

北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律

杜睿¹, 黄建辉², 万小伟¹, 贾月慧³

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院植物研究所; 3. 北京农学院)

摘要: 本研究利用静态箱法在北京市东灵山暖温带森林生长期选择 3 种不同类型的森林(阔叶混交林、辽东栎林和油松林)的土壤进行了温室气体(CH_4 、 CO_2 和 N_2O)排放规律的野外原位观测. 研究结果表明: 暖温带主要代表森林类型的土壤作为 CH_4 的汇吸收大气中的 CH_4 , 同时作为 CO_2 和 N_2O 的源向大气排放. 观测结果显示: 不同的森林土壤类型其温室气体排放通量、范围各不相同, 阔叶混交林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量范围分别是: $42 \sim 103 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $15 \sim 344 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-61 \sim 101 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 辽东栎林土壤 3 种气体通量范围分别是: $13 \sim 182 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $23 \sim 380 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-15 \sim 183 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 油松林土壤 3 种气体通量范围分别是: $12 \sim 128 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $15 \sim 292 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-94 \sim 153 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 观测期内阔叶混交林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 平均通量分别是: $-66 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $145 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 辽东栎林土壤 3 种气体平均通量分别是: $-67 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $146 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $45 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 油松林土壤 3 种气体平均通量分别是: $-79 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $150 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 本研究估算了不同类型的森林土壤不同的温室气体生长期内的排放总量, 阔叶混交林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放总量分别是: $-5.34 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $13.9 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $2.58 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 辽东栎林土壤 3 种气体排放总量分别是: $-6.20 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $14.07 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $4.19 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 油松林土壤 3 种气体排放总量分别是: $-6.85 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $15.71 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $4.30 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$.

关键词: 东灵山; 暖温带森林土壤; 温室气体; 通量

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)02-0012-05

The Research on the Law of Greenhouse Gases Emission from Warm Temperate Forest Soils in Beijing Region

DU Rui¹, HUANG Jian-hui², WAN Xiao-wei¹, JIA Yue-hui³

(1. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China; 2. Institute of Botany, CAS; 3. Beijing College of agriculture)

Abstract: In situ measurements by closed chamber technique were done to investigate the law of greenhouse gases (Methane, carbon dioxide and Nitrous Oxide) fluxes emission from different warm temperate forest soils (Broad-leaved forest, Form. *Quercus liaotungensis* and Form. *Pinus tabulae*) of Dongling mountain in Beijing region. Results show that the all representative types forest soils were sink of CH_4 and source of CO_2 and N_2O . Different type of vegetables and soils result of different fluxes range of the main greenhouse gases. The fluxes range of CH_4 , CO_2 and N_2O emission from the three types forest soils were: $42 \sim 103 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $15 \sim 344 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $-61 \sim 101 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $13 \sim 182 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $23 \sim 380 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $-15 \sim 183 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $12 \sim 128 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $15 \sim 292 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $-94 \sim 153 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; respectively. The mean fluxes of CH_4 , CO_2 and N_2O emission from the three types forest soils during the observation period were: $-66 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $145 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $-67 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $146 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $45 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $-79 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $150 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively. The total amounts of CH_4 , CO_2 and N_2O emission from the three types forest soils were $-5.34 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $13.9 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $2.58 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; $-6.20 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $14.07 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $4.19 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; $-6.85 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $15.71 \text{Mg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $4.30 \text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, respectively.

Key words: Dongling mountain; warm temperate forest soils; greenhouse gases; flux

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 作为主要的温室气体, 其在大气中的实际浓度及其年净增长率以及各自的源汇变化都越来越受到科学家们的关注. 分析大气温室气体的主要源汇功能并开展某些相关过程的研究已成为当前全球气候与环境变化的重要科学问题. 但迄今为止, 国际上有关森林生态系统与温室气体排放的研究较多侧重于植被的蒸腾与 CO_2 的排放^[1-4]以及森林砍伐对温室气体 CO_2 排放的影

响^[5,6]. 我国关于森林生态系统的温室气体的排放的研究有徐慧等^[7]对寒温带不同森林土壤 CH_4 和 N_2O 的排放进行了研究. 北京作为世界著名大都市尤其是申奥成功后, 城市的生态环境变化以及城市

收稿日期: 2003-05-13; 修订日期: 2003-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40005009, 40075028); 中国科学院大气物理所创新领域前沿项目(8-3305)

作者简介: 杜睿(1970~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向是陆地生态系统温室气体排放与全球气候变化.

周边的生态环境对于城市的影响已经越来越受到重视.森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,其温室气体的排放有着重要的贡献.东灵山作为北京西部的著名山峰,地处暖温带落叶阔叶林区,在我国分布广泛.类型繁多的森林生态系统中具有显著的代表性,研究其温室气体的排放规律结果不仅对于陆地生态系统温室气体排放规律的研究是重要的补充,同时对于陆地生态系统碳、氮物质循环以及北京城市的生态环境影响也有着重要的意义.

1 材料与方法

1.1 野外实验样地概况

野外实验样地选于中国科学院北京森林生态系统定位研究站,其位于北京市郊门头沟区的东灵山,地理位置为北纬 $40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}02'$, 东经 $115^{\circ}26' \sim 115^{\circ}30'$.东灵山地区气候特征为暖温带大陆性季风气候,四季表现分明:冬季寒冷多风且干燥,夏季温热多雨,春季干旱,风沙盛行,秋季晴朗少风,寒暖适中但雨量偏少^[8].而定位站所在小龙门地区多年的气象观测资料显示:该区寒冷期长,生长期短,积温小,冻土期长,从温度上讲该区是一个没有夏季,只有春、秋、冬 3 季的地区,冬季长达 230d,通常将 5 月 7 日至 9 月 18 日划分为春秋,9 月 19 日至次年 5 月 6 日划分为冬季.年降雨量在 600 mm 以上,其 70% 以上主要集中在 6、7、8 月份^[9].野外实验样地分别选取森林定位站站区范围内森林郁闭度为 0.7~0.75 的落叶阔叶混交林(样地 1)、辽东栎林(样地 2)、油松林(样地 3)这 3 种群落在暖温带森林生态系统中极具代表性.样地 1 和样地 2 土壤类型是山地棕壤,样地 3 土壤类型是褐土,这些土壤一般都较肥沃,土壤分层不很明显,地面枯枝落叶层较厚,腐殖质发育良好,富含有机质.

1.2 野外实验设计与样品的采集

利用静态箱法^[10]分别对 3 种类型森林群落土壤温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)通量进行观测.采样箱由箱体和箱基座 2 部分构成.根据已有的采样箱的对比研究结果^[11]发现,白色不透光材料可增大箱壁对太阳光的辐射,降低箱内温度升高的速度,减缓箱内温度的变化.箱体的透光性对于地上植物 CO_2 的交换通量也有着直接的影响.因此本研究所使用的箱体材料均是白色不透光 PVC 管和 PVC 板,采样箱结构如图 1.在 3 个样地内分别设置 3 个重复点,采样箱基座内土壤尽量保持原状.自 5 月下旬开始到 10 月中旬,以平均 2 次/月的采样频率进行气

体样品的采集,每次采样时间基本固定在上午 8:30 至 10:00,以此时的通量代表采样日的日均通量^[12],分别在罩箱初时、15 min 和 30 min 时分别用 100 mL 医用注射器连续采集箱内气体 200 mL 注入采样气袋内,运回实验室内进行及时分析.

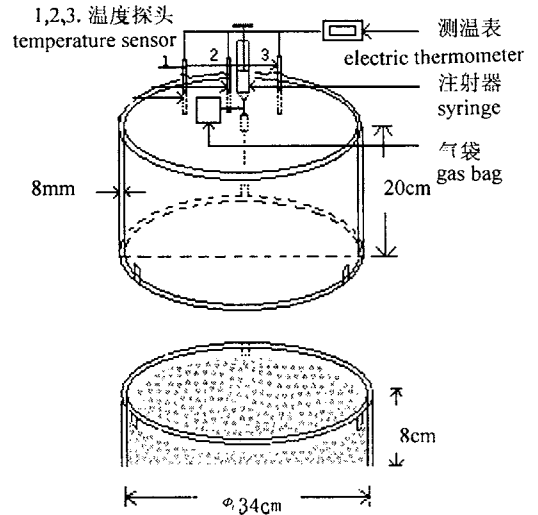


图 1 采样箱结构

Fig.1 The structure of chamber

1.3 样品的分析与通量的计算

N_2O 检测器为 ECD(电子捕获检测器),分离柱内填充料为 80~100 目 Porapak Q,载气为 $\text{Ar}-\text{CH}_4$ ($\text{Ar}90\%$, $\text{CH}_410\%$) 检测器.分离柱和进样口温度分别是 380°C 、 65°C 和 375°C . CO_2 与 CH_4 检测器为 FID(氢焰离子化检测器),载气为高纯氮气,氢气为燃气,空气为助燃气,流速分别为: 25 mL/min , 40 mL/min , 450 mL/min .检测器、分离柱温度分别为 150°C 和 65°C .

在单位面积和单位时间内气体质量的变化即该气体的通量,用公式表示为:

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta c}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量(Flux), ρ 为试验时温度下的气体密度, Δm 和 Δc 分别是 Δt 时间内的采集箱中变化的气体质量和混合比浓度, h 、 A 、 V 分别为箱高、底面积和体积.

气体通量(F)为负值时表示土壤从大气中吸收该气体,正值时表示土壤向大气排放该气体.通量的计算均包括平均值与标准偏差的计算($n=3$).

2 结果与讨论

2.1 暖温带森林土壤 CH_4 通量

图 2 是 3 种不同的暖温带森林土壤 CH_4 吸收

通量在观测期间的变化情况.由于该区的气候特点是生长期短,并且没有明显的夏季,冬季漫长,3种暖温带森林土壤CH₄吸收通量的峰值均出现在生长季,观测期间不同的森林土壤CH₄吸收通量的范围分别是:42~103μg/(m²·h),13~182μg/(m²·h),12~128μg/(m²·h).3种暖温带森林土壤CH₄吸收通量的年排放通量(见表1),不论是纯

阔叶林的(辽东栎纯林),还是阔叶混交林的样地1以及针叶林油松林的样地3都明显的大于寒温带的长白山的森林土壤CH₄吸收通量^[7],而且相互间也不同,样地1与样地2较为接近而样地3的吸收通量相对较大,这主要原因可能是由于不同气候带导致植被类型和土壤类型的差异,从而引起土壤微生物菌群类型和土壤理化特性的区别,最终产生了以

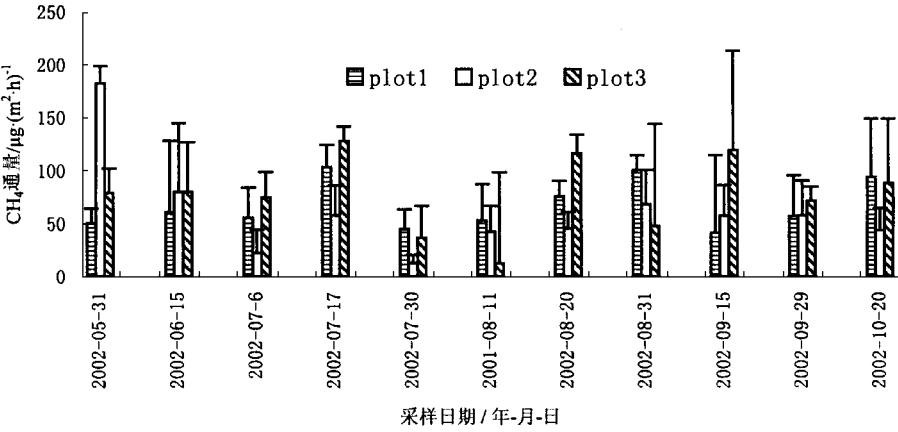


图2 东灵山不同森林土壤CH₄通量

Fig. 2 CH₄ fluxes from different forest soils of Dongling Mountain

表1 不同类型暖温带森林土壤CH₄通量

Table 1 CH₄ flux from different warm temperate forest soils

期	排放量	样地1 plot 1	样地2 plot 2	样地3 plot 3
观测期 observing period	平均通量/μg·(m ² ·h) ⁻¹ mean flux	- 66	- 67	- 79
	年排放量/kg·(hm ² ·a) ⁻¹ annual flux	- 5.70	- 5.81	- 6.82
生长期 growing period	平均通量/μg·(m ² ·h) ⁻¹ mean flux	- 62	- 72	- 79
	年排放量/kg·(hm ² ·a) ⁻¹ annual flux	- 5.34	- 6.20	- 6.85

上这种现象.

2.2 暖温带森林土壤CO₂通量

土壤作为大气CO₂的主要源向大气排放CO₂,根据Houghton等1990年估算的全球土壤CO₂排放量每年是60Pg,而Watson^[7]等1990年估算的大气中CO₂总量约为760Pg,所以每年大气中约10%的CO₂来源于陆地土壤.土壤释放CO₂的主要过程是土壤呼吸作用,它是土壤碳素同化和异化作用平衡的最终结果的反映.Groffman^[8]在热带半干旱森林地发现:土壤呼吸作用在较短的湿季活跃,CO₂通量大,而在干季土壤CO₂通量小,白天高于夜晚.认为土壤微生物呼吸速率的变化主要取决于土壤温度

和湿度对于土壤微生物活性的影响作用,而根系呼吸作用则受控于植物的光合作用.图3是3种不同暖温带森林土壤CO₂排放通量在观测期间的变化情况.由于该区的气候特点年降雨量70%以上主要集中在6、7、8月份,由图可知3种不同暖温带森林土壤CO₂排放通量在6、7、8月份较高,进入冬季后CO₂排放通量将逐渐降低.观测期间的CO₂排放通量较为接近而生长期的CO₂排放通量则以油松林样地最高,影响土壤CO₂产生的因素是多种的,首先,植物的生长状况和其所处的生长阶段直接影响着植物的光合强度和植物的根系呼吸.另外,主要的环境因子如温度和水分对于土壤的呼吸作用的影响亦非常重要.根系呼吸和微生物呼吸都是由温度和水分调控的生物生理活动,在一定的范围内表现为随温度和水分的增加而升高的趋势,在极端的温度和水分条件下抑制了土壤呼吸作用^[9].由于油松林样地海拔高度低于样地1、2,其温度、土壤水分相对较高,另外,油松林棕壤腐殖质相对丰富,微生物种类多样,所以样地3的土壤呼吸作用相对升高.以北京地区森林面积2.67×10⁵hm²^[10]计算,北京地区森林土壤每年将向大气中排放3.40TgCO₂.

由以上原位观测结果可知:北京地区暖温带不同森林土壤作为CH₄的汇所吸收大气中的CH₄与

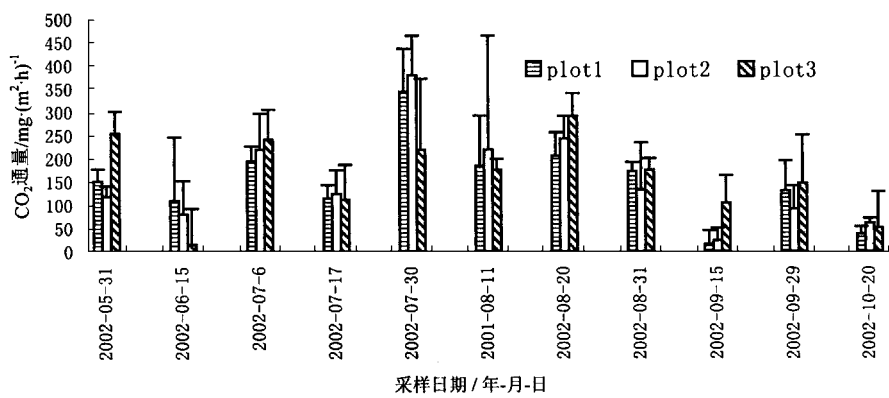


图 3 东灵山不同森林土壤 CO₂ 通量

Fig. 3 CO₂ fluxes from different forest soils of Dongling Mountain

表 2 不同类型暖温带森林土壤 CO₂ 通量

Table 2 CO₂ flux from different warm temperate forest soils

期	排放量	样地 1 plot 1	样地 2 plot 2	样地 3 plot 3
观测期 observing period	平均通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ mean flux	145	146	150
	年排放量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ annual flux	12.56	12.62	12.99
生长期 growing period	平均通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ mean flux	161	163	182
	年排放量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ annual flux	13.93	14.07	15.71

其作为 CO₂ 的源向大气排放 CO₂,为植物冠层光合作用提供反应底物的数量相比相差悬殊,土壤吸收的 CH₄ 量在森林生态系统的碳循环过程中影响甚微.而就我国森林覆盖面积分布的规律来讲,整个温带森林覆盖面积较小,所以温带森林土壤对 CH₄ 的吸收从全球温室气体排放的影响程度考虑,其意义不明显,但从森林生态系统的碳循环过程中营养物质的输送途径来讲,暖温带森林土壤对 CH₄ 的吸收通量仍不失其研究意义.

2.3 暖温带森林土壤 N₂O 通量

暖温带不同类型的森林土壤作为 N₂O 的源向大气排放 N₂O,但观测研究发现:暖温带森林土壤与大气间 N₂O 的交换方式主要是排放,也存在少量的吸收有别于寒温带森林土壤 N₂O 的交换方式^[7] (图 4).3 种不同的森林植被和土壤类型的样地,其 N₂O 的通量范围相差较大,分别是: - 61 ~ 101 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, - 15 ~ 183 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 - 94 ~ 153 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,3 种不同的森林样地土壤 N₂O 的排放通量,大小的排列顺序是:样地 2 > 样地 3 > 样地 1 (表 3).其中样地 1 与样地 2 为同一种土壤类型,同一山坡阴面,紧密相邻,但其排放通量相差近倍,其原因

有待做进一步的研究工作.

表 3 不同类型暖温带森林土壤 N₂O 通量

Table 3 Flux from different warm temperate forest soils

期	排放量	样地 1 plot 1	样地 2 plot 2	样地 3 plot 3
观测期 observing period	平均通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ mean flux	22	45	31
	年排放量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ annual flux	1.86	3.89	2.70
生长期 growing period	平均通量/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ mean flux	30	49	50
	年排放量/ $\text{kg}\cdot(\text{h}\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ annual flux	2.58	4.19	4.30

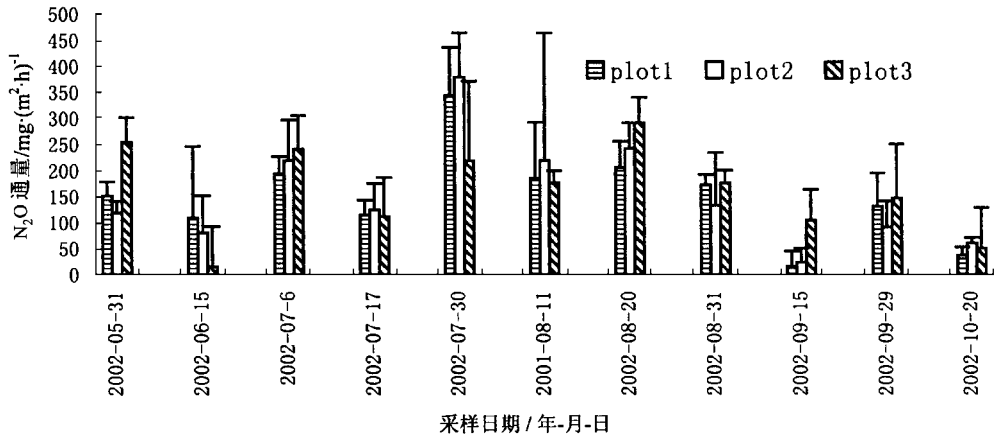
3 结论

(1)北京地区暖温带森林土壤作为 CH₄ 的汇吸收大气中的 CH₄,同时作为 CO₂ 和 N₂O 的源向大气间排放 CO₂ 和 N₂O.

(2)由于我国温带森林覆盖面积较小,所以温带森林土壤对 CH₄ 的吸收从其对全球温室气体排放的影响程度考虑,其意义不明显,但从森林生态系统的碳循环过程中营养物质的输送途径来讲,暖温带森林土壤对 CH₄ 的吸收通量仍不失其研究意义.而土壤 CO₂ 排放不仅在陆地生态系统的碳循环过程有重要意义,同时对于全球温室效应的影响也有着重要的意义.

(3)暖温带森林土壤与大气间存在 2 种 N₂O 的交换方式,不仅向大气排放而且也吸收大气中的 N₂O,最终暖温带森林土壤仍不失为大气中 N₂O 的源.产生 2 种交换方式的原因目前尚未清楚.

(4)不同类型的暖温带森林土壤,观测期间其 3 种温室气体的排放通量的大小排列顺序也不相同.3

图4 东灵山不同森林土壤 N₂O 通量Fig. 4 N₂O fluxes from different forest soils of Dongling Mountain

种森林样地土壤 CH₄ 和 CO₂ 的交换通量相差不显著,而 N₂O 的排放通量差别明显,尤其作为相邻的样地 1 和样地 2 N₂O 的排放通量差别近 1 倍,产生这种现象的原因与机制有待于进一步的研究,这对于寻找合适的减排措施有着重要的意义。

参考文献:

- [1] Baldocchi D D. Measuring and modeling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1997, **20**: 1108 ~ 1122.
- [2] Fan S C, Wofsy S C, Bakwin P S, Jacob D J. Atmosphere-biosphere exchanges of CO₂ and O₃ in the Central Amazon forest [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**: 16851 ~ 16864.
- [3] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability [J]. *Science*, 1996, **271**: 1576 ~ 1579.
- [4] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Weir P L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 1994, **75**: 134 ~ 150.
- [5] Gash J H C, Nobre C A, Roberts J M, Victoria R L. Amazonian Deforestation and Climate [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 611.
- [6] Chauvel A, Grimaldi M, Tessier D. Changes in soil porespace distribution following deforestation and revegetation: an example from the central Amazon basin, Brazil [J]. *Forest Ecology and management*, 1991, **38**: 259 ~ 271.
- [7] 徐慧,陈冠雄,马成新.长白山北坡不同土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的初步研究 [J]. *应用生态学报*, 1995, **6**(4): 373 ~ 377.
- [8] 马克平,于顺利,高贤明.东灵山地区的植物区系分析.暖温带森林生态系统结构与功能的研究 [M].北京:科学出版社, 1997. 38 ~ 55.
- [9] 茅世森,宋凤山.小龙门地区的气候特征.暖温带森林生态系统结构与功能的研究 [M].北京:科学出版社, 1997. 28 ~ 37.
- [10] 杜睿,王庚辰,吕达仁,刘广仁,等.内蒙古羊草草原温室气体交换通量的日变化特征研究 [J]. *草地学报*, 1998, **6**(4): 258 ~ 264.
- [11] Du Rui, Wang Gengchen, Lu Daren, Kong Qinxin, Liu Guangren, Wan Xiaowei. A Study on Chamber Method of *in-Situ* Measurements of Greenhouse Gases Fluxes in Grassland [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2000, **24**(4): 396 ~ 406.
- [12] Mosier A R. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands [J]. *Nature*, 1991, **350**: 330 ~ 332.
- [13] Watson R T, Rodhe H, Oeschger H, Siegenthaler U. Greenhouse Gases and aerosols. in: Houghton J T, *et al.* Climate Change: The IPCC Scientific Assessment [C]. New York: Cambridge University Press, 1990. 1 ~ 40.
- [14] Groffman P M, Eagan P, Sullivan W M, Lemunyon J L. Grass species and soil type effects on microbial biomass and activity [J]. *Plant Soil*, 1996, **183**(1): 61 ~ 67.
- [15] Oomes M J M, Kuikman P J, Jacobs F H H. Nitrogen availability and uptake by grasslands in mesocosms at two water levels and two water qualities [J]. *Plant Soil*, 1997, **192**(2): 249 ~ 259.
- [16] 中国林业部.全国第四次森林资源统计(1989 ~ 1993) [M].北京:中国林业出版社, 1994. 191.