

三峡库区干流及库湾支流 (朱衣河) 夏季 CO₂ 分压及扩散通量

魏浩斌¹, 吴学谦¹, 操 满¹, 傅家楠¹, 贾晓斌¹, 邓 兵², 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 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 以三峡库区中长江干流及其支流朱衣河作为主要研究对象,于 2013 年 5—7 月对该研究区域干支流的 CO₂ 分压进行了研究,并计算出 CO₂ 的扩散通量。研究结果表明,在水体剖面上表层水体 CO₂ 分压最小;随着水深增加,CO₂ 分压急剧增大,到达 10 m 后才保持稳定。干支流表层水体 CO₂ 分压的分布和扩散通量差异显著。5—7 月,干流水体表层 CO₂ 分压为 220.8~268.0 Pa, CO₂ 扩散通量为 51.05 mmol·m⁻²·d⁻¹;支流水体表层 CO₂ 分压为 14.9~190.3 Pa, 3 个月的 CO₂ 扩散通量分别为 0.42, -0.12 和 20.83 mmol·m⁻²·d⁻¹。研究结果表明,支流释放的 CO₂ 远小于干流。

关键词: 三峡库区; CO₂ 分压; CO₂ 扩散通量; 朱衣河

中图分类号: X 14

文献标志码: A

文章编号: 1007-2861(2016)04-0497-08

Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in mainstream and tributary (Zhuyi River) of the Three Gorges Reservoir in summer

WEI Haobin¹, WU Xueqian¹, CAO Man¹,

FU Jianan¹, JIA Xiaobin¹, DENG Bing², 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 200062, China)

Abstract: The mainstream and tributary of the Three Gorges Reservoir were investigated from May 2013 to July 2013 to understand the distribution of the partial pressure of carbon dioxide. The results show that, along the water column of the tributary (Zhuyi River), the lowest value of the partial pressure of carbon dioxide appears in surface water, and increases rapidly with depth. Below 10 meters in depth, the partial pressure of carbon dioxide becomes stable. There are significant differences of the partial pressure of carbon dioxide in surface water between mainstream and tributaries. During the period of investigation, the partial pressure of carbon dioxide in the surface water of the mainstream is 220.8~268.0 Pa, with an average CO₂ emission fluxes of 51.05 mmol·m⁻²·d⁻¹. The partial pressure

收稿日期: 2015-05-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-001); 国家自然科学基金资助项目(41273128, 41473082)

通信作者: 汪福顺(1976—), 男, 教授, 博士, 研究方向为地球化学. E-mail: fswang@shu.edu.cn

of carbon dioxide in the surface water of tributary (Zhuyi River) is 14.9~190.3 Pa. Emission flux of CO₂ in the three months are 0.42, -0.12 and 20.83 mmol·m⁻²·d⁻¹. The result indicates that the tributary Zhuyi River emits less CO₂ than the mainstream.

Key words: Three Gorges Reservoir; partial pressure of carbon dioxide; diffusion flux of carbon dioxide; Zhuyi River

CO₂ 是重要的温室气体 (greenhouse gas, GHG) 之一。据欧洲环境协会和美国环境协会统计, 大气中 CO₂ 占温室气体总量的 80%~85%^[1-2]。化石燃料燃烧产生的 CO₂ 一直是温室气体的重要来源, 为减少化石燃料的使用, 水电被认为是一种清洁能源而得到了大规模推广^[3-4]。但是, 近期有研究表明水库也会向大气排放大量的 CO₂。就生产单位电力而言, 某些水库所释放的温室气体总量甚至会大于火力发电站所释放的总量^[5-9]。

水库建成后, 淹没区植被和流域输入的有机质降解产生了 CO₂、CH₄ 等温室气体, 并通过水-气界面释放到大气中。水库释放温室气体主要通过以下 3 种途径: ① 从水库较浅的区域以气泡形式溢出 (化学成分主要为 CH₄); ② 从水库水-气界面扩散溢出; ③ 河流下游排放^[10]。寒带和热带的水库被淹没地区的土壤有机碳密度较高, 如果蓄水后在缺氧的环境下就会被矿化成 CO₂ 和 CH₄。此外, 热带地区的高生物量也向水库输送大量有机碳, 其降解过程造成了温室气体的大量释放, 相关的研究较多^[11-12]。相比之下, 关于亚热带水库 CO₂ 的释放情况的研究则较少。中国是水库大国, 仅长江流域内修建的水库就超过 48 000 个, 因此对于水库的富营养化^[13-14]、生态影响评估和治理方面^[15-16]的研究较多, 而对于水库水-气界面 GHG 扩散通量的研究则较少。

三峡作为世界级工程一直备受关注。三峡水库在正常蓄水时 (175 m 水位), 水域面积可达 $1.084 \times 10^3 \text{ km}^2$, 总库容 $3.93 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 控制流域面积 $3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。本研究从三峡库区干、支流转换过程中溶解 CO₂ 分压及其水-气扩散通量的变化特征入手, 分析夏季 (5—7 月) 三峡库区长江干流及支流 (朱衣河) 对大气 CO₂ 的“源/汇”关系。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三峡水库东起湖北省宜昌市, 西迄重庆巴县 (东经 $106^{\circ}00' \sim 111^{\circ}58'$, 北纬 $28^{\circ}01' \sim 31^{\circ}45'$), 三峡库区干流水面宽度通常为 0.7~1.7 km。朱衣河位于重庆市奉节县境内, 距三峡大坝约 165 km, 属于三峡库区中部区域, 其全长为 31.4 km, 流域面积 153.6 km², 年均流量 2.92 m³/s。另外, 朱衣河位于长江左岸, 与干流成 60° 角汇入长江, 其左岸为在建公路大桥, 右岸种植了大量脐橙, 低水位运行期两岸河滩裸露, 水面宽为 300~500 m。

1.2 样品的采集与分析

2013 年 5—7 月对三峡库区中部的长江干流和支流 (朱衣河) 进行了按月走航观测。如图 1 所示, 在距河口 0.5 km 处取点记为 ZY01($109^{\circ}46'E$, $31^{\circ}01'N$), 距河口 3 km 处取点记为 ZY02($109^{\circ}43'E$, $31^{\circ}02'N$), 在长江干流取点 CJ01($109^{\circ}45'E$, $31^{\circ}N$)。从 CJ01 到 ZY02 进行走航监测, 在走航过程中利用自吸泵抽取水面下 0.3 m 左右水体进行 CO₂ 分压水质参数分析。在定点站位, 按 5 或 10 m 的间隔, 利用潜水泵抽取不同深度的水体。用德国产的 CO₂ 传感器 Hydro CTM/CO₂ 对水体进行 CO₂ 分压分析; 同时利用 YSI 水质参数仪 (美国哈希公司生产) 测定 pH 值、水温、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、叶绿素 a(Chl-a), 用浊度仪 (OBS) 测定水体浊度, 分析水体剖面水质参数变化。

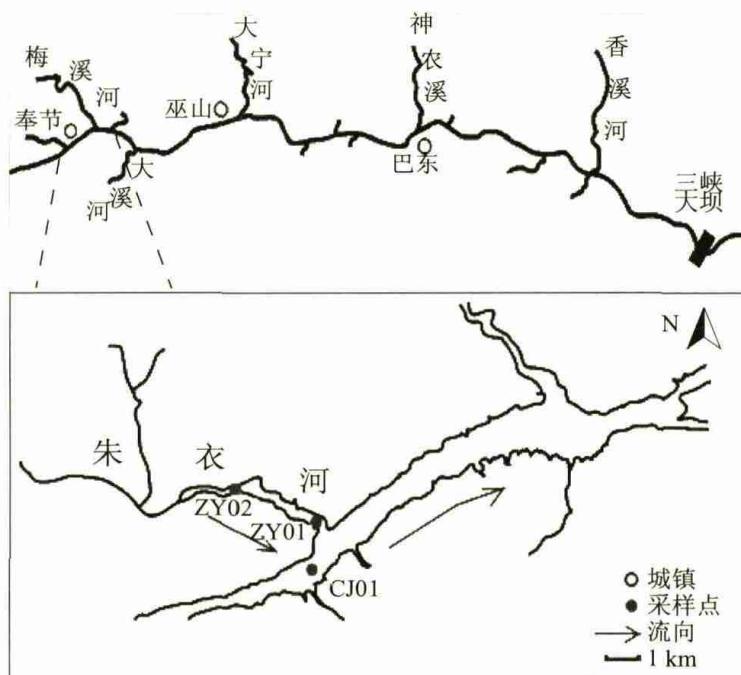


图1 研究区域和采样点位
Fig. 1 Study area and sampling sites

1.3 数据处理

水气界面的CO₂扩散通量主要受以下因素影响: 水体和大气中CO₂分压的差值、温度、风速和河流流速等。通常, 水-气界面的CO₂通量可以通过式(1)计算得到^[17]:

$$F = k(p_{\text{CO}_2} W - \text{gas}_{\text{sat}})k_H, \quad (1)$$

式中, F 为水-气界面的扩散通量, $F > 0$ 表示水体向大气中释放CO₂, $F < 0$ 表示水体吸收CO₂; k 为气体交换系数; p_{CO_2} 为水体CO₂分压; gas_{sat} 为大气CO₂分压(38 Pa); k_H 为亨利系数。 k_H 受温度和盐度影响, 可根据式(2)计算得到

$$\ln k_H = -58.0931 + 90.5069 \left(\frac{100}{T_K} \right) + 22.294 \ln \left(\frac{T_K}{100} \right), \quad (2)$$

式中, T_K 为开尔文温度。

由于气体交换系数 k 会受温度、风速、水体浊度等影响, 故可采用式(3)来计算得到^[18-20]

$$k = k_{600} \left(\frac{S_c}{600} \right)^{-0.67}, \quad (3)$$

$$S_c = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3, \quad (4)$$

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7}, \quad (5)$$

$$U_{10} = 1.22U_1, \quad (6)$$

式中, S_c 为CO₂的施密特数, k_{600} 表示温度为20°C、施密特数为600时CO₂的标准气体交换系数, U_1 为水面上的风速, U_{10} 为水面上方10 m处的风速, t 为表层水的温度。

2 结果与讨论

2.1 研究区域水体表层CO₂分压及各项水质参数的变化

观测结果显示, 在观测期间朱衣河表层水温为22.1~28.4°C, 由ZY01向ZY02逐渐升高;

干流表层水温为 24.7~24.9 °C. 干流和支流水样 pH 值均为 8 左右, 呈碱性; DO 浓度为 4.9~18.8 mg/L, 且均在 6 月份达到最大值. 支流 Chl-a 浓度大多集中在 8~13 μg/L, 而干流 Chl-a 浓度则在 2.2~4.2 μg/L, 这主要是由于长江干流水流速度较快, 水体滞留时间较短, 藻类并未大量繁殖的缘故^[21]. 朱衣河 CO₂ 分压的变化范围为 17.6~190.3 Pa. 7 月份, ZY01 点的 CO₂ 分压达到 190.3 Pa, 而 ZY02 点的 CO₂ 分压只有 17.6 Pa. 这主要是由于水体 CO₂ 受水中生物的光合和呼吸作用共同影响, 当水体表面藻类较多时, 光合作用消耗了水中的 CO₂; 当水体表面藻类较少时, 生物的呼吸作用占了主导^[2,22]. 这与 7 月份 ZY01、ZY02 水体表面 Chl-a 的浓度相吻合. 长江干流 CO₂ 分压集中在 220.8~234.6 Pa. 如图 2 所示, 通过分析走航观测库区干流和支流表层水体的 CO₂ 分压情况, 发现干流水体的 CO₂ 分压远大于支流.

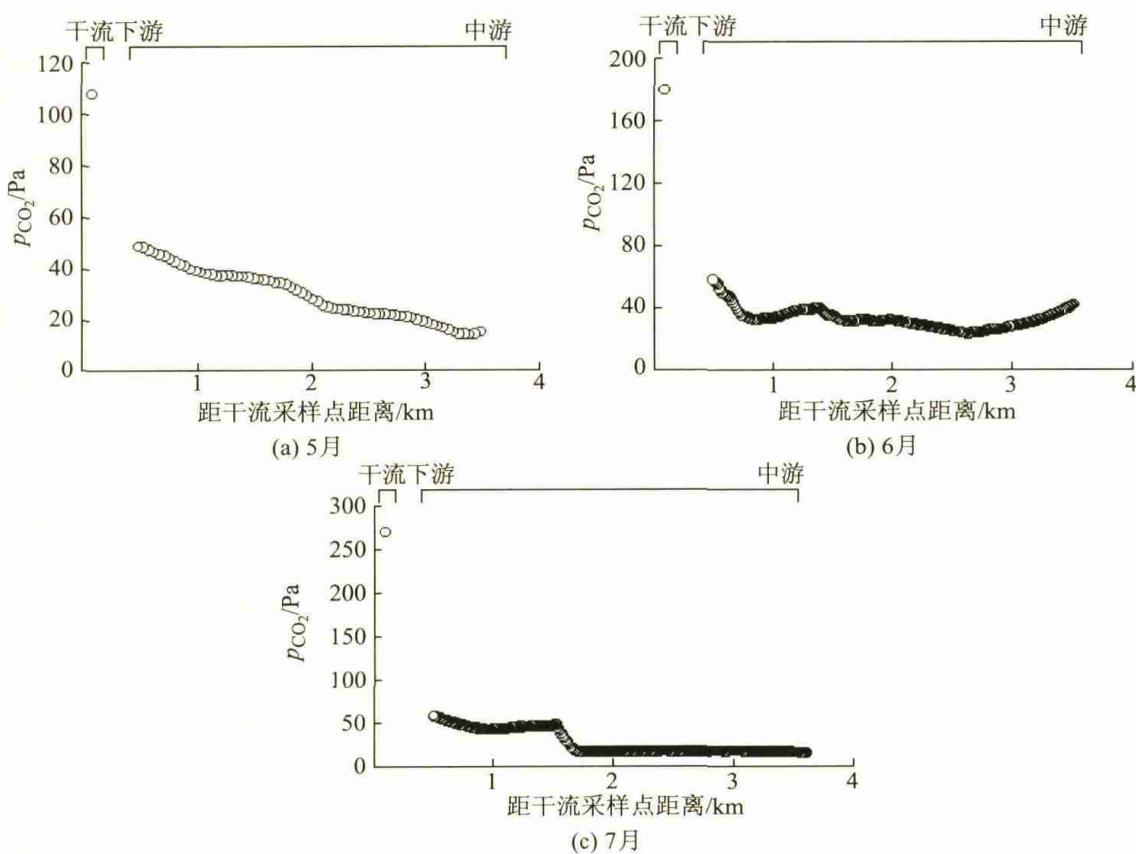


图 2 库区干支流表层水体 CO₂ 分压分布

Fig. 2 Distribution of partial pressure of carbon dioxide in mainstream and tributary surface

2.2 水体参数剖面变化

三峡水库进入夏季防洪泄水后, 会产生水库水位及干支流水体密度差等变化情况, 这将对库湾支流产生显著影响. 由于库区支流受到干流水体回水顶托作用, 流速减缓, 故水体透明度较高, 有利于浮游植物等的生长, 使其在深度方向上产生典型的分层现象^[23]. 根据在 ZY01、ZY02 进行的水体剖面监测结果显示, p_{CO_2} 的最小值均出现在水体表面, 然后随着深度增加而迅速增大. 在水面 5 m 以下的位置, p_{CO_2} 则变得相对稳定, 整个水体剖面呈现明显的分层现象(见图 3). 相应地, pH 值、DO 和叶绿素浓度则是在 0~5 m 范围处于较高的数值, 5 m 以下则迅速下降, 10 m 以下时变化不大, 其趋势与 p_{CO_2} 的变化趋势相反, 呈负相关关系. 在上层水体中, 占主导作用的是光合作用, 水中的悬浮藻类通过光合作用大量消耗水体中的 CO₂, 并释放 O₂, 使得 DO 浓度值增加, p_{CO_2} 值降低. 随着水体深度的增加, 透光度下降, 呼吸作用

占主导, 使得 DO 浓度值逐渐降低而 p_{CO_2} 浓度值逐渐增大(见图 4), p_{CO_2} 和 DO 存在显著负相关关系.

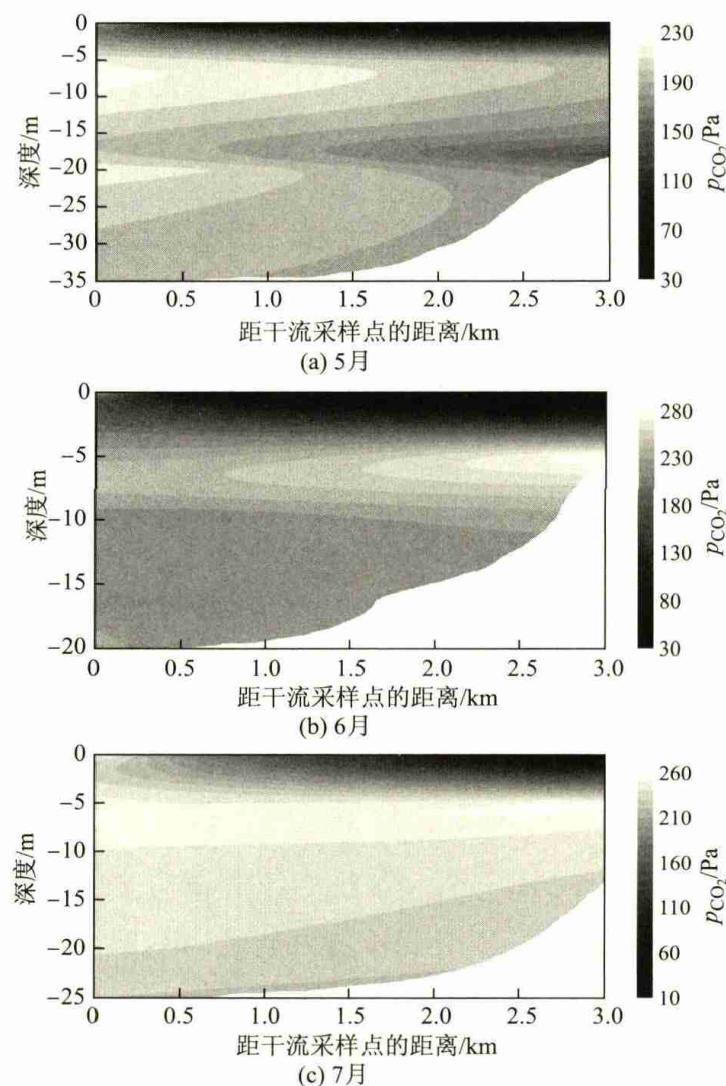


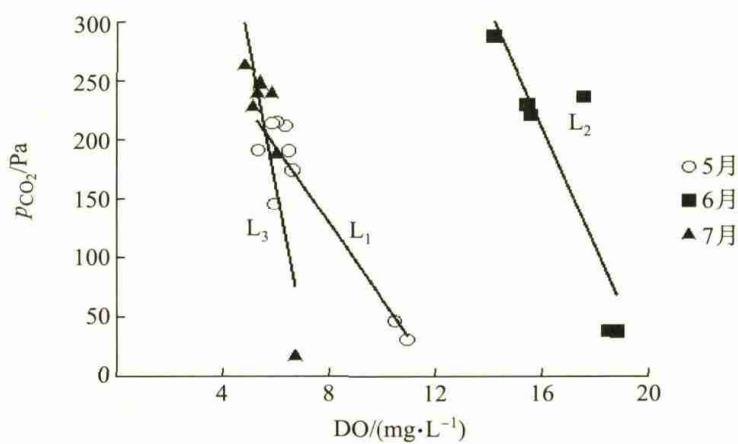
图 3 水体剖面 p_{CO_2} 分布

Fig. 3 Distribution of p_{CO_2} in water sectional

2.3 水体 CO₂ 的扩散通量

库区受地形、气候等因素的影响, 风力较小, 以无风及微风天气为主, 根据 2008—2013 年长江三峡工程生态与环境监测公报可知, 奉节县年平均风速在 1.5 m/s 左右, 因此本研究采用 1.5 m/s 计算 CO₂ 的扩散通量 F_{CO_2} .

图 5 表示朱衣河及长江干流在 5—7 月的 CO₂ 扩散通量. 图 5 中, 风速以 1.5 m/s 作为基准, 以 0.5 和 2.5 m/s 作为最小和最大风速来计算误差线. 从图 5 可以发现, 5—7 月长江干流(库区)的扩散通量是正值, 为 45.86~57.89 mmol·m⁻²·d⁻¹, 远大于大气水平, 向大气释放 CO₂; 而朱衣河 CO₂ 的扩散通量则呈无规律变化, 其中 5 月及 7 月 $F_{\text{CO}_2} > 0$, 向大气释放 CO₂, 6 月 $F_{\text{CO}_2} < 0$, 则向大气吸收 CO₂. 可以看出, 支流的扩散通量远小于干流. 这主要是由于干流作为向外部输送的通道, 携带了大量的有机物, 在运输过程中被降解; 另一方面, 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.



$L_1: p_{CO_2} = -319.5(DO) + 3846.9, R^2 = 0.8783;$

$L_2: p_{CO_2} = -502.89(DO) + 1013.9, R^2 = 0.7556;$

$L_3: p_{CO_2} = -1164.5(DO) + 8586.9, R^2 = 0.7554$

图 4 p_{CO_2} 和 DO 的回归分析

Fig. 4 Regression analysis between p_{CO_2} and DO

根据图 5 进一步分析计算得出, 5—7 月朱衣河向大气释放 CO_2 约 $1.90 \times 10^6 mol$; 长江干流月扩散通量变化不大, 其平均值为 $51.05 \text{ mmol} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 经计算向大气释放的 CO_2 约 $3632.76 \times 10^6 mol$ (见表 1).

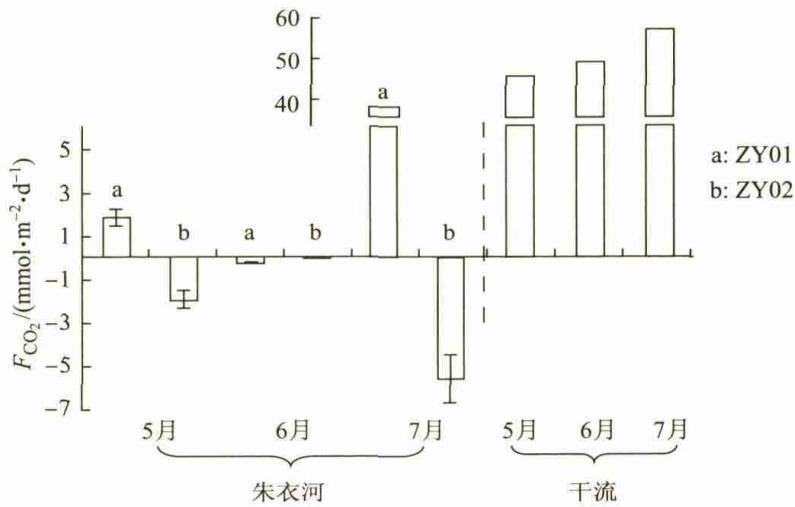


图 5 干支流水体表面 F_{CO_2} 通量

Fig. 5 F_{CO_2} of surface water from mainstream and tributary

表 1 研究区域干支流 CO_2 释放量

Table 1 Emission of CO_2 from tributary and mainstream of reservoir

		面积/ km^2	扩散通量/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)			汇总/($\times 10^6 \text{ mol}$)
			5月	6月	7月	
朱衣河	上游	1.2	0.42	-0.12	20.83	1.90
	中下游	1.8				
干流	全库区	782	45.86	49.39	57.89	3632.76

3 结 论

通过研究夏季5—7月长江干流及支流朱衣河的CO₂分压、部分水质参数和水面CO₂通量, 得到如下结论.

(1) 夏季, 支流与大气的CO₂分压相差不多, 这主要是因为三峡水库调度的影响, 水位维持在最低的防洪界限, 流速缓慢, 藻类大量繁殖, 植物的光合作用消耗了水中的部分CO₂, 使水体的CO₂分压甚至低于大气水平.

(2) 长江干流携带的有机物被降解后, 产生了大量的CO₂, 使水体的CO₂分压远大于大气中的CO₂分压, 同时干流往往有着较高的流速, 加快了CO₂的扩散速度, 因此表现为“源”.

(3) 通过研究发现, 水体中CO₂分压与DO存在显著的负相关关系, 表层光合作用强烈, 光合作用强于呼吸作用, 使得水体DO浓度较高. 库区中底层以呼吸作用为主, 有机物分解消耗DO, 并释放CO₂, 增加了CO₂分压.

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] 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(1): 885-891.
- [3] CHAMBERLAND A, LEVESQUE S. Hydroelectricity, an option to reduce greenhouse gas emissions from thermal power plants [J]. Energy Conversion and Management, 1996, 37(6/7/8): 885-890.
- [4] VICTOR D G. Global warming: strategies for cutting carbon [J]. Nature, 1998, 395: 837-838.
- [5] XING Y P, XIE P, YANG H, et al. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical lake in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 5532-5540.
- [6] DOS S 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.
- [7] HUTTUNEN J T, VAISANEN 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: 1-17.
- [8] RAYMOND P A, HARTMANN J, LAUERWALD R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. Nature, 2013, 503: 355-359.
- [9] 姚臣谌, 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.
- [10] 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): 41-53.
- [11] KELLY V. Influence of reservoirs on solute transport: a regionalscale approach [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(7): 1227-1249.
- [12] HUTTUNEN J, AIM 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]. Chemisphere, 2003, 52(3): 609-621.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WANG F S, CAO M, WANG B L, et al. Seasonal variation of CO₂ diffusion flux from a large subtropical reservoir in East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103: 129-137.
- [18] 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.
- [19] CRUSIUS J, WANNINKHOF R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3): 1010-1017.
- [20] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012)*, 2014, 12(C5): 351-362.
- [21] 梅航远, 汪福顺, 姚臣谌, 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.
- [22] 张永领, 杨小林, 张东. 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 pCO₂ 特征及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2015, 36: 40-48.
- [23] 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.

本文彩色版可登陆本刊网站查询: <http://www.journal.shu.edu.cn>