

三峡水库澎溪河 CO₂、CH₄ 气泡释放通量初探*

李 哲^{1,3}, 张 呈², 刘 靛², 郭劲松¹, 方 芳², 陈永柏³

(1: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 重庆 400030)

(2: 重庆大学城市建设与环境工程学院 重庆 400044)

(3: 中国长江三峡集团公司 北京 100038)

摘 要: 气泡释放是天然水体中水-气交换的重要途径之一. 采用改进的倒置漏斗型气泡通量监测装置于 2012 年 3—8 月期间对三峡支流澎溪河高阳平湖库湾水域进行气泡释放通量的监测研究. 研究期间, 研究水域 CH₄ 气泡释放通量变化范围为 0.01 ~ 23288.64 μmol/(m² · d); CO₂ 气泡释放通量变化范围为 0 ~ 799.89 μmol/(m² · d). 不同常规采样点 CH₄、CO₂ 气泡释放通量均呈现出高度的时空异质性特征. 但 CH₄ 气泡释放通量显著高于 CO₂ 气泡释放通量, 且二者释放过程具有同步性. 同国外已有水库监测结果相比, 澎溪河回水区高阳平湖库湾水域 CH₄、CO₂ 气泡释放通量位于中等水平. CH₄ 气泡释放通量约为同期 CH₄ 扩散通量的 0 ~ 1893.90%, 超量释放下 CH₄ 气泡释放通量可达同水域 CH₄ 扩散通量的 6270.5% ± 390.0%. CO₂ 气泡释放通量仅占同期扩散通量绝对值的 0 ~ 21.74‰, 超量释放下 CO₂ 气泡释放通量亦仅为同期扩散通量绝对值的 40.33‰ ± 0.93‰. CH₄ 气泡释放通量在支流库湾水域对总通量的贡献不可忽视.

关键词: 三峡水库; 澎溪河; 高阳平湖; CO₂; CH₄; 气泡释放通量

Ebullition fluxes of CO₂ and CH₄ in Pengxi River, Three Gorges Reservoir

LI Zhe^{1,3}, ZHANG Cheng², LIU Liang², GUO Jinsong¹, FANG Fang² & CHEN Yongbo³

(1: *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400030, P. R. China*)

(2: *Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China*)

(3: *China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P. R. China*)

Abstract: Ebullitions of CH₄ and CO₂ from sediments to water surface are one of the critical pathways of greenhouse gas emission in natural water bodies. Modified gas collecting funnels were applied to collect CH₄ and CO₂ ebullition and estimate their emission fluxes at an embayment in Lake Gaoyang, Pengxi River, in the Three Gorges Reservoir. From March to August, 2012, ebullition emission fluxes of CH₄ were 0.01–23288.64 μmol/(m² · d), while that of CO₂ were 0–799.89 μmol/(m² · d). Significant spatial-temporal heterogeneities were detected. Generally, ebullition emission fluxes of CH₄ were much higher than that of CO₂. Correlation analysis indicated that ebullition emissions of both CH₄ and CO₂ were simultaneously. Comparing with the global datasets, CH₄ and CO₂ ebullition emission fluxes in this area were in the middle level. Comparing with the air-water diffusive fluxes monitored simultaneously, CH₄ ebullition fluxes were about 0–1893.90% of those of diffusive fluxes. In excess ebullition situation, this ratio could go up to 6270.5% ± 390.0%; CO₂ ebullition fluxes about 0–21.74‰ and up to 40.33‰ ± 0.93‰. It can be concluded that CH₄ ebullition fluxes should not be neglected in evaluation of the total emission fluxes in this area.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; Lake Gaoyang; CO₂; CH₄; ebullition fluxes

气泡是自然水体中各种气态物质向大气传输的 2 种主要方式之一(另一种方式为扩散)^[1]. 天然水域中, 形成于水底(河底、湖底)的气态物质(如 CO₂、CH₄、H₂S 等)在特定的物理化学条件下聚集成微小气泡黏附在水底的土壤或底泥颗粒表面, 并在适宜条件下(如水力扰动、温度升高等)从底质土壤颗粒表面脱附, 在

* 国家自然科学基金项目(51179215)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-14)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2014ZX07104-006-02)联合资助. 2013-08-28 收稿; 2013-11-21 收修改稿. 李哲(1981~), 男, 博士, 副教授; E-mail: zheli81@sina.com.

上升过程中逐渐聚集成较大气泡,至水面后破裂,所携带气体释放入大气。水体中气泡的形成、上升与释放过程十分复杂,不仅同水体底泥有机质元素组成、含量、所处的酸碱与氧化还原环境水下地形条件、底质孔隙率高低等方面密切相关,也易受到产气水域静水压力、水流速度与方向、水生生物活动的影响^[2]。同时,水面的气象条件,如气压、温度、风速等亦显著干扰气泡释放过程^[3]。根据已有野外研究经验,当水温较高且底泥有机质含量较丰富、水深较浅(≤ 10 m)的缓流水域易形成气泡释放现象^[4-5]。尽管如此,同气体在水-气界面间相对均质的扩散交换相比,天然水域中气泡形成、上浮与释放的时间、空间等均具有显著的异质性和不确定性。

长期以来,水生生态系统同大气间气体交换通常采用浮箱法(静态箱)进行现场监测^[6-7]。但浮箱法难以满足气泡释放通量的监测要求。浮箱法通过监测箱体内气体定长时间的变化斜率推求气体扩散通量,气泡瞬时释放将导致气体浓度出现瞬时陡变,严重干扰浮箱内的稳态环境^[3]。即便是存在连续气泡释放使得浮箱内气体浓度与时间呈线性关系,但在气泡释放与水-气界面间气体扩散交换同步的情况下,浮箱法所获结果依然难以明晰二者大小和实际贡献。不仅如此,由于气泡释放的时间、空间通常无法准确预测,在有限时间内(如数十分钟)使用浮箱监测气泡通量的方案并不现实。近年来,有关全球气候变化的研究方兴未艾^[8-9]。国内目前已有不少研究对水生生态系统(湖泊、水库等)温室气体(CO_2 、 CH_4 等)通量特征进行观测,获得了宝贵的研究成果^[10-13]。但作为天然水体水-气界面间重要的温室气体释放途径之一,特定水生生态系统背景下温室气体的气泡释放通量特征仍鲜有报道。

三峡水库成库后,淹没陆地与水生生态系统演变潜在的温室气体效应是近年来国内外关注的焦点^[11-13]。前期研究已充分掌握了三峡水库温室气体扩散通量特征,但对其气泡释放通量并不明确。国外有研究发现,在亚热带或热带的浅水水库中,气泡释放的温室气体可占水库温室气体释放总量的约10%~86%^[14]。尽管三峡水库典型的峡谷河道型特征使其具有较优的流动性、较少的淹没面积,加之其成库前系统的清库工作,使得三峡水库在宏观上不太可能出现温室气体大面积气泡释放的格局,但在对三峡水库或其局部水域进行碳路径核算与计量中,气泡释放过程依然不可忽视。本文尝试设计1种针对三峡水库支流水域特征的 CO_2 、 CH_4 气泡释放通量监测方法,并对三峡水库支流澎溪河高阳平湖水域开展气泡释放通量监测,并与同期该水域水-气界面间扩散通量、国外水库相关研究成果相比较,初步探讨三峡水库典型水域的气泡释放特征。

1 材料与方法

1.1 气泡释放监测方法设计

气泡释放监测,国际上常用的方法是使用圆锥形倒置漏斗状的气泡收集装置^[15],垂直布设于水面下,收集装置顶端开孔,连接到充满水且固定在装置顶端的气体收集器上(通常为小型针筒或集气瓶)。一定持续时间内,水底产生气泡进入漏斗并逐渐汇集至顶端的气体收集器中,通过监测所收集气泡体积和浓度计算漏斗收集面积范围内的气泡通量(图1),但在实际使用中易出现以下问题:

1) 倒置漏斗通常采用软性PVC/PU材质帆布缝制而成,易产生褶皱,易使气泡在这些部位局部黏附、累积,阻滞其迅速汇集至顶层的气泡收集器中;长期放置容易使其内外壁大量生长附着性藻类或真菌,干扰了气泡沿装置内壁向上汇集,且不易清洗;静水压力易使软性材质出现干瘪、变形,影响装置收放和取气。

2) 传统方法是将前述装置用锚固定于水底,在水面设置浮标。该方法仅适宜于静水条件。当出现水位较大涨落时(水库调蓄时),易出现装置跑位或淹没浮标而出现无法收集等情况;当出现流速较大时(洪峰通过时),则易出现装置“翻斗”等现象^[15]。

针对上述问题,本文改进了目前常用的气泡收集与监测方法,装置见图2。所采用的倒置漏斗由金属薄皮材料(马口铁)制作,在接缝处进行焊接密封,敞口部为镀锌钢圈包裹在金属薄皮材料内。倒置漏斗顶部设有开口向下的集气瓶和浮标,集气瓶通过瓶口的瓶塞设有进气管和排水管,进气管穿过瓶塞进入集气瓶底部,另一端用导气软管(硅胶管)同倒置漏斗顶部焊接的管状连接头紧密相连,并同倒置漏斗内部相通。倒置漏斗内壁、镀锌钢圈外表面和管状连接头内壁均有高分子涂层防锈。倒置漏斗敞口部外缘对称焊有用于固定连接配重吊坠的绳子的钢扣;倒置漏斗顶部外缘对称焊有用于固定连接浮标的绳子的钢扣;在倒置漏斗

外壁上对称焊有把手.



图 1 国外通常采用的水下气泡收集装置

Fig. 1 Ebullition-collecting funnel applied in current research

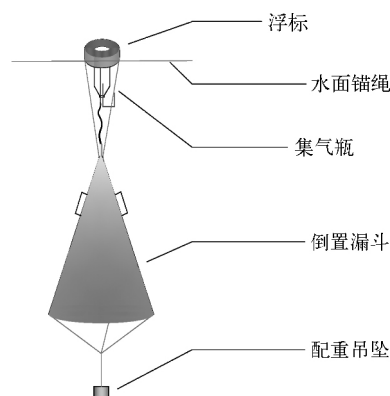


图 2 改进的气泡收集装置示意图

Fig. 2 Sketch map of modified ebullition-collecting funnel

野外作业中,将前述水下气泡收集装置安放于预选的水域中,浮标系于水面锚绳上,倒置漏斗在配重吊坠作用下淹没于水中,水面锚绳一端固定于岸边,另一端固定于航道浮标或对岸.根据实际气泡收集的需要,水下气泡收集装置可以有若干套,分别通过各自的浮标系在水面锚绳上.在预先设定的监测周期完毕后,仅需将集气瓶在水下旋盖密封后自然取出,测量集气瓶内气体收集的体积和气体浓度.

1.2 研究区域与监测方案

澎溪河(又称“小江”)是三峡库区中段长江北岸一级支流,流域面积 5172.5 km^2 ,干流全长 182.4 km ,坝前 145 m 下回水区全长约 60 km .其中,高阳平湖是澎溪河 145 m 回水区中段水域面积在 $4 \sim 5 \text{ km}^2$ (水位 145 m) 的开阔水域(图 3).湖沼特征近似于过水型湖泊.在三峡水库季节性水位涨落下呈现“浅水湖泊↔深水湖泊”的交替特征.该水域淹没区曾为大面积旱地和经果林,有机质含量丰富.野外观测发现,自入春开始局部水域和库湾存在气泡释放现象.综合考查后选取高阳平湖李家坝处库湾开展气泡监测.监测时间为 2012 年 3—8 月,采样周期为每月 1 次,于当月下旬采样,每次采样持续 1 周.

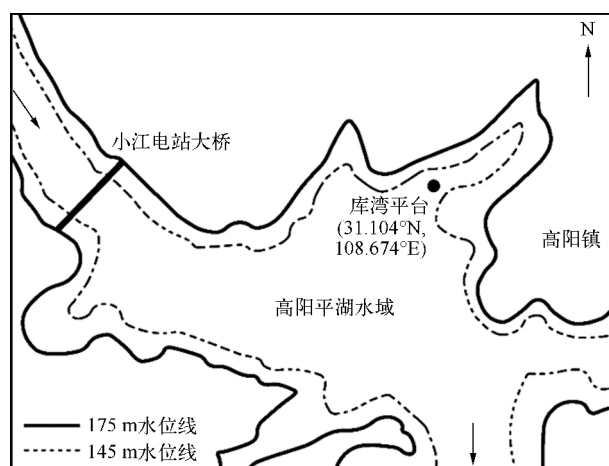


图 3 澎溪河高阳平湖水域及其库湾示意图

Fig. 3 Sketch map of sampling estuary in the Lake Gaoyang, Pengxi River

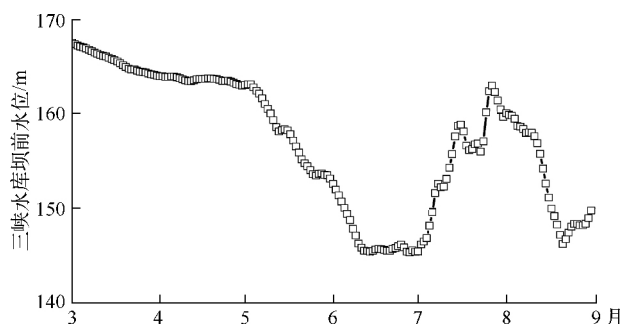


图4 2012年3—8月三峡水库坝前水位日变化

Fig. 4 Daily variation of water level at dam site of Three Gorges Reservoir from March to August in 2012

受三峡水库运行的影响,研究水域水位从170 m逐渐下降至145 m,并受洪峰过程影响而在低水位运行期间陡涨陡落(图4)。根据前述设计,改进的倒置漏斗敞口直径为750 mm、高为1000 mm,集气瓶容积2 L,倒置漏斗敞口部分设置有配重10 kg吊坠。水面锚绳一端固定于岸边175 m水位线以上,另一端固定于位于库湾湖心的野外实验平台(平台处水下高程约为138 m)。4个气泡收集装置由浅至深地拴于水面锚绳下方(图5),装置下部敞口处水深约1.5 m。2012年3月,监测初期三峡水库坝前水位165 m时,4个常规

采样点(以下简称“常规点”)所在处垂向对应水深分别为3、5、8、10 m。随着坝前水位下降至145 m,每月开展监测前预先调整4个常规点所处水平位置,确保其所在处对应水深自近岸处往湖心依次递增。另外,2012年5月野外监测期间,发现临近湖心野外实验平台处出现超量气泡释放现象,故在该处增加气泡收集装置进行气泡收集监测。倒置漏斗装置设置方式同上。

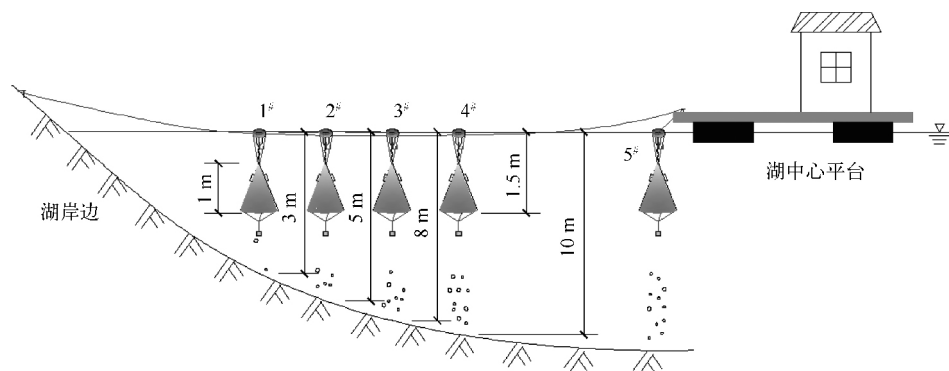


图5 高阳平湖库湾气泡收集装置布置示意图

Fig. 5 Sketch of ebullition collecting funnels for collecting bubbles at the sampling estuary in Lake Gaoyang

气泡收集期间,为避免收集气泡过多而重新溶于水中,采气时间间隔为24 h并在现场完成气泡体积测定。收集的气体用针筒注入铝箔采气袋保存,48 h内使用Agilent GC 7820气相色谱仪完成 CH_4 和 CO_2 气泡浓度分析测定。具体方法参考文献[16]。

气泡释放通量计算公式为:

$$F_b = 1000C \cdot V / (S \cdot T) \quad (1)$$

式中 F_b 为气泡释放通量($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), C 为气泡浓度($\mu\text{mol}/\text{L}$), V 为气泡收集的体积(m^3), S 为倒置漏斗底面积(m^2), T 为采样间隔时间(d),1000为单位转化系数。

为进一步比较气泡释放通量与水-气界面间扩散通量的差别,于相同水域开展浮箱法监测,所使用浮箱监测装置与方法参考文献[16]。为确保浮箱法监测结果为水-气界面间扩散通量,避免同区域气泡释放对浮箱法的干扰,采用以下2个技术措施:

- 1) 现场观察水面气泡释放情况,确保在无明显气泡释放的状态下,浮箱法采气全程时间为10 min,采样间隔2 min,每个采样点共取气6次。采样时用针筒抽取采样箱内气体100 ml,注入铝箔采气袋后保存。
- 2) 浮箱法通过测定气样浓度变化斜率计算水-气界面的气体交换通量,要求气体浓度变化的线性相关

系数 R^2 均大于 0.95, 以确保浮箱内收集气体过程中无气泡释放干扰.

研究期间, 三峡水库坝前水位数据来自于中国长江三峡集团公司网站(<http://www.ctgpc.com.cn/>).

2 结果与讨论

2.1 常规点气泡收集体积与浓度变化

2012 年 3—8 月 4 个常规点累积收集气泡 12.1 L. 3—5 月常规点气泡收集总体积处于较低水平, 分别为 1150.4、530.2、1290.0 ml. 4 月最低. 进入 6 月气泡释放量突然增加, 收集体积在 6、7 月间出现峰值, 均超过 4000 ml. 8 月气泡收集体积有所下降, 气泡收集总体积仅为 774.4 ml(图 6a). 对各常规点气泡收集总体积数据序列的方差分析显示, 各常规点气泡收集体积并无显著的空间差异(显著性水平 $sig. = 0.07 > 0.05$), 大体上 1[#]~3[#] 常规点气泡收集体积随水深越深而逐渐下降, 但在水深较深的 4[#] 常规点在 3—8 月气泡收集体积日均值为 235.1 ± 61.1 ml, 高于其它 3 个常规点; 其变化范围为 62.4~3405.0 ml, 变幅亦在各常规点中最大. 以变异系数(CV 值) 作为评价数据间离散程度的指标, 各常规点逐月数据序列的 CV 值逐月增加趋势明显, 峰值出现在 8 月, CV 值达 1.55, 各常规点空间差异有显著增加的趋势(图 6b).

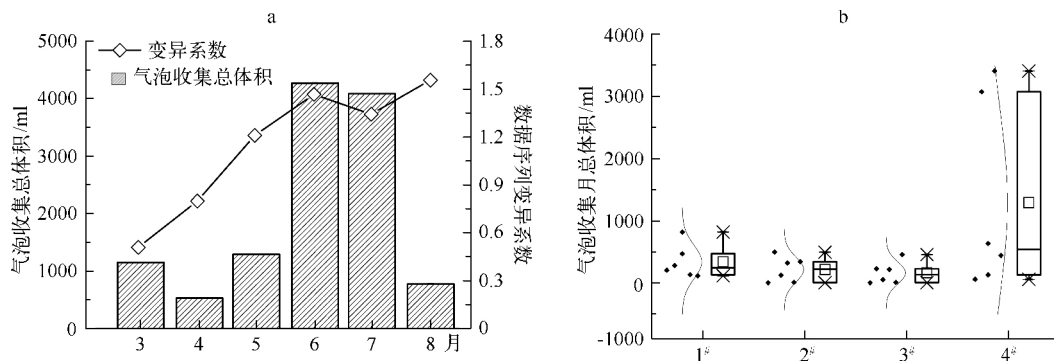


图 6 研究期间常规点气泡收集体积逐月变化(a) 和空间变化(b)

Fig. 6 Monthly changes(a) and spatial changes(b) of ebullition collecting volumes at each steady site during the research

研究期间, 所收集气泡中 CH₄ 浓度变化范围为 0~33224.6 $\mu\text{mol/L}$, CO₂ 浓度变化范围为 0~2055.4 $\mu\text{mol/L}$, 变幅较大. 各常规点 CO₂、CH₄ 浓度亦具有显著的时空变化特征. 从逐月 CO₂、CH₄ 浓度均值可以看出(图 7), CH₄ 逐月变化特征同前述气泡收集体积接近, 5、6 月气泡中的 CH₄ 浓度达到峰值, 期间气泡 CH₄ 峰值

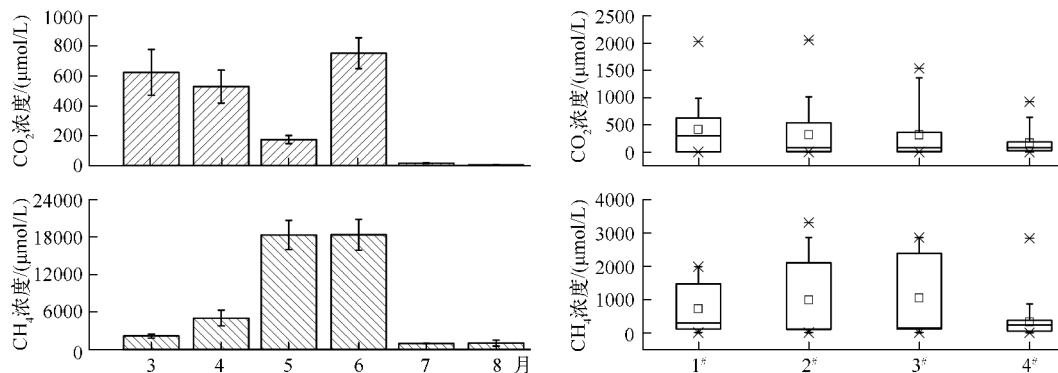


图 7 研究期间常规点气泡 CH₄、CO₂ 浓度逐月变化和空间变化

Fig. 7 Monthly and spatial changes of CH₄ and CO₂ concentrations in bubbles at each steady site during the research

浓度均超过 $28000 \mu\text{mol/L}$; 在 7、8 月期间, 气泡中 CH_4 浓度迅速下降, 变化范围仅为 $5.3 \sim 4767.2 \mu\text{mol/L}$. CO_2 逐月浓度变化同 CH_4 浓度变化有显著差别. 尽管气泡 CO_2 浓度峰值亦出现在 6 月, 期间各常规点 CO_2 浓度均值为 $750.7 \pm 103.1 \mu\text{mol/L}$. 但 3—5 月, 气泡内 CO_2 浓度则呈显著下降趋势. 3 月常规点 CO_2 浓度均值达 $622.4 \pm 153.1 \mu\text{mol/L}$, 变化范围为 $81.8 \sim 2055.4 \mu\text{mol/L}$, 但 5 月常规点 CO_2 浓度均值则显著下降至 $174.5 \pm 27.4 \mu\text{mol/L}$. 7—8 月期间, 气泡 CO_2 浓度亦显著下降, 至 8 月常规点 CO_2 浓度均值仅为 $4.9 \pm 2.2 \mu\text{mol/L}$. 各常规点间数据序列方差分析结果显示(图 7), 常规点间 CH_4 浓度存在显著差异 ($\text{sig.} = 0.038 \leq 0.05$), 但 CO_2 浓度空间差异无统计意义 ($\text{sig.} = 0.138 > 0.05$). 其中 2[#]、3[#] 常规点气泡 CH_4 浓度显著高于 4[#] 常规点.

2.2 常规点气泡释放通量

根据前述气泡收集体积与 CO_2 、 CH_4 浓度结合装置尺寸大小, 气泡释放通量结果见图 8 相应统计结果见表 1. 研究期间, 该水域 CH_4 气泡通量均值为 $363.9 \pm 152.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 变化范围为 $0.01 \sim 17951.9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 最大值出现在 2012 年 6 月的 4[#] 常规点; CO_2 气泡通量均值为 $11.1 \pm 1.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 变化范围为 $0 \sim 119.1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 最大值出现在 2012 年 6 月的 2[#] 常规点. CH_4 气泡通量显著高于 CO_2 气泡通量. 对全部数据序列的 Spearman 相关性分析发现, CH_4 气泡通量与 CO_2 气泡通量呈显著正相关 ($r = 0.796$, $\text{sig.} \leq 0.01$), 说明二者释放过程具有同步性.

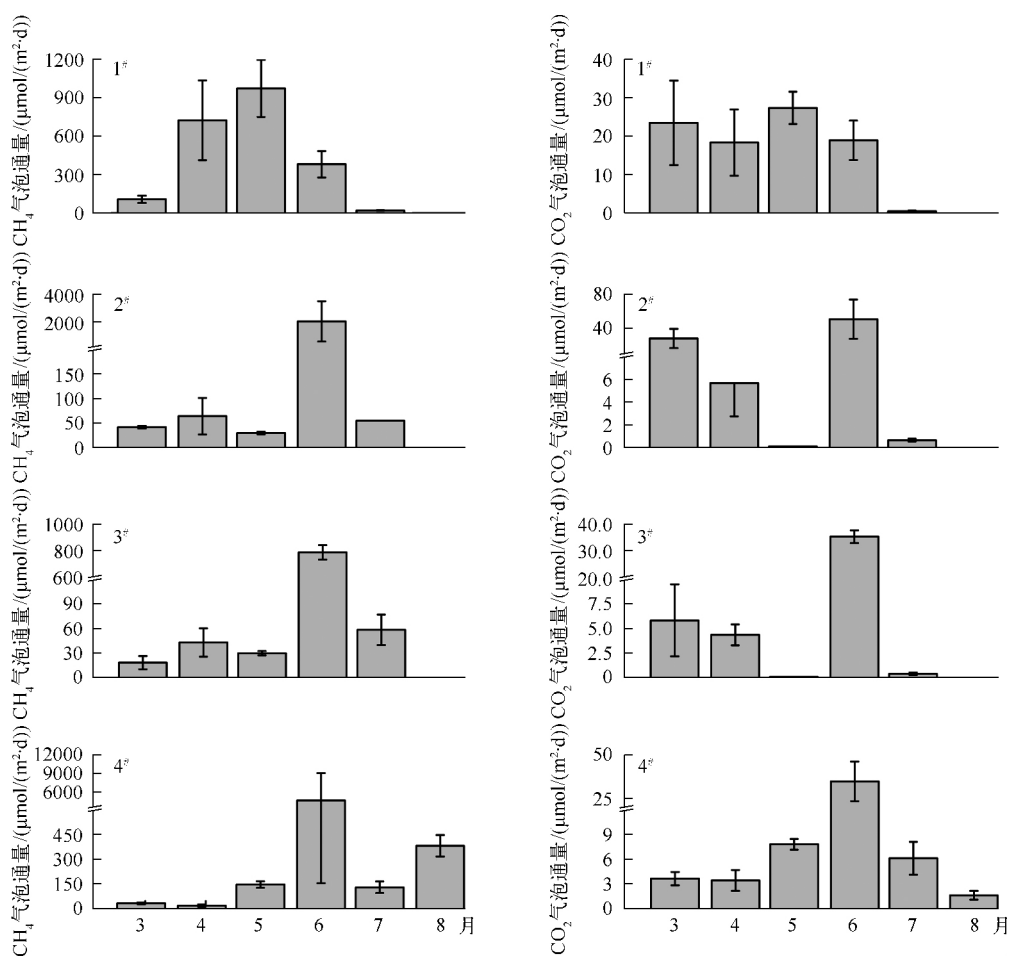


图 8 研究期间常规点 CH_4 和 CO_2 气泡释放通量

Fig. 8 Ebullition fluxes of CH_4 and CO_2 at each steady site during the research

表 1 研究期间常规点 CH₄ 和 CO₂ 气泡释放通量逐月统计结果
Tab. 1 Ebullition fluxes of CH₄ and CO₂ at each steady site during the research

时间	CH ₄ 通量/($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)		CO ₂ 通量/($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	
	均值	变化范围	均值	变化范围
3 月	49.3 ± 9.5	3.83 ~ 206.70	15.3 ± 4.3	0.35 ~ 89.40
4 月	155.0 ± 76.5	0.13 ~ 1229.10	7.9 ± 2.5	0.18 ~ 39.10
5 月	294.7 ± 97.6	0.84 ~ 1630.40	8.8 ± 2.5	0.09 ~ 40.30
6 月	1948.2 ± 1130.6	46.17 ~ 17951.90	35.0 ± 6.6	0.90 ~ 119.10
7 月	67.2 ± 14.4	12.69 ~ 306.20	2.2 ± 0.8	0.06 ~ 17.30
8 月	95.6 ± 45.2	0.01 ~ 447.90	0.4 ± 0.2	0 ~ 2.10

对各常规点的方差分析发现,常规点间 CH₄ 通量空间差异并不显著($\text{sig.} = 0.638 > 0.05$);各常规点 CO₂ 通量空间差异亦无统计意义($\text{sig.} = 0.835 > 0.05$).不同月份间的气泡释放通量的方差分析表明,CH₄ 和 CO₂ 的逐月气泡释放通量均呈显著差异($\text{sig.} \leq 0.01$).在时间序列上,除 1[#]常规点 CH₄、CO₂ 气泡通量在 5 月出现峰值外,其余各常规点 CH₄、CO₂ 气泡通量均在 6 月出现峰值.2[#]、3[#]常规点 CH₄ 气泡通量变化过程一致,CH₄ 气泡通量 5 月略有下降,6 月出现峰值后迅速下降.2[#]、3[#]常规点 CO₂ 气泡通量变化过程亦有相似性,3—5 月显著下降,6 月出现峰值后迅速下降.上述变化特征同 CO₂ 浓度逐月变化过程相似.4[#]常规点 8 月 CH₄ 气泡通量较 7 月显著升高,同上述 2[#]、3[#]常规点时间变化有所不同.

2.3 超量气泡释放现象

2012 年 5 月野外研究发现,湖心野外试验平台附近出现超量气泡释放,故增加 5[#]倒置漏斗装置在该处进行研究,该点位研究持续至 8 月.结果发现,5 月末 3 d 监测期内气泡收集总体积达 8437.5 ml,期间 CH₄、CO₂ 浓度分别为 14062.8、484.1 $\mu\text{mol}/\text{L}$;该处 5 月气泡释放 CH₄ 通量达 22392.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,CO₂ 释放通量达 769.1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,分别是同期前述 4 个常规点均值的 76 和 87 倍.6、7 月,该处采样点存在微量气泡释放现象,同 5 月相比已经显著减少.6 月 CH₄、CO₂ 释放通量仅分别为 3527.4、6.2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,7 月 CH₄、CO₂ 释放通量分别为 73.5、3.2 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,亦较 6 月显著下降.但在 8 月监测期间,该处又出现气泡超量释放现象,4 d 监测期内气泡收集总体积达 7060.0 ml,期间 CH₄、CO₂ 浓度分别为 13504.4、7.2 $\mu\text{mol}/\text{L}$;相应地 CH₄、CO₂ 气泡释放通量分别达 13366.1、7.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,分别是同期前述 4 个常规点均值的 140、18 倍.

3 讨论

天然水域气泡释放过程具有显著的时空异质性和不确定性特点.作为三峡水库支流库湾水域气泡释放的初步尝试,研究结果亦呈现出该水域气泡释放高度的时空变化和随机性.这同影响气泡形成、上浮与释放全程环境因素的复杂性是密切相关的.结合同期水文水力特征和其他环境特点,从以下 3 个方面对该水域气泡释放特点进行初步探讨.

3.1 同水温和水文水力特征的关联性

已有研究认为,在丰富有机质的浅层缓流水体,水温升高是导致气泡形成并释放的根本原因^[17].研究水域气温自 3 月中旬首次突破 20℃,3 月下旬水温亦超过 15℃,气泡开始形成并释放.早期(3、4 月)气泡释放主要集中于近岸水深较浅的 1[#]、2[#]常规点,气泡释放通量高于水深相对较大的 3[#]、4[#]常规点.5 月,水深最浅的 1[#]常规点气泡释放通量最高,这同前述结论一致.在研究中期(5、6 月),相对较深的 4[#]常规点气泡释放强度显著增加,甚至在更深的湖心处出现了超量释放现象(5[#]常规点).研究中期出现了气泡释放峰值主要有 3 个影响因素:1) 入汛前水位在该时期已经降至 145 m 最低水位(图 5),静水压力减少有利于底部积累的气泡集中释放;2) 同期水温已升至 25℃;3) 同期,1[#]、2[#]常规点附近的近岸消落带和浅层淹没区的土壤有机质含量仅为 8.39 ± 0.51 g/kg,而库湾湖心处底泥有机质含量则高达 20.23 ± 0.76 g/kg;近岸带有机质含量不足湖心

处的50%。7月为主汛期,水体流动剧烈^[18],库湾水位陡涨陡落(图4),故尽管7月水温进一步升高,但水文水力特征可能不利于气泡形成并释放。而进入8月伏旱期后,径流量下降^[18]为气泡释放创造了稳定的缓流环境,湖心处(4[#]、5[#]常规点)再次形成大量气泡并释放出水面。

3.2 与同水域水-气界面扩散通量的比较

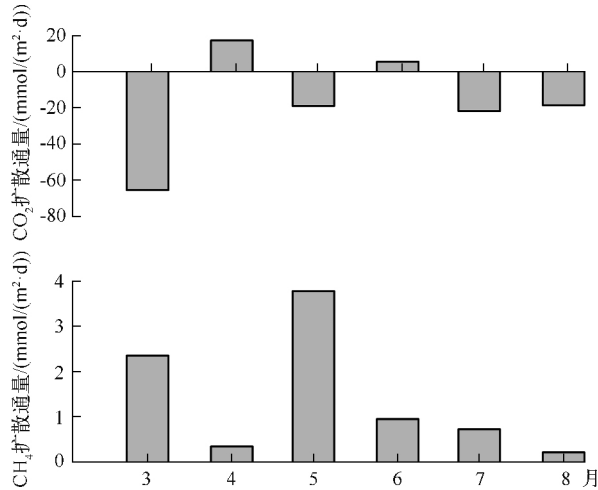


图9 研究期间澎溪河高阳平湖 CH₄ 和 CO₂ 扩散通量

Fig. 9 Diffusive fluxes of CH₄ and CO₂

in the Lake Gaoyang, Pengxi River during the research

研究期间,采用浮箱法对水-气界面间 CH₄、CO₂ 扩散通量进行同步监测,结果见图9。4个常规点 CH₄ 气泡释放通量约为同期 CH₄ 扩散通量的 0 ~ 1893.9%,均值为 $42.3\% \pm 16.5\%$;超量释放情况下,5[#]常规点 CH₄ 气泡释放通量为同水域 CH₄ 扩散通量的 $592.7\% \pm 13.7\%$ (5月)、 $6270.5\% \pm 390.0\%$ (8月)。CO₂ 扩散通量因水生生态系统光合/呼吸过程而出现“源-汇”交替,但无论是“源”通量还是“汇”通量,CO₂ 扩散通量绝对值的量级显著大于气泡释放通量。4个常规点 CO₂ 气泡释放通量仅占同期扩散通量绝对值的 0 ~ 21.74‰,均值为 $1.04\text{‰} \pm 0.24\text{‰}$ 。在超量释放情况下,CO₂ 气泡释放通量亦仅为同期扩散通量绝对值的 $40.33\text{‰} \pm 0.93\text{‰}$ (5月)。上述差异与 CH₄、CO₂ 在水中的溶解度有关,也与其生物可利用性有关,进一步说明在三峡水库支流库湾水域中

CH₄ 的气泡释放强度与扩散强度总体相当,且在局部时期气泡释放通量将可能远高于扩散通量,故 CH₄ 的气泡释放通量在支流库湾水域不可忽视。

3.3 与国际上其他相关研究的比较

国际上对热带、寒带多个水库曾开展过温室气体气泡释放通量监测研究,相关研究成果见表2。从已收集掌握的资料上看,不同水库间 CO₂、CH₄ 气泡释放通量强度的时空差异性明显,热带水库 CO₂、CH₄ 释放通量水平大体上高于寒带水库,但寒带水库亦可能存在较高的气泡释放通量(如芬兰 Lokka 水库)。大体上,CO₂ 气泡释放通量仅为扩散通量的 1%~2%,CO₂ 气泡释放对水库 CO₂ 总通量水平的影响基本可以忽略,CH₄ 气泡释放通量水平显著高于 CO₂。寒带水库 CH₄ 的气泡释放通量水平约为同期扩散通量的 20%~30%,但在芬兰的 Lokka 水库 CH₄ 气泡释放通量远超过其扩散通量水平^[19-20]。热带和亚热带水库 CH₄ 气泡释放通量在不同水库间差异甚大。Duchemin 等发现巴西 Curua-Uná 水库中水深对气泡释放没有明显的影响,但昼夜却存在气泡释放差异^[17]。Delmas 等发现 Petit-Saut 水库 1997 年 CH₄ 气泡释放通量仅约为 1994 年的 1/10^[21,23]。

澎溪河回水区高阳平湖库湾 CO₂、CH₄ 气泡释放强度大体上位于热带水库和寒带水库之间(芬兰 Lokka 水库除外),总体处于中等水平;CO₂、CH₄ 气泡释放同扩散通量的比例关系亦同国际其它水库相近。但由于其仅局限于三峡水库支流回水区库湾的局部缓流水域,无法代表整个三峡水库的 CH₄、CO₂ 温室气体的气泡释放特点。同时,考虑到不同水库受到所在区域土地利用历史、水库库龄等多方面的影响,气泡释放存在显著的时空异质性,故依然需要进一步的研究以明晰三峡水库气泡释放特征及其对温室气体总释放通量的具体影响。

4 结论

研究水域 CH₄ 气泡释放通量变化范围为 $0.01 \sim 23288.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,CO₂ 气泡释放通量变化范围为 $0 \sim 799.89 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。不同常规点 CH₄、CO₂ 气泡释放通量均呈现出高度的时空异质性特征。但 CH₄ 气泡释放通量显著高于 CO₂ 气泡释放通量,且二者释放过程具有同步性。同国外已有水库监测结果相比,澎溪

河回水区高阳平湖库湾水域 CH₄、CO₂ 气泡释放通量处于中等水平.

表 2 国外典型水库 CH₄ 和 CO₂ 气泡释放通量情况
Tab. 2 Ebullition fluxes of CH₄ and CO₂ in global reservoirs

国家	水库	气候带	CH ₄ 气泡通量 / (μmol/(m ² · d))	与扩散通量 比值 / %	CO ₂ 气泡通量 / (μmol/(m ² · d))	与扩散通量 比值 / %	月 / 年
巴西	Itaipu ^[22]	亚热带	31. 25	4	<22. 73	<0. 1	12/1998
	Itaipu ^[22]	亚热带	37. 50	8	<22. 73	<0. 1	08/1999
	Segredo ^[22]	亚热带	106. 25	20	2. 27	<0. 1	05/1998
	Segredo ^[22]	亚热带	118. 75	33	0. 68	<0. 1	11/1998
	Miranda ^[22]	热带	1825	13	6. 82	<0. 1	03/1998
	Miranda ^[22]	热带	1156. 25	68	4. 55	<0. 1	12/1998
	Três Marias ^[22]	热带	17068. 75	494	79. 55	2. 5	03/1998
	Três Marias ^[22]	热带	3493. 75	665	91. 14	0. 17	03/1999
	Barra Bonita ^[22]	热带	300	33	4. 55	<0. 1	04/1998
	Barra Bonita ^[22]	热带	193. 75	16	1. 14	<0. 1	11/1998
	Xingó ^[22]	热带	118. 75	7	0. 23	<0. 1	05/1998
	Xingó ^[22]	热带	1225	64	2. 05	<0. 1	03/1999
	Samuel ^[22]	热带	1206. 25	12	13. 64	<0. 1	06/1998
	Samuel ^[22]	热带	850	126	9. 09	<0. 1	05/1999
	Tucuruí ^[22]	热带	825	7	3. 18	<0. 1	06/1998
	Tucuruí ^[22]	热带	156. 25	23	1. 59	<0. 1	06/1999
	Serra da Mesa ^[22]	热带	6937. 50	1110	43. 18	0. 14	11/1997
	Serra da Mesa ^[22]	热带	4143. 75	169	34. 09	<0. 1	03/1998
	Curua-Uná ^[17]	热带	750	60	—	—	旱季
	Curua-Uná ^[17]	热带	4062. 5	406	—	—	雨季
法属圭亚那	Petit-Saut ^[23]	热带	33125	68. 8	—	—	—
芬兰	Lokka ^[19-20]	寒带	12000	1558	—	—	1994
	Lokka ^[19-20]	寒带	2900	138	—	—	1995
	Porrtipahta ^[19-20]	寒带	50	22. 7	—	—	1995
加拿大	Northern Québec ^[24]	寒带	156. 25	25	—	—	—
	Northwestern Ontario ^[2]	寒带	—	20	—	1 ~ 2	—
中国	三峡澎溪河	亚热带	1264. 1	235. 68	26. 20	0. 18	2012
	高阳平湖库湾*		(0. 01 ~ 23288. 64)	(0 ~ 7341)	(0 ~ 799. 89)	(0 ~ 4. 2)	

* 三峡水库澎溪河高阳平湖库湾数据考虑了前述逐点常规点监测结果和超量释放现象,所示数据为两种情况合并的结果.

CH₄ 气泡释放通量值约为同期 CH₄ 扩散通量的 0 ~ 1893. 9% ,超量释放下,CH₄ 气泡释放通量可达同水域 CH₄ 扩散通量的 6270. 5% ± 390. 0% . CO₂ 气泡释放通量仅占同期扩散通量绝对值的 0 ~ 21. 74‰ ,超量释放下,CO₂ 气泡释放通量亦仅为同期扩散通量绝对值的 40. 33‰ ± 0. 93‰ . CH₄ 的气泡释放通量在支流库湾水域对总通量的贡献不可忽视.

5 参考文献

- [1] St Louis VL , Kelly CA , Duchemin É *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience* , 2000 , **50** (9) : 766-775.
- [2] Kelly CA , Rudd JWM , Bodaly RA *et al.* Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir. *Environmental Science & Technology* , 1997 , **31** (5) : 1334-1344.
- [3] Duchemin É , Lucotte M , Canuel R *et al.* Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of

- the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 529-540.
- [4] Bastviken D, Cole J, Pace M *et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(4): doi. 10.1029/2004GB002238.
- [5] Matvienko B, Sikar E, Rosa LP *et al.* Gas release from a reservoir in the filling stage. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 2001, **27**: 1415-1419.
- [6] Delmas R, Galy-Lacaux C, Richard S *et al.* Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 993-1003.
- [7] Tremblay A, Therrien J, Hamlin B *et al.* GHG Emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems. In: Tremblay A ed. *Greenhouse gas emissions—fluxes and processes*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 208-232.
- [8] Barros N, Cole JJ, Tranvik LJ *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 2011, **4**: 593-596.
- [9] Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 2006, **444**: 524-525.
- [10] 陈永根, 李香华, 胡志新等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 CO₂ 通量. 生态环境, 2006, **15**(4): 665-669.
- [11] 赵炎, 曾源, 吴炳方等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.
- [12] 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. 环境科学, 2012, **33**(6): 63-67.
- [13] Lu F, Yang L, Wang X *et al.* Preliminary report on methane emissions from the Three Gorges Reservoir in the summer drainage period. *Journal of Environmental Science*, 2011, **23**(12): 2029-2033.
- [14] dos Santos MA, Matvienko B, Rosa LP *et al.* Gross greenhouse gas Emissions from Brazilian Hydro Reservoirs. In: Tremblay A ed. *Greenhouse gas emissions—fluxes and processes*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 266-291.
- [15] Goldenfum JA. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs. London: The International Hydropower Association, 2010: 78-82.
- [16] 蒋滔, 郭劲松, 李哲等. 三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探. 环境科学, 2012, **33**(5): 1463-1470.
- [17] Duchemin É, Lucotte M, Canuel R *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 2000, **27**: 1391-1395.
- [18] 李哲, 郭劲松, 方芳等. 三峡澎溪河(小江)回水区一维水动力特征研究. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, **35**(5): 143-150.
- [19] Huttunen JT, Väisänen TS, Hellsten SK *et al.* Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): doi. 10.1029/2000GB001316.
- [20] Huttunen JT, 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. *Chemosphere*, 2003, **52**(3): 609-621.
- [21] Delmas R, Richard S, Guérin F *et al.* Long term greenhouse gas emissions from the hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts. In: Tremblay A ed. *Greenhouse gas emissions—fluxes and processes*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 292-312.
- [22] dos Santos MA, Rosa LP, Sikar B *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, 2006, **34**(4): 481-488.
- [23] Galy-Lacaux C, Delmas R, Jambert C *et al.* Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**(4): 471-483.
- [24] Ferland P, Duchemin É, Canuel R *et al.* Émissions de CH₄ et CO₂ depuis les réservoirs hydroélectriques du moyen-nord québécois. Rapport Annuel de la Chaire de Recherche en Environnement, 1998, HQ/CRSNG/UQAM: 65-87.