

DOI: 10.5846/stxb201707031201

贾朋, 高常军, 李吉跃, 周平, 王丹, 许小林. 华南地区尾巨桉和马占相思人工林地表温室气体通量. 生态学报, 2018, 38(19): - .

Jia P, Gao C J, Li J Y, Zhou P, Wang D, Xu X L. Seasonal variation of greenhouse gas emission fluxes from soils of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations in South China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

华南地区尾巨桉和马占相思人工林地表温室气体通量

贾 朋^{1,2}, 高常军³, 李吉跃⁴, 周 平^{1,*}, 王 丹⁴, 许小林⁴

1 广州地理研究所, 广州 510070

2 广州市林业和园林科学研究院, 广州 510405

3 广东省林业科学研究院, 广州 510520

4 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

摘要:为探索华南地区尾巨桉人工林和马占相思人工林地表温室气体的季节排放规律、排放通量和主控因子, 采用静态箱-气相色谱法, 对两种林型地表 3 种温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 通量进行为期 1 年的逐月测定。结果表明: (1) 尾巨桉人工林和马占相思人工林均为 CO_2 和 N_2O 的排放源, CH_4 的吸收汇。马占相思林地地表 N_2O 通量显著 ($P < 0.01$) 高于尾巨桉林, CO_2 通量和 CH_4 通量无明显差异。 (2) 两种林型 3 种温室气体通量有着相似季节变化规律, 地表 CO_2 通量均呈现雨季高旱季低的单峰规律; 地表 CH_4 吸收通量表现为旱季高雨季低的单峰趋势; 地表 N_2O 通量呈现雨季高旱季低且雨季内有两个峰值的排放规律。 (3) 地表 CO_2 、 N_2O 通量和土壤 5cm 温度呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 3 种温室气体地表通量同土壤含水量呈极显著 ($P < 0.01$) 或显著相关 ($P < 0.05$)。 (4) 尾巨桉林和马占相思林温室气体年温室气体排放总量为 31.014 t/hm² 和 28.782 t/hm², 均以 CO_2 排放占绝对优势 (98.46%—99.15%), CH_4 和 N_2O 处于次要地位。

关键词:人工林; 地表温室气体通量; 季节变化规律; 华南地区

Seasonal variation of greenhouse gas emission fluxes from soils of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations in South China

JIA Peng^{1,2}, GAO Changjun³, LI Jiyue⁴, ZHOU Ping^{1,*}, WANG Dan⁴, XU Xiaolin⁴

1 Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

2 Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture Guangzhou 510405, China

3 Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

4 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: To study the seasonal variation and the influence factors of fluxes of greenhouse gas (CO_2 , N_2O , and CH_4) emissions from the soils of a *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantation and an *Acacia mangium* plantation, we conducted 1 year of continuous monitoring of the greenhouse gas fluxes from the two types of forest using a static chamber and gas chromatography. We found that the soil of both the *E. urophylla* × *E. grandis* plantation and the *A. mangium* plantation behaved as CO_2 and N_2O sources and CH_4 sinks. The N_2O emission fluxes from the *A. mangium* plantation soil were significantly higher ($P < 0.01$) than those from the *E. urophylla* × *E. grandis* plantation soil. There were no significant differences in the CO_2 emission fluxes and CH_4 uptake fluxes between the two forests. The seasonal patterns of greenhouse gas fluxes from the soils of the two types of forest were similar. The CO_2 emission fluxes from the soils of the two forests were single-peak curves, high in the rainy season and lower in the dry season. The uptake fluxes of CH_4 were single-peak

基金项目:广东省科技发展创新专项 (2017GDASCX-0701); 广州市森林碳汇计量与监测研究 (2013—2019)

收稿日期:2017-07-03; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouping@sinogaf.cn

curves, high in the dry season and lower in the rainy season. The N_2O emission fluxes were higher during the rainy season than during the dry season, with two peaks in the rainy season. The fluxes of CO_2 or N_2O from the soils had highly significant ($P < 0.01$) positive correlations with soil temperature at 5 cm depth. The fluxes of greenhouse gases (CO_2 , N_2O , and CH_4) from the soils had highly significant ($P < 0.01$) or significant ($P < 0.05$) positive correlations with soil water content. The emissions of greenhouse gases from the soils of the *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* plantation and the *A. mangium* plantation were 31.014 t/hm^2 and 28.782 t/hm^2 , respectively, and were composed mainly of CO_2 (98.46%—99.15%) with a small amount of N_2O and CH_4 .

Key Words: plantation; greenhouse gas flux; seasonal variation; South China

大气中温室气体浓度急剧增加所导致的全球气候变暖已经成为当今人类社会关注的焦点,遏制全球变暖已经成为世界各国的共同目标^[1-3]。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是对全球气候变化影响最大的3种温室气体,对温室效应的贡献可达80%左右^[4]。目前,全球 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 年均体积分数为 3.91×10^{-6} 、 1.80×10^{-9} 和 3.24×10^{-9} ,达到历史的最高值,并仍以0.4%、0.6%和0.3%的速率增长^[5]。陆地生态系统作为人类活动的主要载体,受温室效应的影响程度是巨大的。土壤作为陆地生态系统的重要组成部分之一,是一个对全球变化响应灵敏的复杂系统,在全球温室气体地气交换方面具有极为重要的作用^[6]。据估计,大气中约有35%的 CO_2 、47%的 CH_4 、53%的 N_2O 与土壤有关^[6-7]。森林土壤作为陆地土壤的重要组成部分之一,了解森林土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的排放特征和影响因子,对遏制温室效应加剧有重要意义。

近20年,世界人工林面积不断扩大,人工林在木材贸易中的比重持续增高,在水热条件优越的热带、亚热带地区发展短周期的速生丰产林,已经成为当今世界林业的一种必然趋势^[8-9]。我国是世界人工林面积最大的国家,全国人工林面积已达0.69亿 hm^2 ^[10]。华南地区是我国最重要的人工林产区之一^[11],据《全国木材战略储备生产基地建设规划》,建设短周期纤维浆纸原料林是华南地区重要的战略任务。华南地区速生丰产林土壤温室气体排放有着怎样的规律,相关的研究少见报道。本研究以亚热带最常见速生丰产林——尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* $\times$ *Eucalyptus grandis*)和马占相思(*Acacia mangium*)人工纯林为研究对象,在2014年8月至2015年7月,通过对3种温室气体通量及环境因子进行为期1年的逐月定量观测,旨在揭示华南地区尾巨桉和马占相思人工林温室气体的排放规律和通量,确定温室气体排放的主控因子。这对更加清晰的认识我国华南地区速生丰产林温室气体排放总量有重要意义,并且为我国森林生态系统源汇清单的制定提供重要依据。

1 研究区概况

本研究设在广州国营增城林场,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1904 mm,4—9月为雨季,占全年降雨量的85%左右,10月份至翌年3月份为旱季;年平均温度21.6℃,最冷月(1月)的多年平均值为13.3℃,最热月(8月)的多年平均值为28.4℃。

研究样地马占相思林地理位置 $23^\circ 19' 45.84''\text{N}$, $113^\circ 47' 12.48''\text{E}$,位于海拔106 m的山坡上,为1995年栽种的人工林。乔木层分两层,高大乔木层以人工栽种的马占相思为主,平均胸径25.9 cm,平均树高21.2 m;小乔木层由少量的布渣叶(*Microcos paniculata*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)等组成,平均胸径7.4 cm,平均树高6.3 m;灌木层优势物种为五指毛桃(*Ficus hirta*)、瓜馥木(*Fissistigma oldhamii*)等,草本层以白花悬钩子(*Rubus leucanthus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等为主。尾巨桉林地理位置 $23^\circ 19' 47.28''\text{N}$, $113^\circ 46' 31.08''\text{E}$,位于海拔209 m的山坡上,为2008年栽种的人工林。乔木层为人工栽种的尾巨桉,平均胸径15.1 cm,平均树高21.6 m;灌木层优势物种为三桠苦(*Evodia lepta*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)等,草本层以蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)等为主。土壤均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 两种林型土壤理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of soil in two types of plantation

林型 Plantations	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	NH ₄ -N/ (mg/kg)	NO ₃ -N/ (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	有机质 Organic carbon/ (g/kg)
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	1.27±0.06	4.28±0.02	12.83±3.5	9.55±0.80	2.37±0.39	0.99±0.06	0.33±0.01	16.84±0.92
马占相思 <i>A.mangium</i>	1.13±0.05	4.26±0.07	9.97±1.43	14.81±0.04	2.71±0.33	0.83±0.27	0.28±0.02	14.47±4.63

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,由底座和顶箱两部分组成,均为 PVC 材质。底座圆环状:直径(D)×高(H)= 35 cm×20 cm,圆环环宽为水封槽:宽度(W)×高(H)= 5 cm×10 cm,顶箱为一端封闭的圆筒:直径(D)×高(H)= 30 cm×39 cm,顶箱一端开直径为 0.5 mm 的小口,连接硅胶管,用于采气。2014 年 4 月在增城林场尾巨桉林和马占相思纯林内设置标准地,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。

从 2014 年 8 月至 2015 年 7 月,逐月采样,每月月底进行,每次采样时间为(9:00—11:00am)。采样前,在底座密封槽内注入清水进行密封。在每个采样点罩箱后每隔 10 min(即 0、10 min、20 min 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 24h 内带回实验室分析完毕。在每次采集气体样品的同时,用便携式手持气象站(NKkestrel 4500NV,美国)测定大气压,用便携式数字温度计(JM 624,天津今明仪器有限公司)测定气温、地表温度和 5 cm 深处土壤温度。用便携式测墒仪(TDR 300,美国)测定土壤含水量。为避免对通量观测点的干扰,在每一个采样点沿采样箱周围选 5 个点,尽可能使 5 个测点位置对称,取五点的平均值作为该采样点的土壤含水量。

2.2 气体分析及计算方法

用 Agilent 7890A 气相色谱仪(7890A GC System,美国)测定 CO₂、CH₄和 N₂O 三种温室气体浓度。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 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^[12]。排放通量的计算公式^[13]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($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$); M 为被测气体的摩尔质量(g/mol); 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)、标准大气压(1013.25 hPa)和绝对温度(273.15 K); H 为采样箱高度(m)。

温室气体全年排放总量通过逐月累加得到。计算公式为:

$$M = \sum (F_i \times D_i \times 2.4)$$

式中, M 为年温室气体排放通量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); F_i 为每月气体通量($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$); i 为月份,1—12; D_i 为每个月天数;2.4 为单位转换系数。

3 种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)在大气中的残留时间及对温室效应的贡献各不相同。为了便于比较不同林型土壤温室气体排放量,将温室气体的年度排放量折算成统一的单位。全球增温潜势(Global Warming

Potential, 以下简称 GWP) 用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响, 以 100 年影响尺度计算, 1 kg 的 CH_4 的增温效应相当于 25 kg 的 CO_2 , 1 kg 的 N_2O 的增温效应相当于 298 kg 的 CO_2 ^[5]。计算公式如下:

$$\text{GWP} = F\text{CO}_2 + 25F\text{CH}_4 + 298F\text{N}_2\text{O}$$

式中, $F\text{CO}_2$ 为 CO_2 排放总量, kg; $F\text{CH}_4$ 为 CH_4 排放总量, kg; $F\text{N}_2\text{O}$ 为 N_2O 排放总量, kg。

2.3 数据分析

用 Excel 2010 软件进行数据整理及作图, 用 SPSS 19.0 对数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 土壤温室气体通量季节变化特征

由图 1 可知, 尾巨桉林和马占相思林地表 CO_2 排放通量季节变化规律基本一致, 均呈现雨季高旱季低的规律。从 4 月开始, 随着华南地区进入雨季, 气温逐步上升, 降雨开始增多, 两种林型地表 CO_2 通量明显增加, 均在 7 月份达到顶峰, 随后逐步下降, 最小排放量均在 12 月份。尾巨桉林地表 CO_2 通量变化幅度为 94.02—621.60 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 349.95 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$; 马占相思林地表 CO_2 通量变化幅度为 118.08—602.94 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 322.66 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。尾巨桉林地表 CO_2 通量稍高于马占相思林, 但两种林型间并未达到显著性差异 ($P = 0.094$)。尾巨桉林雨季地表 CO_2 平均通量 (517.80 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 显著 ($P < 0.01$) 高于马占相思林 (452.21 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$), 马占相思林旱季地表 CO_2 平均通量 (193.10 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 稍大于尾巨桉林 (182.11 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。尾巨桉林和马占相思林的雨季地表 CO_2 通量均显著 ($P < 0.01$) 高于旱季, 雨季排放量分别是旱季的 2.84 和 2.34 倍。

由图 2 可知, 尾巨桉林和马占相思林地表 CH_4 吸收通量的季节变化十分相似, 均呈现雨季低旱季高的规律。两种林型 CH_4 通量的吸收峰和吸收谷均十分接近, 只是出现时间不同。尾巨桉林的 CH_4 吸收峰出现在 11 月, 吸收谷为 9 月份; 马占相思林的 CH_4 吸收峰出现在 1 月, 吸收谷为 8 月份。尾巨桉林地表 CH_4 通量变化幅度为 -52.86—-15.33 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 -33.13 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$; 马占相思林地表 CH_4 通量变化幅度为 -51.29—-15.37 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 -33.51 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。尾巨桉林和马占相思林雨季、旱季平均通量及全年均通量均十分接近。尾巨桉林和马占相思林的旱季 CH_4 吸收通量均显著 ($P < 0.01$) 高于雨季, 旱季吸收量比雨季高 89.75% 和 82.86%。

由图 3 可知, 尾巨桉林和马占相思林地表 N_2O 排放通量均呈现雨季高旱季低的规律, 均在 5 月和 7 月出现两个排放高峰, 排放谷出现的时间稍有差异, 尾巨桉林最小排放出现在 1 月份, 马占相思林出现在 12 月。尾巨桉林地表 N_2O 通量变化幅度为 4.20—34.78 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 12.84 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$; 马占相思林地表 N_2O 通量变化幅度为 3.08—52.77 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 年均值 19.64 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。马占相思林年均地表 N_2O 排放量显著 ($P < 0.01$) 高于尾巨桉林, 比尾巨桉林高 53.03%。马占相思林雨季地表 N_2O 平均通量 (33.65 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 显著 ($P < 0.01$) 高于尾巨桉林 (20.36 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), 两种林型旱季平均通量无显著性差异。两种林型的雨季地表 N_2O 通量均显著 ($P < 0.01$) 高于旱季, 雨季排放量分别是旱季的 3.84 和 5.97 倍。

3.2 土壤温室气体通量与环境因子的关系

由表 2 可知, 尾巨桉林和马占相思林地表 CO_2 和 N_2O 通量和土壤 5 cm 温度均有极显著相关 ($P < 0.01$), 土壤 5 cm 温度对地表 CH_4 通量影响不显著 ($P > 0.05$)。两种林型的地表 CO_2 通量和土壤 5 cm 温度呈指数相关, N_2O 通量和土壤 5 cm 温度极显著呈线性相关。 Q_{10} 值是衡量土壤呼吸速率对温度敏感性的一个指标^[14],

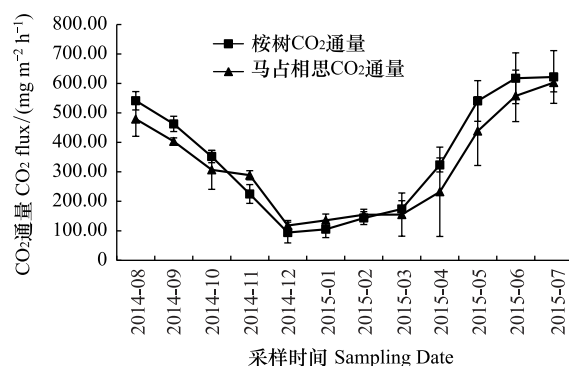


图 1 两种林型地表 CO_2 通量季节变化

Fig.1 Seasonal variation of CO_2 fluxes from soil in two types of plantation

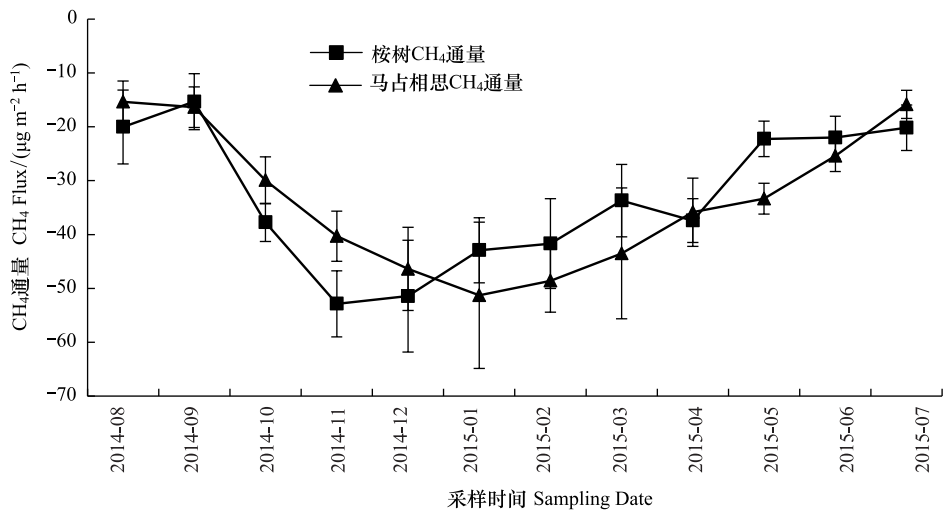


图 2 两种林型地表 CH₄ 通量季节变化

Fig.2 Seasonal variation of CH₄ fluxes from soil in two types of plantation

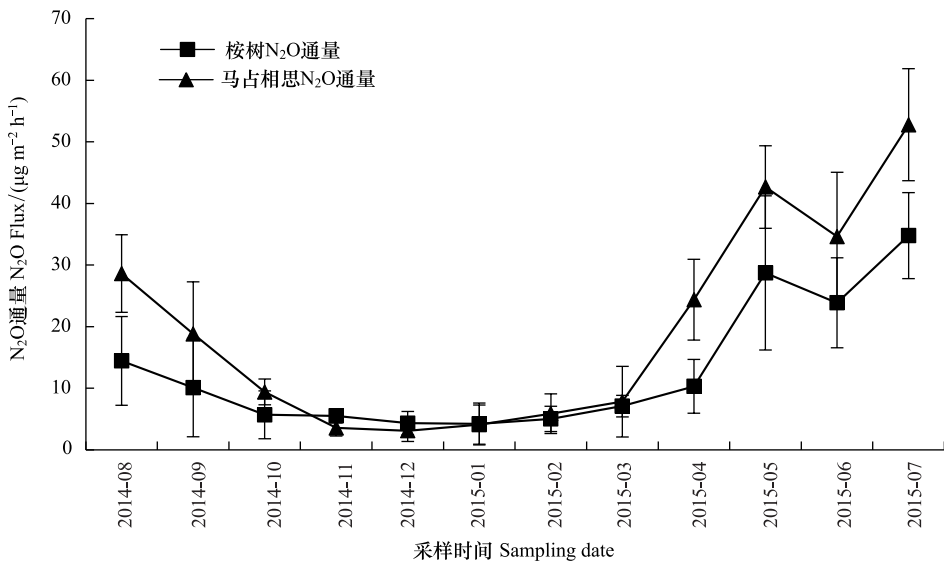


图 3 两种林型地表 N₂O 通量季节变化

Fig.3 Seasonal variation of N₂O fluxes from soil in two types of plantation

根据有关公式可知,尾巨桉林和马占相思林的 Q_{10} 值分别为 3.43 和 3.10。这说明温度每升高 10°C ,尾巨桉林和马占相思林土壤呼吸分别增加 3.43 倍和 3.10 倍。

表 2 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量(y)与土壤 5 cm 温度(x)的回归方程

Table 2 Correlation coefficients of three greenhouse gas fluxes(y) with soil temperature of 5 cm depth(x)

林型 Plantations	温室气体 Greenhouse gases	回归方程 Correlation equation	R^2
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 18.5297e^{0.1234x}$	0.7291 **
	CH_4 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 1.9441x - 78.8076$	0.1071
	N_2O ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 1.3570x - 16.0472$	0.2364 **
马占相思 <i>A.mangium</i>	CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 22.4937e^{0.1132x}$	0.6629 **
	CH_4 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 2.2280x - 86.7345$	0.1429
	N_2O ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$y = 2.5954x - 36.5345$	0.3997 **

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

除了温度外,土壤含水量也是影响地表温室气体通量的一个关键因子^[15]。回归分析表明(表3),两种林型地表 CO₂通量和 N₂O 通量和土壤含水量均存在极显著 ($P<0.01$) 线性关系 ($0.371<R^2<0.646$),地表 CH₄通量和土壤含水量呈现显著 ($P<0.05$) 相关。

表3 CO₂、CH₄和 N₂O 通量(y)与土壤含水量(x)的回归方程(n=60)
Table3 Correlation coefficients of three greenhouse gas fluxes(y) with soil moisture(x) (n=60)

林型 Plantations	温室气体 Greenhouse gases	回归方程 Correlation equation	R ²
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	CO ₂ (mg m ⁻² h ⁻¹)	$y=15.1740x+83.5388$	0.3714**
	CH ₄ (μg m ⁻² h ⁻¹)	$y=1.0984x-53.6638$	0.1289*
	N ₂ O(μg m ⁻² h ⁻¹)	$y=0.9301x-3.0321$	0.5578**
马占相思 <i>A.mangium</i>	CO ₂ (mg m ⁻² h ⁻¹)	$y=12.6257x+138.4148$	0.3850**
	CH ₄ (μg m ⁻² h ⁻¹)	$y=2.3345x-64.9913$	0.1914**
	N ₂ O(μg m ⁻² h ⁻¹)	$y=1.8016x-5.6577$	0.6461**

3.3 土壤温室气体总排放量

根据 CH₄和 N₂O 的 GWP,可以得到两种林型 3 种温室气体全年排放总量及每种温室气体的贡献率(表4)。可以看出尾巨桉林和马占相思林温室气体年温室气体排放总量为 31.014 t/hm²和 28.782 t/hm²,尾巨桉林年排放总量比马占相思林高 7.76%。两种林型中,CO₂排放量处于绝对优势的状态(98.46%—99.15%),CH₄和 N₂O 处于次要地位。N₂O 虽然排放量最低,但是由于其 GWP 较高,依然有着超过 1%的贡献率。因此,华南地区尾巨桉林和马占相思林地表温室气体排放主要源于 CO₂排放。

表4 两种林型土壤温室气体排放总量
Table 4 Greenhouse gases emissions from soil in two types of plantation

林型 Plantations	年总排放量 Total greenhouse gas missions			年总排放量(全球增温潜势) Total greenhouse gas emissions(GWP)				贡献率 Contribution rate		
	CO ₂ /	CH ₄ /	N ₂ O/	CO ₂ -CO ₂ /	CH ₄ -CO ₂ /	N ₂ O-CO ₂ /	Total-CO ₂ /	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	(t/hm ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)	(t/hm ²)	(t/hm ²)	(t/hm ²)	(t/hm ²)			
尾巨桉林 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	30.750	-2.897	1.130	30.750	-0.070	0.337	31.014	99.15%	-0.23%	1.09%
马占相思林 <i>A.mangium</i>	28.340	-2.929	1.730	28.340	-0.070	0.516	28.782	98.46%	-0.25%	1.79%

4 讨论与结论

尾巨桉人工林和马占相思人工林均为 CO₂和 N₂O 的排放源,CH₄的吸收汇。尾巨桉林和马占相思林地表 CO₂通量均呈现雨季高旱季低的单峰规律,季节变异性强于林型之间的变异性。华南地区属于亚热带季风气候,雨热同期,雨季的高温高湿有利于植物旺盛的生长,植物根呼吸及微生物活动强烈^[14]。两种林型地表 CH₄吸收通量均表现为旱季高雨季低,两种林型无明显差异。森林地表 CH₄通量的高低主要取决于甲烷氧化细菌和甲烷吸收细菌的相对活性^[16]。甲烷氧化细菌吸收甲烷是一个耗氧过程,而甲烷产生菌是专性厌氧菌^[17]。雨季土壤含水量高,土壤通气性降低;另一方面雨季土壤呼吸强度高,植物根系和微生物在呼吸过程中消耗大量的氧气,进一步降低了土壤含氧量,这些均有利于甲烷产生菌的代谢,抑制了甲烷氧化菌的活性,从而导致对 CH₄的吸收量降低。两种林型地表 N₂O 通量均呈现雨季高旱季低的规律,在雨季出现两个排放高峰。森林土壤 N₂O 主要来源于硝化过程和反硝化过程^[18],雨季的大量降雨降低了土壤的含氧量,有利于提高反硝化细菌的活性;另一方面,华南地区氮沉降比较严重^[19],降雨为硝化反硝化细菌提供了反应底物,因此 N₂O 排放量在雨季明显上升。马占相思林地表 N₂O 通量大于尾巨桉林,马占相思林的凋落物含量远高于尾

巨桉林,较高的凋落物形成了有利于硝化和反硝化细菌生存的微生物环境^[20]。

尾巨桉林和马占相思林地表 CO_2 通量和土壤 5 cm 温度呈现极显著 ($P<0.01$) 的指数相关。土壤呼吸速率与温度的敏感性指标 Q_{10} 值分别为 3.43 和 3.10,明显高于热带雨林^[21] (2.08)、热带橡胶林^[21] (1.79) 和亚热带天然林^[22] (1.86),但是低于温带地区的硬木混交林^[23] (3.9) 和山毛榉林^[24] (4.2),同去除凋落物的亚热带针阔叶混交林^[22] (3.24) 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呼吸的影响更大。Dong 等^[25] 研究表明,在 0—30℃ 范围内,温带森林地表 CH_4 吸收通量与温度呈正相关。尤其在 -1—10℃ 时,温度是 CH_4 通量的主导因素^[26]。本研究中土壤 5 cm 温度对地表 CH_4 通量没有显著影响。森林土壤中甲烷氧化细菌和甲烷产生菌都是中温细菌,细菌活性适宜温度为 22—38℃^[27]。整个研究期间,尾巨桉林和马占相思林样地平均温度分别为 22.66℃ 和 23.01℃,且温度季节变化幅度远低于温带,因此土壤温度对甲烷细菌活性影响有限。有研究表明温带森林土壤 N_2O 通量与土壤温度之间存在正相关关系^[28],然而在热带森林中这种相关性不显著或者不存在^[29],原因是热带地区土壤温度的季节变化均比较小。与热带森林不同,亚热带尾巨桉林和马占相思林地表 N_2O 通量与 5 cm 土壤温度呈现显著的正相关,这可能是南亚热带季风的气候造成的。

植物和微生物的许多生命活动需要水分参与,所以土壤湿度是影响土壤地表 CO_2 通量的另一个非常重要的环境因子^[15]。尾巨桉林和马占相思林地表 CO_2 通量和土壤含水量均呈现极显著线性相关。在热带,土壤温度的季节变化相对较小,旱季和雨季的交替作用决定了土壤呼吸速率的季节性波动^[30]。本研究中,温度依然是土壤呼吸最主要影响因子。土壤含水量和 CH_4 通量呈现负线性相关,这个结果与温带和热带森林的研究相一致^[21,23]。华南地区雨季较差的土壤通透性和较低的土壤含氧量导致地表 CH_4 通量降低。从相关系数可以看出,土壤湿度对 N_2O 通量的影响大于土壤温度。在本研究中,5 月和 7 月的两个 N_2O 排放高峰和降雨密切相关。5 月降雨 27 天,降水量 628.13 mm,7 月降雨 24 天,降水量 386.34 mm。雨水中含有较高的有效氮,为硝化反硝化提供反应底物;此外,强降雨后会出现干湿交替现象。干湿交替过程可引起土壤硝化作用和反硝化作用交替产生 N_2O ,并且能抑制 N_2O 深度还原为 N_2 ,从而促进土壤排放更多的 N_2O ^[31]。

为了更好的分析评价华南地区人工林地表温室气体排放,特将本文研究结果与国内热带温带不同林分地表温室气体排放情况进行了对比(表 5)。可以看出,华南地区尾巨桉人工林和马占相思人工林的地表 CO_2 通量低于热带及亚热带季风常绿阔叶林,明显高于亚热带松林及温带阔叶林及人工林。表明在我国森林地表 CO_2 通量从温带到热带逐渐增高,在同一区域天然林大于人工林。有研究表明未受干扰的原始森林对 CH_4 的吸收通量显著大于人为干扰严重的人工林^[34]。在本研究中也得到类似结论,两种林型 CH_4 吸收通量均低于热带、亚热带及温带的天然林或次生林。本研究中两种人工林的 CH_4 吸收通量高于热带橡胶人工林,可能因为橡胶林进行了长期的施氮肥,氮沉降会明显降低土壤的 CH_4 通量^[19]。在温带森林研究发现,人工林地表

表 5 国内不同森林生态系统地表温室气体通量值比较

Table 5 Comparison of greenhouse gas fluxes from forest floor at different locations in China

地点 Location	气候带 Climatic zone	森林类型 Forest types	林龄 Age	CO_2 通量 CO_2 fluxes/ ($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	CH_4 通量 CH_4 fluxes/ ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	N_2O 通量 N_2O fluxes/ ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
广西西双版纳 ^[21,32]	热带	热带雨林	原始林	53.400	-3.687	13.834
广西西双版纳 ^[21,32]	热带	橡胶林人工林	22	47.998	-1.497	7.081
广东鼎湖山 ^[15]	亚热带	季风常绿阔叶林	原始林	41.435	-7.796	7.358
广东鼎湖山 ^[15]	亚热带	松林人工林	60	21.637	-4.993	4.205
本研究	亚热带	尾巨桉人工林	6	30.750	-2.897	1.130
本研究	亚热带	马占相思人工林	19	28.340	-2.929	1.730
黑龙江帽儿山 ^[33]	温带	硬阔林	60	18.024	-3.580	1.533
黑龙江帽儿山 ^[33]	温带	红松林	50	11.590	-3.116	1.606

N_2O 通量低于同一区域天然林,在亚热带也得相同的结论^[35]。在本研究中, N_2O 通量低于热带及亚热带天然林,高于温带人工林,和温带天然林或次生林排放相近。

森林地表温室气体通量是森林生态系统碳氮循环的一个重要环节,是森林碳氮收支的重要方式之一。本试验主要研究华南地区处于数量成熟的尾巨桉林和马占相思林 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 这 3 种温室气体的排放规律,要更加清晰的认识华南地区速生丰产林土壤温室气体的源汇问题,还要开展更多广泛的试验。速生丰产林有着不同的生长阶段,林分生长周期较短。在不同的生长时期,速生丰产林林分土壤温室气体又有着怎样的排放规律,是下一步研究的重点。

参考文献 (References):

- [1] Wang W C, Yung Y L, Lacis A A, Mo T, Hansen J E. Greenhouse effects due to man-made perturbations of trace gases. *Science*, 1976, 194 (4266): 685-690.
- [2] Rogelj J, Den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. Paris agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [3] 何建坤.《巴黎协定》新机制及其影响. *世界环境*, 2016, (1): 16-18.
- [4] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(2): 197-208.
- [5] IPCC. *Cambridge Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [6] Oertel C, Matschullat J, Zurba K, Zimmermann F, Erasmi S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2016, 76(3): 327-352.
- [7] IPCC. *Cambridge Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 沈国舫. 集约育林—世界林业研究的主要课题. *世界林业研究*, 1991, (3): 1-6.
- [9] 尹若波, 秦光华, 李修刚. 赴巴西森林资源管理和生态环境保护培训报告. *山东林业科技*, 2012, 42(5): 129-132.
- [10] 徐济德. 我国第八次森林资源清查结果及分析. *林业经济*, 2014, (3): 6-8.
- [11] 杜虎, 曾馥平, 王克林, 宋同清, 温远光, 李春干, 彭晚霞, 梁宏温, 朱宏光, 曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. *生态学报*, 2014, 34(10): 2712-2724.
- [12] 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.
- [13] 贾朋, 魏龙, 王燕, 刘珊, 高常军, 周平, 李吉跃. 马占相思人工林土壤温室气体排放日变化规律研究. *华南农业大学学报*, 2016, 37 (6): 84-90.
- [14] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [15] Tang X L, Liu S G, Zhou G Y, Zhang D Q, Zhou C Y. Soil-atmospheric exchange of CO_2 , CH_4 , and N_2O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 546-560.
- [16] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 张德强, 刘世忠, 孙扬. 鼎湖山针阔叶混交林地表 CH_4 通量. *生态环境学报*, 2005, 14(3): 333-335.
- [17] Zhang W, Mo J M, Zhou G Y, Gundersen P, Fang Y T, Lu X K, Zhang T, Dong S F. Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in southern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D11): D11116.
- [18] Gao B, Ju X T, Su F, Meng Q F, Oenema O, Christie P, Chen X P, Zhang F S. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 112-124.
- [19] 张炜, 莫江明, 方运霆, 鲁显楷, 王晖. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响. *生态学报*, 2008, 28(5): 2309-2319.
- [20] Zhang W, Mo J M, Yu G R, Fang Y T, Li D J, Lu X K, Wang H. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 2008, 306(1/2): 221-236.
- [21] 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[D]. 云南: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2008.
- [22] 周存宇, 周国逸, 张德强, 王迎红, 刘世忠. 鼎湖山森林地表 CO_2 通量及其影响因子的研究. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, 34(S2): 175-182.
- [23] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [24] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [25] Dong Y, Scharffe D, Lobert J M, Crutzen P J, Sanhueza E. Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from a temperate forest soil: the effects of leaves and

- humus layers. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1998, 50(3): 243-252.
- [26] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, Aber J D, Bowden R D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 1-10.
- [27] 邓湘雯, 杨晶晶, 陈槐, 黄志宏, 项文化, 彭长辉. 森林土壤氧化(吸收)甲烷研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 577-583.
- [28] 党旭升, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 韩士杰, 张军辉, 王森, 王永生, 徐敏杰, 李林森, 王磊. 温带针阔混交林土壤碳氮气体通量的主控因子与耦合关系. *生态学报*, 2015, 35(19): 6530-6540.
- [29] Werner C, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Soil-atmosphere exchange of N_2O , CH_4 , and CO_2 and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D3): D03308.
- [30] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [31] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamsen G. N-fertilization and soil acidification effects on N_2O and CO_2 emission from temperate pine forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(11): 1401-1408.
- [32] 严玉平. 西双版纳热带季节雨林、橡胶林土壤 CH_4 、 N_2O 通量及树干呼吸研究[D]. 云南: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2006.
- [33] 刘实. 四种温带森林土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [34] Maljanen M, Liikanen A, Silvola J, Martikainen P J. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils. *Soil Use and Management*, 2003, 19(1): 73-79.
- [35] 韩琳, 王鸽, 王伟, 赵熙. 全球森林土壤 N_2O 排放通量的影响因子. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 446-452.