



贾 朋, 魏 龙, 王 燕, 等. 马占相思人工林土壤温室气体排放日变化规律研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 84-90.

马占相思人工林土壤温室气体排放日变化规律研究

贾 朋^{1,2}, 魏 龙², 王 燕¹, 刘 珊¹, 高常军², 周 平², 李吉跃¹

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要:【目的】探索马占相思 *Acacia mangium* 人工林土壤温室气体排放日变化规律, 确定最佳观测时间。【方法】采用静态箱-气相色谱法, 对华南地区马占相思人工纯林土壤 3 种温室气体 CO₂、CH₄、N₂O 通量进行连续观测。【结果】马占相思人工林土壤 3 种温室气体具有明显的日变化特征, 马占相思人工林土壤为 CO₂ 和 N₂O 的排放源及 CH₄ 的吸收汇, 其通量日变化幅度分别为: 401.33 ~ 555.59 mg · m⁻² · h⁻¹、24.50 ~ 34.72 μg · m⁻² · h⁻¹ 和 -10.96 ~ -41.88 μg · m⁻² · h⁻¹。地表 CO₂、CH₄ 通量和 5 cm 深土壤温度呈极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) 相关, 地表 N₂O 通量同温度的相关性不显著。【结论】通过对校正系数分析, 综合考虑 3 种温室气体以及取样的可操作性, 华南地区马占相思人工林雨季的最佳观测时间为 09:00 时左右。

关键词: 马占相思; 温室气体; 日变化; 观测时间; 人工林土壤

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2016)06-0084-07

Diurnal variations in greenhouse gas emissions from *Acacia mangium* plantation soil

JIA Peng^{1,2}, WEI Long², WANG Yan¹, LIU Shan¹, GAO Changjun², ZHOU Ping², LI Jiyue¹

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract:【Objective】In order to study the diurnal variations in fluxes of greenhouse gases including CO₂, CH₄ and N₂O from *Acacia mangium* plantation soil, and determine the optimal observation time.【Method】The emission fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from *A. mangium* plantation soil in southern China were continually observed using static-chamber and gas chromatograph.【Result】The fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from *A. mangium* plantation soil had clear diurnal variations. The *A. mangium* plantation soil was a source of CO₂ and N₂O and a sink of CH₄. The daily fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ ranged from 401.33 to 555.59 mg · m⁻² · h⁻¹, 24.50 to 34.72 μg · m⁻² · h⁻¹ and -10.96 to -41.88 μg · m⁻² · h⁻¹ respectively. The fluxes of CO₂ or CH₄ from soil surface had highly significant ($P < 0.01$) or significant ($P < 0.05$) positive correlations with soil temperature at 5 cm depth, while CH₄ flux from soil surface was not significantly correlated with soil temperature.【Conclusion】Based on the analysis of the correction coefficients of three greenhouse gases and manipulability of sampling, the optimal time for collection and observation of these three greenhouse gases from *A. mangium* plantation in southern China during rainy seasons is around 09:00.

收稿日期: 2016-01-10 优先出版时间: 2016-10-24

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20161024.1041.014.html>

作者简介: 贾 朋 (1992—), 男, 硕士研究生, E-mail: jiapengforest@163.com; 通信作者: 周 平 (1977—), 女, 研究员, 博士, E-mail: zhouping@sinogaf.cn; 李吉跃 (1959—), 男, 教授, 博士, E-mail: ljyymy@vip.sina.com

基金项目: 广州市森林碳汇计量与监测项目 (GZFC-KT2)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

Key words:*Acacia mangium*; greenhouse gas; diurnal variation; observation time; plantation soil

大气中温室气体浓度增加所引起的全球气候变暖成为当今全人类面临的最大挑战之一^[1-2]。CO₂、CH₄ 和 N₂O 是 3 种对全球气候变化影响最大的温室气体,对温室效应的贡献可达 80% 左右^[3]。IPCC 第 5 次研究报告显示,全球 CO₂ 年均体积分数达到 390.5 cm³ · m⁻³, CH₄ 和 N₂O 年均体积分数达到 1 803.0 和 324.2 mm³ · m⁻³, 分别比工业革命(1750 年)前增加了 40%、150% 和 20%,达到历史的最高值,全球温室效应越来越明显^[4-5]。森林是陆地生态系统的主体,森林土壤是 CO₂、CH₄、N₂O 等主要温室气体的源、汇地之一^[6-7]。从 20 世纪 70 年代以来,世界各国政府和科学界在不同生态系统温室气体源和汇方面开展了大量的工作^[8-10]。目前,国内对森林生态系统土壤温室气体源和汇的研究主要集中于季节性排放特征^[11-13]。人工林是我国森林类型的重要组成部分,第 8 次全国森林资源清查结果显示,全国人工林面积积达 6 933 万 hm²,占世界人工林面积的 1/3^[14]。华南地区是我国最重要的人工林产区,人工纯林的土壤温室气体日变化排放有着怎样的规律? 相关的研究少见报道。本研究以亚热带常见速生丰产林马占相思 *Acacia mangium* 人工纯林为研究对象,通过对 3 种温室气体通量及环境因子的测定,探索马占相思

人工林土壤温室气体排放通量的日变化特征,确定我国亚热带地区人工林不同温室气体通量的最佳观测时间,旨在为研究亚热带地区人工林地表温室气体排放规律提供依据和参考。

1 研究区概况

本研究设在广州增城市国营增城林场,该地区海拔最高为 494.6 m,平均海拔 200 m 左右。研究区属亚热带海洋性季风气候,年平均降水量 1 904 mm,4—9 月为雨季(月平均降水超过 200 mm),占全年降水量的 85% 左右,11 月至翌年 1 月为旱季(月平均降水 50 mm 以下);年平均温度 21.6 ℃,最冷月(1 月)的多年平均温度为 13.3 ℃,最热月(8 月)的多年平均温度为 28.4 ℃。研究样地马占相思林地理位置为北纬的 23°19′45″,东经 113°47′22″,位于海拔 106 m 的山坡上,为 1995 年栽种的人工林。乔木层以人工栽种的马占相思为主,间或有少量布渣叶 *Microcos paniculata* 等分布;灌木层优势植物为五指毛桃 *Ficus hirta*、瓜馥木 *Fissistigma oldhamii* 等,草本层以白花悬钩子 *Rubus leucanthus*、芒萁 *Dicranopteris pedata* 等为主。土壤为花岗岩发育而成的赤红壤,土壤呈酸性,土壤理化性质见表 1。

表 1 马占相思人工林土壤理化性质
Tab. 1 Physical and chemical properties of *Acacia mangium* plantation soil

土层深度/cm	pH	w/(mg · kg ⁻¹)			w/(g · kg ⁻¹)		
		NH ₄ ⁺ - N	NO ₃ ⁻ - N	有效磷	全磷	全氮	有机质
0 ~ 10	4.27 ± 0.15	14.58 ± 1.37	19.27 ± 1.70	4.40 ± 0.32	0.29 ± 0.01	1.26 ± 0.31	20.22 ± 4.13
10 ~ 20	4.21 ± 0.04	10.60 ± 1.59	19.04 ± 1.27	3.05 ± 0.13	0.28 ± 0.02	1.15 ± 0.08	17.91 ± 2.55
20 ~ 30	4.37 ± 0.06	8.38 ± 1.93	12.06 ± 2.30	3.68 ± 1.22	0.31 ± 0.05	0.65 ± 0.18	11.64 ± 3.96
30 ~ 50	4.60 ± 0.04	7.74 ± 2.14	8.89 ± 1.76	1.34 ± 0.13	0.25 ± 0.01	0.36 ± 0.15	5.70 ± 2.94

2 研究方法

2.1 样品采集时间与方法

温室气体通量采用静态箱 - 气相色谱法测定。采样箱为组合式,由底座、水封槽和顶箱 3 部分组成,均为 PVC 材质。底座圆筒形(直径 30 cm,高 20 cm),底座外侧附另一圆筒,2 个圆筒之间的空隙构成水封槽(宽 5 cm,高 10 cm),顶箱为一端密封的圆筒(直径 30 cm,高 39 cm),顶箱顶部开一个直径 0.5 mm 的小口,连接硅胶管,用于采气。2014 年 4 月在增城林场马占相思人工纯林内设置标准地,标准地

规格 30 m × 30 m,在标准地内沿一条对角线均匀布置 5 个静态箱,底座打入地底 10 cm,自然静置 4 个月以消除布设静态箱带来的环境扰动。

采样于 2014 年 8 月 4—5 日进行,天气晴好,采集 06:00 至次日 03:00 时段内的气体样品,每隔 3 h 采集 1 次。采样前,在底座密封槽内注入清水,以密封气体。在每个采样点罩箱后每隔 10 min(即 0、10、20 和 30 min)用注射针管从箱中抽取 100 mL 气体,注入气体采集袋,采样后及时带回实验室分析。在每次采集气体样品的同时,用便携式手持气象站(NK kestrel4500NV,美国)测定大气压,用便携式数

字温度计(JM624,天津今明仪器有限公司)测定地表气温和 5 cm 深处土壤温度。

用 Agilent 7890A 气相色谱仪(7890A GC System,美国)测定 CO₂、CH₄ 和 N₂O 这 3 种温室气体浓度。CO₂ 和 CH₄ 检测器为氢焰离子化检测器(FID),检测器温度 250 ℃,载气为高纯 N₂。N₂O 检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器温度 330 ℃,载气为体积分数为 95% 的氩甲烷。

气体的通量是指单位时间单位面积观测的箱内该气体质量的变化,一般正值表示从土壤排放到大气,负值表示土壤吸收大气中的气体^[15]。气体通量的计算公式^[16]为:

$$F=\frac{M}{V_0}\times\frac{P}{P_0}\times\frac{T_0}{T}\times\frac{dc}{dt}\times H,$$

式中, F 为气体通量,mg · m⁻² · h⁻¹; M 为被测气体的摩尔质量,g · mol⁻¹; P 为采样时的大气压,hPa; T 为采样时的绝对温度,K; dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率; V_0 、 P_0 和 T_0 分别为标准状态下气体摩尔体积(22.41 L · mol⁻¹)、标准大气压(1 013.25 hPa)和绝对温度(273.15 K); H 为采样箱高度,m。

2.2 温室气体日变化中最佳观测时间的矫正系数

各个时刻温室气体通量的矫正系数可以用下式进行计算^[17]:

$$C_i=F_{\text{avg}}/F_i,$$

式中, C_i 为矫正系数, i 为一天中进行观测的次数,各次观测的间隔时间相等, $i=1,2,3,\cdots,n$; F_{avg} 为温室气体日平均通量; F_i 为第 i 次观测的温室气体通量。

2.3 土壤样品的采集及分析

在标准地内选择 3 处有代表性的地段挖掘土壤坡面,划分 4 个层次(0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50 cm),分层采集土壤样品,带回实验室分析。土、水按质量比 1.0:2.5 配成溶液,pH 计测定土壤 pH;用靛酚蓝比色法测定 NH₄⁺ - N;用镀铜镉还原 - 重氮化偶比色法测定 NO₃⁻ - N;用重铬酸钾氧化 - 外加热法测定有机质;用半微量凯氏法测定全氮;用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液,用钼蓝比色法测全磷;用 0.5 mol · L⁻¹ 的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测速效磷^[18]。

2.4 数据分析

用 Excel 2007 软件进行数据整理及作图,用 SPSS 19.0 对数据进行相关性及回归分析。

3 结果与分析

3.1 土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量日变化特征

由图 1 可知,CO₂ 的全天通量均为正值,说明马占相思人工林土壤为 CO₂ 的排放源。CO₂ 排放通量的日变化具有一定的规律性,总体表现为先增高后降低的单峰曲线。整体来看 CO₂ 排放通量的日变化比较平稳,白天稍高于晚上,变化幅度为 401.33 ~ 555.59 mg · m⁻² · h⁻¹,日均值 482.68 mg · m⁻² · h⁻¹。土壤 CO₂ 排放通量的最小值出现在 06:00 左右,此时土壤温度最低。此后,随着温度的升高,CO₂ 排放通量也随之升高,在 15:00 左右达到全天的峰值。相关性分析表明,土壤 CO₂ 排放通量与地表气温及 5 cm 深土壤温度之间有显著的正相关性($R_{\theta_{\text{sa}}}=0.748$, $P<0.05$; $R_{\theta_{\text{s}}}=0.846$, $P<0.01$; $R_{\theta_{\text{sa}}}$ 为通量与地表气温的相关系数, $R_{\theta_{\text{s}}}$ 为通量与 5 cm 深土壤温度的相关系数,下同)。

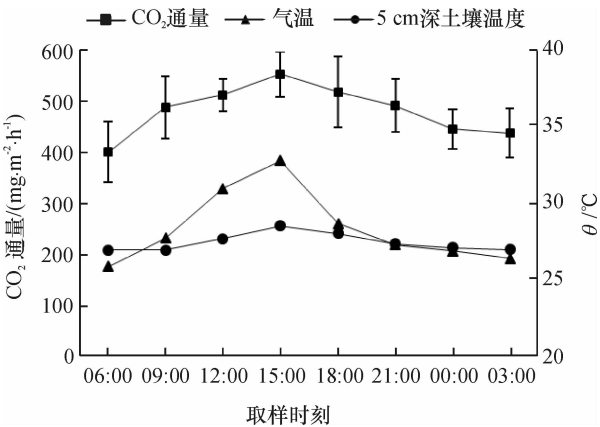


图 1 马占相思人工林土壤 CO₂ 排放通量的日变化
Fig.1 Diurnal variation of CO₂ flux from *Acacia mangium* plantation soil

由图 2 可知,全天的 CH₄ 通量均为负值,说明马占相思人工林土壤为 CH₄ 的吸收汇。CH₄ 吸收通量呈现明显的单峰变化,夜间吸收通量明显高于白天,变化范围为 -10.96 ~ -41.88 μg · m⁻² · h⁻¹,日均值为 -24.35 μg · m⁻² · h⁻¹。从早上开始 CH₄ 的吸收量不断减小,于下午 18:00 左右 CH₄ 的吸收通量达到最小值,为 -10.96 μg · m⁻² · h⁻¹,太阳落山之后急剧增加,凌晨 03:00 达到全天吸收的最大值,为 -41.88 μg · m⁻² · h⁻¹,最大吸收通量是最小值的 3.8 倍。相关性分析发现,气温对土壤 CH₄ 通量无显著影响($P>0.05$),土壤 CH₄ 通量与土壤 5 cm 温度之间有显著的相关性($R_{\theta_{\text{s}}}=0.797$, $P<0.05$)。

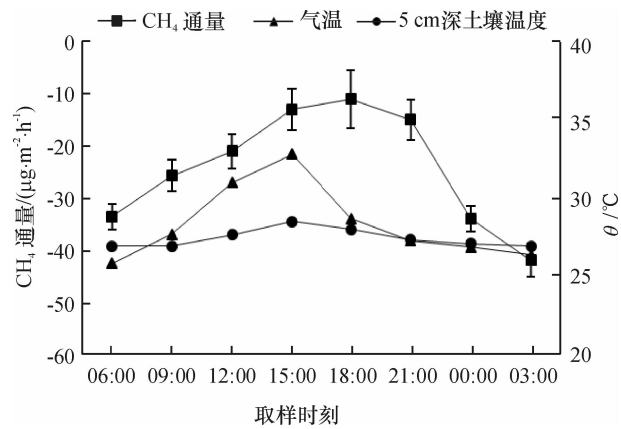


图2 马占相思人工林土壤 CH₄ 通量的日变化

Fig.2 Diurnal variation of CH₄ flux from *Acacia mangium* plantation soil

由图3可知,全天的 N₂O 通量均为正值,说明马占相思人工林土壤为 N₂O 的排放源。N₂O 排放通量变化范围有较明显的日变化特征,呈现升高-降低-升高-降低的趋势,呈大小不同的双峰曲线,变化范围 24.50 ~ 34.72 μg · m⁻² · h⁻¹,日均值为 29.51 μg · m⁻² · h⁻¹。N₂O 排放通量的最低点出现在早上 06:00,这很可能是由于早上的低温所致;随后 N₂O 排放通量逐渐增强,在 09:00 左右达到第 1 个峰值;此后排放通量呈下降趋势,在 12:00 时出现低谷;12:00 之后排放通量迅速增加,在 18:00 达到全天的峰值,34.72 μg · m⁻² · h⁻¹。相关性分析发现,地表气温及 5 cm 深土壤温度对土壤 N₂O 排放通量无显著影响($P>0.05$)。

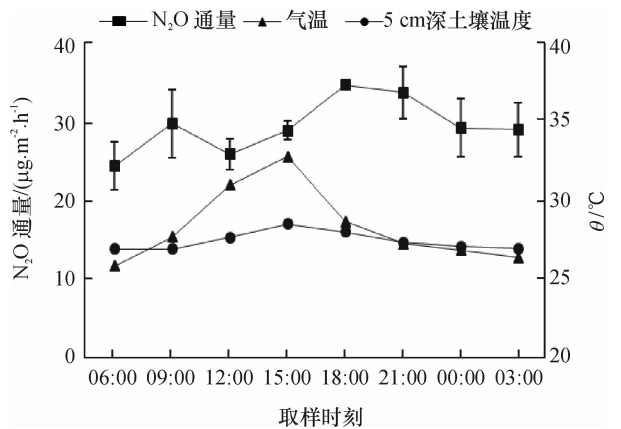


图3 马占相思人工林土壤 N₂O 通量的日变化

Fig.3 Diurnal variation of N₂O flux from *Acacia mangium* plantation soil

3.2 土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量与温度的关系

由于日变化观测中没有降水、施肥等外界因素的影响,温度成为了影响土壤温室气体通量的最关键因子^[19]。回归分析(表2)表明,土壤 CO₂ 排放通量和气温显著相关($P<0.05$),和土壤 5 cm 处温度极显著相关($P<0.01$)。土壤 CO₂ 排放通量和气温、土壤 5 cm 处温度之间呈指数相关,相关性较好,这与许多研究相吻合^[20-22]。 Q_{10} 值是衡量土壤呼吸速率对温度敏感性的一个指标,根据有关公式^[22]可知,马占相思人工林的 Q_{10} 值为 3.37。这说明温度每升高 10℃,马占相思人工林土壤呼吸增加 3.37 倍。土壤 CH₄ 通量同土壤 5 cm 处温度之间显著正相关($P<0.05$),土壤 CH₄ 通量同气温之间无显著相关性($P>0.05$)。土壤 N₂O 通量和气温及土壤 5 cm

表2 土壤 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 通量与温度的相关性 ¹⁾			
Tab.2 Correlation between CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O fluxes from soil and temperature			
温室气体通量(y)	温度因子(x)	回归方程	R ²
CO ₂ 通量	气温	$y = 142.703e^{0.042x}$	0.759 *
	5 cm 深土壤温度	$y = 17.418e^{0.122x}$	0.783 **
CH ₄ 通量	气温	$y = 3.807x - 134.165$	0.443
	5 cm 深土壤温度	$y = 18.282x - 527.482$	0.635 *
N ₂ O 通量	气温	$y = 8.421x + 267.731$	0.327
	5 cm 深土壤温度	$y = 12.627x + 382.977$	0.339

1) * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$), $n=40$ 。

处温度之间无显著相关($P>0.05$)。

3.3 土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量的最佳观测时间

对土壤温室气体进行日变化观测的一个重要目的就是找出一天中最具代表性的通量测定时间段,以该时间段内单次的观测值来近似代替日均值。图4为 CO₂、CH₄、N₂O 通量的矫正系数随时间的分布。可以看出,CO₂ 和 N₂O 的矫正系数波动较小,CH₄ 的矫正系数波动较大。CO₂ 通量的矫正系数在

06:00—12:00 时接近于 1.0,表明这一时间段的 CO₂ 通量能代表一天的 CO₂ 平均排放量,即 06:00—12:00 为该地区温室气体研究中采集 CO₂ 的最佳时间。同理,CH₄ 通量的最佳观测时间为 09:00—12:00, N₂O 通量的最佳观测时间为 09:00—15:00 及 0:00—03:00。3 种温室气体通量的矫正系数在上午 09:00 时最接近 1.0,说明这一时间 3 种温室气体的通量最能代表一天的平均通量。

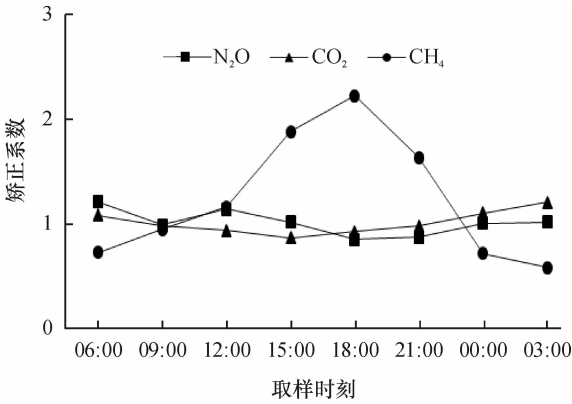


图 4 土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的矫正系数随时间的分布
Fig. 4 Diurnal changes of correction coefficients of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from soil

4 讨论

4.1 温室气体日变化规律

亚热带地区马占相思人工林土壤 3 种温室气体具有明显的日变化特征,CO₂ 排放通量的日变化呈单峰曲线,其变化轨迹同全天温度的变化轨迹大体一致,土壤 CO₂ 主要来源于植物根呼吸、土壤动物和土壤微生物的呼吸作用以及凋落物的分解,呼吸作用及凋落物的分解都在一定范围内随温度的升高而加强^[23]。CH₄ 通量的日变化呈单峰曲线,吸收高峰出现在晚上,甲烷产生菌是专性厌氧菌,而甲烷氧化细菌吸收甲烷是一个耗氧过程^[24]。随着土壤温度提高,土壤生物活性加强,土壤氧消耗快,有利于甲烷产生菌的活性,表现为土壤甲烷吸收通量降低。N₂O 通量的日变化呈双峰曲线,在上午和下午出现 2 个排放高峰。肖冬梅等^[25]研究发现光强是 N₂O 排放的一个限制因子,光强越强,N₂O 排放越少。本研究中也发现类似的情况,N₂O 在中午光强最强的时候出现低谷。

华南地区马占相思人工纯林土壤 3 种温室气体 CO₂、CH₄、N₂O 日均通量(482.68 mg·m⁻²·h⁻¹、-24.35 μg·m⁻²·h⁻¹、29.51 μg·m⁻²·h⁻¹)明显低于南亚热带森林土壤温室气体日均通量(618.50 mg·m⁻²·h⁻¹、-39.13 μg·m⁻²·h⁻¹、78.51 μg·m⁻²·h⁻¹)^[15],表明人工林土壤温室气体通量比同一区域内的天然林低。马占相思人工林土壤 CO₂ 通量低于同一地区近自然林的主要原因可能是马占相思的根系具有固氮根瘤菌,固氮根瘤菌能显著提高土壤中的氮含量^[26],土壤中氮含量较高会降低森林地表 CO₂ 通量^[27],也有可能马占相思叶片凋落量及其分解速度低于天然林有关^[28-29]。森林林龄和土壤的破坏程度会影响 CH₄ 的吸收通量^[24,30],

马占相思人工林对 CH₄ 的吸收功能弱于天然林,可能与受到的人为干扰有关。另外本研究土壤中的氨态氮(9.81 mg·kg⁻¹)高于天然林(5.91 mg·kg⁻¹)^[31],对甲烷的氧化起一定的竞争抑制作用^[32]。森林土壤 N₂O 主要来源于硝化过程和反硝化过程^[33],较高的凋落物量和较快的凋落物分解速率能创造有利于硝化和反硝化细菌生存的微生物环境^[34]。植被组成也是影响森林土壤 N₂O 通量的关键因子之一。和人工林相比,天然林植被类型更为复杂,根生物量和微生物生物量更高,也是天然林 N₂O 排放高于马占相思人工林的原因之一。

4.2 温度对温室气体通量的影响

马占相思人工林地表 CO₂ 通量和气温显著正相关,和 5 cm 深土壤温度极显著正相关。其土壤呼吸速率与温度的敏感性指标 Q₁₀值为 3.37,高于热带地区(2.10)^[35]和亚热带天然林(2.60)^[27],但是低于温带地区的硬木混交林(3.90)^[36]和山毛榉 *Fagus sylvatica* 林(4.20)^[37],同去除凋落物的亚热带针阔叶混交林(3.24)^[28]较为接近。可见低纬度森林对温度的敏感性低于高纬度,自然林对温度的敏感性低于人工林,在全球变暖的条件下,温度变化对高纬度森林和人工林的土壤呼吸排放 CO₂ 的影响更大。马占相思人工林土壤 CH₄ 吸收通量与气温相关性不显著,与 5 cm 深土壤温度呈显著负相关,与北京油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林的研究相一致^[38]。随着土壤温度升高,土壤微生物活性加强,土壤氧消耗快,而甲烷氧化细菌吸收甲烷是一个耗氧过程^[24],CH₄ 吸收速率减少,表现为土壤甲烷吸收通量降低。对温带森林的研究表明,土壤 N₂O 通量与土壤温度之间存在正相关关系^[39],然而在热带森林中这种相关性不显著或者不存在^[40]。对亚热带马占相思人工林而言,结果同热带森林相一致,气温和 5 cm 深土壤温度对土壤 N₂O 通量无明显影响,其原因有待于进一步研究。

4.3 温室气体通量的最佳观测时间

在华南马占相思人工林中,将雨季采样日的 06:00—12:00 作为 CO₂ 的采样时间,可代表当日 CO₂ 的平均通量。CH₄ 为 09:00—12:00, N₂O 为 09:00—15:00 及 00:00—03:00。在不同地区不同时期应通过日变化研究来选择合适的季节的最佳采样时间,以增强观测结果的代表性^[19]。沙丽清^[41]及 Davidson 等^[42]研究表明,上午 09:00 的 CO₂ 通量观测值与日均值非常接近。匡艳华^[43]对内蒙古华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 人工林研究表明,3 种土壤温室气体的最佳观测时间为 09:00 和 19:00。

综合考虑3种温室气体以及取样的可操作性,09:00左右可以作为华南地区马占相思人工林最佳采样时间,获得的通量值可代表当日温室气体的平均通量。

4.4 结论

亚热带地区马占相思人工林土壤为CO₂和N₂O的排放源,是CH₄的吸收汇,其排放(吸收)强度均低于同一区域的天然林。马占相思人工林土壤3种温室气体具有明显的日变化特征,CO₂通量的日变化呈单峰曲线,下午出现排放高峰;CH₄通量的日变化呈单峰曲线,吸收高峰出现在晚上;N₂O通量的日变化呈双峰曲线,在上午和下午出现2个排放高峰。

在日变化中,短时间内没有降水、施肥等外界因素的干扰,温度成为这一时期影响温室气体通量的决定性因素。本研究中,气温和5 cm深土壤温度对马占相思人工林土壤CO₂的释放有显著影响,土壤CO₂通量同气温、5 cm深土壤温度呈指数相关;5 cm深土壤温度对CH₄通量具有显著性影响,二者之间呈线性相关;温度对N₂O通量日变化无显著影响。

综合考虑3种温室气体以及取样的可操作性,华南地区马占相思人工林雨季的最佳采样时间为09:00时左右。

参考文献:

[1] WANG W C, YUNG Y L, LACIS A A, et al. Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases[J]. Science, 1976, 194(4266): 685-690.

[2] DICKINSON R E, CICERONE R J. Future global warming from atmospheric trace gases[J]. Nature, 1986, 319: 109-115.

[3] KIEHL J T, TRENBERTH K E. Earth's annual global mean energy budget [J]. Am Meteorol Soc, 1997, 78 (2): 197-208.

[4] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[5] NAJAFI M R, ZWIERS F W, GILLETT N P. Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences[J]. Nat Clim Change, 2015, 5(3): 246-249.

[6] RICHTER D D, MARKEWITZ D, TRUMBORE S E, et al. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest[J]. Nature, 1999, 400 (6739): 56-58.

[7] BOWDEN R D, DAVIDSON E, SAVAGE K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. Forest Ecol Manag, 2004, 196(1): 43-56.

[8] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[9] BAGGS E M, BLUM H. CH₄ oxidation and emissions of CH₄ and N₂O from Loliumperenne swards under elevated atmospheric CO₂ [J]. Soil Biol Biochem, 2004, 36(4): 713-723.

[10] 齐玉春,董云社,章申,等. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体N₂O和CH₄排放研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2002, 32(11): 934-941.

[11] YAN, J H, ZHANG D Q, ZHOU G Y, et al. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. Soil Biol Biochem, 2009, 41(5), 991-999.

[12] 林丽莎,李向义,韩士杰. 长白山天然次生白桦林土壤CO₂释放通量研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(1): 67-71.

[13] 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.

[14] 徐济德. 我国第8次森林资源清查结果及分析[J]. 林业经济, 2014, 36(3): 6-8.

[15] 周存宇,张德强,王跃思,等. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化[J]. 生态学报, 2004, 24 (8): 1741-1745.

[16] 李锡鹏,川中丘陵区典型农田和森林土壤温室气体排放特征及影响因素[D]. 成都:西南交通大学, 2014.

[17] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. Adv Atmos Sci, 1998, 15(4): 569-579.

[18] 鲍士旭. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.

[19] 田慎重,宁堂原,迟淑筠,等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 879-888.

[20] TANG X L, LIU S G, ZHOU G Y, et al. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China[J]. Global Change Biol, 2006, 12(3): 546-560.

[21] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413(6856): 622-625.

[22] FANG C, MONCRIEFF J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biol Biochem, 2001, 33 (2): 155-165.

[23] 韩瑛,杨小燕,陈祥伟,等. 黑土区不同土地利用方式土壤CO₂和N₂O通量日变化特征[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 89-91.

[24] 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 Geophys Res, 2008, 113 (D11): 3078-3088.

- [25] 肖冬梅,王森,姬兰柱,等. 长白山阔叶红松林土壤氮化亚氮和甲烷的通量研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1855-1859.
- [26] 窦雅静,康丽华,陆俊锐. 相思属树种根瘤菌研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(17): 7511-7514.
- [27] MO J M, ZHANG W, GUNDERSEN P, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. Global Change Biol, 2008, 14(2): 403-412.
- [28] 周存宇,周国逸,张德强,等. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究[J]. 中国科学, 2004, 34(S2): 175-182.
- [29] 邹碧,李志安,丁永祯,等. 南亚热带4种人工林凋落物动态特征[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 715-721.
- [30] MALJANEN M, LIKANEN A, SILVOLA J, et al. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils[J]. Soil Use Manage, 2003, 19(1): 73-79.
- [31] 莫江明,彭少麟,方运霆,等. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林土壤有效氮动态的初步研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 492-497.
- [32] NANBA K, KING G M. Response of atmospheric methane consumption by Maine forest soils to exogenous aluminum salts[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(9): 3674-3679.
- [33] WRAGE N, VELTHOF G L, VAN BEUSICHEM M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biol Biochem, 2001, 33(12): 1723-1732.
- [34] ZHANG W, MO J, YU G, et al. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition[J]. Plant Soil, 2008, 306(1/2): 221-236.
- [35] BEKKU Y S, NAKATSUBO T, KUME A, et al. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils[J]. Appl Soil Ecol, 2003, 22(3): 205-210.
- [36] DAVIDSON E C, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biol, 1998, 4(2): 217-227.
- [37] JANSSENS I A, PILEGAARD K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest[J]. Global Change Biol, 2003, 9(6): 911-918.
- [38] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH₄ 排放通量的研究[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 173-176.
- [39] PAPEN H, BUTTERBACH-BAHL K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 1: N₂O emissions[J]. J Geophys Res, 1999, 104(D15): 18487-18503.
- [40] WERNER C, KIESE R, BUTTERBACH-BAHL K. Soil-atmosphere exchange of N₂O, CH₄, and CO₂ and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya[J]. J Geophys Res, 2007, 112(D3): 3308-3323.
- [41] 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林, 橡胶林及水稻田生态系统碳储量和土壤碳排放研究[M]. 勐腊: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2008.
- [42] DAVIDSON E C, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biol, 1998, 4(2): 217-227.
- [43] 匡艳华. 华北落叶松人工林温室气体通量特征及其影响因素[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.

【责任编辑 李晓卉】