

DOI: 10.5846/stxb202106281706

李君怡, 席毅, 赵俊福. 土壤湿度对中国南部热带森林土壤甲烷吸收的影响. 生态学报, 2022, 42(12): 4978-4987.

Li J Y, Xi Y, Zhao J F. Effects of soil moisture on methane uptake in a tropical forest of southern China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4978-4987.

土壤湿度对中国南部热带森林土壤甲烷吸收的影响

李君怡¹, 席毅¹, 赵俊福^{2,*}

¹ 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

² 海南省生态环境监测中心, 海口 571126

摘要: 森林土壤是一个重要的大气甲烷的汇。然而, 相较于寒带和温带, 在热带尤其是东南亚地区, 森林土壤甲烷通量的观测较少, 这限制了目前对热带森林土壤甲烷通量与环境因子之间关系的认识, 也给热带森林土壤甲烷汇的估算带来了一定的不确定性。在中国海南省吊罗山国家森林公园的热带森林土壤, 采用激光光谱法测量了 2016 年 9 月至 2018 年 9 月逐月的土壤甲烷通量, 并分析了其与周围环境因子的关系。结果表明: 研究区土壤是甲烷的汇, 山顶样地的年平均吸收量为 $0.95 \text{ kg CH}_4\text{-C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 山脚样地的年平均吸收量为 $1.93 \text{ kg CH}_4\text{-C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。干季(11 月—次年 4 月)的甲烷吸收通量明显高于湿季(5—10 月), 占到全年甲烷吸收的 68%。山顶样地年平均土壤湿度为 19.2%, 年内的波动较小(2.8%)。而山脚样地的年平均湿度相对较低, 为 12.7%, 且年内波动大(5.4%)。土壤湿度是控制甲烷吸收最主要的环境因子, 可以解释月际甲烷吸收变化的 76%, 甲烷吸收通量与土壤温度的相关性则不显著。当土壤湿度高于 20%(体积分数)时, 研究区土壤开始从甲烷的汇转变为甲烷的源。综合研究及热带其他研究中甲烷吸收与土壤湿度的关系, 推算出热带森林土壤的甲烷年吸收量为 $1.72 \text{ Tg CH}_4\text{-C/a}$ 。结果对东南亚地区长时间甲烷通量观测及热带森林土壤甲烷汇的估算具有重要意义。

关键词: 热带森林土壤; 甲烷吸收; 土壤湿度; 土壤温度

Effects of soil moisture on methane uptake in a tropical forest of southern China

LI Junyi¹, XI Yi¹, ZHAO Junfu^{2,*}

¹ College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

² Hainan Provincial Ecological and Environmental Monitoring Centre, Haikou 571126, China

Abstract: Forest soils contribute substantially to the global methane uptake. However, compared with the cold and temperate zones, measurements of methane flux from the soils in the tropical forests are still sparse, especially in Southeastern Asia. This gap limits our understanding of the relationship between the methane flux from the soils and the environmental factors, which leads to large uncertainty in the estimation of the methane uptake flux from the tropical forest soils. This study was conducted in Diaoluoshan National Forest Reserve in Hainan Province, China. We measured monthly methane flux from the tropical forest soils by near-infrared laser greenhouse analyzers from September 2016 to September 2018. Soil moisture and soil temperature were measured simultaneously by Decagon 5 TM sensors. Furthermore, we analyzed the relationship between the methane flux with the environmental factors. The results revealed that the soils of the study area served as the sink of atmospheric methane during a 2-year period. The methane uptake in tropical forest soils at the top of the mountain was $0.95 \text{ kg CH}_4\text{-C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, while that in tropical forest soils at the foot of the mountain was $1.93 \text{ kg CH}_4\text{-C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The methane uptake flux in the dry season (from November to April next year) was significantly higher than that in the wet season (from May to October). The former one accounted for about 68% of the methane uptake flux of the whole year. The mean annual soil moisture at the top of the mountain was 19.2% with an intra-annual variance of 2.8%. And the

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(421RC668)

收稿日期: 2021-06-28; 网络出版日期: 2022-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hnuzhao@sina.com

mean annual soil moisture at the foot of the mountain was 12.7% with a bigger intra-annual variance (5.4%) than that at the top of the mountain. Soil moisture acted as the significant predictor of the methane uptake flux and accounted for 76% of the variance. There was no significant correlation between methane uptake flux and soil temperature. For soil moisture lower than 20% (v/v), the relation between soil moisture and methane flux was best fitted with linear regression. For soil moisture higher than 20% (v/v), the tropical forest soils of the study area turned from the sink to the source of the methane flux. According to the relationship between soil moisture and methane flux in the tropical forests, we estimated the annual methane uptake of the tropical forest soils was 1.72 Tg CH₄-C/a. Our results have important implications for long-term methane flux measurements in Southeastern Asia and the estimation of the magnitude of the methane uptake from tropical forest soils.

Key Words: tropical forest soil; methane uptake; soil moisture; soil temperature

甲烷(CH₄)是仅次于二氧化碳(CO₂)的第二大温室气体,尽管它在大气中的浓度只有CO₂的0.45%,其增温潜势却是CO₂的28—34倍^[1]。在过去的几十年,大气CH₄的浓度不断上升,到2020年,已经达到1873 mm³/m³^[2]。大气CH₄浓度的增长是CH₄排放与吸收平衡之后的结果。根据最新的全球甲烷排放收支(2008—2017)^[3],全球CH₄年排放量约为576(550—594) Tg/a,主要来源于水稻田、湿地、海洋以及化石燃料的开采与燃烧。全球CH₄年吸收量约为556(501—574) Tg/a,主要通过在对流层中与羟基自由基发生氧化还原反应、向平流层传输、在通气条件下被土壤中的甲烷氧化菌氧化消除^[4]。土壤产甲烷过程是缺氧环境中有机质分解的核心环节,而甲烷氧化是缺氧-有氧界面的重要微生物过程^[5]。既往研究显示,土壤甲烷通量存在较大的时空差异^[6],气候^[7]、植被类型^[8—9]、底质可利用性^[10]等影响CH₄产生、氧化、传输过程的因子都将引起CH₄通量的变化。气体扩散率随土壤充气孔隙的增加而增加,影响土壤的通气状况且控制土壤与大气间的气体交换。在温带森林^[11—15]和温带草地^[16—18]的实地研究中,观测到CH₄通量与土壤温度、土壤湿度的季节动态呈现一致性。然而,对于热带地区的土壤CH₄通量与环境因子之间的关系却鲜有研究。

热带森林土壤是大气CH₄一个重要的汇^[19],在全球甲烷收支中发挥着重要的作用。一项基于318个站点(包含62个热带森林站点)的全球土壤甲烷吸收的荟萃分析表明,热带森林土壤的CH₄吸收量约为4.65 Tg CH₄-C/a,约占全球土壤CH₄吸收量的28%^[20]。另有研究表明,热带森林土壤CH₄的吸收量在近几十年正在逐步增加^[21]。然而,由于气候类型的多样性及森林结构的复杂性,有关热带森林土壤CH₄吸收对全球变化的响应及机制的认识仍十分有限。相较于寒带森林^[22—24]和温带森林^[25—26],目前热带尤其是东南亚的CH₄通量观测较少。东南亚的热带森林土壤是甲烷的源还是汇尚不清楚,其土壤CH₄通量的量级大小、季节动态、驱动因子亟需进一步的研究。

吊罗山国家森林公园位于我国海南省东南部,是我国重要的热带森林保护区之一。本研究通过对吊罗山热带森林土壤原位甲烷通量及相关环境因子连续两年(2016年9月至2018年9月)的观测,旨在分析热带森林土壤甲烷通量的季节变化规律及其与环境因子的关系,研究结果将为东南亚地区长时间甲烷通量观测及热带森林土壤甲烷汇的估算提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取海南省吊罗山国家森林公园(18°43'—18°58'N, 109°43'—110°03'E)为研究区域(图1的红色五角星处)。该公园位于海南省陵水县、保亭县和琼中县交界处,总面积3.8万hm²,是我国重要的热带森林保护区之一。气候属热带海洋性气候,全年暖热,降水丰沛。年降水量1870—2760 mm,年均气温24.4℃,最冷月平均气温15.4℃,月均相对空气湿度80%—85%^[27]。

由于吊罗山公园地形起伏较大,山顶和山脚分别是典型的山地森林和低地森林,因此本研究分别在山顶(海拔为 970 m)和山脚(海拔为 260 m)布设两个样地。山脚的母岩为黑云母花岗岩,土壤类型以山地赤红壤为主,主要组成树种有青梅(*Vatica mangachapoi*)、钝叶新木姜子(*Neolitsea obtusifolia*)、光叶巴豆(*Croton laevigatus*)、子凌蒲桃(*Syzygium tephrodes*)、琼榄(*Gonocaryum lobbianum*)和九节(*Psychotria rubra*)等。山顶的母岩为花岗岩,土壤类型主要为山地黄壤,主要组成树种有陆均松(*Dacrydium pierrei*)、丛花山矾(*Symplocos poilanei*)、楔叶桉(*Eurya cuneate*)、五列木(*Pentaphylax euryoides*)、红鳞蒲桃(*Syzygium hancei*)和脉叶虎皮楠(*Daphniphyllum paxianum*)等^[27]。位于山顶的热带山地森林和位于山脚的热带低地森林均为 20 世纪 70—80 年代择伐后天然更新的次生林,林下基本无草本层,两类森林的土壤基本理化性质如表 1 所示。地表常年有凋落物覆盖,山顶样地的凋落物多于山脚样地。凋落物的主要组成是叶片,树枝及果实较少。

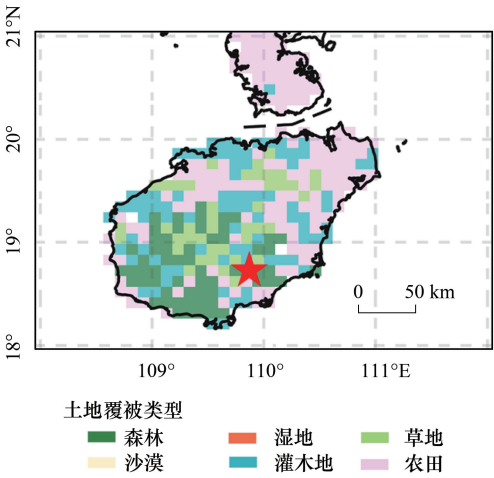


图 1 研究区地理位置

Fig.1 The geographical location of the study area

表 1 热带山地森林和热带低地森林的土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in tropical lowland and montane forest		
项目 Item	热带低地森林 Tropical lowland forest	热带山地森林 Tropical montane forest
pH	5.65	4.62
全碳含量 Total C content/(g/kg)	9.84	23.39
全氮含量 Total N content/(g/kg)	0.91	1.59
全磷含量 Total P content/(g/kg)	0.12	0.14
碳氮比 C:N	10.81	14.71
可溶性有机碳含量 Soluble organic C content/(mg/kg)	94.1	180.61
可溶性总氮含量 Soluble total N content/(mg/kg)	10.59	15.6
无机氮含量 Inorganic N content/(mg/kg)	8.73	11.38
铵态氮含量 Ammonium N content/(mg/kg)	5.07	8.71
硝态氮含量 Nitrate N content/(mg/kg)	3.66	2.68
速效磷含量 Available P content/(mg/kg)	6.38	24.16
田间持水量 Field capacity/(g/g)	0.28	0.64

1.2 样品采集与处理

在研究区山顶和山脚进行 CH₄ 通量、CO₂ 通量及主要环境因子包括土壤温度和土壤湿度的测量,于 2016 年 9 月至 2018 年 9 月每月测量 1 次。受地形因素的影响,设置山顶样地大小为 50 m × 50 m,山脚样地的大小为 30 m × 30 m。样地的地理位置如图 1 所示。在每个样地中,分别沿对角线选取三个样方(10 m × 10 m),布设土壤呼吸环以测量土壤的甲烷通量和二氧化碳通量。在每一个样方中,随机布设五个土壤呼吸环(土壤呼吸环插入土壤中的深度为 10 cm)。土壤呼吸环的外直径 20 cm,长 10 cm。五个土壤呼吸环测得通量的平均值代表该样方的数值。

甲烷通量和二氧化碳通量均采用便携式温室气体分析仪(LGR Inc., San Jose, USA)测量,其测量原理为离轴积分输出腔光谱技术。本研究采取原位测量,测量前不移除凋落物层。距土壤表面约 5 cm 处的土壤温

度和土壤湿度(全土体体积含水量)由 Decagon 5 TM 传感器(Decagon Devices Inc., USA)测量。为了尽可能减小人为测量造成的数据偏差,每次温室气体通量和环境因子的测量工作均在上午进行,此时的土壤甲烷通量接近全天的平均值^[28]。每个呼吸环测量 1 次的时间是 170 s,一共测量三次,取其平均值作为当次测量的结果。在本研究中,从大气到土壤的通量记为负值,反之记为正值。

在升尺度估算全球热带森林土壤甲烷通量时,使用的土壤水数据为 SMOS 卫星遥感数据,来源于 SMOS 数据处理中心(CATDS, <https://www.catds.fr/>),其有效载荷为使用孔径合成(MIRAS)仪器的微波成像辐射计,是全球第一个采用 L 波段的遥感器。由于 L 波段能够穿透大气和植被,因此有效地排除了其对于土壤水分反演的干扰^[29]。

1.3 数据处理

采用 MATLAB R2018b 和 RStudio 软件对数据进行统计分析。采用 Pearson 相关分析对 CH₄通量、CO₂通量和土壤温度、土壤湿度进行相关分析。

相关系数的计算公式如下:

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中, $\bar{x}$ 是 x 的平均值, $\bar{y}$ 是 y 的平均值。

由于土壤中 CH₄吸收随着土壤湿度的增加并非呈现出单调递减的关系,而是当土壤湿度非常大甚至土壤趋于饱和时,土壤由 CH₄的汇变成 CH₄的源。因此,本研究使用分段线性回归^[30]拟合土壤 CH₄吸收和土壤湿度的关系:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon & (x \leq \alpha) \\ \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2(x - \alpha) + \varepsilon & (x > \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中, y 是甲烷通量, x 是土壤湿度, α 是 CH₄通量变化趋势开始改变的断点, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 是回归系数, ε 是残差。利用 RStudio (<http://rstudio.com/>) 中的 segmented 包进行分段回归,并进行断点估计。

运用 MATLAB R2018b 软件进行数据制图。

2 结果与分析

2.1 土壤温度和土壤湿度的季节变化

图 2 展示了 2016 年 9 月至 2018 年 9 月研究区表层土壤(5 cm)的温度和湿度的季节变化。与气温的季节变化趋势一致,土壤温度的最大值出现在夏季(山顶样地为 24.9 °C,山脚样地为 27.5 °C),最小值出现在冬季(山顶样地为 11.5 °C,山脚样地为 15.4 °C)。山顶样地的年平均土壤温度比山脚样地低 3.3 °C。对于土壤湿度,山顶样地年平均土壤湿度为 19.2%,年内的波动较小(2.8%)。而山脚样地的年平均湿度相对较低,为 12.7%,且年内波动大(5.4%)。

2.2 二氧化碳通量和甲烷通量的季节变化及相关性

图 3 展示了研究时段研究区 CO₂通量和 CH₄通量的季节变化。山顶样地和山脚样地均为 CO₂的源(即土壤呼吸过程),山顶样地年平均 CO₂排放通量约为 1.72 μmol m⁻² s⁻¹,山脚样地约为 2.36 μmol m⁻² s⁻¹,且在 4—10 月 CO₂的排放量更多。对于 CH₄通量,山顶样地和山脚样地在研究时段内基本都为 CH₄的汇(山顶样地年平均 CH₄吸收通量约为 0.25 nmol m⁻² s⁻¹,山脚样地约为 0.51 nmol m⁻² s⁻¹)。相比于 CO₂,山顶和山脚 CH₄吸收的季节波动表现出更明显的分歧,山顶 CH₄吸收的季节波动比山脚低 0.15 nmol m⁻² s⁻¹。

图 4 展示了研究时段 CH₄吸收通量与 CO₂排放通量的关系,CO₂排放通量仅能解释 CH₄吸收通量月际变化的 0.2%,二者之间的相关性并不显著($P=0.76$)。

2.3 二氧化碳通量和甲烷通量对土壤温度和土壤湿度的响应

图 5 展示了研究时段 CO₂排放和 CH₄吸收与土壤温度和湿度的关系。对于 CO₂的排放,研究时段 CO₂的

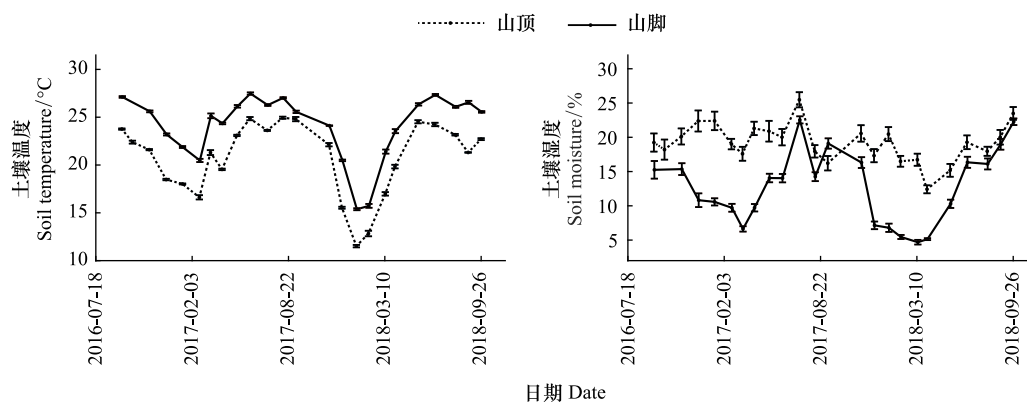


图2 2016—2018年土壤温度和土壤湿度的季节动态

Fig.2 Seasonal variations of soil temperature and soil moisture from 2016 to 2018

误差线表示标准误

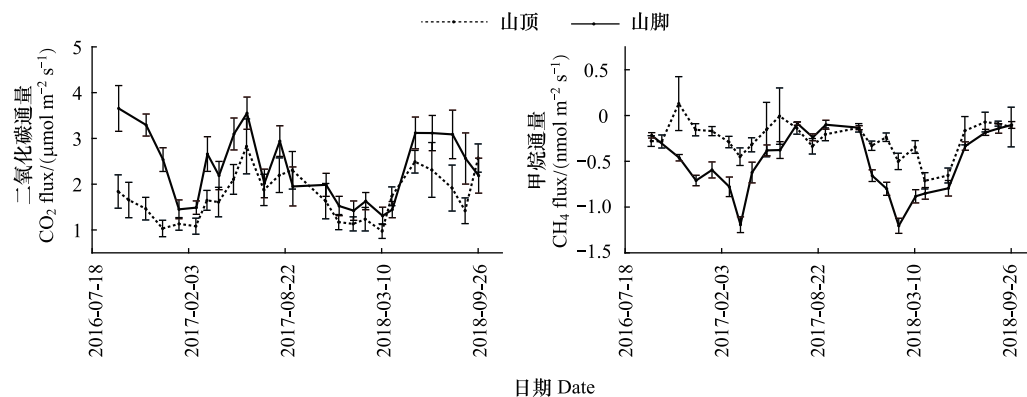


图3 2016—2018年二氧化碳通量和甲烷通量的季节动态

Fig.3 Seasonal variations of CO₂ flux and CH₄ flux from 2016 to 2018

误差线表示标准误

排放与土壤温度呈现出显著的正相关(相关系数 $R = 0.80, P < 0.01$), 土壤温度可以解释研究区 CO₂ 排放月际变化的 64%, 而土壤湿度和 CO₂ 的排放之间没有显著的相关关系。相比之下, CH₄ 的吸收与环境因子的关系与之相反。研究时段 CH₄ 的吸收和土壤湿度之间呈现出显著的负相关关系(相关系数 $R = 0.88, P < 0.01$), 但当土壤湿度超过 20% 时, 土壤 CH₄ 的吸收基本接近于 0, 并存在转化为 CH₄ 的源的现象。因此, 对于土壤湿度和 CH₄ 吸收的关系, 我们采用分段函数进行拟合:

$$y = \begin{cases} -1.28 + 0.06x + \varepsilon & (x \leq 20.02) \\ 0 + \varepsilon & (x > 20.02) \end{cases} \quad (3)$$

2.4 热带森林土壤甲烷吸收量升尺度估算

由于本研究中发现热带森林土壤湿度对于甲烷吸收有明显的主导作用, 使用 SMOS 卫星观测的土壤湿度数据对热带森林土壤甲烷通量进行了升尺度估算。图 6 展示了 2017 年热带地区土壤湿度和甲烷吸收通量的

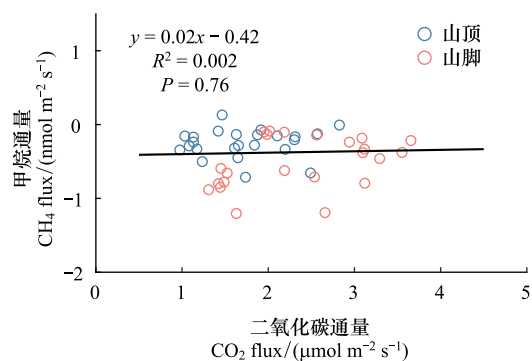


图4 2016—2018年甲烷通量对二氧化碳通量的响应

Fig.4 Response of CH₄ flux to CO₂ flux from 2016 to 2018

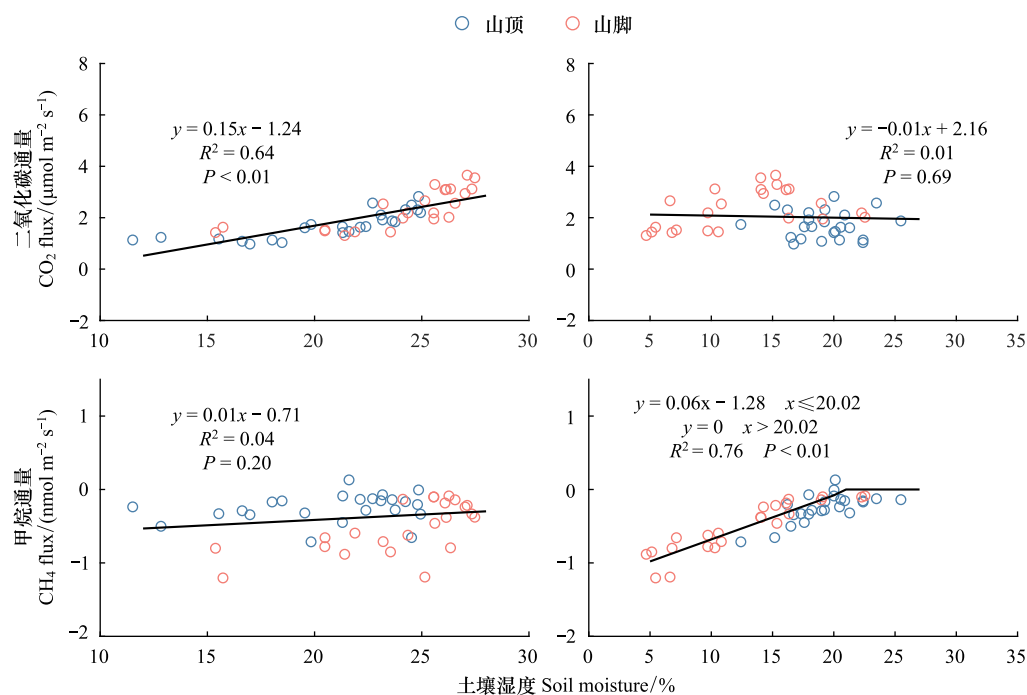


图5 2016—2018年二氧化碳通量和甲烷通量对土壤温度和土壤湿度的响应

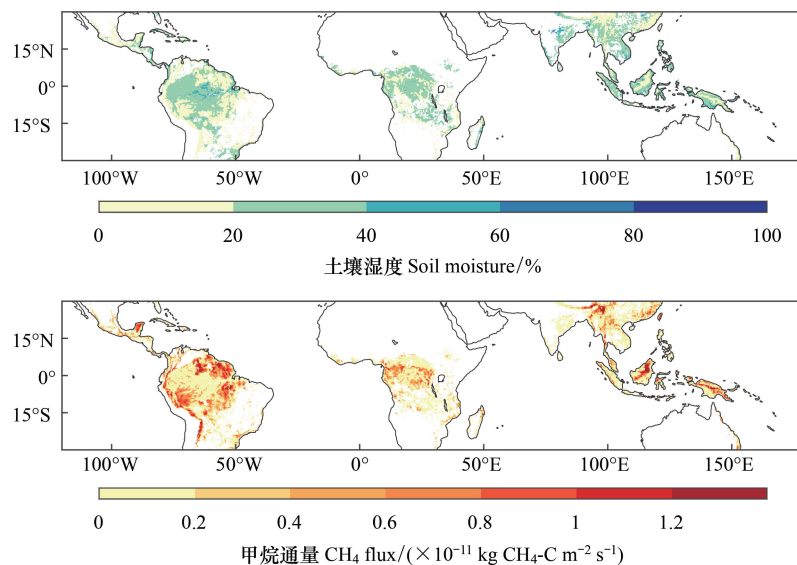
Fig.5 Responses of CO₂ flux and CH₄ flux to soil temperature and soil moisture from 2016 to 2018

图6 2017年热带地区土壤湿度以及甲烷吸收通量的空间格局图

Fig.6 Spatial pattern of soil moisture and CH₄ uptake flux in tropics in 2017

空间格局。综合本研究及表2中研究的结果,得到热带森林土壤湿度和CH₄吸收的关系:

$$y = \begin{cases} -1.44 + 0.06x + \varepsilon & (x \leq 18.04) \\ 0 + \varepsilon & (x > 18.04) \end{cases} \quad (4)$$

另外,由于研究站点测量的土壤湿度受到仪器和土壤质地的影响,测量值比卫星观测偏低。因此在升尺度估算前,对测量数据进行了偏差校正。经过偏差校正之后升尺度估算到的2017年热带森林土壤(1.35×10^9 hm²,

来源于 MODIS MCD12Q1 土地覆被数据)的甲烷吸收通量约为 1.72 Tg CH₄-C/a。

3 讨论

3.1 热带森林土壤作为甲烷的汇

土壤甲烷通量是甲烷产生过程(主要在厌氧条件下发生)和甲烷氧化过程(主要在有氧条件下发生)平衡之后的结果^[31]。由于热带森林土壤一般为不饱和的土壤,因此更有利于发生甲烷的氧化作用。本研究中,无论是山顶样地还是山脚样地,均表现为甲烷的汇。热带森林土壤表现为甲烷的汇这一结论已经被之前的大量研究证实(表 2)。王全成等在中国福建省(27°03'N)的研究发现杉木人工林土壤全年均表现为甲烷汇(甲烷年通量为 1.86 kg CH₄-C hm⁻² a⁻¹)^[32]。Gong 等在中国广东省(21°27'N)持续一年的通量观测表明,热带森林土壤为甲烷汇(甲烷年通量为 0.33 kg CH₄-C hm⁻² a⁻¹)^[33]。Davidson 等在巴西(02°54'S)的研究也发现,热带森林土壤表现为甲烷的吸收,年甲烷吸收通量为 0.83 kg CH₄-C hm⁻² a⁻¹^[34]。Zhao 等搜集了全球 54 项热带森林土壤研究中的甲烷通量数据,其中 94% 的甲烷通量为负值,也证实了热带森林土壤是较强的甲烷吸收汇^[35]。

表 2 热带不同区域森林土壤甲烷年通量

Table 2 Annual CH₄ flux of forest soils in different regions of the tropics

地点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	测量时间 Measure time	甲烷年通量 Annual CH ₄ flux/ (kg CH ₄ -C hm ⁻² a ⁻¹)	甲烷通量与土壤湿度的 回归方程 Regression equation between CH ₄ uptake and soil moisture	参考文献 References
中国福建	27°03'N	118°09'E	2010-09—2011-09 (每月测量 2 次)	1.86	$y = 0.03x - 1.35^{**}$ $R^2 = 0.48$	[32]
中国广东	21°27'N	110°54'E	2018-10—2019-09 (每月测量 1 次)	0.33	$y = 0.01x - 0.19^*$ $R^2 = 0.52$	[33]
巴西	02°54'S	54°57'W	1998-09—2002-12 (每两月测量 1 次)	0.83	$y = 0.03x - 1.56$ $R^2 = 0.25$	[34]
中国云南	21°56'N	101°16'E	2003-01—2006-01 (生长季每周测量 1 次, 非生长季每月测量 1 次)	1.86	$y = 0.04x - 2.38^{**}$ $R^2 = 0.37$	[38]
中国海南	18°43'N	109°53'E	2016-09—2018-09 (每月测量 1 次)	1.44	$y = 0.06x - 1.28^{**}$ $R^2 = 0.76$	本研究
秘鲁	13°11'S	71°34'W	2011-02—2013-06 (每月测量 1 次)	3.16	$y = 0.05x - 2.40^*$ $R^2 = 0.63$	[39]

* 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)

季节上,本研究发现甲烷吸收通量在干季(11月—次年4月)明显高于湿季(5—10月)(约 0.28 nmol m⁻² s⁻¹)。Keller 和 Reiners 的研究也发现,哥斯达黎加(10°26'N)的老龄林中,甲烷吸收通量在干季更高(约 0.61 nmol m⁻² s⁻¹)^[36]。贾高辉等在海南岛尖峰岭(18°23'N)热带山地雨林的研究也表明,土壤甲烷通量整体呈现出旱季大于雨季(约 0.26 nmol m⁻² s⁻¹)^[28]。莫江明等在鼎湖山(23°10'N)的研究也发现,土壤甲烷的吸收速率在研究期间出现夏季最低(约 0.09 nmol m⁻² s⁻¹),冬季最高(约 0.93 nmol m⁻² s⁻¹)^[37]。

3.2 土壤温度和湿度对热带森林土壤甲烷吸收的影响

土壤湿度决定了土壤的通气情况,是影响甲烷吸收和排放的重要环境因子^[40]。本研究中,无论是在热带山地森林还是热带低地森林,甲烷吸收和土壤湿度均呈现出显著的负相关,且土壤湿度可以解释甲烷吸收变化的至少 76% ($P < 0.01$),显示出热带森林土壤湿度对甲烷吸收的主导作用。一致的结论在热带其他地区的森林土壤也有证实(表 2)。Fang 等在中国云南省西双版纳(21°56'N)的研究发现,土壤湿度可以解释甲烷吸收变化的 37% ($P < 0.01$)^[38]。Jones 等在秘鲁(13°11'S)的研究同样发现,甲烷吸收通量与土壤湿度呈显著负相关($R = 0.79, P < 0.05$)^[39]。Rowlings 等在澳大利亚(26°45'S)的热带森林的实验表明,土壤湿度控制甲烷吸

收($R=0.52, P<0.01$)^[41]。这些实验都表明,低的土壤湿度决定的有氧环境是甲烷氧化过程强于甲烷吸收过程的重要前提条件。

土壤温度的变化可以影响甲烷产生和氧化反应中酶的活性,进而影响甲烷的排放和吸收^[19]。然而,本研究中,无论是山顶样地还是山脚样地,土壤温度和甲烷吸收通量之间均没有显著的相关关系,但是土壤温度明显影响了土壤呼吸的过程。这意味着,在研究区,土壤湿度对于甲烷通量的变化是占主导作用的,土壤温度的影响则非常轻微。土壤温度对于热带森林土壤甲烷通量的弱的影响在其他研究中也体现。例如,Werner 等在中国云南省西双版纳($21^{\circ}57'N$)原始林的研究发现,土壤温度仅能解释甲烷吸收变化的 5% ($P<0.05$)^[42]。Werner 等在肯尼亚西部($00^{\circ}16'N$)热带森林实验中也发现,土壤温度与甲烷吸收通量无显著相关性($R^2<0.05, P<0.01$)^[43]。

3.3 热带森林土壤甲烷吸收量的估算

本研究经过偏差校正之后升尺度估算到的 2017 年热带($30^{\circ}N-30^{\circ}S$)森林土壤($1.35\times 10^9\text{ hm}^2$)的甲烷吸收通量约为 $1.72\text{ Tg CH}_4\text{-C/a}$,而 Dutaur 和 Verchot 运用荟萃分析搜集了热带森林土壤甲烷吸收的 58 个测量值,估算出热带森林($1.93\times 10^9\text{ hm}^2$)土壤的甲烷吸收通量为 $4.65\text{ Tg CH}_4\text{-C/a}$ ^[20]。由于 Dutaur 和 Verchot 的研究使用了比本研究中更大的森林面积,且不同站点直接平均受到站点不具备代表性的影响(其热带站点大多集中在南美洲北部,缺乏非洲、亚洲的实测数据),因此其估算的结果可能存在较大的不确定性。除了基于站点测量的估算结果,Curry 使用 CLASS(Canadian Land Surface Scheme)模型模拟的热带森林($1.55\times 10^9\text{ hm}^2$)土壤的甲烷吸收通量为 $3.11\text{ Tg CH}_4\text{-C/a}$ ^[21],由于该模型使用了更大的热带森林面积($2\times 10^8\text{ hm}^2$),且模型的关键参数 β 和 k_0 的验证使用的观测站点较少,因此模型模拟结果也存在较大的不确定性。总体上,大尺度的热带森林土壤甲烷吸收的估算仍然需要更多实地观测的结果。

4 结论

本研究通过测量 2016—2018 年吊罗山热带森林土壤甲烷通量和相关的环境因子,发现我国海南省吊罗山森林公园的热带森林土壤表现为甲烷的汇,且干季的甲烷吸收通量明显高于湿季。土壤湿度主导了研究区甲烷吸收的月际变化。由于热带地区的甲烷地面观测站点分布稀疏,且大部分站点观测时长有限,更多长期的实地观测研究可以帮助了解热带森林土壤甲烷通量的季节变化特征,提升对其在全球甲烷收支中作用的认识。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Dlugokencky E J. 2020 NOAA/ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/.
- [3] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K, Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlson K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L C, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguia-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C H, Peng S S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentretter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele P L, Thornton B F, Tian H Q, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, van der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W X, Zhang Z, Zhao Y H, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q, Zhuang Q L. The global methane budget 2000—2017. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1561-1623.
- [4] 何娜, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 李永夫. 全球变化对森林土壤甲烷吸收的影响及其机制研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 677-684.
- [5] 张坚超, 徐德钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理. *生态学报*, 2015, 35(20): 6592-6603.
- [6] Li T T, Huang Y, Zhang W, Song C C. CH4MOD_{wetland}: a biogeophysical model for simulating methane emissions from natural wetlands. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 666-680.

- [7] Lu X Y, Cheng G W. Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in *Abies fabri* forest of subalpine, southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 1015-1021.
- [8] 曾从盛, 王维奇, 张林海, 林璐莹, 艾金泉, 章文龙. 闽江河口短叶茳芩潮湿地甲烷排放通量. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 500-504.
- [9] Chen H, Wu N, Yao S P, Gao Y H, Zhu D, Wang Y F, Xiong W, Yuan X Z. High methane emissions from a littoral zone on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(32): 4995-5000.
- [10] Grünfeld S, Brix H. Methanogenesis and methane emissions: effects of water table, substrate type and presence of *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*, 1999, 64(1): 63-75.
- [11] Butterbach-Bahl K, Papen H. Four years continuous record of CH_4 -exchange between the atmosphere and untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany. *Plant and Soil*, 2002, 240(1): 77-90.
- [12] Castro M S, Melillo J M, Steudler P A, Chapman J W. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(9): 1805-1810.
- [13] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, Aber J D, Bowden R D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 1-10.
- [14] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, Newkirk K M, Bowles F P, Aber J D. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 1994, 4(3): 617-625.
- [15] Wu X, Brüggemann N, Gasche R, Shen Z Y, Wolf B, Butterbach-Bahl K. Environmental controls over soil-atmosphere exchange of N_2O , NO , and CO_2 in a temperate Norway spruce forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(2): GB2012, DOI: 10.1029/2009GB003616.
- [16] Chen W W, Wolf B, Yao Z S, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Liu C Y, Han S H, Han X G, Zheng X H. Annual methane uptake by typical semiarid steppe in Inner Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D15): D15108, doi: 10.1029/2009JD013783.
- [17] van den Pol-van Dasselaar A, van Beusichem M L, Oenema O. Effects of soil moisture content and temperature on methane uptake by grasslands on sandy soils. *Plant and Soil*, 1998, 204(2): 213-222.
- [18] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, Shen Z Y, Wolf B, Dannenmann M, Zheng X, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on CO_2 and CH_4 soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(5): 773-787.
- [19] Wolf K, Flessa H, Veldkamp E. Atmospheric methane uptake by tropical montane forest soils and the contribution of organic layers. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 469-483.
- [20] Dutaur L, Verchot L V. A global inventory of the soil CH_4 sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): GB4013, doi: 10.1029/2006GB002734.
- [21] Curry C L. Modeling the soil consumption of atmospheric methane at the global scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): GB4012, doi: 10.1029/2006GB002818.
- [22] Billings S A, Richter D D, Yarie J. Sensitivity of soil methane fluxes to reduced precipitation in boreal forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(10): 1431-1441.
- [23] Maljanen M, Jokinen H, Saari A, Strömmer R, Martikainen P J. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use and Management*, 2006, 22(2): 151-157.
- [24] Xu M J, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Gao W L, Wang Y S, Dang X S, Li L S. Low-level nitrogen addition promotes net methane uptake in a boreal forest across the Great Xing'an Mountain region, China. *Forest Science*, 2014, 60(5): 973-981.
- [25] Fender A C, Pfeiffer B, Gansert D, Leuschner C, Daniel R, Jungkunst H F. The inhibiting effect of nitrate fertilisation on methane uptake of a temperate forest soil is influenced by labile carbon. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(6): 621-631.
- [26] 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. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1388-1395.
- [27] 马志波, 黄清麟, 庄崇洋, 黄金城, 王宏. 吊罗山国家森林公园山地雨林板根树与板根的数量特征. *林业科学*, 2017, 53(6): 135-140.
- [28] 贾高辉, 许全, 杨怀, 杨秋, 李意德, 刘文杰. 尖峰岭热带山地雨林林窗土壤甲烷通量研究. *森林与环境学报*, 2020, 40(2): 126-132.
- [29] Kerr Y H, Waldeufel P, Wigneron J P, Martinuzzi J, Font J, Berger M. Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [30] Toms J D, Lesperance M L. Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [31] Chan A S K, Parkin T B. Evaluation of potential inhibitors of methanogenesis and methane oxidation in a landfill cover soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1581-1590.
- [32] 王全成, 陈勿琼, 杨智杰, 刘小飞, 谢锦升, 杨玉盛. 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. *生态学报*, 2019, 39(10): 3517-3525.

- [33] Gong Y, Sun F, Wang F M, Lai D Y F, Zhong Q P, Li Y W, Li Z A, Hu Z M, Jiang Z Y, Wang M. Seven years of wetter and delayed wet season enhanced soil methane uptake during the dry season in a tropical monsoon forest. *CATENA*, 2021, 203: 105276.
- [34] Davidson E A, Ishida F Y, Nepstad D C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 718-730.
- [35] Zhao J F, Peng S S, Chen M P, Wang G Z, Cui Y B, Liao L G, Feng J G, Zhu B, Liu W J, Yang L Y, Tan Z H. Tropical forest soils serve as substantial and persistent methane sinks. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16799.
- [36] Keller M, Reiners W A. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, and methane under secondary succession of pasture to forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(4): 399-409.
- [37] 莫江明, 方运霆, 李德军, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收特征. *广西植物*, 2006, 26(2): 142-147.
- [38] Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Zhu T H, Wang Y S, Yan J H, Wang M, Cao M, Zhou M. Effects of multiple environmental factors on CO₂ emission and CH₄ uptake from old-growth forest soils. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 395-407.
- [39] Jones S P, Diem T, Quispe L P H, Cahuana A J, Reay D S, Meir P, Teh Y A. Drivers of atmospheric methane uptake by montane forest soils in the southern Peruvian Andes. *Biogeosciences*, 2016, 13(14): 4151-4165.
- [40] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展. *地球科学进展*, 1999, 14(6): 613-618.
- [41] Rowlings D W, Grace P R, Kiese R, Weier K L. Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 726-738.
- [42] Werner C, Zheng X H, Tang J W, Xie B H, Liu C Y, Kiese R, Butterbach-Bahl K. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 335-353.
- [43] Werner C, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Soil-atmosphere exchange of N₂O, CH₄, and CO₂ and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D3): D03308.