

DOI: 10.5846/stxb201807091488

王全成, 陈匆琼, 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): - .
Wang Q C, Chen C Q, Yang Z J, Liu X F, Xie J S, Yang Y S. Effects of precipitation exclusion on soil methane uptake under *Cunninghamia lanceolata* plantation in mid-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

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

王全成^{1,2}, 陈匆琼^{1,2}, 杨智杰^{1,2,*}, 刘小飞^{1,2}, 谢锦升^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}

1 福建师范大学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

摘要: 森林土壤是大气中甲烷重要的汇, 降水变化是影响森林土壤甲烷吸收速率(V_{CH_4})的重要因子。以中亚热带地区不同降水减少程度的杉木林土壤为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法来测定不同模拟降水减少处理样地的土壤甲烷吸收速率。结果表明: 模拟降水减少后显著改变了土壤中的含水量, 降水减少 60%、降水减少 20% 和对照样地的年均土壤含水量分别为 18.87%、23.89% 和 28.33%。杉木人工林土壤甲烷吸收速率在月变化上存在较大幅度的波动, 其中土壤甲烷吸收速率在 8 月份达到一年中的最大值(对照 $75 \mu g m^{-2} h^{-1}$), 2 月份达到一年中的最小值(对照 $10.93 \mu g m^{-2} h^{-1}$)。3 种处理样地的土壤全年均为甲烷汇, 与对照样地的甲烷年通量($2.48 kg hm^{-2} a^{-1}$)相比, 降水减少 60% 和 20% 样地的甲烷年通量分别增加 44% 和 19%。在对照样地中, 土壤甲烷吸收速率与土壤含水量呈现负相关($P=0.001$), 与温度相关性不显著($P>0.05$); 而模拟降水减少后, 土壤甲烷吸收速率与土壤温度呈正相关关系($P=0.006$ 和 $P=0.034$), 与土壤含水量相关性不显著($P>0.05$)。总之, 模拟降水减少后不仅提高了杉木人工林土壤甲烷吸收的能力, 同时也可能改变影响土壤甲烷吸收的环境因子; 在模拟降水减少前土壤甲烷吸收速率与土壤水分相关性更为密切, 而模拟降水减少后土壤甲烷吸收速率可能主要受土壤温度的影响。

关键词: 杉木人工林; 土壤甲烷吸收速率; 土壤温度; 土壤含水量

Effects of precipitation exclusion on soil methane uptake under *Cunninghamia lanceolata* plantation in mid-subtropical China

WANG Quancheng^{1,2}, CHEN Congqiong^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2,*}, LIU Xiaofei^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}

1 State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Forest soil plays an important role in atmospheric methane uptake, the rate of which is affected by soil water content and precipitation change. In this study, we excluded precipitation by 20% and 60% in a *Cunninghamia lanceolata* plantation to analyze how precipitation reduction affects soil methane uptake in subtropical China. The results showed that soil water content changed significantly in precipitation exclusion treatments, with an annual mean value of 18.87%, 23.89%, and 28.33% in 60% precipitation exclusion, 20% precipitation exclusion, and control treatments, respectively. We also found V_{CH_4} had strong and substantial fluctuations in the study year, with the highest rate hit in August (control $75 \mu g m^{-2} h^{-1}$) and the minimum in February (control $10.93 \mu g m^{-2} h^{-1}$). Annual flux of soil CH_4 uptake was $2.48 kg hm^{-2} a^{-1}$ in

基金项目: 国家重大科学研究项目(2014CB954003); 国家自然科学基金项目(31670623)

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2019-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhijieyang@fjnu.edu.cn

the control treatment, and increased by 44% and 19% in the 60% and 20% precipitation exclusion treatments, respectively. Precipitation exclusion may also alter the relationship of V_{CH_4} and environmental factors. We found a negative correlation between V_{CH_4} and soil water content ($P=0.001$), and a weak relationship between V_{CH_4} and soil temperature in the control treatment. However, the relationship between V_{CH_4} and soil temperature became stronger after precipitation exclusion ($P=0.006$ at 60% precipitation exclusion and $P=0.034$ at 20% precipitation exclusion), and no significant correlation was found between V_{CH_4} and soil water content in both precipitation exclusion treatments. Our results suggest that precipitation decline may not only increase soil methane uptake in subtropical forests with global climate change in the future, but it may also change the main determining environmental factor of soil methane uptake rate from soil water content to soil temperature.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* plantation; soil methane uptake rate; soil temperature; soil water content

甲烷被认为是大气中最重要的温室气体之一,其对全球变暖的潜能值是二氧化碳的 28 倍^[1],它对全球气候变暖的贡献率是 20%,仅次于 55%的二氧化碳贡献率^[2]。森林土壤被认为是大气中甲烷重要的汇^[3-4],森林土壤吸收大气甲烷量约为 30 Tg/a 与大气中甲烷库的年增加量相近,因此,森林土壤甲烷吸收能力是影响大气甲烷浓度变化最重要的因素之一^[5]。

气候模型预测,在最极端排放的情景下,亚热带的大部分地区降水可能减少 30%^[6],而降水量的变化通过改变土壤含水量来影响土壤的通气状况。人们普遍认为土壤甲烷的吸收能力与土壤含水量呈负相关^[7-8],主要是因为土壤含水量增加,阻碍了甲烷和氧气从空气中扩散到土壤中,减少土壤中甲烷氧化菌的底物供应,从而影响土壤甲烷吸收速率。然而,一些研究表明,温度是影响土壤甲烷吸收速率的主要因素^[9-10],主要是由于温度通过影响微生物和酶的活性而影响土壤的甲烷吸收能力。目前,降水变化对森林土壤甲烷吸收的研究主要集中在热带^[11-12]和温带^[13-14],但在亚热带地区研究较少,对影响亚热带森林土壤吸收甲烷能力变化的因子还不清楚。我国的亚热带季风气候是世界上面积最大和最独特气候类型之一,南北跨越超过 10 个纬度,是对全球变化响应最敏感的地区,降水减少将如何影响亚热带森林土壤吸收甲烷的能力,这已成为目前急需研究的问题。

杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata* plantation)是我国亚热带地区最重要的商品经济林之一,广布于我国南方 16 个省,自治区。因此,本文通过在杉木人工林内设置不同梯度的模拟降水减少控制试验,同时,利用静态箱-气相色谱法原位观测土壤甲烷吸收的季节变化,旨在研究气候变化背景下杉木林土壤甲烷吸收对降水减少的响应,有利于为亚热带杉木林土壤甲烷通量的研究提供基础数据支撑。

1 研究区概况

研究样地位于福建省建瓯市万木林自然保护区(27°03'N, 118°09'E),地处武夷山脉东南,鹫峰山脉西北,为典型的东南低山丘陵地貌。该区属亚热带季风气候,年均温 19.4℃,年均降水量 1731 mm,多集中在 3—8 月。年均蒸发量 1466 mm,相对湿度 81%,全年无霜期 277 d。2010 年 9 月至 2011 年 8 月的月降雨量和月均温如图 1 所示。

天然林在 1969 年皆伐后造杉木人工林,其海拔高度为 350 m,西北坡向,坡度为 21°,造林密度为 1117 株/hm²,林分平均树高为 18 m,平均胸径为 18.3 cm。灌木层以草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、狗骨柴(*Tricalysia dubia*)和杜茎山(*Maesa japonica*)等为主,草本有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)和乌毛蕨(*Blcehnum orientale*)等。土壤为白垩纪的钙质和泥质砂砾岩发育的山地红壤,土壤基本理化性质如表 1 所示。

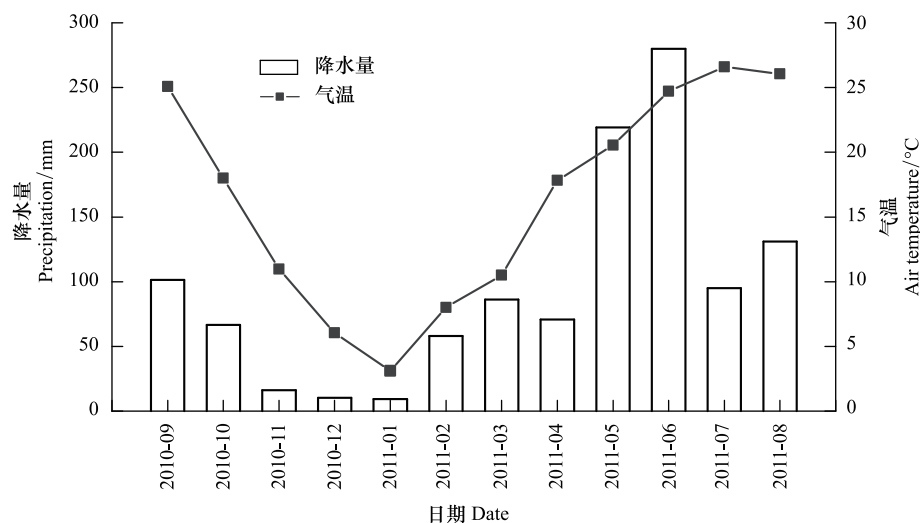


图 1 试验样地月降水量和月气温

Fig.1 Mean monthly precipitation and mean monthly temperature in experimental fields

表 1 杉木人工林土壤理化性质 (0—20 cm)

Table 1 Soil physical and chemical properties in *Cunninghamia lanceolate* plantation (0—20 cm)

项目 Item	杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolate</i> plantation	项目 Item	杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolate</i> plantation
容重 Bulk density /(g/cm ³)	1.20	水解氮含量 Hydrolyze N content /(mg/kg)	93.00
土壤有机碳 Soil organic carbon /(g/kg)	29.00	速效磷含量 Available P content /(mg/kg)	2.47
年凋落物量 Litterfall /(t hm ⁻² a ⁻¹)	4.63	砂粒含量 Sand content /%	19.92
pH	5.60	粉粒含量 Silt content /%	55.78
全氮含量 Total N content /(g/kg)	0.80	黏粒含量 Clay content /%	24.30
全磷含量 Total P content /(g/kg)	0.40		

2 研究方法

2.1 实验设计

2010 年 9 月在杉木人工林内按完全随机方法选取 9 个坡度、坡向、坡位和地上植物结构基本一致的 5 m×5 m 样地。设置降水减少 60%降水、降水减少 20%和对照 3 个降水变化处理,每个处理 3 个重复,具体方法如下:

降水减少 60%处理:在样地地面上 1.5 m 处安放 10 块 0.2 m(直径)×5 m(长)的凹槽面状透明塑料板,每块塑料板之间的间隙为 0.3 m,样地周围用钢板围起,钢板插入深度为 60 cm 以阻止隔离区外地表径流流入。

降水减少 20%处理:在样地地面上 1.5 m 处安放 10 块 0.1 m(直径)×5 m(长)的凹槽面状透明塑料板,每块塑料板之间的间隙为 0.4 m,其他设施与上面介绍相同。

2.2 样品采集与处理

每个样地布设 3 个静态箱,静态箱是由两部分组成,一部分是由 PVC 圈(直径 20 cm、高 10 cm)组成的底座,另一部分是由白铁皮制成的圆台型顶箱(顶部直径 10 cm,底部直径 20 cm,高 20 cm)。于 2010 年 9 月至 2011 年 9 月每月观测 2 次。为保证温度尽可能接近日平均值,观测时间固定在 9:00—11:00 左右。底座于 2010 年 8 月份安装后固定不动,每次观测时将顶箱底部橡胶塞与底座 PVC 圈盖上密封后,用 30 mL 的注射器分别在 0 min、10 min、20 min、30 min 时采集 20 mL 的气体样品,样品立即送回实验室,使用日本产的 GC—

2014 气相色谱测定气样品中甲烷的浓度。

$$\text{土壤甲烷吸收速率: } V_{\text{CH}_4} = \frac{M}{V_0} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \left(\frac{273}{273 + T} \right)$$

式中, V_{CH_4} 代表土壤甲烷吸收速率 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$); V_0 代表标准状态下气体的摩尔体积; M 代表 CH_4 摩尔质量; V 代表静态箱和底座体积, 值为 6.15 L; S 代表底座面积, 值为 0.0314 m^2 ; $\frac{dc}{dt}$ 代表单位时间甲烷浓度变化的直线斜率 (剔除样品中线性回归系数 $R^2 < 0.9$ 的甲烷浓度数据); T 代表静态箱温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

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

2.3 环境因子测定

气体采样时, 同时, 使用 JM624 温度计测定地面上 1.3 m 处空气的温度、静态箱内空气的温度以及 5 cm 深的土壤温度, 利用美国产的 Model TDR 300 Spectrum 测定 12 cm 深的土壤含水量。

2.4 数据分析与处理

运用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 对测定的样品数据进行分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较相同月份不同处理间甲烷吸收速率、土壤含水量和甲烷年通量的差异, 利用线性回归模型拟合土壤甲烷吸收速率与土壤温度和含水量的关系。运用 Origin 8.0 软件进行数据制图。

3 结果与分析

3.1 降水减少对杉木人工林土壤甲烷吸收速率的影响

杉木人工林土壤全年均表现为甲烷汇, 土壤甲烷吸收速率 (V_{CH_4}) 在月变化上存在较大幅度的波动 (图 2), 12 月到次年 2 月期间达到一年中的最低值 (对照 $10.93 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$), 在 8 月最大 (对照 $75 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。模拟降水减少并没有改变 V_{CH_4} 的月变化趋势, 但是显著提高了 V_{CH_4} 。

与对照样地相比, 降水减少 20% 处理样地 V_{CH_4} 在 9 月、5 月和 6 月份显著提高 ($P < 0.05$), 分别提高了 24%、86% 和 137%, 而在其他月份差异不显著 ($P > 0.05$)。但降水减少 60% 处理样地除了在 10 月、2 月和 8 月份期间 V_{CH_4} 差异不显著外 ($P > 0.05$), 其他月份里都显著高于对照处理 ($P < 0.05$), 增加范围在 14%—209%。

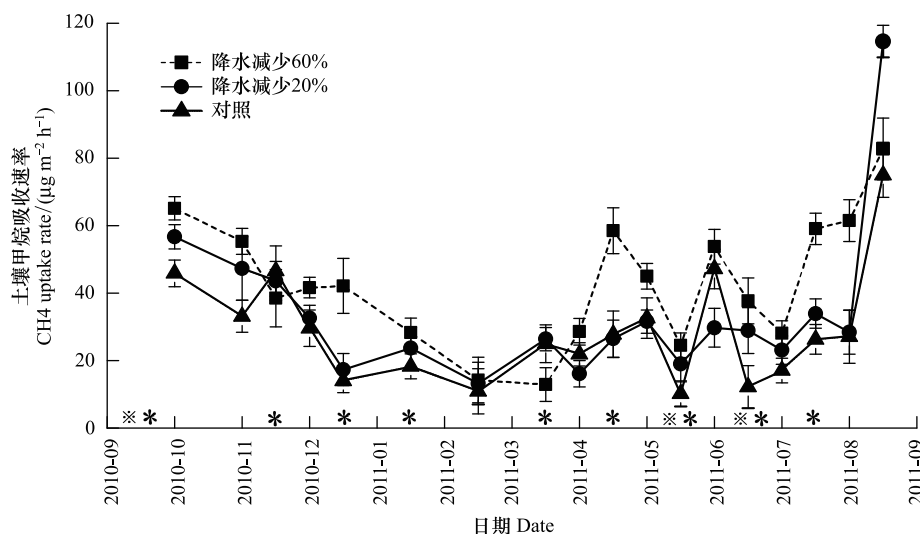


图2 降水变化对土壤甲烷吸收速率的影响

Fig 2 Effect of precipitation change on soil methane uptake rate

* 和 * 分别代表相同月份降水减少 20% 和 60% 样地和对照有显著性, $P < 0.05$

3.2 降水减少对杉木人工林土壤甲烷年通量的影响

降水减少 60%、降水减少 20% 和对照样地的甲烷年吸收量分别是 $3.58 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.96 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 模拟降水减少提高了土壤甲烷年通量, 与对照相比, 降水减少 60% 和 20% 样地的甲烷年通量分别增加 44% 和 19% (图 3)。同时, 降水减少 60%、降水减少 20% 和对照样地年均土壤含水量分别为 18.87%、23.89% 和 28.33% (图 4)。

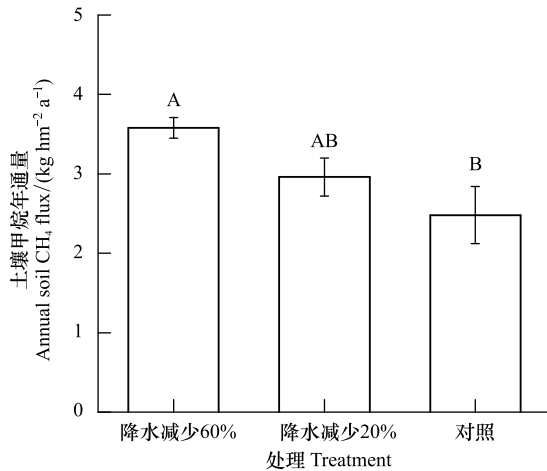


图3 不同降水处理的土壤甲烷年通量

Fig.3 Annual mean soil CH₄ flux under different treatments

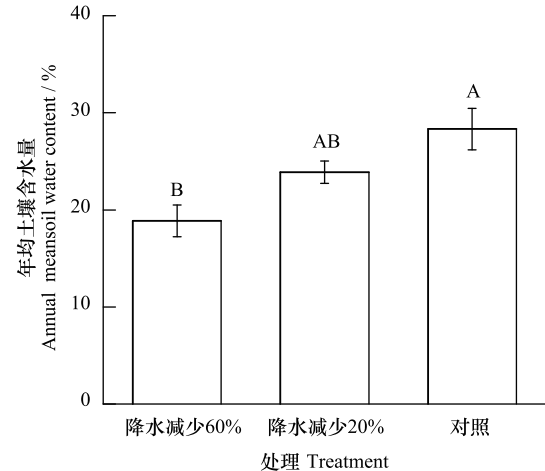


图4 不同降水处理的土壤年均含水量

Fig.4 Annual mean water content under different treatments

3.3 杉木人工林土壤甲烷吸收速率与土壤温度、土壤含水量的关系

对照处理中, V_{CH_4} 与土壤含水量呈显著负相关 ($P=0.001$) (图 5), 但降水减少 60% 和 20% 处理的 V_{CH_4} 与土壤含水量相关性不显著 ($P>0.05$)。模拟降水减少改变 V_{CH_4} 环境影响因素, 其中降水减少 60% 样地的 V_{CH_4} 与其土壤温度呈极显著相关关系 ($P=0.006$), 降水减少 20% 样地的 V_{CH_4} 与土壤温度呈显著相关关系 ($P=0.034$), 但对照样地中 V_{CH_4} 与土壤温度无显著相关 ($P>0.05$) (图 5)。

4 讨论

4.1 亚热带森林土壤甲烷吸收速率的季节变化特征

本研究中, 杉木人工林的 V_{CH_4} 在 8 月最高, 其平均值为 $60.43 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 12 月到次年 2 月期间最低, 其平均值为 $14.41 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 与温带长白山阔叶红松林^[15] (*Korean pine*) 和 中亚热带千烟洲红壤丘陵区针叶人工林^[16] (*Coniferous plantation*) V_{CH_4} 的季节变化规律相似。但是, 南亚热带鼎湖山地区的研究结果却发现^[17], V_{CH_4} 在旱季 (11—1 月) 高于雨季 (4—9 月), 马尾松林 (*Pine forest*) 和阔叶林 (*Broadleaf forest*) 干季 V_{CH_4} 平均值分别是雨季的 1.4 和 1.9 倍。西双版纳热带地区^[18] V_{CH_4} 为干季 (11—4) 大于雨季 (5—10), 2003 和 2005 年热带季雨林 (*Tropical monsoon forest*) 干季 V_{CH_4} 平均值分别是雨季的 1.48 和 5.56 倍。本研究中, 12 月份至次年 2 月份平均土壤含水量和温度分别为 32.21% 和 6.7℃, 而 8 月份平均土壤含水量和温度分别为 22.22% 和 25.7℃, 但 8 月份多为台风雨, 是本区的干季, 加上温度高, 土壤的水热搭配条件好, 土壤通气状况和微生物活性较高, 导致本研究中 V_{CH_4} 在 8 月份最高。而南亚热带鼎湖山和热带西双版纳地区均表现为干季大于雨季, 这是因为干季降水量少, 土壤含水量低, 通气性好, 有利于空气中的甲烷和氧气向土壤中扩散, 有利于提高 V_{CH_4} 。这与 Castro 等的结果相似, 他们认为当土壤温度在 $-5\sim 10^\circ\text{C}$ 之间时, V_{CH_4} 与土壤温度呈正相关, 但当土壤温度高于 10°C 时, V_{CH_4} 与土壤含水量则呈负相关^[19]。同时本研究中降水变化没有改变中亚热带杉木人工林 V_{CH_4} 的季节变化趋势, 与 Davidson 等人在亚马逊流域热带雨林进行五年隔离林内穿透雨实验发现结果

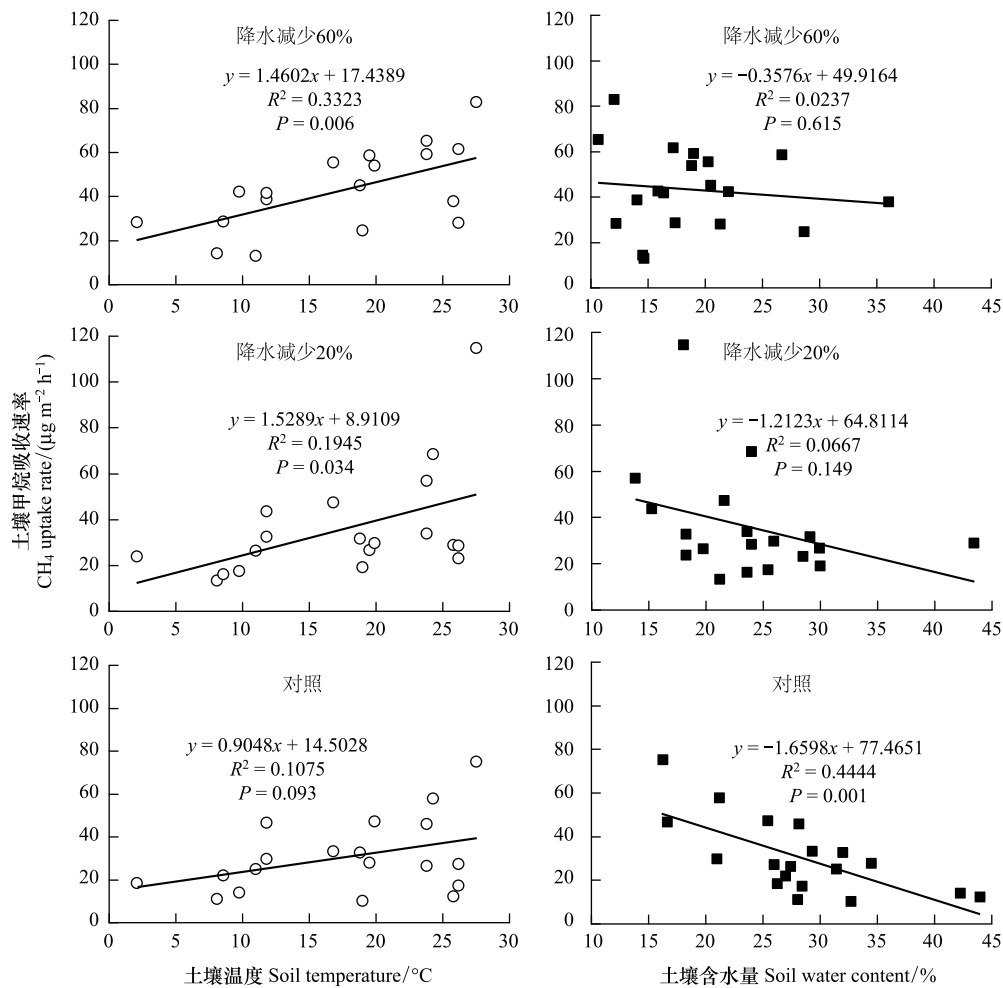


图5 土壤甲烷吸收速率与土壤温度、土壤含水量的相关关系

Fig.5 Correlation of soil CH_4 uptake rates with soil temperature and soil water content under different treatments

a 和 b 为降水减少 60%, c 和 d 为降水减少 20%, e 和 f 为对照

相似^[20]。

4.2 降水减少对土壤甲烷年通量的影响

降水是影响土壤含水量最直接和最重要的途径,同时土壤含水量是影响土壤通气状况的最重要因素之一,而森林土壤甲烷吸收速率在很大程度上也取决于土壤通气状况^[21]。模拟降水减少后将有利于提高甲烷年通量,本研究中降水减少 20% 和 60%,甲烷年通量分别增加了 19% 和 44%,与模拟降水减少后温带桉树林和亚马逊雨林甲烷年通量增加的结果相似,Fest 等人在澳大利亚东南部温带桉树林中降水减少 40% 发现甲烷年通量增加 54.7%^[22];Davidson 等人在亚马逊流域热带雨林进行五年的模拟降水减少发现甲烷年通量增加了 207%。主要原因是模拟降水减少后导致土壤含水量下降,进而改善了土壤的通气状况,有利于甲烷和氧气向土壤中扩散,从而提高甲烷通量。但是 Shvaleva 等人在葡萄牙南部橡树林降水减少 26% 和增加 10% 后土壤甲烷年通量无显著变化^[23],主要是降水增加 10% 和减少 26% 并未导致土壤含水量发生明显变化,因此,对土壤甲烷通量没有显著影响。

本研究中,降水减少 60%、降水减少 20% 和对照样地的甲烷年通量分别是 $3.58 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.96 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,均处于全球人工林土壤甲烷年通量的 $0.1\text{—}9.1 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的变化范围^[24]。亦处于我国人工林甲烷年通量现有研究结果的变化范围 $0.49\text{—}6.85 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之内(表 2)。对照样地的甲烷年通量为 $2.48 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 与莫江明等在南亚热带鼎湖山马尾松林($2.68 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)的结果相近,高于刘玲玲等人在中亚

热带千烟洲马尾松($1.31\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$),低于华南丘陵马尾松($3.41\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)。通过收集我国不同地区人工林的平均甲烷年通量发现,总体上我国不同气候带人工林的土壤甲烷年通量随年均降水量的增加呈减少趋势($P>0.05$,图 6),温带地区($4.66\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)>亚热带($2.65\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)>热带地区($2.15\text{ kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)(表 2)。

表 2 我国不同区域人工林土壤甲烷年通量
Table 2 Annual soil CH₄ oxidation of tree plantations in China

气候带 Climatic zone	地点 Site	植被类型 Forest type	年均降水量 Mean annul precipitation/mm	甲烷年通量 Annual CH ₄ flux/ ($\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)	参考文献 References
温带 Temperate zone	长白山	阔叶红松	700	4.27	[15]
	长白山	针阔混交林	700	1.3	[25]
	东灵山	油松人工林	600	6.85	[26]
	东灵山	辽东林	600	6.20	[26]
亚热带 Subtropical zone	千烟州	马尾松	1490	1.31	[16]
	贡嘎山	冷杉林	2175	3.93	[27]
	鼎湖山	马尾松林	1927	2.81	[28]
	华南丘陵	马尾松林	1700	3.41	[29]
	咸宁市	樟树林	1390.5	1.95	[30]
热带 Tropical zone	建瓯	杉木林	1466	2.48	本研究
	西双版纳	橡胶林	1557	3.8	[31]
	西双版纳	橡胶林	1493	0.49	[18]

4.3 土壤温度和土壤含水量对土壤甲烷吸收的影响

土壤环境(温度和水分等)不但对土壤微生物活性、群落丰度和多样性等有显著的影响^[32],而且可以直接影响 CH₄产生和吸收过程中的底物供应,进而改变 CH₄产生和吸收的比例,从而对土壤 CH₄通量产生不同的影响^[33]。

甲烷分子在空气中的扩散速度是水中的 10⁴倍,土壤含水量的降低有利于氧气和甲烷在土壤中的扩散,被甲烷氧化菌所利用,从而影响到 V_{CH₄}^[34]。温带森林的研究发现,当土壤水分填充孔隙率高于 60%时,土壤甲烷吸收主要受水分的限制,但当土壤水分填充孔隙率在 20%—60%之间时,土壤甲烷吸收则受到其他因素的控制^[19]。本研究中,降水减少 20%和 60%后土壤含水量分别降低了 15.67%和 33.4%。菊花等人在北亚热带神农架地区研究发现杉木林降水减少 50%处理后土壤含水量下降,提高了土壤空隙状况,氧气易于扩散到土壤中,促进土壤中甲烷氧化菌和甲烷氧化酶(如甲烷单加氧酶)的活性,从而显著的影响到 V_{CH₄}^[35]。

温度对 V_{CH₄}的影响,不同研究者的研究结果不同。一些研究认为,温度对 V_{CH₄}无显著影响^[36-37],主要是由于水分对甲烷吸收的影响高于温度,当水分成为限制因子时,温度效应易被屏蔽^[38];田亚男等在湖北樟树马尾松混交林研究发现甲烷吸收通量与土壤含水量呈负相关,但与温度无关^[39]。但也有研究认为温度对 V_{CH₄}有显著影响,主要是温度影响土壤微生物和酶活性,从而影响到 V_{CH₄}^[40]。本研究中对照样地的 V_{CH₄}与温度相关性不显著($P>0.05$),但模拟降水减少后,与土壤温度呈正相关关系($P<0.05$)。这可能是模拟降水减少后土壤通气状况改善,有利于空气中的甲烷和氧气向土壤中扩散,从而能够为甲烷氧化菌提供充足的底物供

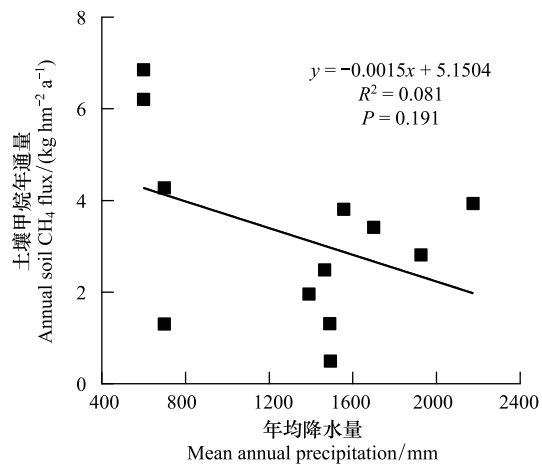


图 6 不同区域甲烷年通量与降水量的相关关系
Fig. 6 Relationship between mean annual soil CH₄ flux and precipitation in China

应,如 Borken 等人在德国温带森林降水量减少 14%—45%, CH_4 年通量增加 41%—102%^[41]。此时,土壤温度对土壤微生物和酶活性的影响则成为 V_{CH_4} 的主要控制因素,如研究发现甲烷氧化菌的温度敏感性 Q_{10} 变化范围为 1.1—4.8^[42]。

5 结论

本研究中,降水减少 20% 和 60% 均提高土壤甲烷吸收能力,同时,模拟降水减少改变了土壤甲烷吸收速率的影响因素,从对照样地中受土壤水分影响,转变成受温度影响。因此,在全球变暖与降水减少的背景下,考虑温度变化对土壤甲烷吸收能力的影响,将提高以往基于水分为主要影响因素的土壤甲烷吸收速率预测模型预测精度。

参考文献 (References):

- [1] Wei H, Peng C H, Liu S R, Liu X J, Li P, Song H X, Yuan M S, Wang M. Variation in soil methane fluxes and comparison between two forests in China. *Forests*, 2018, 9(4): 204.
- [2] 陈勿琼, 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. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 17-22.
- [3] Yan J H, Zhang W, Wang K Y, Qin F, Wang W T, Dai H T, Li P X. Responses of CO_2 , N_2O and CH_4 fluxes between atmosphere and forest soil to changes in multiple environmental conditions. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 300-312.
- [4] Hofmann K, Farbmacher S, Illmer P. Methane flux in montane and subalpine soils of the Central and Northern Alps. *Geoderma*, 2016, 281: 83-89.
- [5] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 徐敏杰, 张裴雷, 郑娇娇, 高文龙, 王永生. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展. *生态学报*, 2012, 32(15): 4914-4923.
- [6] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [7] Barrena I, Menéndez S, Duñabeitia M, Merino P, Stange C F, Spott O, González-Murua C, Estavillo J M. Greenhouse gas fluxes (CO_2 , N_2O and CH_4) from forest soils in the Basque Country: comparison of different tree species and growth stages. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 600-611.
- [8] 张裴雷, 方华军, 程淑兰, 徐敏杰, 李林森, 党旭升. 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响. *生态学报*, 2013, 33(13): 4101-4110.
- [9] 刘实, 王传宽, 许飞. 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. *生态学报*, 2010, 30(15): 4075-4084.
- [10] 耿世聪, 陈志杰, 张军辉, 姜鑫, 王秀秀, 戴冠华, 韩士杰, 于丹丹. 长白山三种主要林地土壤甲烷通量. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1091-1096.
- [11] Veldkamp E, Koehler B, Corre M D. Indications of nitrogen-limited methane uptake in tropical forest soils. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5367-5379.
- [12] Lang R, Blagodatsky S, Xu J C, Cadisch G. Seasonal differences in soil respiration and methane uptake in rubber plantation and rainforest. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 314-328.
- [13] Yamulki S, Morison J I L. Annual greenhouse gas fluxes from a temperate deciduous oak forest floor. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2017, 90(4): 541-552.
- [14] Sundqvist E, Vestin P, Crill P, Persson T, Lindroth A. Short-term effects of thinning, clear-cutting and stump harvesting on methane exchange in a boreal forest. *Biogeosciences*, 2014, 11(21): 6095-6105.
- [15] 肖冬梅, 王霖, 姬立柱, 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. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1855-1859.
- [16] 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 CH_4 排放通量. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 431-439.
- [17] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 张德强, 刘世忠. 鼎湖山主要森林生态系统地表 CH_4 通量. *生态科学*, 2006, 25(4): 289-293.
- [18] 严玉平. 西双版纳热带季节雨林、橡胶林土壤 CH_4 、 N_2O 通量及树干呼吸研究[D]. 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2006.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] Fest B J, Hinko-Najera N, Wardlaw T, Griffith D W T, Livesley S J, Arndt S K. Soil methane oxidation in both dry and wet temperate eucalypt forests shows a near-identical relationship with soil air-filled porosity. *Biogeosciences*, 2017, 14(2): 467-479.
- [22] Fest B, Hinko-Najera N, von Fischer J C, Livesley S J, Arndt S K. Soil methane uptake increases under continuous throughfall reduction in a temperate evergreen, broadleaved eucalypt forest. *Ecosystems*, 2017, 20(2): 368-379.
- [23] Shvaleva A, Lobo-do-Vale R, Cruz C, Castaldi S, Rosa A P, Chaves M M, Pereira J S. Soil-atmosphere greenhouse gases (CO_2 , CH_4 and N_2O) exchange in evergreen oak woodland in southern Portugal. *Plant, Soil and Environment*, 2011, 57(10): 471-477.
- [24] Smith K A, Dobbie K E, Ball B C, Bakken L R, Sitaula B K, Hansen S, Brumme R, Borken W, Christensen S, Priemé A, Fowler D, Macdonald J A, Skiba U, Klemetsson L, Kasimir-Klemetsson A, Degórska A, Orlanski P. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 791-803.
- [25] 党旭升, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 韩士杰, 张军辉, 王淼, 王永生, 徐敏杰, 李林森, 王磊. 温带针阔混交林土壤碳氮气体通量的主控因子与耦合关系. *生态学报*, 2015, 35(19): 6530-6540.
- [26] 杜睿, 黄建辉, 万小伟, 贾月慧. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. *环境科学*, 2004, 25(2): 12-16.
- [27] 齐玉春, 罗辑, 董云社, 章申. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N_2O 和 CH_4 排放研究. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(11): 934-941.
- [28] 莫江明, 方运霆, 李德军, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收特征. *广西植物*, 2006, 26(2): 142-147, 124-124.
- [29] 刘惠, 赵平, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH_4 和 N_2O 通量研究. *热带亚热带植物学报*, 2008, 16(4): 304-314.
- [30] 孙贇, 林杉, Shaaban M, 何志龙, 张水清. 鄂南棕红壤区不同植茶年限茶园 CH_4 通量特征. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3995-4003.
- [31] Werner C, Zheng X H, Tang J W, Xie B H, Liu C Y, Kiese R, Butterbach-Bahl K. N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 335-353.
- [32] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms-a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 54-63.
- [33] Treat C C, Natali S M, Ernakovich J, Iversen C M, Lupascu M, McGuire A D, Norby R J, Chowdhury T R, Richter A, Šantrková H, Schädel C, Schuur E A G, Sloan V L, Turetsky M R, Waldrop M P. A pan-Arctic synthesis of CH_4 and CO_2 production from anoxic soil incubations. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2787-2803.
- [34] Kolb S. The quest for atmospheric methane oxidizers in forest soils. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(5): 336-346.
- [35] 菊花, 申国珍, 徐文婷, 赵常明, 苏磊, 王杨, 谢宗强, 张秋良. 神农架主要森林土壤 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 排放对降水减少的响应. *生态学报*, 2016, 36(20): 6397-6408.
- [36] 刘全全, 王俊, 陈荣荣, 刘文兆, Sainju U M. 黄土高原冬小麦田土壤 CH_4 通量对人工降水的短期响应. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 140-146.
- [37] Lang M, Cai Z C, Chang S X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1): 15-24.
- [38] Lessard R, Rochette P, Topp E, Pattey E, Desjardins R L, Beaumont G. Methane and carbon dioxide fluxes from poorly drained adjacent cultivated and forest sites. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2): 139-146.
- [39] 田亚男, 聂文婷, 张水清, Shaaban M, 吕昭琪, 殷欣, 林杉. 北亚热带红壤丘陵区 3 种土地利用方式下 CH_4 通量及其影响因素. *生态环境学报*, 2015, 24(9): 1434-1440.
- [40] 杨小兵, 江波, 殷寒旭, 康童茜, 高琳, 范东福, 陈晓龙, 汪海鸱, 马友华, 杨书运. 冬小麦田间控水对土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响. *土壤通报*, 2015, 46(2): 471-476.
- [41] Borken W, Brumme R, Xu Y J. Effects of prolonged soil drought on CH_4 oxidation in a temperate spruce forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D6): 7079-7088.
- [42] 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. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2): 43-76.