

三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂、CH₄ 扩散通量昼夜动态初探*

李哲^{1,3}, 姚骁², 何萍², 王钦², 郭劲松³, 陈永柏¹

(1: 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

(2: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

(3: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400030)

摘要: 三峡水库温室气体效应近年来备受关注. 为揭示三峡水库典型支流澎溪河水-气界面 CO₂ 和 CH₄ 通量的昼夜动态规律, 明晰短时间尺度下该水域温室气体释放的影响因素, 在 2010 年 6 月至 2011 年 5 月的一个完整水文年内, 选择 4 个具有代表性的时段(2010 年 8、11 月和 2011 年 2、5 月)对澎溪河高阳平湖水域开展昼夜跟踪观测. 结果表明: 2010 年 8、11 月和 2011 年 2、5 月 4 次采样的 CO₂ 日总通量值分别为 -8.34、73.94、28.13 和 -20.12 mmol/(m²·d), 相应的 CH₄ 日总通量值分别为 2.22、0.11、0.32 和 7.16 mmol/(m²·d), 不同时期昼夜变化明显. 研究水域 CO₂ 和 CH₄ 通量过程不具同步性; CO₂ 昼夜通量变化可能更显著地受到水柱光合/呼吸过程的影响, 但瞬时气象过程(水汽温差、瞬时风速等)在高水位时期亦可对 CO₂ 通量产生显著影响; CH₄ 昼夜通量变化与水温条件改变更为密切.

关键词: 三峡水库; 澎溪河; 高阳平湖; 水-气界面; 温室气体; 扩散通量; 昼夜动态

Diel variations of air-water CO₂ and CH₄ diffusive fluxes in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir

LI Zhe^{1,3}, YAO Xiao², HE Ping², WANG Qin², GUO Jinsong³ & CHEN Yongbo¹

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

(2: *Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China*)

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

Abstract: There is a wide concern on the greenhouse gases emission due to dam construction in recent years. However, diel variation of reservoir greenhouse gases fluxes was seldom reported. To track the diel dynamics of greenhouse gases fluxes in the backwater area of the Pengxi River, Three Gorges Reservoir and elucidate the controlling factors of the fluxes, four 24-h monitoring-campaigns in Aug., Nov. of 2010 and Feb., May of 2011 were carried out in a whole reservoir operation year in Lake Gaoyang. We found that the daily total emission of CO₂ were -8.34, 73.94, 28.13 and -20.12 mmol/(m²·d) in the above periods, respectively. While the fluxes of CH₄ during these 4 monitoring campaigns were 2.22, 0.11, 0.32 and 7.16 mmol/(m²·d), respectively. The diel varied among the campaigns. The emission of CO₂ and CH₄ were showed to have different pathways for their asynchronous fluxes during the study. A correlation analysis revealed that photosynthesis and respiration in water column was a key controlling process for CO₂ fluxes in this area. Furthermore, instantaneous meteorological parameters, i. e. wind speed, water-air temperature differences, were also significant factors that impact the fluxes of CO₂ in high water level operation period of the reservoir. However, the variations of CH₄ might be regulated by water temperature changes.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; Lake Gaoyang; air-water interface; greenhouse gas; diffusion fluxes; diel dynamics

筑坝蓄水是人类开发利用水资源的最主要方式,但水库修建将不可避免地淹没土地,导致其淹没区内土壤有机质和受淹植被降解转化成 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体释放入大气^[1]. Fearnside^[2] 和 Rosa 等^[3] 估测巴西

* 国家自然科学基金项目(51009155, 51179215)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. 2013-05-31 收稿; 2013-10-08 收修改稿. 李哲(1981~), 男, 博士, 副教授; E-mail: zheli81@sina.com.

热带雨林区水库温室气体效应是同等发电当量火电厂的 3~4 倍. 但在加拿大的研究发现寒带水库温室气体并未呈现热带水库的高通量特征,成库后 10~15 年水库温室气体释放接近天然水体本底水平^[4-5]. Barros 等^[6]发现水库成库时间(库龄)及其所处气候带是影响其温室气体总通量的关键. 而更多的观点认为水库温室气体释放是动态的生物地球化学过程,包括气体的产生、传输和排放等,受到水库的特性、气候条件、水体水质、植被状况等众多因素影响,具有复杂性^[7-8]. 目前,国内外的大部分研究建立在对水库温室气体通量的逐月跟踪或跨年跟踪观测基础上^[9-10],以掌握长时间尺度的总通量变化过程为目的,短时间尺度(如 24 h)的温室气体通量动态特征却鲜有报道. 这不仅难以进一步解析水库运行、季节变化等多重环境要素交叠对水库碳循环的影响机制,也难以指导水库温室气体监测时间选取,科学外推更大时间尺度的通量特征,从而为水库温室气体净通量评估提供更丰富的信息.

三峡水库是举世瞩目的超大型水库,兼顾防洪、发电、航运等多种功能. 与其他树枝状水库相比,峡谷河道型的三峡水库具有相对较小的淹没面积和较大的岸线系数,其流域表生过程对水库生态系统的影响更加强烈,碳、氮的生物地球化学过程受天然径流和人工调蓄的交叠影响亦呈现复杂的时空异质性. 近年的研究成果初步掌握了三峡水库典型水域(干、支流)温室气体现状通量水平^[9-12],但关于水库温室气体昼夜动态却鲜有报道. 本文拟以三峡水库支流澎溪河高阳平湖水域为研究对象,对水库不同运行阶段下 CO₂ 和 CH₄ 通量特征开展昼夜连续跟踪观测,以揭示该水域温室气体通量的昼夜动态规律,明晰在特定水库运行阶段 CO₂ 和 CH₄ 通量的主要影响因素,并为后续日通量估算提供信息支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样方案

澎溪河(又称“小江”)是三峡库区中段长江北岸一级支流(图 1),流域面积 5172.5 km²,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 回水区中段较具独特性的水域(图 2),其上游(养鹿杨家坝-小江电站)、下游(代李子-牛栏溪)河段均为峡谷型河道,河道狭长且断面变化不大,水力条件相对单一,而高阳平湖水域则是在上述两个峡谷之间水域面积为 4~5 km²(水位 145 m)的开阔水域,湖沼特征上近似于过水型湖泊. 另一方面,高阳平湖水域河道深泓处高程约 125~130 m,淹没区河底高程约为 135~140 m;故在三峡水库“蓄清排浑”的调度运行模式下(图 3),该水域在夏季低水位时期平均水深不足 15 m,冬季高水位时期平均水深将超过 40 m,形成了近似于“浅水湖泊↔深水湖泊”的季节性交替特征. 本研究以高阳平湖水域作为研究对象开展昼夜跟踪观测.

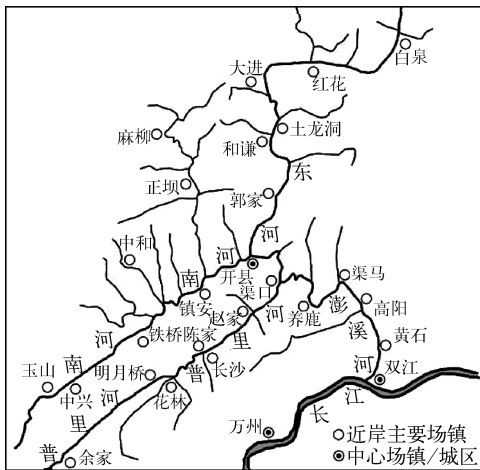


图 1 澎溪河水系示意图

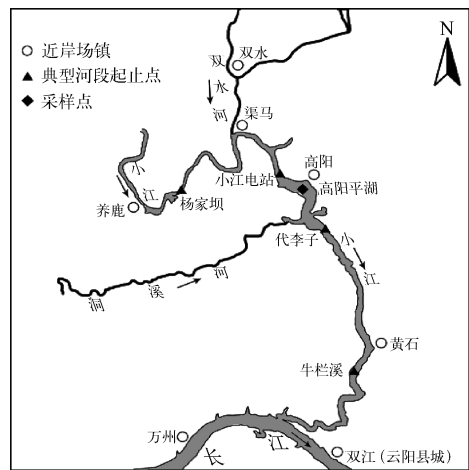


图 2 澎溪河回水区及高阳平湖水域示意图

Fig. 1 Schematic of drainage system of the Pengxi River Fig. 2 Schematic of backwater area of the Pengxi River and Lake Gaoyang

昼夜跟踪采样选择在每年 2、5、8、11 月下旬(20—25 日)开展. 月份的选择系统考虑了三峡水库调度运行方案、澎溪河水生态特征等前期积累^[11,13-18], 不仅反映了水库调度运行的阶段性特点, 也反映了水库调度运行和季节因素叠加对水生生态系统影响的特征, 使月份具有一定代表性. 表 1 对上述 4 个月份高阳平湖水域生态环境特征进行比较以说明所选月份的代表性. 本研究以 2010 年 6 月至 2011 年 5 月一个完整水文年度的 4 次昼夜跟踪观测为代表进行分析探讨, 图 3 为研究期间水位日变化情况, 具体采样时间为: 2010 年 8 月 25 日、2010 年 11 月 24 日、2011 年 2 月 28 日、2011 年 5 月 25 日.

监测时间选择在上述代表月份的下旬(20—25 日). 现场采样点为 8 m × 8 m 野外试验平台, 时间为上午 8:00 至次日 6:00, 每 2 h 采集 1 次. 使用 5 L 改良式采水器采集表层 0.5 m 水样, 并同步监测水-气界面温室气气体通量, 采样后于 48 h 内完成全部样品的分析.

表 1 代表性月份的生态环境特征比较^[11,13-18]

Tab. 1 Comparison of main eco-environmental features in the selected months

月份	三峡水库运行特征	气象特征	水生态特征	其他生境特征	代表的时期
2 月	冬季高水位运行期; 但已开始逐渐下泄放水, 满足发电、航运和下游补水等综合需求;	冬末初春期间出现约 10 d 短暂连晴天气, 气温回升明显, 但易受寒潮影响而迅速下降;	硅藻(小环藻、美丽星杆藻)占优, 易发生冬末硅藻水华;	真光层深度最大, 水温在 11~13℃ 左右, 水下光热条件优越; 营养物以溶解态为主;	1 月中旬至 3 月下旬
5 月	在长江主汛期来到之前腾出防洪库容, 水位降至最低;	春末夏初温度回升, 光热条件优, 局部时段伴随短时降雨;	易出现蓝藻(鱼腥藻、束丝藻)或甲藻(角甲藻、多甲藻)占优或水华;	真光层深度下降, 水温在 25℃ 左右, 适宜藻类生长; 营养物以颗粒态为主;	4 月上旬至 6 月中旬
8 月	主汛期水库低水位运行, 但易受主汛期洪峰调蓄的影响, 水位波动明显;	夏末期间主汛期, 多为出现连续 2 周左右的伏旱, 气温普遍超过 35℃, 亦有短时暴雨;	伏旱期间易出现硅藻(2008 年, 针杆藻)或蓝藻(2009 年后, 鱼腥藻)水华现象;	真光层深度最小, 主要受无机泥沙影响, 水温接近 9 月中旬或超过 30℃; 营养物以颗粒态为主;	6 月下旬至 9 月中旬
11 月	完成汛末蓄水后第 1 个月份, 水位达到最高	秋末入冬, 秋高气爽, 但易受寒潮影响, 气温迅速下降	通常为硅藻、绿藻等占优, 水位升高、气温下降并不易形成水华	真光层深度加大, 水温约 17~20℃, 营养物以溶解态为主	9 月下旬至 1 月上旬

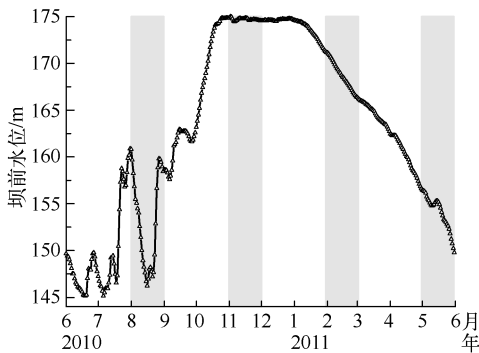


图 3 研究期间水位日变化情况 (阴影部分为研究所选的代表性月份)

Fig. 3 Daily variation of water level during the research

1.2 监测方法与数据处理方案

现场测试分析指标包括: pH 值、溶解氧(DO)、水温、气温等. 其中, 采用多参数水质分析仪(HACH® MS5)现场测定 pH 值(精度分别为 0.01 个单位); 采用 YSI® ProODO 测定水温、DO(测试精度分别为 0.1℃, 0.01 mg/L); 现场气温、大气压采用手持式数字大气压计测得. 水-气界面 CO₂、CH₄ 扩散通量采用悬浮静态箱法测量(图 4)^[19]. 气样分析采用安捷伦 7820 型气相色谱仪. 气体采用十通阀进样, CH₄ 经 TDX-01 色谱柱分离后直接用 FID 检测器检测, 而 CO₂ 先经 TDX-01 柱分离后再通过甲烷转化炉转化, 最后用 FID 检测器检验. 气体浓度变化的线性相关性系数 R² 均大于 0.95, 满足实验要求(图 5). 气体交换通量计算公式见文献[19]. 氮、磷等营养盐以及叶绿素 a(Chl. a) 等生境关键指标的测定参照文献[20]进行.

坝前水位数据下载自中国长江三峡集团公司网站 (<http://www.ctgpc.com.cn>), 化学实验分析及计算得出的数据全部录入 SPSS 或 Origin 进行统计分析, 采用 Oneway ANOVA 或 t 检验来辨别不同数据组的差异显著性, 采用变异系数 CV 值(标准差与均值的比值表征数据变化幅度), 用 Spearman 相关性分析数据间变化的线性相关性.

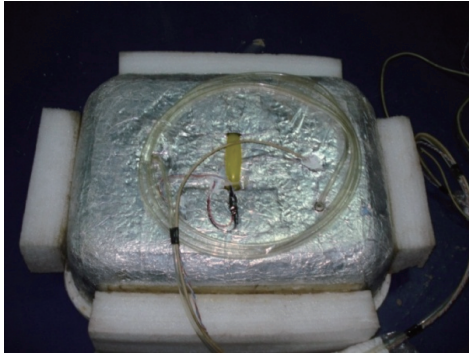


图 4 水-气界面悬浮静态箱照片
Fig. 4 A photo of floating chamber in the air-water interface

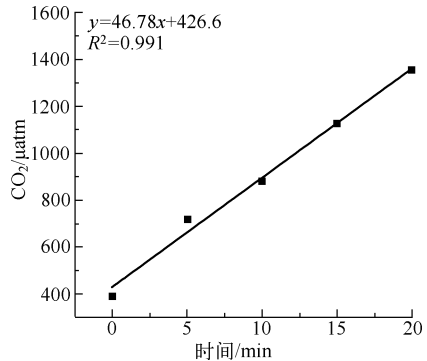


图 5 悬浮静态箱 CO₂ 通量监测与拟合示意
Fig. 5 Analysis and fitting result of CO₂ fluxes in floating chamber

由于采用 2 h 等间隔采样,积分后全天日总通量的计算公式为:

$$F_i = 2 \sum F_{hi} \quad (1)$$

式中, F_i 为日总通量 ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), F_{hi} 为每次采样获得的时通量 ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), i 为具体采样时间, 8:00 至次日 6:00, 共 12 个样本. 无论是日通量还是时通量, 正通量表示水体向大气释放气体, 即为“源”, 负通量表示水体从大气中吸收气体, 即为“汇”.

在此基础上,引入时通量对日总通量的贡献率 $\alpha(\%)$, 具体计算公式为:

$$\alpha = \begin{cases} 2F_{hi}/F_i (F_i > 0) \\ 2F_{hi}/-F_i (F_i < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 贡献率 α 表征的是时通量对日总释放通量 (“源” 通量) 的贡献率, α 为正表明对 “源” 有贡献, α 为负表明对 “汇” 有贡献.

2 结果与分析

2.1 三峡水库不同运行阶段 CO₂ 和 CH₄ 通量的昼夜变化特征

2010 年 8、11 月和 2011 年 2、5 月 4 次采样的 CO₂ 日总通量分别为: -8.34、73.94、28.13 和 -20.12 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 相应的 CH₄ 日总通量分别为: 2.22、0.11、0.32 和 7.16 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 全年 4 次昼夜采样中, CO₂ 时通量数据序列变化范围为 -1.62 ~ 4.87 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; CH₄ 时通量数据序列变化范围为 0.002 ~ 2.41 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (图 6).

低水位运行期(8 月、5 月) CO₂ 时通量的变化呈现“源”、“汇”转化的特征. 其中, 8 月份日总通量为负值, 全天总体为“汇”, 但在 21:00 左右出现“汇→源”转变, 在 5:00 左右出现“源→汇”转变. 5 月份日总通量亦为负且强于 8 月, 其“汇→源”转化时间出现在 2:00 左右, 但迅速地在 4:00 左右出现“源→汇”转变. 高水位运行期(11 月、2 月) CO₂ 通量总体呈现为“源”, 全天均为释放通量, 蓄水初

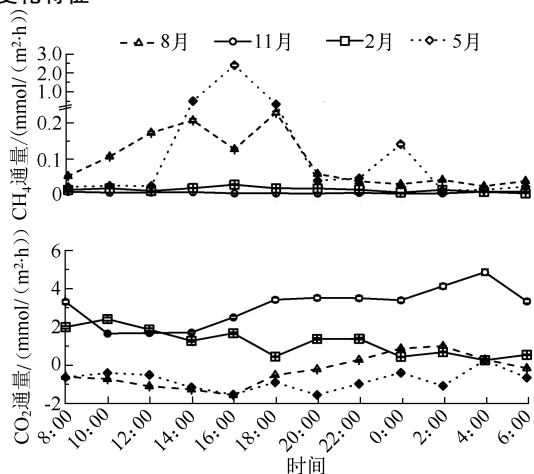


图 6 研究期间 CO₂ 和 CH₄ 时通量变化情况
Fig. 6 Diel variations of CO₂ and CH₄ fluxes during the research

期(11月)的“源”通量显著高于高水位末期(2月)的“源”通量(图6)。

时变化上,低水位运行期全天 CO₂通量的峰值通常出现在 16:00 左右,其中 8 月时通量峰值为 -1.62 mmol/(m²·h)。尽管 5 月份的 CO₂通量峰值 -1.60 mmol/(m²·h) 出现在 20:00,但 16:00 的通量亦较大,为 -1.58 mmol/(m²·h),其贡献率 α_{CO₂} 为 -15.72%,仅次于 20:00 的 -15.95%。高水位运行期,11 月 CO₂通量昼夜变化相对平稳,峰值出现在 4:00 左右,α_{CO₂} 为 13.19%。2 月 CO₂通量昼夜变化整体呈现下降的趋势,峰值出现在 10:00 左右,α_{CO₂} 为 17.07% (图 6 和图 7)。

全年 CH₄均呈现出“源”的通量特征,且低水位期间的通量水平显著高于高水位期间。不仅如此,低水位运行期间(8月、5月)时通量的变幅亦显著大于高水位运行期。研究期间,8 月高阳平湖水域 CH₄通量峰值出现在 18:00 左右,α_{CH₄} 为 20.48%,时通量数据序列的 CV 达到 0.794。5 月 CH₄通量峰值出现在 16:00 左右,α_{CH₄} 达到 67.36%,CV 亦达到 2.289,该现象具有突发性,可能与观测期间静态箱内出现气泡短时持续释放有关。高水位运行期间,11 月时通量的峰值出现在 4:00 至 8:00 左右,α_{CH₄} 均超过 12%;2 月时通量峰值出现在 16:00,α_{CH₄} 达到 17.14%,其时变化过程同 11 月并不相同(图 6 和图 7)。

为方便对最佳观测时刻的选取,将 α 的日均值 (α = ±8.33%,符号含义同式 2) 用虚线标于图 7 中。可以看出,不同水库运行期高阳平湖水域 α 日均值出现的时间并不相同,且同一时期 α_{CO₂} 和 α_{CH₄} 日均值出现的时段也不一致。根据不同采样时期 α_{CO₂} 和 α_{CH₄} 的时变化特征初步判断:

α_{CO₂} 日均值出现时间:8 月约为 17:00 和 7:00;11 月约为 9:00 和 17:00;2 月约为 17:00;5 月约为 13:00 和 23:00。

α_{CH₄} 日均值出现时间:8 月约为 9:00 和 19:00;11 月约为 15:00 和 3:00;2 月约为 13:00 和 21:00;5 月约为 13:00 和 19:00。

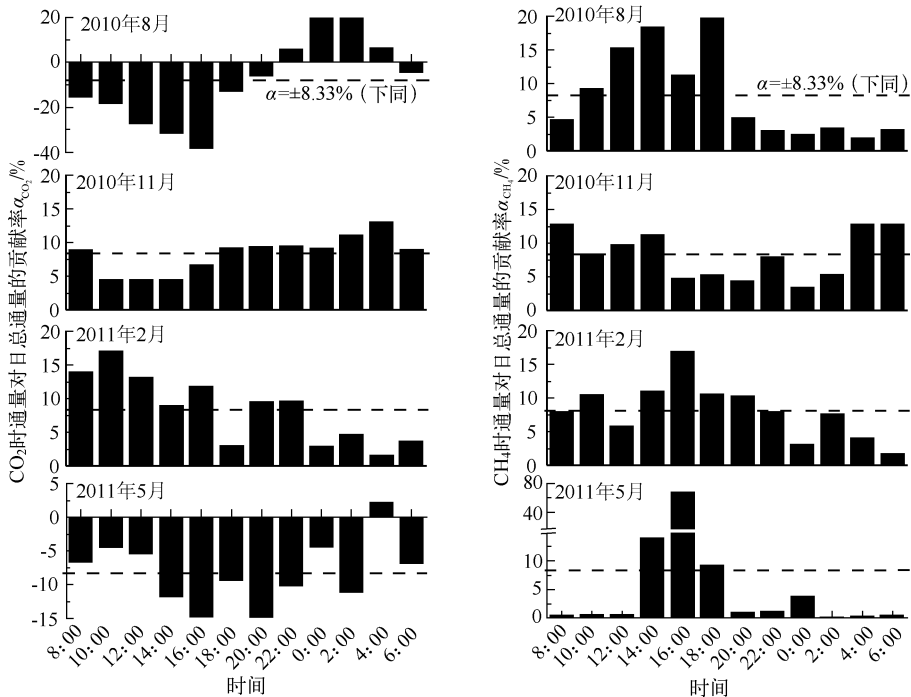


图 7 研究期间时通量对日总通量贡献率 α 的时变化过程

Fig. 7 Diel variations of the contribution percentage (α) of hourly fluxes to daily fluxes during the research

进一步研究发现 CO₂ 与 CH₄ 全年通量数据序列呈显著负相关关系(图 8), r_{CO₂,CH₄} = -0.794 (Spearman 相关系数, sig. < 0.01), 近似呈指数递减规律, 表明研究水域 CO₂ 和 CH₄ 通量过程并不具有同步性, 二者在水

生生态系统中产汇过程及其调控机制在全年均呈现出较显著的差异。

2.2 主要环境参量变化及其对通量的影响

水库 CO₂、CH₄ 产汇以及影响水-气界面温室气体通量的生态过程较多(图 9),但大体上可以分为 2 类:1)影响水中 CO₂、CH₄ 的生态过程,即水生生态系统呼吸作用与光合放氧,底泥细菌产甲烷过程等;2)影响水-气界面 CO₂、CH₄ 交换的气象过程,如水温、气温、风速等。故本研究选取 Chl. a、DO、pH、水温、瞬时风速、水汽温差(水温同气温的差值)作为主要环境参量,通过相关性分析,辨识影响 CO₂、CH₄ 昼夜通量变化的主要环境过程,上述环境变量的昼夜变化过程见图 10,Spearman 相关性分析结果见表 2。

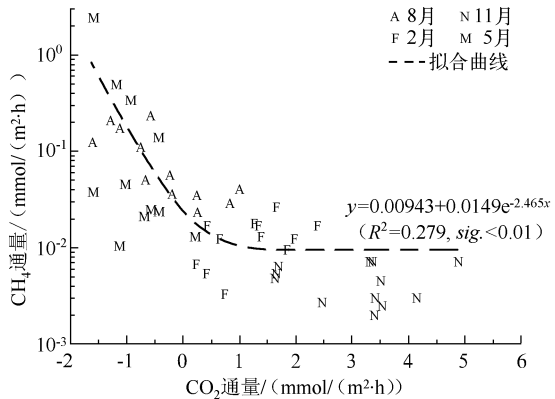


图 8 研究期间 CO₂ 通量与 CH₄ 通量关系与拟合结果

Fig. 8 Scatter plot and curve fitting result of CO₂-CH₄ fluxes during the research

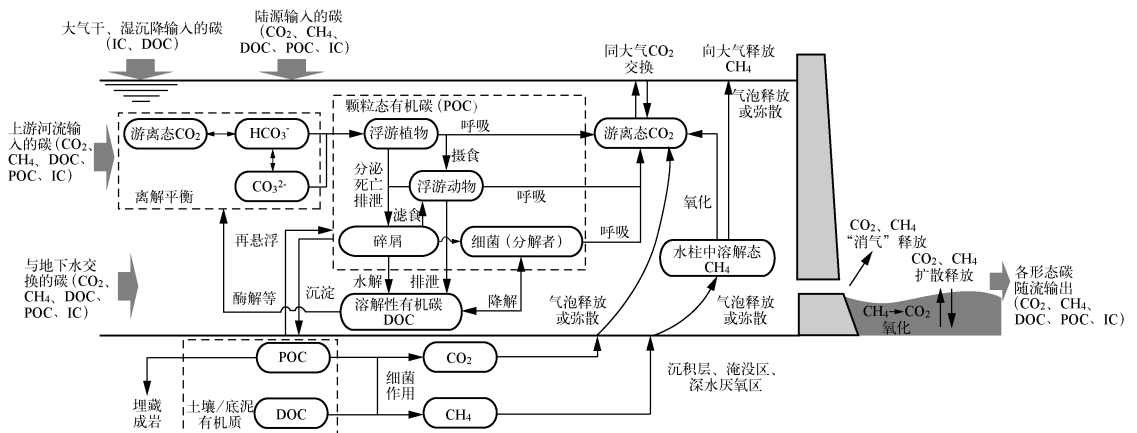


图 9 水库碳的生物地球化学循环与 CO₂ 和 CH₄ 产汇过程(在文献[21]基础上重绘)

Fig. 9 Biogeochemical cycling of carbon in reservoir ecosystem and the sink process of CO₂ and CH₄ (revised based on reference [21])

分析发现,在不同月份开展的昼夜跟踪采样中,CO₂、CH₄ 通量的主要影响因素并不相同,且不同月份之间的差异亦较明显.低水位运行期间,温度升高、Chl. a 增加所引起的相应水生态过程改变同 CH₄ 通量的增加密切相关;高水位运行的 2 月,水汽温差和瞬时风速对 CH₄ 通量影响更为显著,但在蓄水初期的 11 月上述现象并不显著.对于 CO₂ 通量而言,8、2 和 5 月的 CO₂ 通量与 Chl. a 均保持显著的负相关关系,但 11 月的 Chl. a 则与 CO₂ 通量呈显著正相关.昼夜温度变化对 CO₂ 通量的影响在 8 和 11 月表现显著,但在 2 和 5 月并不显著.相应地,DO、pH 的昼夜变化在 8、2 和 5 月均与 CO₂ 有密切的统计相关性.水汽温差和瞬时风速对 CO₂ 通量的影响在高水位运行期(11 和 2 月)显著强于低水位运行期(8 和 5 月).但在 11 月,水汽温差和瞬时风速均与 CO₂ 通量呈正相关关系;而 2 月水汽温差与 CO₂ 通量呈负相关关系.大体上,低水位运行期间 Chl. a、DO、水温等反映水生态过程的参量对 CO₂、CH₄ 通量的影响显著强于高水位运行期;而高水位运行期瞬时风速和水汽温差等反映短时气象过程的参量对 CO₂、CH₄ 通量的影响则更加显著.上述结果在一定程度上验证了 2.1 节关于 CO₂、CH₄ 产汇与调控机制存在差异性的初步判断。

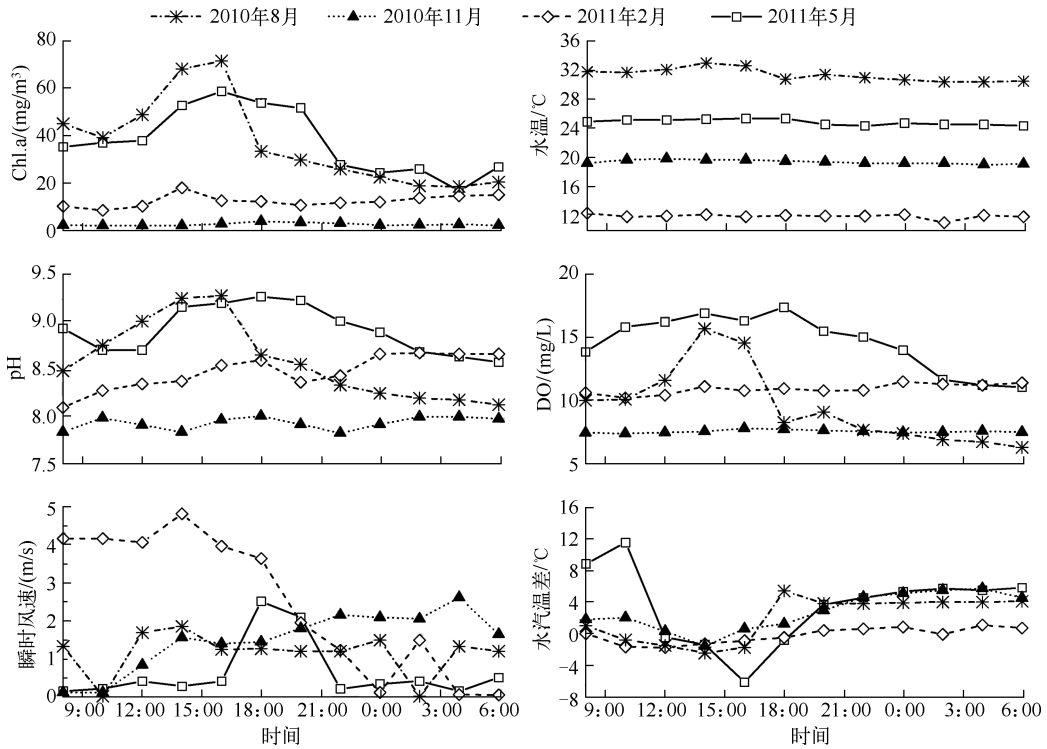


图 10 研究期间主要环境参数的昼夜变化过程

Fig. 10 Diel variation of main environmental parameters during the research

表 2 主要环境要素同 CO₂ 和 CH₄ 昼夜变化的相关性系数 (n = 12) *

Tab. 2 Correlation coefficients of CH₄ and CO₂ with main environmental parameters (n = 12)

环境要素	2010 年 8 月		2010 年 11 月		2011 年 2 月		2011 年 5 月	
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
Chl. a	-0.944	0.783	0.699	—	-0.692	—	-0.622	0.692
DO	-0.895	0.762	—	—	-0.874	—	-0.612	0.783
pH	-0.888	0.832	—	—	-0.838	—	-0.606	0.760
水温	-0.918	0.687	-0.724	—	—	—	—	0.584
水汽温差	0.758	—	0.762	—	-0.664	-0.608	—	-0.748
瞬时风速	—	—	0.790	—	0.704	0.690	—	—

* 显著性水平 sig. ≤ 0.05; “—” 为未通过显著性检验, 相关系数不具统计意义。

3 讨论

在陆地生态系统中采用静态箱法对 CO₂、CH₄ 进行监测的时间选取通常为 9:00 至 11:00, 其主要依据来自于 Davidson 等^[22] 对温带森林土壤呼吸过程昼夜观测与主要影响因素 (水分、温度) 的统计分析, 国内李晶等^[23] 对稻田 CH₄ 通量的非连续监测亦对上述认识予以支撑. 然而, 水库温室气体监测时间选取是否沿用上述时段仍值得商榷. 一方面, 水库水柱 CO₂、CH₄ 产汇机制及其影响因素同其生态系统结构功能密切相关, 水库生境下浮游植物光合固碳、浮游生物呼吸、底泥产甲烷等都是影响 CO₂、CH₄ 产汇的关键, 这显著区别于土壤呼吸过程; 另一方面, 水库水体 CO₂、CH₄ 向大气的释放/吸收是水-气两相界面间的交换过程, 不仅受到风

力、流速等外力扰动,也同两相之间的气体浓度差异密切相关,与土-气间气体经由土壤孔隙向大气释放的过程不同。

通过前述分析可以看出,水域 CO₂ 昼夜通量变化可能更显著地受到水柱光合/呼吸过程的影响。昼间浮游植物光合作用消耗水体中 CO₂ (以 HCO₃⁻ 为主要形态),促使水柱中 CO₂ 分压下降。在低水位运行期间,水体光热条件优越,适合藻类生长。在光合作用强烈的 8 和 5 月,昼间藻类生长消耗水柱中全部的 CO₂,使之出现碳汇(通量为负值)的现象。昼夜短时气象要素(水汽温差、瞬时风速)改变对 CO₂ 的影响在高水位运行的 11 和 2 月可能更为显著。该时期 CO₂ 昼夜通量变化可能来源于 3 方面的驱动因素:1) 随着水位升高,从 145 m 蓄水至 175 m,高阳平湖水域面积从约 3 km² 增加到 4 km²,增加了近 25%,增加了水气界面接触面积,风生扰动和界面温差对水气界面气体传输的影响日渐明显^[13];2) 高阳平湖水域水位升高将导致的另一环境效应便是大量近岸消落区被淹没,消落区有机质(来源于落干期恢复的植被、农业耕作秸秆等)淹没于水底并逐渐被降解^[24];3) 水位雍升至高水位的同时,气温逐渐下降,藻类整体进入非生长季节,光合速率相对减弱导致其对水中 CO₂ 分压消耗能力远低于 8 和 5 月。上述 3 方面要素对 CO₂ 通量的定量贡献,限于数据量和实验方案有限还难以有效区分,有待后续研究中进一步明确。

对于 CH₄ 而言,水柱中 CH₄ 主要来源于水库底部厌氧状态下的产甲烷过程。因此水柱中 CH₄ 分压受 3 方面因素的影响:1) 持续稳定的底部厌氧区;2) 相对较优的温度条件;3) 水库底部有足够量的有机质^[21]。从上述分析中可以看出,全年 CH₄ 通量与气温变化密切相关。5 和 8 月是 CH₄ 释放通量较高的时期,而 11 和 2 月则是 CH₄ 通量较低的时期,且在低水位时期水温昼夜变化对 CH₄ 通量影响明显,验证了水库 CH₄ 通量产汇过程受控于温度变化的基本认识。仅在 2 月气温回升时期 CH₄ 同瞬时气象过程(瞬时风速和水汽温差)的相关性存在统计意义,其他时期并无显著的统计关系(表 2)。

4 参考文献

- [1] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C *et al.* Greenhouse gas emissions-fluxes and process: Hydroelectric reservoirs and natural environments. New York: Springer, 2005.
- [2] Fearnside PM. Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon as sources of “greenhouse” gases. *Environmental Conservation*, 1995, **22**(1): 7-19.
- [3] Rosa LP, Santos MA, Matvienko B *et al.* Biogenic gas production from major Amazon reservoirs. *Hydrological Processes*, 2003, **17**:1443-1450.
- [4] Duchemin É, Lucotte M, Camuel R. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs in the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**:529-540.
- [5] Demarty M, Bastien J, Tremblay A. Annual follow-up of gross diffusive carbon dioxide and methane emissions from a boreal reservoir and two nearby lakes in Québec, Canada. *Biogeosciences*, 2011, **8**:41-53.
- [6] 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.
- [7] Åberg J, Bergström AK, Algesten G *et al.* A comparison of the carbon balances of a natural lake (L. Öträscket) and a hydroelectric reservoir (L. Skinnmuddselet) in northern Sweden. *Water Research*, 2004, **38**:531-538.
- [8] St Louis V, Kelly C, Duchemin É *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience*, 2000, **50**:766-775.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 郭劲松,蒋 滔,李 哲等. 三峡水库澎溪河春季水华期 p(CO₂) 及影响因素分析. *水科学进展*, 2011, **22**(6): 829-838.
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] Li Z, Guo J, Fang F *et al.* The nutrients-phytoplankton relationship under artificial reservoir operation: a case study in tributaries of the Three Gorge Reservoir, China. In: Han B, Liu Z eds. Tropical and sub-tropical reservoir limnology in China: theory and practice. New York: Springer, 2010: 193-200.
- [15] Li Z, Guo J, Long M *et al.* Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Xiaojiang River-A tributary of the Three Gorges Reservoir. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2009, **3**(3): 334-340.
- [16] 李哲, 方芳, 郭劲松等. 三峡小江(彭溪河)藻类功能分组及其季节演替特点. 环境科学, 2011, **32**(2): 392-400.
- [17] 李哲, 郭劲松, 方芳等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 509-517.
- [18] 方芳, 周红, 李哲等. 三峡小江回水区真光层深度及其影响因素分析. 水科学进展, 2010, **21**(1): 113-119.
- [19] 蒋滔, 郭劲松, 李哲等. 三峡水库不同运行状态下支流彭溪河水-气界面温室气体通量特征初探. 环境科学, 2012, **33**(5): 1463-1470.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法: 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-285.
- [21] Goldenfum J. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs. The UK: The International Hydropower Association, 2010: 1-20.
- [22] Davidson EA, Belk E, Boone RD. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 217-227.
- [23] 李晶, 王明星, 陈德章. 稻田甲烷排放非连续测量中采样时间的选择. 中国科学院研究生院学报, 1998, **15**(1): 24-29.
- [24] Chen H, Yuan X, Chen Y *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: D21306. doi:10.1029/2011JD016244.