

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征

龙丽¹, 肖尚斌^{1*}, 张成^{2,3}, 张文丽⁴, 谢恒⁴, 李迎晨¹, 雷丹¹, 穆晓辉¹, 张军伟¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 4. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

摘要: 为研究亚热带富营养化浅水池塘水-气界面 CH_4 释放通量特征, 以宜昌地区 5 个浅水池塘为对象, 利用静态通量箱法进行了为期一年的水-气界面 CH_4 通量监测. 结果表明, 这 5 个池塘 CH_4 的年释放量分别为 4.495、12.702、6.827、8.920、17.560 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 其中扩散通量分别为 0.075、0.087、0.118、0.086、0.151 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 冒泡通量分别为 4.420、12.616、6.709、8.834、17.409 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, CH_4 冒泡量占 CH_4 释放总量的 98% 以上, 并且 CH_4 释放量明显高于其他水域生态系统(湖泊、水库). 可见在富营养化浅水水域中, CH_4 释放量较大, 且冒泡排放是 CH_4 的主要排放方式, 而只关注扩散排放而忽略冒泡排放则会大大低估 CH_4 释放量.

关键词: 水-气界面; 甲烷; 扩散排放; 冒泡排放; 通量; 浅水池塘

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4552-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605093

Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds

LONG Li¹, XIAO Shang-bin^{1*}, ZHANG Cheng^{2,3}, ZHANG Wen-li⁴, XIE Heng⁴, LI Ying-chen¹, LEI Dan¹, MU Xiao-hui¹, ZHANG Jun-wei¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. College of Biotechnology & Pharmaceutical Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Five shallow ponds of Yichang were selected to illustrate the characteristics of methane (CH_4) in subtropical eutrophic shallow ponds. CH_4 flux across the water-air interface was quantified with static floating chamber method for one year. Annual CH_4 fluxes of the five ponds were 4.495, 12.702, 6.827, 8.920, 17.560 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ respectively. Diffusive CH_4 fluxes were 0.075, 0.087, 0.118, 0.086, 0.151 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ respectively and bubble emissions were 4.420, 12.616, 6.709, 8.834, 17.409 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ respectively. Over 98% of total CH_4 flux was bubble emission and CH_4 flux was apparently higher than other aquatic ecosystems. So the CH_4 flux of shallow waters was high and bubble emission was the dominant way. CH_4 emission would be largely underestimated if the research only focus on the diffusion discharge and ignore the bubble emission.

Key words: the water-air interface; methane; diffusion emission; bubble emission; flux; shallow ponds

甲烷(CH_4)是大气中含量仅次于二氧化碳(CO_2)的重要温室气体,在大气中虽然只有 10 a 的留存时间,但其红外吸收能力却是 CO_2 的 20~30 倍^[1~3]. 大气 CH_4 浓度在经历了 20 世纪 90 年代前后 10 多年相对稳定的时期后,2007 年以来再次开始增加,然而导致大气 CH_4 浓度变异的原因并不明了,这种不确定性也导致了应用气候模型预测未来气候变化情景的不确定性^[4,5]. 已有研究表明,湿地是最重要的大气 CH_4 源,其贡献约占全部 CH_4 释放量的 20%~40%. 湖泊、堰塘和水库面积约为地球表面的 3%,其中天然湖泊和堰塘的面积约 $4.2 \times 10^6 \text{ km}^2$,水库面积约 $2.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,农用堰塘约 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[6]. 目前, CH_4 的排放研究主要集中在海

洋、湖泊、稻田和大型水库^[7~10],很少涉及到那些面积较小、水深较浅、且自然地理特征复杂多样的浅水池塘. 而这些池塘通常因泥炭丰富具有较高的 CO_2 和 CH_4 排放量^[11,12],其在全球的面积/数量以及在全球碳循环中的重要性可能被严重低估^[6,13,14]. 如位于亚热带气候的宜昌,至 2016 年已经建成水库中大型 2 座、中型 23 座、小型 409 座,而

收稿日期: 2016-05-13; 修订日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273110); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB672); 2015 年三峡大学研究生科研创新基金项目(2015CX009); 湖北省教育厅科研计划项目(Q20151209); 湖北省自然科学基金指导性计划项目(2015CFC834)

作者简介: 龙丽(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为生态水利, E-mail: 616317325@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: shangbinx@163.com

建成堰塘多达约 8.27 万口。由于化肥在农业领域的使用,导致上个世纪全球尺度上可供初级生产利用的 N 和 P 分别增长了 2 倍和 4 倍^[15]。在 21 世纪,水体富营养化进一步扩展为全球性的问题^[16~19]。特别是在热带发展中国家更为明显^[20]。这为 CH₄ 的产生提供了更多的内源有机质。同时,水体富营养化促进了水体氧消耗和沉积物的厌氧降解^[21~22],从而有利于甲烷产生。本研究通过对宜昌地区 5 个富营养化池塘进行为期一年的 CH₄ 通量观测,通过了解浅水池塘 CH₄ 的年释放特征及其差异性,以期为系统认识

小型浅水湿地碳循环提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

这 5 个池塘位于湖北省宜昌市西陵区,属于亚热带季风性湿润气候,区内年平均降雨量为 1 100 ~ 1 300 mm,年平均日照时数为 1 538 ~ 1 883 h,年平均气温为 16.9℃^[23],水体总氮(TN)、总磷浓度(TP)分别为 2.0 ~ 3.0 mg·L⁻¹ 和 0.02 ~ 2.30 mg·L⁻¹。这 5 个池塘的自然地理特征见表 1。

表 1 观测池塘的基本自然地理属性

Table 1 Features of physical geography of five ponds

池塘编号	平均水深/m	面积/m ²	地理坐标	表观特征
1	0.6	450	30°45'43"N, 111°20'06"E	家用鱼塘,水面有生活垃圾,一年换一次水
2	1.0	200	30°45'25"N, 111°20'56"E	家用鱼塘,水体呈绿色,长年不换水
3	1.1	800	30°45'23"N, 111°20'57"E	家用鱼塘,一年换一次水
4	1.6	300	30°45'06"N, 111°21'01"E	商业性鱼塘,不换水,但会进水确保水量
5	1.2	375	30°44'54"N, 111°20'49"E	家用鱼塘,长年不换水,水面有生活垃圾

1.2 现场监测与水质分析

分别于 2014 年 11 月至 2015 年 10 月对宜昌地区 5 个池塘进行了为期一年的 CH₄ 通量原位观测实验,采样频率为每月一次,中下旬进行实验采样,每次采样从上午 09:00 左右开始,按照 1 号池塘、2 号池塘、3 号池塘、4 号池塘、5 号池塘依次进行。实验期间采用哈希多参数水质检测仪(DataSonde5, 美国)现场测定水温(T)、pH 和溶解氧,便携式气象站(YGY-QXY, 中国)现场测定风速、气温和气压,并采取表层水样两瓶(一瓶加酸保存)。将样品瓶放入恒温箱保存,野外实验结束后带回实验室放入冰箱中保存,并在一周内进行水质指标分析^[24],水质指标分析参考文献[24]。

采用密闭式静态通量箱-温室气体分析仪(DLT-100, 美国)系统观测水-气界面 CH₄ 通量。该通量箱底部中通、不透明,表层为隔热材料,以减少光线和热量对 CH₄ 的影响,体积 43.30 L,底面积 0.096 m² (直径为 0.35 m,高度为 0.45 m)。通量箱内顶部装有 2 个小风扇,以使箱体内部的气体混合均匀。DLT-100 具有高分辨率、高精度的特点,能以 1 Hz 的频率连续、实时地观测通量箱内 CH₄ 浓度。已有研究人员利用其进行了相关分析^[25~28]。本研究每个观测点的通量观测持续 15 min 左右,一个点观测完后将箱体提起让箱体内气体与外部环境气体充分交换混合,再进行下一个点的观测。每个池塘有两个不同的观测点。

1.3 计算方法

水-气界面气体交换通量是指单位时间内单位面积上气体的浓度变化量,正值表示水体向大气排放气体,负值表示水体吸收大气中的气体。当通量箱内没有气泡或者只有很少的气泡时,箱体里 CH₄ 的浓度就会随着时间的变化逐渐上升或者下降,使时间-气体浓度曲线呈现直线趋势。在这种情况下,笔者直接用 Lambert 等^[29]给出的简单线性回归方法计算气体释放速率和通量,即采用以下公式计算水-气界面温室气体通量:

$$F = k \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V \cdot A^{-1} \cdot F_3^{-1} \quad (1)$$

式中, F 为水-气界面 CH₄ 通量 [mg·(m²·h)⁻¹], k 为在观测时间内通量箱内 CH₄ 浓度随时间的变化率 (10⁻⁶·min⁻¹), F_1 为 μL·L⁻¹ 到 μg·m⁻³ 的转换系数 (CH₄ 为 655.47), F_2 为 min 与 h 的转换系数 (60), V 为通量箱在水面时箱体内部的气体体积 (m³), A 为水上部分通量箱的面积 (m²), F_3 为 μg 到 mg 的转化系数 (1 000)。

当有气泡进入箱体时,箱体内气体(主要是 CH₄)浓度就会急剧上升,利用 DLT-100 高频采样的优势,可以计算出冒泡浓度。结合图 1 说明具体方法:先对一段相对长且稳定的直线段,即 AB,进行线性拟合,得到 CH₄ 扩散浓度与时间的变化方程;再根据此方程计算观测时间末,即 C 点处 CH₄ 的扩散浓度;观测时间末 D 点处 CH₄ 的实测浓度与 C 点处拟合的 CH₄ 的扩散浓度的差值即为观测时间

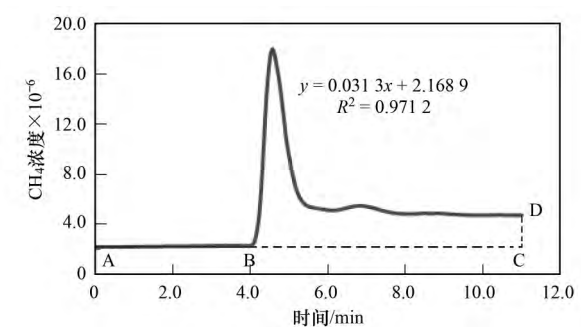


图1 有气泡进入通量箱时 CH₄ 浓度随时间变化示意
Fig. 1 Changes of CH₄ concentration with time
in the presence of bubbles

内的冒泡浓度.

2 结果与讨论

2.1 环境因子

观测期间水温最低 6.34℃ ,最高 30.90℃ ,平均水温 18.4 ~ 20.5℃ (表 2) . 水体基本处于中性或弱碱性 ,最小 pH 6.95 ,最大 pH 9.61 ,平均值 7.95 ~ 8.86 . 溶解氧变化较大 ,在 1.68 ~ 22.28 mg·L⁻¹ 之间波动 ,平均值 6.19 ~ 13.75 mg·L⁻¹ . 叶绿素 a 变化最大 ,最小 7.1 mg·m⁻³ ,最大高达 553.6 mg·m⁻³ ,均值 99.0 ~ 317.6 mg·m⁻³ . 变异系数值显

表 2 观测期间水温、pH、溶解氧和叶绿素 a 情况¹⁾

Table 2 Water temperature , pH , dissolved oxygen and chlorophyll a during the observation period

池塘编号	水温 /℃					pH				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	6.34	30.60	18.4	9.29	0.50	6.97	9.12	7.95	0.73	0.09
2	6.54	30.30	19.0	8.81	0.46	7.16	9.61	8.10	0.82	0.10
3	8.62	30.70	19.4	8.72	0.45	7.76	9.43	8.86	0.59	0.07
4	7.93	30.90	19.8	8.98	0.45	7.42	9.60	8.63	0.73	0.08
5	8.30	30.03	20.5	8.32	0.41	6.95	9.61	8.31	0.81	0.10

池塘编号	溶解氧 /mg·L ⁻¹					Chl-a /mg·m ⁻³				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	1.68	12.31	6.19	2.73	0.44	25.1	222.2	110.8	67.18	0.61
2	1.75	11.61	7.12	3.51	0.49	106.0	553.6	317.6	134.98	0.43
3	7.05	21.55	12.95	4.51	0.35	7.1	386.8	99.0	119.69	1.21
4	8.68	22.28	13.75	4.09	0.30	28.0	281.8	133.7	70.47	0.53
5	6.39	16.39	10.32	2.82	0.27	51.2	103.2	77.1	15.52	0.20

1) 表中 min 为最小值 ,max 为最大值 ,ave 为平均值 ,std 为标准偏差 ,CV 为变异系数 ,下同

示 ,一年中各观测点 pH 变化很小 ,而水温、溶解氧和叶绿素 a 的差异相对较大 ,这与季节变化有关 ,响应于地球的自转和太阳辐射.

观测期内气温、气压和风速的变化情况见表 3 ,由表可知 ,最小气温为 6.0℃ ,最高气温为 41.7℃ ,平均气温 17.7 ~ 27.2℃ (表 3) . 年内气压变化很

小 ,最小为 986.9 hPa ,最大为 1 024.2 hPa ,均值 1 002.6 ~ 1 005.5 hPa . 观测期内风速很小 ,大多数情况处于无风状态(因此变异系数较大) ,最大风速仅 0.65 m·s⁻¹ ,平均风速 0.06 ~ 0.28 m·s⁻¹ . 气温和气压的变化响应于地球的自转和公转以及太阳辐射.

表 3 观测期间主要气象因子¹⁾

Table 3 Main meteorological factors during the observation period

池塘编号	气温 /℃					气压 /hPa					风速 /m·s ⁻¹				
	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV	min	max	ave	std	CV
1	6.0	30.1	17.7	9.52	0.54	988.0	1 023.7	1 005.5	12.2	0.01	0.00	0.51	0.06	0.15	2.43
2	6.3	29.2	19.8	8.63	0.44	988.1	1 024.2	1 005.5	11.7	0.01	0.00	0.19	0.02	0.06	2.68
3	7.6	30.8	23.3	8.03	0.34	987.8	1 023.3	1 005.3	12.4	0.01	0.00	0.26	0.08	0.11	1.43
4	9.0	40.4	25.9	9.06	0.35	987.2	1 020.0	1 003.8	11.3	0.01	0.00	0.65	0.32	0.28	0.86
5	12.5	41.7	27.2	9.06	0.33	986.9	1 019.1	1 002.6	10.4	0.01	0.00	0.51	0.14	0.22	1.58

2.2 扩散通量

图 2 是 1 号池塘水-气界面 CH₄ 扩散通量年变化情况 ,2015 年 10 月 CH₄ 扩散通量值异常 ,舍去 ,因此 1 号池塘只有 11 个有效数据 . 从中可以看出 ,

观测期间 1 号池塘处于排放状态 ,排放量在 0.028 ~ 0.196 mg·(m²·h)⁻¹ 范围内变化 . 其中 2015 年 5 月和 2015 年 8 月的 CH₄ 排放量较大 ,分别为 0.196 mg·(m²·h)⁻¹ 和 0.166 mg·(m²·h)⁻¹ ,其余 9 个月

的 CH_4 排放量均在 $0.10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以下。 CH_4 是微生物在厌氧条件下分解沉积物中的有机质的产物, 而温度对微生物活性具有重要影响^[30, 31], 因此温度是决定 CH_4 产量的重要因素。 监测指标显示 2015 年 5 月和 2015 年 8 月 1 号池塘在观测期间具有较高的水温和气温, 产 CH_4 微生物的活性也相应较高。

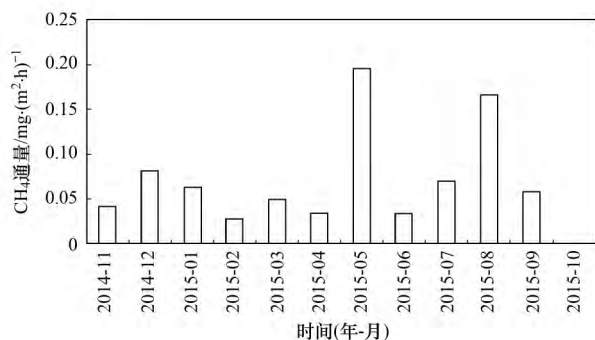


图2 1号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 2 CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 1

2 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况见图 3, 从中可以看出其 CH_4 扩散通量在 $0.011 \sim 0.222 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间变化, 均为正值, 说明在观测期间 2 号池塘处于排放状态。 2014 年 12 月 2 号池塘在观测期间的水温和气温虽然较低, 但其 CH_4 扩散通量较大, 为 $0.165 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 这是由于水面有浮游植物覆盖的原因。 1992 年的 Tucurui 水库研究中, 水面有浮游植物的区域释放的 CH_4 量是开阔水域的 1056 倍^[32]; 1995 年的 Varzea 湖研究中, 有浮游植物覆盖的水面的 CH_4 释放量是开阔水域的 3.25 倍^[33]。 2015 年 9 月 2 号池塘的 CH_4 释放量最大, 其水温和气温也较大, 并且温差(气温与水温差值的绝对值)最大。 2015 年 10 月的 CH_4 释放量最小, 但其 Chl-a 浓度最高, 达 $553.60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 Chl-a 浓度上升, 藻类光合作用强度增强, O_2 产生量增加, 水中溶解氧浓度也相应变大, 产 CH_4 微生物活性减弱, CH_4 产量减小, 对应的 CH_4 释放量也减少。

图 4 是 3 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况。 3 号池塘 2015 年 2 月换水, 2015 年 8 ~ 10 月被占用, 因此没有这 4 个月的数据。 从中可以看出 3 号池塘的 CH_4 释放量呈现先下降、后上升、再下降的趋势, 在 $0.030 \sim 0.269 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 范围内变化。 2015 年 1 月的 CH_4 释放量最小, 监测指标表明, 其气温和水温较低, 溶解氧和 Chl-a 较高。 温度较低, 产 CH_4 微生物的活性也较低, 又处于溶解氧较

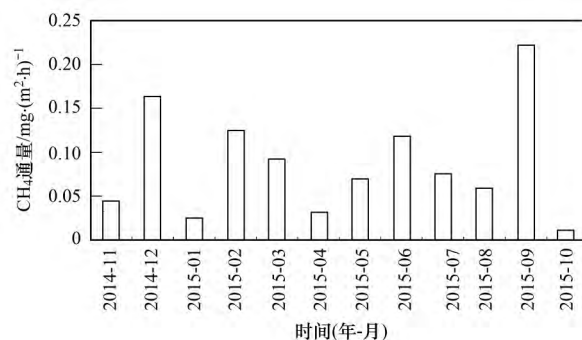


图3 2号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 3 CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 2

高的环境, CH_4 的产量就相应低。 2015 年 5 月 CH_4 的释放量最大, 环境因子分析显示对应的风速最大, 水温和气温较大。 风速较大, 水面的波动也相应较大, 而较大的水面波动会导致较大的 CH_4 释放量^[34]。

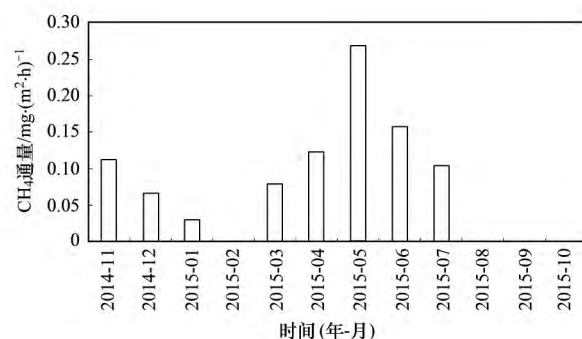


图4 3号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化

Fig. 4 CH_4 annual flux across the water-air interface of pond 3

图 5 是 4 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况。 2015 年 10 月 4 号池塘被占用, 无 CH_4 通量数据。 从中可知 4 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量的年变化范围为 $0.006 \sim 0.178 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。 2015 年 2 月的 CH_4 释放量很大, 达 $0.169 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 是因为其水面有很多浮游植物。 2015 年 4 月、7 月和 9 月的 CH_4 释放量也很大, 分别为 0.111 、 0.178 和 $0.162 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 主要是由于较高的气温和水温引起的^[35, 36]。 2015 年 8 月的 CH_4 释放量最小, 只有 $0.007 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 环境因子分析表明, 2015 年 8 月观测期间的温差最大, 且其溶解氧和 Chl-a 的浓度均较大。

图 6 是 5 号池塘水-气界面 CH_4 扩散通量年变化情况。 从中可以看出 5 号池塘水-气界面 CH_4 释放量波动较大, 在 $0.012 \sim 0.422 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间变化。 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 2015 年 2 月 5

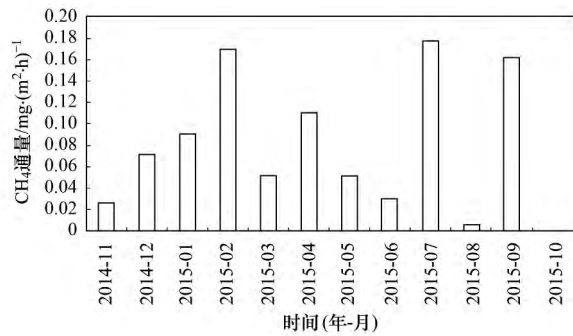


图5 4号池塘水-气界面CH₄扩散通量年变化

Fig. 5 CH₄ annual flux across the water-air interface of pond 4

号池塘的CH₄释放量很大,分别为0.381、0.262和0.422 mg·(m²·h)⁻¹,这是由于这3个月5号池塘水面覆盖了很多浮游植物. 2015年6月和2015年9月CH₄的释放量较大,分别为0.207 mg·(m²·h)⁻¹和0.193 mg·(m²·h)⁻¹,环境因子分析表明其对应的水温和气温也较高,产CH₄微生物的活性也相应较高^[37]. 较低的水温和气温导致了2014年11月5号池塘的CH₄释放量很小,只有0.124 mg·(m²·h)⁻¹. 2015年5月、7月以及10月的水温和气温虽然较高,但水体中高浓度的溶解氧和Chl-a营造了一个含氧量较高的环境,使得在厌氧环境中产生的CH₄量很少,因此这3个月的CH₄的释放量很小,不足0.024 mg·(m²·h)⁻¹.

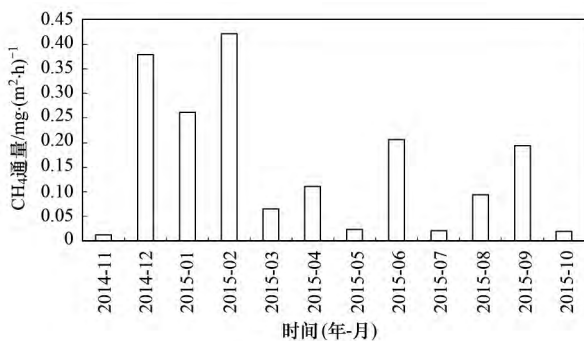


图6 5号池塘水-气界面CH₄扩散通量年变化

Fig. 6 CH₄ annual flux across the water-air interface of pond 5

2.3 冒泡通量

CH₄在水中的溶解度很小,厌氧条件下微生物分解沉积物中的有机质产生CH₄. 部分CH₄气泡在上升到水面的过程中被氧化成CO₂^[38],而在浅水区域CH₄气泡在被氧化之前就能到达水面,以气泡的方式释放到大气中. Samuel水库^[39]的研究表明,水深小于5m的水域的CH₄冒泡释放量占整个水库CH₄冒泡释放量的96.77%~97.22%. 可见浅水水

域CH₄的释放以冒泡排放为主. 在这一年中总共监测到39次明显的冒泡现象,其中1号池塘6次,2号池塘7次,3号池塘7次,4号池塘8次,5号池塘11次. 图7是一年内水-气界面CH₄冒泡总量,从中可知,观测期内CH₄冒泡总量最小的是1号池塘,为26.518 mg·(m²·h)⁻¹,最大的是5号池塘,高达156.684 mg·(m²·h)⁻¹. 4号池塘的CH₄冒泡量大约只有5号池塘CH₄冒泡量的一半,3号池塘的CH₄冒泡量是1号池塘CH₄冒泡量的1.5倍左右,5号池塘的CH₄冒泡量约是2号池塘CH₄冒泡量的2.5倍. 观测期间,单次CH₄冒泡通量最大的高达64.551 mg·(m²·h)⁻¹,最小的仅有0.005 mg·(m²·h)⁻¹,可见CH₄冒泡存在高度的差异性.

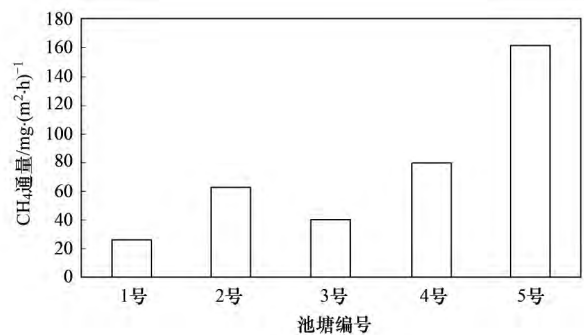


图7 CH₄冒泡通量

Fig. 7 CH₄ bubble emissions

同时,CH₄冒泡排放表现出明显的季节变化规律(图8):秋季(12月~次年2月)最大,夏季(3~5月)和春季(6~8月)次之,冬季(9~11月)最小. 秋季CH₄冒泡排放量为136.594 mg·(m²·h)⁻¹,是冬季CH₄冒泡排放量[23.147 mg·(m²·h)⁻¹]的5.90倍. 夏季和春季CH₄冒泡排放量介于两者之间,分别为121.727 mg·(m²·h)⁻¹、84.567 mg·(m²·h)⁻¹. 夏季和秋季的CH₄冒泡量很高,冬季的CH₄冒泡量很低,这是因为夏季和秋季温度较高,直接刺激产甲烷菌的活性使其趋于活跃^[35],大幅度增加了CH₄的产量,从源头上促进CH₄释放^[40];同时水温也能对气泡的形成产生影响,有研究表明^[41],水温较高的沉积物中CH₄的累积量大于扩散量,最终导致CH₄过饱和从而形成气泡.

2.4 年平均情况

表4是一年中5个池塘水-气界面CH₄释放情况. 从中可以看出,5个池塘CH₄平均扩散通量较小,在0.075~0.151 mg·(m²·h)⁻¹之间波动,低于洞庭湖、鄱阳湖水-气界面CH₄扩散通量,高于巢

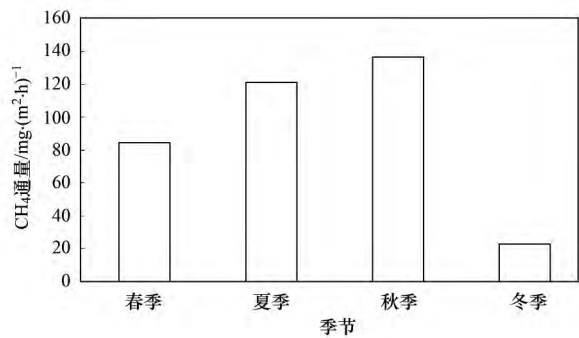


图8 CH₄ 冒泡通量季节性变化

Fig. 8 Seasonal variation of CH₄ bubble emissions

湖、洱海水-气界面 CH₄ 扩散通量^[42]. 但平均冒泡通量很大,最小的为 4.420 mg·(m²·h)⁻¹,是最大平均扩散通量的 30 倍左右,高于 Samuel 水库 [0.083 ~ 2.912 mg·(m²·h)⁻¹] 和 Tucuru 水库 [0.021 ~ 1.250 mg·(m²·h)⁻¹]^[39] 的 CH₄ 冒泡释放量. 1 号池塘 CH₄ 的扩散通量较小,其冒泡通量也较小,但 2 号池塘的 CH₄ 扩散通量小,而冒泡通量却较大,可见 CH₄ 扩散通量与冒泡通量之间没有必然的联系. CH₄ 释放总量都很大,最大的高达 17.560 mg·(m²·h)⁻¹,最小的也有 4.495 mg·(m²·h)⁻¹,远远高于鄱阳湖星子湿地的 CH₄ 释放量,同时这在一定程度上说明了不同的浅水池塘在 CH₄ 释放量上存在着较大的差异. 5 个池塘 CH₄ 冒泡通量均占 CH₄ 总通量的 98% 以上,有的甚至高达 99.31%,说明在浅水水体中,CH₄ 主要以冒泡排放方式进入大气.

表 4 水-气界面 CH₄ 年释放情况 /mg·(m²·h)⁻¹

Table 4 CH ₄ annual flux across the water-air interface /mg·(m ² ·h) ⁻¹			
池塘编号	平均扩散通量	平均冒泡通量	总通量
1	0.075	4.420	4.495
2	0.087	12.616	12.702
3	0.118	6.709	6.827
4	0.086	8.834	8.920
5	0.151	17.409	17.560

为了能够与其他淡水水域进行比较,本研究统计了一些不同淡水水域 CH₄ 释放通量的基本情况(如表 5). 从表 5 中可以看出,美国 Olentangy 湿地的 CH₄ 释放量较大,年排放量达 7.76 ~ 13.01 mg·(m²·h)⁻¹(植被湿地具有较高的累积生产力),但仍然小于本文研究区域的 CH₄ 释放量. 长江口盐沼泽地、闽江河口湿地、洞庭湖、三峡水库巴东段以及国外一些湖泊、水库的 CH₄ 释放量明显低于本

研究区域,并且洞庭湖、洱海和美国西部的 Shasta 水库还是 CH₄ 的部分汇. 长春市城市湖泊的 CH₄ 释放量变化范围较大,为 0.05 ~ 7.29 mg·(m²·h)⁻¹,相差 7.24 mg·(m²·h)⁻¹,同时长春市城市湖泊也属于浅水水域,并且部分也是富营养化水体. 这些都直接或间接说明了浅水池塘具有较高的 CH₄ 释放量.

表 5 不同淡水水域 CH₄ 释放通量^[42-50]

Table 5 CH ₄ flux of different fresh waters	
研究区域	CH ₄ 释放通量 /mg·(m ² ·h) ⁻¹
长春市城市湖泊	0.05 ~ 7.29
Olentangy 湿地(美国)	7.76 ~ 13.01
长江口盐沼泽地	0.96 ~ 3.80
闽江河口湿地	0.16 ~ 0.91
滇池	0.10 ~ 0.20
洞庭湖	-0.91 ~ 0.92
鄱阳湖	0.52 ~ 1.12
巢湖	0.01 ~ 0.04
洱海	-0.28 ~ 0.15
南四湖	0.01 ~ 0.07
三峡水库巴东段	0.01 ~ 0.23
F. D. Roosevelt 水库	0.07 ~ 0.34
Dworshak 水库	0.03 ~ 0.62
Wallula 水库	0.15 ~ 0.71
Shasta 水库	-0.06 ~ 1.22
Oroville 水库	0.05 ~ 0.44
New Melones 水库	0.11 ~ 0.85
Petit Saut 水库(法属圭亚那)	0.24 ~ 0.52
Mistumis 湖泊加拿大	0.024 ~ 0.033
Clarkie 湖泊	0.01 ~ 0.02
富营养化浅水池塘	4.50 ~ 17.56

3 结论

(1) 宜昌地区这 5 个浅水池塘的 CH₄ 均处于排放状态,且冒泡通量很大.

(2) 在浅水水域中,冒泡排放对释放量有着决定性作用,忽略 CH₄ 的冒泡排放会造成 CH₄ 释放量的严重低估. 本实验中 CH₄ 单次最大冒泡通量高达 64.55 mg·(m²·h)⁻¹,CH₄ 冒泡量占 CH₄ 释放总量的 98.98%.

(3) CH₄ 冒泡排放在时间和空间上都存在着很大的差异,探讨其规律需要全方位、长时间的观测研究,即在不同水深、靠近岸边和远离岸边的地方进行长时间观测研究.

参考文献:

[1] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(1): 25-50.

[2] DelSontro T, McGinnis D F, Sobek S, et al. Extreme methane emissions from a swiss hydropower reservoir: contribution from

- bubbling sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2419–2425.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. *Science*, 1990, **248**(4960): 1217–1219.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al* (Eds.). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Stocker B D, Roth R, Joos F, *et al*. Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios [J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(7): 666–672.
- [6] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, *et al*. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2388–2397.
- [7] 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 等. 春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2565–2573.
Cao X P, Zhang G L, Ma X, *et al*. Distribution and air-sea fluxes of methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the spring [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2565–2573.
- [8] 邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 等. 运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 359–365.
Deng H, Cai L C, Jiang Y B, *et al*. Application of microbial fuel cells in reducing methane emission from rice paddy [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 359–365.
- [9] 谢燕, 陈曦, 胡正华, 等. 短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1499–1506.
Xie Y, Chen X, Hu Z H, *et al*. Effects of short-time conservation tillage managements on greenhouse gases emissions from soybean-winter wheat rotation system [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1499–1506.
- [10] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1880–1890.
Guo S F, Qi Y C, Yin F H, *et al*. Effect of irrigation patterns on soil CO₂ and N₂O emissions from winter wheat field in North China plain [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1880–1890.
- [11] Repo M E, Huttunen J T, Naumov A V, *et al*. Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia [J]. *Tellus B*, 2007, **59**(5): 788–796.
- [12] Riera J L, Schindler J E, Kratz T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U. S. A. [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **56**(2): 265–274.
- [13] Kortelainen P, Rantakari M, Huttunen J T, *et al*. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(8): 1554–1567.
- [14] Bastviken D, Cole J J, Pace M L, *et al*. Fates of methane from different lake habitats: connecting whole-lake budgets and CH₄ emissions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(G2): G02024.
- [15] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, *et al*. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. *Science*, 2000, **290**(5490): 291–296.
- [16] Jin X C, Xu Q J, Huang C Z. Current status and future tendency of lake eutrophication in China [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, **48**(S2): 948–954.
- [17] Davis J R, Koop K. Eutrophication in Australian rivers, reservoirs and estuaries – A Southern hemisphere perspective on the science and its implications [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **559**(1): 23–76.
- [18] von Sperling E, da Silva Ferreira A C, Gomes L N L. Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth [J]. *Desalination*, 2008, **226**(1–3): 169–174.
- [19] Yang J, Yu X Q, Liu L M, *et al*. Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(5): 1432–1442.
- [20] Von Sperling E, Souza A D. Long-term monitoring and proposed diffuse pollution control of a tropical reservoir [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(3): 161–166.
- [21] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al*. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(3): 609–621.
- [22] 侯翠翠, 张芳, 李英臣, 等. 卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1891–1899.
Hou C C, Zhang F, Li Y C, *et al*. Characteristics of dissolved CH₄ and N₂O concentrations of Weihe River in Xinxiang section in spring [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1891–1899.
- [23] 王庆礼, 邓红兵, 郝占庆, 等. 梅子垭旅游资源评价及开发、保护规划研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 1998, **7**(4): 347–352.
Wang Q L, Deng H B, Hao Z Q, *et al*. A preliminary study on evaluation and planning for the development and conservation of tourist resources in meiziya area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1998, **7**(4): 347–352.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. (4th ed.) Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [25] Xiao S B, Liu D F, Wang Y C, *et al*. Temporal variation of methane flux from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 2500.
- [26] Xiao S B, Wang Y C, Liu D F, *et al*. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(10): 2065–2071.
- [27] Herbst M, Friborg T, Ringgaard R, *et al*. Interpreting the variations in atmospheric methane fluxes observed above a restored wetland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(7): 841–853.
- [28] Schrott M H, Eugster W, Gómez K E, *et al*. Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil [J]. *Waste Management*, 2012, **32**(5): 879–889.
- [29] Lambert M, Fréchette J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural

- water bodies [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, *et al* (Eds.). *Greenhouse Gas Emissions—Fluxes and Processes* [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 37–60.
- [30] 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云. 产甲烷微生物研究概况 [J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 2025–2030.
- Li Y S, Li Y M, Ouyang Z Y. A research overview of methanogens [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 2025–2030.
- [31] 赵静, 张桂玲, 吴莹, 等. 长江中溶存甲烷的分布与释放 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 18–25.
- Zhao J, Zhang G L, Wu Y, *et al*. Distribution and emission of methane from the Changjiang [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 18–25.
- [32] Rosa L P, Schaeffer R, dos Santos M A. Emissões de metano e dióxido de carbono de hidrelétricas na Amazônia comparadas às termelétricas equivalentes [J]. *Cadernos de Energia*, 1996, **9**: 109–157.
- [33] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of ‘Greenhouse’ Gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, **22**(1): 7–19.
- [34] Keller M, Stallard R F. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(D4): 8307–8319.
- [35] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素 [J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2377–2384.
- Zhao X J, Zhao T Q, Zheng H, *et al*. Greenhouse gas emission from reservoir and its influence factors [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2377–2384.
- [36] 李亨东. 亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 [J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1133–1140.
- Shen L D. Research progress on microbial properties of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidising bacteria [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1133–1140.
- [37] 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 等. 九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 558–564.
- Guo Y Y, Chen J, Yin X J, *et al*. Spatial distribution of methane in surface water and sediment of Jiulongjiang estuary and the effect environment factors of it [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 558–564.
- [38] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1471–1475.
- Wang L, Xiao S B, Liu D F, *et al*. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1471–1475.
- [39] Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, *et al*. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(7): 1443–1450.
- [40] Jerman V, Metje M, Mandić-Mulec I, *et al*. Wetland restoration and methanogenesis: the activity of microbial populations and competition for substrates at different temperatures [J]. *Biogeosciences*, 2009, **6**(6): 1127–1138.
- [41] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, *et al*. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate [J]. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766–775.
- [42] 陈永根, 白晓华, 李香华, 等. 中国 8 大湖泊冬季水-气界面甲烷通量初步研究 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 11–17.
- Chen Y G, Bai X H, Li X H, *et al*. A primary study of the methane flux on the water-air interface of eight lakes in winter, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(1): 11–17.
- [43] 温志丹, 宋开山, 赵莹, 等. 长春市水体夏秋季温室气体排放特征 [J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 102–111.
- Wen Z D, Song K S, Zhao Y, *et al*. Seasonal variability of greenhouse gas emissions in the Urban Lakes in Changchun, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 102–111.
- [44] 沙晨燕. 美国俄亥俄州人工河滨湿地甲烷排放 [J]. 生态学杂志, 2011, **30**(11): 2456–2464.
- Sha C Y. Methane emission from riparian constructed wetland in Ohio, USA [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(11): 2456–2464.
- [45] 李杨杰, 陈振楼, 王东启, 等. 长江口盐沼带湿地生态演替过程中甲烷排放研究 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 2035–2042.
- Li Y J, Chen Z L, Wang D Q, *et al*. Methane emission in the process of wetland vegetation succession in salt marsh of Yangtze River estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(8): 2035–2042.
- [46] 曾从盛, 王维奇, 张林海, 等. 闽江河口短叶茳芰潮汐湿地甲烷排放通量 [J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 500–504.
- Zeng C S, Wang W Q, Zhang L H, *et al*. Methane fluxes of *Cyperus malaccensis* tidal wetland in Minjiang River estuary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(2): 500–504.
- [47] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, *et al*. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(3), doi: 10.1029/2003GB002197.
- [48] Abril G, Guérin F, Richard S, *et al*. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, **19**(4), doi: 10.1029/2005GB002457.
- [49] Demarty M, Bastien J, Tremblay A. Carbon dioxide and methane annual emissions from two boreal reservoirs and nearby lakes in Quebec, Canada [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2009, **6**(2): 2939–2963.
- [50] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 1219–1230.