

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

李双¹, 王雨春², 操满¹, 钱慧君¹, 许涛², 周子然³, 邓兵³, 汪福顺^{1*}

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

摘要: 以三峡库区库中干流以及主要支流——梅溪河为研究区, 于 2013 年 5 月对该区域水体中溶解二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 进行了走航观测. 结果表明, 夏季梅溪河表层 $p\text{CO}_2$ 为 6.8 ~ 7.5 Pa, 三峡库区库中长江干流表层 $p\text{CO}_2$ 为 201.4 ~ 210.2 Pa. 在库区干、支流交汇的过渡区水体剖面上, 表层水体 $p\text{CO}_2$ 最低为 53.5 Pa, 随着水深增加, $p\text{CO}_2$ 急剧增大, 在 3 m 处达到约 210 Pa 后基本保持不变. 通过计算, 库区支流梅溪河和库区干流表层水体的 CO_2 释放通量分别为 $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 结果表明, 库区支流梅溪河表现为大气中 CO_2 的“汇”, 而库区干流表现为 CO_2 的“源”. 库区干、支流水体在 CO_2 的释放上有显著差异.

关键词: 温室气体; 二氧化碳分压; 二氧化碳通量; 三峡库区; 梅溪河

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0885-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.011

Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer

LI Shuang¹, WANG Yu-chun², CAO Man¹, QIAN Hui-jun¹, XU Tao², ZHOU Zi-ran³, DENG Bing³, WANG Fu-shun¹

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

Abstract: This study investigated the partial pressure of CO_2 ($p\text{CO}_2$) in the mainstream of the Three Gorges Reservoir and its tributary (Meixi River) in May 2013. Results showed that $p\text{CO}_2$ in the surface water of the Meixi River and mainstream of the Three Gorges Reservoir was 6.8–7.5 Pa and 201.4–210.2 Pa, respectively. At the mixing area between the Meixi River and the mainstream of Changjiang, the lowest value of $p\text{CO}_2$ in surface water was 53.5 Pa, and $p\text{CO}_2$ gradually increased downwardly. Below 3 m in depth, $p\text{CO}_2$ kept the stable value of around 210 Pa. Based on the calculation results, the emission flux of CO_2 in the Meixi River and the mainstream of the central Three Gorges Reservoir was about $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. These results showed that the Meixi River is a sink for atmospheric CO_2 , and the mainstream of the Three Gorges Reservoir is a source for atmospheric CO_2 .

Key words: greenhouse gas; partial pressure of carbon dioxide; diffusion flux of carbon dioxide; the Three Gorges Reservoir; Meixi River

CO_2 是重要的温室气体, 据欧洲环境协会和美国环境协会统计, 大气中 CO_2 占温室气体总量的 80% ~ 85%^[1, 2]. 人类活动使得大气中温室气体的浓度远远超过了工业革命前的水平, 大气中 CO_2 的含量已从 1750 年的 $(28 \pm 1) \text{ Pa}$ 增加到 1999 年的 36.7 Pa, 至目前的 38 Pa^[3]. 近 50 年气候变暖主要是由人类活动引起的可能性, 从 2001 年 IPCC 第三次评估报告中的 66% 提高到了 90% 以上, 进一步从科学上确认了人类活动引起全球气候变化的事实^[4]. 化石燃料使用产生的 CO_2 一直是温室气体的

重要来源, 而水力发电长期以来被认为是清洁能源而得到大规模推广. 然而最近的一些研究表明, 水库也可能会释放大量的温室气体^[5, 6]. 甚至某些水电站型水库生产单位电力所释放的温室气体甚至大于火电所产生的温室气体^[7]. 但这些研究大多是集

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-09

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(42173128); 上海市教委基金项目(12YZ017)

作者简介: 李双(1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境科学, E-mail: Lishuang2011@shu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fswang@shu.edu.cn

中在热带水库、温带泥炭地水库或浅水库区,对深水水库、峡谷型水库和河道型水库等研究相对较少。此外,我国水库众多,但相关数据严重缺乏,目前的研究多集中在巴西^[8]、加拿大^[9]、美国^[10]、芬兰^[11]、法属圭亚那^[12]等地。中国现有研究更偏重于对自然湖泊及富营养水库的研究,如太湖、东湖、红枫湖、百花湖、滇池和泸沽湖等^[13]。人工水库的温室气体产生、释放及其通量关系研究数据较少且近年来逐渐引起学术界的重视^[2,14,15]。此外,水库水-气界面 CO_2 的“源/汇”关系在时间和空间上可能是动态变化的^[16,17]。因此,积极寻找并量化各种体系中温室气体的源/汇关系成为重要的科学任务。

2003 年开始蓄水的三峡水库是世界瞩目的水利工程,装机容量和发电量都位居世界第一。水库蓄水到 175 m 后,库区面积达到 1 084 km²,两岸原有的大量土地被淹没。蓄水后,三峡库区 CO_2 的排放受到各方关注。本研究从三峡库区中部库区干、支流水体溶解 CO_2 分压及其水气扩散通量入手,分析了夏季三峡水库干库区支流水体对大气 CO_2 的吸收与释放,并探讨研究区水域在对大气中 CO_2 “源”和“汇”关系中的作用。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

三峡库区较大的库区支流主要有嘉陵江、乌江、梅溪河、草堂河、鲢鱼溪、抱龙河、神龙溪、香溪河、青干河、神农溪和黄柏河等。梅溪河位于长江北岸三峡库区中部,发源于巫溪县境内,在奉节老城区东注入长江,是长江的一级库区支流。本研究在梅溪河设置 3 个断面采样点,在长江干流段设置表层采样点。采样地点见图 1。

1.2 样品的采集与分析

2013 年 5 月,对三峡库区中部的长江干流、库区支流(梅溪河)进行走航监测。首先从梅溪河上游(M03)走航至河口(M01);然后从长江干流(A)向三峡大坝方向航行 14.6 km(C)。走航过程中利用自吸泵连续抽取水面下 0.5 m 水体进行 $p\text{CO}_2$ 及相关水质参数的分析。在梅溪河上游(点 M03)、中游(点 M02)、河口(点 M01)处分别进行了水体剖面 $p\text{CO}_2$ 的分析。利用自吸泵间隔抽取不同深度水体,水底至水面下 5 m,每间隔 5 m 取水样,水面下 5 m 至表层每间隔 1 m 取水样,用二氧化碳传感器 HydroCTM/CO₂ 对水体进行 $p\text{CO}_2$ 分析;同时用 YSI

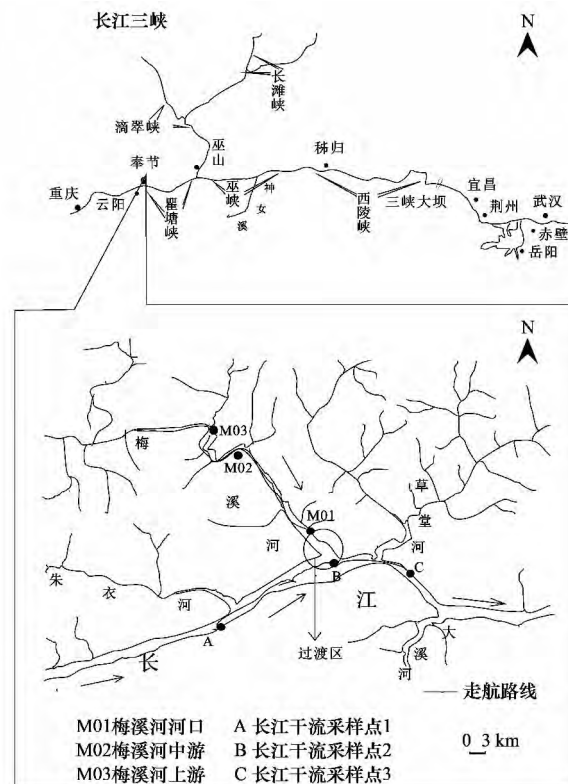


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Geographic location of study area and sampling sites

水质参数仪测定 pH、水温、DO、叶绿素 a(Chl-a),浊度仪(OBS)测定水体浊度。

1.3 数据处理

水气界面 CO_2 交换通量主要受以下 2 个因素的影响:①水体 $p\text{CO}_2$ 与大气中 $p\text{CO}_2$ 的差;②气体交换系数,而气体交换系数又受流速、风速、温度等因素影响。

二氧化碳于水气界面中扩散的通量可以用以下公式(1)计算^[18~21]:

$$F = k [(p\text{CO}_{2\text{W}} - \text{gas}_{\text{sat}}) K_{\text{H}}] \quad (1)$$

式中, F 为水气界面扩散通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], $F > 0$ 表示水体向大气中释放 CO_2 , $F < 0$ 表示水体吸收 CO_2 ^[22]. $p\text{CO}_{2\text{W}}$ 为表层水体中 CO_2 分压; gas_{sat} 为水气平衡时 CO_2 浓度(38 Pa); k 为气体交换系数,可以参照 Soumis 等^[21]的经验公式(2)计算:

$$k = 2.07 + 0.215 U^{1.7} \quad (2)$$

式中, U 为监测地区平均的风速。

K_{H} 为亨利系数,受到温度与盐度的影响,可以根据公式(3)计算^[23]:

$$\ln K_{\text{H}} = -60.2409 + 93.4517 / (100/T) + 23.3585 \times \ln(T/100) + S \times [0.023517 - 0.023656 \times (T \times 100) + 0.0047036 \times (T/100)^2] \quad (3)$$

式中, $T = t + 273.15$ t 为摄氏温度, S 为盐度。

2 结果与分析

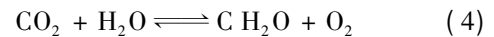
2.1 研究区水体表层 $p\text{CO}_2$ 及各项水质参数的变化

库区干流表层水温为 $20.3 \sim 21.1^\circ\text{C}$, 支流梅溪河表层水温为 $24.1 \sim 26.2^\circ\text{C}$, 库区干流表层水温明显低于支流表层(图3)。从库区干流至梅溪河, 浊度明显下降; 相应地, 叶绿素 a 、 DO 则逐渐增加; 库区干流表层水体 $p\text{CO}_2$ 在干流河段总体相对稳定, 变化范围为 $201.4 \sim 210.2 \text{ Pa}$, 远高于大气 $p\text{CO}_2$ (38.0 Pa)。梅溪河表层水体的 $p\text{CO}_2$ 变化范围为 $6.8 \sim 7.5 \text{ Pa}$, 显著低于大气的 $p\text{CO}_2$ 。

从库区干流至梅溪河过渡区, 浊度明显下降

(图2)。浊度的降低, 增加了水体的透光度, 有利于藻类光合作用的增强。由方程(4)和方程(5)可知, 水体中藻类光合作用的增强, 使水体中 CO_2 含量降低, 平衡向左移动, $[\text{H}^+]$ 降低, 水体的 pH 升高, $p\text{CO}_2$ 降低。在过渡区内水体表层的各项参数均发生大的变化。从过渡区进入梅溪河, 水体中叶绿素 a 含量的逐渐增大, 大量的藻类颗粒进一步增加了水体浊度^[24], 从而影响水体中藻类的光合作用, 使支流梅溪河中上游水体的 $p\text{CO}_2$ 保持在一个相对稳定的水平。

光合反应、呼吸(有氧)作用总反应式:



CO_2 体系在水体中的溶解平衡过程为:

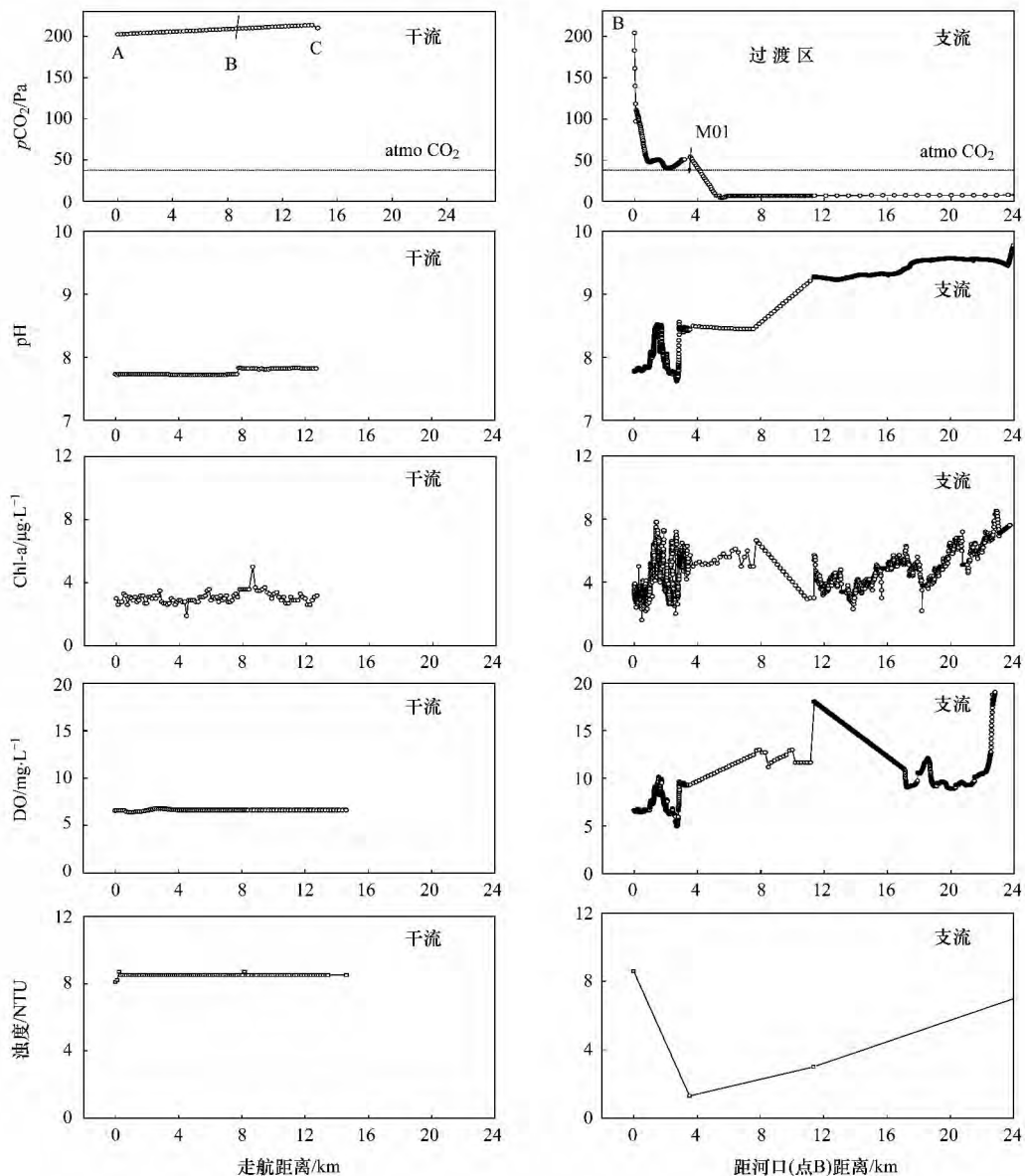
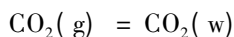


图2 库区干、支流表层水体走航监测结果

Fig. 2 Results of the cruise monitoring of the surface water in the mainstream and tributary of the central Three Gorges Reservoir



库区干、支流水体浊度、温度的明显差异使干、支流水体光合作用强度明显不同,导致干、支流水体表层 $p\text{CO}_2$ 的显著差异.

2.2 库区支流水体 $p\text{CO}_2$ 及水体参数剖面变化

三峡水库蓄水后,水库水位变动以及干支流水体密度差的变化带来干支流水体处于频繁的交换状态,这种变化又会反过来进一步改变库湾水体的物理、化学特性. 库区干流水体由于较大的流速、流量,具有显著的一维流动特征. 库湾支流水动力特性受上游来水及水库干流影响显著,在深度方向具有典型的分层特征,不能简单地根据其“河道型”形

态特点概化为一维特性^[25].

库区支流由于受到干流水体回水顶托作用,流速减缓,透明度较高,有利于浮游植物等的生长,在水体剖面上会形成明显的分层现象^[26]. 以库区干支流的交汇点(B)为起点,绘制库区支流梅溪河3个断面水体参数的剖面变化(图3). $p\text{CO}_2$ 最小值均出现在监测断面表层,随着深度增大,迅速增加. 水面10 m以下水体 $p\text{CO}_2$ 变化平稳,范围为180.5~185 Pa,整个水体剖面呈现明显的垂向分层现象. 库区干、支流水体温度也有分层现象,库区干流水量大流速快,透光性较差,水体表层与底部温差并不大;库区支流受到干流回水顶托影响,水流流速显著降低,有明显的水体热分层现象. 表、底水体温差较大. 由温度、浊度的剖面图可知,干流水体从

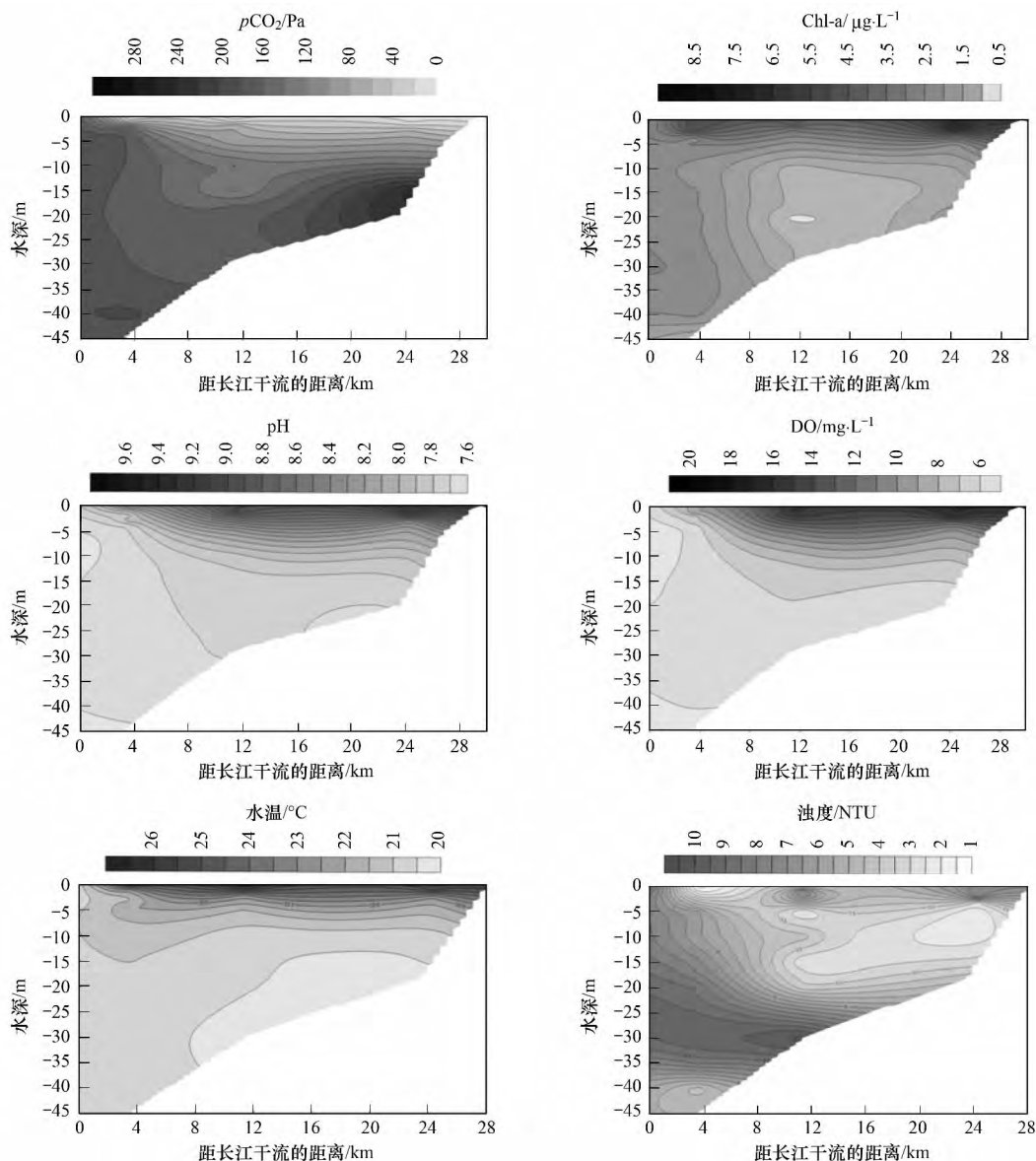


图3 梅溪河剖面监测结果

Fig. 3 Result of the vertical section monitoring in the Meixi River

底部汇入支流,对支流水体产生影响,离河口越远影响逐渐减弱。

与 $p\text{CO}_2$ 变化规律相反,水温、pH、溶解氧(DO)和叶绿素 a(Chl-a)均是在表层水体中最高,然后随着深度增加而下降。由图 4 可知在库区支流梅溪河的 3 个监测断面上,水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH、DO 均呈负相关关系。光合作用在上层水体中占据主导作用,水中初级生产力通过光合作用大量消耗水体中溶解 CO_2 ,并释放 O_2 ,导致 pH 值增加, $p\text{CO}_2$ 值降低。随着水体深度的增加,水体中无机碳平衡逐渐受呼吸作用控制,由方程(5)可知,pH 值逐渐降低而 $p\text{CO}_2$ 值则逐渐增大。

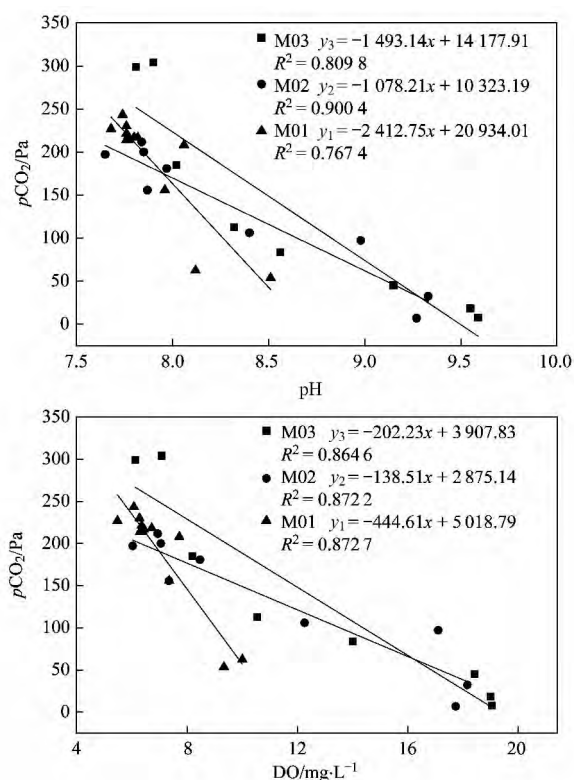


图 4 梅溪河水体剖面 $p\text{CO}_2$ 与 pH 及 DO 的关系

Fig. 4 Relationship between $p\text{CO}_2$ and pH or DO of the water column in the Meixi River

2.3 干、支流水体 $p\text{CO}_2$ 的水平及垂直差异

三峡水库蓄水后,三峡库区江段从天然河道变成了河道型、季调型水库。作为一个典型的河道型水库,三峡水库水动力特性在空间上存在显著的差异,库区干流一维流动特征显著,流速基本不满足藻类水华形成的必要条件,同时三峡水库的水动力特性在时间上呈现的显著变化可以较好地抑制库区藻类的累积,使干流库区仍然保持着天然河流的特性。而在支流库湾,蓄水改变水文水动力条件及河道地形,难以简单概化为一维特征,而是在深度上长期具

有复杂的分层异向流动特征,从而不断影响着支流库湾水华的发生^[27,28]。从库区干流到库区支流梅溪河,水体浊度降低,水体透光性升高,有利于浮游植物的生长繁殖及其光合作用,使库区支流梅溪河水体时有水华现象发生。

干、支流水体物理化学性质的差异,使干流水体处于频繁的交流状态,这种交流状态又会反过来影响干流水体的物理、化学特性,从而不断影响着支流库湾水华现象的发生。由干支流表层水体参数的变化,可知从干流到支流水体中藻类的光合作用逐渐增强,使 $p\text{CO}_2$ 有显著差异;同时在库区支流水体剖面上,随着深度的增加光合作用的减弱,底部水体中有机质降解作用使 CO_2 分压增大,使水体剖面上 $p\text{CO}_2$ 也有显著差异。为了进一步了解受大坝作用影响的库区干、支流水体 CO_2 释放的差异性,通过方程(1)计算库区干、支流表层水体 CO_2 的扩散通量^[29]。

2.4 水体 CO_2 释放通量

库区受地形影响,风力普遍偏小,静风频率一般较大,万州、涪陵站年静风频率占 60% 以上,年平均风速一般在 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,是全国的小风区之一^[30]。取库区的年平均风速 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,根据公式(2)计算得出 k 值为 $2.136 \sim 2.769 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ($0.513 \sim 0.664 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$)。计算监测区域的 CO_2 释放通量时取 k 的平均值 $2.452 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ($0.589 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$)。通过公式(1)计算,梅溪河和三峡坝区干流河道的夏季 CO_2 平均释放通量分别为 $-7.487 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $39.585 \text{ mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。计算结果显示,夏季库区支流梅溪河 CO_2 释放通量 $F < 0$ 是大气中 CO_2 的“汇”,而库区干流 CO_2 释放通量 $F > 0$ 则表现为大气中 CO_2 的源,库区干、支流水体 CO_2 释放上有明显不同。由图 5 对比世界上主要河流、水库的水气界面 CO_2 交换通量^[8-13,31]可以看出,水库、河流总体均表现为 CO_2 的“源”,向大气中释放 CO_2 。虽然库区干流在夏季的 CO_2 交换通量明显高于库湾地区(梅溪河),但是作为河道干流相对于 Amazon 河要低很多,比起加拿大的 St. Lawrence、Ottawa 河,以及我国的西江(Xijiang)都要低,也低于热带水库(如 Petit Saut、Tucurui、Samuel)。

河流作为陆地生源要素向海洋输送的通道,携带大量的有机质,在搬运过程中受呼吸作用降解有机质的影响,会向大气释放大量的 CO_2 。但三峡库区库中干、支流由于三峡大坝的拦截作用降

低了水流速度,使水生生态系统由“河流型”异养体系向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化,减缓了河流温室气体的释放。因此相对热带地区的一些水库,三峡水库温室气体释放作用并不明显。

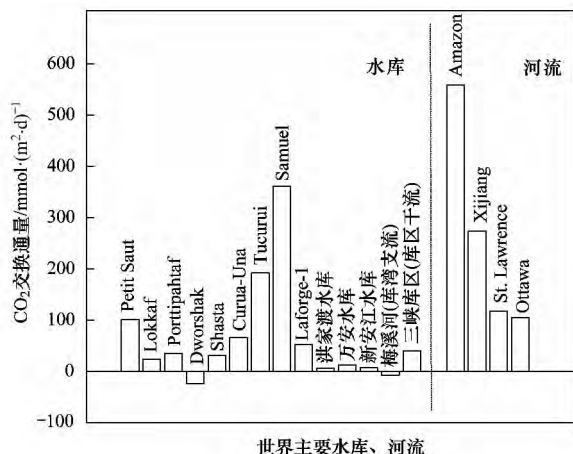


图5 世界上主要水库、河流水气界面 CO₂ 交换通量

Fig. 5 Exchange flux of CO₂ between water and air in main reservoirs and rivers of the world

3 结论

(1) 研究区干、支流水体表层 $p\text{CO}_2$ 、DO、Chl-a、pH 走航结果表明:干、支流水体 $p\text{CO}_2$ 的显著差异是由干、支流水体光合作用强度不同引起的。

(2) 库湾支流水动力特性受上游来水及水库干流影响显著,在深度方向具有典型的分层特征,不能简单的根据其“河道型”形态特点概化为一维特性。

(3) 库区干流作为陆地生源要素向外界输送的通道,携带大量的有机质,在搬运过程中受有机质降解作用的影响,向大气释放大量的 CO₂。同时由于干流水体往往有着很高流速与湍流度,加速了水体中 CO₂ 分压向大气的扩散速率,因此表现为明显的温室气体“源”。在库区支流地区受干流顶托及地形限制,水体流速、浊度等都显著下降,这为浮游植物的生长创造了条件,水体光和作用得到增强。这显著降低了水体中溶解 CO₂ 分压,甚至低于大气水平。库区支流因此表现出对大气 CO₂ 的吸收,并成为大气 CO₂ 的“汇”。通过对三峡水库库中干流及支流的调查,发现三峡坝区库中干流水域向大气中释放 CO₂ 释放通量为 $39.58 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。库区支流梅溪河吸收空气中的 CO₂,释放通量为 $-7.48 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

致谢:感谢中国水利水电科学研究院水环境研究所、华东师范大学河口海岸国家重点实验室对本研究的支持!

参考文献:

- [1] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, et al. Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [M]. New York: Springer, 2005.
- [2] 梅航远,汪福顺,姚臣谏,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.
- [3] Yao G, Gao Q, Wang Z, et al. Dynamics of CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China [J]. Science of the Total Environment, 2007, 376(1-3): 255-266.
- [4] 何建坤,刘滨,王宇. 全球应对气候变化对我国的挑战与对策[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2013, 22(5): 75-83.
- [5] Gunkel G. Hydropower-A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions [J]. Clean-Soil Air Water, 2009, 37(9): 726-734.
- [6] Fearnside P M. Why hydropower is not clean energy. Scitizen, Paris, France (peerreviewed website) [EB-OL]. 2007. http://www.scitizen.com/screens-blogPage-viewBlog-sw_viewBlog.php?idTheme=14&idContribution=298.
- [7] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A. Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(5): 1334-1344.
- [8] 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): 281-288.
- [9] 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.
- [10] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: A regional-scale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(7): 1227-1249.
- [11] Huttunen J T, Aini J, Liikanen A, et al. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003, 52(3): 609-621.
- [12] Guerin F, Abril G, Sera D, et al. Gas transfer velocities of CO₂ and CH₄ in a tropical reservoir and its river downstream [J]. Journal of Marine Systems, 2007, 66(1-4): 161-172.
- [13] 吕迎春,刘丛强,王仕禄,等. 贵州喀斯特地区水库红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2674-2681.
- [14] Billett M F, Moore T R. Supersaturation and evasion of CO₂ and CH₄ in surface waters at Mer Bleue peatland, Canada [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 2044-2054.
- [15] Gupta V, Smemo K A, Yavitt J B, et al. Stable isotopes reveal widespread anaerobic methane oxidation across latitude and

- peatland type[J]. *Environmental Science Technology*, 2013, **47**(15): 8273–8279.
- [16] Fearnside P M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests [A]. In: *The Encyclopedia of Energy* [M]. New York: John Wiley & Sons Publishers, 2011.
- [17] Johanna S, Lars L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542–551.
- [18] Jonsson A, Karlsson J, Jansson M. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(3): 224–235.
- [19] Wannikhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(C5): 7373–7382.
- [20] Cole J J, Caraco N 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.
- [21] Soumis N, Canuel R, Lucotte M. Evaluation of two current approaches for the measurement of carbon dioxide diffusive fluxes from Lentic Ecosystems [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(8): 2964–2969.
- [22] 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.
- [23] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater [J]. *Marine Chemistry*, 1980, **8**(14): 347–359.
- [24] 胡圣, 邱光胜, 印士勇. 三峡水库香溪河库湾水体富营养化演化监测分析 [J]. *人民长江*, 2012, **43**(12): 10–13.
- [25] 纪道斌, 刘德富, 杨正建, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析 [J]. *中国科学 (G 辑): 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101–112.
- [26] Zhang G L, Zhang J, Ren J L, *et al.* Distributions and sea-to-air fluxes of methane and nitrous oxide in the North East China Sea in summer [J]. *Marine Chemistry*, 2008, **110**(35): 42–45.
- [27] 廖文根. 水动力调控: 抑制三峡库区支流水华的路径 [J]. *中国三峡建设*, 2008, **11**(5): 60–63.
- [28] 詹磊, 董耀华, 刘同宦, 等. 干支流直角交汇区水流泥沙运动特性初步研究 [J]. *长江科学院院报*, 2010, **27**(8): 6–11.
- [29] Riera J L, Schindler J E, Kratz T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clear-water lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, U. S. A [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, **66**(3): 265–274.
- [30] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 三峡工程对区域气候影响有多大 [J]. *中国三峡*, 2009, (11): 30–35.
- [31] St Louis V, Kelly C A, Duchemin E. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. *Biological Sciences*, 2000, **50**(9): 766–775.