

中亚热带米槠天然林土壤甲烷吸收速率季节变化^{*}

陈匆琼^{1,2} 杨智杰^{1,2,3} 谢锦升^{1,2**} 刘小飞^{1,2} 钟小剑^{1,2}

(¹湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; ²福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; ³福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

摘要 以福建省建瓯市万木林自然保护区米槠天然林为对象, 定位观测了土壤甲烷吸收速率(V_{CH_4})的季节变化. 结果表明: 米槠天然林土壤 V_{CH_4} 的季节变化表现出夏秋季高于冬春季的趋势, 最大值($95.13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)出现在初秋(9月), 最小值($9.13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)出现在初春(3月). 土壤全年均为甲烷汇. 随土壤温度和含水量的增加, V_{CH_4} 分别呈增加和降低趋势, 但 V_{CH_4} 与土壤温度和土壤含水量的相关性均不显著. 米槠天然林土壤甲烷年通量为 $3.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于全球天然林土壤甲烷年通量的平均水平($2.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和亚洲地区热带天然林土壤甲烷年通量($2.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 低于亚洲地区温带天然林的土壤甲烷年通量($8.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$).

关键词 中亚热带 米槠天然林 土壤甲烷吸收速率 土壤温度 土壤含水量

文章编号 1001-9332(2012)01-0017-06 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Seasonal variations of soil CH_4 uptake rate in *Castanopsis carlesii* forest in mid-subtropical China. CHEN Cong-qiong^{1,2}, YANG Zhi-jie^{1,2,3}, XIE Jin-sheng^{1,2}, LIU Xiao-fei^{1,2}, ZHONG Xiao-jian^{1,2} (¹*Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China*; ²*School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*; ³*Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(1): 17-22.

Abstract: A monthly measurement of soil CH_4 uptake rate (V_{CH_4}) in a natural *Castanopsis carlesii* forest in Wanmulin Natural Reserve of Fujian Province, East China was conducted from March 2010 to February 2011. The V_{CH_4} showed a pronounced seasonal fluctuation, being higher in summer-autumn than in winter-spring, with the maximum value ($95.13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) in September and the minimum value ($9.13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) in March. With the increase of soil temperature and moisture, the V_{CH_4} showed an increasing and a decreasing trend, respectively, but the correlations of the V_{CH_4} with soil temperature and moisture were not significant. The annual soil CH_4 flux of the forest ($3.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) was higher than the average value of global natural forests ($2.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and of Asian tropical natural forests ($2.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), but lower than that of Asian temperate natural forests ($8.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$).

Key words: mid-subtropics; natural *Castanopsis carlesii* forest; CH_4 uptake rate; soil temperature; soil moisture.

甲烷(CH_4)作为重要的温室气体之一, 对全球气候变暖的贡献(20%)仅次于 CO_2 (55%)^[1]. 世界气象组织 2010 年在《温室气体公报》中指出, 大气 CH_4 浓度在过去 3 年重现增长, 至 2009 年大气甲烷

浓度达到 $1.8 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 且增长的原因尚不完全清楚^[2]. 森林土壤是大气 CH_4 重要的汇(6%), 与大气 CH_4 库的年增加量 ($30 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$) 相近, 因而, 森林土壤吸收 CH_4 动态是大气 CH_4 浓度变化的重要影响因素^[3].

我国中亚热带地区是“北回归线荒漠带”上的“绿洲”, 自然条件与其他纬度地区甚至同纬度其他

* 国家自然科学基金项目(40901126)和教育部创新团队项目(IRT0960)资助.

** 通讯作者. E-mail: jshxie@163.com

2011-06-06 收稿, 2011-09-30 接受.

地区存在较大差异. 研究表明, 不同自然条件的土壤吸收甲烷特征差别很大, 如温带森林土壤全年均为甲烷汇^[4-5]; 而热带雨林土壤干季为甲烷汇, 湿季为甲烷源^[6-7]. 目前有关我国森林土壤吸收甲烷的研究主要集中在温带地区^[8], 如北京低山地区^[9-10]、长白山^[11-12]、南亚热带的鼎湖山^[13-15]、华南丘陵^[16-17]、贡嘎山垂直带^[18]、热带的西双版纳^[19]的森林土壤吸收甲烷也有少量研究报道, 中亚热带森林土壤吸收甲烷的研究仅见刘玲玲等^[20]对千烟洲人工林的报道, 对中亚热带天然林土壤吸收甲烷的研究尚未见报道. 天然林土壤对甲烷的吸收能力较强, 是人工林土壤的 3 倍左右^[4]. 开展中亚热带天然林土壤吸收甲烷的研究对于明确我国温室气体源汇状况, 准确地估算我国森林土壤甲烷吸收潜力具有重要意义.

米楮 (*Castanopsis carlesii*) 天然林是我国中亚热带典型的天然常绿阔叶林之一, 广泛分布于长江以南的大部分省份^[21], 是南方常绿阔叶林组成树种之一. 本研究以福建省建瓯市万木林自然保护区保存完好的米楮天然林为对象, 对其土壤甲烷吸收速率 (V_{CH_4}) 进行定位观测, 探讨 V_{CH_4} 的季节变化, 以期明确中亚热带地区森林土壤吸收甲烷特征提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省建瓯市万木林自然保护区, 地处武夷山和鹫峰山之间 (27°03' N, 118°09' E), 属中亚热带季风气候, 年均气温 19.4 °C, 年均降水量 1731 mm, 年均蒸发量 1466 mm, 相对湿度 81%, 全年无霜期 277 d. 2010 年 3 月—2011 年 2 月降水量和平均气温见图 1.

万木林自然保护区迄今已有 600 多年历史, 由原人工杉木林逐渐演替为中亚热带常绿阔叶林地带性植被^[21], 以樟科、木兰科、壳斗科、杜英科、山茶科、冬青科、山矾科和金缕梅科等植物种类为主. 本研究选择典型常绿阔叶林米楮天然林为研究对象. 米楮天然林位于山顶, 海拔 510 m, 平均坡度 15°, 坡向西偏北 5°, 土层深厚肥沃, 乔木层主要由米楮、杜英 (*Elaeocarpus decipiens*)、木荷 (*Schima superba*)、拉氏栲 (*Castanopsis lamontei*)、丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*)、浙江桂 (*Cinnamomum chekiangense*)、台湾冬青 (*Ilex formosana*) 和薄叶山矾 (*Symplocos anomala*) 组成, 其中米楮为建群种, 灌木层植物种类较少,

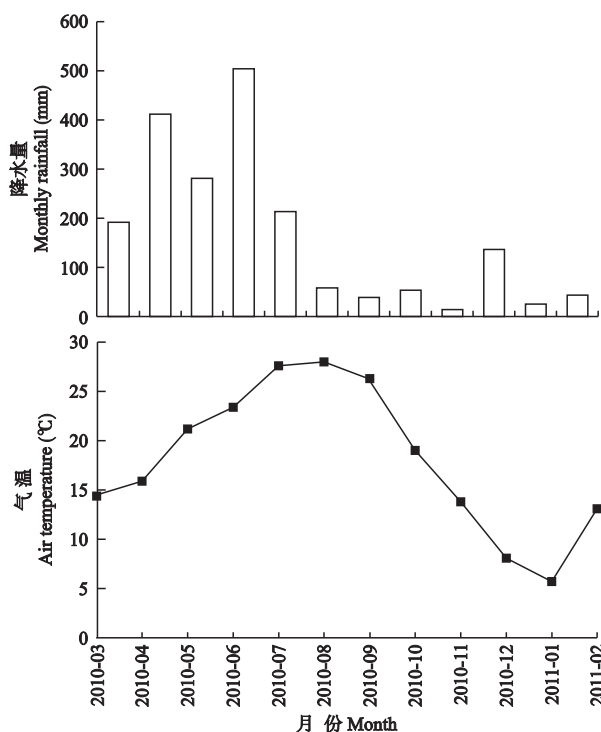


图 1 2010-03—2011-02 试验地降水量和平均气温的月变化
Fig. 1 Monthly rainfall and temperature from March 2010 to February 2011.

以杜茎山 (*Maesa japonica*) 和百两金 (*Ardisia crispa*) 为主. 样地平均树高 23 m, 平均胸径 29.4 cm, 土壤 (0~20 cm) 有机质含量 38.2 g · kg⁻¹, 全 N 含量 1.28 g · kg⁻¹, 全 P 含量 0.27 g · kg⁻¹, 水解 N 含量 146.9 mg · kg⁻¹.

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集、处理和测定 在米楮天然林内随机设立 3 块 20 m × 20 m 标准地, 每个样地随机布设 6 个静态箱. 静态箱由底座和顶箱两部直径分组成, 底座为直径 20 cm、高 10 cm 的 PVC 圈, 插入地表以下 5 cm; 顶箱为白铁皮制成, 圆台型 (底部和顶部直径分别为 20 和 10 cm, 高 20 cm, 体积 4.58 L), 顶部密封. 顶箱底部、中部各有 2 个小孔, 底部的一个小孔用于箱内温度测定, 另一小孔装有一个小气球, 用于平衡箱内气压, 中部一个孔外部连接一个气囊, 在抽气前用于混匀箱内气体, 另一小孔用胶塞密封, 作为采样口. 2010 年 3 月—2011 年 2 月, 每月下旬选择本月的代表性天气进行观测. 底座 2010 年 2 月安装后固定不动, 每次观测时将顶箱安置在底座上, 顶箱与底座间采用橡胶密封圈密封, 在顶箱盖上后的 0、10、20 和 30 min 分别用专用注射器抽取 20 mL 箱内气体样品, 同时使用便携式数字温度计 (JM624) 测定地面上 1.3 m 处气温、静态箱内气温、5 cm 深土壤温度, 使用

时域反射仪 (Model TDR300 Spec-trum 公司, 美国) 测定土壤 12 cm 深处土壤含水量. 气样采集完后带回实验室, 使用 GC-2014 气相色谱 (岛津, 日本) 测定气样中的甲烷浓度, 甲烷检测器为脉冲放电氦离子检测器 (PDD), 分离柱内填充料为 80~100 目 5A 分子筛, 载气为高纯氮气 (99.9%), 流量 $25\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测器温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 柱箱温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 进样口温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 检测限为 $0.05\text{ }\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2.2 计算方法

甲烷吸收速率 (V_{CH_4} , $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$):

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{M}{V_0} \frac{V}{S} \frac{dc}{dt} \left(\frac{273}{273 + T} \right)^{[22]}$$

式中: M 为甲烷的摩尔质量; V_0 为标准状况下气体摩尔体积; V 为静态箱体积+底座露出体积 (L); S 为底座面积 (m^2); dc/dt 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率, 去除 $R^2 < 0.9$ 的数据; T 为静态箱内温度 ($^{\circ}\text{C}$).

每月测定的 V_{CH_4} 代表该月平均 V_{CH_4} , 通过累加计算求得土壤甲烷年通量.

1.3 数据处理

数据处理均基于 SPSS 13.0 软件进行, 由 Origin 8.0 软件绘图. 采用单因素方差分析 (one-way ANO-

VA) 检验其显著性. 采用一般线性模型分析土壤甲烷吸收速率与土壤温度、土壤含水量的关系. 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$.

2 结果与分析

2.1 米槠天然林土壤甲烷吸收速率的季节变化

米槠天然林中土壤甲烷吸收速率 (V_{CH_4}) 呈明显的季节变化, 夏秋季 V_{CH_4} 明显高于冬春季, 最大值 ($95.13\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 出现在初秋的 9 月, 最小值 ($9.13\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 出现在初春的 3 月 (图 2). 土壤全年均为甲烷汇, 年均 V_{CH_4} 为 $43.12\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 土壤甲烷年通量为 $3.93\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

2.2 土壤甲烷吸收速率与土壤温度、土壤含水量的关系

V_{CH_4} 与土壤温度的变化趋势较一致 (图 2). 在土壤温度较高的 6—10 月, V_{CH_4} 平均值为 $68.19\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其中 2 月为 $83.47\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 其余月份平均值仅为 $19.45\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

V_{CH_4} 与土壤含水量的变化趋势相反 (图 2), 土壤含水量较小的 8—11 月, V_{CH_4} 平均为 $61.37\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 是其余月份 ($35.01\text{ }\mu\text{g} \cdot$

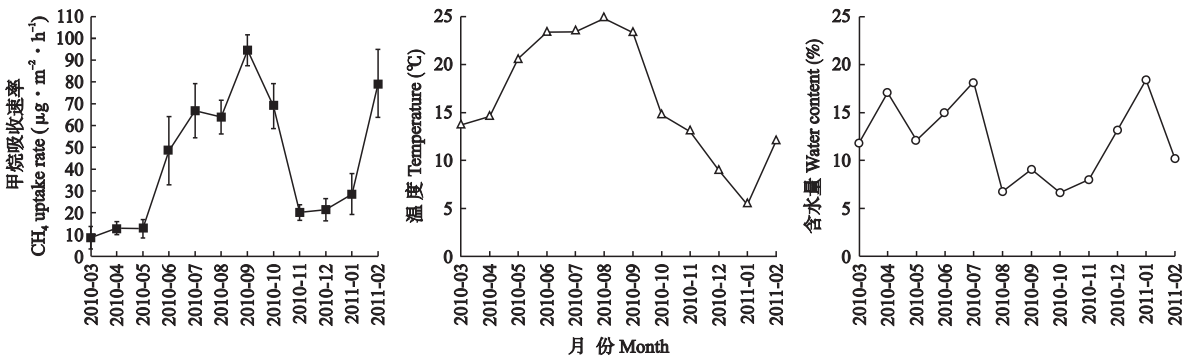


图 2 米槠天然林土壤甲烷吸收速率、土壤温度和土壤含水量的月动态
Fig. 2 Monthly dynamics of soil CH_4 uptake rate, soil temperature and soil water content (mean \pm SE).

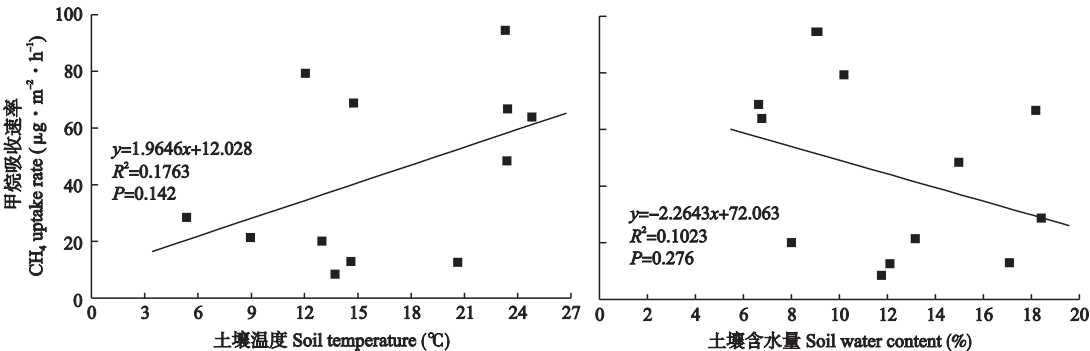


图 3 土壤甲烷吸收速率与土壤温度和土壤含水量的关系
Fig. 3 Relationship between CH_4 uptake rate and soil temperature, soil water content.

$\text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 的近 2 倍。

随土壤温度和含水量的增加, V_{CH_4} 分别呈增加和降低趋势, 但 V_{CH_4} 与土壤温度、土壤含水量的相关性均不显著(图 3)。

3 讨 论

3.1 米赭天然林土壤甲烷吸收速率的季节动态

本研究中 V_{CH_4} 呈夏秋季高于冬春季的季节动态。温带地区的 V_{CH_4} 亦呈夏秋季高于冬春季的季节动态, 最大值主要出现在夏末初秋(7—9 月), 最小值一般出现在冬季(12 月至翌年 2 月)^[5,10,23-28]。但温带地区的 V_{CH_4} 最小值出现在冬季, 而本研究中出现在春季, 可能是因为温带地区冬季较厚的冰雪限制了气体扩散, 不利于土壤吸收甲烷^[5], 而本研究地冬季无积雪, 春季的大量降水成为气体扩散的重要限制因素。中亚热带地区研究结果也与本研究类似, 如千烟洲人工针叶林 V_{CH_4} 表现为秋>夏>冬>春^[20]。而热带地区 V_{CH_4} 的季节动态表现为干季大于雨季^[7,19,29-30]。如 Kiese^[31] 对澳大利亚热带森林研究发现, 干季 V_{CH_4} 在 $35 \sim 48 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 雨季则为 $4 \sim 45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 严玉平^[19] 对西双版纳热带季雨林研究发现, 2003 和 2005 年干季的平均 V_{CH_4} 分别是雨季的 1.48 和 5.56 倍。

3.2 土壤温度和土壤含水量对米赭天然林土壤吸收甲烷的影响

温度主要通过影响甲烷氧化菌酶的活性影响土壤吸收甲烷, 而甲烷氧化菌的温度敏感性较小(Q_{10} 变化范围为 1.1~4.8), 但甲烷氧化菌具有高亲和力, 因此, 在一定的温度范围内, 气体扩散等因素(而非温度)是土壤吸收甲烷的控制因子^[29]。本研究中土壤温度与 V_{CH_4} 的相关关系不显著, 表明土壤温度不是本实验地土壤吸收甲烷的控制因素。

甲烷氧化菌是中温性微生物, 温度过低或过高都不利于其活性的发挥^[32], 因此存在土壤吸收甲烷的最佳温度。Nebsit 和 Breitenbeck^[33] 发现, 土壤吸收甲烷的最佳温度为 $20 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研究中, 6—9 月土壤温度在 $23.34 \sim 24.80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 处于土壤吸收甲烷的最佳温度范围内, 此时 V_{CH_4} 较高; 10 月土壤温度虽已降至 $14.77 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 V_{CH_4} 仍较高($67.26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), 表明 V_{CH_4} 随温度变化表现出一定的滞后性。

甲烷和氧气供应不足通常是土壤吸收甲烷的限制因素, 而水分是甲烷和氧气扩散的重要限制因子^[5], 因此通常认为土壤吸收甲烷与土壤含水量呈负相关关系^[24]。但本研究中土壤含水量对土壤吸收甲烷的影响较小, 可能是本研究地位于山顶, 土壤排水良好, 土壤含水量全年处于较低水平($<20\%$), 土壤通气状况较好。Ishizuka 等^[34] 在日本排水条件较好的山坡的研究结果与之类似。

本研究中土壤温度和土壤含水量与土壤甲烷吸收速率的相关关系均未达显著水平, 可能是因为本区水热同期, 土壤温度增加促进土壤吸收甲烷, 但土壤含水量增加抑制土壤吸收甲烷, 因此, 在同一时期土壤温度和土壤含水量对土壤吸收甲烷的作用相互掩盖, 需进一步加以探讨。

3.3 米赭天然林土壤甲烷年通量的变化

研究区土壤甲烷年通量为 $3.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 处于全球天然林土壤甲烷年通量范围($0.1 \sim 51.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)之内, 高于全球天然林甲烷年通量的平均值($2.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[4]。

亚洲不同气候带天然林平均甲烷年通量依次为: 温带($8.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>亚热带($3.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>热带($2.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (表 1), 表现出随纬度降低而逐渐下降的趋势。

本研究中土壤甲烷吸收速率随温度的增加而增

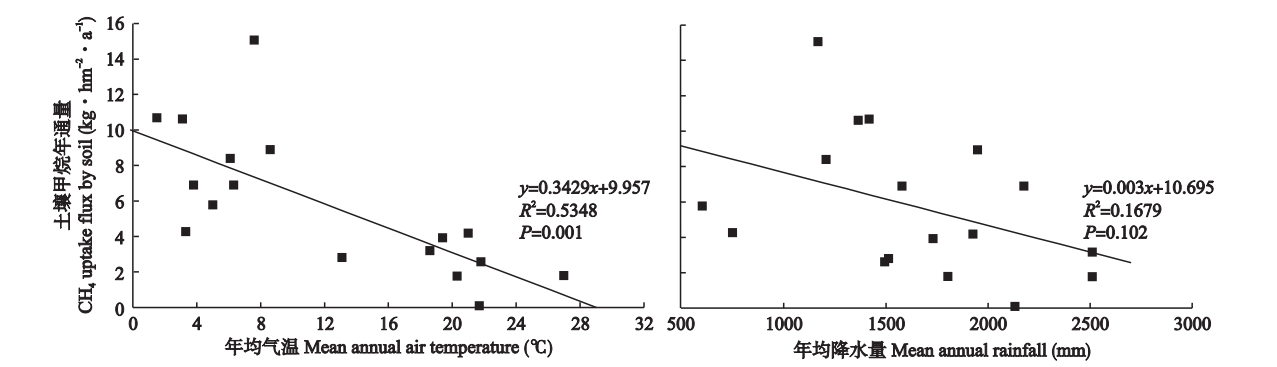


图 4 亚洲不同气候带天然林土壤甲烷年通量与年均气温和降水量的关系

Fig. 4 Relationship of CH_4 flux to mean annual air temperature and annual rainfall of natural forest in different climatic zones in Asia.

表 1 亚洲不同气候带天然林土壤甲烷年通量
Table 1 Annual CH₄ flux of natural forest in different climatic zones in Asia

气候带 Climatic zone	纬度 Latitude (N)	海拔 Elevation (m)	森林类型 Forest type	年均气温 Mean annul air temperature (℃)	年均降水量 Mean annul rainfall (mm)	甲烷年通量 Annual CH ₄ flux (kg · hm ⁻² · a ⁻¹)	文献 Reference
温带 Temperate zone	43°40′	1000	I	1.5	1418	10.69	[34]
	42°59′	240	II	7.6	1167	15.07	[34]
	41°23′—42°36′	736	III	3.3	700 ~ 800	4.27	[26]
	40°00′	825	II	6.1	1207	8.40	[34]
	40°00′—40°02′	—	II	2 ~ 8	600	5.78	[9]
	38°02′	900	II	6.3	1578	6.90	[35]
	36°56′	650	II	8.6	1948	8.90	[34]
	35°51′	2090	I	3.1	1365	10.62	[34]
	34°24′	240	I	13.1	1513	2.81	[34]
亚热带 Subtropical zone	29°00′—30°20′	3000	I	3.8	2175.4	6.90	[18]
	26°31′	100	IV	21.7	2131	0.10	[34]
	27°03′	510	IV	19.4	1731	3.93	本研究 This study
	23°10′	200	V	21.0	1927	4.19	[13]
热带 Tropical zone	21°57′	770	VI	21.8	1493	2.58	[36]
	2°59′	150	VII	26 ~ 29	1804	1.79	[37]
	2°10′ S	870	VII	20.3	2112 ~ 2798	1.78	[38]
	1°42′ S	1540	VII	18.6	2112 ~ 2798	3.17	[38]

I : 针叶林 Coniferous forest; II : 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest; III : 针阔混交林 Broad-leaved and coniferous mixed forest; IV : 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; V : 季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broad-leaved forest; VI : 热带季雨林 Tropical monsoon forest; VII : 热带雨林 Tropical rain forest.

加(图3),但亚洲不同气候带天然林土壤甲烷年通量却随年均气温的增加而减少(图4),这是因为在同一区域内,温度升高促进土壤吸收甲烷,而在不同区域内,低纬度地区的气温虽然较高,但其年均降水量也较高(表1),从而导致年均气温较高的低纬度地区的土壤甲烷年通量较低。亚洲不同气候带天然林的土壤甲烷年通量随年均降水量的增加呈减少趋势(图4),本研究中甲烷吸收速率随土壤含水量的增加亦呈减少趋势(图3)。

参考文献

[1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing in Climate Change: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[2] WMO. The state of greenhouse gases in the atmosphere-based on global observations through 2009. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, 2010, **6**:1-4

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I Report “The Physical Science Basis”. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[4] Smith KA, Dobbie KE, Ball BC, *et al.* Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, 2000, **6**: 791-803

[5] Borken W, Davidson EA, Savage K, *et al.* 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**:

1388-1395

[6] Davidson EA, Nepstad DC, Ishida FY, *et al.* Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 2582-2590

[7] Davidson EA, Ishida FY, Nepstad DC. 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**: 718-730

[8] Chen RW, Yi S, Xiao MY. Advances of study on atmospheric methane oxidation (consumption) in forest soil. *Journal of Forest Research*, 2003, **14**: 230-238

[9] Du R (杜 睿), Huang J-H (黄建辉), Wan X-W (万小伟), *et al.* The research on the law of greenhouse gases emission from wanrm temperate forest soils in Beijing region. *Environmental Science (环境科学)*, 2004, **25**(2): 12-16 (in Chinese)

[10] Sun X-Y (孙向阳). CH₄ emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing. *Soil and Environmental Sciences (土壤与环境)*, 2000, **9**(3): 173-176 (in Chinese)

[11] Xu H (徐 慧), Chen G-X (陈冠雄), Ma C-X (马成新). A preliminary study on N₂O and CH₄ emissions from different soils on northern slope of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 1995, **6**(4): 373-377 (in Chinese)

[12] Lang Z-B (梁战备), Shi Y (史 奕), Wang C-R (王琛瑞), *et al.* Methane oxidation in soil profiles of broad-leaved/Korean pine mixed forest in Changbai Mountain. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院研究生院学报)*, 2004, **21**(1):71-77 (in Chinese)

[13] Zhang W, Mo J, Zhou G, *et al.* Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in

- southern China. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: 1–10
- [14] Mo J-M (莫江明), Fang Y-T (方运霆), Xu G-L (徐国良). The short-term responses of soil CO₂ emission and CH₄ uptake to simulated N deposition in nursery and forests of Dinghushan in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(4): 682–690 (in Chinese)
- [15] Zhou C-Y (周存宇), Zhou G-Y (周国逸), Wang Y-H (王迎红), *et al.* The CH₄ uptake flux by soils of main forest ecosystems in Dinghushan. *Ecology and Environment* (生态环境), 2005, **14**(3): 333–335 (in Chinese)
- [16] Liu H (刘惠), Zhao P (赵平), Lin Y-B (林永标). CH₄ and N₂O fluxes from soil surface of 2 land uses in a hilly area of South China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2008, **16**(4): 304–314 (in Chinese)
- [17] Liu H (刘惠), Zhao P (赵平). Diurnal variations of CH₄ fluxes from soil surface of plantation and orchard in a hilly area of south China. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(3): 1112–1115 (in Chinese)
- [18] Qi Y-C (齐玉春), Luo J (罗辑), Dong Y-S (董云社), *et al.* The research of N₂O and CH₄ fluxes from soil of dark coniferous forest in Gongga Mountain. *Sciences in China Series D* (中国科学·D辑), 2002, **32**(11): 934–941 (in Chinese)
- [19] Yan Y-P (严玉平). Fluxes of CH₄ and N₂O from Tropical Seasonal Rain Forest and Rubber Plantation Soil and Flux of Stem Respiration from Their Trees in Xishuangbanna, SW China. Master Thesis. Xishuangbanna: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese)
- [20] Liu L-L (刘玲玲), Liu Y-F (刘允芬), Wen X-F (温学发), *et al.* CH₄ emission flux from soil of pine plantations in the Qian Yanzhou rde earth hill region of China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(2): 431–439 (in Chinese)
- [21] Zhao Y-C (赵月彩), Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), *et al.* Decomposition of leaf litter of *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* and their mixtures in Wanmulin Natural Reserve, Fujian Province. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2009, **4**(2): 53–59 (in Chinese)
- [22] Borken W, Brumme R, Xu Y. Effects of prolonged soil drought on CH₄ oxidation in a temperate spruce forest. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**: 7079–7088
- [23] Castro MS, Steudler PA, Melillo MJ, *et al.* Exchange of N₂O and CH₄ between the atmosphere and soils in spruce-fir forests in the northeastern United States. *Biogeochemistry*, 1992, **18**: 119–135
- [24] Groffman PM, Hardy JP, Driscoll CT, *et al.* Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 1748–1760
- [25] Kagotani Y, Hamabata E, Nakajima T. Seasonal and spatial variations and the effects of clear-cutting in the methane absorption rates of a temperate forest soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **59**: 169–175
- [26] Xiao D-M (肖冬梅), Wang M (王森), Ji L-Z (姬兰柱), *et al.* Soil N₂O and CH₄ fluxes in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(10): 1855–1859 (in Chinese)
- [27] Prieme A, Christensen S. Seasonal and spatial variation of methane oxidation in a Danish spruce forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**: 1165–1172
- [28] Borken W, Xu Y, Beese F. Conversion of hardwood forests to spruce and pine plantations strongly reduced soil methane sink in Germany. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 956–966
- [29] Dalal RC, Allen DE, Livesley SJ, *et al.* Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and sub-merged landscapes: A review. *Plant and Soil*, 2008, **309**: 43–76
- [30] Singh JS, Singh S, Raghubanshi AS, *et al.* Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils. *Plant and Soil*, 1997, **196**: 115–121
- [31] Kiese R, Hewett B, Graham A *et al.* Seasonal variability of N₂O emissions and CH₄ uptake by tropical rainforest soils of Queensland, Australia. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**: 1043
- [32] Wang C-R (王琛瑞), Huang G-H (黄国宏), Liang Z-B (梁战备), *et al.* Advances in the research on sources and sinks of CH₄ and CH₄ oxidation (uptake) in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(12): 1707–1712 (in Chinese)
- [33] Nesbit SP, Breitenbeck GA. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, **41**: 39–54
- [34] Ishizuka S, Sakata T, Sawata S, *et al.* Methane uptake rates in Japanese forest soils depend on the oxidation ability of topsoil, with a new estimate for global methane uptake in temperate forest. *Biogeochemistry*, 2009, **92**: 281–295
- [35] Jang I, Lee S, Hong HJ, *et al.* Methane oxidation rates in forest soils and their controlling variables: A review and a case study in Korea. *Ecological Research*, 2006, **21**: 849–854
- [36] Werner C, Zheng X, Tang J, *et al.* N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, 2006, **289**: 335–353
- [37] Itoh M, Kosugi Y, Takanashi S, *et al.* Temporal and spatial variations of soil carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes in a Southeast Asian tropical rainforest. *Biogeosciences Discussions*, 2010, **7**: 6847–6887
- [38] Ishizuka S, Iswandi A, Nakajima Y. The variation of greenhouse gas emissions from soils of various land-use/cover types in Jambi Province, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, **71**: 17–32

作者简介 陈勿琼,女,1987年生,硕士研究生.主要从事森林碳循环研究. E-mail: ccongq@126.com

责任编辑 李凤琴