#### DOI: 10.5846/stxb201503220546

高升华,张旭东,汤玉喜,陈吉泉,唐洁,孙启祥,唐学军.滩地人工林幼林不同时间尺度 CH<sub>4</sub>通量变化特征——基于涡度相关闭路系统的研究.生态学报,2016,36(18): - .

Gao S H, Zhang X D, Tang Y X, Chen J Q, Tang J, Sun Q X, Tang X J.Dynamics and regulation of CH<sub>4</sub> fluxes in a poplar plantation on a floodplain. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

# 滩地人工林幼林不同时间尺度 CH<sub>4</sub> 通量变化特征

-基于涡度相关闭路系统的研究

高升华1,张旭东1,\*,汤玉喜2,陈吉泉3,唐 洁2,孙启祥1,唐学军1,4

1 林木遗传育种国家重点实验室 中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091

2 湖南省林业科学院,长沙 410004

3 密执安州立大学 全球变化与地球观测中心 地理系,美国东兰辛 MI48823

4 国家林业局华东林业调查规划设计院,杭州 310019

**摘要:**长江滩地是甲烷(CH<sub>4</sub>)排放的潜在热点区域,然而目前其 CH<sub>4</sub>通量的变化特征及控制因子尚未被揭晓。基于涡度相关 闭路系统进行为期2年多的连续观测,旨在揭示长江滩地杨树(*Populus deltoides*)人工林幼林 CH<sub>4</sub>通量在不同时间尺度上的变 化特征及其调控机理。结果显示,全年和部分未淹水月份表现出白天排放强而夜间排放弱的平均日变化特征,且淹水前、淹水 期间和退水后分别表现出日间双峰型(7:00和10:00h)、日间与夜间各一峰的双峰型(10:00和23:00h),以及典型的日间单 峰型(10:00h)。淹水年份(2012年)在夏季(6-8月)排放最强,在春末(5月)和秋末冬初(11-12月)排放最弱,而未淹 水年份(2013年)在初夏(6月)排放最强,在盛夏(7月)和秋末(11月)转变为较弱的吸收。淹水年份的年排放量((128.0±42.4) mmolm<sup>2</sup>)是未淹水年份((51.5±29.1) mmolm<sup>2</sup>)的2.5倍。滩地人工林幼林 CH<sub>4</sub>通量的日变化和季节变化最可能受到 摩擦风速、水位和土壤温度的调节,而年际间的巨大差异主要由淹水状况决定。 关键词:甲烷通量:长江;滩地;涡度相关;杨树人工林

# Dynamics and regulation of CH<sub>4</sub> fluxes in a poplar plantation on a floodplain

GAO Shenghua<sup>1</sup>, ZHANG Xudong<sup>1,\*</sup>, TANG Yuxi<sup>2</sup>, CHEN Jiquan<sup>3</sup>, TANG Jie<sup>2</sup>, SUN Qixiang<sup>1</sup>, TANG Xuejun<sup>1,4</sup>

1 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China

3 Center for Global Change and Earth Observations and Department of Geography, Michigan State University, East Lansing, MI48823, USA

4 East China Forest Inventory and Planning Institute, State Forestry Administration, Hangzhou 310019, China

Abstract: Atmospheric methane  $(CH_4)$  concentration has been rising in recent years after a short cease, resulting in an increased global warming potential 28 times that of  $CO_2$  in 2011. This phenomenon has caused extensive concern about the atmospheric  $CH_4$  sink and source as well as the dynamics of  $CH_4$  flux at different temporal scales. In fact, changes in  $CH_4$  flux are more complicated than those of  $CO_2$ , owing to the complex interactions between biotic and abiotic regulations. In the past decade, the eddy covariance method has been widely used to assess changes in  $CH_4$  flux and enhanced the understanding of the dynamics and regulations of the flux. The floodplain of the Yangtze River is a hotspot for  $CH_4$  emission because of frequent water inundation, although limited evidence has been reported. In this study,  $CH_4$  flux was continuously

收稿日期:2015-03-22; 网络出版日期:2015-00-00

基金项目:生态经济型血防林构建技术研究与示范(2015BAD07B07);长江防护林质量调控与高效经营技术研究与示范(2015BAD07B04)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhxdcaf@ 163.com

measured with a close-path eddy covariance system using a Fast Methane Analyzer (FMA DLT-100, Los Gatos Research, Inc. USA) for more than two years (January 2012-February 2014) in a young Populus deltoides plantation on a floodplain of the Yangtze River. Throughout the experiment, several environmental factors were observed in order to reveal CH<sub>4</sub> flux dynamics and the environmental controls at different temporal scales. This plantation was re-established in late January 2012 after clear-cutting of the former mature one, and the field was inundated with water in 2012 for approximately 40 d (July  $11^{\text{th}}$ -August  $20^{\text{th}}$ ), but not in 2013. We found that CH<sub>4</sub> flux was highly variable at several temporal scales. At the halfhourly to daily scale during certain months of non-inundation and over both entire years, the mean diurnal exhibited similar patterns, i.e., the emissions were strong and reached their maximum during the day while they were weak at night. However, this pattern was not apparent in most non-inundation months. In the months of inundation (July-August 2012), the mean diurnal variations showed a double-peak pattern before and during inundation, while a single-peak pattern was observed after inundation. The two peaks before inundation appeared at 7:00 and 10:00 h, while those during inundation appeared at 10:00 and 23:00 h. The peak observed after inundation appeared at approximately 10:00 h. At the monthly to yearly scale,  $CH_4$  fluxes in the two years exhibited patterns in seasonal variation. During the year of inundation (2012), the strongest emission appeared in summer (June-August), whereas the weakest emission appeared in late spring (May) and late autumn through early winter (November-December), at which point the system behaved as a  $CH_4$  source. In the year without inundation (2013), the strongest emission appeared in early summer (June) while the weakest emissions were found in mid-summer (July) or late autumn (November). At the yearly scale,  $CH_4$  emission in the inundation year ((128.  $(0\pm 42.4)$  mmolm<sup>2</sup>) was 2.5 times of that in the non-inundation year (( $(51.5\pm 29.1)$  mmolm<sup>2</sup>), where the emission in the inundation months was responsible for 83.8% of the annual total. We also found that the CH<sub>4</sub> flux at the half-hourly and daily scales was mainly modulated by the friction velocity, water table, and soil temperature, whereas the large interannual difference was mainly determined by inundation frequency and magnitude.

Key Words: methane flux; Yangtze River; floodplain; eddy covariance; Populus deltoides plantation

大气中甲烷(CH<sub>4</sub>)的浓度在经历短暂的停滞之后又继续增长,已由 2005 年的 1774 ppb 上升到 2011 年的 1802 ppb,且近 100 a 的增温潜势也增加至 CO<sub>2</sub>的 28 倍<sup>[1]</sup>。CH<sub>4</sub>浓度这一变化引起人们对其源、汇及动态变化 更加广泛的关注。滨水区是全球湿地的重要组成部分,它一般指水生到陆生生态系统的过渡区域<sup>[2-3]</sup>。由于 较高的地下水位<sup>[4-5]</sup>和间歇性淹水,滨水区往往是 CH<sub>4</sub>通量的热点地区<sup>[6]</sup>。同时,人类开垦、种植等活动所带 来的严重干扰和污染<sup>[7-8]</sup>,使得滨水区土壤—大气界面碳交换的生物地球化学过程更复杂。然而,目前对滨 水区 CH<sub>4</sub>通量的变化特征还所知甚少。

由于 CH<sub>4</sub>主要以微生物为生产者,因此对 CH<sub>4</sub>通量的观测研究要比对 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等气体通量的观测研究 复杂得多<sup>[9]</sup>。静态箱-气相色谱法为 CH<sub>4</sub>通量观测的传统方法,由于其较低的观测频率和过多的人工投入,使 其难以在更小或更大的时间尺度上揭示 CH<sub>4</sub>通量的变化特征。近 10 a,随着高频响应的 CH<sub>4</sub>浓度分析仪的陆 续出现,基于涡度相关法的 CH<sub>4</sub>通量长期连续观测研究在国际上日益增加<sup>[9-14]</sup>。近几年在国内也逐渐开展, 但目前还未见文献报道。

杨树人工林是我国长江中下游滩地主要生态系统之一<sup>[15]</sup>。由于具有森林和湿地的双重属性,滩地杨树 人工林将可能同时具有吸收和排放 CH<sub>4</sub>的潜力。有研究表明,滩地人工林的成熟林和采伐迹地在未淹水年份 的生长旺季表现为 CH<sub>4</sub>的汇,且皆伐短期内降低了土壤吸收 CH<sub>4</sub>的能力,甚至导致了土壤排放 CH<sub>4</sub><sup>[16]</sup>。然 而,由于缺乏长时间尺度的 CH<sub>4</sub>通量研究,目前尚难以全面评估长江滩地杨树人工林对全球气候变化的贡献。 本文运用涡度相关闭路系统对长江滩地美洲黑杨 (*Populus dettoides*)人工幼林进行连续 2 年多的 CH<sub>4</sub>通量观 测,旨在揭示 CH<sub>4</sub>通量的日、季节和年际的变化特征,并初步探讨各时间尺度的调控因子。

### 1 研究方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南省岳阳市君山区长江外滩(29°31′35″N,112°55′22″E),海拔 31 m,系中亚热带向北亚热带过渡的气候区,具有典型的季风气候特征,春夏多雨,秋季多旱,冬季寒冷,全年盛行北风。年均气温 16.8 ℃,年均降雨量 1400 mm。土壤类型为江湖洲滩特有的潮土类型。2012 年淹水 40 d (2012 年 7 月 11 日一 8 月 20 日),而 2013 年未淹水。

研究区面积 60 hm<sup>2</sup>, 呈南北向楔形, 其中东西向宽 约 800 m, 南北长约 1500 m。成熟林树种为美洲黑杨。 该林地于 2011 年 9 月皆伐完毕。在成熟林采伐前,林 下优势种为益母草 (*Leonurus arternisia*),其盖度达 90% 以上<sup>[16]</sup>。新林于 2012 年 1 月末种植,树种仍为美洲黑 杨。2012 年 3 月,平均树高 3.5 m, 胸径 2.5 cm, 至 2013 年 10 月,平均树高 7.0 m, 胸径 10 cm。2012 年 2 月至 6 月,林下植被主要有狗牙根 (*Cynodon dactylon*)、堇菜 (*Viola verecunda*)、辣蓼 (*Polygonum flaccidum*)、风轮菜 (*Clinopodium gracile*)、益母草等。2012 年 9 月至 2013 年 3 月和 2013 年 4 月至 11 月期间分别间作白菜 (*Brassica pekinensis*)和南瓜 (*Cucurbita moschata*)。 **1.2** 观测与分析方法

本研究采用涡度相关法 (Eddy Covariance Method) 进行通量观测。通量观测塔高 30 m,以 CSAT-3 三维风 速仪 (Campbell Scientific, Inc., USA)观测三维风速, 以 LI-COR 7500 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> O 分析仪 (LI-COR, Inc., USA)观测 CO<sub>2</sub>和水汽浓度,以快速甲烷分析仪 (Fast Methane Analyzer, FMA) DLT-100 (Los Gatos Research, Inc. USA)分析 CH<sub>4</sub>浓度。2012 年 3 月至 2013 年 2 月 观测高度为 6.5 m,2013 年 3 月至 2014 年 2 月观测高度 为 7.5 m。环境因子观测包括地面以上部分和地面以下 部分,主要包括辐射、降雨、空气温湿度、土壤温度、土壤 含水量、地下水位等<sup>[18]</sup>。采用 HOBO 水位温度记录仪 (Onset Computer Corporation, USA) 观测地下水位。



#### 图1 研究区图、通量贡献区和风玫瑰图(右上)



白色三角为通量塔位置;黑色虚线为研究区范围,2个椭圆分别为 基于 FSAM 模型<sup>[17]</sup>计算的 2012(外)和 2013(内)年平均通量贡 献区大小,其模型的输入参数取当年该参数的平均值;风玫瑰图 为 2012 和 2013年的风向频率

FMA DLT-100 是基于 OA-ICOS (off-axis Integrated Cavity Out-put Spectroscopy) 技术,其原理是通过高反 射镜面使激光在光腔中衰荡,以使激光光程达到 1—4 km,从而提高仪器对痕量气体的检测能力<sup>[14]</sup>。FMA DLT-100 为闭路分析仪,采用 Edwards XDS35i 真空泵 (Edwards Limited, UK) 采气。真空泵位于 FMA DLT-100 下游,采气速度约 40 L/min。采气管采用内壁镀有特氟龙涂层的金属管,内径约 0.01 m,于进气管的前段 和后段分别安装有 5  $\mu$ m 和 1  $\mu$ m 的换膜过滤器。约每 7 天更换一次滤膜。FMA 正常工作时光腔气压通过调 压模块保持在—190 hPa。当光腔衰荡时间降低至—6  $\mu$ s 时,将仪器搬回至实验室进行镜面清洗,并以 2.0 ppm 空气中 CH<sub>4</sub>标准气体进行校准进行校准。

本研究采用 EdiRe 软件 (version 1.5.0.32; Robert Clement, University of Edinburgh, Edinburgh, UK; http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/)进行通量计算和数据质量控制。主要过程包括:去除了超

出仪器测量范围和超过4倍标准差的异常值,运用坐标轴二次旋转法使垂直风速均值为零<sup>[19]</sup>,超声虚温校准(SND correction)<sup>[20]</sup>,频率损失校准,WPL 校准<sup>[21]</sup>等。其中 CH<sub>4</sub>通量仅进行了潜热校正而未进行显热校 正<sup>[22]</sup>。主要使用最大协方差法确定矢量的延迟时间。然而,CH<sub>4</sub>的延迟时间经常难以确定<sup>[23]</sup>,因此本文在 CH<sub>4</sub>信号延迟时间难以确定时,以固定延迟时间替代<sup>[19]</sup>。

主要通过以下方式对 CH<sub>4</sub>通量数据进行数据质量控制:(1)删除仪器处于非正常工作状态的瞬时值,如 气压不稳定、光腔衰荡时间过低 (<6 μs)、CH<sub>4</sub>浓度超出正常范围 (<1.5 或>3.5 ppm)等;(2)计算每个半小 时的通量贡献率,并舍弃通量贡献率低于 80%的 CH<sub>4</sub>数据;(3)去除夜间摩擦风速<0.1 m/s 时的数据。最终 2012 年和 2013 年 CH<sub>4</sub>通量数据保存率为 31.2%和 30.7%。

本文对不大于 2 小时的 CH<sub>4</sub>通量空缺以线性内插法插补,对大于 2 小时的空缺则选择滑动窗平均日变化法 (gliding-window mean diurnal variations method)<sup>[24]</sup>进行插补,滑动窗口依次为 7、14、30 d,对大于 30 d 的空缺不进行插补。本文以插补数据计算的累积通量为标准值,同时以未插补数据计算而得的累积通量作对比。

采用 Multiple Imputation (MI) 法进行 CH<sub>4</sub>月通量和年通量的不确定性分析。MI 法是基于蒙特卡罗理论的一种方法<sup>[25]</sup>,其原理是以若干个模拟值替代缺失值从而得到若干个插补数据集,不同阶段的累计通量及不确定性则通过该若干个数据集进行统计计算获取。目前该方法已被用于 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>O<sup>[25]</sup>及 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O<sup>[11]</sup>通量的插补。本文通过此方法获取月通量和年通量的 95% 的置信区间 (95% CI)。

土壤温度  $(T_s)$ 、土壤含水量 (SWC)、水位 (WT)、摩擦风速  $(U_{star})$  和总生态系统生产力 (Gross Ecosystem Productivity, GEP) 被认为是调节  $CH_4$ 通量的最可能的因子<sup>[10,12,26]</sup>。本文采用 SAS 9.3 软件进行数据统计分析,以 Spearman 相关系数检验不同时间尺度  $CH_4$ 通量与上述环境因子的关系。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 环境因子

2012 年平均气温(15.9 ℃)较2013 年(17.7 ℃)低,但土壤温度(5 cm 深,17.3 ℃)较2013 年(15.2 ℃)高(图2)。2012 年 7 月 11 日至 8 月 20 日淹水,最高水位 2.8 m,而 2013 年最高地下水位为-0.57 m(6 月 7 日)。淹水期间土壤表层温度一直保持在 25 ℃左右,土壤含水量(SWC)几乎保持饱和状态(约 0.6)。 而 2013 年同期的土壤温度为全年最高(>28 ℃),SWC 则从 7 月 6 日的 0.58 一直下降至 9 月 4 日的 0.38。 2012 年的降雨量主要集中于前 9 个月,年总降雨量为 1860 mm。而 2013 年降雨量全年分布更均匀,年总降雨 量为 1670 mm。

#### 2.2 CH₄通量的日变化

在淹水月份(2012年7月和8月),CH<sub>4</sub>通量具有较明显的日变化规律,然而淹水前、淹水期间和退水后的日变化规律不同。淹水前,白天排放强度显著高于夜间,分别于8:00和11:00h出现峰值,9:00h出现日间最小值(图3)。淹水期间,清晨(6:00-9:00h)和夜间(19:00-23:00h)排放逐渐增加,并于9:00和23:00h达到峰值,下午14:00h出现全天最小值(图3)。退水后,通量表现为明显的单峰型,峰值出现于10:00h(图3)。通量变化幅度以退水后最大,淹水期间次之,淹水前最小。

所选月份的数据保持量均>55%。其中 a, b, c 为淹水前、淹水期间和退水后;d, e, f 未表现出明显的日 变化特征;g, h, i, j, k, l 表现出白天的通量较强而夜间较弱的特征。

未淹水时期,典型单日 CH<sub>4</sub>通量的日变化规律不明显,但部分月份的月平均日变化表现出一定的相似性, 主要表现为白天排放强,而夜间排放弱,并于上午、中午或下午出现全天的最强排放(图 3)。这一规律在 2012 和 2013 年全年平均日变化中也得以体现(图 3)。此外,在夜间、日出或日落、正午前后 CH<sub>4</sub>的排放强度 往往较弱,甚至出现 CH<sub>4</sub>的吸收。然而,多数月份的月平均日变化并未明显表现出上述规律(图 3)。通量的 平均日变化规律显著与否与该月的通量强度并无直接关系(图 3)。

2.3 CH<sub>4</sub>通量的季节变化



Fig.2 Dynamics of environmental factors

 $T_a$ 和 $T_s$ 分别为空气温度(air temperature)和5 cm 深处土壤温度(soil temperature), SWC为15 cm 深处土壤体积含水量(soil volumetric water content)

2012年与2013年的月通量表现出不同的季节变化特征(图4)。2012年1月至3月排放强度基本稳定, 自3月开始逐渐减小,并于5月达到最小。然而自6月起急剧增加,并于8月达到最大。之后迅速回落,并逐 渐降低至12月份。自2013年1月起逐渐增加至3月。于4月短暂回落后又逐渐回升直至6月。7月份表现 出微弱的吸收,但于8月份又恢复至6月份的强度,之后逐渐减弱,并于11月达到最小。而之后的2个月又 表现出较强的排放。

由未插补数据计算而得的月通量变化与插补数据计算的结果基本表现一致。然而不同的是,前者显示幼林于 2013 年 7 月排放强度极微弱,而从 8 月起表现为较强的吸收,并于 9 月份达到最大吸收值 (-7.6 mmolm<sup>2</sup>)。插补后与未插补结果的差异主要由于仪器故障导致 2013 年 8 月和 9 月数据缺失过多。

总之,2012年排放高峰出现于淹水期间(7-8月),但淹水前(6月)和淹水后(9月)均受到长江水位 的影响而表现出相对较强的排放;最弱的排放出现于受水位影响较小的春末夏初(5月)和秋末冬初(11和 12月)。而2013年最强排放出现于初夏(6月),而最弱排放出现于盛夏(7月)和秋末(11月份)。结合未 经插补计算而得的通量变化情况推测,夏季(7-9月)将可能表现出一定强度的CH<sub>4</sub>吸收。

2.4 CH<sub>4</sub>通量的年际变化

18 期

2012 年 CH<sub>4</sub>排放量((128.0±42.4) mmolm<sup>2</sup>) 是 2013 年((51.5±29.1) mmolm<sup>2</sup>) 的 2.5 倍(图 5),然而 2012 年淹水月份(7、8 月份)的 CH<sub>4</sub>排放量((107.3±11.3) mmolm<sup>2</sup>)占全年排放量的 83.8%,是 2013 年同期 排放量的 16 倍。而 2012 年未淹水月份的总排放量为 20.7 mmolm<sup>2</sup>,为 2013 年同期排放量的 0.46 倍。因此, 滩地淹水与否是直接导致这 2 年通量巨大差异的最主要原因。

2.5 不同时间尺度 CH<sub>4</sub>通量的影响因素

淹水期间,半小时通量与 SWC、WT 表现出极显著的负相关,而与 U<sub>star</sub>表现出极显著的正相关;而日通量



图 3 CH<sub>4</sub> 通量的平均日变化

Fig.3 Mean diurnal changes of CH<sub>4</sub> flux

与 SWC 和 WT 负相关性较大,但不显著(表1)。

未淹水期间,2012 和 2013 年在半小时尺度、日尺度和月尺度通量上均具有不同的环境控制因子。半小时尺度上,2012 年通量与 *T*<sub>s</sub>和 WT 具有极显著正相关性,并与 *U*<sub>star</sub>具有显著正相关性;而 2013 年通量仅与 *U*<sub>star</sub>具有极显著正相关性。日尺度上,2012 年通量与 *T*<sub>s</sub>和 WT 具有显著正相关性,而 2013 年通量仍仅与 *U*<sub>star</sub>具有显著正相关性。在月尺度上,2012 年通量与 WT 表现出较强的正相关性,而 2013 年通量未与任何变量表现出显著相关性。

## 3 讨论

目前的研究显示, CH<sub>4</sub>通量的日变化特征较复杂。有学者将天然湿地 CH<sub>4</sub>通量日变化规律总结为日间极 大值型、夜间极大值型和随机型<sup>[27]</sup>,将稻田日变化规律总结为单峰型、双峰型和无规则型<sup>[28]</sup>,且这些变化特 征主要根据大量的箱法观测研究案例总结而出。而本研究基于涡度相关法的观测结果显示,本研究区几乎表 现出了上述所有的日变化特征,表明长江滩地 CH<sub>4</sub>通量具有更复杂的日动态变化。Querino, et al.基于涡度相 关法的研究发现,热带森林在日出后会出现持续 5 个小时的较强的 CH<sub>4</sub>排放,归因于夜间储藏在冠层的气体 日出后被排放<sup>[29]</sup>。而本研究中部分月份和 2 个全年的平均日变化均显示,在白天也呈现出持续数小时的较 强排放(图 2),但并非由于冠层夜间储藏气体的释放(因为冠层十分稀疏),而可能由于日出后大气湍流加 强,将土壤中夜间驻留的气体缓慢带出了土壤。





MDV 和 MI 分别表示经滑动窗平均日变化法和 Multiple Imputation 法插补后计算的月通量值

大多研究都表明 CH<sub>4</sub>通量季节性变化明显。典型的湿地生态系统以 CH<sub>4</sub>排放为主,其排放高峰多集中于 夏季<sup>[30-33]</sup>。而温带森林生态系统以 CH<sub>4</sub>吸收为主,其 吸收强度以夏季最高,冬季最小<sup>[34]</sup>。而人工林生态系 统的季节变化相对复杂。孙晓新等研究发现,天然沼泽 和排水造林的人工林 CH<sub>4</sub>通量都有明显的季节变化规 律,但人工林 CH<sub>4</sub>通量峰值出现的时间和频率与天然沼 泽不同,峰值相对较小,有吸收 CH<sub>4</sub>的现象<sup>[35]</sup>。Zona et al. 对由农田转变的杨树人工林温室气体通量的研究显 示,CH<sub>4</sub>排放量以生长季最低,非生长季最高<sup>[11]</sup>。本站 点此前的研究表明,滩地杨树人工林成熟林在未淹水年 份的生长季具有较强的 CH<sub>4</sub>吸收能力,但皆伐后 CH<sub>4</sub>吸 收能力降低<sup>[16]</sup>。而本研究中未插补数据显示 2013 年 8



收能力降低<sup>[16]</sup>。而本研究中未插补数据显示 2013 年 8 一 9 月表现出较强吸收。因此推断,今后未淹水年份的 CH<sub>4</sub>通量将在夏季出现较弱的 CH<sub>4</sub>排放,甚至将表现出一定强度的吸收。

由于环境因子常对 CH<sub>4</sub>的产生和氧化同时产生影响,二者的动态平衡导致其对 CH<sub>4</sub>通量的影响处于动态 变化当中<sup>[36-38]</sup>,因此,CH<sub>4</sub>通量的调控机制往往十分复杂。一般认为温度、土壤水分、水位、湍流条件和生态系 统生产力是调节 CH<sub>4</sub>通量的最可能的因子<sup>[10,12,26]</sup>。而滨水区处于水生和陆生生态系统的过渡区域,其 CH<sub>4</sub>通 量的调控则更加复杂。季节性淹水由于能对许多生物地球化学过程产生影响而被认为是滨水区异质性的主 要驱动力<sup>[39]</sup>。地下水位是有氧和无氧区的分界线,因而此处 CH<sub>4</sub>产生和氧化均十分活跃,为 CH<sub>4</sub>排放的热点 位置<sup>[40]</sup>。而水位的变化会导致该热点位置发生移动,同时会导致气体传输距离的改变。本研究中,水位对 2012 年各时间尺度通量均产生显著影响,而未对 2013 年通量产生影响,因为 2012 年水位的变化较 2013 年幅

18 期

7

		Table 1	The correlation	ns between F <sub>CH4</sub>	and potential en	vironmental cont	rols	
淹水状况 Inundation situation	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux		统计变量 Stat. VAR.	T <sub>s</sub>	SWC	WT	$U_{ m star}$	GEP
淹水 Inundation	$F_{CH_4}_hh$		SCC	0.008	-0.658 ***	-0.284 ***	0.165 ***	0.088
			Р	0.8562	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1134
	$F_{CH_4}-d$		SCC	0.151	-0.482	-0.421	-0.046	0.119
			Р	0.5375	0.2265	0.0726	0.8529	0.6266
	2012	F <sub>CH4</sub> _hh	SCC	0.081 ***	0.026	0.090 ***	0.044 *	-0.004
Non-inundation			Р	< 0.0001	0.0993	< 0.0001	0.0047	0.8317
		$F_{CH_4}d$	SCC	0.241 *	0.080	0.242 *	0.016	0.053
			Р	0.0017	0.3192	0.0016	0.8325	0.4912
		$F_{CH_4}_m$	SCC	0.586	0.128	0.947 **	-0.176	-0.125
			Р	0.1271	0.7629	0.0004	0.677	0.7686
	2013	$F_{CH_4}$ _hh	SCC	0.002	0.023	-0.02793	0.094 ***	-0.016
			Р	0.8866	0.1292	0.0540	< 0.0001	0.4014
		$F_{CH_4}d$	SCC	-0.028	0.036	-0.128	0.190*	-0.014
			Р	0.7175	0.6397	0.0920	0.0120	0.8531
		$F_{CH_4}_m$	SCC	-0.358	0.285	-0.115	-0.236	-0.430
			Р	0.3104	0.4250	0.7514	0.5109	0.2145

表 1 不同时间尺度的  $CH_4$ 通量与潜在控制因子的相关性

F<sub>CH4</sub>-hh, F<sub>CH4</sub>-d 和 F<sub>CH4</sub>-m 分别为半小时、日平均通量和月平均通量(nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), 均采用未经插补的数据; T<sub>s</sub>:5 cm 深处土壤温度 soil temperature; SWC:15 cm 深处土壤体积含水量 soil volumetric water content; WT: 地下水位 water table; U<sub>star</sub>: 摩擦风速 friction velocity; GEP: 总生态系统生产力 gross ecosystem productivity; SCC: Spearman 相关系数, P 为显著性; \*\*\*表示 P<0.0001, \* \*表示 P<0.001, \*表示 P<0.05

度大得多(图2)。摩擦风速是大气湍流条件的重要指标,它同时对扩散和冒泡这2种CH<sub>4</sub>排放方式产生重要影响<sup>[10]</sup>,而这两种方式分别为未淹水和淹水时期CH<sub>4</sub>排放的主要途径,因而本研究中摩擦风速对2012年淹水和未淹水时期及2013年CH<sub>4</sub>通量均有显著影响。Chu et al.在淡水湿地和玉米地中的研究发现,摩擦风速是半小时CH<sub>4</sub>通量的主要控制因素,而对更长时间尺度通量影响不明显<sup>[10]</sup>。而本研究中摩擦风速不仅对任何时期半小时通量具有显著影响,而且对2013年的日通量也具有显著影响。此外,摩擦风速对CH<sub>4</sub>排放的影响常在气体传输受阻时更显著<sup>[10]</sup>。本研究中摩擦风速对2013年通量影响更大,可能由于2013年具有更低的地下水位而导致CH<sub>4</sub>排出的阻力更大,同时更茂密的地表覆盖使土壤表面湍流减弱而导致CH<sub>4</sub>扩散更慢,因而摩擦风速的作用更显著。土壤温度是影响生物活性的重要因子,其同时对甲烷氧化菌和产甲烷菌的活性产生影响<sup>[37]</sup>。本研究中土壤温度对2012年较小尺度通量产生显著影响,而对2013年通量无影响,可能由于2012年地表植被覆盖更少而导致土壤温度波动更大(图2)。林下农作物的间作活动对CH<sub>4</sub>通量可能产生影响。然而,本研究中,生态系统的初级生产力对通量并未表现出显著影响,而幼林期人工林的生产力主要来源于林下植被,因此可以推测林下作物的生长状况对CH<sub>4</sub>通量影响不显著。此外,土壤水分也未表现出对CH<sub>4</sub>通量的显著影响,因此推测农业灌溉活动对全年的不同时间尺度CH<sub>4</sub>通量影响不显著,但灌溉和暴雨冲击对CH<sub>4</sub>通量的短期影响不清楚。至于施肥对CH<sub>4</sub>通量的影响,本研究难以推断。

目前对 CH<sub>4</sub>通量缺失数据尚无统一的插补方法。Chu et al.应用边缘分布抽样法(Marginal Distribution Sampling method, MDS)进行数据插补<sup>[10]</sup>,而 Zona et al.运用分时段线性外推法(Linear Extrapolation)进行线性插补,而运用 MI (Multiple Imputation)法进行不确定性估算<sup>[11]</sup>。MDS 法和 MI 法均为基于 Monte Carlo 技术的数据插补方法。本研究中由于 CH<sub>4</sub>通量在不同时间尺度上具有一定的变化趋势(图 3,4),且数据的缺失在一天中并非均匀分布,因此在进行全年通量估算时应对缺失值进行插补。本文运用滑动窗平均日变化法(MDV)插补计算的月通量和年通量与未经插补而计算的通量和经 MI 法插补而计算的通量均具有较好的一

致性,由此可见 MDV 法用于本研究区 CH<sub>4</sub>通量缺失值插补是可行的。

## 4 结论

本研究表明,滩地人工林幼林不同时间尺度上的 CH<sub>4</sub>通量变化均表现出较大的变异性,主要体现在:(1) 全年和部分未淹水月份表现出白天排放强而夜间排放弱的日变化特征,而淹水前、淹水期间和退水后分别表 现出日间双峰型(7:00和10:00h)、日间与夜间各一峰的双峰型(10:00和23:00h),以及典型的日间单峰 型(10:00),但多数未淹水月份未表现出明显的日变化特征;(2)淹水年份(2012年)在夏季(6-8月)排 放最强,在春末(5月)和秋末冬初(11-12月)排放最弱,而未淹水年份(2013年)在初夏(6月)排放最 强,在盛夏(7月)和秋末(11月)转变为较弱的吸收;(3)淹水年份的年排放量((128.0±42.4) mmolm<sup>2</sup>) 为未淹水年份((51.5±29.1) mmolm<sup>2</sup>)的2.5倍。滩地人工林幼林 CH<sub>4</sub>通量的日变化和季节变化最可能受到 摩擦风速、水位和土壤温度的调节,而年际变化主要由淹水状况决定。

#### 参考文献(References):

- [1] Hartmann D L, Tank A M G K, Rusticucci M, Alexander L V, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener F J, Dlugokencky E J, Easterling D R, Kaplan A, Soden B J, Thorne P W, Wild M, Zhai P M. Observations: Atmosphere and Surface// Stocker T F, QinD, PlattnerG K, TignorM, AllenS K, BoschungJ, NauelsA, XiaY, BexV, MidgleyP M, eds. 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.
- [2] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, Cummins K W. An ecosystem perspective of riparian zones. BioScience, 1991, 41(8): 540-551.
- [3] Swanson F J, Gregory S V, Sedell J R, Campbell A G. Land-water interactions: the riparian zone. Analysis of Coniferous Forest Ecosystems in the Western United States, 1982; 267-291.
- [4] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用. 应用生态学报, 1996, 7(4): 439-448.
- [5] Johnson R R, McCormick J F. Strategies for protection and management of floodplain wetlands and other riparian ecosystems: Proceedings of the symposium.Washington, D.C.: USDA Forest Service General Technical Report WO-12, 1979.
- [6] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, Rees R M, Drewer J. Spatial and temporal variability in CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from a Scottish ombrotrophic peatland: Implications for modelling and up-scaling. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1315-1323.
- [7] Sun Q Q, Shi K, Damerell P, Whitham C, Yu G H, Zou C L. Carbon dioxide and methane fluxes: Seasonal dynamics from inland riparian ecosystems, northeast China. Science of the Total Environment, 2013, 465: 48-55.
- [8] Beger M, Grantham H S, Pressey R L, Wilson K A, Peterson E L, Dorfman D, Mumby P J, Lourival R, Brumbaugh D R, Possingham H P. Conservation planning for connectivity across marine, freshwater, and terrestrial realms. Biological Conservation, 2010, 143(3): 565-575.
- [9] Baldocchi D, Detto M, Sonnentag O, Verfaillie J, Teh Y A, Silver W, Kelly N M. The challenges of measuring methane fluxes and concentrations over a peatland pasture. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 153: 177-187.
- [10] Chu H S, Chen J Q, Gottgens J F, Ouyang Z T, John R, Czajkowski K, Becker R. Net ecosystem methane andcarbon dioxide exchanges in a Lake Erie coastal marsh and a nearby cropland. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(5): 722-740.
- [11] Zona D, Janssens I A, Aubinet M, Gioli B, Vicca S, Fichot R, Ceulemans R. Fluxes of the greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) above a shortrotation poplar plantation after conversion from agricultural land. Agriculturaland Forest Meteorology, 2013, 169: 100-110.
- [12] Olson D M, Griffis T J, Noormets A, Kolka R, Chen J. Interannual, seasonal, and retrospective analysis of the methane and carbon dioxide budgets of a temperate peatland. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(1): 226-238.
- [13] Smeets C J P P, Holzinger R, Vigano I, Goldstein A H, Röckmann T. Eddy covariance methane measurements at a Ponderosa pine plantation in California. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(21): 8365-8375.
- [14] Hendriks D M D, Dolman A J, van der Molen M K, van Huissteden J. A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(2): 431-443.
- [15] 张旭东,漆良华,周金星,刘国华,黄玲玲.林业血防生态工程在血吸虫病防治中的作用及展望.世界林业研究,2006,19(4):33-37.
- [16] 高升华,张旭东,汤玉喜,张蕊,唐洁,张雷,申贵仓,魏远.滩地美洲黑杨人工林皆伐对地表甲烷通量的短期影响.林业科学,2013,49
   (1):7-13.
- [17] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 67(3): 293-318.
- [18] 魏远,张旭东,江泽平,周金星,汤玉喜,吴立勋,黄玲玲,高升华.湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳交换季节动态研究.林业科

学研究, 2010, 23(5): 656-665.

- [19] Rebmann C, Kolle O, Heinesch B, Queck R, Ibrom A, Aubinet M. Data acquisition and flux calculations//Aubinet M, Vesala T, Papale D, eds. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis.Netherlands: Springer, 2012: 59-84.
- [20] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 1983, 26(1): 81-93.
- [21] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447); 85-100.
- [22] Ibrom A, Dellwik E, Larsen S E, Pilegaard K. On the use of the Webb-Pearman-Leuning theory for closed-path eddy correlation measurements. Tellus B, 2007, 59(5): 937-946.
- [23] Detto M, Verfaillie J, Anderson F, Xu L K, Baldocchi D. Comparing laser-based open-and closed-path gas analyzers to measure methane fluxes using the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(10): 1312-1324.
- [24] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [25] Hui D F, Wan S Q, Su B, Katul G, Monson R, Luo Y Q. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1/2): 93-111.
- [26] Schrier-Uijl A P, Kroon P S, Hensen A, Leffelaar P A, Berendse F, Veenendaal E M. Comparison of chamber and eddy covariance-based CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission estimates in a heterogeneous grass ecosystem on peat.Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(6): 825-831.
- [27] 郝庆菊, 王跃思, 江长胜, 王长科, 王明星. 湿地甲烷排放研究若干问题的探讨. 生态学杂志, 2005, 24(2): 170-175.
- [28] 陈槐,周舜,吴宁,王艳芬,罗鹏,石福孙.湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展.应用与环境生物学报,2006,12(5):726-733.
- [29] Querino C A S, Smeets C J P P, Vigano I, Holzinger R, Moura V, Gatti L V, Martinewski A, Manzi A O, de Araújo A C, Röckmann T. Methane flux, vertical gradient and mixing ratio measurements in a tropical forest. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(15): 7943-7953.
- [30] 陈槐,高永恒,姚守平,吴宁,王艳芬,罗鹏,田建卿.若尔盖高原湿地甲烷排放的时空异质性.生态学报,2008,28(7):3425-3437.
- [31] 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 陈华, 王军, 许世远, 杨龙元. 长江口崇明东滩潮间带甲烷(CH<sub>4</sub>) 排放及其季节变化. 地理科学, 2007, 27 (3): 408-413.
- [32] 黄国宏,肖笃宁,李玉祥,陈冠雄,杨玉成,赵长伟. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH<sub>4</sub>)排放研究. 生态学报, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [33] Cheng X L, Luo Y Q, Xu Q, Lin G H, Zhang Q F, Chen J K, Li B. Seasonal variation in CH<sub>4</sub> emission and its <sup>13</sup>C-isotopic signature from Spartina alterniflora and Scirpus mariqueter soils in an estuarine wetland. Plant and Soil, 2010, 327(1/2): 85-94.
- [34] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH<sub>4</sub>排放通量的研究. 土壤与环境, 2000, 9(3): 173-176.
- [35] 孙晓新, 牟长城, 冯登军, 刘霞, 程伟, 石兰英. 排水造林对小兴安岭沼泽甲烷排放的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4251-4259.
- [36] Hopfensperger K N, Gault C M, Groffman P M. Influence of plant communities and soil properties on trace gas fluxes in riparian northern hardwood forests. Forest Ecology and Management, 2009, 258(9): 2076-2082.
- [37] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. European Journal of Soil Biology, 2001, 37 (1): 25-50.
- [38] Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. Biogeochemistry, 1998, 41(1): 23-51.
- [39] Naiman R J, Décamps H. The ecology of interfaces: riparian zones. Annual review of Ecology and Systematics, 1997, 28: 621-658.
- [40] Hagedorn F, Bellamy P. Hot spots and hot moments for greenhouse gas emissions from soils. Soil Carbon in Sensitive European Ecosystems: From Science to Land Management, 2011: 9-14.