

华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH₄ 和 N₂O 通量研究

刘 惠^{1,2}, 赵 平^{1*}, 林永标¹, 饶兴权¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 广东商学院旅游与环境学院, 广州 510320)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法对华南丘陵区马尾松林和果园地表 CH₄ 和 N₂O 通量及其主要影响因子进行了观测 (马尾松 *Pinus massoniana* 林为期 16 个月, 果园 15 个月), 比较和分析了不同土地利用方式下地表 CH₄ 和 N₂O 通量的季节变化, 地表 CH₄ 和 N₂O 通量与温度和土壤含水量的关系以及凋落物对地表 CH₄ 和 N₂O 通量的影响。结果表明, 在有凋落物覆盖下, 马尾松林和果园年均地表 CH₄ 通量分别为 -3.41 ± 0.3 和 -3.24 ± 0.44 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹; 年均地表 N₂O 通量分别为 4.57 ± 0.50 和 11.99 ± 0.67 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹; 去除凋落物情况下, 马尾松林和果园年均地表 CH₄ 通量分别为 -2.98 ± 0.44 和 -1.93 ± 0.53 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹; 年均地表 N₂O 通量分别为 3.12 ± 0.28 和 9.42 ± 0.56 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹。2 种土地利用方式对地表 CH₄ 影响较小, 对 N₂O 通量的影响较大, 果园地表 N₂O 通量显著大于马尾松林 ($P < 0.01$)。马尾松林和果园土壤对 CH₄ 的吸收在旱季(10~3 月)高而雨季(4~9 月)低, N₂O 排放雨季较高而旱季较低。土壤含水量对地表 CH₄ 和 N₂O 通量的影响比温度要大。凋落物对地表 CH₄ 通量的影响较小, 对 N₂O 通量的影响较大, 凋落物对马尾松林和果园 N₂O 排放的贡献率分别为 31.71% 和 21.40%。研究还表明, 地表 N₂O 通量存在明显的降雨驱动效应。

关键词: CH₄; N₂O; 通量; 果园; 马尾松林

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2008)04-0304-11

CH₄ and N₂O Fluxes from Soil Surface of 2 Land Use in a Hilly Area of South China

LIU Hui^{1,2}, ZHAO Ping^{1*}, LIN Yong-biao¹, RAO Xing-quan¹

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. School of Tourism and Environment, Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320, China)

Abstract: The CH₄ and N₂O fluxes from soil surface of different land use in a hilly area of South China were examined from 2004-03-30 to 2005-07-27. CH₄ and N₂O fluxes were measured with closed static chamber and a modified gas chromatograph (HP5890 II) *in situ* in two different land-use types: plantation mainly composed of *Pinus massoniana* and orchard of *Dimocarpus longan*, respectively. There were two sets of plots at both sites respectively: ones were covered with litters on the surface soil and the others without litters. The annual average CH₄ fluxes from plot with litters were -3.41 ± 0.3 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹ in the pine plantation and -3.24 ± 0.44 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹ in the orchard; annual average N₂O fluxes were 4.57 ± 0.50 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹ and 11.99 ± 0.67 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹, respectively. The annual average CH₄ fluxes from plot without litters were -2.98 ± 0.44 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹ in the pine plantation and -1.93 ± 0.53 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹ in the orchard; annual average N₂O

收稿日期: 2007-08-09 接受日期: 2007-11-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX-SW-01-01B-05, KSCX2-SW-133); 国家杰出青年科学基金项目(B类)(30428022)资助

* 通讯作者 Corresponding author

fluxes were $3.12 \pm 0.28 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ and $9.42 \pm 0.56 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2}\text{a}^{-1}$, respectively. N₂O fluxes from soil surface were closely related to the types of land use. They were significantly higher from orchard than those from pine plantation ($P < 0.01$). CH₄ absorptions were higher in dry season (October ~ March) and lower in rainy season (April ~ September). N₂O fluxes were higher in rainy season and lower in dry season. The results indicated that CH₄ and N₂O fluxes from soil surface were affected by soil water content more than temperature. CH₄ absorptions were affected little by litter removal. The litter decomposition accounted for 31.71% and 21.40% of the total N₂O emissions from the pine plantation and from orchard soil surface, respectively. The result also indicated that there was a dominant driving effect of precipitation on the N₂O flux from soil surface in rainy season.

Key words: CH₄; N₂O; Flux; Orchard; Pine plantation

CH₄和N₂O是仅次于CO₂的重要温室气体,每分子CH₄和N₂O的全球增温潜势分别为CO₂的21倍和296倍(以100 a为参照),因其自工业化以来在大气中的浓度迅速增加而倍受关注^[1]。大气CH₄浓度的增长是由于人类活动增加了CH₄源的同时也减弱了其土壤汇的缘故^[2]。土壤作为CH₄的汇每年大约从大气中吸收30 Tg CH₄,占总汇的5.2%^[3]。不同的植被覆盖与土地利用方式对土壤CH₄吸收有很大影响,耕地、草地和森林土壤的平均CH₄吸收率分别为0.28、0.52和1.51 mg m⁻² d⁻¹^[4]。在全球不同的地区和生态系统土地利用变化,特别是森林或草原向农业用地的转化使土壤CH₄汇减少60%左右^[5]。N₂O的主要源是土壤释放,据估计,大气中每年N₂O净释放量有80%~90%来源于土壤和土地利用方式的改变等过程^[6]。而热带和温带森林土壤可能是N₂O最重要的源,热带和温带森林土壤排放的N₂O(4 Tg N₂O-N a⁻¹)约占全球N₂O排放总量(16.4 Tg N₂O-N a⁻¹)的24.4%^[1]。涉及控制N₂O产生的机制在实验室研究中已经被充分确定和描述,但在生态系统水平上的控制参数和过程之间的相互作用还不清楚,由于季节变化、年际变化和空间变异而对全球森林土壤N₂O源强度的估计有很大的不确定性,因此,由于缺乏精度而对N₂O释放的预测带来困难^[7]。

我国对CH₄和N₂O的研究主要集中在农田^[8-10]、湿地^[11]和草地^[12],对森林也有研究但较少^[13],尤其对亚热带森林和果园CH₄和N₂O的研究较少。本研究在中国科学院鹤山丘陵综合实验站内,选取在华南丘陵区分布广泛,具代表性人工林(广东针叶林约占67.3%,阔叶林占32.7%^[14])和

果园(龙眼)为样地,采用静态箱-气相色谱法在原位对CH₄和N₂O的通量和主要环境因子进行了观测。旨在探明华南丘陵区不同土地利用方式土壤CH₄和N₂O源汇功能及其变化规律,了解环境因子对CH₄和N₂O通量的影响。该项研究对正确估算CH₄和N₂O的源、汇状况以及不同土地利用方式CH₄和N₂O的排放总量,评估不同土地利用方式对全球气候变化的贡献十分必要,同时也是拟订温室气体减排措施的重要依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地概况

中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站位于广东省中部的鹤山市,东经112°54',北纬22°41',距广州市以南80 km。试验站所在地属南亚热带粤中丘陵地区,土壤为赤红壤(砖红壤性红壤),属南亚热带季风常绿阔叶林气候。年均温为21.7℃,7月均温28.7℃,极端最高温37.5℃,1月均温13.1℃,极端最低温0℃。年平均太阳辐射为435.1 kJ cm⁻²。年平均≥10℃的有效积温为7 597.2℃。年均降雨量1 700 mm。4~9月为雨季。年蒸发量1 600 mm。鹤山站的针叶林(*Pinus elliottii*, *Pinus massoniana*)于1983年种植,坡向西北,坡度25°,林分高7.2 m,株行距3 m×2.5 m,郁闭度70%,叶面积指数2.5,有3~5 cm厚的半腐解枯落物层。林分的林下植物主要有九节(*Psychotria rubra*)、鬼灯笼(*Clerodendrum fortunatum*)、木姜子(*Litsea cubeba*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等^[15];果园(Orchard)于1991年种植,果树为龙眼(*Dimocarpus longan*)。土壤特性见表1。

表 1 马尾松林和果园的土壤特性

Table 1 Soil characteristics of pine plantation and orchard in Heshan

	马尾松林 Pine plantation	果园 Orchard
土壤结构 Soil texture ^[16]	砂质粘壤土 Sandy clay loam	砂质粘壤土 Sandy clay loam
土壤有机碳 Soil organic C (g C _{org} kg ⁻¹ dry soil) ^[17]	11.89	13.40
土壤微生物碳 Soil microbe C (mg C _{mic} (100 g) ⁻¹ dry soil) ^[17]	29.68	47.79
土壤容重 Bulk density (g cm ⁻³) ^[16]	1.11	0.99
全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹) ^[16]	1.19	1.49
C : N ^[16]	-	10
最大持水量 Maximum water capacity (cm ³ H ₂ Ocm ⁻³ soil × 100) ^[16]	-	38.6

1.2 研究方法

研究方法参见文献^[18]。马尾松林和果园各有土壤+凋落物(S+L)和土壤(清除凋落物)(S)两种处理配对设置。每周及时清除观测表面新生长的植物,随机设置4个重复,同时注意保持箱内土壤、凋落物及环境对周围林下土壤+凋落物状况的代表性。由于温室气体排放具有明显的昼夜变化规律,时间变异性很大,因此每个采样日的采样时间的选择十分重要^[19]。目前一般选择9:00到12:00作为当日采样时间^[19],并假定此测定值能代表当日交换通量。本实验采样时间选择在上午9:00到11:00,每周测定两次,间隔2~3 d,马尾松林为期16个月,从2004-03-30至2005-07-12,果园为期15个月,从2004-05-05至2005-07-27。

采样箱参照国际标准,采用组合式不锈钢采样箱。采样箱由底座、顶箱两部分组成,均为不锈钢板制成。底座:长×宽×高×钢板厚度=500 mm×500 mm×500 mm×2.5 mm;水封曹:宽×高×钢板厚度=20 mm×30 mm×2.5 mm;顶箱:长×宽×高×钢板厚度=500 mm×500 mm×500 mm×1.5 mm,封顶,内装2个轴流混气扇、采样管和测温口。采样时箱体外包一层优质棉保温被,目的在于防止在太阳辐射下采样箱壁温度升高,影响观测结果。观测时将采样箱放入已插入土壤5 cm深处的不锈钢底座外缘四周的凹槽中(内径2 cm),并用蒸馏水密封,采气时盖住箱盖,箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计和采气三通阀。采样时间分别为关箱后的0、10、20、30 min,每次抽样100 ml将气体样品带回实验室,24 h内用改装后的HP5890II型气相色谱仪分析气样中CH₄和N₂O浓度。CH₄检测器为FID(氢焰离子化检测器),载气为氮气,流速是

30 ml min⁻¹,氢气为燃气,流速为30 ml min⁻¹,空气为助燃气,流速为400 ml min⁻¹。检测器温度为200℃,分离柱温度为55℃。N₂O检测器为ECD(电子捕获检测器),分离柱内填充料为80~100目PorpakQ,载气为氮气,流量为30 ml min⁻¹,检测器温度为330℃,分离柱温度为55℃。气体排放速率由4个气样浓度值经线性回归分析得出^[18]。

气体排放通量即单位时间内单位面积土壤表面气体质量的变化,用如下公式计算: $F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} =$

$\frac{\rho \cdot V \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$ 。式中, F 为气体通量(mg m² h⁻¹), 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)为负值时表示被观测系统从大气中吸收该气体,正值时表示被观测系统向大气排放该气体^[18]。

在每次采样同时,对于各箱的气温、地表温度、地下5 cm土壤温度用JM624型便携式数字温度计(天津立文电子有限公司生产)测量,温度计的测量范围:-30~+50℃,测量准确度为0.5℃,读数分辨率为0.1℃。土壤含水量用中国生态系统网络统一配置的TDR土壤墒情仪(MPKit,江苏瑞迪生物科技有限公司生产)测定,在每一采样点周围选取5个点测量土壤含水量,取其平均值代表采样点内的土壤含水量。

1.3 统计分析方法

作图主要使用Excel,数据分析和统计检验则应用SPSS for Windows, Version 10.0(Chicago, IL, USA)。

2 结果和分析

2.1 地表CH₄和N₂O年排放通量

表2和表3为马尾松林和果园土壤表面(有凋落物覆盖和去除凋落物)CH₄和N₂O通量统计值。表2显示土壤中CH₄排放通量为负值,说明马尾松林和果园土壤对CH₄有一定的吸收作用。马尾松林CH₄的变化范围为-0.180~0.076 mg m⁻² h⁻¹;果园CH₄的变化范围为-0.174~0.147 mg m⁻² h⁻¹。CH₄是在严格厌氧条件下由产甲烷菌作用于产CH₄前体的结果。CH₄大量产生时环境的氧化还原电位(Eh)一般要求低于-150 mV^[20],而通常土壤淹

水后能够达到这种还原环境。而马尾松林和果园土壤,一年四季中除降雨后没有这种绝对无氧的条件,因此除降雨后一般没有CH₄的产生过程。相反,好气的土壤条件有利于CH₄氧化菌的活动,因此土壤对CH₄有一定的吸收作用。根据测定期内CH₄通量平均值换算得出马尾松林和果园含凋落物土壤年均CH₄通量分别为-3.41±0.3和-3.24±0.44 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹;不含凋落物年均土壤CH₄通量分别为-2.98±0.44和-1.93±0.53 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹。经*t*检验,无论有无凋落物覆盖,果园CH₄平均通量与马尾松林差异不显著(*P*>0.05)。

表2 不同土地利用方式下地表CH₄的年均通量

Table 2 Annual average CH₄ flux from soil surface in different land use

处理 Treatment	甲烷通量 CH ₄ flux (mg m ⁻² h ⁻¹)				
	样本数 Sampling	平均值 Mean	标准差 SD	标准误 SE	变化范围 Variation range
马尾松林 Pine plantation (S+L)	96	-0.039	0.044	0.004	-0.142~0.076
马尾松林 Pine plantation (S)	96	-0.034	0.046	0.005	-0.180~0.069
果园 Orchard (S+L)	100	-0.037	0.052	0.005	-0.174~0.144
果园 Orchard (S)	100	-0.022	0.057	0.006	-0.166~0.147

S+L:土壤+凋落物 Soil + Litter; S:土壤(清除凋落物) Soil without litter

表3显示土壤中N₂O气体的排放通量为正值,说明马尾松林和果园土壤是大气N₂O的源。马尾松林N₂O的变化范围为-0.059~0.616 mg m⁻² h⁻¹;果园N₂O的变化范围为0.020~0.734 mg m⁻² h⁻¹。根据观测期内N₂O通量平均值换算得出马尾松林和果园含凋落物年均土壤N₂O通量分别为4.57±

0.50和11.99±0.67 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹;不含凋落物年均土壤N₂O通量分别为3.12±0.28和9.42±0.56 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹。无论有无凋落物覆盖,果园土壤N₂O通量都较马尾松林大。经*t*检验,果园N₂O平均通量与马尾松林差异显著(*P*<0.01)。

表3 不同土地利用方式下地表N₂O的年均通量

Table 3 Annual average N₂O flux from soil surface in different land use

处理 Treatment	氧化亚氮通量 N ₂ O flux (mg m ⁻² h ⁻¹)				
	样本数 Sampling	平均值 Mean	标准差 SD	标准误 SE	变化范围 Variation range
马尾松林 Pine plantation (S+L)	106	0.082	0.088	0.009	-0.017~0.616
马尾松林 Pine plantation (S)	106	0.056	0.056	0.005	-0.059~0.370
果园 Orchard (S+L)	110	0.215	0.130	0.012	0.032~0.734
果园 Orchard (S)	110	0.169	0.107	0.010	0.020~0.509

S+L:土壤+凋落物 Soil + Litter; S:土壤(清除凋落物) Soil without litter

2.2 地表CH₄和N₂O通量的季节变化

地表CH₄和N₂O通量的季节变化趋势与温度

和土壤含水量并不一致(图1、图2和图3)。马尾松林和果园地表CH₄通量季节变化波动强烈,规律不

明显(图 2)。从 2004-04 至 2005-03, 马尾松林和果园在有凋落物覆盖下土壤旱季(10~3 月)吸收量明显高于雨季(4~9 月)(t 检验, $P < 0.01$)。土壤 CH_4 吸收率与土壤湿度通常呈负相关关系, 土壤湿度过高, 大气 CH_4 和 O_2 向土壤中扩散受阻; 或土壤湿度过低引起水分胁迫均导致甲烷氧化菌活性下降^[2]。鹤山丘陵区受季风影响, 降水量的季节分配

极不平均, 雨季降雨频繁, 土壤含水量较高, 大雨过后某些低洼处甚至短期内处于渍水状态。根据鹤山站气象站资料, 湿季(4~9 月)降水量占全年的 80.31% (2004-04~2005-03)(图 4)。而旱季土壤则相对较干旱, 给土壤中的甲烷氧化细菌提供了有利的条件, 因而有利于 CH_4 的吸收。

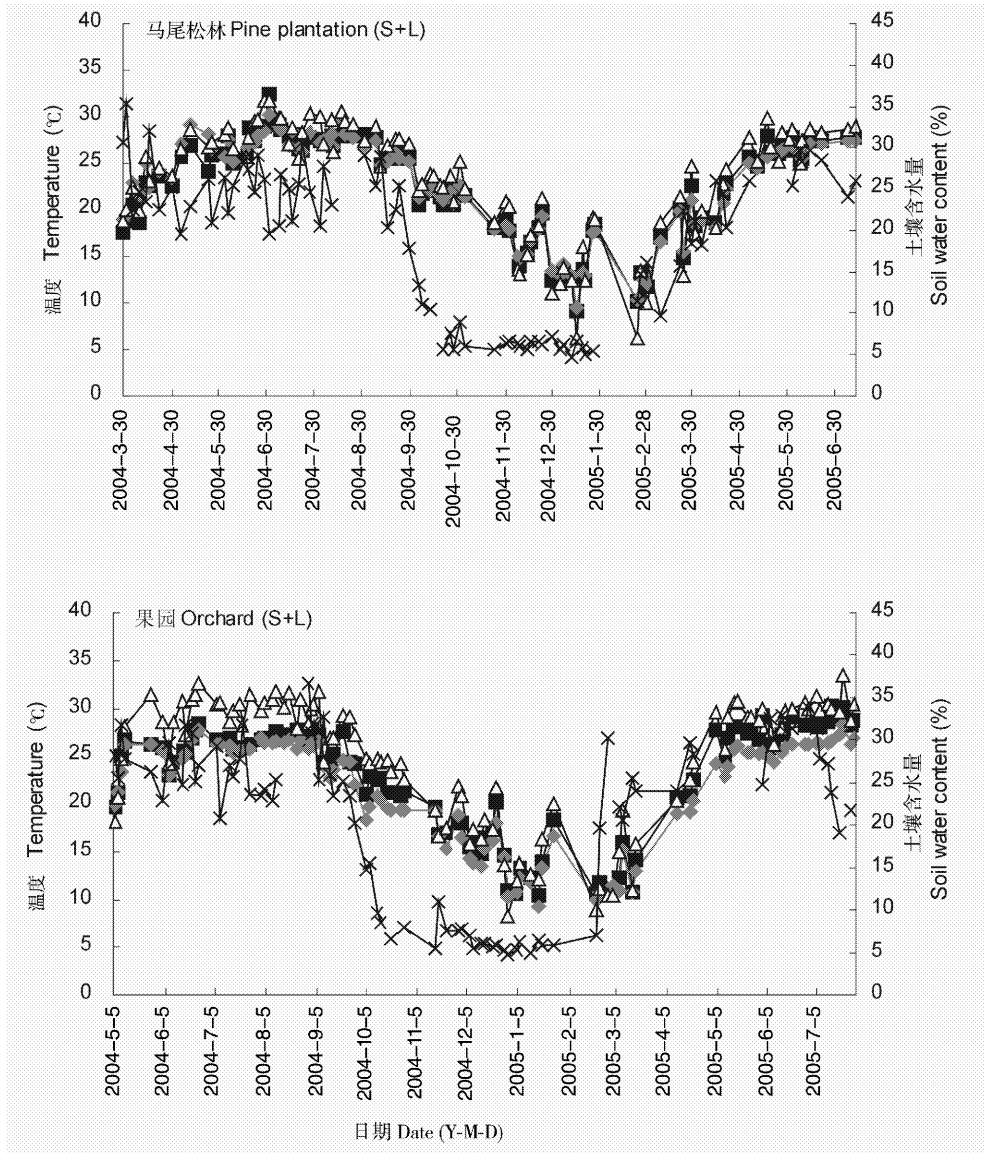


图 1 马尾松林和果园地下 5 cm 土壤温度、地表温度、气温和土壤含水量的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of soil temperature at a depth of 5 cm, soil surface temperature, air temperature and soil water content in the pine plantation and in the orchard

◆: 地下 5 cm 土壤温度 Soil temperature at a depth of 5 cm; ■: 地表温度 Soil surface temperature;
 △: 气温 Air temperature; ×: 土壤含水量 Soil water content; S+L: 土壤+凋落物 Soil+Litter.

马尾松林和果园 N₂O 排放通量季节变化趋势较 CH₄ 明显(图 3)。总体来看地表 N₂O 通量雨季大于旱季,这是因为经常性的降雨,同时较高的温度促进了凋落物的分解,消耗了氧气,使得土壤中形成适合反硝化细菌的厌氧微区。而旱季降雨少,且气温较低,不利于微生物的活动,硝化和反硝化作用都下降。在适合 N₂O 还原的条件下,土壤也能去除 N₂O,但由于土壤本身的复杂性和利用方式的多样性,至今土壤作为大气 N₂O 汇的作用尚未被

肯定^[21]。本研究在测定过程中 N₂O 出现了负的排放量。森林土壤是 N₂O 重要源,但土壤对 N₂O 的净吸收也有报道。地中海森林土壤在长时期内是大气 N₂O 的弱而很重要的汇, San Rossore 松林对 N₂O 吸收的年平均吸收量约为 0.5 kg N₂O-N hm⁻² a⁻¹[22]。Rosenkranz¹ 猜测地中海松林中 N₂O 的吸收主要与在通风良好而含氮量低土壤中异养硝化菌的需氧脱氮作用有关^[22]。

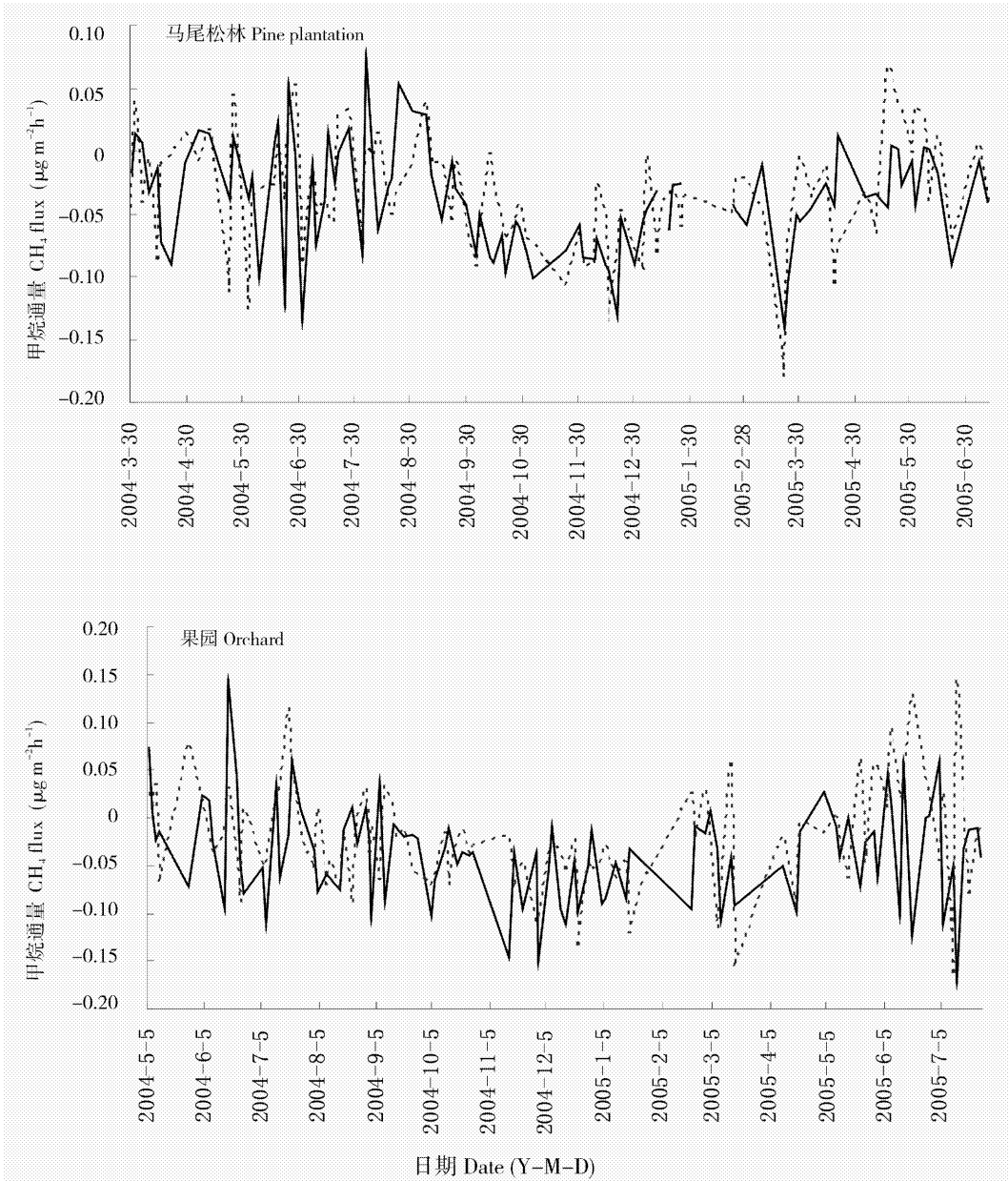


图 2 马尾松林和果园地表 CH₄ 通量季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CH₄ flux in the pine plantation and orchard

——有凋落物覆盖 Plot with litter; ·····无凋落物覆盖 Plot without litter

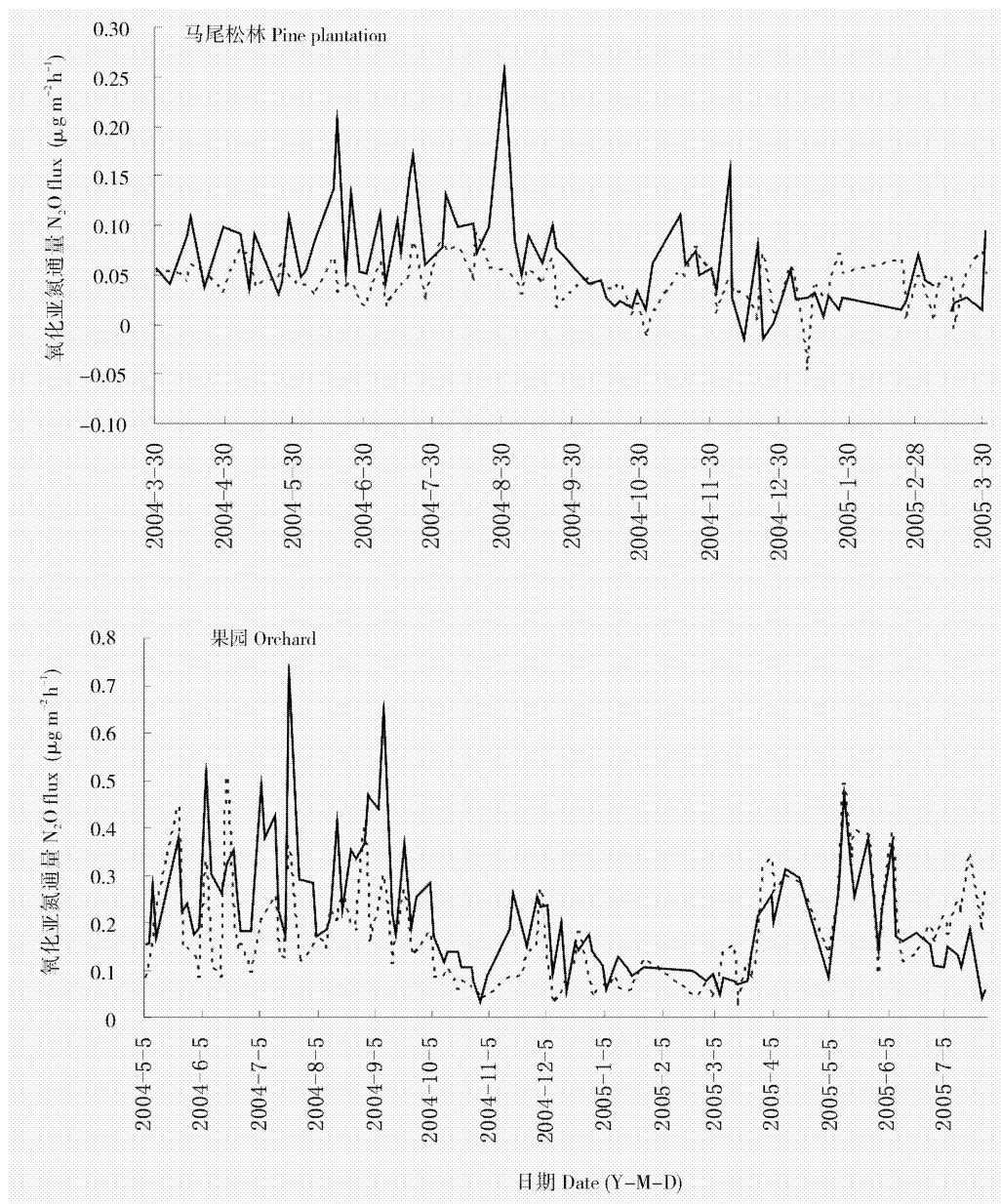


图3 马尾松林和果园地表 N_2O 通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of N_2O flux under two treatments in the pine plantation and in the orchard

——有凋落物覆盖 Plot with litter; -----无凋落物覆盖 Plot without litter

2.3 环境因子对地表 CH_4 和 N_2O 通量的影响

相关分析表明,马尾松林地表 CH_4 通量与地下5 cm 土壤温度、地表温度、气温和土壤含水量有明显相关关系,其相关系数比果园要大(表4)。而果园地表 N_2O 通量与地下5 cm 土壤温度、地表温度、

气温和土壤含水量都呈显著相关关系,其相关系数比马尾松林要大(表4)。从表4还可看出, CH_4 和 N_2O 通量受土壤含水量的影响程度大过温度的影响。

表4 不同土地利用方式下地表CH₄和N₂O通量与地下5cm土壤含水量、地下5cm土壤温度、地表温度和气温的相关系数Table 4 Correlation coefficient between soil water content at a depth of 5 cm, soil temperature at a depth of 5 cm, soil surface temperature, air temperature and CH₄ and N₂O fluxes from soil surface in different land use

气体 Gas	土地利用方式 Land use type	土壤含水量 Soil water content		土壤温度 Soil temperature	地表温度 Soil surface temperature	气温 Air temperature	
		r	n	r	r	r	n
CH ₄	马尾松林 Pine plantation (S+L)	0.493**	82	0.391**	0.366**	0.342**	94
	马尾松林 Pine plantation (S)	0.438**	82	0.350**	0.354**	0.340**	96
	果园 Orchard (S+L)	0.366**	83	0.246*	0.212*	0.186	100
	果园 Orchard (S)	0.396**	83	0.188	0.175	0.140	100
N ₂ O	马尾松林 Pine plantation (S+L)	0.647**	89	0.491**	0.554**	0.465**	105
	马尾松林 Pine plantation (S)	0.328**	89	0.170	0.188	0.197*	106
	果园 Orchard (S+L)	0.483**	96	0.442**	0.380**	0.443**	110
	果园 Orchard (S)	0.632**	95	0.587**	0.602**	0.551**	110

S+L:土壤+凋落物 Soil + Litter; S:土壤(清除凋落物) Soil without litter; **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; CH₄: Pearson correlation; N₂O: Spearman's rho.

雨季地表N₂O通量之所以总体上高于旱季,与雨季出现的若干N₂O通量峰值有关。据测定日期和降雨量分析(图3和图4),雨季每一次降雨过后,马尾松林和果园N₂O通量通常都会出现一个峰值,呈现出明显的驱动-响应关系,这与周存宇等^[23]在鼎湖山季风林的观测结果一致。降雨是影响鹤山马尾松林和果园地表N₂O通量的重要因素

之一。

经 t 检验,在测定期内马尾松林和果园有凋落物覆盖土壤对CH₄吸收与去除凋落物土壤无显著差异($P > 0.05$);而马尾松林和果园有凋落物覆盖土壤N₂O通量明显大于去除凋落物土壤($P < 0.01$)。马尾松林和果园凋落物对全年N₂O排放的平均贡献率分别为31.71%和21.40%。

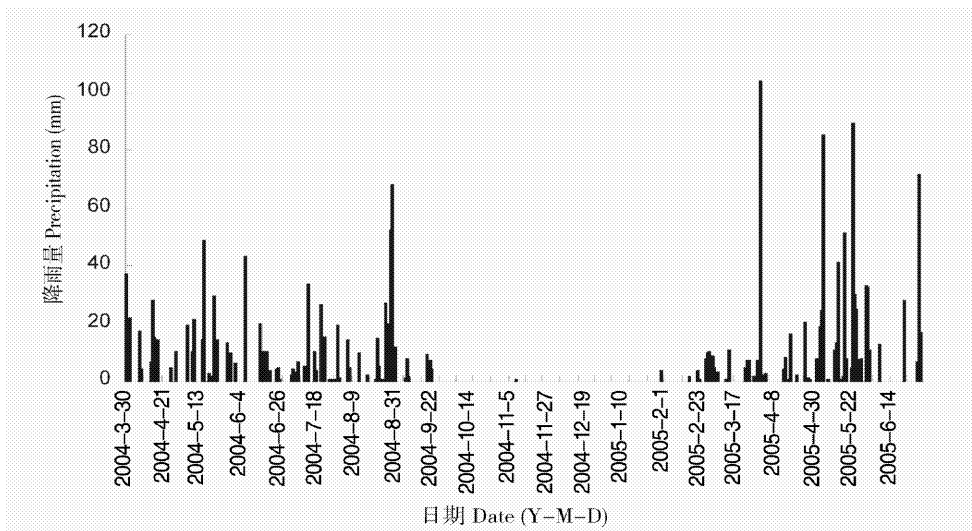


图4 2004-03-30至2005-06-31降雨量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of precipitation from 2004-03-30 to 2005-06-31

3 讨论

世界不同森林CH₄通量变异性很大。在北方地带CH₄通量较低,为0.2~6.4 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹^[5]。

热带和亚热带CH₄通量范围一般为0.4~12.8 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹^[5,24]。本研究中CH₄平均通量(1.93~3.41 kg CH₄ hm⁻² a⁻¹)在热带亚热带CH₄通量范围之内。土壤孔隙状况影响气体在土壤中的运

输,土壤孔性的两个决定性参数气体扩散率和空气透过率,通过影响气体在土壤中的运输而对 CH_4 氧化起作用^[19]。马尾松林和果园土壤容重的差异小(表 1),因此两者土壤气体扩散率差异小,这可能是马尾松林和果园的 CH_4 通量没有明显差异的原因。

Borken 和 Beese^[7]的研究表明德国 Solling 相邻的山毛榉林(*Fagus sylvatica*)、云杉林(*Picea abies*)和山毛榉-云杉混交林土壤平均 N_2O 释放相当小, $0.50 \sim 1.39 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间。长白山阔叶红松林土壤 N_2O 平均通量是 $3.83 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[25]。澳大利亚昆士兰东北部 3 个不同地点热带雨林年释放量分别为 $4.36 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $7.45 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $6.89 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[26]。从以上数据可以看出,地处南亚热带的鹤山马尾松林 N_2O 通量一般比温带地区要高,而比热带地区要低。这是由于亚热带区降雨量和温度比温带区高而低于热带区。而 N_2O 是硝化作用副产物和反硝化作用的中间产物,产物受底物的可利用性和氧气分压的控制,这个过程的速率通常又受温度控制^[27]。土壤含水量影响土壤的通气状况和氧化还原状况,并且通过影响 NH_4^+ 和 NO_3^- 在土壤中的分布及其对微生物的有效性,来影响土壤中硝化作用和反硝化作用,从而影响土壤 N_2O 的排放。

不同土地利用方式对 CH_4 和 N_2O 通量有很大的影响。Chao 等^[28]对不同土地利用方式下 N_2O 通量的研究表明台湾旱田、稻田、果园和阔叶林土壤 N_2O 年平均释放量为 $11.3 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.6 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $4.5 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $3.4 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。鹤山稻田 CH_4 和 N_2O 的释放量分别为 $49.1 \text{ kg CH}_4 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $3.15 \text{ kg N}_2\text{O-N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[8-10]。稻田释放 CH_4 的源,而果园和马尾松林是 CH_4 的汇,但稻田 N_2O 通量比果园和马尾松林要小。土壤-大气之间的 N_2O 交换受化学、物理和生物因素的综合作用的影响,包括气候带、植被、土壤特性和生态系统的动物区系特征^[27]。农田生态系统 CH_4 和 N_2O 释放量大于或小于森林生态系统是由于不同的土地管理方式如施肥灌溉等措施不同和植被的不同等因素而造成的,其中水分是影响稻田排放 CH_4 和 N_2O 的关键因素。果园 N_2O 通量高于马尾松林可能由于以前果园施肥较多(在测定期内没有施肥),土壤有机质含量较高,导致土壤微生物数量增多(表 1)。

Borken 和 Beese^[7]的研究还表明 CH_4 氧化表现出明显的季节变化,生长季节高而休眠季节低,森林类型和季节对 CH_4 吸收都有显著影响,生长季 CH_4 吸收的增加是因为土壤含水量下降和部分由于土壤温度的升高。热带森林和大草原土壤对 CH_4 的吸收在旱季最大,在雨季则很低^[29],本研究结果与前人一致。马尾松林和果园 N_2O 通量都是雨季大于旱季,这是因为雨季温度较高,经常性的降雨使得土壤容易形成厌氧微区,有利于反硝化细菌的代谢活动。周俊岸等^[15]同期对鹤山不同林型土壤不同层次 N_2O 浓度的测定结果表明雨季浓度高于旱季,土层中高的 N_2O 浓度导致高的地表释放。

目前,有关土壤温度对土壤氧化 CH_4 的影响的研究报道不一。一种观点认为,温度对土壤氧化 CH_4 影响很大,因为绝大多数 CH_4 氧化细菌都是中温型微生物,因而土壤氧化 CH_4 的能力与温度密切相关,过高或过低的温度条件都会抑制 CH_4 氧化^[30]。另一种观点认为,温度对土壤氧化 CH_4 的影响很小^[31]。而 Sitaula 等^[32]发现在挪威森林平均温度低于 1°C 的土壤中仍有大量的 CH_4 氧化菌存在。森林土壤中的 CH_4 氧化菌在 $-5 \sim 10^\circ\text{C}$ 时受温度变化影响,在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时则不随温度改变而变化。森林土壤 CH_4 氧化率与 $0 \sim 10^\circ\text{C}$ 地温成正比^[33], $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时各种土壤平均 CH_4 吸收率为常数^[34]。温度 $< 10^\circ\text{C}$ 时,温度对 CH_4 氧化速率的影响大于水分;温度 $> 1^\circ\text{C}$,水分则成为重要影响因子,温度的影响相对较弱^[35]。而鹤山处于南亚热带,温度较高,在测定期内年平均温度都在 20°C 以上,最低地下 5 cm 土壤温度和地温都在 7°C 以上(图 1),因此水分对土壤 CH_4 氧化的影响比温度要大(表 4)。

鹤山马尾松林地表 N_2O 通量与温度和土壤水分呈显著正相关,土壤水分对 N_2O 通量的影响比温度要大(表 4)。 N_2O 是硝化作用副产物和反硝化作用的中间产物。产物受底物的可利用性和氧气分压的控制,这个过程的速率通常又受温度和土壤湿度的控制^[27,36]。雨季地表 N_2O 通量总体上高于旱季,与雨季出现的若干 N_2O 通量峰值有关。在雨季每一次降雨过后,马尾松林和果园林地表 N_2O 释放显著增加,呈现出明显降雨驱动效应。这与周存宇等^[37]在南亚热带鼎湖山季风林和混交林观测到的结果一致,但其在松林没有观测的明显的驱动效应。Butterbach-Bahl 等^[38]研究结果显示热带雨

林土壤降雨后 N₂O 释放显著增加, 大约为 2~3 倍, N₂O 释放主要受降雨和土壤湿度的影响。以上结果说明在热带亚热带降雨对土壤 N₂O 释放通量的驱动效应有一定的普遍性。产生这种效应, 一方面是因为降雨在增加了土壤水分的同时减少了土壤含氧量, 造成适合反硝化细菌的土壤环境; 另一方面是该地区的降雨中有较高的有效态氮含量^[39], 为硝化反硝化细菌提供了反应底物。

Price 等研究表明去掉有机层后 CH₄ 吸收增加了 33%^[31], 而鹤山马尾松林和果园去除凋落物后土壤对 CH₄ 的吸收减小。Borken 和 Beese^[7] 认为有机层能增加或减少 CH₄ 的吸收, 这取决于降雨的频度和强度以及通过蒸散而丢失的水分。在对德国森林土壤吸收 CH₄ 的研究中, 去掉有机层后, CH₄ 吸收下降, CH₄ 吸收的减少与矿质土水分含量的增加一致, 因此, 有机层可能通过储存降雨后不能渗透到矿质土的水分而维持了矿质土内的气体扩散率^[7]。与肖冬枚等^[13] 结果一致, 凋落物对土壤 N₂O 排放的影响是显著的。凋落物对地表 N₂O 通量的影响是由于凋落物在分解过程中, 其所含的营养物质逐渐释放到土壤中, 对土壤有机质含量的提高有明显的作用, 土壤有机质的矿化产物不仅为反硝化过程提供了反应底物, 有机质本身还为参与这一过程的微生物提供能源, 从而加速土壤微生物的反硝化作用, 同时凋落物在微生物分解过程中, N 素仍保持在凋落物残体中, 使得凋落物中的 N 素积累较多, N 素是微生物的重要营养元素, N 素的增加刺激了微生物增殖, 促进其硝化和反硝化过程, 使得凋落物本身的 N₂O 排放通量增大^[13,25]。

相关分析表明鹤山马尾松林和果园土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 排放之间没有明显相关关系。肖冬梅等^[13] 的研究结果表明长白山阔叶红松林土壤的 N₂O 排放和 CH₄ 吸收间存在着一种负线性相关关系, 张秀君等^[35] 对阔叶红松林土壤培养模拟实验结果显示, N₂O 排放速率和 CH₄ 吸收速率间呈显著线性正相关关系。本实验结果和他们的研究结果不同, 由此可见, 在不同条件下, N₂O 排放和 CH₄ 吸收间可能不相关或形成不同的相关关系, 但要进一步确定在何种条件下形成何种关系, 还需要深入研究。

4 结论

本实验通过马尾松林和果园地表 CH₄ 和 N₂O

通量的研究发现, 不同土地利用方式对土壤 CH₄ 影响较小, 而对 N₂O 通量影响较大, 果园 N₂O 通量显著大于马尾松林。凋落物对地表 N₂O 通量有较大影响。有无凋落物两种处理的地表 CH₄ 通量季节变化规律不明, N₂O 通量季节变化规律较明显。土壤含水量对地表 CH₄ 和 N₂O 通量影响比温度要大。研究还发现, 地表 N₂O 通量存在明显的降雨驱动效应, 但这种驱动效应的机理和量化有待进一步研究。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change [C]// Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001: 87-98.
- [2] Li J(李俊), Tong X J(同小娟), Yu Q(于强). Methane uptake and oxidation by unsaturated soil [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2005, 25(1): 141-147.(in Chinese)
- [3] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change [J]. Earth-Sci Rev, 2002, 57: 177-210.
- [4] Hütsch B W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production [J]. Europ J Agron, 2001, 14: 237-260.
- [5] Smith K A, Dobbie K E, Ball B C, et al. Oxidation of atmospheric methane in northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink [J]. Glob Change Biol, 2000, 6: 791-803.
- [6] Bouwman A F. Soils and the Greenhouse Effect [C]. Chichester: John Wiley and Sons, 1990: 61-627.
- [7] Borken W, Beese F. Methane and nitrous oxide fluxes of soils in pure and mixed stands of European beech and Norway spruce [J]. Europ J Soil Sci, 2006, 57: 617-625.
- [8] Liu H(刘惠), Zhao P(赵平), Lin Y B(林永标), et al. CH₄ and N₂O emission from paddy field of agroforestry ecosystem in hilly area of South China in the second crop season [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2006, 14(4): 269-274.(in Chinese)
- [9] Liu H(刘惠), Zhao P(赵平), Lin Y B(林永标), et al. Fluxes of CH₄ and N₂O from paddy field of agroforestry ecosystem in hilly area of South China in the first crop season [J]. Ecol Environ(生态环境), 2006, 15(1): 58-64.(in Chinese)
- [10] Liu H(刘惠), Zhao P(赵平), Sun G C(孙谷畴), et al. Characteristics of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 2007, 18(1): 57-62.(in Chinese)
- [11] Liu J S(刘景双), Wang J D(王金达), Li Z G(李仲根), et al. N₂O concentration and its emission characteristics in Sanjiang Plain wetland [J]. Environ Sci(环境科学), 2003, 24(1): 33-39.(in Chinese)
- [12] Wang S R(王深瑞), Hang G H(黄国宏), Liang Z B(梁战备), et al. Advances in the research on sources and sinks of CH₄ and CH₄ oxidation (uptake) in soil [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报),

- 2002, 13(12): 1707–1712.(in Chinese)
- [13] Xiao D M(肖冬梅), Wang M(王森), Ji L Z(姬兰柱), et al. Soil N_2O and CH_4 fluxes in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2004, 15(10): 1855–1859.(in Chinese)
- [14] Xu S J(徐颂军). Discussion on protection of biological resources in mountain area in Guangdong Province [J]. *Trop Geogr(热带地理)*, 1999, 19(4): 353–357.(in Chinese)
- [15] Zhou J A(周俊岸), Zhou L X(周丽霞), Lin Y B(林永标), et al. Temporal and spatial variation of nitrous oxide concentration in different soil depth under three plantation in Heshan area [J]. *J Fujian Coll For(福建林学院学报)*, 2005, 25(3): 264–268.(in Chinese)
- [16] Li Z A(李志安), Fang W(方炜), Lü D M(吕冬梅). A comparison of soil characteristics of 4 land-use types in a hilly area of Heshan [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 1995, 15(Supp. A): 93–101.(in Chinese)
- [17] Zhou L X(周丽霞), Yi W M(蚁伟民), Yi Z G(易志刚), et al. Soil microbial characteristics in rehabilitation process of degraded ecosystems in Heshan [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2004, 12(3): 202–206.(in Chinese)
- [18] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmosph Sci*, 2003, 20(5): 842–844.
- [19] Wang Y F(王艳芬), Ma X Z(马秀枝), Ji B M(纪宝明), et al. Diurnal and seasonal variation in methane and nitrous oxide fluxes in meadow steppe of Inner Mongolia [J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 2003, 27(6): 792–796.(in Chinese)
- [20] Ding W X(丁维新), Cai Z C(蔡祖聪). Effect of plants on methane production, oxidation and emission [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2003, 14(8): 1379–1384.(in Chinese)
- [21] Cai Z C(蔡祖聪). The forecast of soil trace gas research [J]. *Acta Pedol Sin(土壤学报)*, 1993, 30(2): 117–124.(in Chinese)
- [22] Rosenkranz P, Brüggemann N, Papen H, et al. N_2O , NO and CH_4 exchange, and microbial N turnover over a Mediterranean pine forest soil [J]. *Biogeosci Discuss*, 2005, 2: 673–702.
- [23] Zhou C Y(周存宇), Zhou G Y(周国逸), Wang Y S(王跃思), et al. The N_2O flux from soils of main forest ecosystems in Dinghushan [J]. *China Environ Sci(中国环境科学)*, 2004, 24(6): 688–691.(in Chinese)
- [24] Ishizuka S, Tsuruta H, Murdiyarso D. An intensive field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from soils at four land-use types in Sumatra, Indonesia [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 2002, 16: 1049–1059.
- [25] Xiao D M(肖冬梅), Wang M(王森), Ji L Z(姬兰柱), et al. Variation characteristics of soil N_2O emission flux in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain [J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 2004, 23(5): 46–52.(in Chinese)
- [26] Kiese R, Butterbach-Bahl K. N_2O and CO_2 emissions from three different tropical forest sites in the wet tropics of Queensland, Australia [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34: 975–987.
- [27] Castaldi S. Responses of nitrous oxide, dinitrogen and carbon dioxide production and oxygen consumption to temperature in forest and agricultural light-textured soils determined by model experiment [J]. *Biol Fertil Soils*, 2000, 32: 67–72.
- [28] Chao C C, Young C C, Wang Y P, et al. Daily and seasonal nitrous oxide fluxes in soils from hardwood forest and different agroecosystems of Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2000, 2: 77–84.
- [29] Fernandes S A P, Bernoux M, Cerri C C, et al. Seasonal variation of soil chemical properties and CO_2 and CH_4 fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon [J]. *Geoderma*, 2002, 107: 227–241.
- [30] Prieme A, Christensen S. Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 29: 1165–1172.
- [31] Price S J, Sherlock R R, Kelliher F M, et al. Pristine New Zealand forest soil is a strong methane sink [J]. *Glob Change Biol*, 2003, 10: 16–26.
- [32] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamsen G. CH_4 uptake by temperate forest soil effect of N input and soil acidification [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27: 871–880.
- [33] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, et al. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 1995, 9: 1–10.
- [34] Chapman S J, Kanda K I, Tsuruta H. Minami Influence of temperature and oxygen availability on the flux of methane and carbon dioxide from wetlands: A comparison of peat and paddy soils [J]. *Soil Sci Plant Nutrit*, 1996, 42(2): 269–277.
- [35] Zhang X J(张秀君), Xu H(徐慧), Cheng G X(陈冠雄). Important factors controlling rates of N_2O emission and CH_4 oxidation from forest soil [J]. *Environ Sci(环境科学)*, 2002, 23(5): 8–12.(in Chinese)
- [36] Smith K A, Ball T, Conen F, et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes [J]. *Europ J Soil Sci*, 2003, 54: 779–791.
- [37] Zhou C Y(周存宇), Zhou G Y(周国逸), Wang Y S(王跃思), et al. The N_2O flux from soils of main forest ecosystems in Dinghushan [J]. *China Environ Sci(中国环境科学)*, 2004, 24(6): 688–691.(in Chinese)
- [38] Butterbach-Bahl K, Kock M, Willibald G, et al. Temporal Variations of NO- and N_2O -emissions from Tropical Rain Forest Soils — Evaluation of Controlling Factors [C]. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003: 6–11.
- [39] Liu J X(刘菊秀), Wen D Z(温达志), Zhou G Y(周国逸). Chemical properties of the rainfall in the coniferous and broad-leaved forest in acid rain area of Heshan, Guangdong [J]. *Chin Environ Sci(中国环境科学)*, 2000, 20(3): 198–202.(in Chinese)