

# 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化

周存宇<sup>1</sup>, 张德强<sup>1</sup>, 王跃思<sup>2</sup>, 周国逸<sup>1\*</sup>, 刘世忠<sup>1</sup>, 唐旭利<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 利用静态箱-气相色谱法对鼎湖山针阔叶混交林地表 3 种温室气体  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  通量进行了原位观测。结果表明, 鼎湖山针阔叶混交林地表为  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源, 为  $\text{CH}_4$  的弱汇, 通量日变幅分别是  $488.99 \sim 700.57$ ,  $0.049 \sim 0.108 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $-0.025 \sim -0.053 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 地表凋落物分解释放  $\text{CO}_2$  约占总排放的 1/3; 凋落物层和林下灌木对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的通量无明显影响;  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  的 9:00 观测值与其日平均值有明显差异。

**关键词:** 鼎湖山; 温室气体; 通量; 日变化

## Diurnal variations of fluxes of the greenhouse gases from a coniferous and broad-leaved mixed forest soil in Dinghushan

ZHOU Cun-Yu<sup>1</sup>, ZHANG De-Qiang<sup>1</sup>, WANG Yue-Si<sup>2</sup>, ZHOU Guo-Yi<sup>1\*</sup>, LIU Shi-Zhong<sup>1</sup>, TANG Xu-Li<sup>1</sup>

(1. South China Botanical Garden, CAS, Guangzhou 51065, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1738~1741

**Abstract** The subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest, a typical successional monsoon forest, is one of the major forests in the Subtropics in China. Therefore, it is very important to estimate the fluxes of the greenhouse gases from the forest soil in order to evaluate the impact of subtropical forests on the greenhouse gases emission/uptake. This study investigated the diurnal variations of fluxes of three greenhouse gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  from the coniferous and broad-leaved mixed forest soil. Static chamber-gas chromatograph technique was used to measure the fluxes of these greenhouse gases. By using the improved gas chromatography sampling system, the fluxes of all three greenhouse gases were analyzed with a single injection. In order to find out the effects of litter and seedling on the emission/uptake of these greenhouse gases, three treatments were set in the field: (1) bare soil surface (litter was removed previously); (2) litter+ soil; (3) seedling+ litter+ soil. The experimental results demonstrated that the forest soil was a source of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and a weak sink of  $\text{CH}_4$ . The daily fluxes of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  from the soil surface were in the range of  $488.99 \sim 700.57$ ,  $0.049 \sim 0.108 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  and  $-0.025 \sim -0.053 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , respectively.  $\text{CO}_2$  from the litter decomposition accounted for about 1/3 of the total  $\text{CO}_2$  emission from the soil surface, while the litter and seedling had no significant effect on the fluxes of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ . The fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  measured at 9:00~11:00 a.m. were significantly different from their daily averages. Therefore, caution must be taken if the  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes measured at 9:00~11:00 a.m. are used for extrapolation.

**Key words:** Dinghushan; greenhouse gas; flux; diurnal variation

文章编号: 1000-0933(2004)08-1738-04 中图分类号: X511 文献标识码: A

$\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  是大气中 3 种主要的温室气体, 大量的观测和研究表明, 自工业革命以来, 由于人类活动的影响, 它们正以

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01); 中国科学院知识创新重要方向性资助项目(KSCX2-SW-120)

收稿日期: 2004-01-03; 修订日期: 2004-04-10

作者简介: 周存宇(1968), 男, 湖北人, 博士, 主要从事生态系统生态学研究, E-mail: zhoucy@scib.ac.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence

致谢: 本研究的野外采样工作得到中国科学院鼎湖山森林生态系统定位站有关人员的大力协助, 在此表示衷心感谢。

**Foundation item:** Knowledge Innovation Funds from Chinese Academy of Sciences(No. KZCX1-SW-01, KSCX2-SW-120)

**Received date:** 2004-01-03; **Accepted date:** 2004-04-10

**Biography:** ZHOU Cun-Yu, Ph. D., Mainly engaged in ecosystem ecology.

前所未有的速度增加。目前这 3 种温室气体的浓度年增加量分别为  $1.5 \text{ m l/m}^3$ 、 $4 \text{ }\mu\text{l/m}^3$ 、 $0.8 \text{ }\mu\text{l/m}^3$ <sup>[1,2]</sup>。大气中温室气体的增加通过增强的温室效应,有可能引起全球气候变化,而气候变化又会对自然和社会经济系统产生影响,因此,从 20 世纪 70 年代以来有关温室气体源与汇及地域排放特征的研究越来越受到世界各国政府和科学界的关注。我国在这方面的研究起步较晚,近 10 多年来的有关研究多集中在农田和草原生态系统<sup>[3-6]</sup>,有关森林生态系统土壤温室气体源汇功能的研究极少<sup>[7-9]</sup>,尚未见对森林土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  3 种温室气体通量同时观测的研究报道。

本工作是南亚热带典型森林生态系统地表温室气体通量观测研究的部分内容,其目的是探索森林土壤温室气体排放通量的日变化特征,对每周一次的观测值进行矫正。南亚热带针阔叶混交林一般是在地带性植被——季风常绿阔叶林遭破坏后恢复过程中的典型植被类型,它在整个亚热带森林中占有相当的比重,因此,原位测定其土壤温室气体排放通量对于全面、准确估算我国森林生态系统对温室效应的影响具有重要意义。

## 1 研究地概况

本研究在鼎湖山自然保护区针阔叶混交林 3 号样地内进行。保护区位于广东省中西部,东经  $112^\circ 30' 39'' \sim 112^\circ 33' 41''$ ,北纬  $23^\circ 09' 21'' \sim 23^\circ 11' 30''$ ,面积  $1155 \text{ hm}^2$ ,最高峰鸡笼山海拔  $1000.3 \text{ m}$ 。属南亚热带季风湿润气候,年平均降水量  $1956 \text{ mm}$ ,主要集中在 4~9 月份,占全年的 76%;年平均温度为  $20.9^\circ\text{C}$ ,最冷月(1 月)和最热月(7 月)温度分别为  $12.0^\circ\text{C}$  和  $28.0^\circ\text{C}$ ;年平均相对湿度为 80.8%。本文的研究地点位于保护区内五棵松,处于地带性植被季风常绿阔叶林的边缘,是阔叶树种侵入人工或自然的马尾松(*Pinus massoniana*)林后形成的,为演替系列中间阶段的典型代表类型。群落垂直结构可分为 4 层,乔木 2 层,灌木 1 层,草本 1 层,此外还有多种藤本和附生的层间植物。组成种类以常绿树种占绝对优势,大部分属热带亚热带成分。

## 2 研究方法

温室气体通量利用静态箱/气相色谱法测定。采样箱为组合式,即由底座、顶箱和加高层 3 部分组成(本次暂未用加高层),均为不锈钢板制成。底座:长(L)×宽(W)×高(H)×钢板厚度(T) =  $500 \times 500 \times 100 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ,水封槽:宽×高×钢板厚度 =  $20 \times 30 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ;顶箱:L×W×H×T =  $500 \times 500 \times 500 \times 1.5 \text{ mm}^3$ 。顶箱封顶,内装 2 个轴流混气扇,采样管、测温口。实验观测前将底座打入采样位点,水封槽内填粘性密封胶。为了解地表凋落物和林下灌木对温室气体通量的影响,观测区内设置 3 种处理:(1)去除地表凋落物(S);(2)凋落物+土壤(L+S);(3)林下低矮植物+凋落物+土壤(P+L+S)。在每个采样点罩箱后 0、10、20 min 分别用  $100 \text{ ml}$  医用注射器采集箱内气体  $90 \text{ ml}$ ,采样后及时带回实验室分析。此外,在通量测定的同时观测地表、5 cm 深处土壤温度和气温。

用整机进口的 HP4890D 气相色谱仪测定  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  3 种温室气体浓度,该仪器依照中国科学院大气物理所专利技术改造后,可同时分析这 3 种气体。 $\text{N}_2\text{O}$  检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器、分离柱的温度分别是  $330^\circ\text{C}$ 、 $55^\circ\text{C}$ ,载气为高纯氮气,流速  $27 \text{ ml/min}$ ;  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  检测器为氢焰离子化检测器(FID),检测器、分离柱温度分别为  $200^\circ\text{C}$ 、 $55^\circ\text{C}$ ,载气为高纯氮气,流速  $30 \text{ ml/min}$ 。

气体的通量是指单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化,一般正值表示气体从土壤排放到大气,负值表示土壤吸收大气中的该气体,用公式表示为:

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot D \cdot \frac{V}{A} = hD \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

式中,  $F$  为气体通量( $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ),  $V$  为观测箱的容积,  $A$  为观测时包围的土壤面积,  $D$  为箱内气体密度,  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$  是气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率,  $h$  为观测箱高度。

本次日变化观测的天气状况为雨后多云,根据气象观测记录,影响温室气体通量的各环境要素(气温、地下 5 cm 土壤温度、空气湿度、土壤湿度和大气压等)大致为 7 月份的平均水平,因此本次通量观测结果基本上可以代表该月份的总体情况。

## 3 结果与分析

### 3.1 森林地表 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 通量日变化特征

图 1 至图 3 为针阔叶混交林地表(有凋落物覆盖) 3 种温室气体通量日变化及气温和地下 5 cm 土壤温度变化曲线。

3 种气体中,  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的通量全天均为正值,而  $\text{CH}_4$  则全天均为负值,说明该森林土壤为  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的源,是  $\text{CH}_4$  的弱汇。

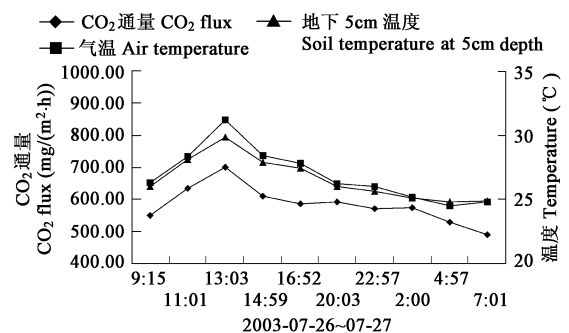


图 1 针阔叶混交林  $\text{CO}_2$  通量、气温及 5 cm 地温日变化  
Fig. 1 Diurnal variations of  $\text{CO}_2$  flux, air temperature and soil temperature at 5 cm depth

于国内其他通量观测的488个不同自然生态系统土壤之间通量日变化而言变化比较平稳,这与该地区受海洋性气候影响昼夜温差不大有关。从土壤表面释放的CO<sub>2</sub>主要来源于土壤中的生物学过程,包括土壤微生物呼吸、根呼吸和土壤动物呼吸,这些生物(或生物体某部分)的呼吸强度在一定范围内都随温度升高而增强,因此地表CO<sub>2</sub>排放通量的日较差也在一定范围内随温度的日较差增大而增大。从曲线看出CO<sub>2</sub>通量与气温和地温有明显的正相关性( $R_{at}=0.61, P<0.05; R_{st}=0.62, P<0.05; R_{at}$ 为CO<sub>2</sub>通量与气温的相关系数; $R_{st}$ 为CO<sub>2</sub>通量与地下5cm土壤温度的相关系数),可见温度是影响土壤CO<sub>2</sub>排放的一个重要因素。

CH<sub>4</sub>吸收通量的日变化规律表现为昼低夜高,这一结果与董云社等<sup>[5]</sup>在内蒙古草原生态系统以及齐玉春等<sup>[7]</sup>在贡嘎山森林生态系统的观测结果完全一致,且相对于内蒙古草原和贡嘎山森林而言,鼎湖山森林地表CH<sub>4</sub>吸收通量昼夜变幅不大,这也与该地区在夏季昼夜温差相对较小有关。

N<sub>2</sub>O通量日变化规律不明显,最大通量出现在夜间,最小通量出现于白天,这与相关报道中N<sub>2</sub>O通量昼高夜低的结论<sup>[5-7]</sup>截然不同。出现这种现象可能是由于该地区雨季降水比较集中,土壤中容易形成厌氧微区,而在厌氧情况下土壤排放的N<sub>2</sub>O主要来自反硝化过程。在厌氧反硝化过程中,产生的N<sub>2</sub>O与N<sub>2</sub>的比值与温度呈反相关<sup>[10]</sup>,即温度越高,反硝化过程生成的N<sub>2</sub>越多,产生的N<sub>2</sub>O越少,因此N<sub>2</sub>O的排在温度较低的夜晚出现峰值,温度较高的白天排放反而较低。

### 3.2 不同处理下3种气体通量变化分析

为了解地表凋落物和林下灌木对3种温室气体通量的影响,观测区内设置了3种处理,结果发现以凋落物对CO<sub>2</sub>通量的影响最为明显,表1为不同处理间地表CO<sub>2</sub>通量的比较。

由上表可知,在一天的各个时段没有凋落物和低矮植物的裸露地表(S)的CO<sub>2</sub>通量在3种处理中都是最低的。经方差分析可知该处理与有凋落物覆盖的处理(L+S)间,CO<sub>2</sub>通量有显著差异( $F=52.63, P<0.05$ )。将L+S减去S可得到地表凋落物的CO<sub>2</sub>排放通量,经过计算可得出其占地表CO<sub>2</sub>总通量的比例,全天平均为31.14%,可见该地区地表排放的CO<sub>2</sub>中有相当一部分是由凋落物的分解产生的。由于鼎湖山针阔叶混交林的凋落物输入量及其分解速率在不同季节有很大差异<sup>[11]</sup>,故上述比例也会随季节而变化。经方差分析发现有植物的处理(L+S+P)和只有凋落物覆盖处理(L+S)间的CO<sub>2</sub>通量无显著差异,这可能与采样点的植物尚为幼苗,呼吸作用较弱有关。

就CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O而言,经统计分析发现3种处理间并无显著差异,表明在观测日,凋落物和林下灌木对这两种气体的通量没有明显影响。虽然有报道<sup>[12,13]</sup>称某些森林植物在自然状态下可以释放N<sub>2</sub>O,但是否释放、释放量大小随植物种类、植物的发育阶段和周围环境的不同会有很大变化<sup>[14]</sup>。要确认该林型的植物能否释放N<sub>2</sub>O,必须以不同植物为对象进行严格的控制性实验,而本试验的有林下灌木的处理(L+S+P)中,同一采样点有多种植物,不同采样点的植物种类也不尽相同,且植物周围微环境条件也有差异,所以本次观测的结果并不能证明林下灌木是否为N<sub>2</sub>O的排放源。董云社<sup>[15]</sup>曾报道森林地表的枯枝落叶层和腐

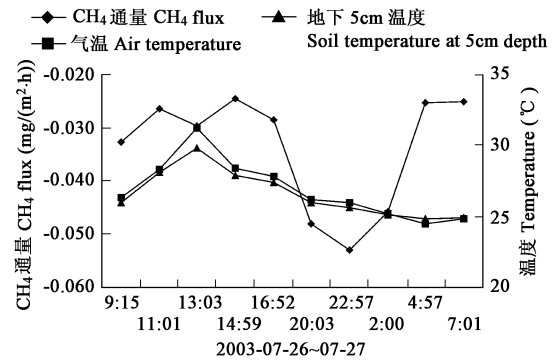


图2 针阔叶混交林CH<sub>4</sub>通量、气温及5cm地温日变化

Fig. 2 Diurnal variations of CH<sub>4</sub> flux, air temperature and soil temperature at 5 cm depth

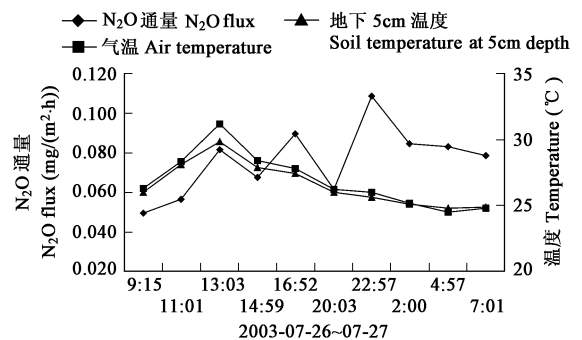


图3 针阔叶混交林N<sub>2</sub>O通量、气温及5cm地温日变化

Fig. 3 Diurnal variations of N<sub>2</sub>O flux, air temperature and soil temperature at 5 cm depth

表1 不同处理间CO<sub>2</sub>通量(mg/(m<sup>2</sup>·h))的比较(括号内为标准误)

Table 1 CO<sub>2</sub> fluxes(mg/(m<sup>2</sup>·h)) of different treatments at different times (SE in parentheses)

观测时间 Time	L+S+P	L+S	S
09:00	552.15(33.38)	549.25(65.55)	325.92(20.02)
11:00	738.32(34.15)	632.68(53.71)	427.14(47.81)
13:00	693.25(31.81)	700.57(84.29)	503.66(73.35)
15:00	577.50(82.51)	611.12(84.90)	485.73(143.14)
17:00	703.87(81.37)	584.81(41.63)	446.55(58.13)
20:00	577.16(72.46)	591.62(122.81)	371.78(87.95)
23:00	562.26(37.70)	569.75(62.65)	410.82(77.06)
02:00	665.49(12.97)	572.60(80.15)	439.68(46.06)
05:00	520.84(34.66)	528.61(28.93)	315.77(29.44)
07:00	594.20(19.16)	488.99(79.39)	271.90(16.59)

L+S+P 凋落物+土壤+低矮植物 litter+soil+plant, L+S  
凋落物+土壤 litter+soil, S 土壤 soil

殖质层对土壤-大气间的气体交换有很大影响(对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  来说,主要是机械阻挡作用),但其观测对象是位于德国的温带森林土壤,由于温度较低,凋落物分解较慢,其枯枝落叶层的厚度远大于地处亚热带的针阔叶混交林的凋落物层厚度。在本试验的有凋落物层覆盖的处理(L+S)中,有的采样点甚至可以看到土壤表面,故凋落物的机械阻挡作用不明显,因而对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的通量无明显影响。

比较每一种处理的全天平均值与 9:00 的观测值发现,除了  $\text{CH}_4$  之外其它两种气体的 9:00 观测值与全天平均值间都有较大差异,特别是  $\text{N}_2\text{O}$  的通量有显著差异。由此可见,在以日常每周 1 次的 9:00 观测值为基础计算各温室气体的周、月甚至年排放/吸收量时,必须根据这种差异程度进行矫正。

#### 4 结论

(1) 根据国内外已有报道,相对于内蒙古草原生态系统等其它自然生态系统而言,鼎湖山针阔叶混交林地表  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  三种温室气体通量的日变化幅度较小。

(2) 该林型在观测当日地表凋落物分解产生的  $\text{CO}_2$  占地表  $\text{CO}_2$  总排放的近 1/3, 是一个重要的  $\text{CO}_2$  排放源。

(3) 由于凋落物层较薄,林下灌木种类不同,加上各采样点的微环境存在一定差异,所以本次观测没有发现凋落物和林下灌木对  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的通量有明显影响。

(4) 在本次观测中,该林型地表  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  通量的日平均值与 9:00 观测值有明显差异。在依据 9:00 单次观测值外推算时,必须对其进行矫正。

#### References

- [1] IPCC. *Climate change* 1994, Cambridge University Press, 1995
- [2] IPCC. *Climate change 2001: Impact, adaptation and vulnerability*, Cambridge University Press, 2001.
- [3] Wang M X, Li J, Zheng X H. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, **22**: 600~ 612
- [4] Wang Y S, Ji B M, Wang Y F, et al. Measurement of the exchange rate of greenhouse gases between field and atmosphere in semi-arid grassland. *Environmental Science*, 2000, **21**: 7~ 10
- [5] Dong Y S, Zhang S, Qi Y C, et al. Fluxes of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chinese science bulletin*, 2000, **45**: 1590~ 1594
- [6] Du R, Wang G C, Liu G R, et al. The study on diurnal variation in greenhouse gas revenue and expenditure fluxes of *Lium chinensis* grassland of Inner Mongolia. *Acta Agraria Sinica*, 1998, **6**: 258~ 264
- [7] Dong Y S, Qi Y C, Luo J, et al. Experimental study on  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  fluxes from the dark coniferous forest zone soil of the Gongga mountain, China. *Science in China*, 2003, **46**: 285~ 295
- [8] Liu Y F, Ouyan H, Cao G M, et al. Soil carbon emission from ecosystems of eastern Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**: 152~ 160
- [9] Sun X Y.  $\text{CH}_4$  emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**: 173~ 176
- [10] Keeney D R, Fillery I R and Marx G P. Effect of temperature on gaseous N products of denitrification. *Soil Sci Soc Am. J.*, 1979, **43**: 1124~ 1128
- [11] Zhang D Q, Ye W H, Yu Q F, et al. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**: 938~ 944
- [12] Zhang X J, Xu H, Chen G X.  $\text{N}_2\text{O}$  emission rate from trees. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**: 538~ 542
- [13] Xu H, Zhang X J, Han S J.  $\text{N}_2\text{O}$  emission by trees under natural condition. *Environmental Science*, 2001, **22**: 7~ 11
- [14] Zhang X J, Chen G X, Xu H.  $\text{N}_2\text{O}$  emission from trees under different light irradiances. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**: 1563~ 1565
- [15] Dong Y S, Peng G B, Li J. Seasonal variations of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from temperate forest soil. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(suppl): 120~ 128

#### 参考文献:

- [3] 王明星,李晶,郑循华,等. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. *大气科学*, 1998, **22**: 600~ 612
- [4] 王跃思,纪宝明,王明星,等. 半干旱草原地-气温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  交换速率测定方法研究. *环境科学*, 2000, **21**: 7~ 10
- [6] 杜睿,王庚辰,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. *草地学报*, 1998, **6**: 258~ 264
- [8] 刘允芬,欧阳华,曹广民,等. 青藏高原东部生态系统土壤碳排放. *自然资源学报*, 2001, **16**: 152~ 160
- [9] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中  $\text{CH}_4$  排放通量的研究. *土壤与环境*, 2000, **9**: 173~ 176
- [11] 张德强,叶万辉,余清发,等. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. *生态学报*, 2000, **20**: 938~ 944
- [12] 张秀君,徐慧,陈冠雄. 树木  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率的测定. *植物生态学报*, 2002, **26**: 538~ 542
- [13] 徐慧,张秀君,韩士杰,等. 自然状态下树木排放  $\text{N}_2\text{O}$  的研究. *环境科学*, 2001, **22**: 7~ 11
- [14] 张秀君,陈冠雄,徐慧. 不同光强条件下树木释放  $\text{N}_2\text{O}$  的研究. *应用生态学报*, 2002, **13**: 1563~ 1565

- [15] 董云社, 彭公炳, 李俊 温带森林土壤排放  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  时空特征 地理学报, 1996, 51(增刊): 120~ 128