

鼎湖山主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征

莫江明¹, 方运霆¹, 李德军¹, 林而达², 李玉娥²

(1. 中国科学院 华南植物园, 广东 肇庆 526070; 2. 中国农业科学院 农业气象研究所, 北京 100081)

摘要: 研究了鼎湖山生物圈保护区马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)在 2000~2001 年期间土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征。季风林、混交林和马尾松林土壤 CO₂ 排放速率在研究期间的平均值分别为(kg CO₂-C · hm⁻² · d⁻¹): 18.6 ± 2.6, 20.5 ± 3.7 和 17.8 ± 3.8, 土壤 CH₄ 吸收速率则分别为(g CH₄-C · hm⁻² · d⁻¹): -5.5 ± 1.8, -3.3 ± 1.6 和 -7.7 ± 1.8。土壤 CO₂ 排放速率和土壤 CH₄ 吸收速率在三种森林类型中均表现明显的季节性变化, 且其季节性变化根据森林类型和年份不同而异。总的来说, 土壤 CO₂ 排放速率在所有森林中均呈现夏季最高而冬季最低的变化, 土壤 CH₄ 吸收速率的季节性变化则相反, 基本上表现为冬季最高而夏季最低的变化。三种森林土壤的 CO₂ 排放速率和 CH₄ 吸收速率在两观测年间的差异均不显著。土壤 CO₂ 排放速率在不同森林类型间的差异也不显著, 但土壤 CH₄ 吸收速率在马尾松林显著高于混交林。在两观测年中, 土壤 CO₂ 排放速率与土壤 CH₄ 吸收速率之间在季风林呈现显著的负相关关系, 在混交林和马尾松林中它们之间也趋向呈负相关关系, 但未达显著水平。土壤 CO₂ 排放速率与土壤温度之间在季风林呈现显著的指数正相关关系, 但在其余森林(混交林和马尾松林)中它们之间的关系则不明显。

关键词: CO₂ 排放; CH₄ 吸收; 温室气体; 全球变化; 亚热带森林

中图分类号: Q948.11, S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2006)02-0142-06

Soil CO₂ emission and CH₄ uptake in the main forests of Dinghushan in subtropical China

MO Jiang-ming¹, FANG Yun-ting¹, LI De-jun¹, LIN E-da², LI Yu-e²

(1. *South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Zhaoqing 526070, China*; 2. *Agrometeorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Soil CO₂ emission and CH₄ uptake in pine(PF), pine-broadleaf mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan in subtropical China were estimated in this study. The mean CO₂ emission rates in MEBF, MF and PF forests during the study period of 2000 to 2001 were (kg CO₂-C · hm⁻² · d⁻¹): 18.6 ± 2.6, 20.5 ± 3.7 and 17.8 ± 3.8, respectively. The mean soil CH₄ uptake rates were (g CH₄-C · hm⁻² · d⁻¹): -5.5 ± 1.8, -3.3 ± 1.6 and -7.7 ± 1.8, respectively. Both CO₂ emission and CH₄ uptake rate exhibited significant seasonal variation and its seasonal pattern varied depending on forests and years. Overall, the soil CO₂ emission rates in the studied forests showed the highest in summer and the lowest in winter, in contrast, the soil CH₄ uptake rates exhibited the highest in winter and the lowest in summer. No significant difference was found in soil CO₂ emission rates among these studied forests. The soil CH₄ uptake rates, however,

收稿日期: 2005-04-15 修回日期: 2005-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(30270283); 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX2-SW-133); 中国科学院华南植物研究所所长基金; 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助[Supported by National Natural Science Foundation of China(30270283); Key Project of Knowledge Innovation Program of CAS(KSCX2-SW-133); Director Foundation of South China Institute of Botany; Field Frontiers Project of Knowledge Innovation Program of CAS].

作者简介: 莫江明(1964-), 男, 广东肇庆人, 博士, 研究员, 主要从事生态系统生态学、恢复生态学和自然保护区管理研究, E-mail: <mojm@scib.ac.cn>.

showed the following order: PF > MEBF > MF, and the difference between PF and MF forest was significant. The soil CO₂ emission rates showed a significant negative correlation with CH₄ emission in MEBF forest during the monitoring period. The soil CO₂ emission rates also showed a negative but not significant correlation with CH₄ uptake in MF and PF forests during the studied period. MEBF forest was the only forest that its soil CO₂ emission rates increased exponentially with soil temperature during the monitoring period of 2000 to 2001.

Key words: CO₂ emission; CH₄ uptake; greenhouse gas; global change; subtropical forest

全球变化包括全球大气成分(主要为温室气体)变化、全球气候变化、土地利用和土地覆盖的变化、人口增加、荒漠化和生物多样性变化,而其中温室气体的变化最引人注目,因为它为直接或间接引起气候和环境等其它全球性变化的因素(Vitousek, 1994)。因此,温室气体的研究是当前全球变化研究的热点之一。森林土壤是我国陆地生态系统的重要组成部分,了解森林土壤中温室气体的排放和吸收(温室气体的源与汇的情况),对于评价森林生态系统对全球气候变化的贡献十分必要,同时也是制订温室气体排减技术措施的重要理论基础(孙向阳, 2000; Butterbach-Bahl 等, 2002)。CO₂ 和 CH₄ 是温室气体中造成温室效应最重要的两种气体,且它们在大气中的浓度正以惊人的速率不断增加(Butterbach-Bahl 等, 2002)。因此,近期学者们对森林土壤 CO₂ 和 CH₄ 的排放和吸收情况进行了一些研究,但这些研究主要集中在温带森林而对热带和亚热带森林的研究报道甚少(Keller 等, 1994; Lessard 等, 1994; 孙向阳等, 2000; 张秀君等, 2002; Butterbach-Bahl 等, 2002; Bekku 等, 2003)。

为此,本研究选择鼎湖山马尾松林(*Pinus massoniana*; PF)、马尾松针阔叶混交林(MF)和季风常绿阔叶林(MEBF)为对象,通过定位监测,探讨亚热带森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征,为进一步研究和估测温室气体排放和吸收提供基础。

1 材料与方 法

1.1 样地概况

本研究在广东鼎湖山生物圈保护区分布的 3 种主要森林类型,即马尾松(*Pinus massoniana*; PF)林、马尾松针阔叶混交林(MF)和季风常绿阔叶林(MEBF)中进行。保护区位于广东省中部,112°33' E, 23°10' N, 属亚热带季风性气候型。年平均降雨量为 1 927 mm, 其中 75% 分布在 3~8 月份, 而 12~2 月仅占 6%。年平均相对湿度为 80%。年平均温度为 21.4 °C, 最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平

均温度分别为 12.6 °C 和 28.0 °C(黄展帆等, 1982)。

保护区面积约 1 100 hm², 其中分布在海拔 250~300 m 的季风常绿阔叶林约占 20%, 分布在海拔 200 m 左右的混交林约占 50%, 在 50~200 m 的马尾松林约占 20%(王铸豪等, 1982)。季风常绿阔叶林分布在保护区的核心区, 保存较完好, 已有 400 多年的保护历史, 是南亚热带代表性的森林类型(王铸豪等, 1982)。混交林为人工种植的马尾松因一些阔叶树种入侵而自然形成的过渡类型的针叶、阔叶混交林, 林龄约为 70 a。马尾松林为人工种植于 1930 年前后, 种植后常受人为活动干扰(主要为收割凋落物和林下层), 林龄与混交林的基本一致(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

季风常绿阔叶林为锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)群落。林冠重叠、稠密, 种类丰富, 结构复杂, 垂直结构可分为 6 层, 即乔木 3 个亚层, 幼树灌木层、草本苗木层, 层间植物层。层间植物主要是木质藤本植物和少量的附生植物。乔木层主要由锥栗、荷木、厚壳桂、黄果厚壳桂(*C. concinna*)、华润楠(*Machilus chinensis*)和红车(*Syzygium rehderianum*)等树种组成, 其它层树种主要有: 杖枝省藤(*Calamus rhabdocladus*)、罗伞树(*Ardisia quinquegona*)和沙皮蕨(*Hemigramma decurrens*)等(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

混交林群落结构较简单, 仅可分成 4 层。乔木分 2 个亚层, 主要树种有马尾松、荷木、锥栗、黄果厚壳桂、红皮紫陵(*Craibiodendron kwangtungense*)、山钓樟(*Lindera metcalfiana*)和天料木(*Homalium cochinchinense*)等。灌木一层, 以阳性灌木桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)占优势。草本及苗木一层, 以芒萁(*Dicranopteris linearis* var. *dichotoma*)和黑莎草(*Gahnia tristis*)为主, 极少发现有马尾松幼苗(王铸豪等, 1982; Mo 等, 2003)。

马尾松林主要以马尾松树种为主, 还有少量的桉树(*Eucalyptus robusta*)。因长期受人为干扰(收割凋落物和林下层, 每年 2~3 次), 该马尾松林退化

较严重,林分结构简单,乔木仅一层且林冠稀疏,但林下层植物(乔木层林冠以下除马尾松和桉树外的灌木、草本以及蕨类植物)较稠密。林下层树种主要以桃金娘、芒萁(*Dicranopteris linearis*)、毛稔(*Melastoma sanguineum*)、岗松(*Baekkea frutescens*)等为主(王铸豪等,1982;Brown等,1995;Mo等,1995,2003)。

季风常绿阔叶林样地的母岩为砂页岩。土壤为赤红壤,土层较深(60~90 cm)。混交林样地的母岩为砂岩。土壤为砖红壤性红壤,土层厚薄不均,一般在30~60 cm之间。马尾松林样地的母岩也为砂岩。土壤也为砖红壤性红壤,土层较浅,一般不超过30 cm(王铸豪等,1982;Brown等,1995;Mo等,1995,2003)。各样地的土壤理化性质见表1。

表1 鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤理化性质(平均值,标准误)¹⁾
Table 1 Soil properties in pine(PF),mixed(MF)and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan in subtropical China(mean,SE in parenthesis)

森林类型 Forest type	土层深(cm) Soil depth	有机质(%) Organic matter	全 N(%) Total N	碳氮比 C/N	pH	容重(g/cm ³) Bulk density	含水量(%) Moisture content
马尾松林 PF	0~20	2.73(0.17)	0.09(0.01)	16.79(0.94)	4.03(0.02)	1.41(0.04)	24.90(1.10)
混交林 MF	0~20	3.45(0.35)	0.10(0.01)	18.90(0.97)	3.86(0.02)	1.30(0.04)	25.97(0.91)
季风林 ²⁾	0~20	5.35(0.58)	0.19(0.01)	15.91(0.86)	3.79(0.06)	1.21(0.03)	38.57(1.19)

¹⁾引自文献(Mo等,2003);²⁾季风常绿阔叶林。

¹⁾Cited from reference (Mo *et al.*, 2003); ²⁾ Monsoon evergreen broadleaf forest(MEBF)。

1.2 样品采集、处理和测定

采用静态封闭箱式技术对土壤排放通量进行原位测定。取样箱由底箱和盖箱组成,其中盖箱为内径25 cm,高30 cm 不锈钢的圆柱体;底箱高度为10 cm,而外径与盖箱内径相同。于1999年底分别在每种森林选择5个代表性样地(也是中国科学院鼎湖山森林生态系统定位研究的永久性标准样地;王铸豪等,1982;Mo等,2003),然后在每个代表性样地埋下1个气体取样底箱(埋入土壤5 cm)。于2000~2001年的1、4、7和10月份的10~14日每天上午9~10点,从每个取样底箱取两个气体样品测定其排放速率。于每次观测准时将盖箱安置于底箱上,在采集箱刚插入土壤、插入后半个小时和1个小时分别用注射器抽取100 mL箱内气体样品,同时测定土壤表层温度。每个季节采30个气体样,其中每个森林类型10个样品。气样带回实验室后,用Agilent 4890D气相色谱仪测定其浓度,CO₂和CH₄均采用氢离子化(FID)检测器。以单位时间气样浓度的变化作为该时间段的气体排放速率(Keller等,1994;Magill等,1997)。

气体通量的计算公式: $F[\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]=D \times H \times \Delta c / \Delta t$ 。

其中,F为通量,D和H分别为气体密度和盖箱高度, $\Delta c / \Delta t$ 单位时间其它浓度变化量(Keller等,1994;Magill等,1997)。

1.3 统计分析

利用SPSS12.0软件进行ANOVA统计分析,

然后以LSD多重比较法检验土壤CO₂排放和CH₄吸收速率在不同类型森林间和年份间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤CO₂排放特征

在2000~2001年观测期间,三种森林土壤CO₂排放速率均表现明显的季节性变化特点(图1),但这种季节性变化根据年份和森林不同而异。在2000年,季风常绿阔叶林和马尾松林土壤CO₂排放速率的大小顺序均为:7月>4月>1月>10月,在混交林则为:4月>7月>1月>10月;在2001年,三种森林土壤CO₂排放速率的大小顺序均为:7月>4月>1月>10月。总的来说,三种森林土壤CO₂排放速率在观测期间呈现夏季最高而冬季最低的变化(图1)。

土壤CO₂排放速率的季节变化程度在两年观测中均以季风常绿阔叶林最大(2000年和2001年土壤CO₂排放速率最大与最小的比值分别为3.8和8.5),但混交林和马尾松林则根据年份不同而异(图1)。在2000年,土壤CO₂排放速率的季节变化程度的大小变化顺序为:混交林(最大与最小的比值为3.0)>马尾松林(最大与最小的比值为2.6),但在2001年,其变化程度的大小顺序为:马尾松林(最大与最小的比值为3.1)>混交林(最大与最小的比值为2.4)。

三种森林土壤CO₂在2000年的排放速率与

2001 年的十分相似,其差异均不显著(图 2),两观测年的平均值分别为(kg CO₂-C · hm⁻² · d⁻¹):18.6 ± 2.6(季风常绿阔叶林),20.5 ± 3.7(混交林)和 17.8 ± 3.8(马尾松林)。此外,不同森林比较,其差异在两观测年份中也不显著(图 2)。

在两观测年(2000 和 2001)中,土壤 CO₂ 排放速率与土壤温度之间在季风常绿阔叶林呈现显著的指数正相关关系(p<0.01,图 3),但在混交林和马尾松林中它们之间的关系则均不明显。

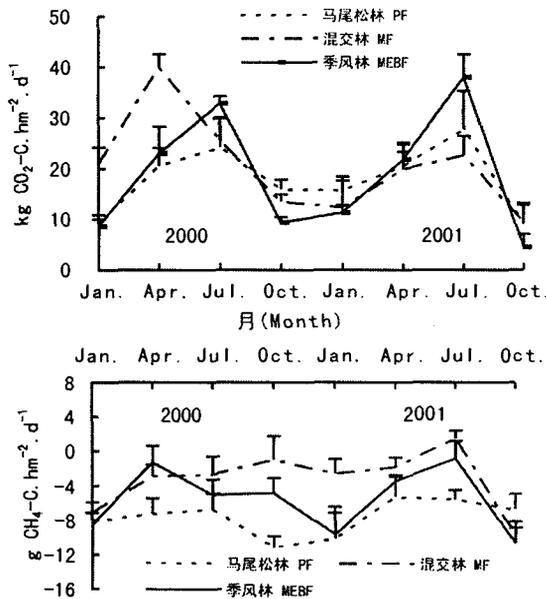


图 1 鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤 CO₂ 排放与土壤 CH₄ 吸收的季节性变化
Fig. 1 Seasonal variations of soil CO₂ emission and soil CH₄ uptake in pine(PF), mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan during the period of 2000 to 2001(n=5)

2.2 土壤 CH₄ 吸收特征

土壤 CH₄ 吸收速率在两观测年中同样呈现明显的季节性变化(p<0.01,图 1),且其季节性变化也根据年份和森林不同而异。与土壤 CO₂ 排放速率变化不同,土壤 CH₄ 吸收速率基本上呈现冬季最高而夏季最低的变化(图 1)。在 2000 年,季风常绿阔叶林土壤 CH₄ 吸收速率的季节性变化为:1 月>10 月>7 月>4 月,混交林为:1 月>4 月>7 月>10 月,马尾松林为:10 月>1 月>4 月>7 月;然而在 2001 年,季风常绿阔叶林土壤 CH₄ 吸收速率的季节性变化为:10 月>1 月>4 月>7 月,混交林为:10 月>1 月>4 月>7 月,马尾松林为:1 月>10 月>7 月>4 月。

土壤 CH₄ 吸收速率的季节变化程度在两年观

测中均以马尾松林最小(2000 年和 2001 年土壤 CH₄ 吸收速率最大与最小的比值分别为 1.6 和 1.9),但混交林和季风常绿阔叶林则根据年份不同而异(图 2)。在 2000 年,土壤 CH₄ 吸收速率的季节变化程度的大小顺序为:混交林(最大与最小的比值为 7.4)>季风常绿阔叶林(最大与最小的比值为 6.7),但在 2001 年,其变化程度的大小顺序为:季风常绿阔叶林(最大与最小的比值为 13.2)>混交林(最大与最小的比值为 11.2)。

与土壤 CO₂ 排放速率相类似,所有森林土壤 CH₄ 的吸收速率在两观测年间的差异均不显著(图 2),其平均值分别为(g CH₄-C · hm⁻² · d⁻¹):-5.5 ± 1.8(季风常绿阔叶林),-3.3 ± 1.6(混交林)和-7.7 ± 1.8(马尾松林)。

不同森林比较,土壤 CH₄ 的吸收速率在各森林的大小顺序为:马尾松林>季风常绿阔叶林>混交林,且马尾松林与混交林之间的差异在两观测年中均达显著水平(p<0.05,图 2)。可见,与土壤 CO₂ 排放速率的表现不同,森林类型对土壤 CH₄ 的吸收速率具有明显的影响。

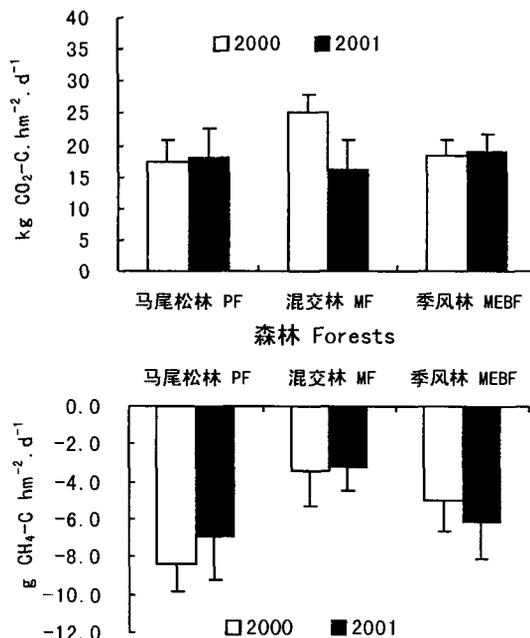


图 2 2000~2001 年鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤 CO₂ 排放与土壤 CH₄ 吸收的平均值
Fig. 2 Mean soil CO₂ emission and CH₄ uptake in pine(PF), mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan during the period of 2000 to 2001(n=20)

2.3 土壤 CO₂ 排放与 CH₄ 吸收的关系

在两观测年中,土壤 CO₂ 排放速率与土壤 CH₄ 吸收速率之间在季风常绿阔叶林呈现显著负相关关系($p < 0.05$, 图 4),在混交林和马尾松林它们之间也趋向呈负相关关系,但均未达显著水平。

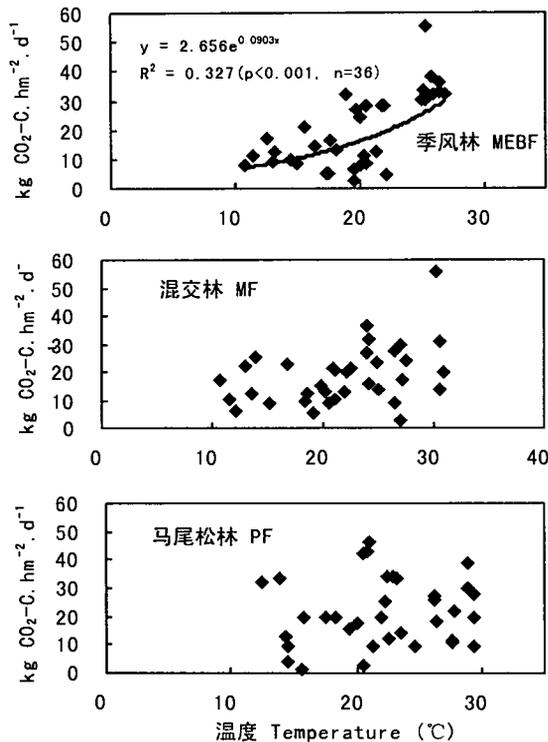


图 3 鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤 CO₂ 排放与土壤温度的关系
Fig. 3 Relationship of soil CO₂ emission and soil temperature in pine(PF), mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan during the period of 2000 to 2001(n=36)

3 讨论

研究结果表明,鼎湖山季风常绿阔叶林、混交林和马尾松林土壤 CO₂ 排放速率在两年观测期间平均分别为(kgCO₂-C · hm⁻² · d⁻¹): 18.6 ± 2.6, 20.5 ± 3.7 和 17.8 ± 3.8。这些量均低于一些温带森林土壤 CO₂ 排放速率(30.1~140.5 kgCO₂-C · hm⁻² · d⁻¹)(Castro 等, 1993; 董云社等, 1996),也低于海南岛尖峰岭热带森林土壤 CO₂ 排放速率(81.9 kg-CO₂-C · hm⁻² · d⁻¹)(吴仲民等, 1997)。鼎湖山季风常绿阔叶林、混交林和马尾松林土壤 CH₄ 的吸收速率平均值分别为(gCH₄-C · hm⁻² · d⁻¹): -5.5 ±

1.8, -3.3 ± 1.6 和 -7.7 ± 1.8。这些量也均低于德国一温带森林土壤 CH₄ 的吸收速率(-17.5 gCH₄-C · hm⁻² · d⁻¹)(董云社等, 1996), 低于北京低山区森林土壤 CH₄ 的吸收速率(-13.5 gCH₄-C · hm⁻² · d⁻¹)(孙向阳, 2000)和略低于长白山北坡各类土壤 CH₄ 的吸收速率的平均值(-9.9 gCH₄-C · hm⁻² · d⁻¹)(徐慧等, 1995)。可见,本研究森林土壤 CO₂ 排放速率和土壤 CH₄ 的吸收速率均较低。

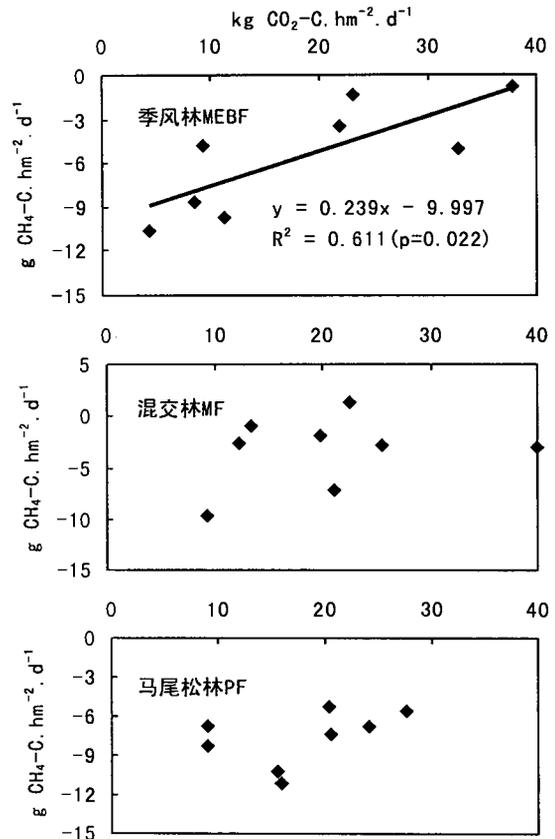


图 4 鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(季风林)土壤 CO₂ 排放与土壤 CH₄ 吸收的关系
Fig. 4 Relationship of soil CO₂ emission and soil CH₄ uptake in pine(PF), mixed(MF) and monsoon evergreen broadleaf(MEBF) forests of Dinghushan during the period of 2000 to 2001(n=8)

土壤 CO₂ 排放速率呈现明显的季节性变化,且总的来说,三种森林土壤 CO₂ 排放速率在观测期间呈夏季最高而冬季最低的变化(图 1)。这与前人在温带森林的研究结果基本一致(董云社等, 1996; 张秀君等, 2002)。他们把以上温带森林土壤 CO₂ 排放速率的季节性变化归因于土壤温度的季节性变化而非降水或土壤含水量造成(董云社等, 1996; 张秀君等, 2002)。然而,在本研究中土壤温度的季节性变化仅能解释季风常绿阔叶林土壤 CO₂ 排放速率

(图 3), 混交林和马尾松林土壤 CO₂ 排放可能更多地受其它因素(如降水和土壤含水量等)的影响。

与土壤 CO₂ 排放速率的季节性变化相反, 土壤 CH₄ 的吸收速率在研究期间通常表现为冬季最高而在夏季最低的现象(图 1)。对它们进行的相关分析结果也进一步证实了以上现象。相关分析结果表明, 土壤 CO₂ 排放速率与土壤 CH₄ 吸收速率之间在季风常绿阔叶林呈现显著负相关($p < 0.05$, 图 4), 在混交林和马尾松林它们之间也趋向呈负相关关系, 但未达显著水平。这与温带森林的研究结果不相符(董云社等, 1996; 孙向阳, 2000; Steinkamp 等, 2001)。Castro 等(1993)报道认为, 温度对 CH₄ 氧化有影响并且与温度的范围有关。温度在 -5~10 °C 之间对 CH₄ 消耗有正效应, 在 10~20 °C 之间无效应。Steinkamp 等(2001)认为, 田间可能存在着土壤温度的临界值, 低于临界值时, 温度成为限制 CH₄ 氧化速率的主要因子, 并推断温度临界值可能接近 10 °C。张秀君等(2002)的研究报道也认为, 温度对土壤 CH₄ 氧化的影响取决于温度的范围, 在较低的温度范围内, CH₄ 吸收速率随温度的升高而增加。在本研究中, 土壤温度在两观测年中的平均温度为 21.6 °C, 最低为 10.7 °C 而最高则为 30.8 °C (图 3), 同时对它们的相关分析结果表明, 土壤温度与土壤 CH₄ 吸收速率之间相关关系不显著。然而, 研究地区的年平均降雨量为 1 927 mm, 其中 75% 分布在 3~8 月份, 而 12~2 月仅占 6% (黄展帆等, 1982)。Lessard 等(1994)在加拿大一温带森林研究时发现, 土壤 CH₄ 吸收速率与土壤含水量存在显著的负相关关系。由于受土壤温度和水分影响的原因, 森林土壤 CH₄ 吸收速率往往呈现明显的季节性变化(孙向阳, 2000)。因此, 土壤湿度而非温度可能是本研究土壤 CH₄ 吸收速率的主要影响因素。在秋冬干燥的气候条件(如增加土壤的透气性)很可能增加土壤对 CH₄ 的养化速率。

本研究结果还表明, 森林类型对土壤 CO₂ 排放速率影响不明显, 但对土壤 CH₄ 的吸收速率具有显著的影响(马尾松林 > 季风常绿阔叶林 > 混交林, 且马尾松林与混交林之间的差异在两观测年中均达显著水平, $p < 0.05$, 图 2)。马尾松林土壤 CH₄ 的吸收速率较高的原因可能与长期以来受收割林下层和凋落物这种人为干扰有关(Brown 等, 1995; Mo 等, 1995, 2003)。董云社等(1996)对一温带森林的研究时观察到, 当森林表层物质枯枝落叶和腐殖层被取

掉以后, 土壤对大气中 CH₄ 的消耗氧化增加了 17%。因此, 在本研究中收割林下层和凋落物这种人为干扰活动很可能增加马尾松林土壤对大气 CH₄ 的吸收速率。

参考文献:

- Brown S, Lenart MT, Mo JM, *et al.* 1995. Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China[J]. *Biotropica*, **27**(3): 276-289.
- Butterbach-Bahl BK, Breuer L, Gasche R, *et al.* 2002. Exchange of trace gases between soils and the atmosphere in Scots pine forest ecosystems of the northeastern German lowlands 1. Fluxes of N₂O, NO/NO₂ and CH₄ at forest sites with different N-deposition[J]. *Fore Ecol Management*, **167**:123-134.
- Bekku YS, Nakatsubo T, Kume A, *et al.* 2003. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils[J]. *Appl Soil Ecol*, **22**:205-210.
- Castro MS, Steudler PA, Mello JM. 1993. Exchange of N₂O and CH₄ between the atmosphere and soil in spruce-fir forests in the northeastern United States[J]. *Biogeochemistry*, **18**: 119-136.
- Dong YS(董云社), Peng GB(彭公炳), Li J(李俊). 1996. Seasonal variations of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes from temperate forest soil(温带森林土壤排放 CO₂, CH₄, N₂O 时空特征)[J]. *Acta Geographica Sin*(地理学报), **51**(supplement):120-128.
- Huang ZF(黄展帆), Fan ZG(范征广). 1982. The climate of Dinghushan(鼎湖山的气候)[J]. *Trop Subtrop Fore Ecosystem*(热带亚热带森林生态系统研究), **1**:11-16.
- Keller M, Reiners WA. 1994. Soil atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, **8**:399-409.
- Lessard R, Rochetter P, Topp E, *et al.* 1994. Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites[J]. *Canadian J Soil Sci*, **74**:139-146.
- Magill AH, Aber JD, Hendricks JJ, *et al.* 1997. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition[J]. *Ecol Appl*, **7**(2):402-415.
- Mo JM, Brown S, Lenart MT, *et al.* 1995. Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China[J]. *Biotropica*, **27**(3):290-304.
- Mo JM, Brown S, Peng SL, *et al.* 2003. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. *Fore Ecol Management*, **175**(3):573-583.
- Steinkamp R, Butterbach-Bahl K, Papen H. 2001. Methane oxidation by soils of an limited and N fertilized spruce forest in the Blanck Forest, Germany[J]. *Soil Biochemistry*, **33**: 145-153.
- Sun XY(孙向阳). 2000. CH₄ emission flux of forest soils in (下转第 124 页 Continue on page 124)