

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.263

三峡水库不同运行工况下中段干流碳源 气体释放通量研究

秦宇, 蒋成勇, 张渝阳, 郑望

(重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:来自陆地大量有机碳源的输入,以及三峡库区调度运行和筑坝蓄水导致 CO₂、CH₄ 等碳源气体的排放成为近来关注的热点。以三峡库区干流中段为研究对象,于 2017 年 8 月—2018 年 11 月对忠县(ZX),万州(WZ),涪陵(FL)进行每月采样分析,探求水-气界面 CO₂、CH₄ 通量在水库不同运行工况下的变化特征。研究发现,在观测期间内,ZX 采样点 CO₂ 浓度在 0.008 6~0.115 3 mmol/L 波动,WZ 采样点 CO₂ 浓度在 0.003 5~0.116 8 mmol/L 波动,FL 采样点 0.006 3~0.098 6 mmol/L,整体上 3 个采样点的 CO₂ 浓度变化趋于一致,都在库区泄水期运行 4—5 月 CO₂ 浓度达到峰值,在低水位运行期的 6—9 月降到最低值。CH₄ 通量在水库低水位运行期表现为“汇”,FL 点位在泄水期达到“源”的最大值;3 个采样点的 CO₂ 通量在泄水期均表现为“源”的特征,低水位运行期的 CO₂ 通量表现为“源”与“汇”的转换。通过与国外已有水库监测数据比较分析,CO₂ 扩散通量在全球水库序列中处于中等水平,CH₄ 扩散通量在全球水库序列中处于中等偏下水平。

关键词:三峡库区;干流;中段;碳源气体;运行工况

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)08-097-10

Study on the release fluxes of carbon source gases under different operating conditions in the middle reach of the main stream of the Three Gorges Reservoir

QIN Yu, JIANG Chengyong, ZHANG Yuyang, ZHENG Wang

(Key Laboratory of Water Conservancy and Water Transportation Engineering, Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: The input of large quantities of organic carbon sources from the land, and the discharge of carbon sources such as CO₂ and CH₄ caused by the operation and damming in the Three Gorges Reservoir Area have become the hot spots of recent research. In order to reveal the variation characteristics of CO₂ and CH₄ concentrations in different flow levels in the Three Gorges Reservoir Area, this study took the middle reach of the main stream of the Three Gorges Reservoir as the research objects. Samples were taken from Zhongxian County (ZX), Wanzhou (WZ), Fuling (FL) monthly from August 2017 to November 2018 to

收稿日期:2019-06-25 网络出版日期:2019-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51609026);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0280);重庆市研究生教育创新基金项目(CYS19246);重庆交通大学河海学院研究生科研创新(创新基金)项目(YC2019002)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51609026), Basic Science and Frontier Technology Research Project of Chongqing (cstc2017jcyjAX0280), Chongqing Graduate Innovation Fund(CYS19246) and Chongqing Jiaotong University Hehai School Graduate Innovation Fund(YC2019002).

作者简介:秦宇(1981—),女,重庆交通大学副教授,博士,主要研究方向为水生态治理,(E-mail)qinyu54001@163.com。

analyze and study the characteristics of CO_2 and CH_4 fluxes at the water-air interface under different operating conditions. Results showed that during the research period, CO_2 concentration of the ZX, WZ and FL was between 0.008 6 mmol/L and 0.115 3 mmol/L, 0.003 5 mmol/L and 0.116 8 mmol/L, and 0.006 3 mmol/L and 0.098 6 mmol/L, respectively. The concentration of CO_2 at these three sampling points tended to be consistent and reached its peak during the drain period from April to May and its lowest point in the low water level operation period from June to September. CH_4 flux exhibited the feature of a sink during the operation at a low water level, but at FL it reached the maximum value as a source in the discharge period. The CO_2 fluxes at the three locations showed the feature of a source during the discharge period, but during low water level operation period, CO_2 flux indicated the switch between a source and a sink. CO_2 flux was at a medium level and CH_4 flux was at a lower-middle level compared with those of other reservoirs in the world.

Keywords: Three Gorges Reservoir Area; main stream; middle reach; carbon source gas; operating conditions

自有研究称水库可能是温室气体的净排放源后,水库温室气体的“源”-“汇”效应引起国内外学者的广泛关注^[1]。三峡水库建成后,水位的周期性变化和水生生态系统演变造成的温室气体效应成为国内外研究的热点。通过 Rudd 等^[2]对南美热带雨林地区水库 CO_2 和 CH_4 释放通量观察数据分析来看,水库温室气体排放已经成为国内外学者的研究热点问题。Fearnside 等^[3]研究发现一些热带雨林地区水库的温室气体效应可以达到同等发电量的火电厂的数倍。Barros 等^[4]发现水库建成投入运行时间和所处气候是影响温室效应的关键。目前,国内大多数研究只关注水库水-空气界面 CO_2 和 CH_4 温室气体的通量特征,或者侧重于季节、气温等对其影响^[5-6]。三峡库区前期研究已经基本掌握了三峡库区温室气体昼夜变化和气泡释放通量特征,但对于库区不同水位运行条件下水体 CO_2 和 CH_4 浓度时空变化特征还不明确^[7]。在“蓄清排浑”的水库调度运行方案下,三峡水库每年 2—5 月为泄水期,6—9 月水库在低水位运行,10 月至次年 1 月为高水位运行;这个反季节性的水位涨落过程在很大程度上影响着水-气界面碳源气体的释放。

笔者以三峡库区中段干流为研究对象,初步探究水-气界面 CO_2 、 CH_4 通量在不同运行工况下的时空变化特征,确定关键影响因素,为进一步阐释三峡库区中段干流 CO_2 、 CH_4 在水库调度运行下的产汇机制提供理论支撑与数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

基于前期调研及预备实验,选择三峡库区库中段涪陵、忠县、万州 3 个断面为研究对象开展研究工作,采样点基本情况见表 1。

表 1 干流各采样点基本情况

Table 1 The features of the sampling spots of the main stream

| 采样点 | 样本编号 | 采样点坐标 | 采样时间 |
|-----|------|-----------------------------|-------------|
| | ZXS | | |
| ZX | ZXZ | N30°24'57.63"E108°12'40.86" | 10:00—12:00 |
| | ZXX | | |
| | WZS | | |
| WZ | WZZ | N30°46'26.66"E108°24'46.74" | 13:00—15:00 |
| | WZX | | |

续表 1

| 采样点 | 样本编号 | 采样点坐标 | 采样时间 |
|-----|------|-----------------------|-------------|
| | FLS | | |
| FL | FLZ | N29°48'00"E107°27'00" | 10:00—12:00 |
| | FLX | | |

忠县位于重庆市东中部,其上距重庆 190 km,下距长江三峡大坝 386 km。该河段平直宽阔,水流均匀,流程 88 km,多年平均流量约 12 400 m³/s。

万州位于重庆东北部,属长江上游区域中心城市,其上距重庆 328 km,下距三峡大坝里程约 283 km。该河段属大型山区河流稳定地段,河道较为顺直,流程 84.3 km,多年平均流量约 13 700 m³/s。

涪陵居重庆市中部,位于长江和乌江交汇处,其上距重庆 120 km,下距长江三峡大坝 482 km。该河段属于长江上游典型的山区型河道,流程 86 km,多年平均流量约 11 200 m³/s,该河段的径流年内分配极不均匀,汛期 6—10 月平均流量为 1 050 m³/s,其径流量占全年径流量的 74.5%。

选择三峡库区中段涪陵南沱镇,忠县石宝寨,万州小周镇作为本研究采样点,从 2017 年 8 月开始,对所选监测断面开展完整周年逐月定位跟踪观测。

根据三峡工程调度运行规定,汛期 6—9 月三峡工程按照 145 m 低水位防汛运行,9 月底逐渐抬高水位,10 月至次年 1 月按照 175 m 高水位。在本文研究期间,2018 年 7 月初,三峡水库迎来特大洪水,水位在短时间内暴涨,入库流量达到 50 000 m³/s。本次监测时间完整地包括了水库泄水期,低水位运行期,高水位运行期,充分考虑了三峡水库调度运行方案,体现水位周期性变化对 CO₂、CH₄ 浓度的影响,也考虑到库区季节因素下水环境特征,反映水库调度运行和季节变化下对干流 CO₂、CH₄ 产汇的影响。

1.2 CO₂、CH₄ 浓度测试方法

由于采样区域环境因素复杂,气候条件差,水流湍急,采样点之间的距离远,不确定性因素影响大且需要大区域长时间观测,故采用顶空平衡法与 TBL 模型估算法对三峡库区干流中段不同深度水体 CO₂、CH₄ 浓度展开监测工作。每月采样时间设定在每月的 20 日左右,每天监测时间控制在上午 10:00 至下午 3:00 之间,采样工具为 5 L 采样器。具体流程为:将顶空瓶放置于事先装满水样的采水器中,使水体完全淹没顶空瓶,拧紧瓶盖确认顶空瓶内无气泡产生,取出倒置放好,送回实验室进行进一步测量分析。将装满水样的顶空瓶从仪器盘上取出,事先准备两支注射器,其中一支装入 5 mL 高纯氮,另一支不做操作。在室温条件下,将两支注射针头同时插入倒置的顶空瓶,确保注射气体的针头应高于另一只。再次密封好将顶空瓶放入摇床内机械震荡 20 min,达到水—气两相平衡之后抽取瓶内上部气体,送入气象色谱仪进一步检测,经 TDX-01 色谱柱分离,用 FID 检测器进一步检验得到 CO₂、CH₄ 浓度^[8-9]。

1.3 数据处理方案

本研究所得的实验数据分析计算全部录入 Origin[®] 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 水库运行关系图

水库调度运行使库区水位和流量呈现周期性变化,为了进一步了解水位和流量变化对水—气界面 CO₂、CH₄ 交换通量的影响,分别记录了采样点在 2018 年 4 月到 2018 年 9 月的水位流量数据。采用清溪场监测站的水位和流量代表涪陵采样点,由于清溪场没有流量数据,用寸滩监测站加上武隆监测站的流量数据相加,近似等于清溪场的流量;万州、忠县和涪陵之间没有大的支流汇入,即认为涪陵点位的水位流量数据近似等于万州和忠县采样点的水位流量。不同运行时间的水位流量数据见图 1(数据来源于中国长江三峡集团)。

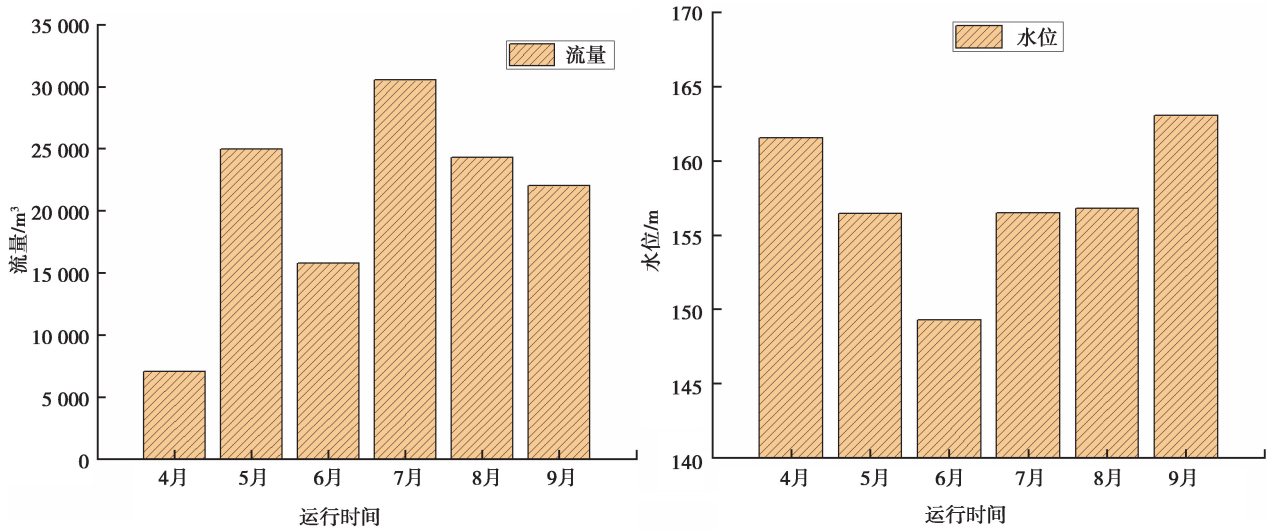
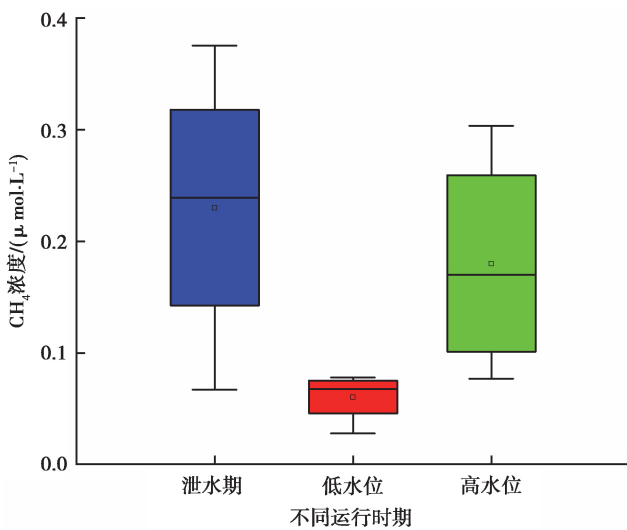
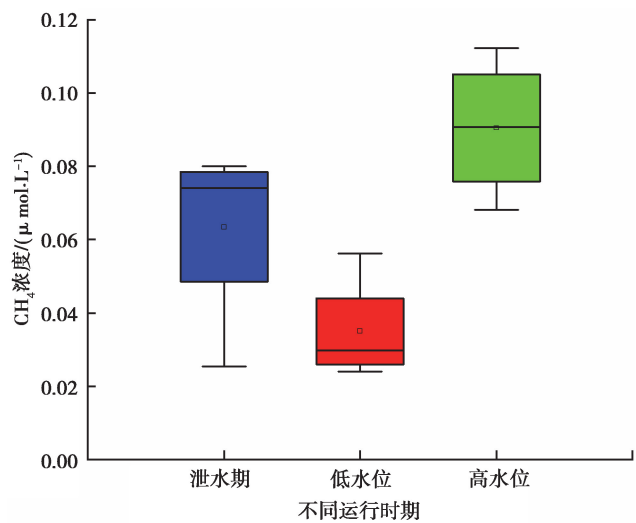


图 1 2018 年 4 月至 9 月期间水位和流量变化

Fig. 1 Water level and flow during the period from April to September 2018

2.2 CH₄ 浓度

各采样点水-气界面 CH₄ 浓度含量随水库运行时间变化情况详见图 2~4。经过一个完整的观测周期发现, ZX 点位 CH₄ 浓度波动范围为 0.02~0.91 μmol/L, WZ 点位 CH₄ 浓度波动范围为 0.02~0.13 μmol/L, FL 点位 CH₄ 浓度波动范围为 0.02~0.65 μmol/L。ZX 点位在观测开始的 2017 年 8 月达到观测期间的 CH₄ 浓度峰值,接着开始急剧下降,并在 2017 年 11 月下降到最低值。ZX 点位分别在 2018 年 1 月份和 2018 年 5 月份达到相对较高值。同时期 FL 点位变化趋势与 ZX 一致,并且在 2018 年 4 月份上升至观测期间最大值,为 0.65 μmol/L,整个观测期间 ZX 和 FL 点位不同水位 CH₄ 浓度相差不大。WZ 点位不同水层 CH₄ 浓度波动较大,分析可能为采样区域水流湍急和不同水层温度变化较大影响有机物的厌氧分解,加上外界有机碳通过各种途径进入河流生态系统沉降成沉积物后,在厌氧状况下,有机碳在微生物作用下产生 CH₄,不同水层 CH₄ 传输速率相差较大^[10-12]。3 个采样点在 6—9 月均保持观测期间 CH₄ 浓度的较低水平,分析可能为该时期三峡水库遇特大洪水,水位暴涨加上水流速度加快,不利于水体植被生长,厌氧分解过程受到抑制,CH₄ 的释放较少。10 月进入三峡水库的高水位调度运行,不同采样点的 CH₄ 浓度均开始缓慢上升。

图 2 不同运行时期 CH₄ 浓度 (ZX)Fig. 2 CH₄ concentration (ZX) in different operating periods图 3 不同运行时期 CH₄ 浓度 (WZ)Fig. 3 CH₄ concentration (WZ) in different operating periods

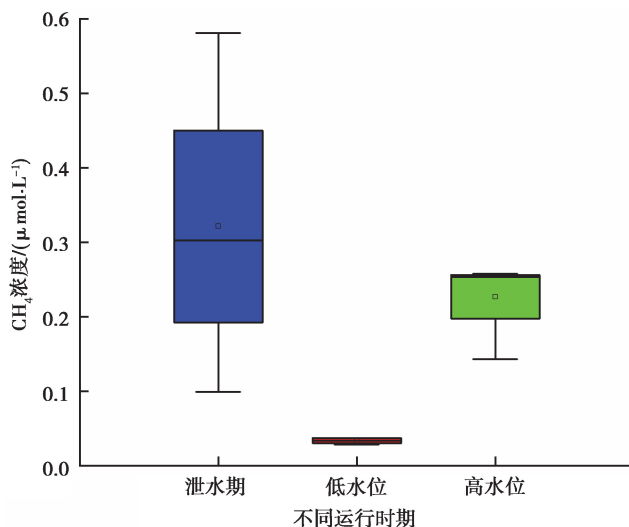


图 4 不同运行时期 CH₄ 浓度 (FL)

Fig. 4 CH₄ concentration (FL) in different operating periods

2.3 CO₂ 浓度

每个采样水气界面 CO₂ 浓度含量随运行时间变化情况详见图 5~7。经过一个完整的观测周期发现,每个观测点位 CO₂ 浓度随时间变化趋势一致,春季 CO₂ 浓度最高,夏季 CO₂ 浓度最低。其中 ZX 点位 CO₂ 浓度波动范围为 0.008~0.110 mmol/L, WZ 点位 CO₂ 浓度波动范围为 0.006~0.110 mmol/L, FL 点位 CO₂ 浓度波动范围为 0.008~0.090 mmol/L。FL 观测点在 2018 年 5 月份达到观测期间的峰值, ZX 和 WZ 均在 2018 年 4 月份达到峰值。在整个夏季观测期内, FL 和 WZ 观测点均保持不变,但 ZX 观测点在 2018 年 7 月突然增大,分析可能为 2018 年 7 月发洪水所致。进入 9 月水库高水位运行期,水温开始降低,每个观测点 CO₂ 浓度都开始迅速增加。在整个观测期内,每个观测点不同水层 CO₂ 浓度没有明显变化,表现出水深对于 CO₂ 产汇没有明显影响^[13-15],且水底产生的 CO₂ 通过扩散或气泡形式向水面大气传输的传输速率在不同水层之间相差不大^[16-17]。

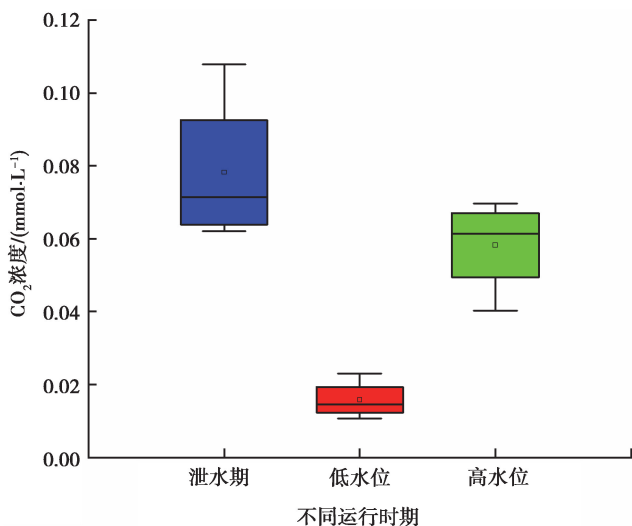


图 5 不同运行时期 CO₂ 浓度 (ZX)

Fig. 5 CO₂ concentration (ZX) in different operating periods

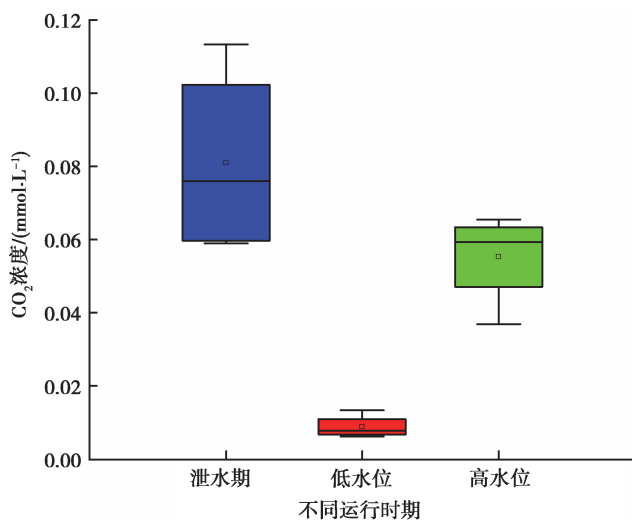
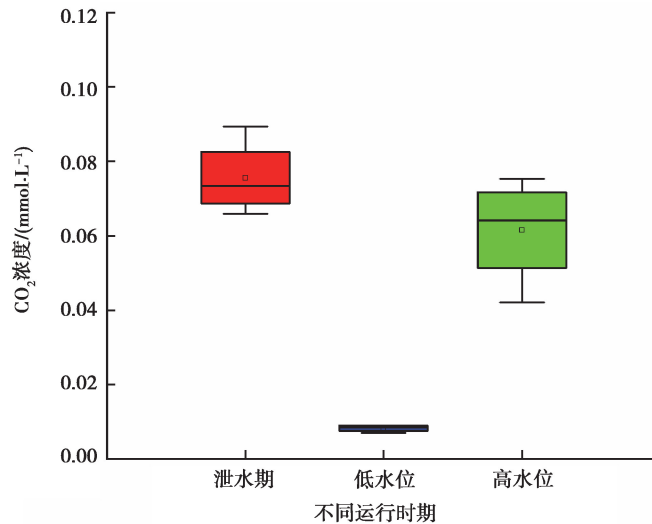


图 6 不同运行时期 CO₂ 浓度 (WZ)

Fig. 6 CO₂ concentration (WZ) in different operating periods

图 7 不同运行时期 CO₂ 浓度 (FL)Fig. 7 CO₂ concentration (FL) in different operating periods

3 讨 论

3.1 不同运行时期 CH₄ 通量变化

不同观测点位 CH₄ 通量在库区不同运行时期的变化情况详见图 8。经过一个完整的三峡库区调度运行周期,研究发现 ZX 点位的 CH₄ 通量波动范围为 $-0.13 \sim 2.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, WZ 点位的 CH₄ 通量波动范围为 $-0.54 \sim 0.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, FL 点位的 CH₄ 通量波动范围为 $-0.97 \sim 4.98 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。其中在泄水期运行时期, ZX 观测点 CH₄ 通量表现为“源”,进入低水位运行初期出现“源”→“汇”的转变,但“汇”的量不大,进入高水位运行期 CH₄ 通量整体表现为“源”,并且大于泄水期运行时的 CH₄ 通量。WZ 观测点位在整个泄水期和低水位运行期 CH₄ 通量均表现为“汇”,在低水位运行期水库呈现出最大吸收通量为 $-0.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,进入库区低水位运行末期 CH₄ 通量呈现出“汇”→“源”的转变,但 CH₄ 释放通量并不大,仅为 $0.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。FL 点位 CH₄ 通量在泄水期达到库区调度运行的峰值,且数值明显大于其他两个观测点位。分析原因可能为 FL 点位在该时期水体藻类迅速繁殖需要吸收大量的 CO₂ 和营养盐成分,死亡后提供大量厌氧消化过程所需的有机物^[18-19]。这些藻类会发生聚集,当达到一定数量时就会发生厌氧的死亡分解,短时间内释放大量的 CH₄、CO₂ 等温室气体,只有小部分会先沉降到水底再缓慢释放^[20-22]。

3.2 不同运行时期 CO₂ 通量变化

不同观测点位 CO₂ 通量在库区不同运行时期的变化情况详见图 9。经过一个完整的三峡库区调度运行周期,研究发现 ZX 观测点 CO₂ 通量的波动范围为 $-0.12 \sim 3.16 \text{ mmol}/\text{L}$, WZ 观测点 CO₂ 通量的波动范围为 $-0.48 \sim 2.88 \text{ mmol}/\text{L}$, FL 观测点 CO₂ 通量的波动范围为 $-0.38 \sim 2.13 \text{ mmol}/\text{L}$ 。干流上 3 个观测点在泄水期均达到 CO₂ 通量的峰值,分析可能为水流逐渐进入库区干流观测点位后,水体容量增大导致对碳的沉淀利用作用增强,加上来自外源碳的不断摄入,水库碳含量明显增加,导致 CO₂ 扩散通量逐渐增加。在低水位运行期 WZ 和 FL 点位 CO₂ 通量表现为“汇”,ZX 观测点位 CO₂ 通量仍然表现为“源”,但数值很小。造成 3 个观测点位 CO₂ 扩散通量减小的原因可能为 2018 年 7 月份重庆三峡库区遇特大洪水,水位暴涨和浮游植物的增加,光合作用效果远大于呼吸作用效果,导致观测点位水气界面 CO₂ 通量减小。进入库区高水位运行期,3 个观测点位 CO₂ 通量均表现为“源”,数值都几乎为库区泄水期 CO₂ 通量的一半,分析可能为硝态氮含量增加,加上浮游植物呼吸作用效果大于光合作用效果^[23-24],导致 CO₂ 释放达到一个相对小高峰。

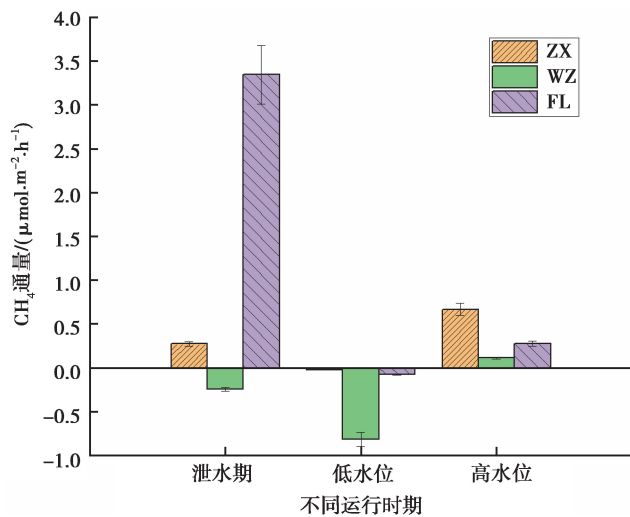


图 8 CH₄ 通量与运行时期关系

Fig. 8 Relationship between CH₄ flux and operating period

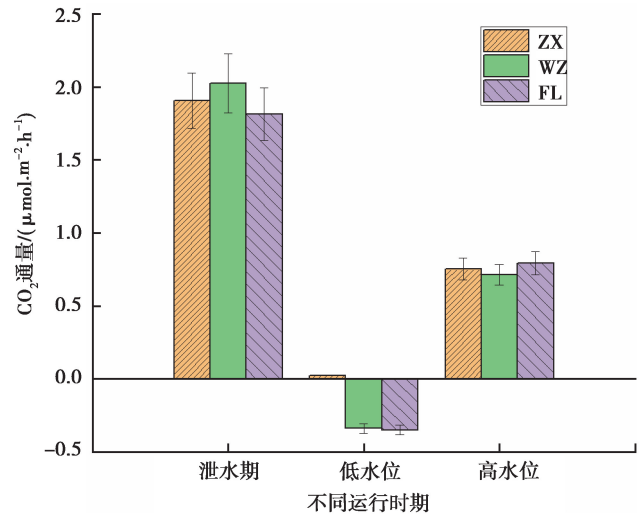


图 9 CO₂ 通量与运行时期关系

Fig. 9 Relationship between CO₂ flux and operating period

3.3 三峡库区干流中段 CO₂、CH₄ 扩散通量与全球水库比较分析

对观测区域每月 CO₂、CH₄ 通量进行全年平均估算,选择环境要素作为参考,研究区域 CO₂ 全年平均释放强度为 21.12 mmol/(m²·d); CH₄ 通量全年平均释放强度为 7.92 mmol/(m²·d)。通过对 Soumis 等^[25]、St Louis 等^[18]、Huttunen 等^[27] 相关样本进行对比分析,三峡库区干流中段 CO₂ 扩散通量在全球范围内处于中等水平;CH₄ 通量则远低于 St Louis 等^[18]、Huttunen 等^[27] 收集的数据的平均值。全球主要水库 CO₂、CH₄ 通量见表 2,3。

表 2 世界上主要水库水-气界面 CO₂ 扩散通量

Table 2 CO₂ diffusion flux at the water-gas interface of major reservoirs in the world

| 名称 | 位置 | 水-气界面 CO ₂ 扩散通量/ (mmol·m ⁻² ·d ⁻¹) | 数据来源 |
|--------------|------|---|------------------------------|
| Petit Saut | 圭亚那 | 101.36 | St Louis 等 ^[18] |
| Lokkaf | 芬兰 | 24.00 | Huttunen 等 ^[26] |
| Porttipahtaf | 芬兰 | 35.00 | Huttunen 等 ^[26] |
| Dworshak | 美国 | -23.41 | Soumis 等 ^[25] |
| Shasta | 美国 | 30.82 | Soumis 等 ^[25] |
| Curua-Una | 巴西 | 65.91 | dos Santos 等 ^[27] |
| Tucuruí | 巴西 | 192.61 | dos Santos 等 ^[27] |
| Samuel | 巴西 | 361.77 | St Louis 等 ^[18] |
| Laforge-1 | 加拿大 | 52.27 | St Louis 等 ^[18] |
| 红枫湖 | 中国 | 20.20 | 刘丛强等 ^[28] |
| 洪家渡水库 | 中国 | 6.14 | 喻元秀等 ^[29] |
| 万安水库 | 中国 | 12.74 | 梅航远等 ^[30] |
| Amzson | 巴西 | 559.30 | Richey 等 ^[31] |
| Cabonga | 中国美国 | 105.43 | Tremblay ^[17] |
| 本研究三峡水库 | 中国 | 21.12 | |

表 3 世界上主要水库水-气界面 CH₄ 扩散通量Table 3 CH₄ diffusion flux at the water-gas interface of major reservoirs in the world

| 名称 | 位置 | 水-气界面 CH ₄ 扩散通量/ (mmol · m ⁻² · d ⁻¹) | 数据来源 |
|--------------|-----|--|------------------------------|
| Lokkaf | 芬兰 | 79.00 | Huttunen 等 ^[26] |
| Porttipahtaf | 芬兰 | 6.00 | Huttunen 等 ^[26] |
| Laforge-1 | 加拿大 | 7.50 | Soumis 等 ^[25] |
| Bourassa | 加拿大 | 0.14 | Soumis 等 ^[25] |
| Eastmain 1 | 加拿大 | 0.77 | dos Santos 等 ^[27] |
| Jenpeg | 加拿大 | 1.11 | dos Santos 等 ^[27] |
| Cabonga | 加拿大 | 13.90 | St Louis 等 ^[18] |
| Roosevelt | 美国 | 3.20 | St Louis 等 ^[18] |
| Dworshak | 美国 | 4.40 | dos Santos 等 ^[27] |
| Shasta | 美国 | 9.50 | Soumis 等 ^[25] |
| Grimsel | 瑞士 | 0.40 | Huttunen 等 ^[26] |
| Gruyere | 瑞士 | 0.70 | Richey 等 ^[31] |
| Cabonga | 美国 | 9.50 | Tremblay 等 ^[17] |
| 本研究三峡水库 | 中国 | 7.92 | |

4 结 论

1) 在 2017 年 8 月至 2018 年 11 月一个完整水文周期内, 库区干流中段 CH₄ 通量在水库低水位运行期表现为“汇”, 其中 FL 点位在泄水期达到“源”的最大值; 3 个采样点在 CO₂ 通量在泄水期均表现为“源”的特征, 低水位运行期为 CO₂ 通量表现为“源”与“汇”的转换。

2) 三峡库区干流中段各观测点位 CO₂、CH₄ 浓度均呈现出高度的时空异质性特征, 二者变化不具有同步性, 但均在夏季保持完整周期内的最低值, 其中 CO₂ 浓度在库区开始进入低水位运行的 5—6 月均出现急剧下降。

3) 通过与国外已有水库监测数据比较分析, CO₂ 扩散通量在全球水库序列中处于中等水平, CH₄ 扩散通量在全球水库序列中处于中等偏下水平。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Rudd J W M, Hecky R E, Harris R, et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases[J]. *Ambio*, 1993, 22(4): 246-248.
- [3] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of ‘Greenhouse’ gases[J]. *Environmental Conservation*, 1995, 22(1): 7-19.
- [4] Barros N, Cole J J, Tranvik L J, et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 593-596.

- [5] 冉景江, 林初学, 郭劲松, 等. 水库温室效应研究进展与主要影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 197-202.
RAN Jingjiang, LIN Chuxue, GUO Jinsong, et al. Advances in reservoir greenhouse effects and principal influence factors analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(2): 197-202. (in Chinese)
- [6] 陈进, 黄薇. 水库温室气体排放问题初探[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 1-5.
CHEN Jin, HUANG Wei. Problem on greenhouse gas emissions of reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 1-5. (in Chinese)
- [7] 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[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1463-1470.
JIANG Tao, GUO Jinsong, LI Zhe, et al. Air-water surface greenhouse gas flux in Pengxi River at different operational stages of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1463-1470. (in Chinese)
- [8] 汪国骏, 胡明明, 王雨春, 等. 蓄水初期三峡水库草堂河水-气界面 CO₂ 和 CH₄ 通量日变化特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 696-704.
WANG Guojun, HU Mingming, WANG Yuchun, et al. Diurnal variation and influencing factors of carbon dioxide and methane emissions at water-air interface of Caotang River, Three Gorges Reservoir in the initial impoundment period[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3): 696-704. (in Chinese)
- [9] 杨博道. 三峡以及金沙江下游水库水气界面温室气体通量对比研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
YANG Boxiao. Comparative study on the air-water fluxes of CO₂ and CH₄ in the Three Gorges Reservoir and the downstream of Jinsha River, China[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] Richey J E, Hedges J I, Devol A H, et al. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River[J]. Limnology and Oceanography, 1990, 35(2): 352-371.
- [12] Li Z, Guo J S, Long M, et al. Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Xiaojiang River: a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2009, 3(3): 334-340.
- [13] Lu F, Yang L, Wang X K, et al. Preliminary report on methane emissions from the Three Gorges Reservoir in the summer drainage period[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(12): 2029-2033.
- [14] 李哲, 姚晓, 何萍, 等. 三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂、CH₄ 扩散通量昼夜动态初探[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 576-584.
LI Zhe, YAO Xiao, HE Ping, et al. Diel variations of air-water CO₂ and CH₄ diffusive fluxes in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(4): 576-584. (in Chinese)
- [15] 罗佳宸, 李思悦. 三峡库区典型河流水-气界面 CO₂ 通量日变化观测及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5217-5226.
LUO Jiachen, LI Siyue. Daily variation of CO₂ flux at water-air interface and analysis of its affecting factors in a typical river of the Three Gorges reservoir[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5217-5226. (in Chinese)
- [16] 秦宇, 张渝阳, 李哲, 等. 三峡澎溪河水华期间水体 CH₄ 浓度及其通量变化特征初探[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1578-1588.
QIN Yu, ZHANG Yuyang, LI Zhe, et al. CH₄ fluxes during the algal bloom in the Pengxi River[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1578-1588. (in Chinese)
- [17] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, et al. Greenhouse gas emissions: fluxes and processes[M]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. DOI: 10.1007/b137840.
- [18] St Louis V L, Kelly C A, Duchemin É, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. BioScience, 2000, 50(9): 766-775.
- [19] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles: consequences of damming[J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(1): 55-65.
- [20] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2): 1-8.
RAN Xiangbin, YAO Qingzhen, GONG Yao, et al. Nutrient budget of Three Gorges reservoir pre-and-post impoundment[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 30(2): 1-8. (in Chinese)

- [21] Stanley E H, Casson N J, Christel S T, et al. The ecology of methane in streams and rivers: patterns, controls, and global significance[J]. *Ecological Monographs*, 2016, 86(2): 146-171.
- [22] Bastviken D, Cole J, Pace M, et al. Methane emissions from lakes: dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(4). DOI: 10.1029/2004gb002238.
- [23] Kling G W, Kipphut G W, Miller M C. The flux of CO₂ and CH₄ from lakes and Rivers in arctic Alaska[M]// Toolik Lake. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992: 23-36. DOI: 10.1007/978-94-011-2720-2_3.
- [24] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6part2): 2298-2314.
- [25] Soumis N, Duchemin É, Canuel R, et al. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): 1-11. DOI: 10.1029/2003gb002197.
- [26] 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.
- [27] dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants[J]. *Energy Policy*, 2006, 34(4): 481-488.
- [28] 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.
LIU Congqiang, WANG Fushun, WANG Yuchun, et al. Responses of aquatic environment to river damming: from the geochemical view[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(4): 384-396. (in Chinese)
- [29] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 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*, 2008, 27(7): 1193-1199.
YU Yuanxiu, LIU Congqiang, WANG Fushun, et al. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide (pCO₂) in Hongjiadu Reservoir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1193-1199.
- [30] 梅航远, 汪福顺, 姚臣湛, 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.
MEI Hangyuan, WANG Fushun, YAO Chenchen, et al. Diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Wan'an Reservoir in spring[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 58-63. (in Chinese)
- [31] Richey J E, Wissmar R C, Devol A H, et al. Carbon flow in four lake ecosystems: a structural approach[J]. *Science*, 1978, 202(4373): 1183-1186.

(编辑 郑洁)