

华南地区典型人工林土壤二氧化碳和氧化亚氮通量研究

李海防^{1,2}, 段文军¹

(1. 桂林理工大学 旅游学院, 广西 桂林 541004; 2. 中国科学院 华南植物园, 广东 广州 510650)

摘要: 二氧化碳(CO_2)和氧化亚氮(N_2O)是重要的温室气体, 森林土壤是其主要排放源。采用静态箱/气相色谱分析技术对中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 纯林(EUp), 厚英相思 *Acacia crassicarpa* 纯林(ACp), 10个树种混交林(Tp)和30个树种混交林(THp)等4种林型的土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量进行了原位测定, 研究纯林和混交林对土壤温室气体排放的影响。结果表明: CO_2 和 N_2O 排放通量季节波动幅度较大; 4个林型土壤 CO_2 和 N_2O 通量在湿季均维持较高水平; 通量峰值均出现在湿季, 旱季则明显降低, 且相对稳定。由于EUp和ACp纯林土壤微生物碳(microbial biomass carbon, MBC)比混交林高, 导致EUp ($130.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)和ACp ($134.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)土壤 CO_2 通量显著高于Tp ($111.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)和THp ($108.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。在4种林型中, 尾叶桉对土壤 NO_3^- -N吸收快速, 土壤 N_2O 排放通量最低, 达 $12.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。土壤温度、土壤湿度、MBC和呼吸底物[NO_3^- -N和土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)]都是影响土壤 CO_2 和 N_2O 通量的重要因子。图2表3参29

关键词: 土壤学; 二氧化碳通量; 氧化亚氮通量; 纯林; 混交林; 温室气体; 林业管理

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)01-0026-07

Soil CO_2 and N_2O fluxes from four typical plantations in southern China

LI Hai-fang^{1,2}, DUAN Wen-jun¹

(1. College of Ecotourism, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: Carbon dioxide (CO_2) and nitrous oxide (N_2O), which mainly come from soils in forest ecosystems, are important greenhouse gases. Both CO_2 and N_2O fluxes in a *Eucalyptus urophylla* plantation (EUp), an *Acacia crassicarpa* plantation (ACp), a 10-species-mixed plantation (Tp), and a 30-species-mixed plantation (THp) were measured in situ using a static chamber and gas chromatography(GS) technique at the He-shan Hilly Land Interdisciplinary Experimental Station, Chinese Academy of Sciences (CAS). Results from the four plantations showed that CO_2 and N_2O fluxes varied widely during the year, exhibited a relatively high level during the rainy season, and kept a relatively low level in the dry season. Also, peak CO_2 and N_2O fluxes appeared in the rainy season. Compared to Tp and THp, significantly ($P<0.05$) higher values of microbial biomass carbon (MBC) were found in EUp and ACp with CO_2 fluxes also significantly ($P<0.05$) higher. The fastest NO_3^- -N uptake was in EUp as were the lowest soil N_2O fluxes. These results indicated that soil temperature, soil moisture, MBC, and soil substrate(NO_3^- -N and soil organic carbon, SOC) could be important controlling variables for soil CO_2 and N_2O fluxes. [Ch, 2 fig. 3 tab. 29 ref.]

Key words: soil science; soil CO_2 fluxes; N_2O fluxes; pure plantations; mixed plantations; greenhouse gases; forest management practices

温室气体是指地球大气中导致温室效应的气体, 主要包括二氧化碳(CO_2)和氧化亚氮(N_2O)等。近几十年来, 大气中的温室气体在逐年增加^[1-2]。据联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC(2001)估计, 大

收稿日期: 2010-05-11; 修回日期: 2010-06-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30630015); 国家自然科学基金资助项目(30771704)

作者简介: 李海防, 副教授, 博士, 从事生态学与景观生态学等研究。E-mail: lihaifang@scbg.ac.cn

气中 CO_2 和 N_2O 年均增长速度分别达到 0.5% 和 0.3%，全球增温效应越来越明显^[3]。在温室气体的所有排放源中，其主要源是土壤^[4]。土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 经土壤微生物和土壤动物的矿化作用，以 CO_2 形式释放到大气中^[5]。土壤 N_2O 是在微生物的参与下，通过硝化和反硝化作用完成的^[6]。土壤 CO_2 和 N_2O 通量受土壤温度^[7-8]、湿度^[9-10]、质地^[11]、微生物量^[12]、可溶性氮^[13]、根系生物量^[14-15]、林业砍伐^[6]和增施肥料^[16]等多种因素的影响。此外，植被类型变化能通过改变上述各种环境因素，进而影响土壤 CO_2 和 N_2O 通量^[17]。人工林是中国森林类型的重要组成部分，据全国绿化委员会发布的《2007 年中国国土绿化状况公报》，中国人工林面积达 0.62 亿 hm^2 ，占世界人工林面积的 1/3，居世界第一；且主要是一些速生纯林，如桉树 *Eucalyptus* sp.，马尾松 *Pinus massoniana* 和相思树 *Acacia* sp. 等^[18]，而混交林相对较少。在华南人工林产区，纯林和混交林林型变化对土壤温室气体排放有什么影响，相关的研究还不多，有些研究结果还有待进一步证实^[19]。因而，研究纯林和混交林土壤 CO_2 和 N_2O 通量的变化，探寻林型变化对 CO_2 和 N_2O 通量影响机制，对丰富人工林生态系统碳固定及固碳减排理论和技术，实现经济转型和减少温室气体排放具有重要的理论意义和实践意义。本研究以中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站典型人工林为研究对象，原位系统测定尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 纯林(简写为 EUp)，厚荚相思 *Acacia crassicarpa* 纯林(简写为 ACp)，10 个树种混交林(简写为 Tp)和 30 个树种混交林林下(简写为 THp) 土壤 CO_2 和 N_2O 通量，对 CO_2 和 N_2O 通量和环境因子的关系进行探讨，探究人工纯林和混交林在温室气体排放中的作用。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

实验选在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站共和样地。试验站位于广东省鹤山市， $22^\circ 41' \text{N}$, $112^\circ 54' \text{E}$ ，地形多为海拔 100 m 以下的丘陵地。试验站所在地属南亚热带季风气候，年均太阳辐射为 4 350.5 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ；年平均气温为 21.7 °C，极端最高气温 37.5 °C，极端最低气温 0.0 °C。年均降水量为 1 800.0 mm，有明显的干、湿季之分，干季为 10 月到翌年 3 月，湿季为 4 月到 9 月；年均蒸发量为 1 638.8 mm。丘陵地土壤为赤红壤，属强酸性土壤。人工林建于 2005 年春，造林前皆为荒草地，面积

表 1 4 种典型人工林样地概况

Table 1 Characteristics of four typical plantations

林分类型	造林年限/a	密度/(株· hm^{-2})	树高/m	胸径/cm	郁闭度/%	树种代号
尾叶桉纯林	2	1734	8.9	7.4	0.75	1
厚荚相思纯林	2	1734	4.2	4.8	0.70	2
10 个树种混交林	2	1734	1.4	2.0	0.25	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
30 个树种混交林	2	1734	1.4	1.8	0.30	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
土壤特征	土壤 pH 值	土壤有机碳/(g· kg^{-1})	土壤总氮/(g· kg^{-1})	可溶性钾/(mg· kg^{-1})	可溶性钠/(mg· kg^{-1})	
尾叶桉纯林	4.35	18.17	0.79	16.03	7.09	
厚荚相思纯林	4.39	22.12	0.75	17.53	6.56	
10 个树种混交林	4.26	23.13	1.22	21.14	10.27	
30 个树种混交林	4.46	17.68	0.88	19.52	7.29	

说明：1. 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; 2. 厚荚相思 *Acacia crassicarpa*; 3. 楝香 *Liquidambar formosana Hance*; 4. 灰木莲 *Magnoliae glanca*; 5. 观光木 *Tsoungiodendron odorum*; 6. 刺栲 *Castanopsis hystrix*; 7. 火力楠 *Michelia macclurei*; 8. 深山含笑 *Michelia Maudiae*; 9. 蓝花楹 *Jacaranda acutifolia*; 10. 假苹婆 *Sterculia lanceolata*; 11. 五桠果 *Dillenia indica*; 12. 长芒杜英 *Elaeocarpus apiculatus*; 13. 大叶栎 *Quercus griffithii*; 14. 乐昌含笑 *Michelia chapensis*; 15. 日本杜英 *Elaeocarpus japonicus*; 16. 海南红豆 *Ormosia pinnata*; 17. 凤凰木 *Delonix regia*; 18. 山竹子 *Hedysarum fruticosum*; 19. 小叶紫檀 *Pterocarpus santalinus*; 20. 人面子 *Dracontomelon duperreanum*; 21. 大叶樟 *Cinnamomum parthenoxylon*; 22. 山茱萸 *Radermachera sinica*; 23. 猫尾木 *Dolichandrone caudafelina*; 24. 岭南山竹子 *Garcinia oblongifolia*; 25. 福木 *G. subelliptica*; 26. 台湾山桂花 *Maesa perlaria*; 27. 红檵木 *Loropetalum chinensis*; 28. 蒲桃 *Syzygium jambos*; 29. 重阳木 *Bischofia javanica*; 30. 阴香 *Burmann Cinnamon*; 31. 华润楠 *Machilus chinensis*; 32. 榆树 *Quercus dentata*。

约为 50 hm², 有尾叶桉纯林、厚壳相思纯林、10 树种混交林和 30 个树种混交林等不同林型; 各个林型有 3 个重复, 各个重复样地面积约 1 hm² (表 1)。林下灌草主要为芒萁 *Dicranopteris dichotoma*, 乌毛蕨 *Blechnum orientale* 和岗松 *Baeckea frutescens* 等。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 在研究区选取 EUp, ACp, Tp 和 THp 等 4 种林型为研究对象。在每块样地建立 1 个 10 m × 10 m 的小区, 共计 12 个小区(4 个林型 × 3 个重复)。

1.2.2 采样方法 ①土壤温室气体采样: 土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量用静态箱/气相色谱法进行测定。土壤温室气体采样从 2007 年 6 月开始到 2008 年 5 月结束。2 个星期采样 1 次。各个试验小区设置 2 个静态箱, 箱体由聚氯乙烯(PVC)管制成, 内径为 22 cm, 高 20 cm。不锈钢底座固定于采气样点, 整个生长季节不再移动。每次采样都在上午 9:00 开始^[8], 将采气箱放在不锈钢底座凹槽中, 加水密封, 扣箱后用 100 mL 塑料注射器于 0, 10, 20, 30 min 抽取箱内气体, 采集的气样迅速带回实验室进行气相色谱分析。②表层土壤采样: 表层土样分别于 2007 年 9 月和 2008 年 3 月干湿季各取样 1 次。在各个小区内随机选取 6 个点, 在每一点用直径 8.5 cm 的采土器取 0~10 cm 深的表土, 各个小区土样由 6 次取样混和而成。土样立即带回实验室, 其中, 用于理化性质分析的样品风干磨细, 过孔径 2 mm 筛; 分析土壤微生物量的样品放入 -4 ℃ 的冰箱保存。

1.2.3 测定方法 ①土壤温室气体测定: 采集的气样在 24 h 内用 HP5890 气相色谱仪分析 CO₂ 和 N₂O 浓度。温室气体通量的计算是通过气体浓度随时间的变化, 计算单位地表面积的气体排放通量。土壤温室气体排放通量用以下公式计算:

$$F = \frac{d_c}{d_t} \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H.$$

其中, F 为土壤温室气体排放通量; d_c/d_t 为观测箱内气体浓度随时间变化的直线斜率; M 为气体的摩尔质量(g·mol⁻¹); V_0 为标准状态下(温度为 273.15 K, 气压 1 013.25 hPa)气体的摩尔体积(22.41×10^{-3} m³); T_0 和 P_0 分别为标准状态下的空气绝对温度(K)和气压(hPa), P 为采样点的气压(hPa), T 为采样时的绝对温度(K), H 为采样箱的高度(cm)。②在抽取土壤温室气体气样同时, 在静态箱底座处随机选取 3 个测定点, 用土壤温度计(Fisher Scientific)和湿度计(TK1-Basic, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK)分别测定地表 0~10 cm 土壤温湿度。③土壤理化性质及微生物碳测定均采用常规方法^[8]: 土壤 pH 值采用土壤 pH 计水浸液测定法; 土壤 SOC 有机碳采用重铬酸钾氧化法; 土壤铵态氮(NH₄-N)采用靛酚兰比色法进行测定; 土壤硝态氮(NO₃-N)采用酚二磺酸比色法; 土壤微生物碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸, 氯化钾浸提容量分析法。

1.3 数据处理

应用 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析, 用最小显著差(LSD)法检验不同处理对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放及土壤理化性质影响差异的显著性。

2 结果与讨论

2.1 土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量季节动态变化

结果表明, 4 种林型土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量分别为 32.85~225.99 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 1.82~50.05 μg·m⁻²·h⁻¹, 该范围与 Tang 等^[21]的研究结果基本相符。从图 1 可以看出, CO₂ 和 N₂O 通量均具有明显的季节变化趋势。CO₂ 和 N₂O 排放通量季节变化幅度较大, 在湿季(4 月到 9 月)明显较高, 而在旱季(10 月到 3 月)则降低, 且在旱季则保持相对稳定; CO₂ 和 N₂O 通量峰值均出现在湿季(图 1)。一般认为, 土壤温度和湿度是影响土壤温室气体排放的主要环境因子^[10,22]。CO₂ 和 N₂O 通量在旱季降低的主要原因是由于地表土壤温湿度降低, 土壤微生物和土壤根系活性下降, 土壤微生物呼吸和根呼吸处于抑制状态, 导致温室气体通量下降, 这与前人^[5,23]的研究结果一致。在湿季, 由于土壤微生物和土壤根系活性较高, CO₂ 和 N₂O 通量易受其他环境因子影响, 因而波动幅度较大^[21]。

2.2 4 种人工林土壤理化性质分析

结果表明, 纯林和混交林对土壤理化性质有重要的影响(表 2)。EUp 和 ACp 纯林地表土壤湿度显著

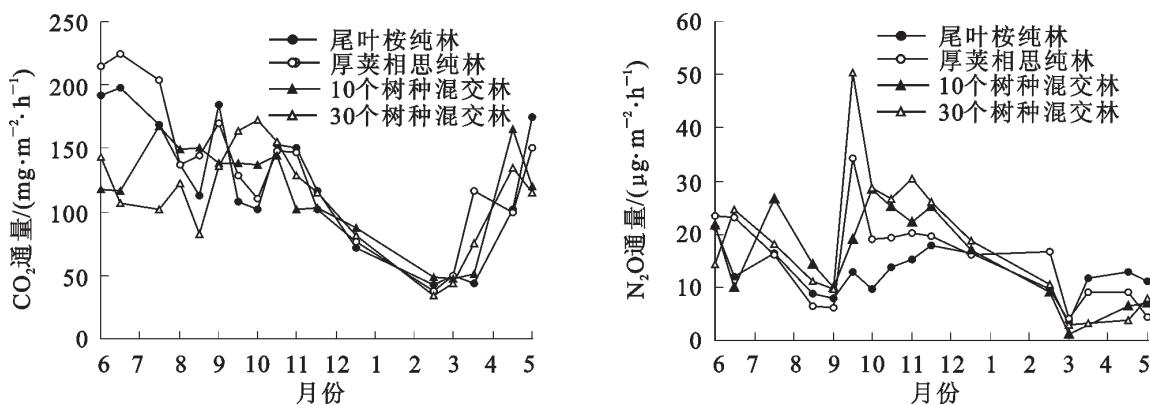


图 1 4 种人工林土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量月动态变化

Figure 1 Monthly variations of soil CO_2 and N_2O fluxes in four typical plantations

($P<0.01$) 高于 Tp 和 THp 混交林, 而土壤温度则相对较低($P<0.05$)。这是因为尾叶桉和厚英相思是典型的速生树种, 生长速度快, 郁闭度高(表 1), 地表土壤通透度较低, 光照较弱, 导致地表温度略低; 同时, 温度降低减缓土壤水分蒸发散失, 土壤湿度较高。纯林和混交林对土壤 pH 值没有明显影响, 4 种林型土壤 pH 值没有显著差异(表 2)。表 2 结果表明, EUp 和 ACp 纯林土壤有机碳与 Tp 和 THp 相比并不显著。一般认为, 土壤有机碳与植被凋落物的输入密切相关, 速生树种年生长量高于慢生树种, 地面凋落物输入量大, 土壤有机碳一般较高^[24], 但在本研究中, 由于造林时间较短, 仅为 2 a, 这可能是土壤有机碳差异不显著的主要原因。在 EUp 和 ACp 纯林, 林下土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 明显较低(表 2), 这是因为速生林对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 需求较高的缘故。龚珊珊等^[25]研究指出, 由于速生林对土壤养分的大量消耗, 桉树林下土壤有效氮的含量显著减少。土壤微生物碳虽然仅占土壤有机碳总量的 1% ~ 4%, 但它却是土壤养分转化的活性库或源, 是碳素循环和周转的重要媒介^[14]。土壤微生物碳反映了土壤微生物的生物量。与 Tp 和 THp 混交林相比, EUp 和 ACp 纯林林下环境在一定程度上有利于土壤微生物的生存繁衍, 土壤微生物碳明显较高(表 2)。

表 2 4 种人工林下土壤理化性质

Table 2 Average of soil physical and chemical characteristics in four plantations

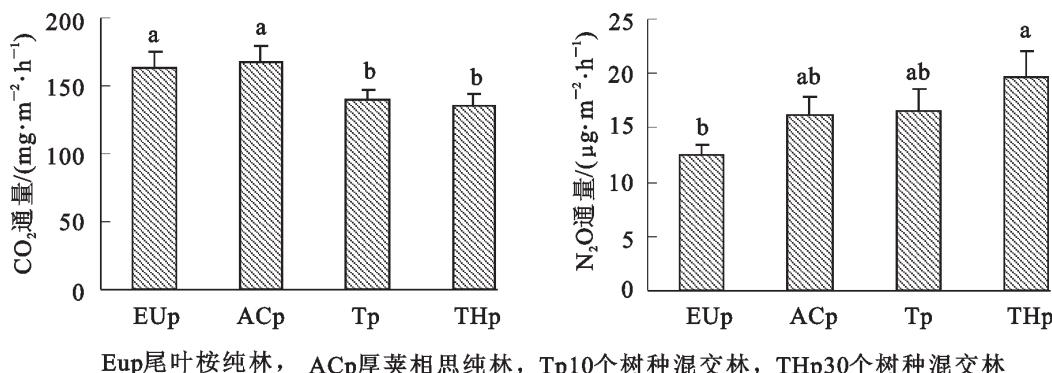
变量	土壤温度/℃	土壤湿度/%	pH 值	土壤有机碳/(g·kg⁻¹)	$\text{NO}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\text{NH}_4\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	微生物碳/(mg·kg⁻¹)
尾叶桉纯林	22.31 ± 0.52 b	17.24 ± 0.89 a	4.26 ± 0.05	196.6 ± 22.5	5.55 ± 0.67 b	4.35 ± 0.48 b	309.431 ± 38.070 a
厚英相思纯林	22.94 ± 0.51 b	16.55 ± 0.95 a	4.26 ± 0.08	193.5 ± 22.1	8.12 ± 0.52 ab	5.32 ± 0.59 b	293.171 ± 28.660 a
10个树种混交林	23.74 ± 0.53 a	11.82 ± 0.90 b	4.37 ± 0.07	157.9 ± 32.1	8.45 ± 0.53 ab	6.07 ± 0.56 a	161.188 ± 21.280 b
30个树种混交林	24.48 ± 0.53 a	11.65 ± 0.92 b	4.38 ± 0.05	158.2 ± 12.6	10.03 ± 1.43 a	6.87 ± 0.16 a	153.900 ± 36.880 b
P 值	<0.05	<0.01	>0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05
n	102	102	6	6	6	6	6

说明: 表中数据为平均值 ± 标准误差。

2.3 影响土壤二氧化碳和氧化亚氮通量的主要因素

CO_2 和 N_2O 年通量平均值(图 2)表明, 纯林和混交林林下土壤温室气体排放具有明显的规律性。土壤 CO_2 和 N_2O 通量均为正值, 为净排放。EUp ($130.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 和 ACp ($134.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 纯林土壤 CO_2 通量显著高于 Tp ($111.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 和 THp ($108.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 混交林; 与混交林相比, EUp 和 ACp 纯林 N_2O 通量都较低, 其中, EUp 林 N_2O 通量最低, 这说明林型变化对土壤温室气体排放有重要影响^[22]。

一般认为, 土壤 CO_2 和 N_2O 排放是土壤生物化学过程的结果, 所有能直接或间接影响生物化学过程的环境因子都能够影响土壤温室气体的排放。依据 1 a 实验观测数据, 得出土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量与各环境因子之间的相关系数矩阵(表 3)。结果表明, 土壤 CO_2 排放通量与表层土壤温度及土壤湿度具有显著正相关性, 这与很多人的研究结果相一致^[8,10]。表 2 和表 3 也表明, 4 种林型土壤微生物碳差异显



EUp尾叶桉纯林, ACp厚英相思纯林, Tp10个树种混交林, THp30个树种混交林

图 2 4 种人工林二氧化碳和氧化亚氮通量比较(误差线为标准误, $n = 102$)

Figure 2 Comparisons of mean soil CO_2 and N_2O fluxes in the four plantations (vertical bars are standard error for means, $n = 102$)

著($P < 0.05$), 且 CO_2 通量与土壤微生物碳呈正相关性($r = 0.560$, $n = 6$)。这说明, 在 4 种林型中, 由于尾叶桉和厚英相思为速生树种, 与 Tp 和 THp 混交林相比, 林下土壤温度较低, 但土壤湿度较大(表2)。土壤温度和土壤湿度作为影响土壤温室气体排放的重要因子, 可能在 EUp 和 ACp 林下土壤创造一个有利于土壤微生物的小环境^[26-27], 土壤微生物碳显著增高, 微生物活性较强, 因而土壤 CO_2 通量增高。表 3 表明, N_2O 排放通量与土壤温度表现为极显著正相关, 但与土壤湿度呈显著负相关。这可能是由于在土壤湿度较高的情况下, N_2O 易溶于水, 导致 N_2O 排放通量下降的缘故^[28]。总之, 土壤温度和土壤湿度是影响土壤温室气体排放的启动因子和关键因子, 土壤温度和土壤湿度的组合作用能直接影响土壤中微生物的活性, 进而影响土壤温室气体的排放^[26]。

表 3 土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量与环境因子的相互关系

Table 3 Correlation of soil CO_2 and N_2O fluxes and environmental factors

因子	CO_2 通量	N_2O 通量	土壤温度	土壤湿度	土壤 pH 值	有机碳	硝态氮	铵态氮	微生物碳
CO_2 通量	1.000								
N_2O 通量	0.449	1.000							
土壤温度	0.651**	0.607**	1.000						
土壤湿度	0.584*	-0.513*	-0.437	1.000					
土壤 pH 值	-0.238	-0.077	0.401	0.397	1.000				
有机碳	0.477	0.281	-0.560*	0.296	-0.177	1.000			
硝态氮	0.126	0.582*	-0.084	-0.448	-0.560*	-0.016	1.000		
铵态氮	0.482	0.393	-0.520	0.405	-0.043	-0.138	0.395	1.000	
微生物碳	0.560*	0.370	-0.503	0.517*	-0.374	0.066	0.167	0.369	1.000

说明: ** 为 0.01 显著水平; * 为 0.05 显著水平。

硝化作用和反硝化作用等生物过程是土壤 N_2O 产生的主要原因, 而氮源是影响土壤中这些生物过程的最主要因素。从表 2 可以看出, 由于速生树种对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的大量吸收利用, 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 EUp($5.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $4.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 ACp ($8.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 都显著低于 Tp ($8.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $6.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 THp ($10.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $6.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(表 2)。图 2 结果显示, EUp 和 ACp 纯林 N_2O 排放通量低于 Tp 和 THp 混交林, 且 EUp 林 N_2O 排放通量最低。这说明, 在 EUp 和 ACp 速生林, 尽管土壤微生物碳较高, 但由于土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量降低, N_2O 氮源不足, 导致 EUp 林 N_2O 通量最低。表 3 可以看出, N_2O 通量与土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈明显的正相关($r = 0.582$, $n = 6$), 说明土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是影响 N_2O 通量的主要因素, 这与 Davidson^[13] 和 Fisk 等^[12] 的研究的结果类似。但土壤 N_2O 通量与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相关性不大(表 3), 说明土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 不是影响 N_2O 通量的主要因子, 这与 Simojoki 等^[16] 的研究结果一致。

表 3 还表明, 土壤 CO_2 通量与土壤有机碳的相关并不显著, 且在表 2 中, EUp 和 ACp 速生林土壤

有机碳与混交林相比也不显著。但很多研究表明^[2,29]，土壤有机碳是影响土壤 CO₂ 通量的重要因子。在本研究中，土壤有机碳对 CO₂ 通量影响不显著，可能是由于研究时间较短，效果还不显著的缘故。总之，土壤呼吸底物(NO₃-N 和土壤有机碳)都是影响土壤温室气体排放的限制因子和关键因子，但由于土壤温室气体排放机制固有的复杂性，土壤温湿度、微生物量以及呼吸底物等因子对土壤温室气体通量的影响是相互影响，相互制约的。

3 结论

总结以上分析，得出以下结论：①4 种林型土壤都是二氧化碳(CO₂)和氧化亚氮(N₂O)的源。CO₂ 和 N₂O 排放通量季节波动幅度较大；CO₂ 和 N₂O 通量在湿季维持较高水平，在旱季则明显降低，且相对稳定；CO₂ 和 N₂O 通量峰值均出现在湿季。②与 10 个树种和 30 个树种的混交林相比，由于尾叶桉和厚葵相思纯林土壤微生物碳较大，EUp 和 ACp 速生林下土壤 CO₂ 通量显著高于 Tp 和 THp 混交林；但对 N₂O 通量而言，由于速生树种对土壤 NO₃-N 的快速吸收，EUp 和 ACp 速生林 N₂O 通量都有降低，其中 EUp 林最低。③表层土壤温度和湿度是影响土壤温室气体排放的启动因子和关键因子；土壤微生物碳和呼吸底物(NO₃-N 和土壤有机碳)也是影响土壤温室气体排放的主要因子，它们对土壤温室气体通量的影响是相互影响，相互制约的。

参考文献：

- [1] MOSIER A R, DELGADO J A, KELLER M. Methane and nitrous oxide fluxes in an acid Oxisol in western Puerto Rico: effects of tillage, liming and fertilization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30** (14): 2087 – 2098.
- [2] BAGGS E M, BLUM H. CH₄ oxidation and emissions of CH₄ and N₂O from *Lolium perenne* swards under elevated atmospheric CO₂ [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36** (4): 713 – 723.
- [3] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [4] SCHLESINGER W H. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* [M]. New York : Academic Press, 1997.
- [5] ZERVA A, MENCUCCHINI M. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37** (11): 2025 – 2036.
- [6] YASHIRO Y, KADIR W R, OKUDA T, et al. The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia [J]. *Agric For Meteorol*, 2008, **148**: 799 – 806.
- [7] 李正才, 傅懋毅, 杨校生. 经营干扰对森林土壤有机碳的影响研究概述[J]. 浙江林学院学报, 2005, **22** (4): 469 – 474.
LI Zhengcai, FU Maoyi, YANG Xiaosheng. Review on effects of management disturbance on forest soil organic carbon [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, **22** (4): 469 – 474.
- [8] GROGAN P, MICHELSEN A, AMBUS P, et al. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36** (4): 641 – 654.
- [9] SUBKE J A, REICHSTEIN M, TENHUNEN J D. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in southern Germany [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, **35** (11): 1467 – 1483.
- [10] WANG Yuesi, XUE Min, ZHENG Xunhua, et al. Effects of environmental factors on N₂O emission from and CH₄ uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**: 205 – 215.
- [11] MALJANEN M, NYKÄNEN H, MOILANEN M, et al. Greenhouse gas fluxes of coniferous forest floors as affected by wood ash addition [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **237**: 143 – 149.
- [12] FISK M C, FAHEY T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **53**: 201 – 223.
- [13] DAVIDSON E A. Sources of nitricand nitrous oxide following wetting of dry soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, **56**: 95 – 102.
- [14] HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115 – 146.
- [15] GEORGE K, NORBY R J, HAMILTON J G, et al. Fine-root respiration in a loblolly pine and sweetgum forest grow-

- ing in elevated CO₂ [J]. *New Phytol*, 2003, **160**: 511 – 522.
- [16] SIMOJOKI A, JAAKKOLA A. Effect of nitrogen fertilization, cropping and irrigation on soil air composition and nitrous oxide emission in a loamy clay [J]. *Eur J Soil Sci*, 2000, **51**: 413 – 424.
- [17] INUBUSHI K., FURUKAWA Y, HADI A, et al. Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of south Kalimantan [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**: 603 – 608.
- [18] 薛立, 何跃君, 屈明, 等. 华南地区典型人工林凋落物的持水特性[J]. 植物生态学报, 2005, **29** (3): 415 – 421.
- XUE Li, HE Yuejun, QU Ming, et al. Water holding characteristics of litter in plantations in south China [J]. *Acta Phytocen Sin*, 2005, **29** (3): 415 – 421.
- [19] CONCILIO A, MA Siyan, LI Qinglin, et al. Soil respiration response to prescribed burning and thinning in mixed-conifer and hardwood forests [J]. *Can J For Res*, 2005, **35** (7): 1581 – 1591.
- [20] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Properties Analysis* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [21] TANG, Xuli, LIU Shuguang, ZHOU Guoyi, et al. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Glob Change Biol*, 2006, **12** (3): 546 – 560.
- [22] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应[J]. 生态学报, 2004, **24** (5): 953 – 958.
- YANG Yusheng, CHEN Guangshui, DONG Bin, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (5): 953 – 958.
- [23] IRVINE J, LAW B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests [J]. *Glob Change Biol*, 2002, **8** (12): 1183 – 1194.
- [24] FORNARA D A, TILMAN D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. *J Ecol*, 2008, **96**: 314 – 322.
- [25] 龚珊珊, 廖善刚. 桉树人工林与天然林土壤养分的对比研究[J]. 江苏林业科技, 2009, **36** (6): 1 – 4.
- GONG Shanshan, LIAO Shangang. Soil nutrient characteristics in eucalypt plantation and natural forest [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2009, **36** (6): 1 – 4.
- [26] ABNEE A C, THOMPSON J A, KOLKA R K. Landscape modeling of in situ soil respiration in a forested watershed of southeastern Kentucky, USA [J]. *Environ Manage*, 2004, **33**: 168 – 175.
- [27] SPERATTI A B, WHALEN J K. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil as influenced by anecic and endogeic earthworms [J]. *Appl Soil Ecol*, 2008, **38**: 27 – 33.
- [28] NEILL C, PAUL A S, DIANA C G, et al. Rates and controls of nitrous oxide and nitric oxide emissions following conversion of forest to pasture in Rondônia [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2005, **71**: 1 – 15.
- [29] KRAVCHEKO I, BOECKX P, GALCHENKO V, et al. Short- and medium-term effects of NH₄⁺ on CH₄ and N₂O fluxes in arable soils with a different texture [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34** (5): 669 – 678.