

三峡库区高水位运行期典型干支流水体 CO₂ 分压及其水面通量特征

傅家楠¹, 操 满¹, 邓 兵², 周子然², 陈 瑶³,
党承华³, 王雨春⁴, 汪福顺^{1,*}

(1. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200633;
3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 4. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘 要: 本文以三峡库区典型干支流作为研究对象, 重点研究高水位运行期库湾水体及库区干流 CO₂ 分压 ($p\text{CO}_2$) 的分布规律, 计算 CO₂ 的扩散通量和释放总量。本研究于 2013 年 9 月至 11 月利用走航式观测系统对库区奉节段干支流表层水体及定点剖面水体中 $p\text{CO}_2$ 和相关水质参数进行了逐月观测。研究结果表明, 干支流表层水体 $p\text{CO}_2$ 的分布和扩散通量差异显著。干流 CO₂ 扩散通量 ($F\text{-CO}_2$) 9 月至 11 月变化不大, 为 $28.19 \pm 0.80 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 支流在观测期内, 扩散通量由负变正, 其中朱衣河 $F\text{-CO}_2$ 从 -6.86 增至 $32.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 梅溪河从 -6.94 增至 $37.85 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 草堂河从 -6.97 增至 $31.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。由 10 至 11 月的数据推广到全年的高水位运行阶段 (10 月至次年 1 月), 全库区 CO₂ 排放量可达 $166\,450 \text{ t}$, 其中支流占 30.17%。

关键词: 三峡库区; 高水位运行; 二氧化碳分压; 二氧化碳扩散通量

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2016)01-0064-09 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.009

CO₂ 是最重要的温室气体 (GHG) 之一, 占全球 GHG 总量的 80% ~ 85%, 对地球温室效应强度变化的贡献约为 55%^[1]。自 18 世纪 60 年代以来, 大气 CO₂ 从 28.37 Pa 逐渐上升。到 2013 年 5 月, 美国夏威夷的 Mauna Loa 气象站公布大气中 CO₂ 已达 40.53 Pa^[2]。二氧化碳在地表系统中的源/汇关系由此成为温室气体减排工作的重要环节。相对于人为直接排放 CO₂ 的核算, 自然系统的碳收支估算仍存在很大的不确定性, 其中针对陆地水文系统和大气之间的碳交换计算被很大程度上忽略了。

实际上, 内陆水域与大气 CO₂ 的交换是全球碳循环的重要组成部分^[3]。据有限的研究表明, 全球 CO₂ 释放量中来自溪流与河流为 $1.8^{+0.25}_{-0.25} \text{ Pg C/a}$, 来自湖泊与水库为 $0.32^{+0.52}_{-0.26} \text{ Pg C/a}$ ^[4]。陆地河流被大规模拦截筑坝, 形成大量的水库, 而这些水库的存在会对陆地水文系统和大气碳交换的准确估算产

生不确定的影响。另一方面, 认识水库的碳排放也是明确水电是否清洁能源的关键之一。影响水库产生 GHG 的因素很多, 如淹没植被的降解导致的早期释放、水库的地理位置和季节的变化、水库的库龄等^[5-7]。

天然湖泊与水库对大气 CO₂ 而言, 既表现为“源”, 也可能是“汇”, 但绝大多数表现为“源”的特性^[8-10]。相比而言, 尽管中国是水库大国, 但对其研究多集中在支流富营养化^[11-12]、生态影响评估和治理等方面^[13-14]。对水库水-气界面 GHG 通量的研究不多。例如, 2003 年开始蓄水的三峡水库是全球著名水库, 总库容达 393 亿 m³。该水库的温室气体排放也引起了国际同行的极大关注。其中, 2009 年 9 月 Nature News online 发表了“Chinese dam may be a methane menace”一文。该文以并不严谨的态度认为包括三峡水库在内的我国水库是甲烷的重要来

收稿日期: 2015-03-40; 改回日期: 2015-09-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-001); 国家自然科学基金项目 (41273128); 河北省重点基础研究项目 (14964206D-3)。

第一作者简介: 傅家楠 (1990-) 男, 硕士研究生, 从事环境地球化学研究。E-mail: fjnstar@shu.edu.cn.

* 通讯作者: 汪福顺 (1976-) 男, 博士, 教授, 从事环境地球化学研究。E-mail: fswang@shu.edu.cn.

源,然而其唯一证据仅来自于发表在 Journal of Geophysical Research 的一篇文章中的估算数据^[15]。因此,开展三峡水库 GHG 释放效应研究,获得可信的水库温室气体观测数据具有重要的科学和现实意义。

根据中国长江三峡集团公司历年的水文情况统计,每年水库高水位运行(175 m 作为标准)多为10月至次年1月。蓄水末期的9月水位保持在145~150 m,而枯水期的10月和11月则保持在170~175 m,正是由于这段时间的水文水动力条件存在较大差异,是三峡水库调度运行背景下的特殊时期,所以本文以此作为研究时段,对三峡水库典型干流与支流进行详细观测研究。一方面,研究区段干流与全库区干流均具有普遍的一维流动特性;另一方面,所选取的三条支流具有不同河长,不同河宽,不同流向等特点,基本涵盖全库区其他支流类型。本次研究的重点在于高水位期 $p\text{CO}_2$ 的分布规律及其水面通量变化,探讨该区水体与大气 CO₂ 的源汇关系,为认识和评估水库系统与大气 GHG 的总交换量、净交换量这一重要的科学和现实问题提供数据支持,为该区域碳循环的进一步研究提供参考,为研究低龄型、深水型亚热带大型水库的 GHG 释放的现状和机理提供研究范例。

1 研究区域与方法

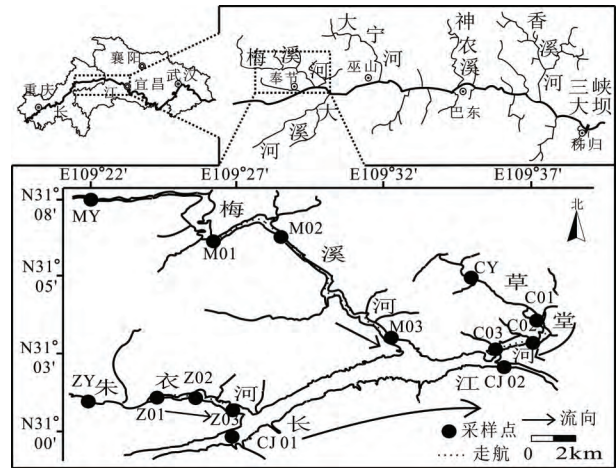
1.1 研究地点

三峡库区位于四川盆地与长江中下游平原的结合部,属于亚热带湿润季风气候区。当水库在最高水位175 m 时,其水面面积达1084 km²,其中干流约782 km²,支流约302 km²^[16]。朱衣河、梅溪河和草堂河均位于重庆市奉节县境内(109°01'17"~109°45'58"E, 30°29'19"~31°22'23"N),属于库区的典型支流。朱衣河全长31.4 km,流域面积153.6 km²,年均流量2.92 m³/s;梅溪河全长103 km,流域面积1929 km²,年均流量45.9 m³/s;草堂河全长33 km,流域面积394.8 km²,年均流量7.51 m³/s。

1.2 采样方法

自2013年9月底至2013年11月底,按月对三峡库区库中奉节段典型干支流进行走航监测和水样采集,走航路线及采样点如图1所示。

每条支流各设4个采样点(源头、上游、中游、下游),从上游到下游进行走航式观测,并在各采样



ZY、MY、CY 分别表示朱衣河、梅溪河、草堂河的源头采样点; Z01、M01、C01 表示各支流上游采样点; Z02、M02、C02 表示各支流中游采样点; Z03、M03、C03 表示各支流下游采样点

图1 研究区域和采样点位

Fig.1 Study area and sampling sites

点进行水体剖面观测并采集水样。在长江干流上设2个采样点(CJ01、CJ02),沿断面方向进行走航。

走航观测方法: 利用自吸泵连续抽取水面下方0.3 m 左右处水体进行 $p\text{CO}_2$ 检测。水体剖面 $p\text{CO}_2$ 观测方法: 利用潜水泵(型号: 100QJ2-50/10)抽取不同深度水,自表层到水下5 m 每隔1 m 采水,水下5 m 至底层每隔5 m 或10 m 采水。用二氧化碳传感器(HydroCTM/CO₂)对水样进行 $p\text{CO}_2$ 检测。水质参数测定方法: 利用YSI(型号: EXO)水质参数仪测定温度(T)、叶绿素(Chla)以及溶解氧(DO)等。采样时空安排: 每月均在月底结束采样,各水样均在采样点中部采集。

1.3 数据计算方法

水-气界面 CO₂ 扩散通量($F\text{-CO}_2$),由下式计算^[17]。

$$F = (\text{CO}_{2w} - \text{CO}_{2g}) \times k = (p\text{CO}_{2w} - p\text{CO}_{2g}) \times K_H \times k \quad (1)$$

式中, F 为 CO₂ 的扩散通量[mmol/(m²·d)]。若 $F > 0$ 表示水体释放 CO₂,若 $F < 0$ 表示水体吸收 CO₂; CO_{2w} 为水中 CO₂ 的平衡浓度(mmol/L), CO_{2g} 为大气中 CO₂ 的平衡浓度; k 表示气体交换系数; $p\text{CO}_{2w}$ 表示水中 CO₂ 的分压(0.1 Pa), $p\text{CO}_{2g}$ 表示空气中 CO₂ 的分压(本研究用39 Pa 计算); K_H 表示亨利系数,计算如公式如下^[18]:

$$\ln K_H(\text{CO}_2) = -58.0931 + 90.5069 \times \left(\frac{100}{T_K} \right) + 22.294 \times \ln \left(\frac{T_K}{100} \right) \quad (2)$$

式中, T_k 表示开尔文温度 [K]。

由于 k 受到风速、温度、流速等多重因素的影响, 导致 k 的计算方法多样, 由于本研究区域处于低风速、低流速地域, 故可采用经验公式 (3) 来计算^[19-20]。

$$k = [2.07 + (0.215 \times U_{10}^{1.7})] \times \left(\frac{SC_{CO_2}}{600} \right)^x \quad (3)$$

式中, U_{10} 表示在水面上方 10 m 处的平均风速 (m/s); SC_{CO_2} 为 CO_2 的施密特数, 取决于温度; x 取决于 U_{10} , 若 $U_{10} < 3$ m/s 则 $x = -2/3$, 若 $U_{10} > 3$ m/s 则 $x = -1/2$ ^[20]。

而 U_{10} 得通过公式 (4)^[20] 计算获得, SC_{CO_2} 由公式 (5)^[21] 计算获得

$$U_{10} = 1.22 \times U_1 \quad (4)$$

式中, U_1 表示在水面上方 1 m 处的平均风速 (m/s)。

$$SC_{CO_2} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (5)$$

式中, t 表示表层水的温度 (°C)。

计算中所用到的 pCO_2 均为实际检测数值的平均值。通过计算各研究区段 9 月至 11 月 $F-CO_2$ 结合区段面积可以得到 CO_2 释放量通量。以朱衣河为例, 用 Z01 到 Z02 的观测数据表征上游, 计算 $F-CO_2$, 结合上游面积可得该段 CO_2 释放量; 用 Z02 到 Z03 的观测数据表征中下游, 计算 $F-CO_2$, 结合中下游面积可得该段 CO_2 释放量, 综合可得高水位运行期朱衣河流域研究区段 CO_2 释放量。

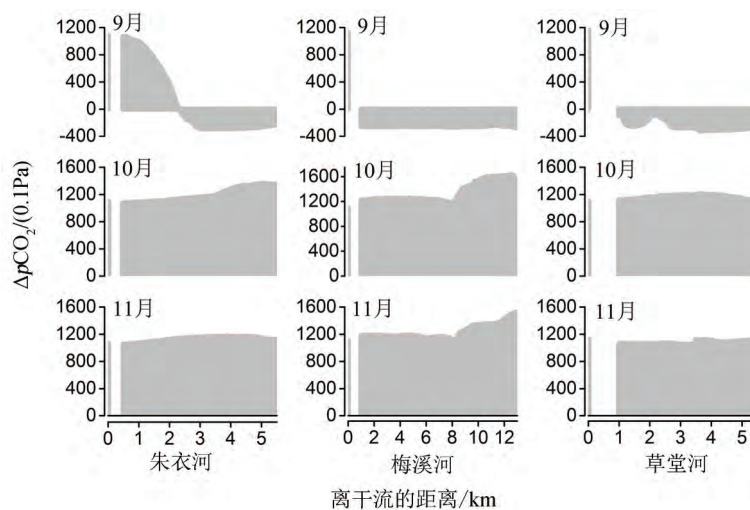
2 结果与讨论

2.1 表层水体的走航观测

由于在同一时间段、一定区域范围的干流表层水体的水质特性及水动力特性类似, 表层水体 pCO_2 变化不大^[22], 故采用断面 CJ01 和 CJ02 走航来表征研究区段干流。从图 2 中可以发现, 9 至 11 月, 干流 pCO_2 与大气 pCO_2 的差值 (ΔpCO_2) 差别不大。相比之下, 三条支流表层水体 ΔpCO_2 差异较大。其中干流 ΔpCO_2 均值为 112 Pa; 变化范围在 108 ~ 118 Pa; 朱衣河 ΔpCO_2 的变化范围保持在 -30 ~ 119 Pa; 梅溪河为 -28 ~ 166 Pa; 草堂河为 -32 ~ 122 Pa。干支流存在明显差异主要是由于干流始终保持河流的一维流态, 呼吸作用成为水体中的主要生物过程; 相反, 支流库湾则逐渐发育出湖沼型特征。9 月份开始三峡水库进入蓄水期, 大量干流水团倒灌进入支流库湾^[23]。干流顶托作用导致支流流速变缓, 水体中泥沙大量沉积并增加了水体的透明度, 结合 9 月较高的温度, 利于水生植物的光合过程, 这与 9 月支流低 ΔpCO_2 一致 (图 2)。由此可以发现 9 月支流依然延续着夏季的特性, 到了 10 月和 11 月, 随着温度下降, 支流库湾水体层化现象逐渐消失, 干、支流水体之间的差异也逐渐减弱, 从而表现出正常高水位运行期的特征。

2.2 支流库湾 pCO_2 的分布规律

9 月三条支流表层水体 pCO_2 与中底层具有明



ΔpCO_2 表示实际测得 pCO_2 值与大气中 pCO_2 (本文以 39 Pa 计算) 的差值

图 2 9 ~ 11 月干、支流表层水体 pCO_2 与大气 pCO_2 的差异

Fig. 2 Differences of pCO_2 between surface water and atmosphere of the study area from September to November.

显差异,其中0~5 m 水层段 $p\text{CO}_2$ 明显偏低(接近大气水平),大约在10 m 以下 $p\text{CO}_2$ 稳定在较高的水平;此外,从干、支流交汇处沿着各支流到上游的过程中,表层水体 $p\text{CO}_2$ 均表现出逐渐降低的趋势(图3)。

10 月和 11 月一方面由于温度的影响使得表层水体密度变大而下沉,从而上下水体得以交换;另一方面,水位不断上升意味着水团不断地流入,加剧了水体的交换和混合,这些都会导致 $p\text{CO}_2$ 垂直分层现象逐渐消失。图3(由于潜水泵发生故障导

致10月份草堂河数据缺失)中10月与11月的支流库湾还呈现出水平分层的现象。根据纪道斌等人^[24]对三峡库区支流库湾香溪河的水动力特性研究,这一现象可以用支流库湾的分层异向流水动力特性(包括干流水体密度差引起的倒灌异重流和库湾上游来水与库湾回水水体密度差引起的顺坡底部异重流)来解释,其中干流和源头来水的部分水质参数如表1。

2.3 干、流水体的剖面分析

图4反映的是9~11月期间朱衣、梅溪、草堂河

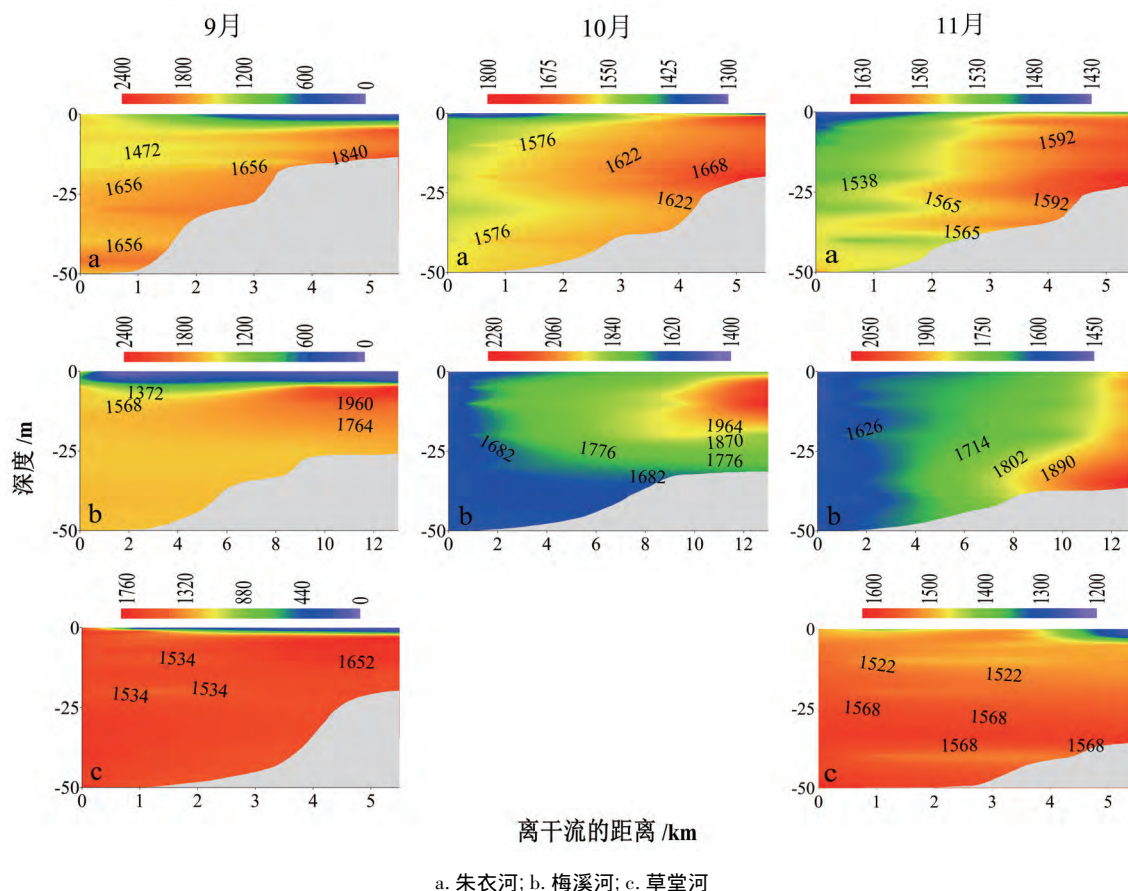


图3 高水位运行期三条支流沿途 $p\text{CO}_2$ 分布规律

Fig. 3 Distribution of $p\text{CO}_2$ in three tributaries during high water level period

表1 干流与源头表层水体水质参数

Table 1 Water quality parameters of surface water in the mainstream and headwaters

点位	浊度/NTU			温度/℃			叶绿素/($\mu\text{g/L}$)			溶解氧/(mg/L)		
	9月	10月	11月	9月	10月	11月	9月	10月	11月	9月	10月	11月
CJ01	10.3	3.5	0.2	23.61	22.68	19.83	0.57	0.34	0.47	7.5	7.27	7.34
CJ02	11.7	3.5	1.3	23.21	22.59	20.15	0.7	0.3	0.12	7.36	7.19	7.16
ZY	—	—	—	30.49	20.67	16.06	0.38	1.33	0.67	11.19	14.16	9.33
MY	—	—	—	24.32	17.97	14.96	0.72	0.35	0.31	8.52	9.78	10.02
CY	—	—	—	23.92	18.25	15.17	1.23	0.83	0.45	9.02	10.43	9.62

注:—为未检测。

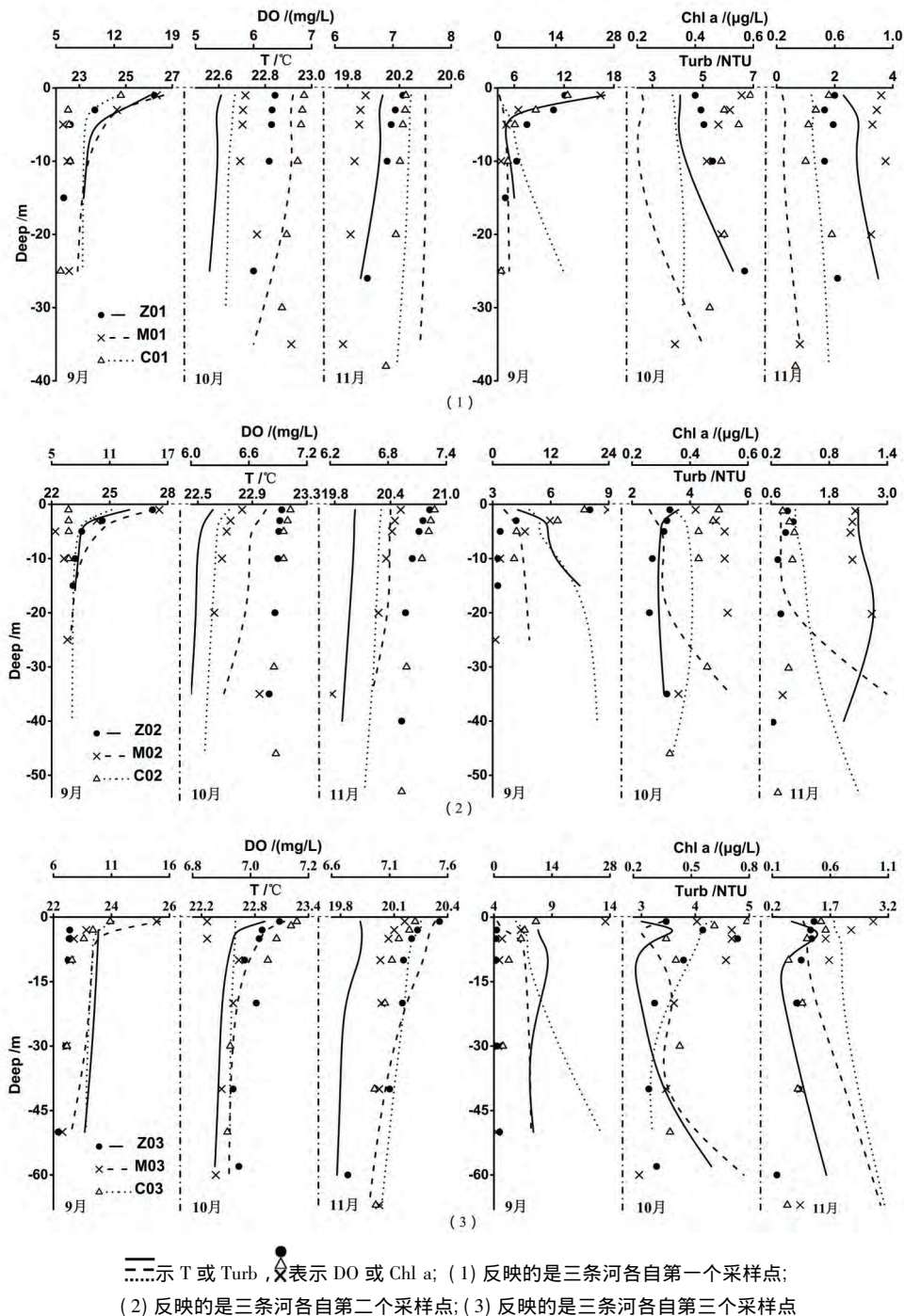


图 4 高水位运行期各支流各采样点剖面水质参数

Fig. 4 Vertical profiles of water quality parameters of three tributaries during high water level period

各采样点 DO、T、Chl a、Turb 的剖面变化情况。支流库湾水体表、底层温差从 9 月到 11 月逐渐减小(图 4),表明库湾水体热分层现象逐渐消失。随着干流水体含沙量的降低,支流水体浊度(Turb)从 9 月到 11 月明显减小(图 4,表 1)。此外,随着水动力减弱,库湾河口到上游浊度也逐渐减小。这是由于干流携带大量泥沙^[25],干流水体的顶托作用使支流水

体流速降低,从而导致颗粒物沉降。支流库湾的水文特征也促进了自养系统的发育。9 月支流各采样点表层 DO 与 Chl a 均较高(图 4),表明表层水体光合作用占据主导地位,与 9 月表层低 $p\text{CO}_2$ (图 2)一致。受温度下降和热分层消失的影响,10 月和 11 月水体中光合作用减弱,表层水体中 DO 和 Chl a 含量明显降低,相应地 $p\text{CO}_2$ 则明显增高(图 2)。

影响 $p\text{CO}_2$ 分布的因素可归纳为光合作用、呼吸作用和干支流之间的掺混过程。从图 5 中可以发现 $p\text{CO}_2$ 与 DO 呈现显著的负相关。支流类型的差异(即空间角度)对 $p\text{CO}_2$ 与 DO 回归性分析的影响不大,而月际差异(即时间角度)则相对明显。一般情况下表层水温越高,DO 越高, $p\text{CO}_2$ 越低。这是由于表层光合强烈,光合作用强于呼吸作用,使得水体 DO 高。中底层以呼吸作用为主,有机物分解消耗 DO,并释放 CO₂,增加 CO₂ 分压。

2.4 干支流 CO₂ 的释放量

库区受地形影响,风力普遍偏小,静风频率较大。根据 2008~2013 年长江三峡工程生态与环境监测公报中显示,奉节县年平均风速在 1.4~1.6 m/s,本次研究采用 1.5 m/s 计算。

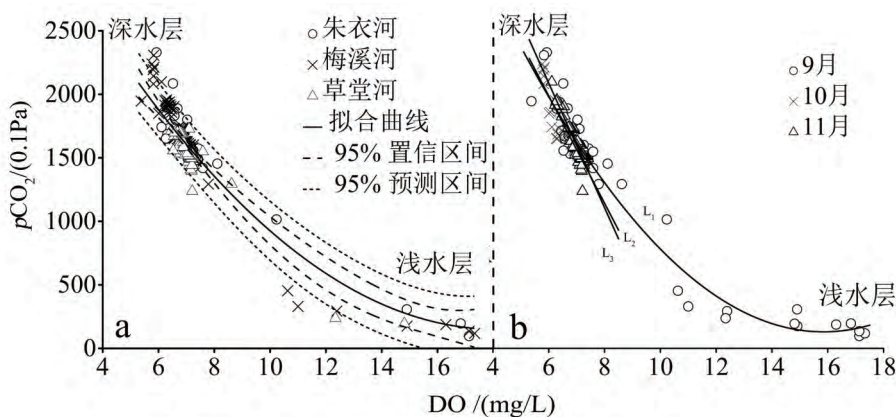
研究区段干流及支流上游、中下游的 $F\text{-CO}_2$ 如图 6 所示,从中可以发现:9 月朱衣河上游、梅溪河、草堂河的扩散通量为负,对大气中 CO₂ 表现出“汇”的特征;10 月和 11 月三条支流的扩散通量均为正,对大气中 CO₂ 表现出“源”的特征。9~11 月干流的扩散通量均为正值,且几乎维持在同一水平,对大气中 CO₂ 表现出“源”的特征。这主要是由于干流流速快,保持了河流的一维流动特性,而且浊度较大,光合作用较弱,有机物的降解作用较强。因此区分 9 月与 10、11 月十分必要,9 月的数据并不能用来估算高水位运行期,反之 10 月与 11 月数据稳定,能很好反映出高水位运行的特点,因此能用来估算全年高水位运行期(10 月至次年 1 月)。

进一步分析计算结果 9~11 月研究区段朱衣河

CO₂ 扩散通量从 $-6.86 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增至 $32.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,向大气总共释放 CO₂ 约 $5.63 \times 10^6 \text{ mol}$ (合 250 t);梅溪河扩散通量从 $-6.94 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增至 $37.85 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,向大气总共释放 CO₂ 约 $1.79 \times 10^7 \text{ mol}$ (合 0.79 kton);草堂河从 $-6.97 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增至 $31.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,向大气总共释放 CO₂ 约 $8.21 \times 10^6 \text{ mol}$ (合 360 t);干流 CO₂ 扩散通量各月变化不大,为 $28.19 \pm 0.80 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,向大气总共释放 CO₂ 约 $3.72 \times 10^7 \text{ mol}$ (合 1 640 t)。

从其他研究者对三峡库区其他干支流—气界面 CO₂ 通量时空变化的研究对比发现:(1)空间角度(对比各区段干支流 9~11 月 CO₂ 平均通量),支流方面近似于李哲等人研究的彭溪河,低于龙溪河^[26],略低于蒋滔等人研究的彭溪河^[27],高于姚臣谔等人研究的香溪河^[28],近似于 Zhao 等人研究的香溪河、大宁河,低于小江^[16];干流方面近似于 Yang 等人研究的云阳、巫山、秭归段干流^[29],近似于 Zhao 等人研究的巫山、巴东、秭归段干流^[16]。因此,将本次研究的结果推广到统计整个三峡库区 CO₂ 释放量具有一定可行性,如表 2 所示。(2)时间角度(对比 9~11 月和 12~2 月的 CO₂ 平均通量),云阳段、巫山段、秭归段 9 月至次年 2 月 CO₂ 扩散通量变化不大^[29];支流香溪河、干流万州段、巴东段、秭归段秋冬两季 CO₂ 扩散通量变化也不大^[16]。因此,将 10~11 月的数据推广到全年高水位运行期(10 月至次年 1 月)同样具有一定可行性。

从图 2、3、4 以及图 6 我们可以发现 9 月支流的数据与 10、11 月有较大差异,因此估算全年高水位



a. 按不同类型支流分: $p\text{CO}_2 = 4020.66 - 427.67(\text{DO}) + 11.82(\text{DO})^2$, $R^2 = 0.91$;
 b. 按不同月份分: L_1 $p\text{CO}_2 = 4921.80 - 604.86(\text{DO}) + 19.09(\text{DO})^2$, $R^2 = 0.95$;
 L_2 $p\text{CO}_2 = 4521.80 - 422.40(\text{DO})$, $R^2 = 0.81$; L_3 $p\text{CO}_2 = 5021.67 - 489.89(\text{DO})$, $R^2 = 0.85$

图 5 $p\text{CO}_2$ 和 DO 的回归分析

Fig. 5 Regression analysis between $p\text{CO}_2$ and DO

表 2 高水位运行期库区干支流 CO₂ 释放量Table 2 Emission of CO₂ from tributary and mainstream of reservoir during high water level period

河流	河段	面积 /km ²	10 月释放量 /kmol	11 月释放量 /kmol	汇总 /1 000 t
朱衣河	上游	1.2	2 821	2 537	0.24 ^a
	中下游	1.8			(0.47) ^b
梅溪河	上游	5.5	10 403	9 431	0.87 ^a
	中下游	3.8			(1.75) ^b
草堂河	上游	1.6	4 773	4 324	0.40 ^a
	中下游	3.6			(0.80) ^b
支流 ^c	全库区	302	—	—	25.11 ^a (50.21) ^b
干流	研究区域	14.5	12 483	12 010	1.08 ^a (2.16) ^b
干流 ^d	全库区	782	—	—	58.12 ^a (116.24) ^b
三峡水库 ^e	—	1 084	—	—	83.23 ^a (166.45) ^b

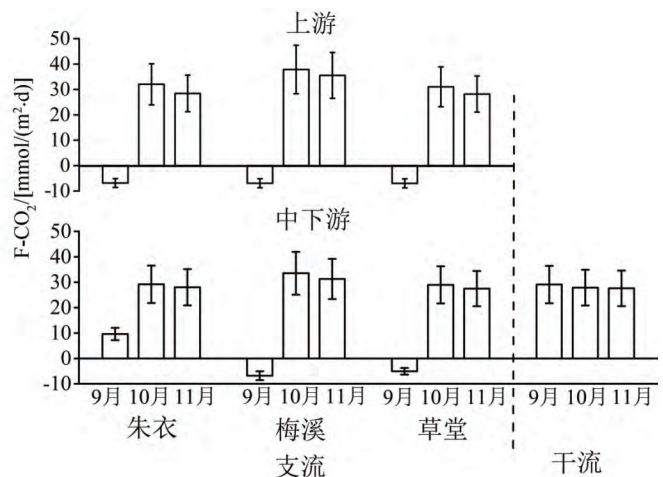
注: a 表示 10 月至 11 月实际观测计算值; b 表示全年高水位运行期 10 月至次年 1 月的估算值; c 表示 175 m 水位, 整个三峡库区的支流; d 表示 175 m 水位, 整个三峡库区的干流; e 表示 175 m 水位, 整个三峡库区总 CO₂ 释放量。

时期 CO₂ 通量时只能参考数据更为稳定的 10、11 月。结合图 6 和表 2, 可以发现 10 至 11 月三峡库区支流 CO₂ 释放量占整个库区的 30.17%, 因此支流对于统计整个库区 CO₂ 的释放有着不容忽视的地位。

3 结 论

研究高水位运行状态下的水库, 对比三峡库区干流与不同类型流水体的 $p\text{CO}_2$ 、部分水质参数及水面 CO₂ 通量, 得到如下结论:

1) 三峡库区干流表层水体 $p\text{CO}_2$ 稳定, 9 月各支流表层水体 $p\text{CO}_2$ 低于大气中 $p\text{CO}_2$, 表现为吸收 CO₂; 10 月和 11 月各支流表层水体表现为释放 CO₂。



数据以 1.5 m/s 风速计算获得, 误差线数据是基于 0.5 m/s 和 2.5 m/s 风速计算获得

图 6 干支流水体表面 CO₂ 通量Fig. 6 F-CO₂ of surface water from mainstream and tributary

2) 三峡库区从 9 月至 11 月, 干流共向大气释放 1 640 tCO₂, 朱衣河、梅溪河与草堂河这三条支流共向大气释放 1400 tCO₂。但考虑到 9 月水体各项指标与 10、11 月差异显著, 故只能用 10、11 的数据来估算全年高水位运行期(10 月至次年 1 月) CO₂ 释放量。通过估算得高水位期全库区干流共向大气释放 116 240 t CO₂, 全库区支流共向大气释放 50 210 tCO₂。

3) 三峡库区从 10 至 11 月实际观测计算发现, 三峡库区支流 CO₂ 释放量占全库区的 30.17%, 因此支流对于统计整个库区 CO₂ 的释放有着不容忽视的地位。

研究区段三峡库区干流和支流有着相对较低的 CO₂ 释放量, 可能与库龄、面积、季节、地形等因素有关。根据本研究发现支流对于统计整个水库 CO₂ 的释放有着不容忽视的作用, 因此, 后续评估水库 CO₂ 释放量时, 可能会更加明显的区分干流与支流区段, 同时细化高低水位条件下的库区 CO₂ 释放量, 并对全库区年度性变化作出一定的评估。

参 考 文 献

- [1] Tomić J, Živanov M B, Kušljević M, *et al.* Realization of measurement station for remote environmental monitoring[J]. Key Engineering Materials, 2013, 543: 105–108.
- [2] Bala G. Digesting 400 ppm for global mean CO₂ concentration[J]. Current Science, 2013, 104(11): 1471–1472.
- [3] Cole JJ, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 172–185.
- [4] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. Nature, 2013, 503(7476): 355–359.
- [5] Louis V L S T, 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.
- [6] Roland F, Vidal L O, Pacheco F S, *et al.* Variability of carbon dioxide flux from tropical(Cerrado) hydroelectric reservoirs[J]. Aquatic Sciences, 2010, 72(3): 283–293.
- [7] 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.
- [8] Demarty M, Bastien J, Tremblay A, *et al.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Québec, Canada, measured with automated systems[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(23): 8908–8915.
- [9] Tadonleke R D, Marty J, Planas D. Assessing factors underlying variation of CO₂ emissions in boreal lakes *vs.* reservoirs[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, 79(2): 282–297.
- [10] Halbedel S, Koschorreck M. Regulation of CO₂ emissions from temperate streams and reservoirs[J]. Biogeosciences, 2013, 10(11): 7539–7551.
- [11] Shen Z, Chen L, Hong Q, *et al.* Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of the Total Environment, 2013, 454: 383–392.
- [12] Zheng B H, Xiong C J, Liu D F, *et al.* The influence of hydrodynamic conditions on algal bloom in the Three Gorges Reservoir Tributaries[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295: 1981–1990.
- [13] Zhang Z, Wan C, Zheng Z, *et al.* Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7080–7091.
- [14] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* An eco-environmental friendly operation: An effective method to mitigate the harmful blooms in the tributary bays of Three Gorges Reservoir[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1458–1470.
- [15] Chen H, Wu Y, Yuan X, *et al.* Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres(1984–2012), 2009, 114: D18301.
- [16] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China[J]. Biogeosciences, 2013, 10(2): 1219–1230.
- [17] Kelly C A, Rudd J W M, St Louis V L, *et al.* Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1994, 75(29): 332–333.
- [18] 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[J]. Biogeosciences, 2011, 8(1): 41–53.
- [19] Cole J, Nina J, Caraco F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. Limnology and Oceanography, 1998, 43(4): 647–656.
- [20] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(3): 1010–1017.
- [21] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans(1978–2012), 1992, 97(C5): 7373–7382.
- [22] 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.
- [23] 罗光富. 河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [24] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学(G 辑), 2010, 40(1): 101–112.
- [25] 李灿. 三峡库区重庆段泥沙对富营养化影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [26] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO₂、CH₄ 通量比较初探[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1008–1016.
- [27] 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.

- [28] 姚臣谔, 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.
- [29] Yang L, Lu F, Wang X, *et al.* Spatial and seasonal variability of CO₂ flux at the air-water interface of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environment Science, 2013, 25(11): 2229-2238.

Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in Typical Mainstream and Tributaries of the Three Gorges Reservoir during High Water Level Period

FU Jianan¹, CAO Man¹, DENG Bing², ZHOU Ziran², CHEN Yao³,
DANG Chenghua³, WANG Yuchun⁴, WANG Fushun¹

- (1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. State Key Laboratory of Estuarine and coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200633, China;
3. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. Department of Water Environment,
China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In this study, typical mainstream and tributaries of the Three Gorges Reservoir were investigated during high water level period, in order to understand the distribution of partial pressure of carbon dioxide ($p\text{CO}_2$) and its diffusion flux. The $p\text{CO}_2$ of surface water in the mainstream and tributaries in Fengjie Region was detected once a month by underway observation system from September to November. At the regular sites, $p\text{CO}_2$ and some related water quality parameters along the water column were also determined. Results show that, there are significant differences of $p\text{CO}_2$ in surface water body between mainstream and tributaries. In comparison with tributaries, diffusion flux of dissolved carbon dioxide (F-CO_2) from mainstream has less variation, with a value of $28.19 \pm 0.80 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. As for tributaries, their F-CO_2 turn negative into positive; F-CO_2 of the Zhuyi River, the Meixi River and the Caotang River range -6.86 to 32.05 , -6.94 to 37.85 , and -6.97 to $31.05 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively. Taking all high water level period from October to January of the next year into consideration, based on the date of October and November, 166.45 kiloton of CO₂ would be emitted to atmosphere of the whole reservoir, while 30.17% of it came from tributaries.

Key words: Three Gorges Reservoir; high water level; partial pressure; CO₂; diffusion flux