

# 三峡水库澎溪河水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 通量特征及影响因素初探

秦 宇<sup>1</sup>, 王紫薇<sup>1</sup>, 李 哲<sup>2</sup>, 杨博逍<sup>1</sup>

1. 重庆交通大学, 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 中国科学院水库水环境重点实验室, 重庆 400714

**摘 要:** 澎溪河流域是三峡水库典型支流, 对水库区域碳循环及区域化学风化的影响非常重要。2016 年 5 月—2017 年 2 月对澎溪河流域水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 通量特征进行监测与分析, 采用顶空平衡法结合模型估算法计算表层水体 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 的分压以及水 - 气界面的交换通量, 并运用 spearman 相关分析法分析了二氧化碳和甲烷的分压和排放通量与其他环境变量之间的相关性。研究发现: 澎溪河是温室气体排放“源”, 表层水体  $p(\text{CO}_2)$  平均值为  $(1807.635 \pm 315.605) \mu\text{atm}$  ( $1 \mu\text{atm} = 0.101325 \text{ Pa}$ , 下同), 表层水体  $p(\text{CH}_4)$  平均值为  $(218.7725 \pm 127.9425) \mu\text{atm}$ ; CO<sub>2</sub> 扩散通量平均值为  $(32.53 \pm 3.86) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 水 - 气界面 CH<sub>4</sub> 扩散通量平均值为  $(0.208 \pm 0.143) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 通量与分压趋势基本保持一致。通过与世界上典型河流温室气体扩散通量对比, 得出澎溪河流域 CO<sub>2</sub> 通量释放量为中等水平, 而 CH<sub>4</sub> 扩散通量较小, 且 CH<sub>4</sub> 通量与  $p(\text{CH}_4)$ 、水温、pH 值显著正相关, 而水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 扩散通量与  $p(\text{CO}_2)$  显著正相关, 与 DO、pH 值、叶绿素 a (Chl-a) 显著负相关。

**关键词:** 澎溪河; CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; 水 - 气界面通量; 影响因素

## CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> flux across water-air interface and environmental factors in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir

QIN Yu<sup>1</sup>, WANG Ziwei<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, YANG Boxiao<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. Key Laboratory of Reservoir Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

**Abstract: Background, aim, and scope** The reservoir has always been a source of water and electricity providing energy and convenience for human beings. However, due to the huge water storage capacity, complex dam

收稿日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-10-18; 网络出版: 2018-10-29

**Received Date:** 2018-06-19; **Accepted Date:** 2018-10-18; **Online first:** 2018-10-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51679226, 51609026); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1500506); 重庆市基础科学与前沿技术研究项目 (cstc2017jcyjAX0280)

**Foundation Item:** National Natural Science Foundation of China (51679226, 51609026); Scientific and Technological Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1500506); Chongqing Basic Science and Frontier Technology Research Project (cstc2017jcyjAX0280)

**通信作者:** 秦 宇, E-mail: qinyu54001@163.com

**Corresponding Author:** Qin Y, E-mail: qinyu54001@163.com

**引用格式:** 秦 宇, 王紫薇, 李 哲, 等. 2019. 三峡水库澎溪河水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 通量特征及影响因素初探 [J]. 地球环境学报, 10(2): 177–189.

**Citation:** Qin Y, Wang Z W, Li Z, et al. 2019. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> flux across water-air interface and environmental factors in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(2): 177–189.

operation and maintenance process, the reservoir has become the main carrier of carbon cycle in the ecological environment, which emits loads of greenhouse gas to atmosphere. As one of the world's major dams, the Three Gorges Dam transports many carbon compounds to nature. And this phenomenon has aroused the worldwide scholars' attention. However, there is no uniform method to monitor the absorption and emission of greenhouse gas from reservoir till now. As the typical tributary of the Three Gorges Reservoir, Pengxi River plays a significant role in carbon cycle and chemical efflorescence weathering in reservoir region. Consequently, this paper seeks to establish a method for quantifying gas emissions and to analyze how greenhouse gases change over the course of a year. Moreover, it is also requested what is the major attributer for emission of greenhouse gas. This paper supervises and analysis the fluxes of  $\text{CO}_2$  and methane in water-gas interface in Pengxi River from May 2016 to February 2017. **Materials and methods** In reference of previous literature, this study adopted the combination of Headspace balance method and model estimation to obtain the partial pressures of carbon dioxide and methane in surface water and exchange fluxes of  $\text{CO}_2$  and methane. Additionally, this paper also used field measuring instruments to measure the physical and chemical variables so as to analyze the effects of these factors on greenhouse gas release. The correlation between the partial pressures and fluxes of  $\text{CO}_2$  and methane and environment variables were analysed by means of the spearman correlation index based on SPSS software. **Results** Through researching, it was achieved that Pengxi River was the source of greenhouse gas emission. The average value of  $p(\text{CO}_2)$  in surface of waters was analysed to be  $(1807.635 \pm 315.605) \mu\text{atm}$  ( $1 \mu\text{atm} = 0.101325 \text{ Pa}$ , the same below) in Pengxi River, while that of  $p(\text{CH}_4)$  was  $(218.7725 \pm 127.9425) \mu\text{atm}$ ; and the average value for  $\text{CO}_2$  flux in water-gas interface was  $(32.53 \pm 3.86) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{CH}_4$  flux average value was  $(0.208 \pm 0.143) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , the trend of the partial pressure and flux almost remained the same. Moreover, in terms of physical and chemical factors, water temperature, dissolved oxygen (DO) and pH are proved to be generally higher in summer. **Discussion** In comparison with other similar study in literature, it can be concluded that the diffusive of  $\text{CO}_2$  was higher in mainstream than that in tributary. The  $\text{CO}_2$  flux in the Pengxi River basin was moderate, higher than the flux in some small reservoir but smaller than that in large lakes and rivers. And the data for  $\text{CO}_2$  in this paper are much similar with previous study in Pengxi River. With respect to methane, the amount of methane released from tropical waters is greater. The amount of methane released from Pengxi River located in subtropical zone is not only much smaller than that in tropical waters, but also less than that from other rivers in subtropical zone as well as rivers in temperate zone. Moreover, there was a significant positive correlation between  $\text{CH}_4$  flux,  $p(\text{CH}_4)$ , water temperature, and pH, while the  $\text{CO}_2$  diffusion flux at the water-air interface was significantly positively correlated with  $p(\text{CO}_2)$  and negatively correlated with DO, pH, and Chl-a. Other environmental factors showed vague effects on the fluxes. **Conclusions** Compared with the diffusive fluxes of greenhouse gases in typical rivers in the world, the study found that the release of  $\text{CO}_2$  flux in the Pengxi River basin was moderate, while the diffusion flux of  $\text{CH}_4$  was small. DO, pH, Chl-a and water temperature have apparent impact on the release of greenhouse gas. Furthermore, the emission of greenhouse gas is greater when water carry larger capacity of that gas. **Recommendations and perspectives** This research methods can be applied to other reservoirs and extensive analysis of the effects of other influencing factors on greenhouse gas emissions such as nitrogen compounds. In addition, the conclusions which have been achieved give evidence for controlling greenhouse gas emissions in future study.

**Key words:** Pengxi River;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{CH}_4$ ; diffusion flux; environmental factors

水电是具有显著减排效应的清洁能源形式(蒋滔等, 2012)。但近年来在热带、温带等水库的研究结果表明:在筑坝蓄水过程中,被淹没库区中的有机质会分解成为腐殖酸、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、氮、磷等,进而产生一定量的温室气体(Kelly et al, 1997;

St Louis et al, 2000; 周广胜, 2003; Demarty et al, 2009),甚至个别热带水库温室气体释放通量强于同等电能输出的火电站(dos Santos et al, 2006)。目前世界水库总面积约为 50 万  $\text{km}^2$ ,相当于地球天然湖面的 1/3(刘丛强等, 2009)。对

于各种水库水-气界面温室气体通量的研究一直是过去十几年该领域的研究热点。目前对水库温室气体通量研究主要集中在热带地区,而在亚热带气候背景下开展的该类研究相对匮乏,且温室气体通量水平及其影响机制仍存在较大科学分歧。

三峡水库是亚热带气候条件下的超大型水库,其生境特征、生态结构与功能、关键生源要素对全球生态系统碳循环等均有极为显著的作用(李哲等,2013)。在三峡水库遴选典型水域开展研究,能有效完善对水库生态系统温室气体排放的认识,明确其对全球碳循环的影响作用,重要性不言而喻。澎溪河流域是三峡库区中段、北岸流域中面积最大的支流,对三峡库区的碳循环起着举足轻重的作用,故本文选取澎溪河作为研究对象,研究碳排放通量。目前对于水-气界面气体排放通量监测常用的有两种方法:一种为静态箱法-气相色谱法,另一种为顶空平衡法-气相色谱法与TBL模型估算法结合。静态箱-气相色谱法通常只能获得点上的通量数据,且劳动强度大,气体分析成本较高,不适宜开展大区域、长期的观测,因此静态箱只适用于对静态水体的观测(Tremblay et al, 2005)。而模型估算法因其简单、灵活、易操作等特点在野外现场监测中最为常用(秦宇等,2017)。考虑到澎溪河水体流动性较强,采样点位之间距离远,监测持续时间较长,且点位的地理与气候条件差,静态箱法可行性较弱。除此以外,由于箱外水体扰动,静态箱法所获通量数据离散性较为显著,对比实验表明TBL估算法所获通量结果总体上较前者更为稳定(姚晓等,2015)。因此本研究采用顶空平衡法结合TBL模型估算法对澎溪河支流-气界面温室气体展开监测研究,从2016年5月开始,开展为期10个月的逐月监测,得到拟定采样点位表层水体CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>分压数据与各环境参数的实测资料,估算水-气界面CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>的交换通量,并得出环境变量与气体分压通量的关系,以期深入研究评价水库的温室气体效应提供理论与数据支撑,为揭示三峡水库支流水域碳通量特征与循环机制提供更丰富的科学信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

澎溪河处于北纬31°00'—31°42',东经107°56'—108°54',流域面积5172.5 km<sup>2</sup>,全长约182 km,位于金沙江下游。发源于重庆市开县白

泉乡鼓村的东河,与另一条支流南河在开县县城汇合后在开县渠口与第三条支流普里河汇合,最后于云阳县双江镇汇入长江,河口距三峡大坝约247 km,河道平均坡降1.25‰,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的支流。

本研究根据澎溪河流域的地理特征,布设4个采样点,分别为(按上游到下游的顺序):开县温泉(WQ)、开县汉丰湖(HFH)、开县白家溪(BJX)、高阳平湖(GY)。采样点流域与采样点示意图见图1,采样点基本特征见表1。因水流湍急,故在水体样品采集时,沿程利用当地小船在河道中心采样,并同步采集相关环境参数指标。

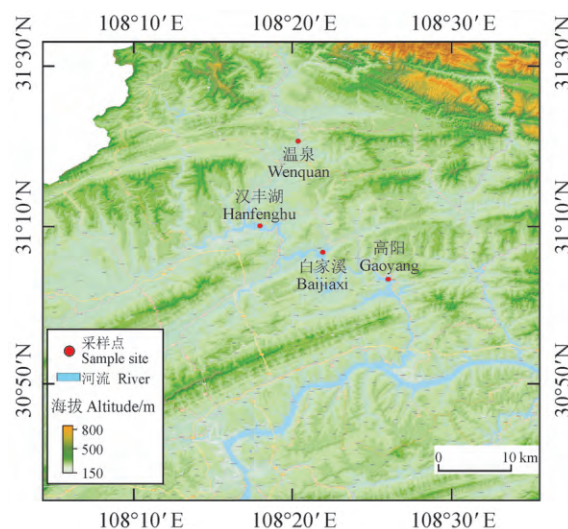


图1 采样点流域及采样点示意图  
Fig.1 Sketch map of backwater area and sampling spots in the Pengxi River

### 1.2 采样与分析方法

从2016年5月开始,逐月对支流所有采样点位进行监测,为期10个月,所有采样点监测时间控制在每月中旬15—20日。大量关于温室气体采集研究将上午9:00—11:00(吴铭,2016)作为当日的通量代表时间,吴玉源(2012)选择在上午9:00—11:00对三峡水库消落带进行监测,赵炎(2011)在9:00—14:00监测三峡水库香溪河流域内温室气体排放。为获得较系统和准确的数据,本研究尽量控制在相同时间——上午10:00采样,考虑极个别月份由于天气等原因,存在野外试验的不确定性,选择上午10:00至下午15:00



作为采样时段。采样工具为 5 L 采水器，所需水样均只采集各点位 0.5 m 表层水。除现场手持仪器分析指标外，其余水样当天即刻送回实验室，并于 48 小时内完成所有测试分析工作。现场手持仪器

分析指标包括：水温、溶解氧（DO）、pH 值、气温、大气压、风速等。水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 扩散通量利用顶空平衡法结合 TBL 模型估算法进行计算。

表 1 澎溪河各采样点基本特征  
Tab.1 Features of the sampling spots in the Pengxi River

采样点 Sampling site	坐标 Coordinate	基本特征 Basic features
上游 Upstream	温泉 Wenquan	原始河道，控制 24% 的澎溪河流域面积，水面高程 190 m 以上，不受三峡蓄水影响，水深常年保持在 1—2 m。 The original river channel controls 24% of the area of the Pengxi River basin. The water surface elevation is over 190 m, which is not affected by the Three Gorges water storage. The water depth maintains at 1—2 m.
	汉丰湖 Hanfenghu	澎溪河支流（南河）与干流（东河）的汇合处，由于研究期间下游开县调节坝仍未开始蓄水，故低水位运行期为河道特征，最大水深不足 5 m；高水位运行期形成开阔水域，水域面积大约 6 km <sup>2</sup> ，最大水深 10 m。 The confluence of the tributary of the Pengxi River (Nanhe River) and the main stream (Donghe River), due to the fact that the downstream Kaixian County dam has not started to store water during the study period, the low water level operation period is characterized by the river channel, the maximum water depth is less than 5 m; the high water level operation period is open. In the waters, the water area is about 6 km <sup>2</sup> and the maximum water depth is 10 m.
中游 Midstream	白家溪 Baijiaxi	于白家溪与澎溪河干流交汇处上游 500 m，断面呈峡谷型地貌特征。白家溪 - 养鹿高水位运行期最大水深 15—20 m，夏季低水位运行期最大水深不足 10 m。 It is 500 m upstream of the intersection of Baijiaxi and Pengxi River, and the section is characterized by canyon geomorphology. The maximum water depth of the Baijiaxi-Yanglu high water level operation period is 15—20 m, and the maximum water depth during the low water level operation period in summer is less than 10 m.
下游 Downstream	高阳 Gaoyang	蓄水后成为水域面积在 5—6 km <sup>2</sup> 的平湖水域，水库在 145 m 水位下时，平均水深不足 10 m，近似于浅水湖泊；冬季蓄水期最大水深达到 30 m 以上，接近于深水湖泊。 After storage, it becomes a Pinghu water area with a water area of 5—6 km <sup>2</sup> . When the reservoir is under 145 m water level, the average water depth is less than 10 m, which is similar to shallow lakes. The maximum water depth during winter storage period is more than 30 m, which is close to deep lakes.

野外测量仪器在采样工作前都已经过标准校正程序。水样用水质取样器采集，每个点位只取 0.5 m 表层水，顶空瓶置于采水器中，以淹没状

态进行密封，采集的水样与顶空瓶均低温保存；pH、盐度采用 YSI 野外多参仪现场测定；气温、大气压通过手持式数字大气压计现场测定；碱度

(TA) 采用 HACH 公司的微量滴定器及标准硫酸溶液现场滴定 (精度 1.25  $\mu\text{L}$ ) ; 光合作用有效强度采用 LI-COR190SA 光量子仪现场测定; 太阳辐射强度来自照度计; 水温及溶解氧 (DO) 采用 YSI ProODO 溶解氧仪 (精度分别为 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 、0.01  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 现场测定; 叶绿素 a (Chl-a) 采用丙酮萃取分光光度法测定。水体中  $p(\text{CO}_2)$  与  $p(\text{CH}_4)$  根据亨利系数、水温、大气压、顶空瓶气液体积比 5/7, 通过安捷伦 7820A 气相色谱仪, 利用顶空平衡法计算得出; 水-气界面气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 交换通量采用 TBL 模型估算法原理得出, 对于气体交换系数  $k_x$  的确定, 根据小型气象站测定的水面上方瞬时风速 ( $U_1$ ) (精度 0.1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 并根据式 (1) 换算成水面上方 10 m 风速 ( $U_{10}$ ,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) :

$$U_{10} = 1.22 \times U_1 \quad (1)$$

对于大气中的  $C_{\text{air}}$ , 澎溪河受农田、湿地、人为等因素影响很小, 参考关于黄河以及长江干流的相关研究 (Salençon and Thébault, 1996; Hamilton, 1997), 本研究取大气 CO<sub>2</sub> 平均浓度  $390.5 \times 10^{-6} \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、CH<sub>4</sub> 平均浓度  $1.803 \times 10^{-6} \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (IPCC, 2014)。具体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 监测方法参见秦宇 (2017)。

### 1.3 数据处理方案

本研究的实验分析及计算所得数据全部录入 SPSS<sup>®</sup> 或 Origin<sup>®</sup> 进行统计分析, 采用 spearman 相关性分析对  $p(\text{CO}_2)$ 、 $p(\text{CH}_4)$ 、CO<sub>2</sub> 通量、CH<sub>4</sub> 通量及各理化指标 (pH、TA、DO、水温、Chl-a 等) 进行回归分析, 探讨数据间变化的线性相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 澎溪河水-气界面 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 分压与通量特征分析

#### 2.1.1 澎溪河表层水体 CO<sub>2</sub> 分压

图 2 展示了三峡水库支流澎溪河点位 CO<sub>2</sub> 分压。由图 2 可知: 支流各点位全年 CO<sub>2</sub> 分压表现出非常大的差异。支流 WQ 点位处于澎溪河上游, 三峡水库水位变化对其影响较小, 表层水体 CO<sub>2</sub> 分压值整体趋于稳定, 变化不大, 最大值为 8 月 2027.40  $\mu\text{atm}$ , 最小值为 2 月份 1204.81  $\mu\text{atm}$ 。而 HFH、BJX 和 GY 点由于受三峡水库水位波动影响, 处于澎溪河中游的 HFH 点位与 BJX 点位相似, 分别在 7 月份、9 月份 CO<sub>2</sub> 分压较低, 而在

8 月份、10 月份较高, 随着 10 月份库区水位上升后, CO<sub>2</sub> 分压值整体呈减小趋势。分析其原因, 由于支流流速较低适合浮游植物等生长, 根据对溶解氧的监控, 8 月份 BJX 点位 DO 相对于 7 月、9 月低很多, 证明浮游植物呼吸作用旺盛, 因此水体中 CO<sub>2</sub> 分压较大。同理可解释汉丰湖 8 月出现小高峰的情况。在 9 月蓄水期中, 新建水库中被淹没的以及来自河流输入的有机质分解加快, 使得水库 CO<sub>2</sub> 分压增高, 10 月 CO<sub>2</sub> 分压达到最大值, HFH 点位与 BJX 点位 CO<sub>2</sub> 分压最大值分别为 5207.22  $\mu\text{atm}$ 、3389.87  $\mu\text{atm}$ 。由于汉丰湖夏季接近干枯状态, 因此蓄水后, 淹没的土地植被更多, 更多的有机质被分解, 因此水体中 CO<sub>2</sub> 分压值也相对更大。10 月高峰过后, 浮游植物逐渐增加, 光合作用强度大于呼吸作用, 水体中 CO<sub>2</sub> 分压值逐渐降低。同样 6 月 GY 点位 DO 含量较低, 浮游植物呼吸作用强, 随着水位的上升, 土地与植被被淹没, 有机质被分解释放 CO<sub>2</sub>, 在 11 月达到最大值 2662.67  $\mu\text{atm}$ , 过后光合作用强于呼吸作用, CO<sub>2</sub> 分压值逐渐降低。全年澎溪河  $p(\text{CO}_2)$  平均值为  $(1807.635 \pm 315.605) \mu\text{atm}$ 。

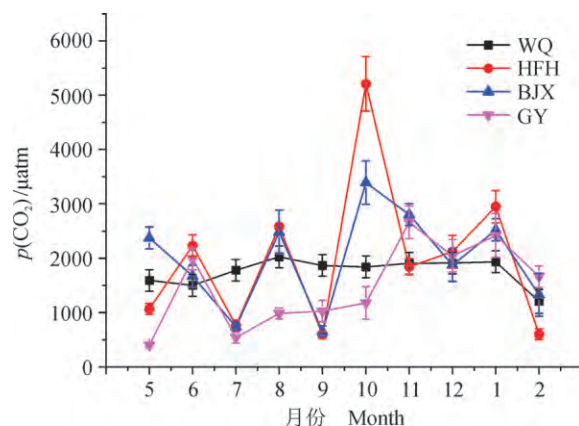


图 2 澎溪河点位 CO<sub>2</sub> 分压结果  
Fig.2 Results of the partial pressure of CO<sub>2</sub> in Pengxi River

#### 2.1.2 澎溪河表层水体 CH<sub>4</sub> 分压

图 3 展示了从 2016 年 5 月到 2017 年 2 月三峡水库支流澎溪河点位 CH<sub>4</sub> 分压, 由于 2016 年 9 月以后所有点位波动情况远远小于 9 月前 CH<sub>4</sub> 分压的变化情况, 因此以 9 月为分界, 分为图 3a 与图 3b 分别显示从 2016 年 5 月到 2016 年 9 月与 2016 年 9 月到 2017 年 2 月的变化情况。四个点

位 2016 年 5 月到 8 月的甲烷分压普遍高于 9 月至 2017 年 2 月的甲烷分压值,但在位于澎溪河上游的 WQ 与澎溪河支流的 BJX 点位整体  $\text{CH}_4$  分压较低,最大值分别为  $298.37 \mu\text{atm}$ 、 $278.24 \mu\text{atm}$ 。而 WQ、HFH、GY 点位表现出相似的规律,从 6、7 月开始  $\text{CH}_4$  分压逐渐增加,在 8、9 月  $\text{CH}_4$  分压达到最大值,分别为  $298.37 \mu\text{atm}$ 、 $1405.37 \mu\text{atm}$ 、 $705.36 \mu\text{atm}$ ,9 月过后急速减小,之后上下波动,但变化不大。由于河流底部产生的  $\text{CH}_4$  在随着水位上升的过程中,会逐渐被水体中含有的溶解氧

氧化,而夏季水位较低,在底部产生相同数量的  $\text{CH}_4$  时水越浅其含量也就越大。9 月后随着水位的上升,河底产生的  $\text{CH}_4$  在上升过程中逐渐被氧化,导致  $\text{CH}_4$  值显著减小。而 BJX 点位在 6 月出现水华现象,厌氧环境下产甲烷菌分解有机物释放  $\text{CH}_4$ ,导致 6 月  $\text{CH}_4$  分压值达到全年最大值,6 月后 BJX 点位水体恢复正常,8 月到 10 月间  $\text{CH}_4$  分压值上下波动,10 月后随着水位的上升, $\text{CH}_4$  分压值再减小。全年表层水体  $p(\text{CH}_4)$  平均值为  $(218.7725 \pm 127.9425) \mu\text{atm}$ 。

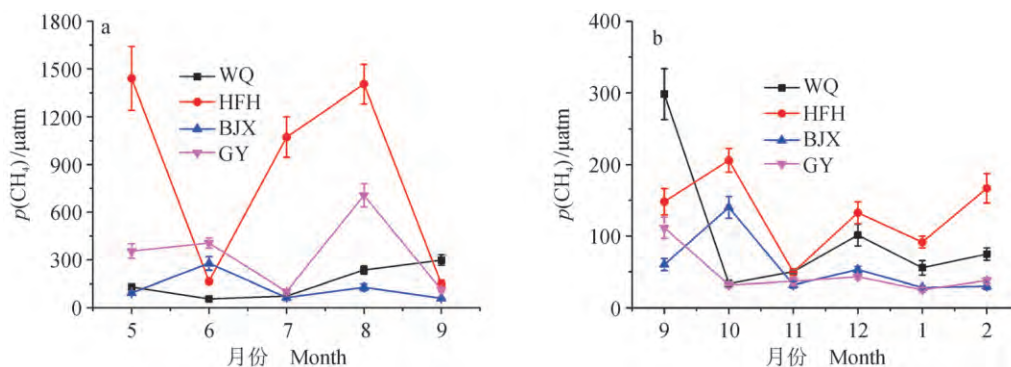


图3 澎溪河点位  $\text{CH}_4$  分压结果  
Fig.3 Results of the partial pressure of  $\text{CH}_4$  in Pengxi River

### 2.1.3 澎溪河水 - 气界面 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 扩散通量

图4显示澎溪河各点位水 - 气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  扩散通量监测结果。由图可知:三峡库区支流澎溪河点位水 - 气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  扩散通量变化趋势基本与水体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  分压一致,所有值均为正,表现为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  释放的“源”,其中 WQ 点位水 - 气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  扩散通量都较小,其水 - 气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量全年变化不大, $\text{CH}_4$  扩散通量除夏季较大(最大值为 9 月  $0.012 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,全年水 - 气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量整体较小;HFH 点位水 - 气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量 10 月最大,最大值为  $4.30 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,因为 10 月蓄水后淹没大量的土地与植被,碳的大量摄入造成  $\text{CO}_2$  释放增加。HFH 点位水 - 气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量仍是在夏季达到最大值,最大值为  $0.057 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。BJX 点位在夏季 8—10 月  $\text{CO}_2$  扩散通量达到顶端,10 月到达最大值 ( $2.56 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),而后因为水位的上升与浮游植物增加,光合作用增强, $\text{CO}_2$  扩散通量整体逐渐减少。而 BJX 点位全年整体  $\text{CH}_4$

扩散通量较小。GY 点位由于 6 月浮游植物呼吸作用较强,该月水 - 气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量较大,考虑水容积较大,在蓄水后的 1 月达到最大值,最大值为  $2.83 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,该点位水 - 气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量在 8 月枯水期达到最大值,最大值为  $0.031 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,蓄水后随着水位上升,水 - 气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量急速减少。全年澎溪河水 - 气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量平均值为  $1.31 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $(32.53 \pm 3.86) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),水 - 气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量平均值为  $0.0079 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  ( $(0.208 \pm 0.143) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

## 2.2 澎溪河水 - 气界面 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 扩散通量的影响因素分析

### 2.2.1 水温

图5显示了澎溪河点位全年水温分布情况。温度从 5 月到 8 月升高,8 月后逐步下降,在冬季 1 月、2 月出现水温最低值。

### 2.2.2 溶解氧 DO

图6展示了三峡水库支流澎溪河点位全年溶



解氧分布情况。整体来看, HFH、BJX、GY 点位水体溶解氧变化趋势大致相同, 在夏季7月和9月达到高峰后下降, 在冬季有小范围升高。而夏季溶解氧变化波动较大, 且有时会出现溶解氧过

饱和状态和缺氧状态。在夏季当溶解氧出现较大值时, CO<sub>2</sub> 溶解度一般较小, 这与 CO<sub>2</sub> 的变化情况相一致。而 WQ 点位的水体溶解氧全年变化不大, 呈现随时间推移缓慢上升的趋势。

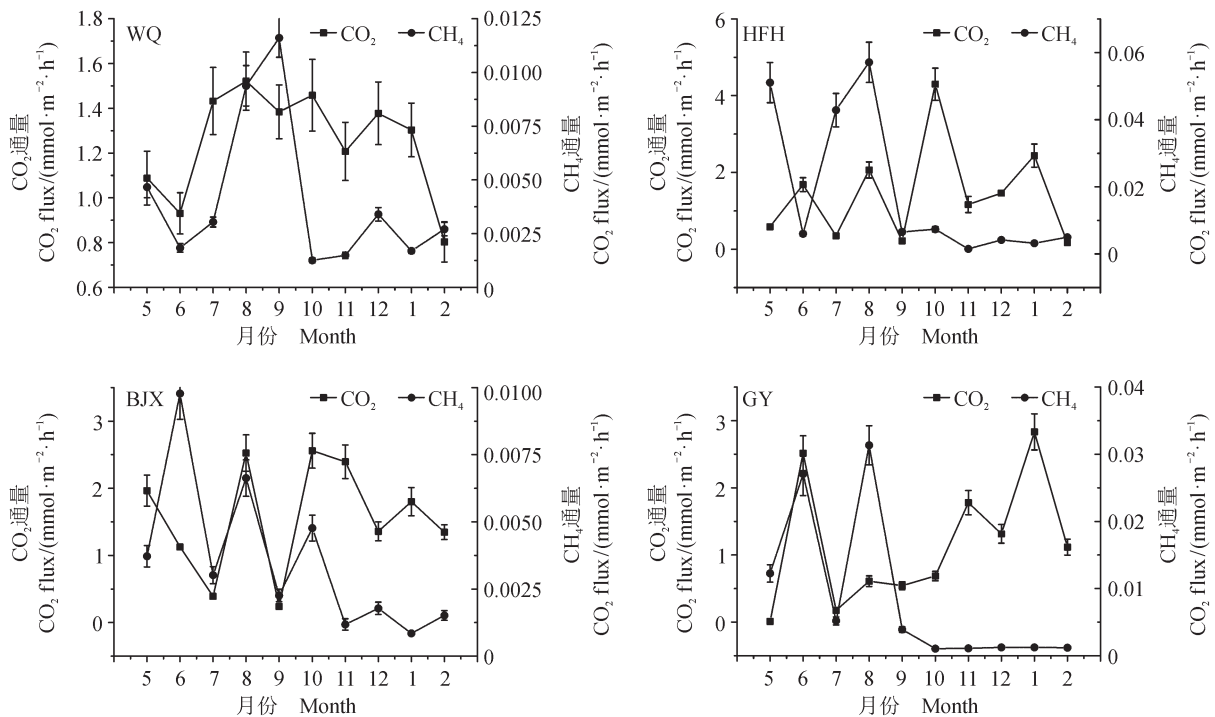


图4 澎溪河水-气界面CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>扩散通量监测结果(TBL)  
Fig.4 Results of the air-water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in Pengxi River (TBL)

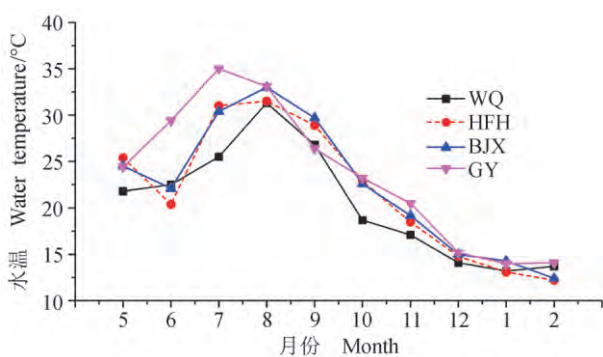


图5 澎溪河点位水温分布情况  
Fig.5 Distribution of water temperature in Pengxi River

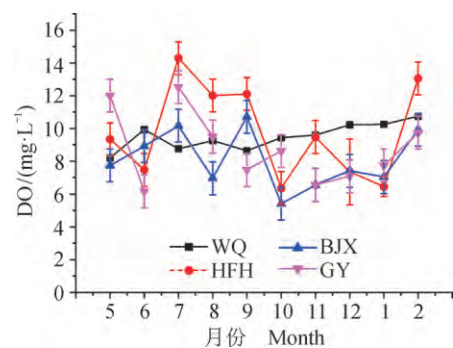


图6 澎溪河点位溶解氧分布情况  
Fig.6 Distribution of dissolved oxygen in Pengxi River

### 2.2.3 pH

澎溪河各点位全年 pH 变化情况如图 7 所示。三峡库区支流澎溪河各点位, 除 WQ 点位 pH 变化较小以外, 其余 3 个点位波动较大, 最大变化值都在 1 以上, 可能是因为支流点位浮游植物生长

相对旺盛, 光合作用、呼吸作用以及分解作用对水体 pH 造成一定影响。

### 2.2.4 Chl-a

由于 Chl-a 含量在 HFH 点位和 GY 点位普遍高于 WQ 和 BJX 点位, 故图 8a 与图 8b 分别显示

HFH、GY 点位和 WQ、BJX 点位的变化情况。HFH 与 GY 点位所在水域由于接近湖泊的性质,整体 Chl-a 含量普遍较高,其中夏季水温较高,适宜浮游植物的生长,所以夏季 Chl-a 含量相对较高,又因为夏季 HFH 点位接近枯水,有水华现象,因此 HFH 点位 Chl-a 含量明显高出其他各点位很多。WQ 点位整体都很小,说明 WQ 点位所在澎溪河上游受库区影响较小,同时不适宜藻类等初级生产者的生长。

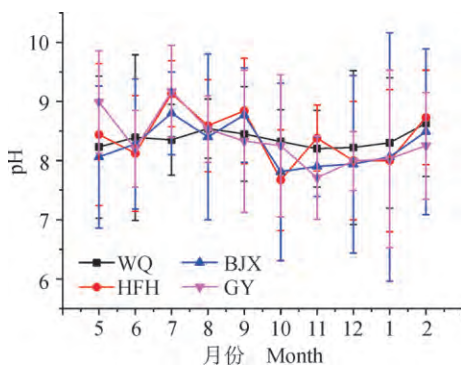


图 7 澎溪河点位 pH 分布情况  
Fig.7 Distribution of pH in Pengxi river

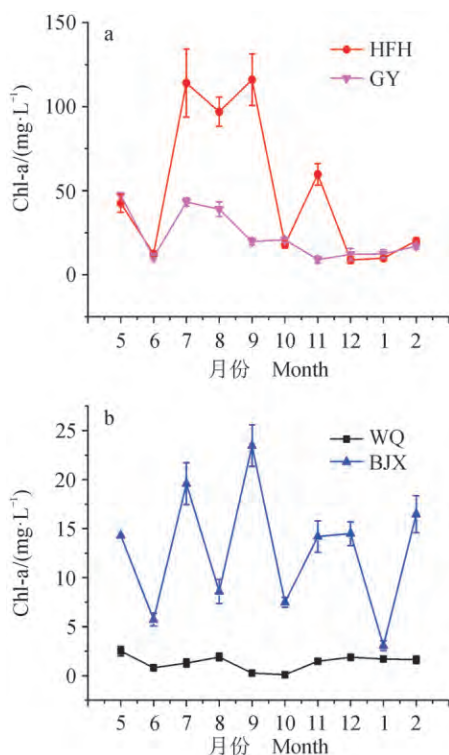


图 8 澎溪河点位 Chl-a 分布情况  
Fig.8 Distribution of Chl-a in Pengxi River

### 3 讨论

#### 3.1 温室气体通量与已有研究比较

##### 3.1.1 与已有澎溪河研究比较

研究发现河流为明显的温室气体的“源”,全年澎溪河水-气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量平均值为  $31.44 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,水-气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量平均值为  $0.1896 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。李哲等(2013)在对澎溪河  $\text{CO}_2$  通量研究中得出和本研究结果相近的结果:平均值为  $(19.92 \pm 3.55) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。而 Chen et al (2011) 2008 年 7—9 月于三峡库区澎溪河支流开展的水库新生湿地甲烷排放研究指出:三峡水库新生湿地甲烷平均排放达到了  $6.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,同时基于南美洲 3 个热带水库的平均甲烷排放水平 ( $3.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),对三峡水库全区 ( $1080 \text{ km}^2$ ) 的甲烷排放进行了估算,认为三峡水库的甲烷排放量达到了  $3.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,这与本研究得出的甲烷通量年平均值有较大出入。而蒋滔等(2012)在对澎溪河甲烷通量的研究中得出  $\text{CH}_4$  扩散通量平均值为  $0.202 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,赵炎等(2011)对三峡水库香溪河支流开展的研究结果仅为  $0.2449 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。李双(2014)、李哲等(2014)关于三峡水库流域甲烷通量的研究结果与本文的观测结果十分接近,因此本次观测具有一定的代表性。

##### 3.1.2 与现有河流研究比较

世界上主要水库、河流的水-气界面  $\text{CO}_2$  交换通量如表 2 所示。由表 2 可知:河流基本上都表现为  $\text{CO}_2$  的“源”,其中热带地区的河流二氧化碳释放通量最大,亚热带河流次之,温带河流在三者中最低(程瑶等,2017)。而澎溪河作为三峡库区的一条最大支流,在和世界各水库水-气界面  $\text{CO}_2$  交换量比较时属于中等水平。水库二氧化碳排放通量明显低于河流,且排放规律与河流类似,表现为热带地区最高。

国内外典型水体  $\text{CH}_4$  扩散通量情况见表 3,由表 3 可知:河流基本上都表现为  $\text{CH}_4$  的“源”,其中热带地区的河流甲烷释放通量最大,澎溪河流域水-气界面  $\text{CH}_4$  扩散通量与国外一些典型水库  $\text{CH}_4$  扩散通量相比,处于较低水平。与国内典型河流对比,澎溪河流域甲烷排放通量处于也处于较低水平,这可能是由于而三峡库区土壤有机质本底含量较低,且水库蓄水前采取了全面的清库措施(赵炎,2011)。



表 2 世界上主要水库、河流水 - 气界面 CO<sub>2</sub> 扩散通量  
Tab.2 Exchange flux of CO<sub>2</sub> between water and air in main reservoirs and rivers of the world

水体类型 Water type	名称 Name	国家 Country	气候带 Climatic zone	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux /(mmol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	来源 Reference
河流 River	Amazon	巴西 Brazil	热带 Tropic	559.3	Ternon et al, 2000
	长江干流 (香溪镇段) The main stream of the Yangtze River (Xiangxi Town Section)	中国 China	亚热带 Subtropic	83.7	姚臣谔等, 2010 Yao et al, 2010
	赣江 Ganjiang River	中国 China	亚热带 Subtropic	201.86	李哲等, 2013 Li et al, 2013
	澎溪河 Pengxi River	中国 China	亚热带 Subtropic	17.04	本研究 This research
	澎溪河 Pengxi River	中国 China	亚热带 Subtropic	31.44	Hélie et al, 2002
	St. Lawrence	加拿大 Canada	温带 Temperate zone	118.29	Telmer et al, 1999
	Ottawa	加拿大 Canada	温带 Temperate zone	105.43	dos Santos et al, 2006
	Curua-Una	巴西 Brazil	热带 Tropic	65.91	dos Santos et al, 2006
水库 Reservoir	Tucuruí	巴西 Brazil	热带 Tropic	192.61	刘丛强, 2007 Liu, 2007
	红枫湖水库 Hongfenghu Reservoir	中国 China	亚热带 Subtropic	20.2	喻元秀等, 2008 Yu et al, 2008
	洪家渡水库 Hongjiadu Reservoir	中国 China	亚热带 Subtropic	6.14	梅航远等, 2011 Mei et al, 2001
	万安水库 Wan'an Reservoir	中国 China	亚热带 Subtropic	12.74	St Louis et al, 2000
	Laforge-1	加拿大 Canada	温带 Temperate zone	52.27	Ternon et al, 2000

同等情况下, 热带水体甲烷释放量更大, 中国澎溪河属于亚热带, 不仅远小于热带水体甲烷释放量, 还小于亚热带水体以及温带瑞士河流的甲烷释放量。二氧化碳通量在文献中的世界总体释放量里属于中下水平, 由于是支流的原因, 所以比主流的释放量少, 但是比部分水库的释放量大, 且测得数据和以往的澎溪河数据类似。

### 3.2 主要环境指标与扩散通量的相关性分析

将各点位表层水温、溶解氧、pH、Chl-a 与水体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 分压以及水 - 气界面 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 扩散通量 (顶空 TBL 模型估算法) 进行相关性分析, 结果见表 4。由表 4 可知: 澎溪河流域各点位 CO<sub>2</sub>

分压与 DO、pH、Chl-a 显著负相关, 这与李哲等 (2013) 对澎溪河二氧化碳通量研究获得的结论一致, 水 - 气界面 CH<sub>4</sub> 扩散通量与水体 CH<sub>4</sub> 分压、水温以及 pH 正相关。

根据表 4, 支流澎溪河点位 CH<sub>4</sub> 分压与水温以及 pH 正相关, 与其他环境指标相关性不明显。水温与 CH<sub>4</sub> 分压和通量呈正相关性, 水温除了影响 CH<sub>4</sub> 气体在水中的溶解度, 同时还与 pH 一起影响水中产甲烷菌的活动, 适宜的水温与 pH 有利于产甲烷菌产生 CH<sub>4</sub> 气体, 导致水体 CH<sub>4</sub> 分压和通量增大; 而水温虽然一方面可通过影响水体和沉积物微生物的活性和有机质的分解以及水生浮游植物的呼吸来增加 CO<sub>2</sub> 排放通量, 另一方面也

可通过影响  $\text{CO}_2$  在水中的溶解度及水生植物的光合作用来减少  $\text{CO}_2$  排放通量（吴铭，2016）。水温与二氧化碳分压及通量的相关性不明显，推测其原因可能是随着水温的变化，水生植物的光合作用与呼吸作用同时变化，因此  $\text{CO}_2$  排放规

律不明显，郭劲松（2011）在对澎溪河二氧化碳通量研究中也发现水温与  $\text{CO}_2$  没有相关性。水体溶解氧含量决定了水体中有机物降解的途径和产物，并对水体元素循环有重要影响（黄文敏等，2013）。

表 3 国内外典型水体  $\text{CH}_4$  扩散通量数据  
Tab.3 Exchange flux of  $\text{CH}_4$  between water and air in typical water body in the world

名称 Name	国家 Country	气候带 Climatic zone	$\text{CH}_4$ 通量 $\text{CH}_4$ flux /( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	来源 Reference
Petit Saut	圭亚那 Guyana	热带 Tropic	34.8	Abril et al, 2005
Manso	巴西 Brazil	热带 Tropic	42	dos Santos et al, 2006
鄱阳湖 Poyang Lake	中国 China	亚热带 Subtropic	0.51	林茂, 2012 Lin, 2012
香溪河 Xiangxi River	中国 China	亚热带 Subtropic	0.088	王亮等, 2012 Wang et al, 2012
密云水库 Miyun Reservoir	中国 China	亚热带 Subtropic	0.488	杨萌, 2011 Yang, 2011
澎溪河 Pengxi River	中国 China	亚热带 Subtropic	0.1896	本研究 This research
Grimsel	瑞士 Switzerland	温带 Temperate zone	0.4	Diem et al, 2008
Gruyere	瑞士 Switzerland	温带 Temperate zone	0.7	Diem et al, 2008

表 4  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  分压和扩散通量与常规指标的相关性分析  
Tab.4 Correlation analysis between indicators and fluxes of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , pressures of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$

	$\text{CH}_4$ 分压 $\text{CH}_4$ partial pressure	$\text{CO}_2$ 分压 $\text{CO}_2$ partial pressure	$\text{CH}_4$ 通量 $\text{CH}_4$ flux	$\text{CO}_2$ 通量 $\text{CO}_2$ flux
$\text{CH}_4$ 分压 $\text{CH}_4$ partial pressure	1	—	0.947**	—
$\text{CO}_2$ 分压 $\text{CO}_2$ partial pressure	—	1	—	0.978**
水温 Water temperature	0.549**	—	0.598**	—
DO	—	-0.741**	—	-0.745**
pH	0.370*	-0.790**	0.431**	-0.712**
Chl-a	—	-0.397*	—	-0.419**

\*\* $p \leq 0.01$ , 表示极显著相关; \* $p \leq 0.05$ , 表示显著相关。

\*\* $p \leq 0.01$ , indicating extremely significant correlation; \* $p \leq 0.05$ , indicating significant correlation.

DO与CO<sub>2</sub>排放通量呈负相关性,这是因为DO越高,细菌呼吸作用越强,固定的碳越多, $p(\text{CO}_2)$ 与CO<sub>2</sub>扩散通量越低。pH值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,是影响CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>产生和排放过程的重要因素之一(陈永根等,2006)。CO<sub>2</sub>通量与pH值呈显著负相关,主要是由于当pH>7时,碳在水体中容易形成重碳酸盐,使水体CO<sub>2</sub>处于不饱和状态,促使大气中CO<sub>2</sub>进入到水体中(吴瑶洁,2016)。pH与CH<sub>4</sub>的分压和通量呈正相关性,这是因为pH会影响水中产甲烷菌的活动,适宜的水温与pH有利于产甲烷菌产生CH<sub>4</sub>气体,导致水体CH<sub>4</sub>分压和通量增大。Chl-a和水体CO<sub>2</sub>分压和通量有显著负相关性,由于澎溪河作为三峡水库支流,流动性较干流较弱,利于浮游植物的生长,表层水体浮游植物光合作用会利用CO<sub>2</sub>,导致水体CO<sub>2</sub>分压降低。

#### 4 结论

(1) 澎溪河表层水体 $p(\text{CO}_2)$ 范围为538.54—5207.22  $\mu\text{atm}$ ,  $p(\text{CH}_4)$ 范围为25.21—1072.31  $\mu\text{atm}$ ;其中 $p(\text{CO}_2)$ 在中游HFH与BJX点位较高,上游与下游点位较低;WQ点位 $p(\text{CO}_2)$ 波动不大, HFH、BJX、GY点位 $p(\text{CO}_2)$ 在库区蓄水后相对较高;表层水体 $p(\text{CH}_4)$ 整体夏季相对较高,蓄水后冬季较低。澎溪河中游,水-气界面CO<sub>2</sub>扩散通量较高,水-气界面CH<sub>4</sub>扩散通量中下游较高。

(2) 2016年5月到2017年2月在较完整水库运行周期内,澎溪河水-气界面CO<sub>2</sub>扩散通量平均值约为1.31  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;而CH<sub>4</sub>扩散通量全为正值,平均值为0.0079  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。表现为“源”的特征,CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>扩散通量的变化趋势基本与 $p(\text{CO}_2)$ 、 $p(\text{CH}_4)$ 保持一致。在世界范围的河流中,澎溪河的CO<sub>2</sub>排放量属于中等水平,CH<sub>4</sub>排放量较少。

(3) 澎溪河水-气界面水气界面CH<sub>4</sub>通量与 $p(\text{CH}_4)$ 、水温、pH值显著正相关;而水-气界面CO<sub>2</sub>扩散通量与 $p(\text{CO}_2)$ 显著正相关,与DO、pH值、Chl-a显著负相关;其他环境因素的影响不明显,有待进一步研究。

#### 参考文献

陈永根,李香华,胡志新,等.2006.中国八大湖泊冬季水-气界面CO<sub>2</sub>通量[J].生态环境,15(4):665–669.[Chen Y G,

Li X H, Hu Z X, et al. 2006. Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lakes in China in winter [J]. *Ecology and Environment*, 15(4): 665–669.]

程瑶,王雨春,胡明明.2017.三峡水库支流水文情势差异对水-气界面二氧化碳释放通量特征的影响[J].生态学报,36(1):216–223.[Cheng Y, Wang Y C, Hu M M. 2017. Influence of different water regimes of tributaries in Three Gorges Reservoir on air-water interface CO<sub>2</sub> fluxes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 36(1): 216–223.]

郭劲松,蒋滔,李哲,等.2011.三峡水库澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析[J].水科学进展,22(6):829–838.[Guo J S, Jiang T, Li Z, et al. 2011. Analysis on partial pressure of CO<sub>2</sub> and influencing factors during spring phytoplankton bloom in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 22(6): 829–838.]

黄文敏,朱孔贤,赵玮,等.2013.香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J].环境科学,34(4):1270–1276.[Huang W M, Zhu K X, Zhao W, et al. 2013. Diurnal changes in greenhouse gases at water-air interface of Xiangxi River in autumn and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 34(4): 1270–1276.]

蒋滔,郭劲松,李哲,等.2012.三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[J].环境科学,33(5):1463–1470.[Jiang T, Guo J S, Li Z, et al. 2012. Air-water surface greenhouse gas flux in Pengxi River at different operational stages of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 33(5): 1463–1470.]

李双.2014.三峡水库库中地区典型干、支流水体 $p(\text{CO}_2)$ 的时空分布及影响因素研究[D].上海:上海大学.[Li S. 2014. A preliminary study about the partial pressure and influencing factors of the dissolved carbon dioxide in the mainstream and tributaries of the central Three Gorges Reservoir [D]. Shanghai: Shanghai University.]

李哲,白镭,郭劲松,等.2013.三峡水库两条支流水-气界面CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>通量比较初探[J].环境科学,34(3):1008–1016.[Li Z, Bai L, Guo J S, et al. 2013. Comparative study on water-air CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 34(3): 1008–1016.]

李哲,姚骁,何萍,等.2014.三峡水库澎溪河水-气界面CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>扩散通量昼夜动态初探[J].湖泊科



- 学, 26(4): 576–584. [Li Z, Yao X, He P, et al. 2014. Diel variations of air-water  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  diffusive fluxes in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 26(4): 576–584.]
- 林 茂. 2012. 鄱阳湖水 - 气界面温室气体通量研究 [D]. 北京: 北京林业大学. [Lin M. 2012. Greenhouse gas fluxes on the water-air interface of Poyang Lake [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 2009. 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*, 18(4): 384–396. [Liu C Q, Wang F S, Wang Y C, et al. 2009. Responses of aquatic environment to river damming— from the geochemical view [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 18(4): 384–396.]
- 梅航远, 汪福顺, 姚臣湛, 等. 2011. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究 [J]. *环境科学*, 32(1): 58–63. [Mei H Y, Wang F S, Yao C C, et al. 2011. Diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Wan'an Reservoir in spring [J]. *Environmental Science*, 32(1): 58–63.]
- 秦 宇, 杨博道, 李 哲, 等. 2017. 夏季金沙江下游水 - 气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量特征初探 [J]. *湖泊科学*, 29(4): 991–999. [Qin Y, Yang B X, Li Z, et al. 2017.  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  flux across water-air interface in summer in the downstream of Jinsha River, southwest China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 29(4): 991–999.]
- 王 亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 2012. 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*, 33(5): 1471–1475. [Wang L, Xiao S B, Liu D F, et al. 2012. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 33(5): 1471–1475.]
- 吴 铭. 2016. 崇州市不同水体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量变化特征及其影响因素研究 [D]. 雅安: 四川农业大学. [Wu M. 2016. The characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions in different water bodies in Chongzhou [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University.]
- 吴瑶洁, 李海英, 陈文重, 等. 2016. 夏季温榆河温室气体释放特征与影响因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 39(5): 8–16. [Wu Y J, Li H Y, Chen W Z, et al. 2016. Effects and emission characteristics of greenhouse gases from Wenyu River in summer [J]. *Environmental Science & Technology*, 39(5): 8–16.]
- 吴玉源. 2012. 三峡水库消落带新生湿地温室气体通量评估及碳汇初步研究 [D]. 重庆: 重庆大学. [Wu Y Y. 2012. Study on greenhouse gas flux from newly created marshes and carbon sink in the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing University.]
- 杨 萌. 2011. 密云水库温室气体通量的时空特征及其影响因素研究 [D]. 北京: 北京林业大学. [Yang M. 2011. Spatial-temporal variation of greenhouse gas flux and its environmental factors at Miyun Reservoir [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 姚臣湛, 汪福顺, 吴以赢, 等. 2010. 新安江水库水体春季二氧化碳分压的分布规律研究 [J]. *地球环境学报*, 1(2): 150–156. [Yao C C, Wang F S, Wu Y Y, et al. 2010. The vernal distribution of dissolved carbon dioxide ( $p\text{CO}_2$ ) in the Xin'anjiang Reservoir [J]. *Journal of Earth Environment*, 1(2): 150–156.]
- 姚 骁, 李哲, 郭劲松, 等. 2015. 水 - 气界面  $\text{CO}_2$  通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算算法比较 [J]. *湖泊科学*, 27(2): 289–296. [Yao X, Li Z, Guo J S, et al. 2015. Comparison between closed static chamber method and thin boundary layer method on monitoring air-water  $\text{CO}_2$  diffusion flux [J]. *Journal of Lake Sciences*, 27(2): 289–296.]
- 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 2008. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量 [J]. *生态学杂志*, 27(7): 1193–1199. [Yu Y X, Liu C Q, Wang F S, et al. 2008. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide ( $p\text{CO}_2$ ) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 27(7): 1193–1199.]
- 赵 炎, 曾 源, 吴炳方, 等. 2011. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测 [J]. *水科学进展*, 22(4): 546–553. [Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, et al. 2011. Observation on greenhouse gas emissions from Xiangxi River in Three Gorges Region [J]. *Advances in Water Science*, 22(4): 546–553.]
- 周广胜. 2003. 全球碳循环 [M]. 北京: 气象出版社: 4–135. [Zhou G S. 2003. Global carbon cycle [M]. Beijing: China Meteorological Press: 4–135.]
- Abril G, Guérin F, Richard S, et al. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19. DOI: 10.1029/2005GB002457.

- Chen H, Yuan X, Chen Z, et al. 2011. Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(D21). DOI: 10.1029/2011JD016244.
- Demarty M, Bastien J, Tremblay A, et al. 2009. Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Québec, Canada, measured with automated systems [J]. *Environmental Science and Technology*, 43(23): 8908–8915.
- dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, et al. 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants [J]. *Energy Policy*, 34(4): 481–488.
- Hamilton D P, Schladow S G. 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs, Part I — Model description [J]. *Ecological Modelling*, 96(1/2/3): 91–110.
- Hélie J F, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. 2002. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River— isotopic and chemical constraint [J]. *Chemical Geology*, 186(1/2): 117–138.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: mitigation of climate change [M]// Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A, et al. 1997. Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir [J]. *Environmental Science and Technology*, 31(5): 1334–1344.
- Salençon M J, Thébault J M. 1996. Simulation model of a mesotrophic reservoir (Lac de Pareloup, France): MELODIA, an ecosystem reservoir management model [J]. *Ecological Modelling*, 84(1/2/3): 163–187.
- St Louis V L, Kelly C A, Duchemin É, et al. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate [J]. *BioScience*, 50(9): 766–775.
- Telmer K, Veizer J. 1999. Carbon fluxes,  $p\text{CO}_2$ , and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives [J]. *Chemical Geology*, 159(1/2/3/4): 61–86.
- Ternon J F, Oudot C, Dessier A, et al. 2000. A seasonal tropical sink for atmospheric CO<sub>2</sub> in the Atlantic ocean: the role of the Amazon River discharge [J]. *Marine Chemistry*, 68: 183–201.
- Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, et al. 2005. Greenhouse gas emissions: fluxes and processes, hydroelectric reservoirs and natural environments [M]. New York: Springer: 725–732.