

三峡库区香溪河秋末至中冬 CO_2 和 CH_4 分压特征分析

张军伟¹, 雷丹^{1*}, 肖尚斌¹, 张成², 穆晓辉¹, 刘佳¹, 李迎春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)

摘要: 为揭示三峡库区支流库湾表层水体秋末至中冬 CH_4 和 CO_2 的分压特征及其影响因素, 于 2014 年相应时间段在香溪河库湾每天定点定时采取表层水样, 利用顶空气相色谱技术测定水中溶解 CH_4 和 CO_2 的浓度, 通过亨利定律计算 CH_4 和 CO_2 的分压, 并同步监测相关环境因子。结果表明: 表层水体 CH_4 分压变化范围 0.64~4.43 Pa, 平均值为(1.69±0.94) Pa, CO_2 分压变化范围 49.90~868.91 Pa, 平均值为(328.48±251.63) Pa。水体 CO_2 和 CH_4 分压的变化呈显著负相关($r = -0.618$, $P < 0.01$)。 $p\text{CH}_4$ 和 $p\text{CO}_2$ 与溶解氧、总磷、叶绿素 a、pH 水温和水位相关性明显, 其中 $p\text{CO}_2$ 与各环境因子的相关性较 $p\text{CH}_4$ 更为密切。

关键词: 溶解气体; 分压; 环境因子; 三峡水库; 香溪河库湾

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2924-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.013

Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Jun-wei¹, LEI Dan^{1*}, XIAO Shang-bin¹, ZHANG Cheng², MU Xiao-hui¹, LIU Jia¹, LI Ying-chen¹

(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)

Abstract: The Concentrations of dissolved CH_4 and CO_2 in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir from autumn to winter in 2014 were determined with headspace gas chromatography technology. Then their partial pressures of CH_4 and CO_2 were calculated according to the Henry's law. Their temporal variation and the effects of environmental parameters were also discussed. The results indicated that the CH_4 partial pressure in the surface water ranged 0.64–4.43 Pa, with an average of (1.69±0.94) Pa. The CO_2 partial pressure varied from 49.90 to 868.91 Pa, with the average of (328.48±251.63) Pa. The $p\text{CO}_2$ and $p\text{CH}_4$ had a strong negative correlation ($r = -0.618$, $P < 0.01$). During the period of monitoring, the $p\text{CO}_2$ and $p\text{CH}_4$ in surface water were significantly correlated with pH, DO, chlorophyll a, TP, surface water temperature and water level. Compared with $p\text{CH}_4$, $p\text{CO}_2$ was more closely correlated with various environmental factors.

Key words: dissolved gas; partial pressure; environmental factors; the Three Gorges Reservoir; Xiangxi River Bay

水库作为人类活动对大气温室气体浓度影响的一个重要方面,越来越受到关注。对于水库温室气体的研究始于 1993 年^[1], Duchemin 等^[2]首次对水库水-气界面温室气体通量进行观测和计算。水库淹没陆地生态系统中的碳并释放进入水体,淹没土壤的化学性质被改变,导致不稳定碳和营养物质释放到水中,并在一定时间内改变水体里的生物化学参数,进而影响新环境中温室气体的动力学过程,主要体现在加强水体里细菌、浮游生物和鱼类群落的活动性,从而刺激水库生态系统的全面生产,这在热带地区尤为明显^[3]。通过各种途径进入到水库中的有机物,在厌氧、好氧的条件下腐烂分解,生成大量的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O ,成为温室气体重要的排放源^[4]。水体二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)和甲烷分压($p\text{CH}_4$)是影响水-气界面 CO_2 和 CH_4 交换的重要因素,不仅受流域地表的生物、物理、化学和人类活动的影响,而且也受生物地球化学过程的影响。冉景

江等^[5]通过对小江回水区 $p\text{CO}_2$ 的时空变化监测与分析,指出了水体 $p\text{CO}_2$ 与水体碳循环的关系;袁希功等^[6]、姚臣谔等^[7]对三峡库区支流香溪河库湾 $p\text{CO}_2$ 进行监测以及影响因素的分析,分析发现水-气界面 $p\text{CO}_2$ 与温度、pH、叶绿素 a、溶解氧(DO)的相关性明显。温志丹等^[8]对长春 7 个城市湖泊 CO_2 和 CH_4 分压研究发现,秋季 CO_2 和 CH_4 分压都高于大气中 CO_2 和 CH_4 分压,秋季这些城市水体是大气 CO_2 和 CH_4 的“源”。在三峡水库蓄水期间,水库内的水文情势发生了显著的变化,水深加大、水面增宽、水流变缓、水质发生明显的变化,同时季节交替伴随的水温降低,共同导致生物地球化学过程的改变或自适应。本研究基于 2014 年秋末至中冬以天

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2016-04-06

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, 2015CFC834)

作者简介: 张军伟(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水工学, E-mail: 1657729290@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: leidan@ctgu.edu.cn

为频率、对三峡库区支流香溪河表层水体 CO₂ 和 CH₄ 分压进行持续性的原位观测数据,通过分析香溪河库湾溶解温室气体分压的变化特征,探讨二者的影响因素,以期全面而系统地认识三峡水库蓄水之后的温室气体通量特征提供客观依据。

1 研究区概况

香溪河位于鄂西,距离三峡大坝约 20 km,是三峡水库湖北库区最大支流,也是三峡坝首的第一大支流,流域面积为 3 099 km²^[9],拥有南阳河、古夫河、高岚河 3 条主要支流。香溪河流域地处亚热带大陆性季风气候区,降水量较多,多年降雨量平均在 900 ~ 1 200 mm 之间,年平均气温为 17.24℃^[10]。香溪河流域内山地众多,地势高差大,沿河两岸多为陡坡峡谷。香溪河库湾属深水型回水库湾,由于干支流的水温差异及颗粒物浓度含量不同导致分层异重流现象长期存在,同时库湾存在显著的水温分层现象^[11]。考虑到香溪河流域的自然地理特征及水环境特征,本研究中观测点选择在兴山县峡口镇,即图 1 中 XX06 的位置,其处于香溪河中游,距离香溪河口约 18 km。



图 1 监测点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品的采集与分析方法

采样时段为 2014 年 11 月至 2015 年 1 月,每日上午 09:00 定点采集表层水(水深 0.5 m),已有的

研究表明^[12],上午 09:00 水体溶解 CH₄ 和 CO₂ 浓度可反映 24 h 内的变化情况。使用注射器取 100 mL 水样,注入预先清洗干净的真空镀铝内膜采样袋内(水样取两袋做平行样,结果取其平均值),并注入 3 mL 饱和 HgCl₂ 溶液抑制微生物的活动,用于短时间保存^[13]。另外取 350 mL 水样于采样瓶内,用于叶绿素 a、TN、TP 的测定。样品采集同时,利用水质多参数仪(HYDROAB DS5,美国)测定水体理化因子。采样袋中的水样带回实验室后先用注射器注入 200 mL 高纯氮(99.99%) ,然后用 40 W 功率超声波处理 20 min 使水中 CH₄ 与 CO₂ 充分释放,静置 24 h 使待测气体两相平衡^[14],抽取顶空气体,用 FLGC9790II 型气相色谱仪(福立公司,中国)测定,CH₄ 和 CO₂ 的检测器为离子化火焰检测器(FID)^[15]。根据文献[16],水体中 TN 以及 TP 的含量分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾消解法,通过紫外分光光度计(TU-4810 北京普析)测定,采用丙酮提取法^[17]测定叶绿素 a 的浓度,水样通过 0.45 μm 乙酸纤维滤膜在真空泵下抽滤得到滤膜,将滤膜放入离心管中,加入 90% 的丙酮溶液 10 mL,放在阴暗处 24 h 之后摇匀,用离心机离心 15 min,取其上清液测定水体中叶绿素 a 的含量。

2.2 溶解气体浓度计算

水体中溶解气体浓度的计算采用 Johnson 等^[18]提出的方法:

$$c_w = c_{\text{gas}} \times \left(\beta \times \frac{RT}{22.356} + \frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{liq}}} \right) \quad (1)$$

式中, c_w 为表层水中溶解气体的浓度 (mol·L⁻¹); c_{gas} 为顶空平衡后的气体浓度 (mol·L⁻¹); β 为 Bunsen 系数 [L·(L·Pa)⁻¹]; R 为通用气体常数 0.082 L·Pa·(mol·K)⁻¹; V_{gas} 和 V_{liq} 分别是气体体积 (mL) 和水样体积 (mL); T 为热力学温度 (K); 22.356 为气体摩尔体积 (L·mol⁻¹)。

2.3 溶解气体分压计算

水体中溶解气体的分压采用公式 (2) 计算^[19]:

$$p = \frac{c_w}{k_H} \quad (2)$$

式中 k_H 为亨利定律常数 [mol·(L·Pa)⁻¹]; c_w 为表层水中溶解气体的浓度 (mol·L⁻¹); p 为待测气体分压 (Pa)。

3 结果与分析

3.1 水体 pCO₂ 和 pCH₄

观测点 CO₂ 和 CH₄ 分压有明显的月变化特征

(图2),监测期间水体 $p\text{CH}_4$ 平均为 (1.69 ± 0.94) Pa, 其分压变化范围 $0.64 \sim 4.43$ Pa; 水体 $p\text{CO}_2$ 平均为 (328.48 ± 251.63) Pa, 分压变化范围 $49.90 \sim 868.91$ Pa. 11月 $p\text{CO}_2$ 相对比较稳定, 12月和1月变化幅度比较明显, 而对于 $p\text{CH}_4$, 11月变化比较明显, 12月和1月相对比较稳定. 已有研究表明, 长江上游的龙川江水体 $p\text{CO}_2$ 在 $23 \sim 841$ Pa 之间^[20]; 夏季梅溪河表层 $p\text{CO}_2$ 为 $6.8 \sim 7.5$ Pa, 三峡库区库中长江干流表层 $p\text{CO}_2$ 为 $201.4 \sim 210.2$ Pa^[21]; 秋季黄河水体 $p\text{CO}_2$ 介于 $80 \sim 166$ Pa^[22]; 小浪底站表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 $82 \sim 195$ Pa 之间, 花园口站表层水体 $p\text{CO}_2$ 在 $99 \sim 228$ Pa

之间, 且花园口站表层水体 $p\text{CO}_2$ 均高于同期的小浪底站^[23]. 由于受河流内、外部的物理、化学和生物过程的影响, 香溪河水体 $p\text{CO}_2$ 与其他河流相比有显著差别.

CO_2 和 CH_4 分压呈显著负相关, 相关系数为 -0.618 . 11月 $p\text{CH}_4$ 比较高, 平均为 2.39 Pa, 且出现 $p\text{CH}_4$ 最大值 4.43 Pa, 12月和1月相对比较低, 平均分压分别为 1.12 Pa、 1.25 Pa, 12月分压达到最小值 0.64 Pa; 而 $p\text{CO}_2$ 最大值和最小值分别在12月和11月, 最大值 868.91 Pa, 最小值 49.90 Pa, 11月、12月和1月 $p\text{CO}_2$ 平均值分别为 78.60 、 578.93 和 433.10 Pa.

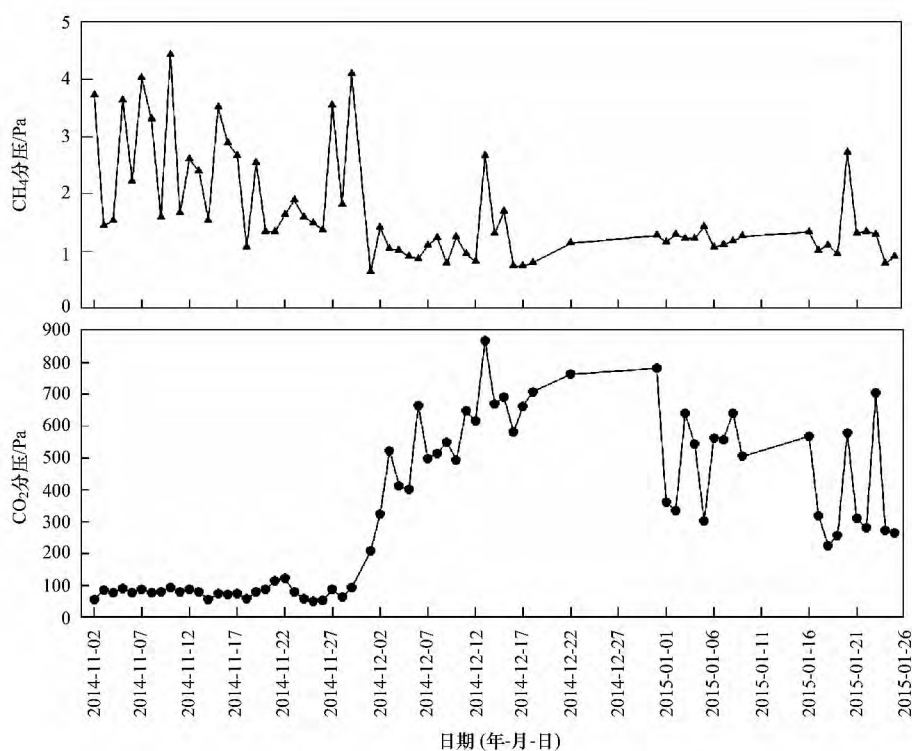


图2 CO_2 和 CH_4 分压日变化

Fig. 2 Daily variation of the partial pressure of CO_2 and CH_4

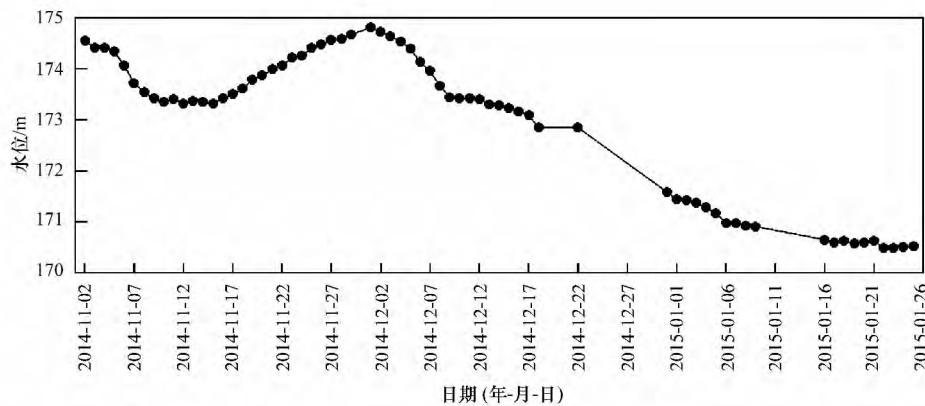
3.2 主要环境因子

图3为2014年11月至2015年1月香溪河支流水位变化情况. 三峡水库蓄水之后, 11月水位整体小幅度的抬升, 平均水位 174 m, 水位日变幅比较小, 11月上旬水位处于缓慢下降的趋势, 下旬水位从 173.32 m 慢慢抬升到 174.81 m; 12月和1月水位持续下降, 从11月最高水位 174.81 m 下降到1月最低水位 170.50 m 左右, 平均日下降 0.09 m.

从图4可以看出, 入冬后随着气温降低, 香溪河支流表层水温呈现降低的趋势, 水温从11月最高 21.29°C 降到1月最低 13.37°C , 日均降低 0.10°C .

叶绿素 a 的含量介于 $0.13 \sim 3.88 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其中11月叶绿素 a 的含量相对较低, 在 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 12月和1月叶绿素 a 含量较11月高, 其平均浓度分别为 $1.42 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 整体来看叶绿素 a 处于上升的趋势. 11月表层水体溶解氧 (DO) 在 $8.2 \sim 10.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 12月表层水体溶解氧 (DO) 呈现逐渐上升的趋势, DO 浓度从 $9.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 1月 DO 介于 $8.0 \sim 12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

监测期间水体 pH 平均为 8.6 , 呈碱性, 11月和12月 pH 比较稳定, 1月 pH 波动比较大. TN、TP 浓



数据来源: 中国长江三峡集团公司

图3 2014年11月~2015年1月香溪河支流水位变化情况

Fig. 3 Variation of water level of Xiangxi River from Nov. 2014 to Jan. 2015

度分别在 $0.2 \sim 1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.03 \sim 0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动,其中 TN、TP 在 12 月和 1 月比较高,11 月相对较低。

4 讨论

水库温室气体的排放是由气体产生和传输过程共同决定的,直接影响碳通量的是水体和大气之间的二氧化碳分压差^[24],但是在大部分时间多数河段水体中的二氧化碳处于过饱和状态,不断向大气排放二氧化碳^[25~29]。对于 CH_4 气体来说,氧化过程也是一个决定因素^[30],有研究表明淡水环境中碳的厌氧矿化占碳总矿化的 20%~60%,其中厌氧矿化的 30%~80% 都是通过水体和沉积物中甲烷的生成来实现^[31]。而这些过程受诸多因素的影响,比如水库的库龄、气候、下垫面条件、水位变化、水位日变幅、pH、浮游生物等。

4.1 $p\text{CO}_2$ 与环境因子之间的关系

水体 $p\text{CO}_2$ 受多种因素的影响,其中水温和叶绿素的作用尤为重要^[32]。支流由于受到干流与地形等影响,流速变缓,有利于浮游植物生长^[33],浮游植物的光合作用吸收二氧化碳,在已有的河流水体 CO_2 影响因素的研究中,呼吸作用是维持亚马逊河与珠江口 $p\text{CO}_2$ 的主要机制^[26,34],光合作用和呼吸作用同时影响着泰晤士河的 $p\text{CO}_2$ ^[35]。

叶绿素 a 含量是浮游植物数量的重要指标,它直接反映水库的初级生产力^[36]。在自养状态下,水体中植物的光合作用大于呼吸作用,碳被固定,导致水体中 CO_2 分压降低;而在异养状态下,呼吸作用较强, CO_2 分压会相应增加^[37]。11 月后三峡水库基本维持在 170 m 左右高水位运行,香溪河支流水体

受干流水体顶托作用影响,水体交换作用减小,水体处于准静止状态水力学条件以及水中营养条件 (TP) 均适合浮游植物的生长,水体中叶绿素 a 的含量随着浮游植物的增加逐渐上升,而浮游植物代谢作用的增强也导致水中 DO 增加。 $p\text{CO}_2$ 与水体中叶绿素 a 含量呈显著正相关,相关系数为 0.435 (表 1),这与文献 [38~40] 研究结果相反,分析其原因是由于冬季光照强度较弱,水生生物呼吸作用释放的 CO_2 高于浮游植物光合作用消耗的 CO_2 ,导致 $p\text{CO}_2$ 上升。Morotta 等^[41] 也观测到强降雨后湖泊中有水生植物覆盖的水体 $p\text{CO}_2$ 的上升幅度要大于开阔水体,原因可能在于低光照下浮游植物的低光合作用吸收的 CO_2 无法抵消水生生物呼吸作用释放的 CO_2 ,从而导致水体 $p\text{CO}_2$ 上升。

pH 影响水体中 CO_2 浓度,当 pH 较高时,水体中游离的 CO_2 就会转变为碳酸盐,水体中 CO_2 分压降低,导致水中溶解的 CO_2 处于不饱和状态,促使大气中 CO_2 进入水体中^[19]。 $p\text{CO}_2$ 与 DO、pH 呈显著正相关 (表 1),这与文献 [42~44] 的研究结果相反,分析其原因是由于监测期间 pH 的变化范围比较小,且绝大部分时间处于稳定状态,在弱碱状态下,水中游离的 CO_2 易于形成碳酸,浮游植物光合作用释放 O_2 ,使水体中溶解氧含量增加, pH 上升,光合作用消耗的 CO_2 低于浮游植物呼吸作用产生的 CO_2 量,因此 $p\text{CO}_2$ 与 DO、pH 呈显著正相关。

水温不仅可以影响气体分子的扩散速度及其在水体中的溶解度来影响气体的交换通量^[43],还可以通过影响微生物的活性来间接影响温室气体产生的地球化学过程^[44],另外水温通过影响水生植物的光合作用和呼吸作用进而影响 CO_2 在水-气界面的扩

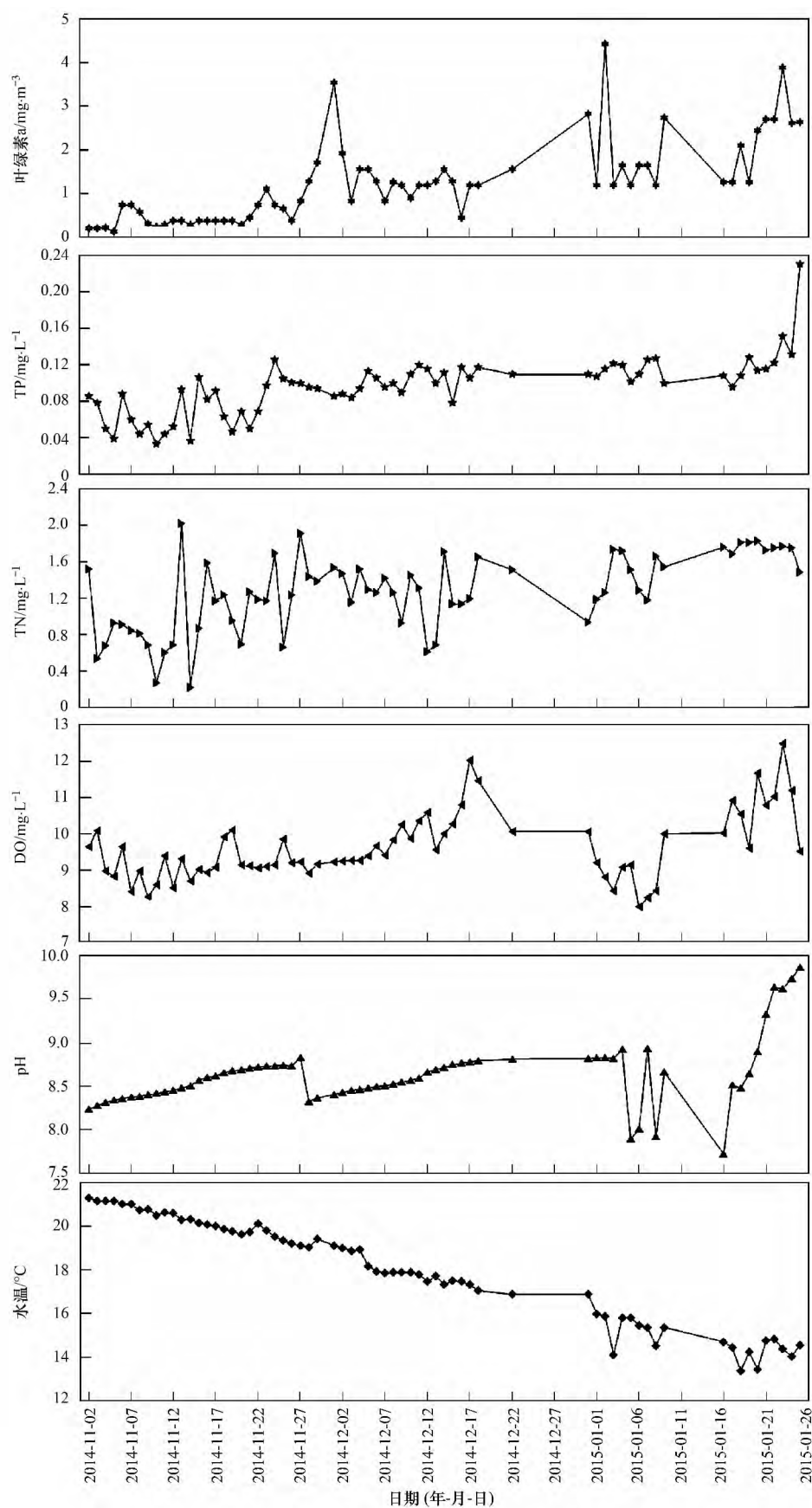


图4 各环境因子日变化

Fig. 4 Daily variation of environmental factors

散^[45]. 水温与 $p\text{CO}_2$ 呈明显的负相关, 相关系数达到 -0.618 (表 1), 这与许多学者的研究结果是一致的. 水温升高, CO_2 在水体中的溶解度降低, 另外水温升高是光照强度增强的结果, 最终导致 $p\text{CO}_2$ 降低.

4.2 $p\text{CH}_4$ 与环境因子的关系

表层水体 CH_4 与水位变化和沉积物有机质含量有一定关系. CH_4 主要产生于有机质在水下厌氧环境下的分解, 而水位的变化直接反映了沿岸消落区的淹没时长. 由于植物在水中的厌氧分解速率服从指数变化规律^[46], 在库区高水位运行时, 植物分解速率加快, CH_4 生成量增加. $p\text{CH}_4$ 与水位呈现正相关, 相关系数为 0.305 (表 1), 11 月水位较高, $p\text{CH}_4$ 比较高, 随着水位的逐渐下降, $p\text{CH}_4$ 有下降的趋势.

温度对 CH_4 的浓度有重要影响^[46], 而水体中的 CH_4 主要来源于沉积物中有机物厌氧产甲烷过程^[47], 该代谢产生 CH_4 的过程与水温关系密切, 温暖的水体有利于有机物的矿化, 增强产甲烷速率^[48]. Louis 等^[49]认为, 水温较高的沉积物中积累的甲烷量大于扩散到水中的量, 导致甲烷过饱和而形成气泡. Friedl 等^[50]研究结果显示温和的水体会更进一步促进温室气体的产生, 增加排放到大气中的量. 水温与 $p\text{CH}_4$ 显著正相关, 相关系数 0.509 (表 1), 水温升高使得微生物活性增强, 增加 CH_4 产生量, 同时随着温度升高 O_2 和 CH_4 在水中的溶解度减小^[43], 降低 CH_4 在水柱中被氧化的量, 进而导致 CH_4 气体的释放增加^[51], $p\text{CH}_4$ 比较高. 其中

11 月水温相对比较高, 有利于 CH_4 的产生, 因此 $p\text{CH}_4$ 与水温呈显著正相关($r = 0.509$, $P < 0.01$).

由表 1 可知 $p\text{CH}_4$ 与叶绿素 a、DO、TP 呈负相关. Huttunen 等^[52]研究表明沉积物中 CH_4 浓度以及 CH_4 扩散浓度与水体含氧量密切相关, CH_4 只有在严格厌氧还原条件下才能产生, 主要通过沉积物-水界面以气泡或溶解的形式交换至上覆水^[53, 54], 在扩散经过有氧的沉积物层时, 厌氧层产生的 CH_4 会被氧化消耗^[55]. $p\text{CH}_4$ 与水体中叶绿素 a 和 DO 呈负相关, 叶绿素 a 的含量是浮游植物数量的重要指标, 秋、冬季节浮游植物等生物死亡后堆积在库底形成了产生 CH_4 的“源”, 另外浮游植物光合作用释放 O_2 , 使水体中溶解氧增加, 产生的大部分甲烷被生活在有氧-缺氧临界面的甲烷氧化菌消耗掉^[56]. 水体中的 TP 为浮游植物的生长提供了有利条件, 加大了光合作用强度, 使水中溶解氧增加, 加剧了 CH_4 氧化.

pH 与水体有机质的分解、微生物的活动和水生生物的代谢等密切相关^[57, 58], 在 CO_2 和 CH_4 产生及排放过程中有重要的影响^[53]. CH_4 是在严格厌氧条件下产甲烷菌产生的, 其中产甲烷菌对 pH 较为敏感, 有研究表明在厌氧培养产甲烷菌的过程中, 当 pH 小于 5.5 和大于 9.0 时, 产甲烷菌几乎不生长^[58], 产甲烷菌最适生长环境是中性环境, 有利于 CH_4 的产生^[59]. 监测期间水体均呈现碱性, pH 在 7.25 ~ 9.70 之间波动, 产甲烷菌的活性可能随着 pH 的升高而受到了抑制, 所以 $p\text{CH}_4$ 与水体 pH 呈负相关($r = -0.218$, $P < 0.01$).

表 1 香溪河库湾表层水 $p\text{CO}_2$ 和 $p\text{CH}_4$ 与环境因子间的相关系数¹⁾
Table 1 Correlation coefficient of influencing factors with the partial pressure of CO_2 and CH_4 across the surface water of the Xiangxi River Bay

项目	水温	水位	pH	DO	TN	TP	叶绿素 a
$p\text{CO}_2$	-0.618^{**}	-0.394^{**}	0.546^{**}	0.411^{**}	0.262	0.476^{**}	0.435^{**}
$p\text{CH}_4$	0.509^{**}	0.305^{**}	-0.218^{**}	-0.323^{**}	-0.240	-0.446^{**}	-0.363^{**}

1) $**$ 表示 0.01 置信水平显著相关; $N = 67$

5 结论

(1) 监测期间表层水体 $p\text{CH}_4$ 介于 $0.64 \sim 4.43$ Pa 之间, 平均为 (1.69 ± 0.94) Pa; $p\text{CO}_2$ 分压变化范围 $49.90 \sim 868.91$ Pa, 平均为 (328.48 ± 251.63) Pa.

(2) 通过对三峡库区支流香溪河库湾表层水体 CO_2 和 CH_4 分压持续性的原位观测, 结果表明 $p\text{CO}_2$

和 $p\text{CH}_4$ 呈现明显的负相关性. $p\text{CH}_4$ 和 $p\text{CO}_2$ 与水温、水位、pH、DO、叶绿素 a 等相关性明显, 其中各环境因子与 $p\text{CO}_2$ 的相关性较 $p\text{CH}_4$ 更为密切, 但是由于 $p\text{CH}_4$ 和 $p\text{CO}_2$ 的变化受到诸多因素共同的影响, 目前还难以确定是哪个因素占主要地位, 需要进一步开展三峡水库温室气体的研究.

致谢: 感谢中国长江三峡集团公司对本研究的支持.

参考文献:

- [1] Rudd J W M, Harris R, Kelly C A, *et al.* Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? [J]. *Ambio*, 1993, **22**(4): 246–248.
- [2] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, *et al.* Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 529–540.
- [3] Delmas R, Galy-Lacaux C, Richard S. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 993–1003.
- [4] Mäkinen K, Khan S. Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs [J]. *Water Alternatives*, 2010, **3**(2): 91–105.
- [5] 冉景江, 林初学, 郭劲松, 等. 三峡库区小江回水区二氧化碳分压的时空变化特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(8): 976–982.
- [6] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季 pCO₂ 与浮游植物生物量的关系 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1754–1760.
- [7] 姚臣谌, 张靖, 吴以赢, 等. 三峡坝区干流及香溪河库湾水体秋季二氧化碳分压 [J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(1): 152–157.
- [8] 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.
- [9] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 141–144.
- [10] 付娟, 李晓玲, 戴泽龙, 等. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性 [J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2015, **61**(3): 285–290.
- [11] 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2009, **2**(5): 6–11.
- [12] 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.
- [13] Butler J H, Elkins J W. An automated technique for the measurement of dissolved N₂O in natural waters [J]. *Marine Chemistry*, 1991, **34**(1–2): 47–61.
- [14] 柴欣生, 付时雨, 莫淑欢, 等. 静态顶空气相色谱技术 [J]. *化学进展*, 2008, **20**(5): 762–766.
- [15] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842–844.
- [16] 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. 240–260.
- [17] Song K S, Zang S Y, Zhao Y, *et al.* Spatiotemporal characterization of dissolved carbon for inland waters in semi-humid/semi-arid region, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(10): 4269–4281.
- [18] Johnson K M, Hughes J E, Donaghay P L, *et al.* Bottle-calibration static head space method for the determination of methane dissolved in seawater [J]. *Analytical Chemistry*, 1990, **62**(21): 2408–2412.
- [19] Sander R. Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry (Version 3) [EB/OL]. <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>, 1999-04-08.
- [20] Li S Y, Lu X X, He M, *et al.* Daily CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the upper Yangtze River basin: a case study of the Longchuan River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **466–467**: 141–150.
- [21] 李双, 王雨春, 操满, 等. 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 885–891.
- [22] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 pCO₂ 控制因素及水-气界面通量 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(2): 227–235.
- [23] 张永领, 杨小林, 张东. 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 pCO₂ 特征及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 40–48.
- [24] 李宁, 李学刚, 宋金明. 海洋碳循环研究的关键生物地球化学过程 [J]. *海洋环境科学*, 2005, **24**(2): 75–80.
- [25] Jones J B, Mulholland P J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **40**(1): 57–72.
- [26] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, *et al.* Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂ [J]. *Nature*, 2002, **416**(6881): 617–620.
- [27] Worrall F, Swank W T, Burt T. Fluxes of inorganic carbon from two forested catchments in the Appalachian Mountains [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(15): 3021–3035.
- [28] 苏征, 张龙军, 王晓亮. 黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析 [J]. *海洋科学*, 2005, **29**(4): 41–44.
- [29] Raymond P A, Caraco N F, Cole J J. Carbon dioxide concentration and atmospheric flux in the Hudson River [J]. *Estuaries*, 1997, **20**(2): 381–390.
- [30] 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.
- [31] 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: Biogeosciences*, 2008, **113**(G2): G02024.
- [32] 朱钰, 商少凌, 翟惟东, 等. 南海北部夏季海表二氧化碳分压及其海气通量的遥感算法初探 [J]. *自然科学进展*, 2008, **18**(8): 951–955.
- [33] 吴学谦, 操满, 傅家楠, 等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, **21**(3): 311–318.
- [34] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, *et al.* High partial pressure of CO₂ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the

- Pearl River estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **93** (1): 21–32.
- [35] Neal C, Harrow M, Williams R J. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: spring–summer 1997 [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **210–211**: 205–217.
- [36] Paasche E. On the relationship between primary production and standing stock of phytoplankton [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1960, **26**(1): 33–48.
- [37] 刘昕, 江明喜, 邓红兵. 三峡地区香溪河流域叶片凋落物分解过程中 N、P 含量动态研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2008, **26**(6): 613–619.
- [38] Fan C X, Ford P W, Hu W P, *et al.* Divergence of carbon dioxide fluxes in different trophic areas of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(4): 433–442.
- [39] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(30): 5532–5540.
- [40] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 p(CO₂) 季节变化研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2674–2681.
- [41] Marotta H, Duarte C M, Pinho L, *et al.* Rainfall leads to increased pCO₂ in Brazilian coastal lakes [J]. *Biogeosciences*, 2011, **7**(5): 1607–1614.
- [42] 梅航远, 汪福顺, 姚臣谌, 等. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 58–63.
- [43] 丁建平, 程静, 杨建明. 溶解性气体对开式循环凝汽器运行特性的影响 [J]. *热力透平*, 2004, **33**(1): 41–45.
- [44] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands [J]. *Chemosphere–Global Change Science*, 2000, **2**(1): 39–46.
- [45] Patra P K, Lal S, Venkataramani S, *et al.* Seasonal and spatial variability in N₂O distribution in the Arabian Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1999, **46**(3): 529–543.
- [46] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542–551.
- [47] Duc N T, Crill P, Bastviken D. Implications of temperature and sediment characteristics on methane formation and oxidation in lake sediments [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **100**(1–3): 185–196.
- [48] Gudas C, Bastviken D, Steger K, *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments [J]. *Nature*, 2010, **466**(7305): 478–481.
- [49] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: a global estimate reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases [J]. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766–775.
- [50] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles—Consequences of damming [J]. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**(1): 55–65.
- [51] 杨妍, 刘丛强, 吴攀, 等. 猫跳河流域梯级开发水库夏季甲烷排放研究 [J]. *贵州水力发电*, 2009, **23**(3): 12–16.
- [52] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Methane fluxes at the sediment–water interface in some boreal lakes and reservoirs [J]. *Boreal Environment Research*, 2006, **11**(1): 27–34.
- [53] Ivanov M V, Pimenov N V, Rusanov I I, *et al.* Microbial processes of the methane cycle at the north–western shelf of the Black Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54**(3): 589–599.
- [54] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 384–396.
- [55] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): 3–13–17.
- [56] 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.
- [57] Dumestre J F, Vaquer A, Gosse P, *et al.* Bacterial ecology of a young equatorial hydroelectric reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **400**: 75–83.
- [58] 刘亭亭, 曹靖瑜. 产甲烷菌的分离及其生长条件研究 [J]. *黑龙江水专学报*, 2007, **34**(4): 120–122.
- [59] Wang Z P, DeLaune R D, Patrick W H, *et al.* Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(2): 382–385.