment*, 2012, 46(1): 36-44.
- [12] Moscatelli M C, Lagomarsino A, De Angelis P, Grego S. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 447-454.
- [13] Castro M S, Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, Gholz H L, Lewis D. Effects of nitrogen fertilization on the fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ from soils in a Florida slash pine plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(1): 9-13..
- [14] 张广斌, 马静, 马二登, 徐华, 蔡祖聪. 尿素施用对稻田土壤甲烷产生、氧化及排放的影响. *土壤*, 2010, 42(2): 178-183.
- [15] Inselsbacher E, Wanek W, Ripka K, Hackl E, Sessitsch A, Strauss J, Zechmeister-Boltenstern S. Greenhouse gas fluxes respond to different N fertilizer types due to altered plant-soil-microbe interactions. *Plant and Soil*, 2011, 343(1/2): 17-35.
- [16] 张俊丽, 高明博, 温晓霞, 陈月星, 杨生婷, 李露, 廖允成. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO₂ 排放量的影响. *生态学报*, 2012, 32(19): 6147-6154.
- [17] 葛瑞娟, 宋长春, 王丽丽, 杨桂生. 氮输入对小叶章湿地土壤甲烷产生与氧化能力的影响. *湿地科学*, 2010, 8(2): 176-181.
- [18] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价. *环境科学*, 2011, 32(4): 1133-1138.
- [19] Hanson P, Edwards N, Garten C, Andrews J. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [20] Currie W S. The responsive C and N biogeochemistry of the temperate forest floor. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14(8): 316-320.
- [21] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 113-119.
- [22] Venterea R T, Groffman P M, Verchot L V, Magill A H, Aber J D, Steudler P A. Nitrogen oxide gas emissions from temperate forest soils receiving long-term nitrogen inputs. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 346-357.
- [23] Sitaula B, Sitaula J, Aakra Å, Bakken L. Nitrification and methane oxidation in forest soil: Acid deposition, nitrogen input and plant effects. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 130(1/4): 1061-1066.
- [24] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 赵志春. 淡水沼泽湿地 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应. *环境科学*, 2007, 27(12): 2369-2375.
- [25] Aarnio T, Martikainen P. Mineralization of C and N and nitrification in Scots pine forest soil treated with nitrogen fertilizers containing different proportions of urea and its slow-releasing derivative, ureaformaldehyde. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(10): 1325-1331.
- [26] Bargali S S, Singh S P. Aspects of productivity and nutrient cycling in an 8-year-old Eucalyptus plantation in a moist plain area adjacent to central Himalaya, India. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(9): 1365-1372.
- [27] Papen H, Daum M, Steinkamp R, Butterbach-Bahl K. N₂O- and CH₄-fluxes from soils of a N-limited and N-fertilized spruce forest ecosystem of the temperate zone. *Journal of Applied Botany*, 2001, 75(3/4): 159-163.
- [28] Bodelier P L, Roslev P, Henckel T, Frenzel P. Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots. *Nature*, 2000, 403(6768): 421-424.
- [29] Dunfield P, Knowles R. Kinetics of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(8): 3129-3135.
- [30] King G M, Schnell S. Effect of increasing atmospheric methane concentration on ammonium inhibition of soil methane consumption. *Nature*, 1994, 370(6487): 282-284.
- [31] Whalen S. Influence of N and non-N salts on atmospheric methane oxidation by upland boreal forest and tundra soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(3/4): 279-287.

- [32] Sitaula B, Bakken L, Abrahamsen G. CH_4 uptake by temperate forest soil: effect of N input and soil acidification. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(7): 871-880.
- [33] 卢妍, 徐洪文, 宋长春. 沼泽湿地生态系统 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放通量的相互关系研究. *农业现代化研究*, 2011, 32(5): 637-640.
- [34] 董云社, 章申, 齐玉春, 陈佐忠, 耿远波. 内蒙古典型草地 CO_2 , N_2O , CH_4 通量的同时观测及其日变化. *科学通报*, 2000, 45(3): 318-322.
- [35] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花. 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. *生态学报*, 2005, 25(4): 682-690.
- [36] 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生, 排放及其影响因素. *地理学报*, 1999, 54(6): 534-542.
- [37] Koschorreck M, Conrad R. Oxidation of atmospheric methane in soil: measurements in the field, in soil cores and in soil samples. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(1): 109-121.
- [38] Azam F, Müller C, Weiske A, Benckiser G, Ottow J. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 54-61.
- [39] 徐慧, 陈冠雄, 马成新. 长白山北坡不同土壤 N_2O 和 CH_4 排放的初步研究. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 373-377.
- [40] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97-103.
- [41] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 陈建会, 冯志立, 李检舟. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 31-39.
- [42] assal R S, Black T A, Roy R, Ethier G. Effect of nitrogen fertilization on soil CH_4 and N_2O fluxes, and soil and bole respiration. *Geoderma*, 2011, 162(1/2): 182-186.
- [43] 周存宇, 张德强, 王跃思, 周国逸, 刘世忠, 唐旭利. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化. *生态学报*, 2004, 24(8): 1738-1741.
- [44] Nesbit S, Breitenbeck G. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1992, 41(1): 39-54.
- [45] 陈勿琼, 杨智杰, 谢锦升, 刘小飞, 钟小剑. 中亚热带米槠天然林土壤甲烷吸收速率季节变化. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 17-22.
- [46] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 万运帆, 高清竹, 秦晓波, 马欣. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1093-1098.