

云南哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量特征

陈丽娟^{1,5}, 周文君^{1,2,5*}, 易艳芸^{1,5}, 宋清海^{1,2}, 张一平^{1,2}, 梁乃申⁴,
鲁志云^{1,3}, 温韩东^{1,3}, MOHD Zeeshan¹, 沙丽清^{1,2,5,6*}

1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303; 2. 中国科学院核心植物园植物生态中心, 云南 勐腊 666303;
3. 中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南 景东 676209; 4. 日本国立环境研究所, 筑波 305—8506;
5. 中国科学院大学, 北京 100049; 6. 中国科学院西双版纳热带植物园公共技术中心, 云南 勐腊 666303

摘要: 甲烷 (CH₄) 是仅次于二氧化碳 (CO₂) 的重要温室气体, 对全球气候变化有重要的反馈作用。亚热带森林土壤是全球陆地生态系统重要的 CH₄ 汇, 但因在亚热带的观测较少, 致使模型估算得出的结果具有不确定性, 因此需对土壤 CH₄ 通量进行现场观测和实验, 以便准确估计亚热带森林土壤 CH₄ 通量及其对该生态系统碳汇能力的贡献。采用大型多点自动密闭箱式自动连续测定法在哀牢山亚热带常绿阔叶林开展土壤 CH₄ 通量、气温 (t_a)、地表温度 (t_0)、土壤 5 cm 温度 (t_5)、降雨量 (P) 和土壤含水量 (C_{sw}) 进行连续 1 年定位观测。结果表明, (1) 云南哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤为 CH₄ 的汇, 年通量为 $(-11.79 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均速率为 $(-0.13 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 呈现出显著的季节动态, 表现为干季土壤 CH₄ 的吸收通量 $[(-0.17 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$ 显著高于雨季 $[(-0.10 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}]$ ($P < 0.05$)。 (2) 土壤 CH₄ 通量与地表温度 ($r^2 = 0.2125$, $P < 0.001$)、土壤 5 cm 温度 ($r^2 = 0.1948$, $P < 0.001$) 和气温 ($r^2 = 0.0983$, $P < 0.001$) 呈显著相关关系, 但土壤 CH₄ 通量与土壤 5 cm 温度的相关关系在 12.35 °C 由正相关转为负相关。 (3) 土壤 CH₄ 通量对土壤含水量的变化响应较温度敏感, 土壤含水量可解释其 90.36% 的相关性 ($P < 0.001$), 单因素和双因子关系模型进一步证明土壤含水量是调节哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量的主导因子。 (4) 在 20 年和 100 年时间尺度上, CH₄ 通量的全球增温潜势 (global warming potential, GWP) 分别可以抵消土壤 CO₂ 排放产生增温潜势的 2.2% 和 0.7%, 可以增加该生态系统碳汇的 10.6% 和 3.5%。为此, 在未来降水格局变化的情景下, 土壤含水量可用于预测哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量的变化和生态系统 CH₄ 汇的强度, 进而反映其对该森林生态系统碳汇能力的贡献。

关键词: 亚热带森林土壤; CH₄ 通量; 土壤含水量; 温度敏感性 (Q_{10}); 全球增温潜势

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.05.010

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2022) 05-0949-12

引用格式: 陈丽娟, 周文君, 易艳芸, 宋清海, 张一平, 梁乃申, 鲁志云, 温韩东, MOHD Zeeshan, 沙丽清, 2022. 云南哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量特征[J]. 生态环境学报, 31(5): 949-960.

CHEN Lijuan, ZHOU Wenjun, YI Yanyun, SONG Qinghai, ZHANG Yiping, LIANG Naishen, LU Zhiyun, WEN Handong, MOHD Zeeshan, SHA Liqing, 2022. Characteristics of soil CH₄ flux in the subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain, Yunnan, southwest China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 31(5): 949-960.

甲烷 (CH₄) 作为主要的温室气体成分之一, 对温室效应的贡献率为 15%, 仅次于二氧化碳 (CO₂) (IPCC, 2013), 其相对重要性在于其较短的大气寿命和较强的全球增温潜势 (Saunio et al., 2020)。在 20 年和 100 年时间尺度上, CH₄ 辐射增温效应分别是 CO₂ 的 84 倍和 28 倍 (IPCC, 2013)。IPCC (2021) 报告认为, 2019 年的大气 CH₄ 浓度是 1750 年的 2.56 倍, 达历史最高水平, 并呈现出不断增加的趋势 (IPCC, 2021)。全球变暖导致土

壤 CH₄ 吸收量增加, CH₄ 汇增加将分别抵消 1.5 °C 和 3.0 °C 增温引起的 CO₂ 排放增量的 9% 和 7% (Wang et al., 2021)。森林占陆地 CH₄ 汇总量的 52% (Kirschke et al., 2013; Ni et al., 2018), 在全球气候变化中具有重要地位。对森林 CH₄ 汇评估多基于模型, 导致 CH₄ 汇可能被大大高估 (Ni et al., 2018; Feng et al., 2020), 森林 CH₄ 源汇能力评估不准确导致全球陆地生态的碳汇评估的不确定性。由此可见, 在碳达峰与碳中和的背景下, 准确评估森林土

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870467; 42073080); 云南省自然科学基金项目 (2019IB018); 云南省第四批博士后定向培养项目; 中国科学院“一三五”专项 (2017XTBG-F01; 2017XTBG-T01); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目 (202205AC160045)

作者简介: 陈丽娟 (1996 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为全球变化生态学。E-mail: chenlijuan@xtbg.ac.cn

*通信作者: 沙丽清 (1963 年生), 男, 研究员, 博士, 研究方向为土壤生态与环境生态。E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

周文君 (1977 年生), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为全球变化生态学。E-mail: zhouwj@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2022-01-26

壤的CH₄通量及其调控的关键影响因素对于准确评估森林生态系统对气候变化的贡献至关重要。

森林土壤 CH₄ 收支对全球的温室气体贡献显著 (Tian et al., 2016)。目前对热带 (Yan et al., 2008; Lang et al., 2019; Yu et al., 2021; Zhou et al., 2021a)、亚热带 (菊花等, 2016a, 2016b)、温带 (刘岳坤等, 2019) 和北方高纬度森林 (Grace, 2004; 何姗等, 2019) 的研究表明, 森林土壤均表现为 CH₄ 的汇, 对减少大气中的 CH₄ 具有重要作用。不同森林生态系统因植被、降水、温度等不同导致土壤 CH₄ 通量和汇的水平存在差异, 如温带的东灵山油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林土壤 CH₄ 通量为 $-6.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (杜睿等, 2004), 高于亚热带的紫金山针阔混交林 ($-3.25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) (闫新利, 2018) 和华南丘陵区的马尾松 *Pinus massoniana* 林 [$(-3.41\pm 0.3) \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$] (刘惠等, 2008); 西双版纳热带季节雨林的 CH₄ 汇 [$(-12.83\pm 21.02) \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$] (Zhou et al., 2021a) 则比海南山地雨林的 ($-1.63 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) (白贞智等, 2017) 高。在通量估算时, 多数研究依托实地观测数据获得森林土壤 CH₄ 通量动态以及与环境因子如温度、土壤含水量和土壤理化性质的关系进行模型估算, 估算过程多由点到面进行, 而不同的研究区域间存在很大差异, 且观测多不连续, 致使估算结果具有很大的不确定, 为此, 野外连续高频观测将为模型的准确模拟提供数据支持, 为区域土壤 CH₄ 通量的估算提供证据。

众多研究表明, 土壤 CH₄ 生产与氧化过程均与环境因子紧密相关, 并通过其生物过程吸收大气中的 CH₄ 来调节大气中 CH₄ 的浓度 (Mer et al., 2001; Zhou et al., 2021b)。这些影响因子如溶解态有机碳、土壤 CO₂ 浓度、土壤溶解态 O₂ 浓度、土壤含水量 (刘惠等, 2008)、土壤温度 (Feng et al., 2020; 耿世聪等, 2013; 何姗等, 2019)、土壤氮形态与含量 (刘岳坤等, 2019) 以及大气降水、穿透水 (Castro et al., 1994)、凋落物输入 (高明磊等, 2021) 等。而在众多影响因子中, 土壤温度和含水量因调节了土壤甲烷氧化菌和产甲烷菌活性而对土壤 CH₄ 通量具有主要作用, 促使温度 ($P<0.05$, $r^2=0.2878$, 刘玲玲等, 2008; $P<0.01$, 菊花等, 2016b) 和土壤含水量 ($P<0.05$, $r^2=0.5193$, 刘玲玲等, 2008; $P<0.01$, $r^2=0.76$, 李君怡等, 2022) 与 CH₄ 通量相关关系显著。但是温度与土壤含水量的主控作用却因研究区域、森林类型和土壤特征而存在差异 (莫江明等, 2006; 房彬等, 2013)。为此, 需根据实际观测获得各森林类型土壤 CH₄ 通量及其主要的调控因子。

亚热带 (含热带) 森林土壤是 CH₄ 重要的汇, 在气候变化情景下对全球碳平衡起着重要的作用。

云南亚热带常绿阔叶林紧邻热带, 其植被具有热带森林的特点, 但是其气候兼具暖温带-温带气候特点, 成为了植被类型与气候带不一致的森林类型 (朱华, 2022)。因此, 独特的气候、植被特征造就了特殊的土壤环境。为探究云南亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量特征及其调控因子和对该生态系统碳汇的贡献, 本研究选择地处横断山系的哀牢山亚热带常绿阔叶林为研究点。该森林生态系统是 300 多年的老龄林, 为横断山系重要的原生森林, 在区域碳汇功能上发挥着巨大的作用 (Tan et al., 2011)。已有研究探讨了哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CO₂ 通量及其调控因子, 并得出其对增温、土壤温度、土壤含水量变化的响应 (Tan et al., 2012; Wu et al., 2014, 2016; Mohd et al., 2021)。哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤腐殖质较厚 (12.2 ± 1.04) cm (鲁志云等, 2017)、含水量较高 (Wu et al., 2014; Mohd et al., 2021), 但迄今为止, 对哀牢山亚热带常绿阔叶林 CH₄ 通量特征、对环境因子的敏感度及响应程度尚不清楚。为准确评估哀牢山亚热带常绿阔叶林碳收支及土壤 CH₄ 通量对区域气候变化的贡献, 本研究依托哀牢山亚热带森林生态系统研究站设置的长期温室气体观测研究平台, 采用大型多点自动开闭箱式自动连续测定法估算土壤 CH₄ 通量, 并同步进行气温 (t_a)、地表温度 (t_0)、土壤 5 cm 温度 (t_5)、降雨量 (P) 和土壤含水量 (C_{sw}) 的监测, 分析得到哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量特征及其主要影响因子, 估算哀牢山亚热带常绿阔叶林的 CH₄ 源汇现状, 明确影响其 CH₄ 通量变化的主导因子及其交互作用关系, 为更好地理解估算亚热带森林 CH₄ 通量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于云南省景东县哀牢山国家级自然保护区实验区, 位于徐家坝的中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站 ($24^{\circ}32'N$, $101^{\circ}01'E$, 海拔 2400—2600 m) 的长期观测样地内。2002—2011 年的观测数据表明: 该地区平均温度为 $11.3^{\circ}C$, 最热月 (7 月) 气温为 $15.6^{\circ}C$, 最冷月 (1 月) 气温为 $5.7^{\circ}C$; 年降雨量为 1817 mm; 季节分明, 干季 (11 月至翌年 4 月) 降雨约占年降雨量的 14%, 雨季 (5—10 月) 约占 86%, 年日照时数为 1239 h, 具有高原山地暖冬凉夏的气候特征 (Wu et al., 2014)。哀牢山隶属横断山脉, 起源于云南省西北部的云岭山系, 纵贯云南中南部, 海拔高, 垂直差异大, 植物种类丰富, 生物多样性高 (吴征镒等, 1983)。哀牢山亚热带常绿阔叶林主要由

壳斗科 Fagaceae、茶科 Theaceae、樟科 Lauraceae、木兰科 Magnoliaceae 等种类组成,其中以木果石栎 (*Lithocarpus xylocarpus*) 为标志的亚热带中山湿性常绿阔叶林是该区域分布面积最大、保存最完好的原生植被(邱学忠, 1998)。研究区土壤类型为黄棕壤,是哀牢山发育较普遍的土壤类型;地表常年覆盖着厚度为 3—7 cm 的凋落物,腐殖质层厚达 (12.2±1.04) cm 并呈棕黑色;土壤呈酸性 (pH<5) 且较肥沃;表土层 (0—15 cm) 具有较好的透水性 (总孔隙度为 71.7%±2.00%) 和涵养水的能力 (最大持水量为 119.1%±6.00%) (鲁志云, 2016, 2017), 在 5 cm 深度土壤含水量最高达 38% (余雷等, 2013)。表层土壤 (0—20 cm) 的全碳 (98.65±13.22) g·kg⁻¹、全氮 (6.53±0.83) g·kg⁻¹、全磷 (1.17±0.29) g·kg⁻¹ 含量较丰富 (鲁志云等, 2017)。

1.2 研究方法

本研究依托哀牢山亚热带森林温室气体长期观测平台 (Tan et al., 2012; Wu et al., 2016) 设置在哀牢山亚热带常绿阔叶林内的野外原位全自动开闭式土壤温室气体观测系统进行,采用大型多点自动开闭箱式自动连续测定方法 (Liang et al., 2003) 进行土壤 CH₄ 通量观测。4 个土壤温室气体观测箱 (长 90 cm×宽 90 cm×高 50 cm) 随机设置在 100 m×100 m 的区域内,各呼吸箱随机排列,间距在 50—80 m。CH₄ 监测频次为 2 h/(one time)。在监测期间,每个观测箱的关闭时间为 3 min,其余时间 2 扇盖子打开成 90°,保障观测箱内的自然条件与外界一致,让风、雨、枯枝落叶等可以自由进入观测箱中。CH₄ 采用 LGR 气体分析仪 (Los Gatos Research, San Jose, CA) 获得,数据采集频率为 1 Hz,在每个观测箱设置热电偶温度传感器观测气温 (25 cm 高度)、地表温度和土壤温度 (5 cm 深度),土壤 (0—10 cm) 体积含水量 (V/V) 由 TDR 湿度传感器 (TDR CS-616, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 测定,测定频率为 0.5 h/(one time)。所有温度与土壤含水量数据通过 62/124 频道数据转换器 (NS62/124S, NorthStar, 上海) 记录在数采上 (CR1000, Campbell, USA),数采每 10 s 对各种转换器采样 1 次,每 30 min 记录 1 次数据 (张一平等, 2015)。林内温度、降雨量 (P) 观测依托 ChinaFlux 设置在哀牢山亚热带常绿阔叶林通量观测塔进行,通量观测塔与土壤温室气体观测平台直线距离为 30 m。

林内温度、降雨量和土壤含水量年变化使用日平均数据。

土壤 CH₄ 通量 (R , nmol·m⁻²·s⁻¹) 的计算公式为:

$$R = \frac{VP}{\rho ST} \times \frac{\partial C}{\partial T} \quad (1)$$

式中:

V ——呼吸箱体积 (m³);

S ——呼吸箱底面积 (m²);

ρ ——标准状况下 CH₄ 的密度 (0.714 kg·m⁻³);

T ——呼吸箱内空气温度 (K);

P ——大气压力 (Pa);

$\partial C/\partial t$ ——观测期间 CH₄ 浓度随时间变化的斜率 (Liang et al., 2010)。

CH₄ 累积量的计算公式为:

$$R_{(\text{CH}_4)} = \sum_{i=m}^{i=n} xd \quad (2)$$

式中:

$R_{(\text{CH}_4)}$ ——第 m — n 天这段时期内的 CH₄ 累积量,该公式可计算月、季节和年的 CH₄ 累积量;

xd ——日平均通量,通量数据为正值时表示排放,为负值则表示吸收。

全球增温潜势 (global warming potential, P_{GW}) 用作衡量温室气体的增温能力的指标,本研究考虑 20 年和 100 年时间尺度上土壤温室气体的增温潜势 ($P_{\text{GW-20}}$ 、 $P_{\text{GW-100}}$),其计算公式为:

$$F_{\text{GWP-20}} = F_{(\text{CO}_2)} + F_{(\text{CH}_4)} \times 84 \quad (3)$$

$$F_{\text{GWP-100}} = F_{(\text{CO}_2)} + F_{(\text{CH}_4)} \times 28 \quad (4)$$

式中:

F_{GWP} ——部分全球变暖潜能值 (kg·hm⁻², 以 CO₂ 计);

$F_{(\text{CO}_2)}$ 、 $F_{(\text{CH}_4)}$ ——土壤 CO₂ 和 CH₄ 的通量 (kg·hm⁻²),将 CH₄ 通量乘以其辐射强迫值得到 CH₄ 的 GWP 值 (Zschornack et al., 2016)。

1.3 数据处理

分析用 SPSS 26.0 进行正态检验、方差分析、相关分析。利用 Sigmaplot 14.0 (Systat Software Inc., San Jose, California, USA) 进行土壤 CH₄ 通量与 t_0 、 t_5 、 C_{sw} 回归模型拟合:采用单因子指数模型 $R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bx}$ 分别拟合土壤 CH₄ 通量与环境因子的关系,即:

$$R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bt_a} \quad (5)$$

$$R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bt_0} \quad (6)$$

$$R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bt_5} \quad (7)$$

$$R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bp} \quad (8)$$

$$R_{(\text{CH}_4)} = a \exp^{bC_{\text{sw}}} \quad (9)$$

式中:

a 和 b ——拟合后的常数项;

$R_{(\text{CH}_4)}$ ——土壤 CH_4 通量;

t_a ——气温;

t_0 ——地表温度;

t_5 ——土壤 5 cm 温度;

P ——降雨量;

C_{sw} ——土壤体积含水量。采用双因子模型拟合土壤 CH_4 通量与多种环境因子的关系, 拟合 t_5 和 C_{sw} 与 CH_4 通量的方程模型, 即:

$$R_{(\text{CH}_4)} = y_0 + at_5 + bC_{\text{sw}} + ct_5^2 + dC_{\text{sw}}^2 \quad (10)$$

其中:

y_0 ——拟合后的常数项;

a 、 c 和 b 、 d ——温度敏感性系数和土壤含水量系数。土壤通量对温度的敏感性通常用 Q_{10} 表示 ($Q_{10} = \exp^{10b}$), 即土壤温度增加 10°C 后, CH_4 通量增加的倍数, 通过指数方程模型计算其数值。

文中所有绘图用 Sigmaplot 14.0 (Systat Software Inc., San Jose, California, USA) 完成。文中数据均为平均值 \pm 标准方差 (mean \pm std)。本研究的土壤 CH_4 通量为负值, 文中图表采用 CH_4 的绝对值进行绘制。

2 结果与分析

2.1 温度、降雨量和土壤含水量动态

哀牢山亚热带常绿阔叶林气温、地表温度与土壤 5 cm 温度均呈现相似的变化规律和季节动态(图 1), 即雨季(5—10 月)时的温度均高于干季(11

月至翌年 4 月)。5—9 月呈上升趋势, 10 月至次年 1 月呈下降趋势, 翌年 2 月初开始为上升趋势(图 1)。年均气温为 $(11.71 \pm 4.19)^\circ\text{C}$, 年均地表温度为 $(11.81 \pm 3.28)^\circ\text{C}$, 年均土壤 5 cm 温度为 $(11.91 \pm 3.69)^\circ\text{C}$ 。雨季(5—10 月)的气温 $(15.12 \pm 1.98)^\circ\text{C}$ 、地表温度 $(14.18 \pm 1.28)^\circ\text{C}$ 与土壤 5 cm 温度 $[(15.12 \pm 1.48)^\circ\text{C}]$ 比干季(11 月至翌年 4 月)的气温 $[(8.24 \pm 2.74)^\circ\text{C}]$ 、地表温度 $[(8.90 \pm 1.79)^\circ\text{C}]$ 、土壤 5 cm 温度 $[(8.66 \pm 2.02)^\circ\text{C}]$ 高。气温、地表温度和土壤 5 cm 温度的月均最高值均出现在 8 月 $(16.19 \pm 0.73)^\circ\text{C}$, 月均最低值出现在 1 月 $(6.08 \pm 2.54)^\circ\text{C}$ 。气温、地表温度和土壤 5 cm 温度的变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 分别为 35.78%、27.75%、30.93%。

在观测期内, 降雨量和土壤含水量均呈现出显著的季节动态(图 1)。雨季的降雨量占全年的 65.90%, 在 6 月达到峰值。土壤含水量也呈现出雨季高、干季低的特征。全年土壤含水量的变异系数为 CV (19.59%), 雨季土壤含水量 CV (12.00%) 低于干季土壤含水量 CV (18.23%), 波动变化较小, 最高值出现在 10 月 (38.90%); 干季时, 降雨量和土壤含水量变化较大, 最低值均分别出现在 12 月和 3 月。干季时地表温度、土壤 5 cm 温度和土壤含水量差异均大于雨季(表 1)。

2.2 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH_4 通量特征

哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH_4 排放通量为负值, 即土壤与大气间的 CH_4 交换表现为吸收, 说明土壤为 CH_4 的汇, 年均土壤 CH_4 通量为 $(-11.79 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在观测期的 5—10 月, 即

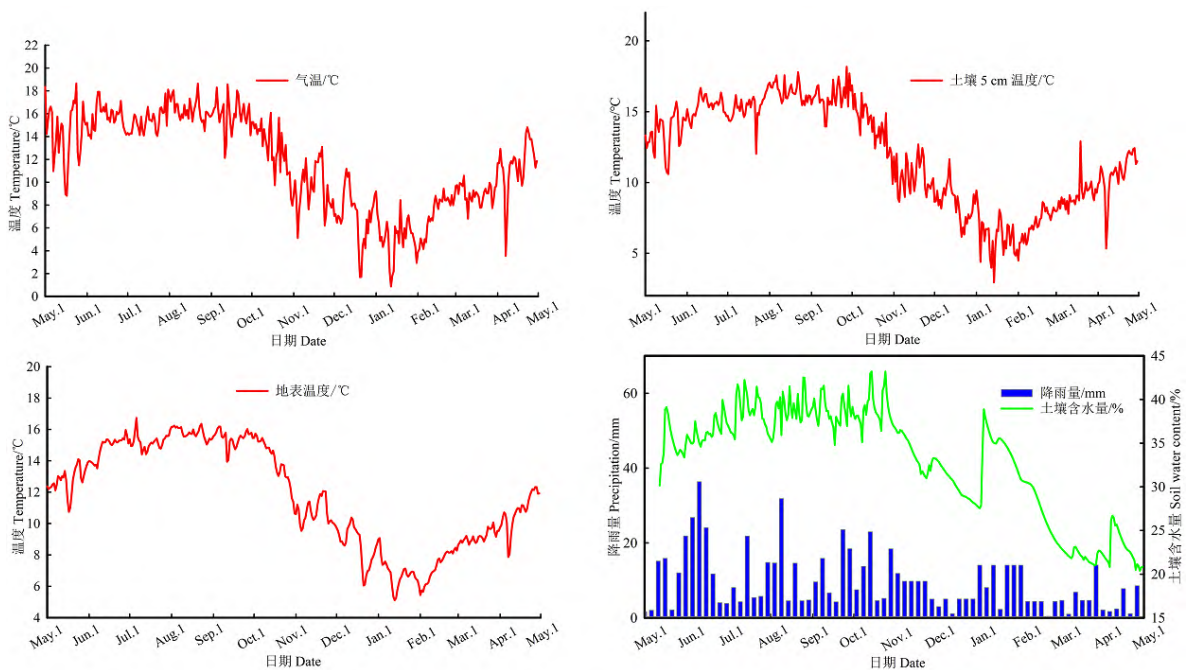


图 1 哀牢山温度 (t)、降雨量 (P) 与土壤含水量动态

Figure1 Temperature (t), precipitation (P) and soil water content dynamics in Ailao Mountain

表 1 不同季节土壤温度、土壤含水量与 CH₄ 通量
Table 1 Soil temperature, soil water content and CH₄ flux in different seasons

项目 Item	雨季 Rainy season	干季 Dry season	年 Annual
气温 Air temperature/°C	15.12±1.98**	8.24±2.74**	11.71±4.19
地表温度 Surface temperature/°C	14.18±1.28**	8.90±1.79**	11.81±3.28
土壤 5 cm 温度 Soil temperature at 5 cm/°C	15.12±1.48**	8.66±2.02**	11.91±3.69
土壤含水量 Soil water content/%	37.66±2.28**	28.42±5.18**	33.04±6.20
降雨量 Precipitation/mm	14.81±11.82**	7.78±6.72**	11.33±10.24
CH ₄ 通量 CH ₄ flux/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	-0.10±0.03**	-0.17±0.06**	-0.13±0.05
CH ₄ 年通量 Annual flux/(kg·hm ⁻²)	-4.49±0.001	-7.30±0.001	-11.79±0.001

*表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著, **表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著
* indicates significant difference at $P<0.05$ level, ** indicates significant difference at $P<0.01$ level; $n=180$

雨季, 土壤 CH₄ 汇能力较弱, 其通量为 $(-0.10±0.03)$ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 最低值出现在 10 月, 为 $(-2.64±0.01)$ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 2b); 自 11 月至翌年 4 月, 土壤 CH₄ 汇能力增强, 平均吸收速率为 $(-0.17±0.06)$ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 2a), 在 3 月达到最大 $(-7.13±0.02)$ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 雨季 CH₄ 通量为 $(-4.49±0.001)$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 干季为 $(-7.30±0.001)$ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.3 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量影响因素

随着温度升高, CH₄ 通量呈现先增加后下降的变化特征 (图 3), 其转化阈值为土壤 5 cm 温度 12.35 °C。低于该阈值的土壤温度发生在 11 月到翌年 4 月, 即干季。高于该阈值的土壤温度为 5—10 月, 为雨季。土壤 CH₄ 日通量与温度之间均呈现极显著的指数函数关系 ($P<0.001$) 和极显著负相关 ($P<0.001$), 基于指数函数关系 (图 3), 地表温度、土壤 5 cm 温度和气温分别解释 CH₄ 通量

21.25%、19.48%和 9.83%的变率, 其中地表温度对 CH₄ 通量变化影响最大。气温、地表温度、土壤 5 cm 温度对 CH₄ 吸收速率的 Q_{10} 值分别为 0.75、0.59、0.64, 土壤 CH₄ 通量对温度的变化敏感性较小。本研究中土壤含水量解释 CH₄ 通量变化的 90.36%, 降雨量仅解释 11.71%, 土壤 5 cm 温度和土壤含水量共同解释了 CH₄ 通量变化的 90.53% (图 3)。

回归分析发现, 干季 CH₄ 通量随着温度的升高而升高, 而在雨季 CH₄ 通量随着温度的增加而降低 (图 4)。温度与 CH₄ 的指数方程模型表明 (表 2), 雨季和干季的气温、地表温度和土壤 5 cm 温度与 CH₄ 的通量之间相关性不强。而在干季, 经过土壤温度阈值筛选的土壤含水量与土壤 CH₄ 通量的关系表明, 土壤 5 cm 温度阈值之下的土壤含水量对 CH₄ 通量解释率 (86.11%) 较阈值之上 (雨季解释率为 57.19%) 的高 (表 2)。但是干季和雨季, 土壤含水量与土壤温度对 CH₄ 通量的解释率则较全年尺度的低, 在阈值之下的解释率为 84.63% (图 4)。

土壤 CH₄ 年通量的全球增温潜势在 20 年 (GWP 为 $-990.15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 和 100 年 (GWP 为 $-330.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 时间尺度, 分别相当于土壤呼吸增温潜势的 2.20%和 0.70%; 哀牢山亚热带常绿阔叶林生态系统净交换 (NEE) 为 $7.02 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (Fei et al., 2018), 土壤吸收的 CH₄, 相当于该生态系统排放 10.60%和 3.50%的 CO₂ 当量, 分别在 20 年和 100 年尺度上抵消了该生态系统 CO₂ 排放量的 10.60%和 3.50%, 同时土壤 CH₄ 吸收固定的碳相当于 GPP ($20.68 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 的 0.04% (表 3)。

3 讨论

3.1 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量及对森林碳汇的贡献评估

哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤表现为 CH₄ 汇,

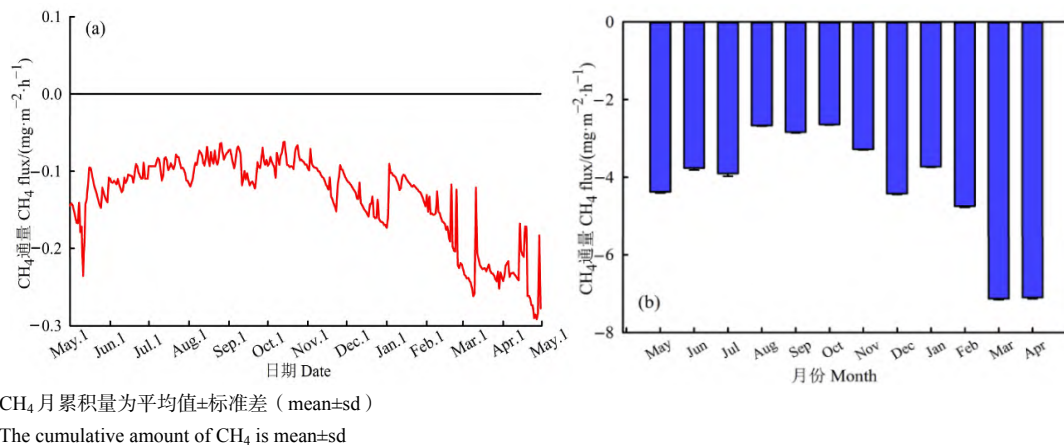
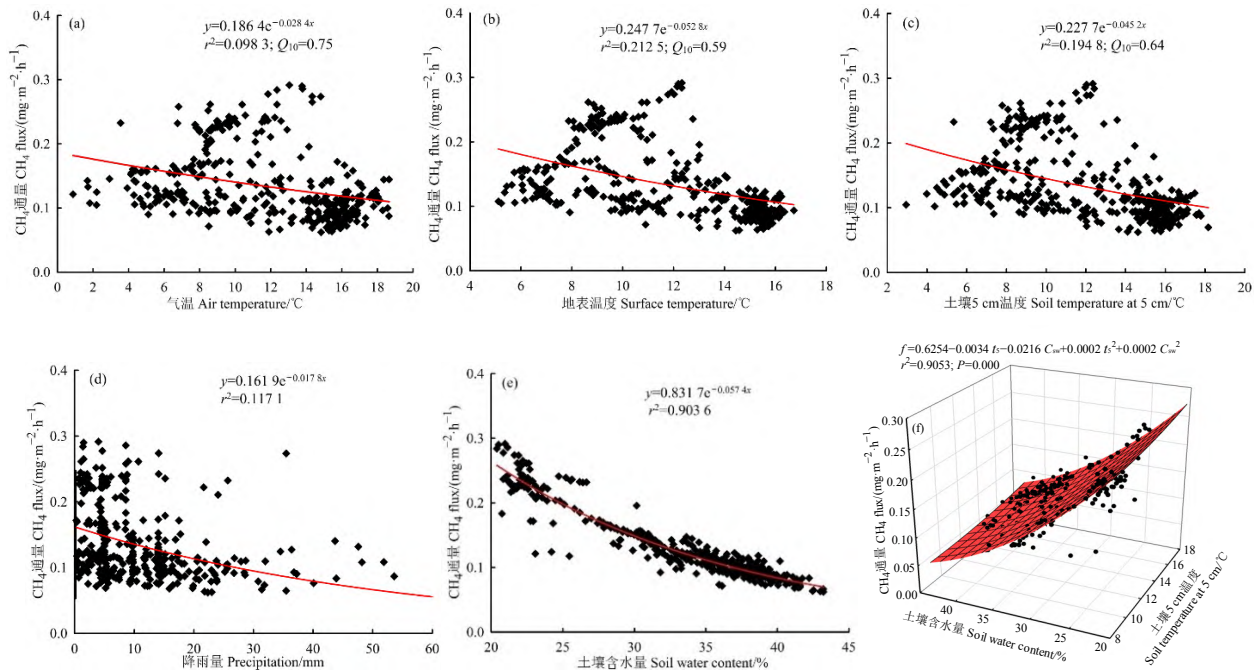


图 2 土壤 CH₄ 日动态 (a) 和月累积通量 (b)

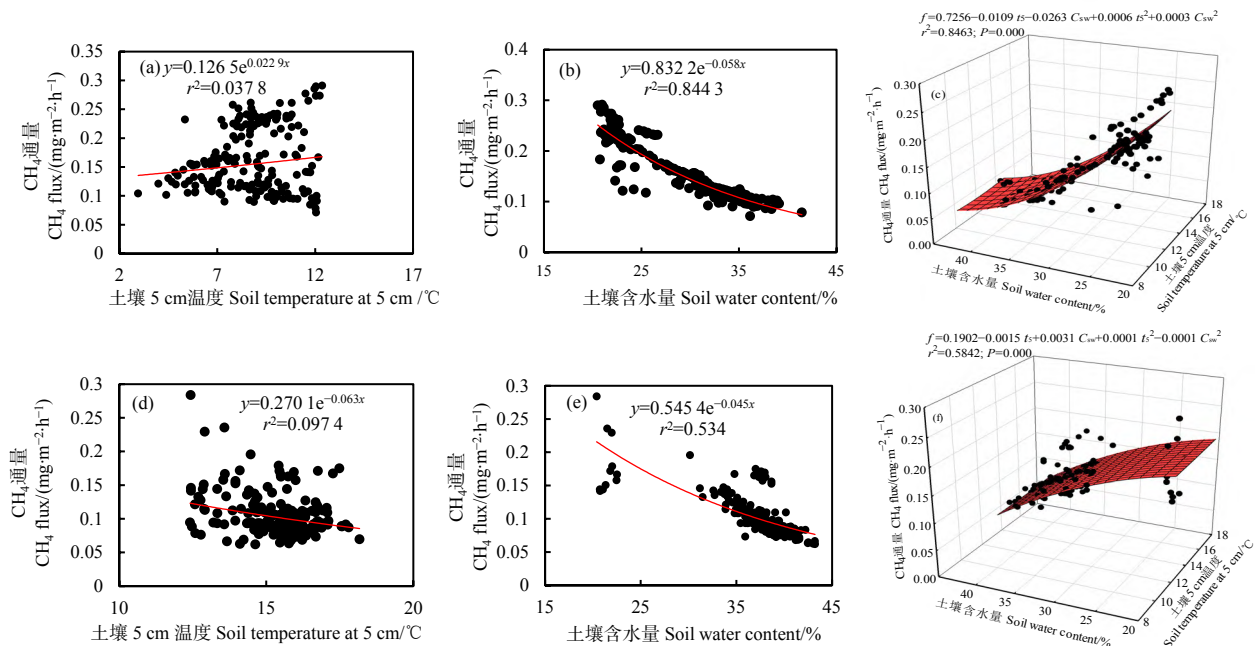
Figure 2 Diurnal dynamics (a) and monthly cumulative fluxes (b) of soil CH₄



由于本研究的土壤CH₄通量为负值，文中图表采用CH₄的绝对值进行绘制，下图同
The soil CH₄ flux in this study is negative, the chart in this paper is drawn with the absolute value of CH₄, the figure 4 below is the same

图3 温度、土壤含水量与土壤CH₄通量的指数回归及其双因子交互作用关系

Figure 3 Exponential regression of temperature, soil water content with soil CH₄ flux and their two factors interaction



图(a)、(b)、(c)表示低于阈值的土壤5 cm温度、土壤含水量与CH₄的回归关系及其双因子关系模型；图(d)、(e)、(f)表示高于阈值的土壤5 cm温度、土壤含水量与CH₄的回归关系及其双因子关系模型

Figures (a), (b) and (c) show the regression relationship between soil temperature at 5 cm, soil water content and methane below the threshold and its two factors relationship model, respectively; figures (d), (e) and (f) show the regression relationship between soil temperature, soil water content and CH₄ above the threshold and its two factors relationship model, respectively

图4 位于阈值上下土壤5 cm温度、土壤含水量与CH₄的回归关系

Figure 4 Regression relationship between soil temperature at 5 cm, soil water content and CH₄ above and below the threshold

年通量 (-134.56±0.95) μg·m⁻²·h⁻¹ 高于热带和亚热带等部分研究区域(表4)。存在较高通量的原因可

能与该研究区植被特征和水热条件特异性(朱华, 2022)导致土壤腐殖质层厚 [(12.2±1.04) cm](鲁志

表 2 环境因子与 CH₄ 通量的回归方程Table 2 Regression equation between environmental factors and CH₄ flux

季节 Season	变量 Variable	回归方程 Regression equation	r ²	P 值 P value	Q ₁₀
干季 Dry season	气温/°C	$y=0.106e^{0.0454t_a}$	0.129 1	0.000	1.57
	地表温度/°C	$y=0.1311e^{0.0182t_0}$	0.009 8	0.177	1.20
	土壤 5 cm 温度/°C	$y=0.1265e^{0.0229t_5}$	0.017 9	0.068	1.26
	土壤含水量/%	$y=0.8322e^{-0.058C_{sw}}$	0.861 1	0.000	
	降雨量/mm	$y=0.1563e^{-0.011P}$	0.084 4	0.113	
雨季 Rainy season	气温/°C	$y=0.1142e^{-0.007t_a}$	0.001 9	0.562	0.93
	地表温度/°C	$y=0.5386e^{-0.112t_0}$	0.250 6	0.000	0.33
	土壤 5 cm 温度/°C	$y=0.2701e^{-0.063t_5}$	0.083 7	0.000	0.53
	土壤含水量/%	$y=0.5454e^{-0.045C_{sw}}$	0.571 9	0.000	
	降雨量/mm	$y=0.1093e^{-0.009P}$	0.258 8	0.000	

y 为土壤 CH₄ 通量, t_a 为气温, t_0 为地表温度, t_5 为土壤 5 cm 温度, C_{sw} 为土壤含水量, P 为降雨量

y : soil CH₄ flux, t_a : air temperature, t_0 : surface temperature, t_5 : soil 5 cm temperature, C_{sw} : soil water content, P : precipitation

表 3 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 全球增温潜势估算
Table 3 GWP of soil CH₄ in subtropical evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountain

项目 Item	20 年 20-year	100 年 100-year
CH ₄ 全球增温潜势 GWP of Soil CH ₄ /(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	990.15	330.05
土壤 CH ₄ 的 GWP/土壤呼吸 GWP Soil CH ₄ GWP/soil CO ₂ CWP	2.2%	0.7%
土壤 CH ₄ 的 GWP/NEE Soil CH ₄ GWP/NEE	10.6%	3.5%
土壤 CH ₄ 的 GWP/GPP Soil CH ₄ GWP/GPP	0.04%	

全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP), 在 20 年和 100 年的时间尺度, CH₄ 的增温潜势分别是 CO₂ 的 84 倍和 28 倍 (IPCC, 2013)。土壤呼吸 (12.48 t·hm⁻²·a⁻¹) 引自 Tan et al. (2013), NEE (7.02 t·hm⁻²·a⁻¹) 和 GPP (20.68 t·hm⁻²·a⁻¹) 引自 Fei et al. (2018)

Global warming potential (GWP). On a time scale of 20 and 100 years, the warming potential of CH₄ is 84 times and 28 times that of CO₂, respectively (IPCC, 2013). Soil respiration (12.48 t·hm⁻²·a⁻¹) is quoted from Tan et al. (2013), NEE (t·hm⁻²·a⁻¹) and GPP (20.68 t·hm⁻²·a⁻¹) are quoted from Fei et al. (2018)

云等, 2017)、土壤全碳含量较高 [(98.65±13.22) g·kg⁻¹] (鲁志云, 2016)、活性碳含量较高 [(157.53±8.82) g·kg⁻¹] (武传胜等, 2012) (Yan et al., 2008; Lang et al., 2019; Yu et al., 2021; Zhou et al., 2021a; 房彬等, 2013; 张宇鸿等, 2016; 菊花等, 2016b) 有关。收集中国热带到亚热带不同林区的平均土壤 CH₄ 通量 (表 4), 发现中国不同气候带随年均降水量的增加, 土壤 CH₄ 年通量呈减少趋势 ($P=0.615$, 且 $P>0.05$, $y=-1.5337x+66.758$, $r^2=0.026$)。

此外, 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量的 GWP 与土壤呼吸相比当量较小 (20 年尺度的 GWP 为 2.2%), 然而其 CH₄ 汇产生的 GWP 在 20 年尺度上相当于增加了该森林生态系统 10.6% 的碳

汇能力 (表 3), 因此亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 的汇对该生态系统的碳汇评估具有重要作用。

3.2 温度和水分对土壤 CH₄ 通量的驱动作用

森林土壤温度与 CH₄ 通量关系具有多样性。如南岭森林土壤 CH₄ 汇能力随着土壤温度的升高而增强 (张强, 2017), 而东北东部 4 种典型温带森林 (刘实等, 2010) 和若尔盖高原高寒草甸 (徐颖怡, 2017) 的 CH₄ 汇能力与土壤温度呈显著负相关关系; 但也存在温度与土壤 CH₄ 通量无显著相关关系的现象 (田亚男等, 2015; 王全成等, 2019)。这些差异与各研究点土壤与气候条件有关, 尤其是水热条件的限制 (Zhao et al., 2019)。本研究土壤 CH₄ 通量与土壤温度的相关关系不如土壤含水量高 (图 3、表 2)。但土壤温度更容易通过影响表层微生物的活性进而影响土壤 CH₄ 的氧化 (房彬等, 2013), 使得甲烷氧化菌随着温度升高, 活动旺盛, 有利于促进 CH₄ 的吸收 (Borken et al., 2006), 但是多数甲烷氧化菌为中温型微生物, 甲烷氧化菌的氧化反应需要适宜的温度范围 (Fang et al., 2010; 邓湘雯等, 2012)。如 Steinkamp et al. (2001) 研究认为, 在 0—10 °C 的温度范围内, 温度对土壤 CH₄ 氧化速率的影响更显著。Castro et al. (1995) 研究也发现, 土壤温度在 -5—10 °C 范围内是土壤 CH₄ 氧化的重要控制因素, 而在 10—20 °C 范围内, 土壤温度对 CH₄ 氧化没有影响, 本研究也验证了土壤 CH₄ 氧化存在阈值温度 (土壤 5 cm 温度大致为 12.35 °C 时)。当低于阈值温度 12.35 °C 时, CH₄ 通量随着温度升高而增加, 反之, CH₄ 通量则随着温度升高呈减小的趋势 (图 4)。这可能是当温度过低时, 土壤微生物活性较弱, 土壤温度升高则会导致微生物活性增强 (魏达等, 2011), 促进 CH₄ 氧化; 而超过微生物最适的温度阈值则会产生抑制作用, 主要是由于 CH₄ 氧化菌有较强亲和力, 所需活化能较低, 土壤中 CH₄ 浓度增加有限, 使得 CH₄ 氧化菌数量及活性增加缓慢, 温度效应减弱 (丁维新等, 2003)。土壤 5 cm 温度 12.35 °C 虽然不是产甲烷菌与甲烷氧化菌活性限制点, 但有可能是亚热带常绿阔叶林产甲烷菌与甲烷氧化菌生物量比的转折点, 这在很大程度上影响着 CH₄ 通量 (Hussain et al., 2019; Feng et al., 2020; Zhou et al., 2021a; 刘惠等, 2008; 耿世聪等, 2013; 何姗等, 2019)。所以, 土壤温度通过调控甲烷微生物活性来影响土壤 CH₄ 通量变化, 甲烷微生物对温度的响应也存在着最佳值, 在本研究中, 低于土壤 5 cm 温度的甲烷氧化菌活性随温度增加而刺激 CH₄ 氧化, 超过该阈值范围则活性降低, CH₄ 通量也随之减少。

土壤含水量变化影响 O₂ 和 CH₄ 分子在土壤中

表4 中国不同气候带森林土壤 CH₄ 通量比较
Table 4 Comparison of CH₄ flux in forest soil in different climate zone in China

气候带 Climate zone	地点 Place	植被类型 Vegetation type	经纬度 Coordinate	海拔 Altitude/m	平均 温度 MAT/°C	降雨量 Precipitation/ mm	甲烷通量 CH ₄ flux/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	温度 Temperature/ °C	土壤含 水量 C _{sw} /%	土壤 有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	文献 Reference
	湖南省 长沙县	青冈石栎常 绿阔叶林	28°23'N, 113°19'E	55–350	17.1	1 413–1 559	-4.14	土壤温度	—	土壤 有机质	张宇鸿, 2016
	湖北省 神农架	常绿落叶阔叶 混交林	31°18'N, 110°28'E	1 670	10.6	1 306–1 722	-36.79± 13.99	土壤温度	—	—	菊花等, 2016b
亚热带 Subtropical	贵州省 开阳县	喀斯特灌丛林	27°00'N, 107°02'E	1 130	10.6– 15.3	926–1 419	-59.85– -206.14	土壤温度	C _{sw}	—	房彬等, 2013
	广东省 鼎湖山	针阔叶混交林	23°09'–23°11'N, 112°30'–112°33'E	1 000.3	20.9	1 956	-44.60±5.79	土壤温度	—	—	周存宇等, 2005
	云南省 哀牢山	常绿阔叶林	24°32'N, 101°01'E	2 400– 2 600	11.3	1 817	-134.56± 0.95	—	C _{sw}	—	本研究
	云南省 西双版纳	橡胶林	21°55'N, 101°15'E	580	21.7	1 557	-20±0.087	—	C _{sw}	—	Zhou et al., 2021a
		热带雨林	21°56'N, 101°16'E	720	—	—	-110±0.18	土壤温度	C _{sw}	分解的 细根	
热带 Tropical	海南省 尖峰岭	热带山地雨林 原始林	18°23'–18°52'N, 108°36'–109°05'E	—	19.8	1 990	-26.39± 0.196 8	—	—	—	白贞智等, 2017
		热带山地雨林 次生林	—	—	—	—	-21.08± 0.202 6	—	C _{sw}	—	
		热带山地雨林 鸡毛松林	—	—	—	—	-26.07± 0.161 3	—	C _{sw}	—	
	黑龙江 帽儿山	红松人工林	45°24'N, 127°40'E	400	2.8	770	-17.2±4.6	土壤温度	—	—	刘实等, 2010
温带 Temperate	北京市 东灵山	蒙古栎林	—	400	2.8	770	-31.5±4.5	土壤温度	—	—	杜睿等, 2004
		阔叶混交林	40°00'–40°02'N	—	—	600	-66	—	—	—	
		辽东栎林	115°26'–115°30'E	—	—	600	-67	—	—	—	
		油松林	—	—	—	600	-79	—	—	—	

表中的 C_{sw} 表示土壤含水量, “—” 表示无数据

C_{sw} and “—” represent soil water content and no data in the table, respectively

的扩散速率以及甲烷氧化菌和产甲烷菌的活性(邓湘雯等, 2012)。森林土壤中, CH₄ 通量主要由产甲烷细菌产生排放 CH₄ 和甲烷氧化菌氧化 CH₄ 来体现(Bender et al., 1995), 土壤甲烷菌对水分的响应, 致使 CH₄ 通量与土壤含水量的关系并不确定, 如青藏高原高寒草原(魏达等, 2011)和南岭山地矮林(王瑶等, 2017)的土壤含水量与土壤 CH₄ 通量存在正相关关系, 而常绿阔叶林和针阔混交林中则表现出负相关影响(王瑶等, 2017)。在本研究中, 当土壤含水量低时, 土壤 CH₄ 的通量较高, 随土壤含水量增加, 土壤 CH₄ 的通量降低(图3), 且土壤含水量可以解释 CH₄ 吸收变化的 90.36%, 海南热带山地的土壤湿度对 CH₄ 通量解释率也高达 76%($P<0.01$)(李君怡等, 2022), 体现出哀牢山亚热带森林土壤含水量对 CH₄ 吸收起主导作用。原因可能有, (1)在土壤含水量低时, CH₄ 和 O₂ 更容易扩散, 甲烷氧化菌活性强, 进而产生高 CH₄ 氧化速率且有利于 CH₄ 扩散(Whalen et al., 1990), 随着土壤含

水量增加, 大气 CH₄ 和 O₂ 向土壤中扩散受阻, 甲烷氧化菌活性下降, 土壤 CH₄ 的吸收速率随之降低(Fang et al., 2010; Subke et al., 2018; Hussain et al., 2019; 耿世聪等, 2013; 梁艳等, 2015), 这也可以解释哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量在温度低和土壤含水量低的干季高于温度高和土壤含水量高的雨季, 这与本研究亚热带常绿阔叶林的土壤 CH₄ 通量的季节动态一致(图1、2, 表1)。本研究与亚热带的马尾松林(刘惠等, 2008)、中亚热带森林(黄志宏等, 2016)、鼎湖山马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林(莫江明等, 2006)的研究结果一致; 热带地区的西双版纳热带季节雨林和橡胶林(Zhou et al., 2021a; 严玉平, 2006)的土壤 CH₄ 的吸收也表现出相似的季节变化规律, 即干季高于雨季。(2)同时这也可能是因为该区域全年土壤温度均在 20 °C 以下, 且并未达到微生物活跃温度以上(Fang et al., 2010; 丁维新等, 2003; 邓湘雯等, 2012), 而全年的土壤含水量(CV=19.59%)

变幅小于土壤温度 (CV=30.93%), 致使在低温条件下调节 CH₄ 生产与氧化的微生物活性更容易受到土壤含水量的调节。(3) 在季节差异上, 干季土壤含水量 (CV=18.23%) 的变幅高于雨季 (CV=12.00%), 且平均土壤含水量较低, 致使其波动对 CH₄ 通量产生较大的影响, 尤其是在干季的 2—4 月 (图 2b), 土壤 CH₄ 通量的变化幅度也与土壤含水量存在一致的波动变化特点 (图 1, 图 2b), 这也体现在干季土壤含水量对土壤 CH₄ 通量的解释率高于雨季 (干季, $r^2=86.11\%$; 雨季, $r^2=57.19\%$)。本研究也表明, 土壤含水量是调控该区域土壤 CH₄ 通量的主导因子, 干季受土壤含水量的调控更显著, 随着土壤含水量的增加, 土壤 CH₄ 通量降低。

影响 CH₄ 通量的主要因子是温度或土壤含水量 (表 4), 但是土壤含水量对土壤 CH₄ 通量的影响比温度大 (刘惠等, 2008), 这也被本研究证明。这可能与本研究点的产甲烷菌与氧化菌的季节活跃程度的差异有关 (Curry, 2007)。对于干季来说, 本研究中干季 (图 1、表 1) 土壤 5 cm 温度低于阈值温度 (12.35 °C), 随着土壤温度升高并逐渐接近温度阈值, 甲烷氧化菌活性增强, 较低的土壤含水量有利于气体的扩散和氧化, 干季的 CH₄ 通量 (-0.17 ± 0.06) mg·m⁻²·h⁻¹ 高于雨季 (-0.10 ± 0.03) mg·m⁻²·h⁻¹, 且干季土壤含水量 (86.11%) 对 CH₄ 通量变化的解释率显著较高 ($P<0.001$)。因此, 可以推断较低的土壤含水量有利于 CH₄ 氧化, 并随着土壤含水量的增加 CH₄ 通量减少 (Fang et al., 2010), 如图 1 中 3、4 月 CH₄ 汇最大。对于雨季来说, 雨季的土壤含水量 (37.66%±2.28%) 高于干季 (28.42%±5.18%), 雨季土壤含水量最高的 7—9 月的 CH₄ 通量为 -0.07 mg·m⁻²·h⁻¹, 低于平均值 (-0.13 ± 0.05) mg·m⁻²·h⁻¹。加之该观测时期土壤温度 (18.17 °C) 高于阈值温度 (12.35 °C), 土壤氧化能力降低, 而高含水量的土壤减慢了 CH₄ 和 O₂ 从大气向地下部分的传输速度 (Castro et al., 1995), 减少土壤中甲烷氧化菌的底物供应 (王全成等, 2019), 雨季高温高湿的水热条件不利于 CH₄ 的氧化, 因此低于干季时的 CH₄ 通量, 雨季的土壤含水量对土壤 CH₄ 通量的解释率仅为 (57.19%), 但仍占主要地位。这表明土壤 CH₄ 的高氧化仍需要适宜的温度和水分条件。

土壤 CH₄ 排放和吸收是土壤碳生物地球化学循环的重要过程, 在森林与土壤碳收支过程中占有重要的地位。在未来降水格局变化的情景下, 该生态系统土壤 CH₄ 通量对区域气候变化带来水热条件变化的响应, 将影响 CH₄ 对该森林生态系统碳收支的影响。因此, 随着温度升高和土壤含水量的变化,

哀牢山亚热带森林土壤 CH₄ 通量的变化如何, 仍需结合野外原位增温与控水实验平台进行监测。虽然本研究已明确了哀牢山亚热带常绿阔叶林 CH₄ 通量的季节动态、主导因子及在该森林生态系统碳收支中的地位, 但仍需结合同位素与微生物技术进一步探明高碳、不同的水热环境下土壤 CH₄ 的氧化反应和微生物过程, 进一步探讨在气候变化情景下哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤 CH₄ 通量的长期变化特征、CH₄ 生产与氧化的微生物机制和对气候变化的响应。

4 结论

综上所述, 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤为 CH₄ 的汇, 年通量为 (-11.79 ± 0.001) kg·hm⁻²·a⁻¹, 在 20 年时间尺度上, 其全球增温潜势相当于该森林生态系统全年的净生态系统生产力的 10.60%, 相当于增加了该森林生态系统的碳汇能力。干季的 CH₄ 吸收通量高于雨季, 土壤含水量对该研究区土壤 CH₄ 通量起主导作用。干季低的土壤含水量和低于阈值的土壤 5 cm 温度的共同作用下, 干季的 CH₄ 通量高于雨季, 干季的土壤含水量对 CH₄ 的解释率高于雨季, 温度的作用较小。雨季较高的土壤含水量和高于阈值的平均土壤 5 cm 温度导致土壤 CH₄ 吸收通量降低。土壤含水量可用于预测该生态系统土壤 CH₄ 通量的变化和 CH₄ 汇的强度, 进而反映其对该森林生态系统碳汇能力的贡献。

致谢: 感谢中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站 (简称哀牢山站) 对本研究的支持和帮助; 特别感谢哀牢山站罗奇先生、全球变化研究组的杨东海先生、依涛香女士及全组老师和同学们在野外与实验室实验和论文撰写过程中给予的帮助; 感谢中国科学院西双版纳热带植物园公共技术中心给予样品分析的帮助; 感谢中国科学院西双版纳热带植物园的 Palingamoorthy Gnanamoorthy 博士对英文摘要进行修改。

参考文献:

- BENDER M, CONRAD R, 1995. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(12):1517-1527.
- BORKEN W, DAVIDSON E A, SAVAGE K, et al., 2006. Effect of summer through fall exclusion, summer drought and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6): 1388-1395.
- CASTRO M S, STEUDLER P A, MELILLO J M, et al., 1995. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1): 1-10.
- CASTRO M S, MELILLO J M, STEUDLER P A, et al., 1994. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils [J]. *Canadian*

- Journal of Forest Research, 24(9): 1805-1810.
- CURRY C L, 2007. Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4): B4012-1-B4012-15.
- FANG H, YU G R, CHENG S L, et al., 2010. Effects of multiple environmental factors on CO₂ emission and CH₄ uptake from old-growth forest soils [J]. *Biogeosciences*, 7(1): 395-407.
- FEI X H, SONG Q H, ZHANG Y P, et al., 2018. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 616: 824-840.
- FENG H L, GUO J H, HAN M H, et al., 2020. A review of the mechanisms and controlling factors of methane dynamics in forest ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117702.
- GRACE J, 2004. Understanding and managing the global carbon cycle [J]. *Journal of Ecology*, 92(2): 189-202.
- HUSSAIN K N, WOO P J, 2019. Precipitation decreases methane uptake in a temperate deciduous forest [J]. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 24(1): 24-34.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* [R].
- IPCC, 2013. (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2013: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- KIRSCHKE S, BOUSQUET P, CIAIS P, et al., 2013. Three decades of global methane sources and sinks [J]. *Nature Geoscience*, 6: 813-823.
- LANG R, GOLDBERG S, BLAGODATSKY S, et al., 2019. Converting forests into rubber plantations weakened the soil CH₄ sink in tropical uplands [J]. *Land Degradation & Development*, 30(18): 2311-2322.
- LIANG N S, HIRANO T, ZHENG Z M, et al., 2010. Soil CO₂ efflux of a larch forest in northern Japan [J]. *Biogeosciences*, 7(11): 3447-3457.
- LIANG N S, INOUE G, FUJINUMA Y, 2003. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux [J]. *Tree Physiology*, 23(12): 825-832.
- MER J L, ROGER P, 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 37(1): 25-50.
- MOHD Z, ZHOU W J, WU C S, et al., 2021. Soil heterotrophic respiration in response to rising temperature and moisture along an altitudinal gradient in a subtropical forest ecosystem, Southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151643.
- NI X Y, GROFFMAN P M, 2018. Declines in methane uptake in forest soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(34): 8587-8590.
- SAUNOIS M, BOUSQUET P, POULTER B, et al., 2020. The global methane budget 2000–2017 [J]. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561-1623.
- STEINKAMP R, BUTTERBACH-BAHL K, PAPEN H, 2001. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(2): 145-153.
- SUBKE J A, CATHERINE S, MOODY T C, et al., 2018. The rhizosphere activity and atmospheric methane concentrations drive variations of methane fluxes in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 116: 323-332.
- TAN Z H, ZHANG Y P, LIANG N S, et al., 2012. An observational study of the carbon-sink strength of East Asian subtropical evergreen forests [J]. *Environmental Research Letters*, DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044017.
- TAN Z H, ZHANG Y P, LIANG N S, et al., 2013. Soil respiration in an old-growth subtropical forest: patterns, components, and controls [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(7): 2981-2990.
- TAN Z H, ZHANG Y P, SCHAEFER D, et al., 2011. An old-growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink [J]. *Atmospheric Environment*, 45(8): 1548-1554.
- TIAN H Q, LU C Q, CIAIS P, et al., 2016. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere [J]. *Nature*, 531(7593): 225-228.
- WHALEN S C, REEBURGH W S, SANDBECK K A, 1990. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(11): 3405-3411.
- WANG J S, QUAN Q, CHEN W N, et al., 2021. Increased CO₂ emissions surpass reductions of non-CO₂ emissions more under higher experimental warming in an alpine meadow [J]. *Science of the Total Environment*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144559.
- WU C S, LIANG N S, SHA L Q, et al., 2016. Heterotrophic respiration does not acclimate to continuous warming in a subtropical forest [J]. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep21561.
- WU C S, ZHANG Y P, XU X L, et al., 2014. Influence of interactions between litter decomposition and rhizosphere activity on soil respiration and on the temperature sensitivity in a subtropical montane forest in SW China [J]. *Plant and Soil*, 381(1-2): 215-224.
- YAN Y P, SHA L Q, CAO M, et al., 2008. Fluxes of CH₄ and N₂O from soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 20(2): 207-215.
- YU L F, ZHU J, JI H L, et al., 2021. Topography-related controls on N₂O emission and CH₄ uptake in a tropical rainforest [J]. *Science of the Total Environment*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145616.
- ZHAO J F, PENG S S, CHEN M P, et al., 2019. Tropical forest soils serve as substantial and persistent methane sinks [J]. *Scientific Reports*, 9(2): 697-751.
- ZHOU X X, ZUO H L, SMAILL S J, 2021b. Incorporation of NPP into forest CH₄ efflux models [J]. *Trends in plant science*, 26(12): 1210-1212.
- ZHOU W J, ZHU J, JI H L, et al., 2021a. Drivers of difference in CO₂ and CH₄ emissions between rubber plantation and tropical rainforest soils [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108391.
- ZSCHORNACK T, ROSA C M D, PEDROSO G M, et al., 2016. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions in subtropical paddy rice under alternative irrigation systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 105(1): 61-73.
- 白贞智, 付青霞, 2017. 海南山地雨林土壤 CH₄ 通量与环境因子的关系研究[J]. *陕西林业科技* (3): 1-3.
- BAI Z Z, FU Q X, 2017. Relationship between greenhouse gas CH₄ from soil and environmental factors in tropical montane rainforest [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology* (3): 1-3.
- 丁维新, 蔡祖聪, 2003. 温度对土壤氧化大气 CH₄ 的影响[J]. *生态学杂志*, 22(3): 54-58.
- DING W X, CAI Z C, 2003. Effect of temperature on atmospheric CH₄ oxidation in soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 22(3): 54-58.
- 邓湘雯, 杨晶晶, 陈槐, 等, 2012. 森林土壤氧化(吸收)甲烷研究进展[J]. *生态环境学报*, 21(3): 577-583.
- DENG X W, YANG J J, CHEN H, et al., 2012. Advances in the research of methane oxidation in forest soils [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(3): 577-583.
- 杜睿, 黄建辉, 万小伟, 等, 2004. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律[J]. *环境科学*, 25(2): 12-16.
- DU R, HUANG J H, WAN X W, et al., 2004. The research on the law of greenhouse gases emission from warm temperate forest soils in Beijing region [J]. *Environmental Science*, 25(2): 12-16.
- 房彬, 李心清, 张立科, 等, 2013. 西南喀斯特地区灌丛林土壤 CO₂、CH₄ 通量研究[J]. *地球化学*, 42(3): 221-228.
- FANG B, LI X Q, ZHANG L K, et al., 2013. CO₂ and CH₄ fluxes from soil of scrub forest in the karst area of southwest China [J]. *Geochimica*, 42(3): 221-228.
- 高明磊, 满秀玲, 段北星, 2021. 林下植被和凋落物对寒温带森林生长季土壤 CH₄ 通量的影响[J]. *生态学报*, 41(24): 9886-9897.
- GAO M L, MANG X L, DUAN B X, 2021. Effects of understory vegetation and litter on soil CH₄ flux during growing season in cold

- temperate forest in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(24): 9886-9897.
- 耿世聪, 陈志杰, 张军辉, 等, 2013. 长白山三种主要林地土壤甲烷通量 [J]. *生态学杂志*, 32(5): 1091-1096.
- GENG S C, CHEN Z J, ZHANG J H, et al., 2013. Soil methane fluxes of three forest types in Changbai Mountain of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(5): 1091-1096.
- 何娜, 刘娟, 姜培坤, 等, 2019. 全球变化对森林土壤甲烷吸收的影响及其机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 30(2): 677-684.
- HE S, LIU J, JIANG P K, et al., 2019. Effects of global change on methane uptake in forest soils and its mechanisms: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(2): 677-684.
- 黄志宏, 张宇鸿, 沈燕, 等, 2016. 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*, 36(4): 56-63.
- HUANG Z H, ZHANG Y H, SHEN Y, et al., 2016. Effects of environmental factors on soil CH₄ and N₂O fluxes in three forest types in central subtropical China [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 36(4): 56-63.
- 菊花, 申国珍, 马明哲, 等, 2016a. 北亚热带地带性森林土壤温室气体通量对土地利用方式改变和降水减少的响应[J]. *植物生态学报*, 40(10): 1049-1063.
- JU H, SHENG G Z, MA M Z, et al., 2016a. Greenhouse gas fluxes of typical northern subtropical forest soils: Impacts of land use change and reduced precipitation [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(10): 1049-1063.
- 菊花, 申国珍, 徐文婷, 等, 2016b. 神农架主要森林土壤 CH₄、CO₂ 和 N₂O 排放对降水减少的响应[J]. *生态学报*, 36(20): 6397-6408.
- JU H, SHENG G Z, XU W T, et al., 2016b. The emission of CH₄、CO₂ and N₂O in the typical forest soils of Shennongjia under the precipitation reduction [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(20): 6397-6408.
- 梁艳, 干珠扎布, 张伟娜, 等, 2015. 灌溉对藏北高寒草甸生物量和温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 34(4): 801-808.
- LIANG Y, GANJURJAV H B, ZHANG W N, et al., 2015. Effects of Irrigation on Biomass and Greenhouse Gas Emissions of Alpine Meadow in Northern Tibet [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 34(4): 801-808.
- 李君怡, 席毅, 赵俊福, 2022. 土壤湿度控制了中国南部热带森林土壤甲烷的吸收[J]. *生态学报*, DOI: 10.5846/stxb202106281706.
- LI J Y, XI Y, ZHAO J F, 2022. Soil moisture controls methane uptake in a tropical forest of southern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, DOI: 10.5846/stxb202106281706.
- 刘惠, 赵平, 林永标, 等, 2008. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH₄ 和 N₂O 通量研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 16(4): 304-314.
- LIU H, ZHAO P, LIN Y B, et al., 2008. CH₄ and N₂O fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of south China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 16(4): 304-314.
- 刘玲玲, 刘芬芬, 温学发, 等, 2008. 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*, 32(2): 431-439.
- LIU L L, LIU Y F, WEN X F, et al., 2008. CH₄ emission flux from soil of pine plantations in the Qianyanzhou red earth hill region of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32(2): 431-439.
- 刘实, 王传宽, 许飞, 2010. 4 种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[J]. *生态学报*, 30(15): 4075-4084.
- LIU S, WANG C K, XU F, 2010. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(15): 4075-4084.
- 刘岳坤, 庞军柱, 袁凡, 等, 2019. 秦岭火地塘林区不同海拔不同林型土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量研究[J]. *西北林学院学报*, 34(1): 1-10.
- LIU Y K, PANG J Z, YI F, et al., 2016. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane and carbon dioxide of different forest types at different elevations in Huoditang forest region of Qinling mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 34(1): 1-10.
- 鲁志云, 2016. 增温和切根处理对哀牢山常绿阔叶林土壤氮矿化的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院.
- LU Z Y, 2016. Effects of increasing temperature and root cutting on soil Nitrogen mineralization in Evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountain [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences.
- 鲁志云, 宋亮, 王训, 等, 2017. 哀牢山森林凋落物与腐殖质及土壤的生态化学计量特征[J]. *山地学报*, 35(3): 274-282.
- LU Z Y, SONG L, WANG X, et al., 2017. Ecological stoichiometry characteristics of the litterfall-humus-soil continuum systems under different successional stages of the subtropical forest in SW China [J]. *Mountain Research*, 35(3): 274-282.
- 莫江明, 方运霆, 李德军, 等, 2006. 鼎湖山主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征[J]. *广西植物*, 26(2): 142-147, 124.
- MO J M, FANG Y T, LI D J, et al., 2006. Soil CO₂ emission and CH₄ uptake in the main forests of Dinghushan in subtropical China [J]. *Guihaia*, 26(2): 142-147, 124.
- 邱学忠, 1998. 哀牢山森林生态系统研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- QIU X Z, 1998. Study on forest ecosystem of Ailao Mountain [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press.
- 田亚男, 聂文婷, 张水清, 等, 2015. 北亚热带红壤丘陵陵区 3 种土地利用方式下 CH₄ 通量及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 24(9): 1434-1440.
- TIAN Y N, NIE W T, ZHANG S Q, et al., 2015. CH₄ fluxes and its influence factors under three land use type in the hilly red soil region of northern subtropical, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(9): 1434-1440.
- 王全成, 陈琼琼, 杨智杰, 等, 2019. 模拟降水减少对中亚热带杉木人工林土壤甲烷吸收的影响[J]. *生态学报*, 39(10): 3517-3525.
- WANG Q C, CHEN C Q, YANG Z J, et al., 2019. Effects of precipitation exclusion on soil methane uptake under *Cunninghamia lanceolata* plantation in mid-subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(10): 3517-3525.
- 王瑶, 沈燕, 张强, 等, 2017. 南岭三种主要森林类型土壤甲烷通量研究 [J]. *湖南林业科技*, 44(2): 8-14.
- WANG Y, SHEN Y, ZHANG Q, et al., 2017. Study on soil methane fluxes of three forest types in Nanling mountains [J]. *Central South University of forestry science and technology*, 44(2): 8-14.
- 魏达, 旭日, 王迎红, 等, 2011. 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*, 19(3): 412-419.
- WEI D, XU R, WANG Y H, et al., 2011. CH₄, N₂O and CO₂ fluxes and correlation with environmental factors of alpine steppe grassland in Nam Co region of Tibetan plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 19(3): 412-419.
- 武传胜, 沙丽清, 高建梅, 等, 2012. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林与人工茶园土壤呼吸的季节变化[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 36(3): 64-68.
- WU C S, SHA L Q, GAO J M, et al., 2012. Analysis of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest and an artificial tea garden in Ailao Mountains, Yunnan province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 36(3): 64-68.
- 吴征镒, 曲仲湘, 姜汉桥, 1983. 云南哀牢山森林生态系统研究[M]. 昆明: 云南科技.
- WU Z Y, QU Z X, JIANG H Q, 1983. Study on forest ecosystem of Ailao Mountain in Yunnan Province [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology.
- 徐颖怡, 2017. 气候变化对若尔盖高原高寒草甸温室气体排放的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- XU Y Y, 2017. The effect of climate change on greenhouse gas emissions in an alpine meadow on the Zoige plateau [D]. Northwest A & F University.
- 闫新利, 2018. 紫金山 2 种不同森林类型土壤甲烷通量研究[D]. 南京: 南京林业大学: 5.
- YAN X L, 2018. Methane fluxes in soils of two forest types in Zijin Mountain, Nanjing [D]. Nanjing Forestry University: 5.
- 严玉平, 2006. 西双版纳热带季节雨林、橡胶林土壤 CH₄、N₂O 通量及

- 树干呼吸研究[D]. 西双版纳: 中国科学院研究生院, 西双版纳热带植物园.
- YAN Y P, 2006. Fluxes of CH₄ and N₂O from soil under tropical seasonal rain forest and rubber plantation, and their stem respiration in Xishuangbanna, SW China [D]. Xishuangbanna: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden.
- 余雷, 张一平, 沙丽清, 等, 2013. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因子[J]. 生态学报, 32(2): 332-336.
- YU L, ZHANG Y P, SHA L Q, et al., 2013. Temporal variation pattern and its affecting factors of soil water content in a subtropical evergreen broadleaved forest in Ailao Mountains [J]. Southwest China Chinese Journal of Ecology, 32(2): 332-336.
- 张一平, 武传胜, 梁乃申, 等, 2015. 哀牢山亚热带常绿阔叶林森林土壤温湿特征及其对温度升高的响应[J]. 生态学报, 35(22): 7418-7425.
- ZHANG Y P, WU C S, LIANG N S, et al., 2015. Responses of soil temperature, moisture and respiration to experimental warming in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 35(22): 7418-7425.
- 张宇鸿, 沈燕, 黄志宏, 等, 2016. 亚热带三种林型甲烷通量及其影响因子[J]. 湖南林业科技, 43(1): 26-32.
- ZHANG Y H, SHENG Y, HUANG Z H, et al., 2016. Factors affecting methane fluxes of three forests in subtropics [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 43(1): 26-32.
- 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等, 2005. 鼎湖山针阔叶混交林地表 CH₄ 通量[J]. 生态环境, 14(3): 333-335.
- ZHOU C Y, ZHOU G Y, WANG Y H, et al., 2005. CH₄ fluxes from soil of coniferous broad-leaved mixed forest in Dinghu Mountain [J]. Ecology and Environment, 14(3): 333-335.
- 张强, 2017. 南岭地区 4 种森林类型 CH₄ 通量影响因素分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学.
- ZHANG Q, 2017. CH₄ fluxes and its effect factors for four forests in Nanling area [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology.
- 朱华, 2022. 云南植被多样性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 42(1): 1-12.
- ZHU H, 2022. Vegetation of diversity of Yunnan [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 42(1): 1-12.

Characteristics of Soil CH₄ Flux in the Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest in Ailao Mountain, Yunnan, Southwest China

CHEN Lijuan^{1, 5}, ZHOU Wenjun^{1, 2, 5*}, YI Yanyun^{1, 5}, SONG Qinghai^{1, 2}, ZHANG Yiping^{1, 2}, LIANG Naishen⁴, LU Zhiyun^{1, 3}, WEN Handong^{1, 3}, MOHD Zeeshan¹, SHA Liqing^{1, 2, 5, 6*}

1. CAS Key Laboratory of Tropical Forest Ecology/Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, P. R. China;

2. Center for Plant Ecology, Core Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, P. R. China;

3. Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Jingdong 676209, P. R. China;

4. Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China;

6. Institutional Center for Shared Technologies and Facilities of Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, P. R. China

Abstract: Methane (CH₄), one of the important greenhouse gases, has significant effects on global climate change. Subtropical forest soil plays an important role in CH₄ sink, which, however, are still uncertain by models due to few *in situ* observation in the subtropical zone. Field based investigations of CH₄ flux and its contribution to the carbon sink capacity of forest ecosystem are needed. In this study, we collected the one-year experimental data of CH₄ flux in Ailao Mountain subtropical evergreen broad-leaved forest by continuous automatic flux chambers systems. The regulating factors including air temperature (t_a), surface temperature (t_0), soil temperature at 5 cm depth (t_5), precipitation (P) and soil water content (C_{sw}) were analyzed. The results showed that (1) the subtropical forest soil acted as the sink of CH₄. The annual CH₄ uptake were $(-11.79 \pm 0.001) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in the subtropical evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountain. The seasonal dynamic with the soil CH₄ flux in dry season $(-0.17 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ was significantly stronger than that in rainy season $(-0.10 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ($P < 0.05$). (2) There were significant correlations between soil CH₄ flux and surface temperature ($r^2 = 0.2125$, $P < 0.001$), and between soil temperature at 5 cm ($r^2 = 0.1948$, $P < 0.001$) and air temperature ($r^2 = 0.0983$, $P < 0.001$). Soil CH₄ flux was correlated with soil temperature at 5 cm positively when the temperature was at or below 12.35 °C and negatively when it was above 12.35 °C. (3) The relationship between CH₄ flux and soil water content showed statistical significance, which explained the correlation of soil CH₄ 90.36% ($P < 0.001$). The fitting results of single and two factors relationship models showed that soil water content was the dominant factor affecting soil CH₄ flux absorption in the subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain. (4) The global warming potential of soil CH₄ flux for 20 years (990.15 CO₂) and 100 years (330.05 CO₂) was 2.2% and 0.7% of soil CO₂ and 10.6% and 3.5% of net ecosystem exchange (NEE), respectively. Therefore, soil water content can be used to predict the change of soil CH₄ flux and the intensity of ecosystem CH₄ sink of subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain.

Keywords: subtropical forest; CH₄ flux; soil water content; temperature sensitivity (Q_{10}); global warming potential