

doi:10.3799/dqkx.2017.071

# 神农架大九湖泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量特征及其影响因子

李艳元<sup>1,2,3</sup>, 葛继稳<sup>1,2,3\*</sup>, 彭凤姣<sup>1,2,3</sup>, 周颖<sup>1,2,3</sup>, 李金群<sup>1,2,3</sup>, 吴先<sup>1,2,3,4</sup>, 刘奕伶<sup>1,2,3,5</sup>, 张志麒<sup>6</sup>

1. 中国地质大学盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生态环境研究所, 湖北武汉 430074

4. 武汉智汇元环保科技有限公司, 湖北武汉 430079

5. 昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南昆明 650051

6. 湖北神农架林区大九湖国家级湿地公园管理局, 湖北神农架林区 442417

**摘要:**开展大九湖湿地生态系统 CH<sub>4</sub> 通量研究,对深入了解碳循环机制、科学经营以及准确评估湿地生态系统碳收支等方面具有重要意义。以湖北省神农架林区大九湖亚高山泥炭湿地为研究区域,采用涡度相关法对 CH<sub>4</sub> 通量进行原位连续观测,分析了泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量变化特征及其影响因素。结果表明,大九湖泥炭湿地在 2015 年 8 月至 2016 年 5 月期间表现为 CH<sub>4</sub> 的源,日通量均值为 15.57 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。CH<sub>4</sub> 通量具有“夜间极大值”(2:00 或 22:00)和“三峰模式”(6:00、12:00 和 22:00)两种昼夜变化规律;CH<sub>4</sub> 通量具有明显季节变化规律,8 月释放最多(36.46 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>),3 月释放最少(3.92 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)。相关性分析表明,大九湖泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量受空气温度(T<sub>a</sub>)、土壤温度(T<sub>s</sub>)、土壤含水量(SWC)和摩擦风速(U\*)的共同影响;不同时间尺度上,各影响因子与 CH<sub>4</sub> 通量的相关性有所差异。曲线拟合得出,CH<sub>4</sub> 通量与 T<sub>a</sub> 和 T<sub>s</sub> 呈指数增长趋势,与 SWC 呈二次曲线关系。

**关键词:**CH<sub>4</sub> 通量;泥炭湿地;涡度相关;动态变化;影响因子;生态学;水文地质。

**中图分类号:** P421

**文章编号:** 1000-2383(2017)05-0832-11

**收稿日期:** 2016-12-17

## Characteristics of Methane Flux and Their Effect Factors on Dajiuhu Peatland of Shennongjia

Li Yanyuan<sup>1,2,3</sup>, Ge Jiwen<sup>1,2,3\*</sup>, Peng Fengjiao<sup>1,2,3</sup>, Zhou Ying<sup>1,2,3</sup>, Li Jinqun<sup>1,2,3</sup>,  
Wu Xian<sup>1,2,3,4</sup>, Liu Yiling<sup>1,2,3,5</sup>, Zhang Zhiqi<sup>6</sup>

1. Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Wuhan Gathering Wisdom Environmental Science and Technology Co., Ltd, Wuhan 430079, China

5. Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd, Kunming 650051, China

6. Institute of Hubei Shennongjia National Wetland Park Administration Bureau, Shennongjia Forestry District 442417, China

**Abstract:** It is significant to do research on methane flux in Dajiuhu, to understand mechanism of the carbon cycle better, to manage it more scientifically and to assess the carbon balance in wetland ecosystem accurately. By using eddy covariance technique, methane fluxes of Dajiuhu subalpine peatland in Shennongjia Forestry Administrative District of Hubei Province, Central China were observed from August 2015 to May 2016, and temporal variation of methane emission and related affecting factors were investigated. The results show that the peatland ecosystem was methane sources, with the daily average release rate being 15.57 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>. During the sampling period, the mean diurnal variations showed a maximum value at night (2:00 or 22:00) and a three-peak pattern all day (6:00, 12:00 and 22:00). The monthly average emission rate of CH<sub>4</sub> de-

**基金项目:**中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项(Nos.1323521225,1323521325);环境保护部生态环境十年变化遥感调查与评估项目(Nos.2012046151,2012046395)。

**作者简介:**李艳元(1991-),女,硕士,主要从事湿地生态学研究。ORCID:0000-0001-6947-4202.E-mail:Sophieyuanba@163.com

\* **通讯作者:**葛继稳,ORCID:0000-0003-0594-4417.E-mail:gejiwen2002@aliyun.com

**引用格式:**李艳元,葛继稳,彭凤姣,等,2017.神农架大九湖泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量特征及其影响因子.地球科学,42(5):832-842.

creased rapidly from August(36.46 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), and its valley in March(3.92 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), then increasing gradually from April. The correlation analysis indicates that CH<sub>4</sub> flux was mainly dominated by air temperature ( $T_a$ ), soil temperature ( $T_s$ ), soil water content (SWC) and friction velocity ( $U^*$ ). And their relevance varied with different time scales. The curve fitting shows that CH<sub>4</sub> flux was an exponential correlated with  $T_a$  and  $T_s$ , and had a good conic relationship with SWC.

**Key words:** methane flux; peatland; eddy covariance; variation; effect factor; ecology; hydrogeology.

## 0 引言

CH<sub>4</sub> 是最重要的温室气体之一,在大气中的浓度虽远低于 CO<sub>2</sub>,但其在百年尺度上的分子增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 28 倍.自工业革命以来,由于人类活动的干扰,大气中 CH<sub>4</sub> 浓度增长了 2.5 倍,并仍在持续增加(IPCC, 2013).湿地是 CH<sub>4</sub> 最大的自然排放源,约占全球年排放总量的 25%(Whalen, 2005).因此,湿地生态系统 CH<sub>4</sub> 通量的研究已成为研究热点之一.但鉴于观测仪器、研究方法、地理环境等方面的影响和制约,湿地生态系统 CH<sub>4</sub> 通量的变化特征及其控制机制等一直是研究的重点和难点.近年来迅速发展的涡度相关分析法(eddy covariance method)能通过测量各种属性的湍流脉动值来直接测量气体的通量,并已应用于 CH<sub>4</sub> 通量研究.其优势在于能原位观测生态系统 CH<sub>4</sub> 通量的连续变化,分析频率高,监测范围大,更具代表性(贾庆宇等, 2015).

随着 CH<sub>4</sub> 分析仪的陆续出现,国际上基于涡度相关分析法连续观测 CH<sub>4</sub> 通量的研究日益增多,前人对不同类型生态系统的 CH<sub>4</sub> 通量特征进行了初步研究(Smeets *et al.*, 2009; Baldocchi *et al.*, 2012; Olson *et al.*, 2013; Zona *et al.*, 2013; Chu *et al.*, 2014).在我国,目前关于湿地 CH<sub>4</sub> 通量的研究主要集中于若尔盖高原(Ding *et al.*, 2004a; Chen *et al.*, 2008; 陈槐等, 2008; 高燕等, 2016; 周文昌等, 2016)、三江平原(王毅勇等, 2005; 杨文燕等, 2006; 朱晓艳等, 2015)、小兴安岭(孙晓新等, 2009; 石兰英等, 2010)等地以及一些河口湿地(全川等, 2010; 王慧等, 2012; 王维奇等, 2012; 杜慧娜等, 2016),且普遍采用静态箱一气相色谱法,采用涡度相关技术对 CH<sub>4</sub> 通量进行研究的文献报道还较为少见(贾庆宇等, 2015; 高升华等, 2016).对亚高山泥炭湿地 CH<sub>4</sub> 通量的研究更鲜有报道.

神农架大九湖亚高山泥炭湿地是华中地区保存最完好的亚高山泥炭沼泽湿地,在世界中纬度地区具有典型性、代表性、稀有性和独特性,其地域的独特性、对气候变化的敏感性、生态环境的重要性和脆弱

性在全球气候变化研究中具有特别重要的地位.因此,开展大九湖湿地生态系统 CH<sub>4</sub> 通量研究,对深入了解碳循环机制、科学经营以及准确评估湿地生态系统碳收支等方面具有重要意义.本研究以大九湖泥炭湿地生态系统为研究对象,基于涡度相关技术观测的数据资料,探讨大九湖泥炭湿地生态系统的 CH<sub>4</sub> 通量变化特征及其主要影响因子.在为湿地相关基础研究提供数据及为湿地保护和湿地生态系统功能评估和生态补偿应用方面有一定的创新.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

通量观测塔设在湖北省神农架林区大九湖国家湿地公园 1 号湖附近的泥炭湿地生态系统内(31°28'44.45"N, 110°00'14.61"E, 1 758 m).该研究区地处中纬度北亚热带季风气候区,属于亚高山寒温带潮湿气候,日照时间短,年平均气温为 7.4 °C,无霜期 144 d,年降水量为 1 528.3 mm,降水丰富且分布均匀,云雾天气较多,相对湿度 > 80%;冬长夏短、春秋相连的独特气候条件造成了特有的亚高山湿地资源.研究区成土母岩主要为冲积物和湖积物,土壤类型以沼泽土、草甸沼泽土和草甸土为主.地表层以泥炭藓(*Sphagnum palustre*)为优势种,伴生种有大金发藓(*Polytrichum commune*)、沼泽皱缩藓(*Aulacomnium palustre*),周边维管植物种类有苔草(*Carex fulvorubescens*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、圆叶茅膏菜(*Drosera rotundifolia*)、马先蒿(*Pedicularis davidii*)等.

### 1.2 研究方法

大九湖湿地生态系统开放式涡度相关观测系统的探头安装高度为 3 m,主要由开放式 CH<sub>4</sub> 分析仪(LI-7700, LI-Cor, USA)、开放式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(LI-7500, LI-Cor, USA)和三维超声风速仪(CAST3, LI-Cor, USA)组成,采样频率为 10 Hz,在线通量系统(SMARTFlux)计算并存储每 30 min 的 CH<sub>4</sub> 通量、摩擦风速、潜热通量和显热通量等平均

值结果,同时,安装了生物气象辅助传感器系统(Biomet 100, LI-Cor, USA),用于测定空气温度/相对湿度(Vaisala HMP 155)和降雨量(TR-525USW)以及地面以下 10 cm、20 cm 和 30 cm 处土壤温度(7900-180, LI-Cor, USA);10 cm、20 cm 和 30 cm 处土壤含水量(Delta-T ML2x)等环境因子,每 30 min 自动记录 1 次。

由于机械故障,导致 2016 年 6~7 月数据不可用,因此本研究选用 2015 年 8 月至 2016 年 5 月共 10 个月涡度观测数据进行分析。考虑季节动态时,选择 2015 年 8 月代表夏季,2015 年 9~11 月代表秋季,2015 年 12 月~2016 年 2 月代表冬季,2016 年 3~5 月代表春季。

### 1.3 数据质量控制和插补

由于受仪器故障、断电、天气突变等不利因素的影响,数据不可避免的出现部分缺失和“野点”,因此需要进行标准化的数据质量控制/质量保证(QC/QA)过程,主要包括:(1)去除同期有降水的数据;(2)去除夜间摩擦风速低于  $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  所对应的数据;(3)去除与平均值相差超过 4 倍总体标准差的极端异常值。

目前对  $\text{CH}_4$  通量的插补尚缺乏统一的插补方法。本文对  $<2.5 \text{ h}$  的  $\text{CH}_4$  通量空缺利用缺失时段前后的数据以线性内插法插补,对  $\geq 2.5 \text{ h}$  的空缺选择滑动窗平均日变化法(gliding-window mean diurnal variations method)(Falge *et al.*, 2001)进行插补,滑动窗口依次为 7 d、14 d、30 d。

### 1.4 数据处理

本文运用 Excel 2010 进行数据统计分析、Ori-

gin 8.5 软件进行绘图、SPSS 19 软件进行 Spearman 相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要环境因子动态变化

本研究环境因子主要包括:空气温度( $T_a$ )、降水量( $P$ )、土壤温度( $T_s$ )和土壤含水量(SWC)。研究区主要环境因子月变化平均值见表 1。

由表 1 可以看出,研究区研究期内(2015 年 8 月~2016 年 5 月)月均最高  $T_a$ (8 月)和最低  $T_a$ (1 月)分别为  $17.91 \pm 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-1.59 \pm 0.11 \text{ }^\circ\text{C}$ ,平均  $T_a$  为  $8.21 \pm 0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ ;日均  $T_a$  变化呈“U”型曲线(图 1),8 月 2 日达到最高值  $21.75 \pm 0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ,1 月 25 日降至最低值  $-12.42 \pm 0.11 \text{ }^\circ\text{C}$ ;3 层  $T_s$ ( $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$ 、 $T_{s30}$ )最高月均值为 8 月,与  $T_a$  相同,而  $T_{s20}$ 、 $T_{s30}$  最低月均值为 2 月,略滞后于  $T_a$  和  $T_{s10}$ ;3 层  $T_s$  变化幅度均小于  $T_a$ ,变化趋势与  $T_a$  基本相同,但明显滞后于  $T_a$ ,2015 年 8 月至 2016 年 3 月末略高于  $T_a$ ,2016 年 4 月初开始逐渐低于  $T_a$ ,这是由于  $T_s$  随  $T_a$  的升高和下降时吸收和释放热量滞后造成的,且土层越深这种现象越显著。

研究区研究期内总降水量为 873.97 mm,总降雨天数为 182 d,最大日总降水量  $62.70 \pm 0.10 \text{ mm}$ (8 月 18 日),冬季(12 月、次年 1 月和 2 月)降水稀少,仅占降水总量的 8.08%。3 层 SWC( $\text{SWC}_{10}$ 、 $\text{SWC}_{20}$ 、 $\text{SWC}_{30}$ )月均值差异较大, $\text{SWC}_{10}$  月均值始终保持在  $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  以上,而  $\text{SWC}_{20}$  和  $\text{SWC}_{30}$  月均值均小于  $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ;3 层 SWC 均随着降

表 1 环境因子月平均变化

Table 1 Average monthly changes in environmental factors

年份	月份	$T_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ (mm)	$T_s$ ( $^\circ\text{C}$ )			$\text{SWC}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$		
				$T_{s10}$	$T_{s20}$	$T_{s30}$	$\text{SWC}_{10}$	$\text{SWC}_{20}$	$\text{SWC}_{30}$
2015	8	$17.90 \pm 0.05$	$123.20 \pm 0.15$	$20.21 \pm 0.04$	$19.54 \pm 0.03$	$18.59 \pm 0.02$	$0.65 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.00$	$0.61 \pm 0.00$
	9	$15.91 \pm 0.06$	$100.90 \pm 0.12$	$17.58 \pm 0.04$	$17.32 \pm 0.04$	$16.99 \pm 0.03$	$0.68 \pm 0.00$	$0.64 \pm 0.00$	$0.61 \pm 0.00$
	10	$10.96 \pm 0.06$	$103.22 \pm 0.16$	$13.84 \pm 0.05$	$14.03 \pm 0.04$	$14.27 \pm 0.03$	$0.71 \pm 0.00$	$0.64 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$
	11	$7.17 \pm 0.10$	$71.76 \pm 0.14$	$9.54 \pm 0.05$	$10.02 \pm 0.03$	$10.75 \pm 0.02$	$0.79 \pm 0.00$	$0.64 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$
	12	$0.07 \pm 0.07$	$22.70 \pm 0.04$	$3.78 \pm 0.04$	$4.79 \pm 0.04$	$6.16 \pm 0.04$	$0.81 \pm 0.00$	$0.65 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.00$
2016	1	$-1.59 \pm 0.11$	$15.70 \pm 0.03$	$2.01 \pm 0.01$	$2.69 \pm 0.01$	$3.77 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.00$	$0.65 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.00$
	2	$2.53 \pm 0.13$	$32.20 \pm 0.07$	$2.03 \pm 0.02$	$2.36 \pm 0.02$	$3.05 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.00$	$0.65 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.00$
	3	$5.17 \pm 0.10$	$96.90 \pm 0.15$	$6.82 \pm 0.04$	$6.50 \pm 0.03$	$6.27 \pm 0.02$	$0.80 \pm 0.00$	$0.65 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$
	4	$11.13 \pm 0.05$	$139.10 \pm 0.22$	$12.22 \pm 0.03$	$11.28 \pm 0.03$	$10.35 \pm 0.03$	$0.76 \pm 0.00$	$0.64 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$
	5	$14.00 \pm 0.07$	$168.30 \pm 0.18$	$15.43 \pm 0.03$	$14.63 \pm 0.02$	$13.75 \pm 0.01$	$0.65 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$	$0.59 \pm 0.00$
均值		$8.21 \pm 0.06$	$2.91 \pm 0.13$	$10.25 \pm 0.05$	$10.23 \pm 0.05$	$10.31 \pm 0.04$	$0.75 \pm 0.00$	$0.64 \pm 0.00$	$0.62 \pm 0.00$

注: $T_{s10}$ ,地面以下 10 cm 处土壤温度; $T_{s20}$ ,地面以下 20 cm 处土壤温度; $T_{s30}$ ,地面以下 30 cm 处土壤温度; $\text{SWC}_{10}$ ,地面以下 10 cm 处土壤含水量; $\text{SWC}_{20}$ ,地面以下 20 cm 处土壤含水量; $\text{SWC}_{30}$ ,地面以下 30 cm 处土壤含水量。

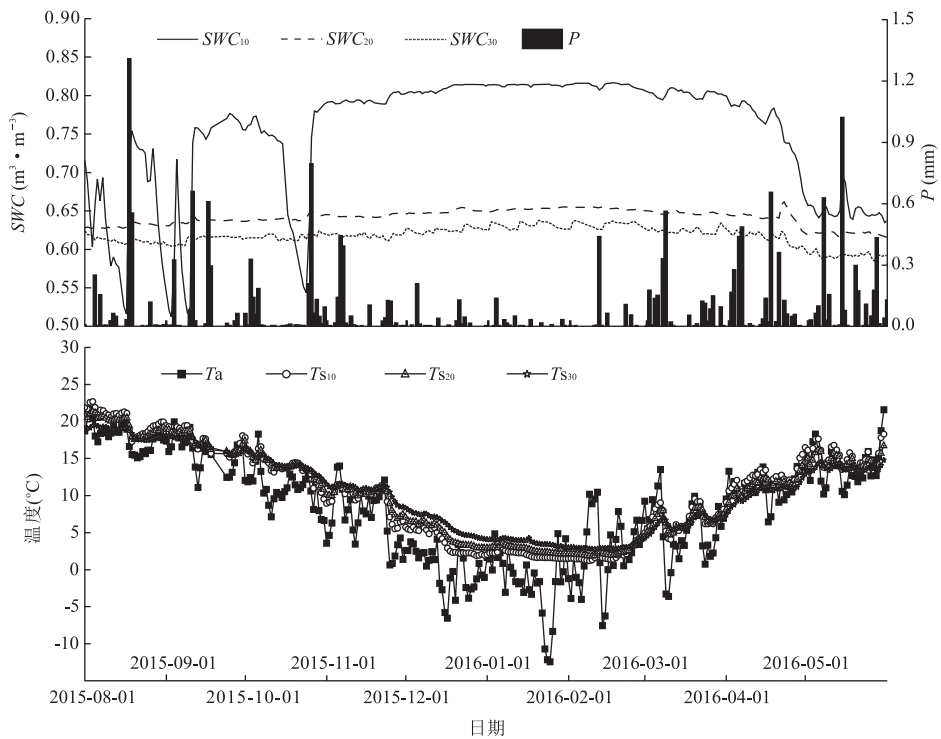


图 1 大九湖泥炭湿地环境因子变化

Fig.1 Variations of environmental factors in Dajihu peatland

雨事件的发生有一个显著上升现象,且滞后出现,土层越浅现象越明显;SWC<sub>20</sub>和SWC<sub>30</sub>由于土层较深,日变化波动幅度较小;而SWC<sub>10</sub>随着降雨量的增大会快速增高,日变化波动幅度较大;在8~10月、4~5月,由于温度较高、蒸发快,降雨停止后SWC会快速下降,而11月到次年3月,由于温度较低和冰雪层的覆盖,蒸发缓慢,同时受前期降雨影响,SWC在下次降雨来临时仍维持在较高水平,至3月末温度回暖该现象才逐渐缓解.SWC变化影响因素有待进一步研究分析。

## 2.2 CH<sub>4</sub> 通量动态变化

### 2.2.1 CH<sub>4</sub> 通量月平均日动态变化

将研究期大九湖泥炭湿地的CH<sub>4</sub>通量按每月每天从0:00~23:30每30min进行平均(即CH<sub>4</sub>月平均日通量=每月相同时间点CH<sub>4</sub>通量之和/每月天数),得到通量每月平均日变化特征曲线(图2)。从图2可以看出,CH<sub>4</sub>通量在10个月都没有表现出可以预测的变化规律。CH<sub>4</sub>通量的每月平均日变化大致呈现2种变化形式,第1种(8~10月、4~5月)是白天(6:00~18:00)甲烷排放基本维持在一个稳定水平,波动较小,晚间(18:00~6:00)波动较大,出现“夜间极大值”(一般为2:00或22:00),第2种(11月到次年3月)是甲烷排放昼夜变化具有“三峰模

式”,每月的三峰值出现时间点不尽相同(一般为6:00、12:00和22:00)。10个月份均大约在晚间22:00左右出现了甲烷排放明显增加的现象;5月、8月和10月出现了异常大的甲烷排放,其中5月和10月最大值分别达到64.96和61.74 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,且都大约出现在晚间22:00。

2015年8月~2016年5月CH<sub>4</sub>通量月平均日变化波动范围(每天48个时间段内CH<sub>4</sub>月平均日通量的最高点与最低点)分别为18.31~86.92、10.36~36.22、10.18~61.74、0.35~22.15、1.85~28.82、-7.62~22.05、-12.92~16.92、-4.35~15.45、-1.98~23.38、11.97~64.97 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,波动范围从8月到次年3月逐渐减小(10月波动增大),4月开始逐渐变大。其中8~12月全天均表现为甲烷排放,从1月开始白天和晚上都出现甲烷吸收和排放,4月白天不再出现甲烷吸收现象,至5月全天均为甲烷排放。

### 2.2.2 CH<sub>4</sub> 通量日平均、月平均和季度平均动态变化

将2015年8月~2016年5月CH<sub>4</sub>通量按每天进行平均,得到通量日平均变化特征曲线(图3)。由图3可知,CH<sub>4</sub>通量日平均变化范围为-12.38~55.46 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,均值为15.57 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,最大值出现在8月3日,最小值出现在3



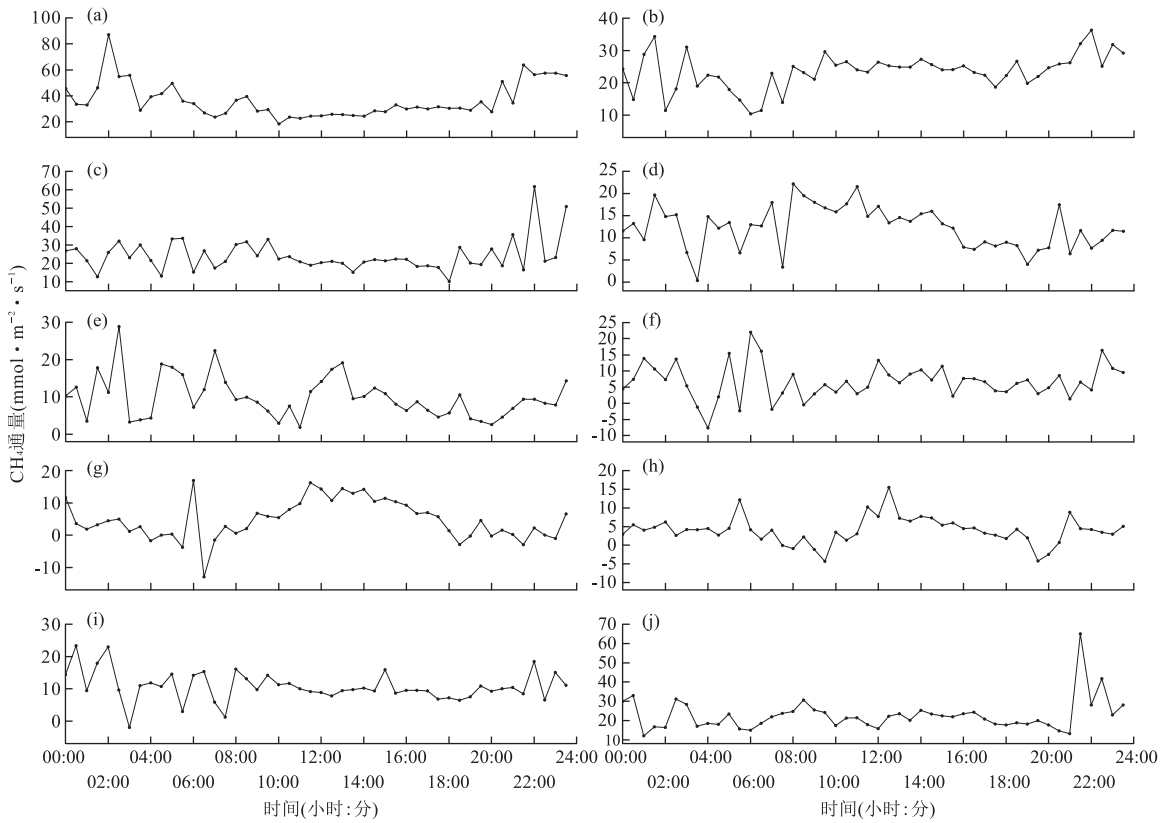


图 2 CH<sub>4</sub> 通量月平均日变化

Fig.2 Monthly mean diurnal variation of CH<sub>4</sub> flux

a.8 月;b.9 月;c.10 月;d.11 月;e.12 月;f.1 月;g.2 月;h.3 月;i.4 月;j.5 月

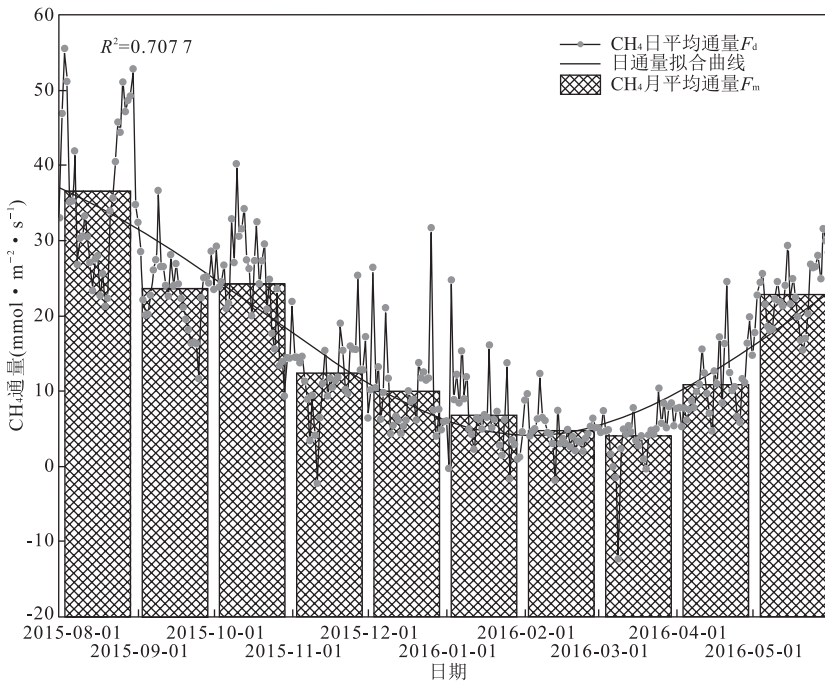


图 3 CH<sub>4</sub> 通量日平均变化

Fig.3 Daily mean variation of CH<sub>4</sub> flux

图中上坐标对应绘制的“CH<sub>4</sub> 月平均通量变化”条形图;下坐标对应绘制的“CH<sub>4</sub> 日平均通量变化”折线图

表2 各环境因子的相关性分析

Table 2 Correlations analysis of different factors

	$T_a$	$T_{s10}$	$T_{s20}$	$T_{s30}$	$SWC_{10}$	$SWC_{20}$	$SWC_{30}$	$U^*$
$F_{hh}$	0.460**	0.565**	0.584**	0.597**	-0.537**	-0.529**	-0.491**	0.032**
$F_d$	0.700**	0.798**	0.817**	0.835**	-0.754**	-0.732**	-0.692**	-0.064
$F_m$	0.830**	0.891**	0.903**	0.927**	-0.830**	-0.842**	-0.806**	-0.503

注:“\*\*”表示在置信度(双侧)为0.01时,相关性是显著的。 $F_{hh}$ .半小时的CH<sub>4</sub>通量; $F_d$ .CH<sub>4</sub>日平均通量; $F_m$ .CH<sub>4</sub>月平均通量; $T_a$ .空气温度; $U^*$ .摩擦风速。

月9日.日平均通量随时间推移具有一定的上下波动,但几乎全部(97.38%)表现为甲烷的排放.将通量日平均变化进行曲线拟合,可看出CH<sub>4</sub>通量日平均变化趋势与温度变化趋势基本一致,表现出了较明显的日际变化规律,从8月至次年2月排放通量依次降低,3月开始逐渐增加。

2015年8月~2016年5月月平均通量分别为36.46、23.50、24.11、12.31、9.93、6.68、4.67、3.93、10.72、22.70 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,全都表现为甲烷的排放.CH<sub>4</sub>通量月际变化规律十分明显,从8月到次年5月先减小后增加,3月份平均通量达到最低值。

研究区CH<sub>4</sub>通量具有明显的季节变化,具体表现为夏季>秋季>春季>冬季,其季度平均通量分别为36.50、20.19、12.47、7.15 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,全表现为甲烷的排放。

### 2.3 CH<sub>4</sub>通量与主要环境因子的关系

由于本研究区CH<sub>4</sub>通量变化幅度较大,部分时段并不符合正态分布,因此统一采取Spearman相关系数进行相关性分析.本文分析了不同时间尺度上CH<sub>4</sub>通量与可能影响因子 $T_a$ 、 $T_s$ 、SWC、摩擦风速( $U^*$ )的关系.结果显示(表2),在半小时尺度上,CH<sub>4</sub>通量( $F_{hh}$ )与 $T_a$ 、 $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$ 、 $T_{s30}$ 和 $U^*$ 呈显著正相关关系,与 $SWC_{10}$ 、 $SWC_{20}$ 和 $SWC_{30}$ 呈显著负相关关系;在日尺度上,CH<sub>4</sub>通量( $F_d$ )与 $T_a$ 、 $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$ 和 $T_{s30}$ 呈显著正相关关系,与 $SWC_{10}$ 、 $SWC_{20}$ 和 $SWC_{30}$ 呈显著负相关关系,与 $U^*$ 不相关;在月尺度上,CH<sub>4</sub>通量( $F_m$ )与 $T_a$ 、 $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$ 和 $T_{s30}$ 呈显著正相关关系,与 $SWC_{10}$ 、 $SWC_{20}$ 和 $SWC_{30}$ 呈显著负相关关系,与 $U^*$ 不相关.随着时间尺度的加长,CH<sub>4</sub>通量与 $T_a$ 、 $T_s$ 和SWC的相关性加强,而与 $U^*$ 的相关性减弱。

## 3 讨论

### 3.1 CH<sub>4</sub>通量特征

在日尺度上,研究区在研究期内既表现出了

CH<sub>4</sub>排放,也表现出了CH<sub>4</sub>吸收,但总体以排放为主;在月尺度和季节尺度上,研究区均表现为CH<sub>4</sub>通量的排放.因此,从总体上笔者推测,研究区主要表现为甲烷的源。

由于沼泽环境不同,产生和排放CH<sub>4</sub>的能力也不尽相同.有研究表明,当有维管植物(有通气组织)存在时,CH<sub>4</sub>通过植物排放的速率是通过水体扩散的10 000倍(Chanton *et al.*, 1992).而泥炭藓由于缺乏通气组织不能有效地排放CH<sub>4</sub>,导致其CH<sub>4</sub>排放速率略低于其他类型沼泽地,这一现象在许多研究中得到了证明(Sundh *et al.*, 1995; Frenzel and Rudolph, 1998).本研究区CH<sub>4</sub>日平均排放速率为15.57 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,明显低于我国三江平原毛茛苔草沼泽(300.17 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)(王德宣等, 2002)和若盖尔高原木里苔草沼泽(68.57 nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)(高燕等, 2016)等其他类型沼泽地CH<sub>4</sub>排放速率。

目前研究显示,CH<sub>4</sub>通量的昼夜变化特征较为复杂,不同类型湿地CH<sub>4</sub>排放差异更为显著.Käki *et al.*(2001)、Ding *et al.*(2004a, 2004b)以及Ding and Cai(2007)在各自的研究中均观察到沼泽湿地CH<sub>4</sub>排放存在明显的昼夜变化规律,但CH<sub>4</sub>通量峰值出现的时间点不尽相同.而在Wang and Han(2005)和Rinne *et al.*(2007)的研究中,CH<sub>4</sub>通量则未表现出明显的昼夜变化规律.本研究在研究期内观察到两种昼夜变化类型(“夜间极大值”和“三峰模型”),表明大九湖泥炭湿地具有更为复杂的日动态变化.而各月CH<sub>4</sub>通量日变化波动范围的不同和CH<sub>4</sub>源汇表现形式的不同,归因于各月温度和含水量等环境因子的不同。

大多研究表明CH<sub>4</sub>通量具有明显的季节变化规律,但不同类型湿地之间存在一定差异.典型的湿地生态系统以CH<sub>4</sub>排放为主,排放峰值多集中于夏季(7~9月)(杨洪霞等, 2007; 陈槐等, 2008).但宋长春等(2005)对三江平原沼泽湿地的研究中发现,春季融冻期(4~6月)出现了明显的CH<sub>4</sub>排放峰值。

本研究发现夏季  $\text{CH}_4$  排放量明显高于其他季度,而冬季  $\text{CH}_4$  排放量最小,这与大部分研究结果(王德宣等, 2002; Wang and Han, 2005; Rinne *et al.*, 2007)一致。

### 3.2 $\text{CH}_4$ 通量的环境调控机制

$\text{CH}_4$  通量的调控机制往往十分复杂,因其产生、氧化、排放和消耗同时受到各个环境因子(温度、土壤含水量、摩擦风速和有机质含量等)的影响,各环境因子的细微变化也会使其处于动态变化之中(Hopfensperger *et al.*, 2009; Schrier-Uijl *et al.*, 2010; Olson *et al.*, 2013; Chu *et al.*, 2014; 杨桂芳等, 2015; 丁修建等, 2016)。

**3.2.1 温度** 考虑样本量大小和相关性显著度,选择  $\text{CH}_4$  日平均通量( $F_d$ )与  $T_a$ 、 $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$  和  $T_{s30}$  进行曲线拟合。结果表明(图 4),  $F_d$  与  $T_a$  呈指数关系( $R^2 = 0.5438$ ),随着  $T_a$  的升高,  $\text{CH}_4$  排放量增加。当  $T_a$  在  $0^\circ\text{C}$  以下时,随着  $T_a$  的升高,  $F_d$  缓慢增加;当  $T_a$  在  $0^\circ\text{C}$  以上时,随着  $T_a$  的升高,  $F_d$  增加速度明显加快。 $F_d$  与 3 层  $T_s$  ( $T_{s10}$ 、 $T_{s20}$ 、 $T_{s30}$ ) 均呈指数关系( $R^2 = 0.6622$ ,  $R^2 = 0.6784$ ,  $R^2 = 0.6933$ ),且土层越深,拟合系数  $R^2$  越大,表明其与  $F_d$  的相关性越明显。

目前关于  $\text{CH}_4$  通量与温度关系的研究,尚未有

统一的定论。一些研究表明,  $\text{CH}_4$  排放通量的大小与土壤温度密切相关(Thomas *et al.*, 1996; Rask *et al.*, 2002; 段晓男等, 2007; 高燕等, 2016);但也有研究表明,  $\text{CH}_4$  排放量和土壤温度的相关性较差,甚至没有明显的相关性(Schütz *et al.*, 1990; 江长胜等, 2004)。王慧等(2012)在碱蓬湿地发现了  $\text{CH}_4$  排放量与土壤温度呈显著的指数相关,这与本研究结论一致(图 3)。这是因为温度可以通过影响产甲烷菌来控制  $\text{CH}_4$  的产生过程(Le Mer and Roger, 2001),温度越高,微生物的反应速率越快,进而导致泥炭中产甲烷菌越活跃,甲烷产生量也越高。同时,温度也会影响沼泽湿地  $\text{CH}_4$  的排放方式,温度越高,  $\text{CH}_4$  通过气泡排放的能力越强(Fechner-Levy and Hemond, 1996)。有研究表明,  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  还原为苔藓泥炭沼泽甲烷产生的主要途径之一,且土层越深现象越明显(Chasar *et al.*, 2000; Nakagawa *et al.*, 2002; 刘德燕和丁维新, 2011)。因此,不同土层温度与  $\text{CH}_4$  排放量的相关性不同,可能是因不同土层产甲烷相关微生物代谢速率和底物供应的不同。

**3.2.2 土壤含水量** 选择  $\text{CH}_4$  日平均通量( $F_d$ )与  $\text{SWC}_{10}$ 、 $\text{SWC}_{20}$  和  $\text{SWC}_{30}$  进行曲线拟合。结果表明(图 5),  $\text{CH}_4$  通量与 3 层  $\text{SWC}$  ( $\text{SWC}_{10}$ 、 $\text{SWC}_{20}$ 、 $\text{SWC}_{30}$ ) 均呈二次曲线关系( $R^2 = 0.5559$ ,  $R^2 =$

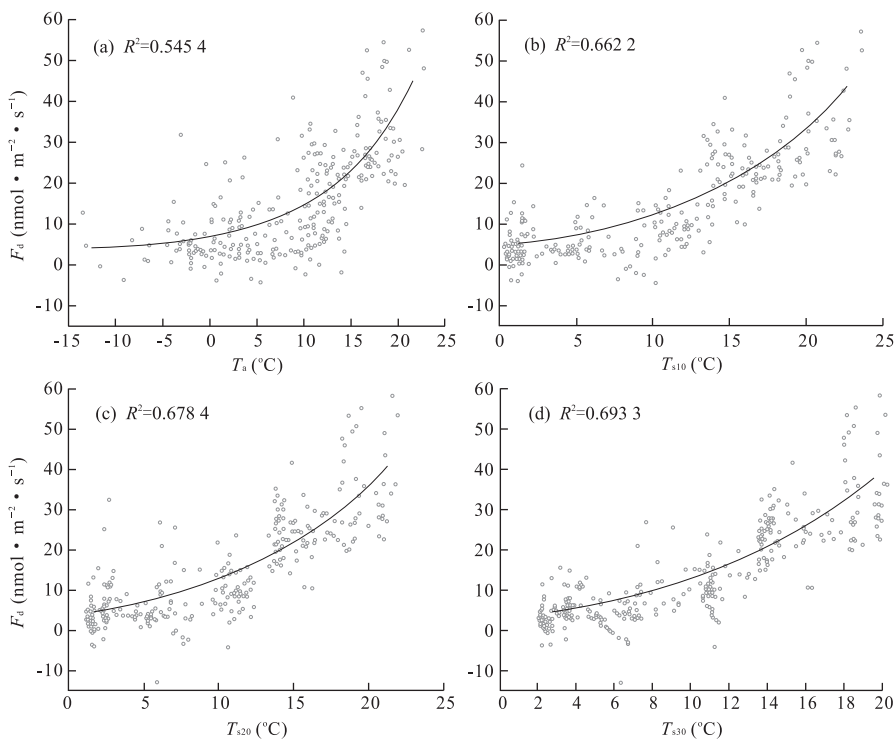
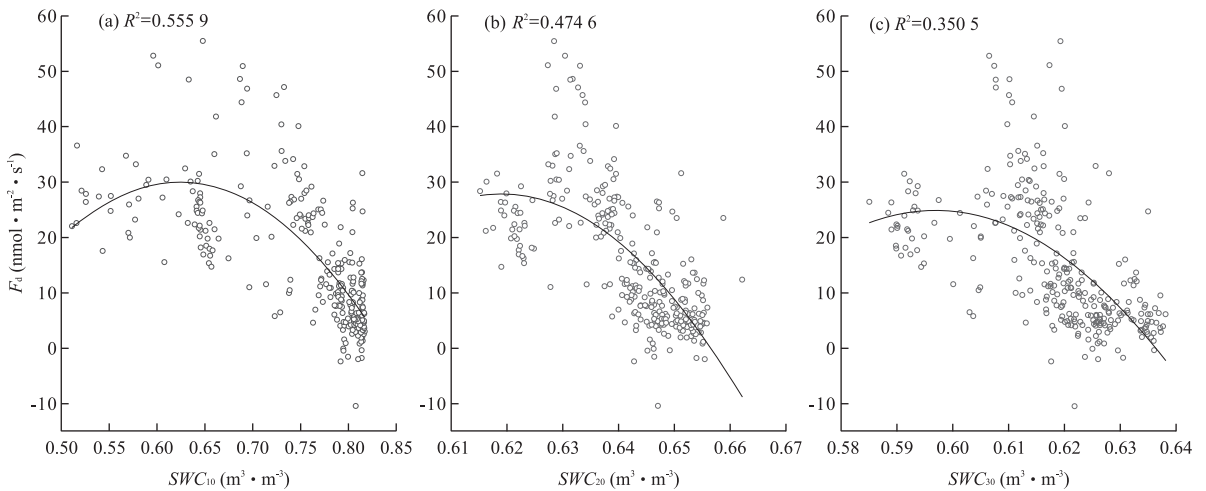


图 4  $\text{CH}_4$  日通量与温度的拟合曲线

Fig.4 Simulated curves of relationship between diurnal  $\text{CH}_4$  flux and temperature

图5  $\text{CH}_4$  日通量与土壤含水量的拟合曲线Fig.5 Simulated curves of relationship between diurnal  $\text{CH}_4$  flux and soil water content

0.474 6,  $R^2 = 0.350 5$ ). 当  $\text{SWC}_{10} < 0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  时, 随着  $\text{SWC}_{10}$  的升高,  $F_d$  缓慢增加; 当  $\text{SWC}_{10} > 0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  时,  $F_d$  开始随着  $\text{SWC}_{10}$  的升高而逐渐降低.  $\text{SWC}_{20}$  和  $\text{SWC}_{30}$  始终低于  $0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , 在其变化范围内,  $F_d$  随着  $\text{SWC}$  升高而逐渐降低. 这一现象可能是由于研究区土壤含水量在  $0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  以上时, 土壤达到了饱和含水量. 而本研究中的泥炭地  $\text{SWC}_{10}$  长期处于饱和含水量之上.

土壤含水量可以通过影响微生物的活性、土壤 pH、Eh 和 DO 值、 $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  的扩散速率等, 间接影响土壤  $\text{CH}_4$  的氧化能力 (Hirota *et al.*, 2007). 多数研究表明, 泥炭沼泽  $\text{CH}_4$  通量变化与表层土壤含水量呈正相关关系 (Tsuyuzaki *et al.*, 2001; Kutzbach *et al.*, 2004; Wang and Han, 2005), 这可能是因为随着土壤含水量的增加, 沼泽土壤的厌氧程度增加,  $\text{O}_2$  含量减少, 从而降低了  $\text{CH}_4$  的氧化率, 增加了  $\text{CH}_4$  的排放. 而本研究表明,  $\text{CH}_4$  排放与表层土壤含水量之间不是简单的正相关或负相关关系, 而是呈二次曲线关系 (图 4). 当  $\text{SWC}_{10}$  低于  $0.66 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  时, 土壤含水量与  $\text{CH}_4$  排放呈正相关; 当  $\text{SWC}_{10}$  高于  $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $\text{SWC}_{20}$  高于  $0.63 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  以及  $\text{SWC}_{30}$  高于  $0.61 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  时, 土壤含水量均与  $\text{CH}_4$  排放呈显著负相关. 这可能是在一定范围内土壤含水量增加会抑制甲烷氧化菌的活性, 同时影响土壤中氧气含量, 从而有利于甲烷的排放; 而当含水量升高到某一临界值时, 过高的土壤含水量可能会抑制土壤中微生物的活性或改变微生物的种类和数量, 导致土壤产甲烷能力降低. 不同土层含水量与  $\text{CH}_4$  通量呈显著负相关时的临界值不

同, 可能是由于深层土壤含水量升高会导致相应土壤温度降低, 进而影响  $\text{CH}_4$  产生和排放过程中所涉及的微生物的数量、结构和活性. 湿地  $\text{CH}_4$  排放是其与各因子 (气候、水文、土壤理化性质、生物等) 相互作用的结果, 土壤含水量的改变会通过直接或间接影响  $\text{CH}_4$  产生、氧化和传输 3 个过程, 从而改变  $\text{CH}_4$  的最终排放量. 因此, 研究区内  $\text{CH}_4$  通量与土壤含水量的关系有待进一步研究探讨.

**3.2.3 摩擦风速** 在不同时间尺度上,  $\text{CH}_4$  通量与摩擦风速 ( $U^*$ ) 的相关性显著不同.  $U^*$  仅与半小时的  $\text{CH}_4$  通量 ( $F_{\text{th}}$ ) 显著相关 ( $p < 0.01$ ), 而对更长时间尺度  $\text{CH}_4$  通量影响不明显, 这与 Chu *et al.* (2014) 和高升华等 (2016) 的研究结果一致.  $U^*$  是大气湍流条件的重要指标, 它主要是通过影响  $\text{CH}_4$  排放方式 (扩散和冒泡) 从而影响  $\text{CH}_4$  通量大小 (Chu *et al.*, 2014).

## 4 结论

本研究表明, 大九湖泥炭湿地甲烷日平均排放速率变化范围为  $-12.38 \sim 55.46 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 整体表现为甲烷的源. 研究期内甲烷排放昼夜变化表现为“夜间极大值”和“三峰模型” (6:00、12:00 和 22:00) 两种形式, 同时表现出了比较明显的月变化和季节变化规律, 排放峰值出现在夏季 (8 月). Spearman 检验表明, 甲烷通量与空气温度、土壤温度和土壤含水量在不同时间尺度上均显著相关 ( $p < 0.01$ ), 而与摩擦速度仅在半小时尺度上甲烷通量显著相关; 曲线拟合表明, 不同深度土壤温度和含



水量与甲烷通量的相关系数均不同,这与不同深度产甲烷相关微生物数量、结构和活性及其不同的理化环境密切相关。

## References

- Baldocchi, D., Detto, M., Sonnentag, O., et al., 2012. The Challenges of Measuring Methane Fluxes and Concentrations over a Peatland Pasture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 153: 177 – 187. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.04.013
- Chanton, J.P., Martens, C.S., Kelley, C.A., et al., 1992. Methane Transport Mechanisms and Isotopic Fractionation in Emergent Macrophytes of an Alaskan Tundra Lake. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D15): 16681 – 16688. doi: 10.1029/90JD01542
- Chasar, L.S., Chanton, J.P., Glaser, P.H., et al., 2000. Radiocarbon and Stable Carbon Isotopic Evidence for Transport and Transformation of Dissolved Organic Carbon, Dissolved Inorganic Carbon, and CH<sub>4</sub> in a Northern Minnesota Peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 14 (4): 1095 – 1108. doi: 10.1029/1999GB001221
- Chen, H., Gao, Y.H., Yao, S.P., et al., 2008. Spatiotemporal Variation of Methane Emissions from Alpine Wetlands in Zoige Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 28(7): 3425 – 3437 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Yao, S.P., Wu, N., et al., 2008. Determinants Influencing Seasonal Variations of Methane Emissions from Alpine Wetlands in Zoigê Plateau and Their Implications. *Journal of Geophysical Research*, 113 (D12): 253 – 264. doi: 10.1029/2006JD008072
- Chu, H.S., Chen, J.Q., Gottgens, J.F., et al., 2014. Net Ecosystem Methane and Carbon Dioxide Exchanges in a Lake Erie Coastal Marsh and a Nearby Cropland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119 (5): 722 – 740. doi: 10.1002/2013JG002520
- Ding, W.X., Cai, Z.C., 2007. Methane Emission from Natural Wetlands in China: Summary of Years 1995–2004 Studies. *Pedosphere*, 17 (4): 475 – 486. doi: 10.1016/S1002-0160(07)60057-5
- Ding, W.X., Cai, Z.C., Tsuruta, H., 2004a. Diel Variation in Methane Emissions from the Stands of *Carex Lasiocarpa* and *Deyeuxia Angustifolia* in a Cool Temperate Freshwater Marsh. *Atmospheric Environment*, 38 (2): 181 – 188. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.09.066
- Ding, W.X., Cai, Z.C., Wang, D.X., 2004b. Preliminary Budget of Methane Emissions from Natural Wetlands in China. *Atmospheric Environment*, 38 (5): 751 – 759. doi: 10.1016/j.atmosenv.2003.10.016
- Ding, X.J., Liu, G.D., Huang, Z.L., et al., 2016. Controlling Function of Organic Matter Supply and Preservation on Formation of Source Rocks. *Earth Science*, 41 (5): 832 – 842 (in Chinese with English abstract).
- Du, H.N., Xie, W.X., Zhao, Q.S., et al., 2016. Characteristics of Methane Emission Fluxes in Wetlands of Dagu River Estuary in Jiaozhou Bay. *Wetland Science*, 14 (1): 44 – 49 (in Chinese with English abstract).
- Duan, X.N., Wang, X.K., Chen, L., et al., 2007. Methane Emission from Aquatic Vegetation Zones of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia. *Environmental Science*, 28 (3): 455 – 459 (in Chinese with English abstract).
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., et al., 2001. Gap Filling Strategies for Defensible Annual Sums of Net Ecosystem Exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107 (1): 43 – 69. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00225-2
- Fechner-Levy, E.J., Hemond, H.F., 1996. Trapped Methane Volume and Potential Effects on Methane Ebullition in a Northern Peatland. *Limnology and Oceanography*, 41 (7): 1375 – 1383. doi: 10.4319/lo.1996.41.7.1375
- Frenzel, P., Rudolph, J., 1998. Methane Emission from a Wetland Plant: The Role of CH<sub>4</sub> Oxidation in Eriophorum. *Plant and Soil*, 202 (1): 27 – 32. doi: 10.1023/A:1004348929219
- Gao, S.H., Zhang, X.D., Tang, Y.X., et al., 2016. Dynamics and Regulation of CH<sub>4</sub> Fluxes in a Poplar Plantation on a Floodplain. *Acta Ecologica Sinica*, 36 (18): 5912 – 5921 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Liu, G.H., Du, L.S., et al., 2016. Effects of Water Table Level and Soil Temperature on CH<sub>4</sub> Emissions in Zoigê Peatlands. *Research of Environmental Sciences*, 29(4): 516 – 521 (in Chinese with English abstract).
- Hirota, M., Senga, Y., Seike, Y., et al., 2007. Fluxes of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide in Two Contrastive Fringing Zones of Coastal Lagoon, Lake Nakau-mi, Japan. *Chemosphere*, 68(3): 597 – 603. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.01.002
- Hopfensperger, K.N., Gault, C.M., Groffman, P.M., 2009. Influence of Plant Communities and Soil Properties on Trace Gas Fluxes in Riparian Northern Hardwood Forests. *Forest Ecology and Management*, 258(9): 2076 – 2082. doi: 10.1016/j.foreco.2009.08.004
- IPCC, 2013. 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 University, Cambridge.
- Jia, Q.Y., Liu, J.M., Liang, C.H., et al., 2015. The Characteristics of CH<sub>4</sub> Concentration and Flux of the near Sur-

- face in Liaohe Delta Rice Region. *Ecology and Environmental Sciences*, 24 (5): 804—810 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. S., Wang, Y. S., Zheng, X. H., et al., 2004. Advances in the Research on Methane Emission from Paddy Fields and Its Affecting Factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 35 (5): 663—669 (in Chinese with English abstract).
- Käki, T., Ojala, A., Kankaala, P., 2001. Diel Variation in Methane Emissions from Stands of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud. and *Typha latifolia* L. in a Boreal Lake. *Aquatic Botany*, 71 (4): 259—271. doi:10.1016/s0304-3770(01)00186-3
- Kutzbach, L., Wagner, D., Pfeiffer, E. M., 2004. Effect of Microrelief and Vegetation on Methane Emission from Wet Polygonal Tundra, Lena Delta, Northern Siberia. *Biogeochemistry*, 69 (3): 341—362. doi:10.1023/b:biog.0000031053.81520.db
- Le Mer, J., Roger, P., 2001. Production, Oxidation, Emission and Consumption of Methane by Soils: A Review. *European Journal of Soil Biology*, 37 (1): 25—50. doi:10.1016/s1164-5563(01)01067-6
- Liu, D. Y., Ding, W. X., 2011. Progress on Spatial Variation of Methanogens and Their Influencing Factors in Natural Wetlands. *Scientia Geographica Sinica*, 31 (2): 136—142 (in Chinese with English abstract).
- Nakagawa, F., Yoshida, N., Nojiri, Y., et al., 2002. Production of Methane from Alases in Eastern Siberia: Implications from Its <sup>14</sup>C and Stable Isotopic Compositions. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (3): 14-1—14-15. doi:10.1029/2000gb001384
- Olson, D. M., Griffis, T. J., Noormets, A., et al., 2013. Interannual, Seasonal, and Retrospective Analysis of the Methane and Carbon Dioxide Budgets of a Temperate Peatland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118 (1): 226—238. doi:10.1002/jgrg.20031
- Rask, H., Schoenau, J., Anderson, D., 2002. Factors Influencing Methane Flux from a Boreal Forest Wetland in Saskatchewan, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 34 (4): 435—443. doi:10.1016/s0038-0717(01)00197-3
- Rinne, J., Riutta, T., Pihlatie, M., et al., 2007. Annual Cycle of Methane Emission from a Boreal Fen Measured by the Eddy Covariance Technique. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59 (3): 449—457. doi:10.1111/j.1600-0889.2007.00261.x
- Schrier-Uijl, A. P., Kroon, P. S., Hensen, A., et al., 2010. 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*, 150 (6): 825—831. doi:10.1016/j.agrformet.2009.11.007
- Schütz, H., Seiler, W., Conrad, R., 1990. Influence of Soil Temperature on Methane Emission from Rice Paddy Fields. *Biogeochemistry*, 11 (2): 77—95. doi:10.1007/bf00002060
- Shi, L. Y., Mu, C. C., Tian, X. M., et al., 2010. CH<sub>4</sub> Emission and Its Driving Factors from Different Marshes in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 30 (19): 5289—5295 (in Chinese with English abstract).
- Smeets, C. J. P. P., Holzinger, R., Vigano, I., et al., 2009. Eddy Covariance Methane Measurements at a Ponderosa Pine Plantation in California. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9 (1): 5201—5229. doi:10.5194/acpd-9-5201-2009
- Song, C. C., Wang, Y. Y., Wang, Y. S., et al., 2005. Dynamics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O Emission Fluxes from Mires during Freezing and Thawing Season. *Environmental Science*, 26 (4): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. X., Mu, C. C., Shi, L. Y., et al., 2009. Methane Emission from Forested Swamps in Xiaoxing'an Mountains, Northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33 (3): 535—545 (in Chinese with English abstract).
- Sundh, I., Mikkilä, C., Nilsson, M., et al., 1995. Potential Aerobic Methane Oxidation in a Sphagnum-Dominated Peatland—Controlling Factors and Relation to Methane Emission. *Soil Biology and Biochemistry*, 27 (6): 829—837. doi:10.1016/0038-0717(94)00222-m
- Thomas, K. L., Benstead, J., Davies, K. L., et al., 1996. Role of Wetland Plants in the Diurnal Control of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Fluxes in Peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (1): 17—23. doi:10.1016/0038-0717(95)00103-4
- Tong, C., Liu, Z. Z., Zeng, C. S., et al., 2010. Effects of Simulated Sulfate Deposition on CH<sub>4</sub> Fluxes from Tidal Wetland in the Min River Estuary. *China Environmental Science*, 30 (3): 302—308 (in Chinese with English abstract).
- Tsuyuzaki, S., Nakano, T., Kuniyoshi, S. I., et al., 2001. Methane Flux in Grassy Marshlands near Kolyma River, North-Eastern Siberia. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (10): 1419—1423. doi:10.1016/s0038-0717(01)00058-x
- Wang, D. X., Lü, X. G., Ding, W. X., et al., 2002. Comparison of Methane Emission from Marsh and Paddy Field in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 22 (4): 500—503 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Zhao, H. D., Zhang, S. Y., et al., 2012. Research on Methane Fluxes and Effect Factors in the Wetland of *Sunada glauca*. *Marine Environmental Science*, 31 (2): 173—175 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. Q., Zeng, C. S., Tong, C., et al., 2012. Stoichiometry of Carbon Dioxide and Methane Emissions in Minjiang River Estuarine Tidal Wetland. *Acta Ecologica Sinica*,

- 32(14):4396—4402(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Zhao, Z. C., Song, C. C., 2005. Methane Emission from *Carex lasiocarpa* Wetland in the Sanjiang Plain, China. *Wetland Science*, 3(1): 37—41 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. P., Han, X. G., 2005. Diurnal Variation in Methane Emissions in Relation to Plants and Environmental Variables in the Inner Mongolia Marshes. *Atmospheric Environment*, 39(34): 6295—6305. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.07.010
- Whalen, S. C., 2005. Biogeochemistry of Methane Exchange between Natural Wetlands and the Atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1): 73—94. doi: 10.1089/ees.2005.22.73
- Yang, G. F., Wu, F. D., Chen, Z. H., et al., 2015. *n*-Alkane Distribution and Their Palaeoenvironmental Implications in Fluvial-Lacustrine Sediments in Dengkou, Inner Mongolia. *Earth Science*, 40(2): 327—333 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. X., Wang, D. Q., Chen, Z. L., et al., 2007. Seasonal Variation of CH<sub>4</sub> Emission from Chongming East Intertidal Flat of Yangtze River Estuary. *Scientia Geographica Sinica*, 27(3): 408—413 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. Y., Song, C. C., Luan, Z. Q., et al., 2006. Methane Emission from Freshwater Marshes in Sanjiang Plain and Its Affecting Factors in Arid Year. *Chinese Journal of Ecology*, 25(4): 423—427 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. C., Cui, L. J., Wang, Y. F., et al., 2016. Characteristics of Methane Emission Fluxes in the Zoigê Plateau Wetland on Microtopography. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(9): 902—911 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. Y., Song, C. C., Guo, Y. D., et al., 2015. The Porewater Methane Concentration and Controlling Factors from the Peatlands in the Sanjiang Plain. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(7): 2233—2239 (in Chinese with English abstract).
- Zona, D., Janssens, I. A., Aubinet, M., et al., 2013. Fluxes of the Greenhouse Gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) above a Short-Rotation Poplar Plantation after Conversion from Agricultural Land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 100—110. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.10.008
- 附中文参考文献**
- 陈槐, 高永恒, 姚守平, 等, 2008. 若尔盖高原湿地甲烷排放的时空异质性. *生态学报*, 28(7): 3425—3437.
- 丁修建, 柳广弟, 黄志龙, 等, 2016. 有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用. *地球科学*, 41(5): 832—842.
- 杜慧娜, 谢文霞, 赵全升, 等, 2016. 胶州湾大沽河口湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量特征. *湿地科学*, 14(1): 44—49.
- 段晓男, 王效科, 陈琳, 等, 2007. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律. *环境科学*, 28(3): 455—459.
- 高升华, 张旭东, 汤玉喜, 等, 2016. 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*, 36(18): 5912—5921.
- 高燕, 刘高慧, 杜乐山, 等, 2016. 地下水位和土壤温度对若尔盖泥炭地 CH<sub>4</sub> 排放的影响. *环境科学研究*, 29(4): 516—521.
- 贾庆宇, 刘晶森, 梁成华, 等, 2015. 辽河三角洲稻区近地层 CH<sub>4</sub> 浓度与通量特征. *生态环境学报*, 24(5): 804—810.
- 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等, 2004. 稻田甲烷排放影响因素及其研究进展. *土壤通报*, 35(5): 663—669.
- 刘德燕, 丁维新, 2011. 天然湿地土壤产甲烷菌及其影响因子研究进展. *地理科学*, 31(2): 136—142.
- 石兰英, 牟长城, 田新民, 等, 2010. 小兴安岭不同沼泽甲烷排放及其影响因子. *生态学报*, 30(19): 5289—5295.
- 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等, 2005. 季节性冻融期沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放动态. *环境科学*, 26(4): 7—12.
- 孙晓新, 牟长城, 石兰英, 等, 2009. 小兴安岭森林沼泽甲烷排放及其影响因子. *植物生态学报*, 33(3): 535—545.
- 仝川, 柳铮铮, 曾从盛, 等, 2010. 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降对河口潮汐湿地甲烷排放通量的影响. *中国环境科学*, 30(3): 302—308.
- 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等, 2002. 三江平原沼泽湿地与稻田 CH<sub>4</sub> 排放对比研究. *地理科学*, 22(4): 500—503.
- 王慧, 赵化德, 张世宇, 等, 2012. 碱蓬湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量及影响因素研究. *海洋环境科学*, 31(2): 173—175.
- 王维奇, 曾从盛, 仝川, 等, 2012. 闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比. *生态学报*, 32(14): 4396—4402.
- 王毅勇, 赵志春, 宋长春, 2005. 三江平原毛果苔草湿地 CH<sub>4</sub> 排放研究. *湿地科学*, 3(1): 37—41.
- 杨桂芳, 武法东, 陈正洪, 等, 2015. 内蒙古磴口河湖相沉积物正构烷烃分布特征及其环境意义. *地球科学*, 40(2): 327—333.
- 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 等, 2007. 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*, 27(3): 408—413.
- 杨文燕, 宋长春, 栾兆擎, 等, 2006. 干旱年份三江平原沼泽甲烷(CH<sub>4</sub>) 排放及影响因子. *生态学杂志*, 25(4): 423—427.
- 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 等, 2016. 若尔盖高原湿地不同微地貌区甲烷排放通量特征. *植物生态学报*, 40(9): 902—911.
- 朱晓艳, 宋长春, 郭跃东, 等, 2015. 三江平原泥炭沼泽孔隙水甲烷浓度变化动态及其影响因子. *环境科学学报*, 35(7): 2233—2239.