

西南喀斯特地区灌丛土壤 CO₂、CH₄ 通量研究

房彬^{1,2}, 李心清^{1*}, 张立科^{1,2}, 程建中¹,
王兵¹, 程红光¹, 杨放^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 灌丛生态系统是西南喀斯特地区广泛分布的生态系统类型, 在区域生态系统碳循环和碳平衡中有重要作用。为估算亚热带喀斯特地区 CO₂ 和 CH₄ 源汇现状, 评价灌丛生态系统对温室效应的影响, 以贵阳市开阳县灌丛为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法观测 CO₂ 和 CH₄ 通量的季节变化。对 2010 年 12 月到 2012 年 1 月的观测结果分析表明, 灌丛林地土壤表现为 CO₂ 的释放源和 CH₄ 的吸收汇, CO₂ 通量的变化范围为 33.20 ~ 1106.75 mg/(m² · h), 年平均通量为 342.98 mg/(m² · h); CH₄ 通量的变化范围为 -206.14 ~ -59.85 μg/(m² · h), 年平均通量为 -103.22 μg/(m² · h)。CO₂ 排放通量和 CH₄ 吸收通量均表现出明显的季节变化规律, 两者最高值均出现在夏季, 不同的是 CO₂ 排放通量最低值出现在 12 月, 而 CH₄ 吸收通量最高值则出现在 11 月。土壤温度和土壤湿度是影响灌丛土壤 CO₂ 通量的主要因子, 双因素模型($F = \alpha e^{\beta T} W^n$)较好拟合了土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的影响, 两者共同解释了 CO₂ 通量变化的 81.4%。土壤 CH₄ 吸收通量与温度存在显著正相关关系, 其中 5 cm 土壤温度同 CH₄ 吸收通量相关性最好, 但温度超过一定阈值时, 两者相关性降低。土壤 CH₄ 吸收通量与土壤湿度呈显著负相关关系表明, 水分是土壤氧化 CH₄ 的重要限制因子。

关键词: 土壤; CO₂ 通量; CH₄ 通量; 温度; 湿度; 喀斯特地区

中图分类号: P588.121 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)03-0221-08

CO₂ and CH₄ fluxes from soil of scrub forest in the karst area of southwest China

FANG Bin^{1,2}, LEE Xin-qing^{1*}, ZHANG Li-ke^{1,2}, CHENG Jian-zhong¹, WANG Bing¹,
CHENG Hong-guang¹ and YANG Fang^{1,2}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Shrub forest is an important, widely distributed ecosystem type in karst area of southwest China, playing an important role in the regional carbon cycle and balance. Our objectives were to evaluate the CO₂, CH₄ budgets of karst area of southwest China, and estimate the influence of shrub forest ecosystem on greenhouse effects. Taking shrub forest in Kaiyang country of Guizhou province as our study object, we used static enclosed chamber coupled with GC to observe the seasonal changes in soil CO₂, CH₄ fluxes. The results showed that the forest soil performed as a source for CO₂ and a sink for CH₄ to the atmosphere; annual CO₂ flux ranged from 33.20 to 1106.75 mg/(m² · h) with an average of 342.98 mg/(m² · h), and annual CH₄ flux ranged from -206.14 to -59.85 μg/(m² · h) with an average of -103.22 μg/(m² · h). There are significant seasonal variations in both CO₂ emission flux and CH₄ absorption flux: their maximums both appeared in summer, while minimum CO₂ emission flux occurred in December and minimum CH₄ absorption flux in November. Soil temperatures and soil moistures

收稿日期(Received): 2012-11-16; 改回日期(Revised): 2013-01-28; 接受日期(Accepted): 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(40872212); 中国科学院战略性科技先导专项(碳专项); 贵州省农业攻关计划项目(黔科合 NY 字 [2011]3079 号)

作者简介: 房彬(1986-), 男, 博士研究生, 地球化学专业, 研究方向为环境地球化学。E-mail: binfang87@hotmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): LEE Xin-qing, E-mail: lee@mail.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891611

FANG Bin et al.: CO₂ and CH₄ fluxes from soil in the karst area of southwest China

were the two main factors regulating the soil CO₂ flux of shrub forest. The relationship of soil respiration rate (F) with soil temperature (T) and soil moisture (W) fit well with the equation $F = \alpha e^{\beta T} W^\gamma$ (α, β, γ were constants). The results showed that soil temperatures and soil moistures together accounted for 81.4% of the seasonal variations in soil respiration rate. Soil CH₄ absorption flux increased along with the temperature, and had the highest correlation with soil temperature at the depth of 5 cm. Besides, the correlation between soil CH₄ absorption flux and soil temperature decreased as temperature increased. Significant negative correlation between CH₄ absorption flux and soil moisture indicated that soil moisture was one important factor that limits soil CH₄ oxidation.

Key words: soil; CO₂ flux; CH₄ flux; temperature; moisture; karst area

0 引言

CO₂ 和 CH₄ 是大气中最重要的两种温室气体, 两者温室效应之和占温室气体总效应的 75%^[1]。世界气象组织 2011 年在《温室气体公报》中指出, 大气 CO₂ 浓度在过去 10 年以每年 2.0 μg/g 的速度增长, 至 2010 年达到 389.0 μg/g, 比工业革命前增长了 39%; 大气 CH₄ 浓度则由工业革命前的 700 ng/g 增加到 1808 ng/g^[2]。由温室气体浓度升高带来的全球变化已成为人们关注的重大科学问题之一^[3]。

土壤碳收支在陆地碳收支中占主导地位, 是全球碳循环的重要组成部分。土壤呼吸是大气 CO₂ 的重要来源, 全球土壤碳库每年向大气的碳输出高达 (98±12) Pg, 是化石燃料燃烧排放量的 10 倍^[4]。另一方面, 土壤还是 CH₄ 的一个重要汇, 每年消耗大气 30 Tg CH₄, 约占全球 CH₄ 汇的 6%^[5-6], 对调节大气 CH₄ 的总量有重要意义。现阶段土壤对 CH₄ 消耗量的减少是造成 CH₄ 源汇不平衡的一个重要因素^[7]。森林土壤碳库占全球土壤碳库的 73%^[8], 在维持全球碳平衡和调节气候方面具有不可替代的作用; 森林土壤也是陆地生态系统中大气 CH₄ 的一个重要的汇^[9]。目前对于森林土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量的研究主要集中在温带地区的针阔叶林^[10-11], 以及亚热带地区的季风林、混交林和马尾松林^[12-13]等乔木林, 对占全国森林面积 21.9%^[14]的灌丛 CO₂ 和 CH₄ 通量的研究还比较少^[15]。

中国西南喀斯特地区特殊的地质背景造就了其生态环境的脆弱性和敏感性, 由于活跃的生物过程和化学过程, 喀斯特地质和生态系统在全球碳循环中发挥着重要作用^[16]。作为陆地生态系统碳循环的重要环节, 喀斯特地区土壤碳收支及其对温度和降水的响应需要深入研究。灌丛是西南喀斯特地

区面积较大的生态系统, 以贵州为例, 灌丛林约占国土面积的 9.48%^[17], 在陆地生态系统碳收支中有重要作用。本次工作拟以亚热带喀斯特地区灌丛林地为研究对象, 通过一年时间对地表 CO₂、CH₄ 通量及相关环境因子的观测结果, 分析灌丛林地 CO₂、CH₄ 通量变化规律, 找出影响其变化的关键因子, 为估算亚热带喀斯特地区 CO₂、CH₄ 源汇现状, 评价灌丛林生态系统温室效应提供依据。具体目标包括: (1)测定灌丛林地土壤 CO₂、CH₄ 通量, 阐明季节变化特征, 估算年均通量; (2)分析 CO₂、CH₄ 通量季节变化与环境因子主要是土壤温度和湿度的关系; (3)讨论 CO₂ 排放通量和 CH₄ 吸收通量之间的关系。

1 研究区域概况

研究地区位于贵州省贵阳市开阳县, 地理位置为 107°02'49.3"E, 27°00'39.7"N, 海拔 1130 m。地貌上, 属于云贵高原东侧梯状斜坡地带, 附近喀斯特发育较为典型。气候类型属亚热带季风性湿润气候, 四季分明, 年均气温介于 10.6~15.3 之间, 最热为 7 月, 平均温度 22.3, 最低温度为 1 月, 平均气温 2.0; 雨水充沛, 全年降水量 926.5~1419.2 mm, 降水多集中在夏季, 雨季平均为 180 d。全年日照时数 898.1~1084.7 h, 其中夏季日照时数占全年 39%。观测点位于一处山坡上, 山体岩石类型主要是石灰岩和白云岩, 山坡上灌木覆盖度较好, 优势物种为火棘、小果蔷薇和薄叶鼠李, 灌丛中偶见刺杉、柏树和松树等乔木, 此外还有一些蕨类和苔藓。土壤类型为石灰土, 土壤发育不完全, 夹杂砾石较多, 容重 1.59 g/cm³, pH 7.96, 表层土壤有机质含量 104.2 g/kg, 全氮含量 7.08 g/kg, 有效磷含量 4.06 mg/kg。

2 研究方法

2.1 气体采集、测定和通量计算

本研究选取山坡灌丛林地内原状土壤作为样地, 土壤温室气体通量监测时间为 2010 年 12 月到 2012 年 1 月, 观测频率为每月两次, 两次观测间隔为 15 d, 共观测 24 次, 基本涵盖了本地区的土壤温度和含水量的季节变化范围。观测时间从上午 8:00 持续到下午 6:00, 每 2 h 测定 1 次, 共测定 6 次, 每次测定设 3 个重复。为保证实验平行性, 每次采样过程中尽量不破坏原位土壤环境条件, 且采样点位置在观测期间保持固定。

采用较为常用的密闭静态箱法进行土壤呼吸的监测, 具体操作是, 将不透明有机玻璃密闭箱(箱体大小约为 30 cm × 30 cm × 50 cm, 顶部有小电扇和采气孔)罩在提前安置好的基座上。基座上设有密封水槽, 采样时注水以避免箱内气体和外界的交流。在密封通量箱后的 0、5、10、15 和 20 min 分别抽取箱内气体 30 mL 注入提前抽成高真空的 labco 12 mL 顶空进样瓶, 气体样品送回实验室后用气相色谱仪(Agilent 7890A)测定 CO₂ 和 CH₄ 的浓度。CO₂ 和 CH₄ 检测器均为 FID(火焰原子化检测器), 检测器温度为 250 °C, 载气是高纯氮气(99.999%), 柱箱温度为 60 °C。采用下式计算土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量(mg/(m² · h)):

$$F = \frac{60}{100} \rho_0 H \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_0 + T_a} \frac{dc_i}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为 CO₂ 或 CH₄ 通量(mg/(m² · h)); 60 和 100 为单位换算系数; ρ_0 为标准状态下 CO₂ 或 CH₄ 密度(g/L); H 为采样箱气室的高度(cm); p 为采样点的气压; p_0 为标准状态下的大气压力(1.013 × 10⁵ Pa); T_0 为绝对温度 273.15 K; T_a 为采样时箱内平均气温(°C); dc_i/dt 为采样箱内 CO₂ 或 CH₄ 浓度(μL/L)对时间 t (min) 的变化率, 正值表示排放, 负值表示吸收。

在每次监测土壤呼吸的同时, 记录箱内温度、土壤 5 cm 温度以及大气压力。温度用水银温度计读取, 大气压力由 DYM3 便携式数字大气压力表测定。

2.2 影响土壤温室气体通量环境因子分析

土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量大小与多种环境因子有关, 如土壤温度、土壤湿度、C/N 比率、大气温度、植被类型和土地利用方式等^[6,18]。本研究主要分析土壤温度和土壤湿度对 CO₂ 和 CH₄ 通量的影响。气温和土壤 5 cm 处温度在采样开始和结束时读取; 土壤体

积含水量(0 ~ 10 cm)在每次采样后由烘干法测定, 土壤容重测定用环刀法。土壤理化分析样品取自 0 ~ 10 cm 土层, 除硝态氮、铵态氮和含水量测定用新鲜土外, 其余土壤样品室内风干, 过筛。土壤基本理化性质参照土壤农化分析方法^[19]测定: 硝态氮测定采用酚二磺酸比色法, 铵态氮测定采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法, 土壤 pH 值采用电位法(水土比 5 : 1), 以上各种理化性质每月测定两次。此外, 有机质含量采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法, 有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法(olsen 法), 土壤总氮用元素分析仪(PE2400, 美国, PE 公司)测定。

2.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据整理, SPSS16.0 软件做统计分析, 图形的绘制采用 Sigmaplot 10.0。

为了分析土壤 CO₂ 通量 F 与土壤温湿度变化的关系, 我们采用双因素关系模型^[20]进行拟合:

$$F = \alpha e^{\beta T} W^\gamma \quad (2)$$

式中: F 为土壤 CO₂ 通量(mg/(m² · h)), T 为土壤 5 cm 温度(°C), W 为土壤(0 ~ 10 cm)体积含水量(%), α 、 β 和 γ 为待定系数。

Q_{10} 通过下式确定^[20]:

$$F = \alpha e^{\beta T} \quad (3)$$

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (4)$$

其中, α 、 β 为待定系数。

每个采样日三块样地共 18 次重复测定加以平均得出通量日均值, 每月测定的两次通量日值的平均值代表该月平均, 通过累加计算求得当年 CO₂ 和 CH₄ 年通量。

3 结果与分析

3.1 灌丛林地土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量变化规律

3.1.1 CO₂ 通量变化规律

2010 年 12 月到 2012 年 1 月的观测期间, 研究区 CO₂ 通量的季节变化十分明显, 呈现夏秋季高于冬春季的季节动态, 与土壤温度的变化趋势大体一致(图 1), 最大值(1106.75 mg/(m² · h))出现在 2011 年 8 月上旬, 最小值(33.20 mg/(m² · h))出现在 2011 年 12 月下旬, 全年表现为 CO₂ 的源, 由观测期内 CO₂ 通量平均值(342.98 mg/(m² · h))换算得出研究区年均 CO₂ 通量为 3.00 × 10⁴ kg/(hm² · a)(图 2)。2010 年 12 月到 2011 年 6 月, 土壤 CO₂ 通量总体呈上升

趋势; 7月份受土壤含水量降低影响, 通量出现低值; 8月份适宜的水热条件促使 CO_2 通量迅速升高至全年最高值; 之后由于持续的严重干旱, 8月下旬到9月下旬, 呼吸速率急剧下降至低谷; 10月以后, 由于降雨补充土壤水分, 使土壤呼吸速率增大至峰值; 10月和11月 CO_2 通量有两次较大波动, 但含水量并没有大的变化, 这是温度波动影响所致。2011年11月以后, 温度不断下降, CO_2 通量随之降低。本研究的土壤呼吸季节动态较一般报道的单峰型动态要复杂, 这主要是在连续观测1年中天气出现异常, 2011年7月到9月出现了较为严重的干旱, 土壤温度和水分这两个决定土壤呼吸的主要因素变化不协调。

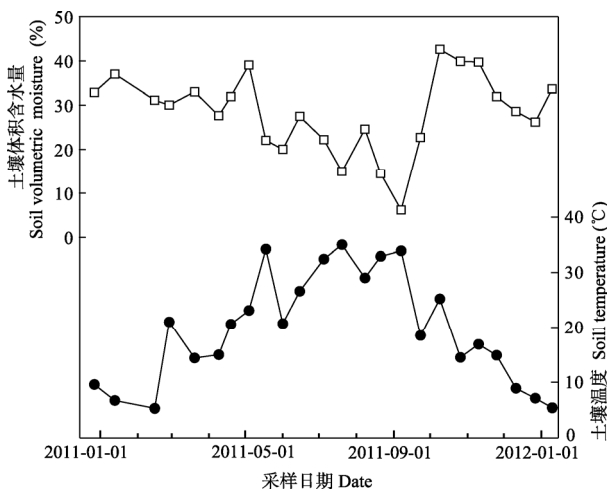


图1 土壤温度及含水量季节变化

Fig.1 Seasonal changes of soil temperatures and soil moistures

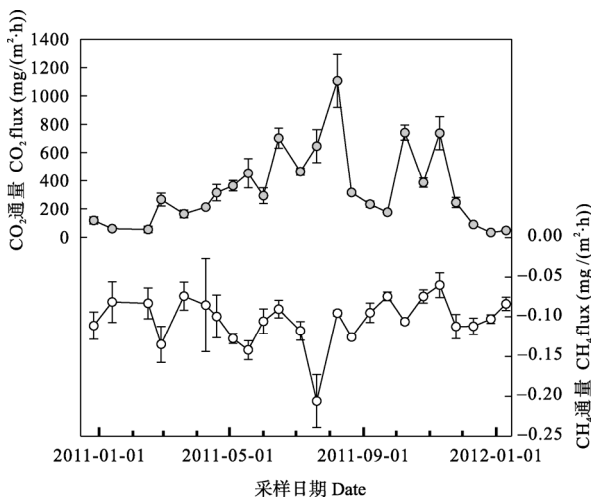


图2 土壤 CO_2 、 CH_4 通量季节变化

Fig.2 Seasonal variations of CO_2 and CH_4 fluxes from the soil

3.1.2 CH_4 通量变化规律

本研究观测结果(图2)表明, 山坡灌丛林地土壤 CH_4 通量的变化幅度为 $-206.14 \sim -59.85 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,

全年均表现为 CH_4 的汇, 根据观测期内通量平均值 $-103.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 换算得出土壤 CH_4 年通量为 $-9.04 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。从全年变化看, 山坡灌丛林地土壤 CH_4 通量季节变化并不十分明显, 夏季平均吸收速率最高, 秋季最低, 春季和冬季介于两者之间。从时间分布上看, 土壤 CH_4 吸收通量最小值 ($59.85 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 出现在秋末的11月。此后吸收通量在 $100 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上下波动, 没有明显趋势性变化。4月下旬至8月下旬, CH_4 吸收通量处于全年中的高峰期, 出现了3个峰值, 并且高低波动较大, 其中7月的吸收峰值为全年最大值 ($206.14 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), 土壤 CH_4 汇的作用达到最大。

3.2 灌丛林地土壤 CO_2 和 CH_4 通量的影响因子

3.2.1 土壤 CO_2 通量影响因子

土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的环境因子中最重要的两个因素^[18]。由图1和图2可以看出, CO_2 通量与土壤温度的季节动态总体保持一致, 统计结果显示, CO_2 通量与土壤温度和大气温度均有极显著指数正相关关系 ($R^2=0.610$ 、 0.640), 表明温度是影响灌丛林地土壤 CO_2 通量的主要环境因子。 Q_{10} 通常被用来指示土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度^[21]。根据式3和式4, 本研究中喀斯特灌丛林地土壤 Q_{10} 值为2.12, 高于喀斯特地区马尾松林地^[22], 但低于鼎湖山地区的亚热带林地^[12]。Luo *et al.*^[21]发现 Q_{10} 值随着温度升高而下降, 周存宇等^[12]的研究也表明土壤呼吸对温度的敏感程度在较低温度下要高于较高温度时。在本研究中土壤温度与土壤呼吸之间有类似情况(图3), 即温度较低时, CO_2 通量值对应的点聚集在拟合线附近, 但随着温度升高则发散开来,

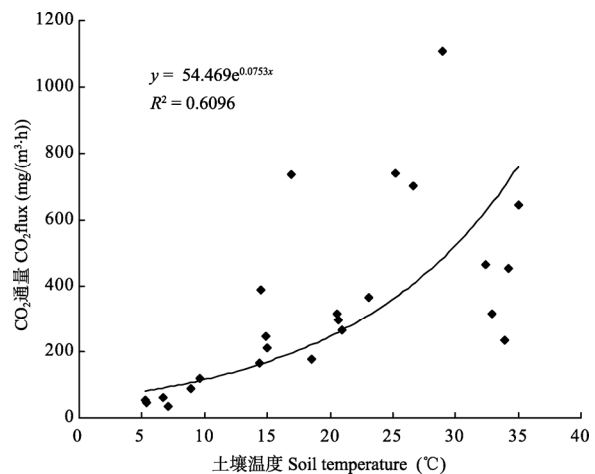


图3 土壤 CO_2 通量与土壤温度的关系

Fig.3 Relationship between soil CO_2 flux and soil temperature at the depth of 5 cm

表明温度较低时土壤呼吸受温度影响较显著。在温度较高时, 其他因素对土壤呼吸的影响不容忽视。

从全年看, 土壤湿度对土壤呼吸的影响并不显著, 可能是由于受土壤温度作用掩盖, 无法单独区分土壤湿度的作用, 但 2011 年 6 月到 9 月期间, 土壤湿度较低时, 土壤湿度对土壤呼吸的限制影响明显。本研究采用双因素模型(式 2)分析土壤温度和湿度两者对土壤呼吸的共同影响, 结果显示两者共同解释了土壤 CO₂ 通量的 81.4%, 相比单一变量模型(式 3), 这一模型能更好预测土壤呼吸(表 1), 这与同样采用双因素模型解释亚热带季风气候下土壤呼吸季节变化 64%~90%的研究结果相似^[23]。对于具有典型亚热带季风湿润气候的西南喀斯特地区, 气温季节变化大且降雨分配不均, 双因素模型拟合土壤温度和湿度估测土壤呼吸的季节变化更具有适用性。

3.2.2 土壤 CH₄ 通量影响因子

从图 1 和图 2 中可以看出, CH₄ 吸收通量随温度升高而增大。分别将 CH₄ 吸收通与气温及土壤 5 cm 温度做相关分析发现, CH₄ 吸收通量和土壤 5 cm 温度表现为极显著相关($R^2=0.288, p < 0.01$), 与气温表现为显著相关($R^2=0.250, p < 0.05$)。CH₄ 通量和土壤 5 cm 温度相关性最高。已有研究表明, 土壤微生物氧化 CH₄ 主要发生在相对较浅的次表层土壤, 通常 5~15 cm 深, 此深度土壤 CH₄ 氧化菌数量最大, 活性也最强^[24-25], 因此土壤 5 cm 温度能较准确反映温度对土壤微生物的影响。温度是土壤 CH₄ 通量的重要控制因素, 通过影响土壤微生物活性以及 CH₄ 和 O₂ 扩散速率进而影响土壤吸收 CH₄, 这与 Liu *et al.*^[26]对丘陵山区林地及 Iqbal *et al.*^[27]对农田、林地得出的结论是一致的。

当土壤温度较低时(小于 10 °C), 土壤各种微生物的活性都较弱, 大气 CH₄ 和 O₂ 扩散进入土壤的速率高于 CH₄ 氧化菌对 CH₄ 和 O₂ 的消耗速率, 此时温度是 CH₄ 氧化的主要限制因素, 因而土壤温度对 CH₄ 氧化速率有正效应。当温度进一步升高时, CH₄ 氧化菌的数量、活性及 CH₄ 和 O₂ 扩散速率继续增加,

相应 CH₄ 氧化速率也会提高, 但由于 CH₄ 氧化菌有较强亲和力, 所需活化能较低, 以及土壤空气 CH₄ 浓度增加有限, 使得 CH₄ 氧化菌数量及活性增加缓慢, 使得 CH₄ 氧化速率对温度的响应减弱^[28]。另外, 土壤中硝化细菌等微生物的生存和竞争利用 O₂ 的能力强于 CH₄ 氧化菌, 导致 CH₄ 氧化菌的 O₂ 供给处于不饱和状态, 限制了 CH₄ 氧化菌的活性及自身繁殖^[29], 这也是造成 CH₄ 氧化速率减小的原因。从不同温度范围土壤 CH₄ 吸收通量与温度相关性(表 2)来看, 温度在 -5~10 °C 之间时, CH₄ 吸收通量与温度的相关系数最大, 当温度升高至 10~25 °C 及 25~40 °C 时, 相关系数随之逐渐降低, 差异显著。由此可见, 温度对于喀斯特山地灌丛土壤 CH₄ 吸收通量的影响取决于温度的范围, 较低温度范围内, 温度的改变对 CH₄ 吸收通量的影响更大。在本研究中, 温度较高的 9、10 月份, 土壤 CH₄ 吸收通量却处在较低范围, 这表明温度不是惟一主要的影响因素。

CH₄ 和 O₂ 供应不足通常是土壤氧化 CH₄ 的限制因素, 而水分是 CH₄ 和 O₂ 扩散的重要限制因子^[6], CH₄ 氧化菌的活性也受土壤水分的显著影响^[30], 因而土壤水分是土壤氧化 CH₄ 的重要影响因子。全年范围内, 土壤湿度的季节变化十分明显, 2010 年 12 月到 2011 年 4 月期间, 土壤湿度在 32%(体积含水量, 下同)上下波动, 经偏相关分析发现温度是这一时期影响 CH₄ 通量的主要因子。2011 年 4 月以后, 由于天气干旱的原因, 土壤湿度持续降低, 加上这一时期温度较高, 水热条件适宜 CH₄ 的氧化, 因此夏季 CH₄ 吸收通量全年最高。进入 9、10 月份以后, 由于降雨增多, 土壤湿度大幅增大, 湿度范围为 32%~43%, 平均湿度为 35%, 至 11 月达到全年最高值, CH₄ 吸收通量在波动中降至全年最低值, 说明土壤湿度是秋季 CH₄ 通量的主要限制因素。

将 CH₄ 吸收通量与土壤湿度做相关分析, 发现两者呈现显著负相关关系($R^2=0.170, p < 0.05$), 表明土壤含水量增加限制了 CH₄ 和 O₂ 的扩散, 从而抑制了 CH₄ 的氧化, 这与 Werner *et al.*^[31]在中国西南季

表 1 土壤 CO₂ 通量(F)与土壤温度(T)和土壤湿度(W)的统计模型
Table 1 Models of soil CO₂ flux (F) against soil temperature (T) and soil volumetric moisture (W)

模型 Model	回归方程 Regression model	决定系数 R^2	显著水平 p	样本数 n
式 2	$F=0.443 \cdot e^{0.108T} \cdot W^{1.273}$	0.814	<0.001	24
式 3	$F=54.5 \cdot e^{0.075T}$	0.610	<0.001	24

表 2 不同温度范围土壤 CH₄ 通量与气温及土壤温度相关性
Table 2 Correlation analysis between soil CH₄ flux and temperature in different ranges of temperature

温度范围 () Temperature range	气温 Air temperature	土壤 5 cm 温度 Soil temperature	样本数 <i>n</i>
-5 ~ 10	-0.646	-0.903*	6
10 ~ 25	-0.469	-0.652*	10
25 ~ 40	-0.150	-0.610	8
-5 ~ 40	-0.500*	-0.537**	24

注: *表示相关性显著($p < 0.05$), **表示相关性极显著($p < 0.01$)。

表 3 中国不同气候带林地土壤 CO₂、CH₄ 年通量比较
Table 3 Contrast of annual soil CO₂ and CH₄ fluxes of forests in different climatic zones in China

气候带 Climatic zone	纬度 Latitude (N)	植被类型 Crop	土壤 CO ₂ 通量 Soil CO ₂ flux (mg/(m ² · h))	土壤 CH ₄ 通量 Soil CH ₄ flux (μg/(m ² · h))	文献来源 Reference
亚热带 Subtropical zone	23°09' ~ 23°11'	针叶林	250.4	-	[12]
	23°09' ~ 23°11'	常绿阔叶林	475.8	-	[12]
	26°44'	针叶林	356.0	-	[33]
	26°44'	针叶林	-	- 15.5	[13]
	26°22'	灌丛	-	- 110.7	[15]
	26°44'	灌丛	-	- 53.3	[15]
	27°00'	灌丛	343.0	- 103.2	本研究
温带 Temperate zone	27°03'	常绿阔叶林	-	- 44.9	[35]
	39°54'	针叶林	-	- 20.5	[10]
	39°58'	针叶林	98.8	-	[34]
	39°58'	落叶阔叶林	129.2	-	[34]
	45°24'	针叶林	150.5 ~ 738.1	-	[11]
	45°24'	落叶阔叶林	179.0 ~ 945.6	-	[11]
	47°24'	针阔混交林	-	- 63.1 ~ 48.8	[36]

节性热带雨林、橡胶园以及刘玲玲等^[13]在亚热带针叶林的研究结果是一致的, 但与 Liu *et al.*^[26]在亚热带丘陵林地得出的结论相反, 造成这种差异的原因在于对不同的土壤类型, 水分对 CH₄ 通量的影响是双重的。当土壤含水量较低时, 水分含量的提高可以减少微生物水分胁迫, 有利于 CH₄ 氧化菌发挥活性, 提高土壤 CH₄ 吸收能力; 但随着水分含量进一步增加, CH₄ 扩散受到限制, 又会抑制 CH₄ 的氧化。本研究区的土壤发育不完全, 夹杂砾石较多, 容重达到 1.59 g/cm³, 总孔隙度较小(约为 44.5%), 这使得水分易布满土壤孔隙, 限制空气扩散, 进而抑制 CH₄ 氧化, 因此出现 CH₄ 吸收通量随土壤湿度增加而降低的现象。

3.3 土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收的关系

在一年的观测期内, 土壤 CO₂ 排放速率与 CH₄ 吸收速率之间趋向呈正相关关系, 但未达显著水

平。土壤对 CH₄ 的氧化过程为纯生物过程^[32], 温度能制约有机质分解、调节 CH₄ 氧化菌活性并影响 CH₄ 和 O₂ 扩散速率, 而水分通过影响土壤通气状况影响土壤吸收 CH₄。土壤呼吸作用主要是微生物矿化作用和植物根际呼吸, 受同样环境因子的影响。研究区土壤 CO₂ 排放与 CH₄ 吸收呈正相关提示在今后灌丛林地碳循环研究以及温室气体源汇效应评估中, 不仅要考虑 CO₂ 的排放, 还要考虑 CH₄ 的贡献。

3.4 国内不同地区林地土壤 CO₂、CH₄ 通量比较

将本研究中 CO₂、CH₄ 通量与国内其他地区林地的研究结果进行了比较(见表 3)。从表 3 可知, 研究区灌丛林地土壤 CO₂ 通量处于同属于亚热带地区的江西千烟洲^[13, 33]、广东鼎湖山^[12]的针叶林及阔叶林土壤 CO₂ 通量变化范围之内, 高于温带林地^[11, 34], 反映出土壤 CO₂ 通量随纬度降低而升高的趋势, 出现这种现象的原因除了不同区域的植被及土壤类型差异

外, 可能主要原因在于低纬度地区较高的温度更有利于土壤呼吸。旱地生态系统的碳收支(NEP)由土壤异养呼吸和净初级生产力(NPP)共同决定。为精确估算生态系统碳收支, 必须对自养呼吸和异养呼吸占土壤呼吸的比例进行量化, 这是以后喀斯特地区林地碳通量研究需要加强之处。从表3的对比中还可发现, 本研究的灌丛林土壤 CH₄ 吸收通量明显高于亚热带和温带的针叶林及阔叶林^[13,35,10,36]。这种差异除了与不同研究区的气候条件、土壤理化性质相关外, 群落组成可能是一个重要的原因。

4 结 论

(1)全年范围内, 喀斯特灌丛林土壤 CO₂ 排放通量和 CH₄ 吸收通量的变化幅度分别为 33.20 ~ 1106.75 mg/(m² · h)和 -206.14 ~ -59.85 μg/(m² · h), CO₂ 年均释放通量为 342.98 mg/(m² · h), CH₄ 年均吸收通量为 103.22 μg/(m² · h)。

(2)土壤温度是影响 CO₂ 通量的主要因素, 土壤 CO₂ 通量随温度升高呈极显著幂函数增加; 土壤水分对土壤 CO₂ 通量的影响不显著, 但干旱造成的水分胁迫却能明显影响土壤呼吸速率; 双因素模型可以很好拟合土壤温度和土壤湿度对土壤 CO₂ 通量的共同影响。

(3)CH₄ 吸收通量与土壤 5 cm 温度呈极显著正相关关系, 温度越高, 越利于土壤对 CH₄ 的吸收, 但随着温度升高二者相关性降低, 表明温度影响 CH₄ 吸收通量的重要性会随温度升高而下降; CH₄ 吸收通量受土壤湿度的限制影响明显, 随着土壤含水量增加, 土壤通透性变差, 进而抑制 CH₄ 氧化。

(4)CO₂ 排放通量及 CH₄ 吸收通量均表现出明显的季节性变化规律, 受水热条件等共同因素的影响, 两者趋向正相关关系, 但未达显著水平, 要进一步确定在何种条件下形成何种关系, 还需深入研究。

参考文献(References):

[1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey D W, Haywood J, Lean J, Lowe D C, Myhre G, Nganga J, Prinn R, Raga G, Schulz M, Van Dorland R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 131-234.

[2] WMO. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2010 [J]. WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2011, 7: 1-4.

[3] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰. 全球变化科学进展与未来趋势 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 467-469.
Ye Du-zheng, Fu Cong-bin, Dong Wen-jie. Advances and trends of global changes studies [J]. Adv Earth Sci, 2002, 17(4): 467-469 (in Chinese).

[4] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.

[5] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. Eur J Soil Biol, 2001, 37(1): 25-50.

[6] Dalal R C, Allen D E, Livesley S J, Richards G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: A review [J]. Plant Soil, 2008, 309(1): 43-76.

[7] Ojima D S, Valentine D W, Mosier A R, Parton W J, Schimel D S. Effect of land use change on methane oxidation in temperate forest and grassland soils [J]. Chemosphere, 1993, 26(1): 675-685.

[8] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.

[9] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, Aber J D, Bowden R D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils [J]. Global Biogeochem Cy, 1995, 9: 1-1.

[10] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH₄ 排放通量的研究 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 173-176.
Sun Xiang-yang. CH₄ emissions flux of forest soil in lower mountain area, Beijing [J]. Soil Environ Sci, 2000, 9(3): 173-176 (in Chinese with English abstract).

[11] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO₂ 通量的影响 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 286-294.
Yang Jin-yan, Wang Chuan-kuan. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forest in northeastern China [J]. J Plant Ecol, 2006, 30(2): 286-294 (in Chinese with English abstract).

[12] 周存宇, 周国逸, 张德强, 王迎红, 刘世忠. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究 [J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(): 175-182.
Zhou Cunyu, Zhou Guoyi, Zhang Deqiang, Wang Yinghong, Liu Shizhong. CO₂ efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain, China [J]. Sci China (D), 2004, 34(): 175-182 (in Chinese).

[13] 刘玲玲, 刘允芬, 温学发, 王迎红. 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.
Liu Ling-ling, Liu Yun-fen, Wen Xue-fa, Wang Ying-hong. CH₄ emission flux from soil of pine plantations in the Qianyanzhou red earth hill region of China [J]. J Plant Ecol, 2008, 32(2): 431-439 (in Chinese with English abstract).

[14] 王兵, 魏江生, 胡文. 中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估 [J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1936-1945.
Wang Bing, Wei Jiang-sheng, Hu Wen. The assessment of forest ecosystem services evaluation for shrubbery-economic

- forest-bamboo forest in China [J]. *Acta Ecol Sinica*, 2011, 31(7): 1936–1945 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘芳, 刘丛强, 王仕禄, 吕迎春. 黔中非农业土壤 CH₄ 的地-气交换及其影响因素 [J]. *地球与环境*, 2009 (2): 147–152.
Liu Fang, Liu Cong-qiang, Wang Shi-lu, Lü Ying-chun. Fluxes of CH₄ from non-agricultural soils in central Guizhou Province and their affecting factors [J]. *Earth Environ*, 2009 (2): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势 [J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 1–12.
Liu Cong-qiang, Lang Yun-chao, Li Si-liang, Piao He-chun, Tu Cheng-long, Liu Tao-ze, Zhang Wei, Zhu Shu-fa. Researches on biogeochemical processes and nutrient cycling in karstic ecological systems, southwest China: A review [J]. *Earth Sci Front*, 2009, 16(6): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- [17] 贵州省林业厅林政处. 贵州省森林资源现状 [Z]. <http://www.gzforestry.gov.cn/>, 2008.
Forestry province department of Guizhou. Status of forest resources in Guizhou province [Z]. <http://www.gzforestry.gov.cn/>, 2008.
- [18] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 1–6.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12–289.
Lu Ru-kun. Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12–289 (in Chinese).
- [20] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biol*, 2001, 7(6): 667–677.
- [21] Luo Y, Wan S, Hui D, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622–625.
- [22] 程建中, 李心清, 周志红, 王兵, 邢英, 彭艳, 程红光, 闫慧, 庞小兵, 黄代宽. 西南喀斯特地区几种主要土地覆被下土壤 CO₂-C 通量研究 [J]. *地球化学*, 2010, 39(3): 258–265.
Cheng Jian-zhong, Lee Xin-qing, Zhou Zhi-hong, Wang Bing, Xing Ying, Peng Yan, Cheng Hong-guang, Yan Hui, Pang Xiao-bing, Huang Dai-kuan. Studies on soil CO₂-C fluxes of several major types of land covers in the karst region of southwestern China [J]. *Geochimica*, 2010, 39(3): 258–265 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性 [J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960–1968.
Wang Xiao-guo, Zhu Bo, Wang Yan-qiang, Zheng Xun-hua. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions [J]. *Acta Ecol Sinica*, 2007, 27(5): 1960–1968 (in Chinese with English abstract).
- [24] Koschorreck M, Conrad R. Oxidation of atmospheric methane in soil: Measurements in the field, in soil cores and in soil samples [J]. *Global Biogeochem Cy*, 1993, 7(1): 109–121.
- [25] Borken W, Davidson E A, Savage K, Sundquist E T, Steudler P. Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38(6): 1388–1395.
- [26] Liu Hui, Zhao Ping, Lu Ping, Wang Yue-Si, Lin Yong-Biao, Rao Xing-Quan. Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China [J]. *Agr Ecosyst Environ* 2008, 124(1/2): 125–135.
- [27] Iqbal J, Lin S, Hu R, Feng M. Temporal variability of soil-atmospheric CO₂ and CH₄ fluxes from different land uses in mid-subtropical China [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43(37): 5865–5875.
- [28] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对土壤氧化大气 CH₄ 的影响 [J]. *生态学杂志*, 2003, 22(3): 54–58.
Ding Wei-xin, Cai Zu-cong. Effect of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils [J]. *Chinese J Ecol*, 2003, 22(3): 54–58 (in Chinese with English abstract).
- [29] Kravchenko I, Boeckx P, Galchenko V, Van Cleemput O. Short-and medium-term effects of NH₄⁺ on CH₄ and N₂O fluxes in arable soils with a different texture [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34(5): 669–678.
- [30] Czepiel P M, Crill P M, Harriss R C. Environmental factors influencing the variability of methane oxidation in temperate zone soils [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100(D5): 9359–9364.
- [31] Werner C, Zheng X, Tang J, Xie B, Liu C, Kiese R, Butterbach-Bahl K. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China [J]. *Plant Soil*, 2006, 289(1): 335–353.
- [32] Nesbit S P, Breitenbeck G A. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 1992, 41(1): 39–54.
- [33] 周志田, 成升魁, 刘允芬, 李家永. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放规律初探 [J]. *资源科学*, 2002, 24(2): 83–87.
Zhou Zhi-tian, Cheng Sheng-kui, Liu Yun-fen, Li Jia-yong. CO₂ emission of soil under different land-use types in subtropical red soil hilly areas in China: Preliminary exploration [J]. *Resour Sci*, 2002, 24(2): 83–87 (in Chinese with English abstract).
- [34] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119–126.
Liu Shao-hui, Fang Jing-yun, Kivota Makoto. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China [J]. *Acta Phytocol Sinica*, 1998, 22(2): 119–126 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陈匆琼, 杨智杰, 谢锦升, 刘小飞, 钟小剑. 中亚热带米槠天然林土壤甲烷吸收速率季节变化 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 17–22.
Chen Cong-qiong, Yang Zhi-jie, Xie Jin-sheng, Liu Xiao-fei, Zhong Xiao-jian. Seasonal variations of soil CH₄ uptake rate in *Castanopsis carlesii* forest in mid-subtropical China [J]. *Chinese J Appl Ecol*, 2012, 23(1): 17–22 (in Chinese with English abstract).
- [36] 肖冬梅, 王焱, 姬兰柱, 韩士杰, 王跃思. 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.
Xiao Dong-mei, Wang Miao, Ji Lan-zhu, Han Shi-jie, Wang Yue-si. Soil N₂O and CH₄ fluxes in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountains [J]. *Chinese J Appl Ecol*, 2004, 15(10): 1855–1859 (in Chinese with English abstract).