

湖南莽山 4 种林型甲烷通量及其影响因子

张 强^{1,2}, 沈 燕^{1,2}, 韩天宇^{1,2}, 勾蒙蒙^{1,2}

(1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004;

2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南 长沙 41004)

摘 要: 以湖南省莽山地区 4 种典型森林类型(阔叶混交林、针阔混交林、常绿阔叶林及山地矮林)为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法观测 4 种森林类型土壤 CH₄ 通量, 比较其 CH₄ 通量的动态及影响因子。结果表明: 在生长季, 4 种森林类型甲烷通量总体上表现为汇, 其大小顺序为常绿阔叶林(-10.290 9±9.900 5 μg·m⁻²·h⁻¹) > 山地矮林(-14.175 8±11.559 0 μg·m⁻²·h⁻¹) > 阔叶混交林(-17.115 5±11.074 8 μg·m⁻²·h⁻¹) > 针阔混交林(-23.700 2±10.484 7 μg·m⁻²·h⁻¹); 除针阔混交林外, 甲烷通量与土壤含水量无显著的相关性, 4 种森林类型甲烷通量均与土壤温度呈显著的负相关; 甲烷通量对土壤养分的响应出现差异: 山地矮林甲烷通量与土壤全氮、全磷呈显著正相关; 常绿阔叶林甲烷通量与土壤有机碳呈显著负相关, 与土壤全氮显著正相关, 其他两种森林类型甲烷通量均与全氮呈显著正相关, 说明土壤温度和土壤全氮是影响莽山地区甲烷通量的主要因素。

关键词: 甲烷通量; 土壤温度; 土壤含水量; 土壤养分

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2017)09-0104-08

Methane fluxes and the effective factors of four forests in Mangshan, Hunan province

ZHANG Qiang^{1,2}, SHEN Yan^{1,2}, HAN Tianyu^{1,2}, GOU Mengmeng^{1,2}

(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;

2. National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry and Ecology in South China, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: Seasonal dynamics of CH₄ flux and its controlling factors for four representative forests were examined with a static closed chamber-gas chromatograph technique in Mangshan, Hunan province. These forests were evergreen broad-leaved forest, deciduous broad-leaved mixed forest, theropencedrymion and montone low brsh. The results showed that all forest was sink of CH₄ during the growing season. The CH₄ flux decreased in order of the broad-leaved forest(-10.290 9±9.900 5 μg·m⁻²·h⁻¹) > montone low brsh(-14.175 8±11.559 0 μg·m⁻²·h⁻¹) > broad-leaved mixed forest(-17.115 5±11.074 8 μg·m⁻²·h⁻¹) > theropencedrymion(-23.700 2±10.484 7 μg·m⁻²·h⁻¹). Except for theropencedrymion, soil moisture content could not affect CH₄ flux. Soil temperature could significantly affect CH₄ flux. However, the responses of CH₄ flux to soil nutrient differed among the forests. The CH₄ flux for the montone low brsh were positively correlated to soil total nitrogen and phosphorus, The CH₄ flux for the evergreen broad-leaved forest were negatively correlated to soil organic, but positively correlated to soil total nitrogen. As for the other forests, the CH₄ flux were significantly related to total nitrogen. Thus, soil temperature and total nitrogen were the main factors to affect the CH₄ flux for four forests in Nanling area.

Keywords: CH₄ flux; soil temperature; soil moisture content; soil nutrient

大气中温室气体的含量增加是导致全球气候变暖的主要原因之一, CH₄ 是一种重要的温室气体, 也是强效的温室气体, 对全球气候变暖的贡献仅次于 CO₂, 其贡献率为 18%~20%^[1]。20 世纪以来全球平均气温逐步上升, 且近 50 年的增长趋势几乎是近 100 年来的两倍^[2], CH₄ 分子具

有很强的红外吸收能力, 其单分子的增温潜势是 CO₂ 的 25 倍^[3], 是 65 万年以来的最高值^[4]。与 CO₂ 相比, CH₄ 在大气中的浓度及含量比例较少, 但其浓度增长率远高于 CO₂, 而且能参与多种大气中的重要化学反应^[5]。自工业革命以来, 全球大气 CH₄ 浓度从 3.19×10⁻⁸ mol·L⁻¹ 增加到了如今

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFA32190)

作者简介: 张 强, 硕士研究生

通讯作者: 沈 燕, 副教授; E-mail: 13873340123@163.com

引文格式: 张 强, 沈 燕, 韩天宇, 等. 湖南莽山 4 种林型甲烷通量及其影响因子[J]. 中南林业科技大学学报, 2017,37(9):104-111.

的 $7.96 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远超过了过去万年来自然因素引起的变化范围^[6], 其持续增长的趋势对于全球环境将造成长期和潜在的影响, 已经直接威胁到人类生存环境和健康, 因此研究 CH_4 的排放规律引起了科学界的高度重视。全球变化对人类生存环境的变化有着十分重要的影响。由于温室效应而引起全球气候不断变化, 温室气体造成的温室效应也成为国际社会关注的热点和焦点。

森林是陆地生态系统的主体, 森林土壤是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等主要温室气体的源、汇之一^[11]。我国亚热带森林里拥有世界上最大的亚热带常绿阔叶林, 植被生产力高, 固碳能力强, 生物多样性丰富, 被公认为是陆地上固碳潜力最大的区域之一。我国林地分布面积较广^[12], 森林覆盖率为 18.21%, 人工林保存面积达到 0.63 亿 hm^2 ^[13], 位居世界首位, 约占据全球陆地人工林总面积的 1/3。土壤中良好的环境能为氧化 CH_4 的微生物生存提供条件, 使其可以更好地吸收大气中的 CH_4 。土壤对 CH_4 氧化吸收虽然只占总汇的 5%, 但土壤是已知唯一的 CH_4 生物汇^[14], 如果没有它, 大气 CH_4 浓度的增长率将是现在的 1.5 倍^[15]。我国对 CH_4 排放的研究已有不少, 但研究多集中在湿地、草地和农田^[710]。相对而言, 森林土壤的 CH_4 排放研究较少。因此, 深入研究亚热带典型森林生态系统土壤 CH_4 的排放、吸收不仅可为以地区尺度研究温室气体排放提供基础数据, 为研究降低 CH_4 浓度的减排技术提供重要的理论依据, 同时还对

深入理解和掌握这一区域森林生态系统对于人类活动和环境变化的响应有着重要意义, 也反映出森林生态系统对于全球气候变化所产生的影响。

本研究以莽山国家级自然保护区 4 种典型森林类型, 阔叶混交林、常绿阔叶林、针阔混交林、山地矮林为研究对象, 对四种森林类型土壤 CH_4 通量进行详细观测, 比较研究 4 种森林类型土壤地表温室气体 CH_4 通量特征, 与相关环境因子的关系。旨在为 CH_4 通量的观测以及地区范围内温室气体的评估提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区域位于湖南莽山国家级自然保护区 ($112^\circ 43' \sim 113^\circ 0'E$, $24^\circ 53' \sim 25^\circ 23'N$), 属中亚热带季风湿润气候, 植被繁茂, 树种复杂, 气温、降水的垂直变化明显, 作为湖南省东南部与广东省北部的自然地理分界线以及珠江水系和长江水系的分水岭, 我国的中亚热带和南亚热带也在此过渡, 是南岭山地森林及生物多样性生态功能区的重要组成部分。由于莽山保护区地形复杂, 森林气候小气候, 常有不同小气候变化, 莽山年平均气温为 17.2°C , 在 900 m 以上的地带, 冬无严寒, 夏无酷暑。年均降水量为 1 700 mm, 降水主要集中在 4—6 月份。土壤类型为山地黄壤和黄棕壤, pH 值为酸性。本研究选自研究区域内主要的 4 种森林类型, 常绿阔叶林、针阔混交林、阔叶混交林及山地矮林样地的概况见表 1。

表 1 样地概况
Table 1 Sample plot survey

样地编号	样地名称	海拔/m	面积/ m^2	样地位置	森林类型	优势树种
NL1800GS	猛坑石	1 705	400	山顶	山地矮林	微毛柃、长叶石栎
NL1300EG	黑坑	1 300	1 500	北麓	阔叶混交林	润楠、臭椿、悬钩子
MS1300EG	鬼子寨	1 280	1 500	北麓	常绿阔叶林	厚皮香、长蕊杜鹃
MS1300zk	鬼子寨	1 280	1 500	北麓	针阔混交林	华南五针松、润楠

2 研究方法

2.1 样地设置

在南岭北麓常绿阔叶林 (MS1300EG)、南岭北麓阔叶混交林 (NL1300EG)、南岭北麓针阔混交林 (MS1300ZK) 和近山顶山地矮林 (NL1700GS) 4 种森林类型中分别选取坡度等大致相同区域设置 1 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的固定样地, 每个样地都设置有 6 个采样点, 观测 4 种林型土壤 CH_4 通量, 同时记录其相关的环境因子数据。

2.2 样品采集, CH_4 通量测定及计算方法

采用静态箱 - 气相色谱法观测莽山保护区森林土壤 CH_4 通量。取样箱为圆柱体, 由 PVC 材质制作, 由底箱和顶箱组合而成。其中上部分顶箱的半径为 20 cm, 高度约 40 cm, 底座的高度约为 15 cm, 直径略微大于顶箱, 取样时两部分配套使用。在箱体外部贴有一层反光铝箔, 以避免阳光直射对箱体内部环境造成影响。顶箱上表面设有采气孔及测温装置, 取样时则将底座和顶箱相扣, 密封以形成密闭空间。在试验开始前已提前将底箱埋入

样地土壤中数周,埋入深度约7 cm。

采样于2015年1月至2015年12月的晴好天气进行。每月采样2次,一般间隔为15 d,在特殊天气情况时稍有变动。每次取样时间为上午9:00至11:00。气样采集时间为30 min,分别在取样箱安置完毕后每隔10 min用10 mL硬质玻璃真空管收取箱内气体样品。采样结束后静态箱的底箱放置于原地不移动,将静态箱顶箱移开以待下次取样重新安置。试验采用10 mL真空玻璃管采集和存储样品,真空管气密性良好且为一次性使用,能较为准确便捷地获取箱内气体。真空管在采样中应选择无阳光直射处使用和放置,避免温度引起管内气体变化。将采集的气体样品带回实验室用Agilent 7890B型气相色谱仪进行浓度分析。

温室气体浓度用气相色谱测定,检测器为ECD/FID检测器,操作温度分别为250℃和350℃,柱箱温度为60℃,气谱柱为填充柱,柱长25 m,柱直径为320 μm。柱前安装捕集阱,去除载气回路循环中的氧气水、有机物、二氧化碳和一氧化碳,有针对氮气的RMSN-2和针对氢气的RMSHY-2两种模式。纯氮气用作ECD的载气,流速为2 mL·min⁻¹并做ECD和FID检测器的尾吹,氢气流速为48 mL·min⁻¹,空气为燃烧气,流速为500 mL·min⁻¹。CH₄使用FID检测器,柱箱运行温度为60℃,FID检测器和ECD检测器运行温度为300℃。高纯氮气(N₂)为载气,高纯氢气(H₂)作为燃气,流量都为30 mL·min⁻¹,干燥空气为辅助气且气体流量为400 mL·min⁻¹。气体分析完成时间为8 min,CH₄的出峰时间在0.85 min左右。在气体浓度测定过程中,采用标气(CH₄的体积分数为4.86 ppm)进行外标法校正。CH₄通量计算公式为。

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dCt}{dt}$$

式中: F 为CH₄通量(μg·m⁻²·h⁻¹); ρ 为标准状态下CH₄的密度; V 为采样用的静态箱体积; A 为静态箱底部土壤的面积; P/P_0 为所在样点的大气压和标准大气压的比值; T_0/T 为绝对温度与采样时的绝对温度比值; dCt/dt 为采集的CH₄在单位时间内浓度变化的斜率; F 为正值时表示土壤排放CH₄; F 为负值时表示土壤吸收CH₄。

2.3 相关环境因子分析

在采集气体样品时,同时用土壤温湿度速测

仪测定样点附近土壤表层5~10 cm处温度及含水率,并记录样点的气温、气压等。分别在样地内的6个样点周围蛇形布置5个采样点,采用环刀采集5~10 cm土壤样品后,将各样点土壤混合。现场采用四分法弃去多余的样品,保留1 kg土壤样品装于自封袋中,写好标签,带回实验室。将取回的土样摊放在实验室,除去土壤中可见的动、植物残体及石块等,让其自然风干。风干后土样过0.25 mm筛后供土壤有机质、全氮、全磷的测定。实验使用重铬酸钾水合加热法测定其土壤总有机碳(C)含量、半微量凯氏定氮法测定其全氮(N)含量和王水酸溶钼锑抗比色法测定全磷(P)含量。

2.4 数据处理

采用SPSS18.0和Excel软件对数据进行处理、统计分析及制图,用单因素方差(One-way ANOVA)分析比较4种森林类型土壤CH₄通量的差异,分析土壤温湿度、土壤总有机碳和全氮含量、全磷含量与土壤CH₄通量的相关性,确定影响土壤CH₄通量变化的主要因素。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型土壤CH₄通量比较

根据分析,4种不同森林类型CH₄通量有较为显著的差异,从2015年1月到2015年12月,常绿阔叶林土壤CH₄通量变化范围是-48.8~39.0 μg·m⁻²·h⁻¹,全年通量平均值为-5.9 μg·m⁻²·h⁻¹。针阔混交林土壤CH₄通量变化范围是-83.6~10.5 μg·m⁻²·h⁻¹,全年通量平均值为-17.4 μg·m⁻²·h⁻¹。阔叶混交林土壤CH₄通量变化范围是-34.7~32.2 μg·m⁻²·h⁻¹,全年通量平均值为-11.7 μg·m⁻²·h⁻¹。山地矮林土壤CH₄通量变化范围是-48.8~63.7 μg·m⁻²·h⁻¹,全年通量平均值为-6.2 μg·m⁻²·h⁻¹(见图1)。方差分析结果显示:4种森林类型CH₄通量之间的差异显著($P < 0.01$)。

3.2 不同森林类型土壤CH₄通量时间变化

4种森林类型土壤CH₄通量随时间动态变化有着一定的变化规律(见图2)。4种林型在12月一翌年2月土壤CH₄通量均为正,即森林土壤CH₄呈排放状态。除针阔混交林外,其他3种林型在3月份呈排放状态。4种森林类型在4—11月土壤CH₄通量均呈现吸收状态。其中,南岭北麓常绿阔叶林在4—6月期间CH₄通量虽为均为吸收

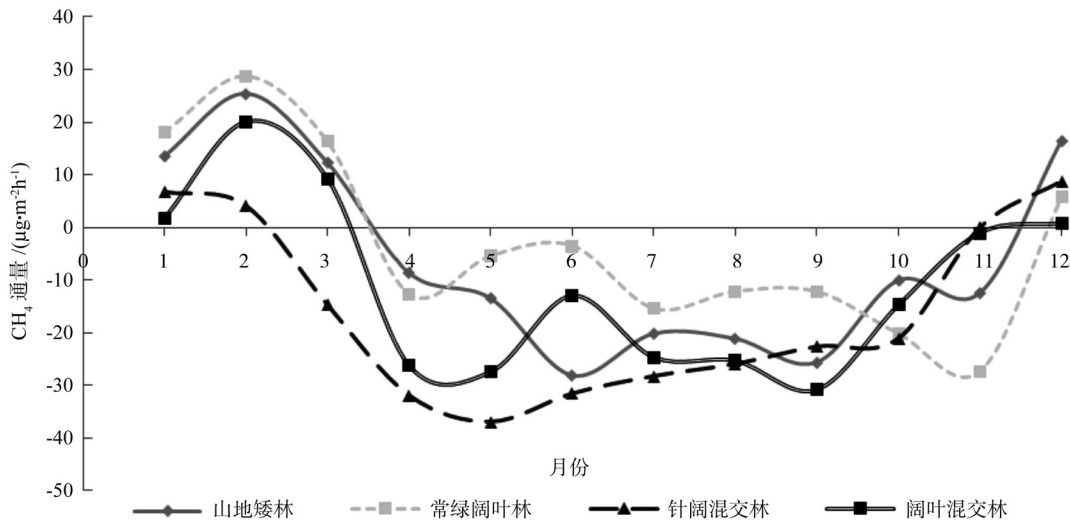


图 1 4 种林型 CH₄ 通量月动态变化
 Fig. 1 Monthly dynamic changes of CH₄ flux for four forests

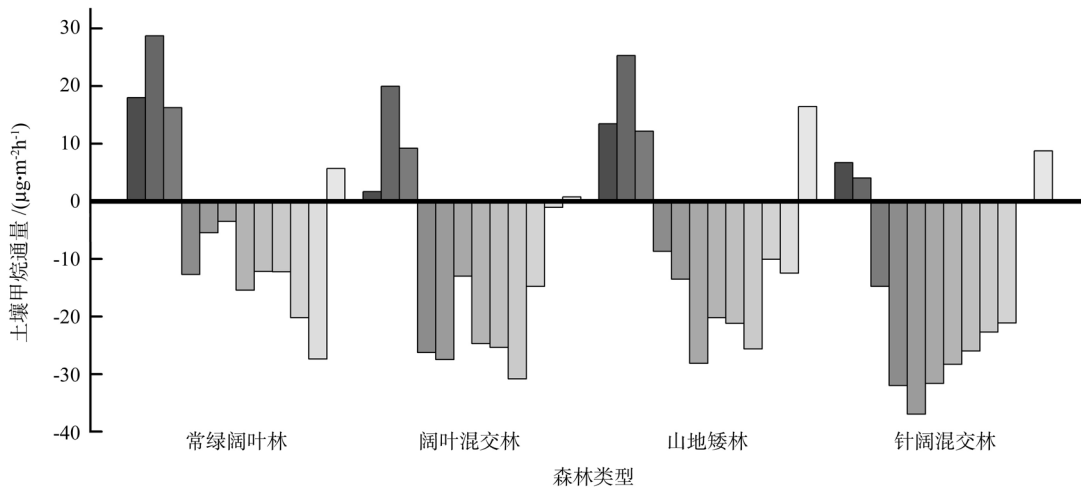


图 2 4 种林型 CH₄ 通量月均值
 Fig. 2 Mean CH₄ flux of month

但呈现出 不 稳 定 波 动 ， 随 后 在 7—11 月 土 壤 CH₄ 通 量 均 为 吸 收 并 呈 现 规 律 的 递 减 趋 势 ， 在 11 月 份 达 到 吸 收 峰 值 (- 27.352 μg · m⁻² · h⁻¹) ， 而 后 在 12 月 份 CH₄ 通 量 又 迅 速 增 加 呈 现 排 放 状 态 (5.703 μg · m⁻² · h⁻¹) 。 南 岭 北 麓 的 阔 叶 混 交 林 ， 除 6 月 外 其 余 各 月 均 呈 现 稳 定 吸 收 的 状 态 ， 6 月 为 4—11 月 中 吸 收 量 最 低 (- 12.976 μg · m⁻² · h⁻¹) ， 9 月 达 到 吸 收 峰 值 (- 30.817 μg · m⁻² · h⁻¹) 。 位 于 海 拔 1 705 m 的 山 地 矮 林 4—11 月 期 间 各 月 CH₄ 通 量 均 为 吸 收 状 态 ， 其 中 4—5 月 、 10—11 月 吸 收 量 较 小 ， 6—9 月 吸 收 量 较 大 ， 6 月 达 到 吸 收 峰 值 (- 28.118 μg · m⁻² · h⁻¹) 。 针 阔 混 交 林 4—11 月 期 间 呈 极 明 显 的 规 律 变 化 ， 3—5 月 通 量 逐 步 递 减 ， 到 5 月 达 到 全 年 的 吸 收 峰 值 (- 36.931 μg · m⁻² · h⁻¹) ； 5—11 月 通 量 逐 步 递 增 ， 到 11 月 吸 收 量 为 最 低 值 (- 0.033 μg · m⁻² · h⁻¹) 。 在 12—翌 年 3 月 期 间 ， 常 绿 阔 叶 林 (28.726 μg · m⁻² · h⁻¹) 、

阔 叶 混 交 林 (19.994 μg · m⁻² · h⁻¹) 、 山 地 矮 林 (25.327 μg · m⁻² · h⁻¹) 2 月 的 排 放 量 为 最 高 ， 针 阔 混 交 林 12 月 份 的 CH₄ 排 放 量 最 高 (8.768 μg · m⁻² · h⁻¹) 。 从 季 节 变 化 规 律 来 说 (见 图 4) ， 春 季 (3—5 月) 常 绿 阔 叶 林 土 壤 CH₄ 通 量 较 其 他 3 种 林 型 最 高 ， 平 均 为 - 0.608 μg · m⁻² · h⁻¹ ， 针 阔 混 交 林 最 低 ， 平 均 为 - 27.877 μg · m⁻² · h⁻¹ ； 夏 季 (6—8 月) 针 阔 混 交 林 通 量 想 比 春 季 变 化 不 大 ， 其 他 3 种 林 型 相 比 春 季 均 有 不 同 程 度 的 降 低 ， 其 中 山 地 矮 林 降 幅 较 大 ， 平 均 下 降 为 - 23.154 μg · m⁻² · h⁻¹ ； 秋 季 (9—11 月) 为 4 种 林 型 CH₄ 通 量 由 低 到 高 的 转 折 点 ， 4 种 林 型 CH₄ 通 量 季 平 均 值 在 秋 季 均 趋 于 平 稳 ； 冬 季 (12—翌 年 2 月) 各 林 型 均 呈 明 显 排 放 状 态 ， 其 中 山 地 矮 林 最 高 ， 平 均 为 18.427 μg · m⁻² · h⁻¹ ， 针 阔 混 交 林 最 低 ， 平 均 为 6.522 μg · m⁻² · h⁻¹ 。

3.3 相关因子对 CH₄ 通量的影响

3.3.1 土壤温度和含水率对森林土壤 CH₄ 通量的影响

土壤温度作为对 CH₄ 通量具有重要影响的因子,与 CH₄ 通量有着很大的相关性,在对地表下 10 cm 处的土壤温度与土壤 CH₄ 通量的相关性分析结果(见表 2)表明,4 种林型的土壤 CH₄ 通量与地表下 10 cm 处的土壤温度均呈极显著负相关,可以看出随着温度的升高,4 种林型对 CH₄ 的汇都有明显增强。由图 3 可知,在一定温度变化范围里,温度升高会促进 CH₄ 的吸收,这是因为土壤温度的增加。使得土壤微生物活性增强。4 种林型在 0~25℃ 范围内,土壤温度对 CH₄ 的吸收都有显著影响,这与相关研究得出的 0~10℃ 森林土壤 CH₄ 通量随温增加而减少而在 10~20℃ 时不随温度变化的结论不完全一致^[16]。土壤 CH₄ 通量在 12—翌年 2 月份均呈现排放,除针阔混交林外,其他 3 种林型在 3 月份也呈排放状态,针阔混交林在 3 月达到全年吸收的最低值,与温度数值保持一致。针阔混交林在春夏季的 CH₄ 通量随土壤

温度的变化不大,其余 3 种林型在春夏季均随土壤温度的升高土壤 CH₄ 通量有所降低,秋冬季 4 种林型 CH₄ 通量随温度的变化趋势相似(见图 4)。4 种林型之间土壤含水率差异显著($P < 0.05$),通过多重比较发现山地矮林与其他 3 种林型含水率差异显著,其他 3 种林型含水率均无显著差异。通过(见图 5)分析,山地矮林较其他 3 种林型含水率最高,但四季变化不明显。除针阔混交林外,其他 3 种林型含水率与土壤 CH₄ 通量均无相关性(见表 2)。针阔混交林土壤甲烷通量与土壤含水率显著相关($P < 0.01$),可以看出针阔混交林含水率春夏季较高,秋冬季较低。这与针阔混交林全年 CH₄ 通量的变化规律相合。

表 2 4 种林型 CH₄ 通量与土壤温度及含水率的相关系数[†]
Table 2 Relationship coefficient between CH₄ flux and soil temperature or moisture content

土壤因子	山地矮林	常绿阔叶林	针阔混交林	阔叶混交林
土壤温度	-0.719**	-0.642**	-0.744**	-0.798**
土壤含水率	0.069	-0.067	-0.667**	-0.310

† *表示 $P=0.05$ 水平上相关性显著; **表示 $P=0.01$ 水平上相关性显著。下同。

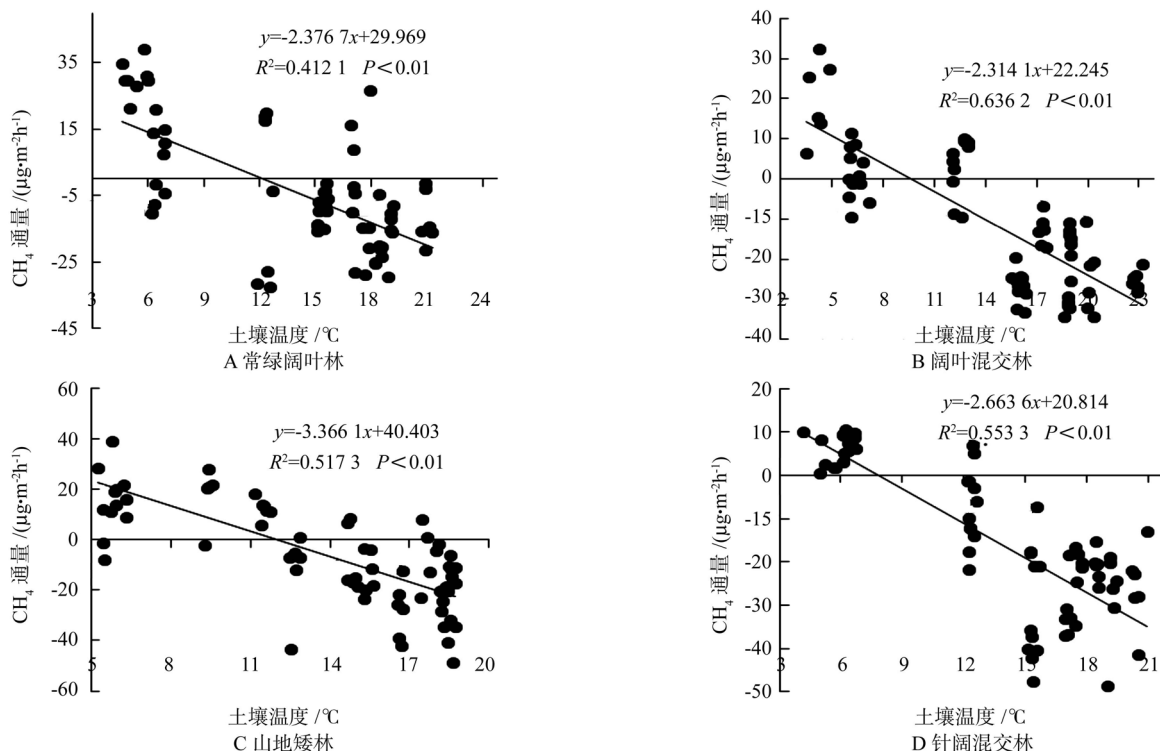


图 3 4 种林型土壤 CH₄ 通量与土壤温度的关系
Fig.3 Relationship between soil CH₄ flux and soil temperature in four forest types

3.3.2 甲烷通量与土壤养分的关系

土壤有机碳是土壤中甲烷氧化菌和产甲烷菌等微生物生长的有效基质,其含量能很大程度上影响微生物的活性,从而影响 CH₄ 排放^[19]。土

壤 N 素对土壤 CH₄ 的氧化具有很显著的作用,在森林中有报道土壤 N 对土壤氧化 CH₄ 具有很强的抑制作用^[20-21]。磷作为微生物生长、繁殖、生物活动的主要矿质元素之一,对土壤中甲烷氧化菌

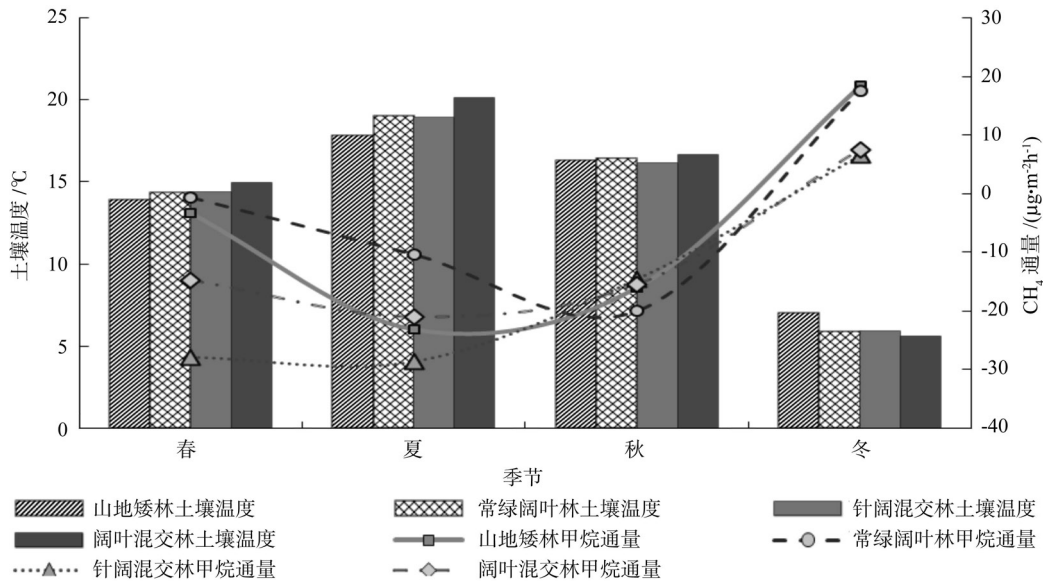


图 4 4 种林型土壤 CH₄ 通量与土壤温度季变化动态
Fig.4 Seasonal dynamics of CH₄ flux and soil temperature in four forest types

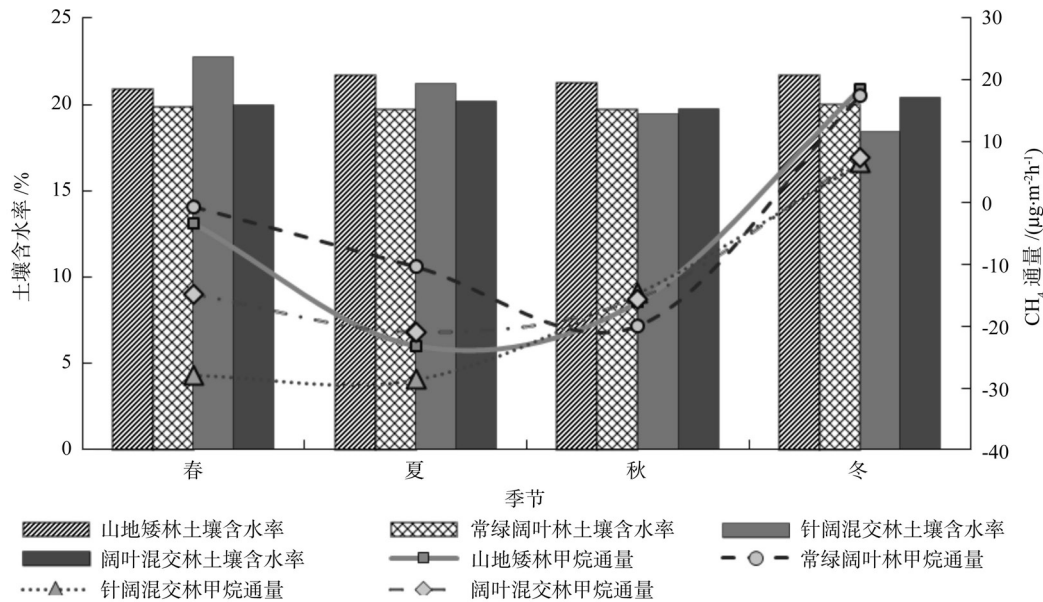


图 5 4 种林型土壤 CH₄ 通量与土壤含水率季变化动态
Fig.5 Dynamic changes of CH₄ flux and soil moisture content in four forest types

和产甲烷菌也有相对较大的影响。在对 4 种林型 CH₄ 通量与土壤有机碳、土壤全 N 和土壤全 P 的相关分析 (见表 3) 中, 4 种林型 CH₄ 通量与土壤全 N 显著正相关, 其中针阔混交林相关性极显著; 常绿阔叶林 CH₄ 通量与土壤有机 C 显著负相关, 其余 3 种林型与土壤有机 C 相关性不显著; 山地矮林与土壤全 P 显著正相关, 其余 3 种林型与土壤全 P 相关性不显著。

4 讨论

土壤 CH₄ 的排放和吸收是一个非常复杂的生物学过程, 其影响因子非常多。在森林土壤中,

表 3 4 种林型土壤 CH₄ 通量与土壤有机 C、土壤全 N、土壤全 P 的关系

Table 3 Relationship between soil CH₄ flux and soil organic C, soil total N and soil P in four forest types

土壤因子	山地矮林	常绿阔叶林	针阔混交林	阔叶混交林
土壤有机 C	-0.047	-0.428**	-0.292	-0.313
土壤全 N	0.451**	0.430**	0.677**	0.625**
土壤全 P	0.337*	-1.170	-0.056	-0.076

CH₄ 通量主要由两方面的生物过程决定的, 甲烷细菌产生排放甲烷以及甲烷氧化菌氧化甲烷。两个过程交互作用, 最终体现为森林土壤甲烷通量值 [17-18]。甲烷在土壤中的主要来源是在产甲烷菌的作用, 对土壤中含有甲基的物质脱甲基作用,

一般反应式为 $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$, 以此来源的甲烷占土壤来源的 70%^[22]。CH₄ 氧化的过程一般是甲烷 (CH₄) → 甲醇 (CH₃OH) → 甲醛 (HCHO) → 甲酸 (HCOOH) → 二氧化碳 (CO₂), 当 CH₄ 被氧化为 CO₂ 增温潜势大大减弱^[23], 在土壤微生物氧化 CH₄ 的过程中大部分的 CH₄-C 被微生物转化为生物量而非 CO₂^[24]。

4 种林型均为大气中 CH₄ 的汇, 其中针阔混交林为 4 种林型中对 CH₄ 吸收能力最强的林型。4 种林型对 CH₄ 吸收总体能力为: 针阔混交林 > 阔叶混交林 > 山地矮林 > 常绿阔叶林。这与相关研究的结论一致^[25]。常绿阔叶林和阔叶混交林中 CH₄ 通量远远低于针阔混交林, 针阔混交林中甲烷氧化菌数量较多可能是造成这一现象的主要原因^[26]。4 种林型都呈现出一定的季节变化规律, 冬季均呈现排放状态, 春、夏、秋三季均呈现不同的吸收状态与肖冬梅等^[27]的研究结果一致。

4 种林型 CH₄ 通量与土壤温度呈显著负相关, 这与甲烷氧化菌的活性有一定关系, 因为多数甲烷氧化菌为中温型微生物, 过高或过低的土壤温度都会极大地影响甲烷氧化菌的氧化作用^[27], 从而影响通量的大小。针阔混交林春、夏两季 CH₄ 通量变化不大, 但夏季土壤温度比春季秋季高, 很可能是因为当大气中 CH₄ 和 O₂ 扩散进入与土壤 CH₄ 和 O₂ 消耗的速率相同时的土壤温度就是 CH₄ 氧化的最佳温度。当地温高于最佳温度时, 由于 CH₄ 氧化菌难以与利用 O₂, 能力更强的硝化细菌和其它微生物竞争利用土壤空气中的 O₂, 使得土壤中 CH₄ 氧化菌的繁殖和活性降低^[28], 土壤氧化甲烷的能力也有所下降。

甲烷氧化菌的活性通常受氧的有效性限制^[29]。甲烷氧化菌氧化 CH₄ 的能力一般超过 CH₄ 由大气向土壤中扩散的潜力^[30], 所以土壤中含水率对 CH₄ 通量的影响也很大。在本研究中, 除针阔混交林外其他 3 种林型与土壤含水率的关系均不大, 可能是因为气体在气相中和液相中扩散的速度不同, 在气相中要快得多。湿度影响微生物的活性, 湿度低时微生物活性较低, 降低了 CH₄ 的氧化。土壤湿度较低时, 土壤 CH₄ 吸收率随土壤湿度增加而上升。当土壤湿度超一定量后, 由于大气 CH₄ 和 O₂ 向土壤中扩散受阻, 甲烷氧化菌活性开始下降^[31], 土壤 CH₄ 的吸收率随土壤湿度增加而降低。4 种林型的土壤 CH₄ 通量与土壤全氮显著正相关, 这与有关报道土壤 N 抑制甲烷氧化菌的吸收能力结果一致^[32]。森林类型也是影响土壤 CH₄ 通量主要原因, 不同植被类型对土壤养分的吸收

能力不同也是影响土壤氧化的重要原因^[33]。

本研究持续时间为 1 a, 时间较短, 无法对大的时间和空间尺度上森林 CH₄ 吸收的生物学机理、生态学机制形成系统完备的认识。土壤 CH₄ 通量与土壤有机 C、土壤全 P 没有显著相关性, 主要原因可能是样点分布在海拔 1 300 m 以上的山区, 气候多变, 没有明显的季节差异, 秋冬季时常有逆温现象影响了植物的生长周期, 导致土壤养分没有明显差异。对森林 CH₄ 通量的估算、对其进行机理分析以及研究各种影响因子的作用, 是预测温室效应趋势和调节 CH₄ 汇强度的基础。由于不同的森林类型、不同地区、不同气候的差异, 需要更为大量的检测数据作为基础。森林类型与地表温度间的交互作用对 CH₄ 通量有显著影响, 可以看出 CH₄ 通量的变化受到多种因子共同影响, 对于不同尺度的 CH₄ 通量变化机理有待进一步深入研究。

5 结 论

(1) 4 种森林类型土壤 CH₄ 通量均表现出一定的月份及季节动态变化, 且存在显著性差异 ($P < 0.01$), 总体均表现为 CH₄ 的汇。

(2) 4 种林型土壤 CH₄ 通量与土壤温度呈显著负相关 ($P < 0.01$), 针阔混交林与土壤含水率显著负相关 ($P < 0.01$), 但其他 3 种林型与土壤含水率关系不显著。

(3) 甲烷通量对土壤养分的响应出现分异: 山地矮林甲烷通量与土壤全氮、全磷呈显著正相关 ($P < 0.01$); 常绿阔叶林甲烷通量与土壤有机碳呈显著负相关 ($P < 0.01$), 与土壤全氮显著正相关 ($P < 0.01$), 其他 2 种森林类型甲烷通量均与全氮呈显著正相关 ($P < 0.01$), 土壤全氮是影响莽山地区 4 种森林类型甲烷通量的主要因素。

参考文献:

- [1] Knittel K, Boetius A. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63(1): 311.
- [2] Solomon S D, Qin D, Manning M, *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC[J]. 2007, (2): 1-21.
- [3] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers[C]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 2007: 159-254.
- [4] Spahni R, Jouzel J. Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores[J]. *Science*, 2005, 310(5752): 1317-1321.
- [5] 陈碧辉, 李跃清, 何光碧, 等. 温室气体源汇及其对气候影响的研究进展 [J]. *成都信息工程学院学报*, 2006, 21(1):123-127.
- [6] Fowler D, Pilegaard K, Sutton M A, *et al.* Atmospheric composition change: Ecosystems–Atmosphere interactions[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(33): 5193-5267.
- [7] Yang L B, Xin-Yan L I, Yan W J, *et al.* CH₄ Concentrations and Emissions from Three Rivers in the Chaohu Lake Watershed in Southeast China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4): 665-673.
- [8] 魏 达, 旭 日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究 [J]. *草地学报*, 2011, 19(3): 412-419.
- [9] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放动态 [J]. *环境科学*, 2005, 26(4):7-12.
- [10] 陈 槐, 周 舜, 吴 宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5):726-733.
- [11] Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [12] 陈 波, 王良衍. 陆地植被与全球变化中碳之间的关系 [J]. *浙江林业科技*, 2001, 21(3): 1-4.
- [13] 刘玲玲, 刘允芬, 温学发, 等. 千烟洲红壤丘陵区人工针叶林土壤 CH₄ 排放通量 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2):431-439.
- [14] 李 俊, 同小娟, 于 强, 等. 不饱和土壤 CH₄ 的吸收与氧化 [J]. *生态学报*, 2005, 25(1):141-147.
- [15] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouse gases[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1994, 38(2): 151-163.
- [16] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 1-10.
- [17] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(12): 1517-1527.
- [18] Hutsch B W, Webster C P, Powlson D S. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the broadbalk wheat experiment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(10):1307-1315.
- [19] 柳 敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(11):1412-1417.
- [20] Adamsen A P S, King G M. Methane Consumption in Temperate and Subarctic Forest Soils: Rates, Vertical Zonation, and Responses to Water and Nitrogen[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1993, 59(2): 485-490.
- [21] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamsen G. CH₄ uptake by temperate forest soil: Effect of N input and soil acidification[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(7): 871-880.
- [22] Strayer R F, Tiedje J M. Kinetic parameters of the conversion of methane precursors to methane in a hypereutrophic lake sediment[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1978, 36(2): 330-40.
- [23] Lelieveld J, Crutzen P J, Brühl C. Climate effects of atmospheric methane[J]. *Chemosphere*, 1993, 26(1-4): 739-768.
- [24] Mancinelli R L. The Regulation of Methane Oxidation in Soil[J]. *Annual Review of Microbiology*, 1995, 49(1): 581-605.
- [25] 莫江明, 方运霆, 李德军, 等. 鼎湖山主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征 [J]. *广西植物*, 2006, 26(2):142-147.
- [26] Verveveld H W V, Duine J A. Microbial growth on C₁ compounds [J]. 1987.
- [27] 肖冬梅, 王 淼, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤氮化亚氮和甲烷的通量研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10):1855-1859.
- [28] Friedrich G, Rose T, Rissler K. Effect of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 47(11): 1346-1350.
- [29] Mer J L, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(1): 25-50.
- [30] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils[J]. *Chemosphere*, 1993, 26(1): 715-720.
- [31] Fernandes S A P, Bernoux M, Cerri C C, *et al.* Seasonal variation of soil chemical properties and CO₂, and CH₄, fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon[J]. *Geoderma*, 2002, 107(3-4): 227-241.
- [32] 王智平, 胡春胜, 杨居荣, 等. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 305-309.
- [33] 黄志宏, 张宇鸿, 沈 燕, 等. 中亚热带森林地表 CH₄ 和 N₂O 通量影响因素分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(4): 56-63.

[本文编校：谢荣秀]