

三峡库区小江回水区二氧化碳分压的 时空变化特征分析

冉景江^{1,2}, 林初学^{1*}, 郭劲松², 陈永柏¹, 蒋滔²

(1. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 2009年9月~2010年4月在三峡库区与小江交汇的回水区的典型段面测量了该区域水体表层水和水体内部两部分水体中的有关物理化学参数, 并利用这些水化学特征值通过水化学平衡模型计算出该区域水体 CO₂ 的分压。得出该区域水体中的 CO₂ 分压在一定时空范围内的变化特征。并对该区域有关水质参数与 CO₂ 的分压进行了相关性分析, 得出其相关系数。指出了水体 CO₂ 分压与水体碳循环的关系。通过对三峡库区小江流域这一典型回水区域水体的 CO₂ 分压的分析研究, 可望为三峡库区及其它同类型区域水体的二氧化碳分压研究提供一个分析案例, 也为今后进一步从事水库温室效应的研究提供参考。

关键词: 三峡库区; 小江回水区; 二氧化碳分压; 特征分析

中图分类号: P94 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2011)08-0976-07

小江作为三峡库区中段的一级支流, 随着三峡水库蓄水, 在小江流域因自然水文和防洪调度作用而出现较明显的库岸消落带特征。该区域作为主要的农业生产区域, 植被淹没量大, 每年进入该区域水库的有机碳来源量较大, 区域内的沉积层-水界面的营养物质交换频繁, 使得该区域多表现为水体富营养化特征^[1]。该区域内水体的生物量相对较高, 植物呼吸与光合作用强烈, CO₂、O₂ 产生量较大。根据 CO₂ 在水库中迁移转化的特点, 水库水体大致可分为水体表层、水体内部和水体-沉积物界面 3 部分。本文从表层水和水体内部两部分对三峡库区与小江交汇的回水区域水体中各种物理化学参数进行测量, 对溶解态 CO₂、HCO₃⁻、DIC、TOC 等 C 指标的垂直变化时空特征及迁移转化过程、影响因素加以分析, 得出该区域水体中的 CO₂ 分压在一定时空范围内的变化特征。在该区域的研究结果与目前国内外的相关研究结果基本一致: 刘丛强、喻元秀、吕迎春等对云贵高原地区的湖泊和水库等水环境中 pCO₂ 的数年研究表明: 该地区除夏季外, 其它季节水体 CO₂ 均过饱和^[2~4]; 王桂胜得出了长江干流及其河口水体 pCO₂ 的分布特征^[5]; 与湖泊类似, 世界

绝大多数河流中的 CO₂ 也是过饱和的, 基本在 2 000~8 000 μatm, 一些地区支流水体 pCO₂ 甚至高达 10 000 μatm 以上^[6]。对欧洲、美洲及亚洲河流入海口水域的观测也得到同样的结论^[7,8]。国内外已有研究证实了水体溶解态有机物(DOC)对 CO₂ 过饱和的贡献, 特别是一些贫营养水体, 细菌代谢 DOC 是水中 CO₂ 的主要来源。而对于富营养水体而言, 浮游植物的光合作用则往往导致夏季水体 CO₂ 欠饱和, 从而使得该区域水体的 pCO₂ 较低^[9]。

通过对三峡库区小江流域这一典型回水区域水体的二氧化碳分压的分析研究, 可望为三峡库区及其它同类型区域水体的二氧化碳分压研究提供一个分析案例, 也为今后进一步从事水库温室效应的研究提供参考。

1 监测区域与测量方法选用

1.1 研究区域特征

监测区域为小江流域消落带及小江与长江干流交汇的部分回水区域。小江位于三峡库区中段, 该

收稿日期: 2010-09-03; 修回日期: 2010-11-10

基金项目: 科技部 973 项目“推动中国绿色发展的重大战略及技术问题研究”(2010CB955900); 中国长江三峡集团公司生态与环境保护科研项目“三峡水库温室气体效应监测与评估初步研究”(0707435)

作者简介: 冉景江(1970~), 重庆人, 博士, 主要研究方向为水资源管理与水环境保护。E-mail: ran_jingjiang@ctgpc.com.cn

* 通讯作者 E-mail: lin_chuxue@ctgpc.com.cn

区域集中了三峡水库库中与库尾川东丘陵地区的绝大部分支流流域的主要地貌特征。流域面积 5 276 km²,干流全长 182 km。三峡水库蓄水后,小江流域包含了峡谷、消落带区以及湖库等各种特征的水域,其在三峡水库具有代表性(图 1)。

地貌特征:叶形丘陵山地;以紫色土为主;该区域临江段地势较陡,平均坡度在 45 度以上,区域水土流失十分严重;输沙模数 1 812.2 t/km²;气候条件:亚热带湿润季风气候,大巴山南麓暴雨区,暴雨历时短、强度大区域地理位置如图 2 所示:

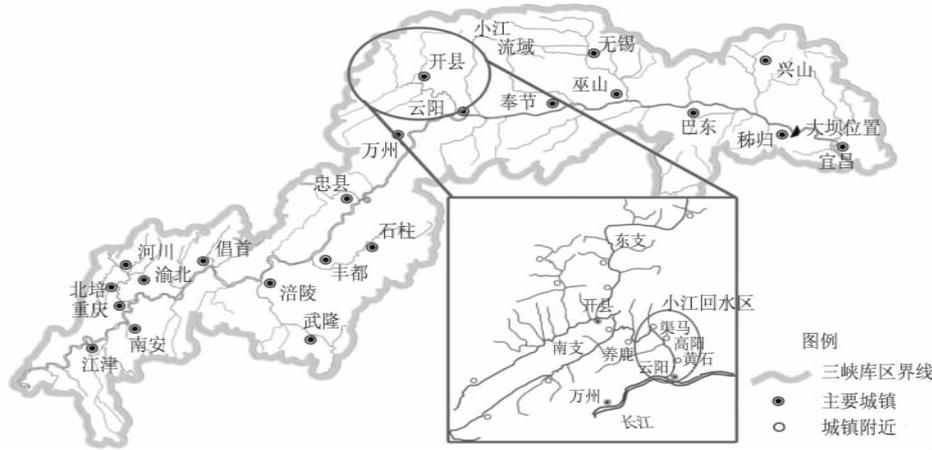


图 1 小江所在的长江流域地理位置图

Fig. 1 Geographic Locations of Xiao Jiang River in the Yangtze River Basin

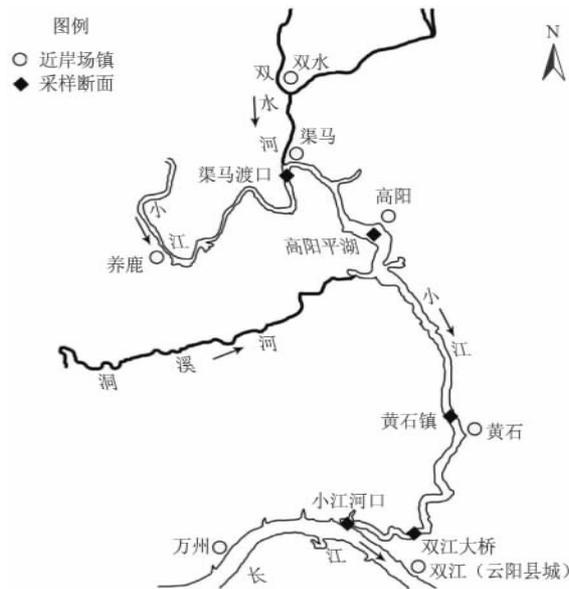


图 2 小江流域回水区监测采样分布图

Fig. 2 Monitoring Distribution in Backwater Zone of Xiao Jiang River Basin

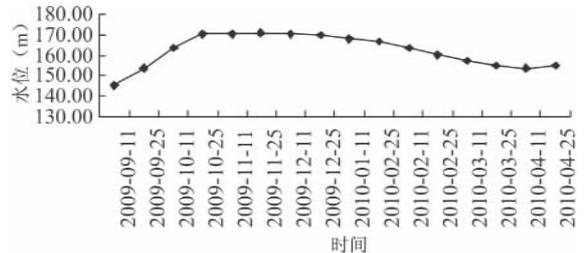


图 3 三峡库区 2009-09~2010-04 的水位变化趋势图

Fig. 3 Variation Trend of Water Level in the Three Gorges Reservoir in Sept. 2009~Apr. 2010

1.2 研究时段的三峡库区水位变化

小江作为三峡库区中段的主要支流,其水文水化学特征的变化受到三峡水库的蓄水影响很大,因此有必要标明在该研究时段的三峡库区的水位变化情况,如图 3 所示(数据来源:中国长江三峡集团公司)。

1.3 测量方法

2009 年 9 月~2010 年 4 月对小江高阳、黄石、双江及河口地段采样点进行了水体采集及水质监测分析。使用 YSI63 型 pH/电导率测量仪现场测定水温、pH 值、电导率和盐度;使用 YSIProODO 溶解氧仪现场测定水体溶解氧;叶绿素 a(Chla)的测定用丙酮萃取分光光度法;使用 HACH 公司的微量滴定器及标准硫酸溶液现场测定水体碱度;水体中 pCO₂ 根据 pH、碱度及亨利常数计算而得。相关气象资料来源于中国气象局数据中心。

2 环境指标监测与 CO₂ 分压计算

2.1 影响水体 CO₂ 分压变化的水化学特征分析

水体溶解态 CO₂ 主要来自底层沉积物的呼吸、

水体中有机物的矿化^[10],以及通过地表-地下径流所带入的陆生植物呼吸和岩石风化所产生的 CO₂^[11,12]。水体中 CO₂ 的消耗主要是浮游植物、高等水生植物光合作用及细菌的光化学反应;生产和消费两者共同决定了水体 pCO₂。水体中的叶绿素 a 浓度是浮游植物现存量的重要指标,其分布反映出了水体中浮游植物的丰度及其变化规律,其同时也是初级生产力的一个重要指标,而初级生产力反映了水域初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力。浮游植物通过叶绿素 a 将水体中的溶解无机碳转化成有机碳,一方面通过减小水体中 CO₂ 分压,直接驱动大气中 CO₂ 进入水体的溶解度泵,另一方面通过食物链传递启动了碳从表层向深层转移的生物泵。通过叶绿素 a 浓度表现出来的初级生产力是碳在有机和无机储库间循环的最重要的环节,在全球碳循环中起着重要作用,在相当程度上控制着水-气界面二氧化碳的交换,是全球气候变化中的重要影响因子。水体的总的碱度与水体的 pH 值反应了水中的酸碱平衡情况,水中的 H⁺、OH⁻ 离子受到水中的 O₂ 与 CO₂ 的含量变化的影响较大,特别是水体表层的碱度与 pH 值的大小在一定程度揭示了水气界面处的 CO₂ 通量变化的强弱。通过水体的碱度与 pH 值的大小,结合亨利常数就可以算出水体里的 pCO₂ 值。

2.2 基于水化学平衡的二氧化碳分压(pCO₂)计算

水体中溶解无机碳(DIC)由 CO₂、H₂CO₃、HCO₃⁻和 CO₃²⁻组成,平衡时各组分在水溶液中的浓度主要与 pH、水温和水溶液中离子强度有关。由于 HCO₃⁻、pH、水温和阴阳离子均已测出,根据 CO₂ 在水溶液中的碳酸平衡原理(式(1)~式(4)),计算水溶液中 CO₂ 分压^[13,14]。



$$K_{CO_2} = [H_2CO_3^*] / [pCO_2] \quad (2)$$

$$K_1 = [H^+][HCO_3^-] / [H_2CO_3^*] \quad (3)$$

$$K_2 = [H^+][CO_3^{2-}] / [HCO_3^-] \quad (4)$$

上述各式中 *K_i* 为平衡常数,其值主要通过以下几个方程计算:

$$pK_{CO_2} = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016 T + 1.11 \quad (5)$$

$$pK_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012 T + 6.58 \quad (6)$$

$$pK_2 = 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0137 T + 10.62 \quad (7)$$

根据亨利定律, pCO₂ 可根据以下方程计算。

$$pCO_2 = \frac{[H_2CO_3^*]}{K_{CO_2}} = \frac{\alpha(H^+) \cdot \alpha(HCO_3^-)}{K_{CO_2} \times K_1} \quad (8)$$

式中: α(H⁺)和 α(HCO₃⁻)分别表示 H⁺和 HCO₃⁻的活度;可用式(9)和(10)求出,式中: *I* 为离子强度。

$$\alpha(H^+) = 10^{-[pH]} \quad (9)$$

$$\alpha(HCO_3^-) = [HCO_3^-] \times 10^{-0.5 \times \sqrt{I}} \quad (10)$$

$$I = 0.5 \times ([K^+] + [Ca^{2+}] \times 4 + [Na^+] + [Mg^{2+}] \times 4 + [Cl^-] + [SO_4^{2-}] \times 4 + [NO_3^-] + [HCO_3^-]) / 1000000$$

2.3 小江回水区二氧化碳分压计算结果

通过水化学平衡计算,得出了在 2009 年 9 月到 2010 年 4 月小江回水区高阳、黄石、双江、河口 4 地水体不同深度的二氧化碳分压月变化情况,如图 4 所示。

3 结论与分析

小江回水区 CO₂ 浓度时空分布基本特征:

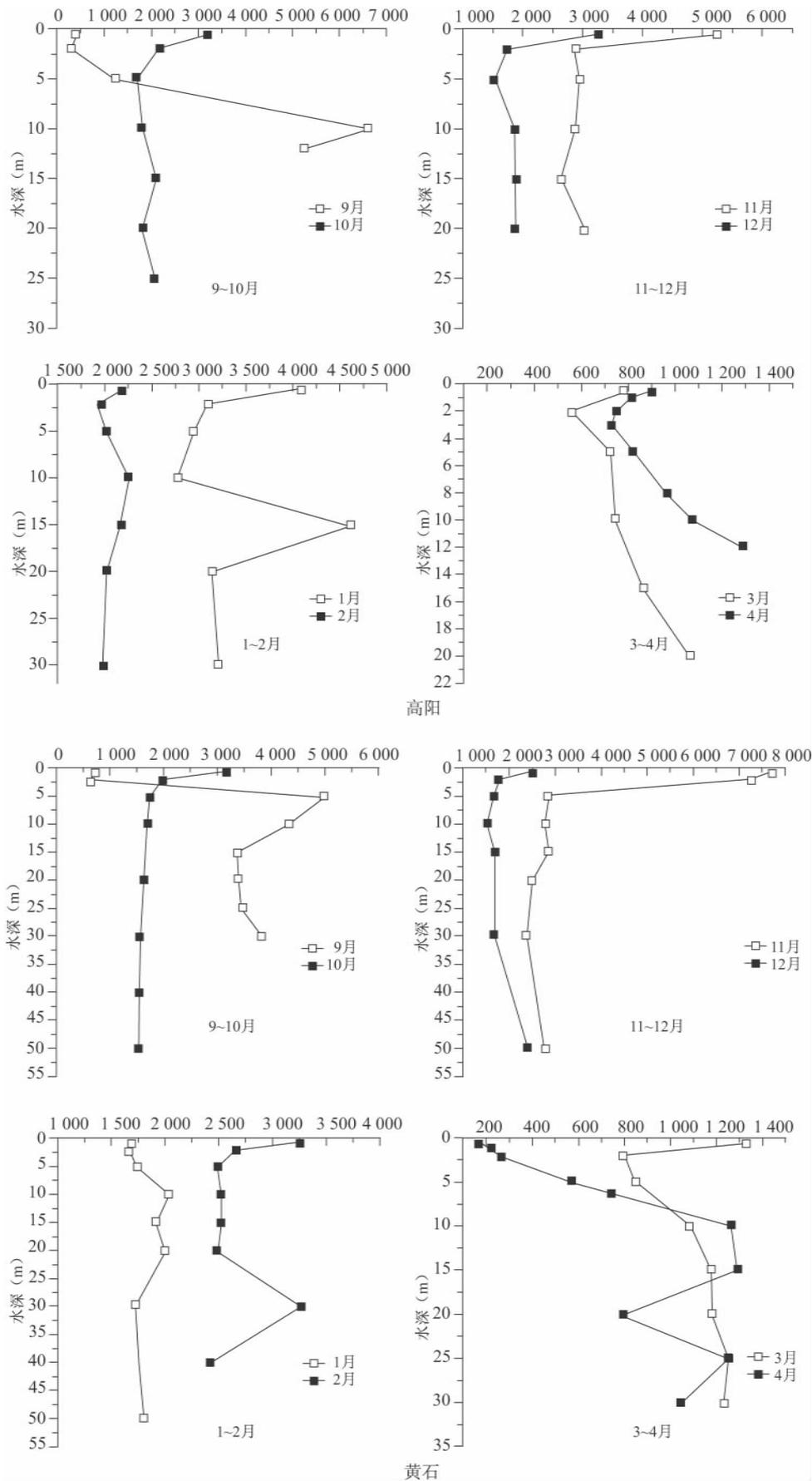
(1)9 月份与 10 月份的 CO₂ 浓度相比,显示出水体表层 CO₂ 浓度呈迅速升高的趋势,并最终显示出过饱和现象;10 月份至次年的 2 月份,CO₂ 浓度后则相对稳定。在 3、4 月份,除了在与长江交汇的河口区域的 CO₂ 浓度与其它 3 个区域有一定的差异外,另外 3 个区域的 CO₂ 浓度的时空变化情况基本是一致的。

(2)不同采样处的理化背景、水深等各不相同,但在水体各个层面的变化趋势基本一致。特别是在水深超过 10 m 的水体,除个别月份(这可能是因为测量或分析时出现的误差)外其 CO₂ 浓度保持相对的稳定。

(3)进入 9 月份以后水体的 CO₂ 浓度垂向梯度明显,但在 10 月至次年的 2 月份的垂向 CO₂ 梯度分布则显著下降。

(4)进入 3 月份以后,水体表层的 CO₂ 浓度呈明显的下降趋势,这与在 3、4 月份的天气逐渐变暖,水生植物及藻类进入生长期后的光合作用加强有很大的关系。

小江回水区高阳、黄石、双江、河口等地 pCO₂ 变化基本一致,只是在河口区域,3~4 月份的 pCO₂ 变化与前 3 个区域有一定的差别。9 月份所测段面的表层水体 pCO₂ 均高于大气平均水平,在 8 月份曾经测得高阳段面表层水体 pCO₂ 为 72.7 μatm,明显低于平均大气 pCO₂ (387 μatm, IPCC, 2009),也就是说 8 月份高阳水体总体上是 CO₂ 的汇。相对于同年 8 月份,小江水体在 9 月份开始其总体上停



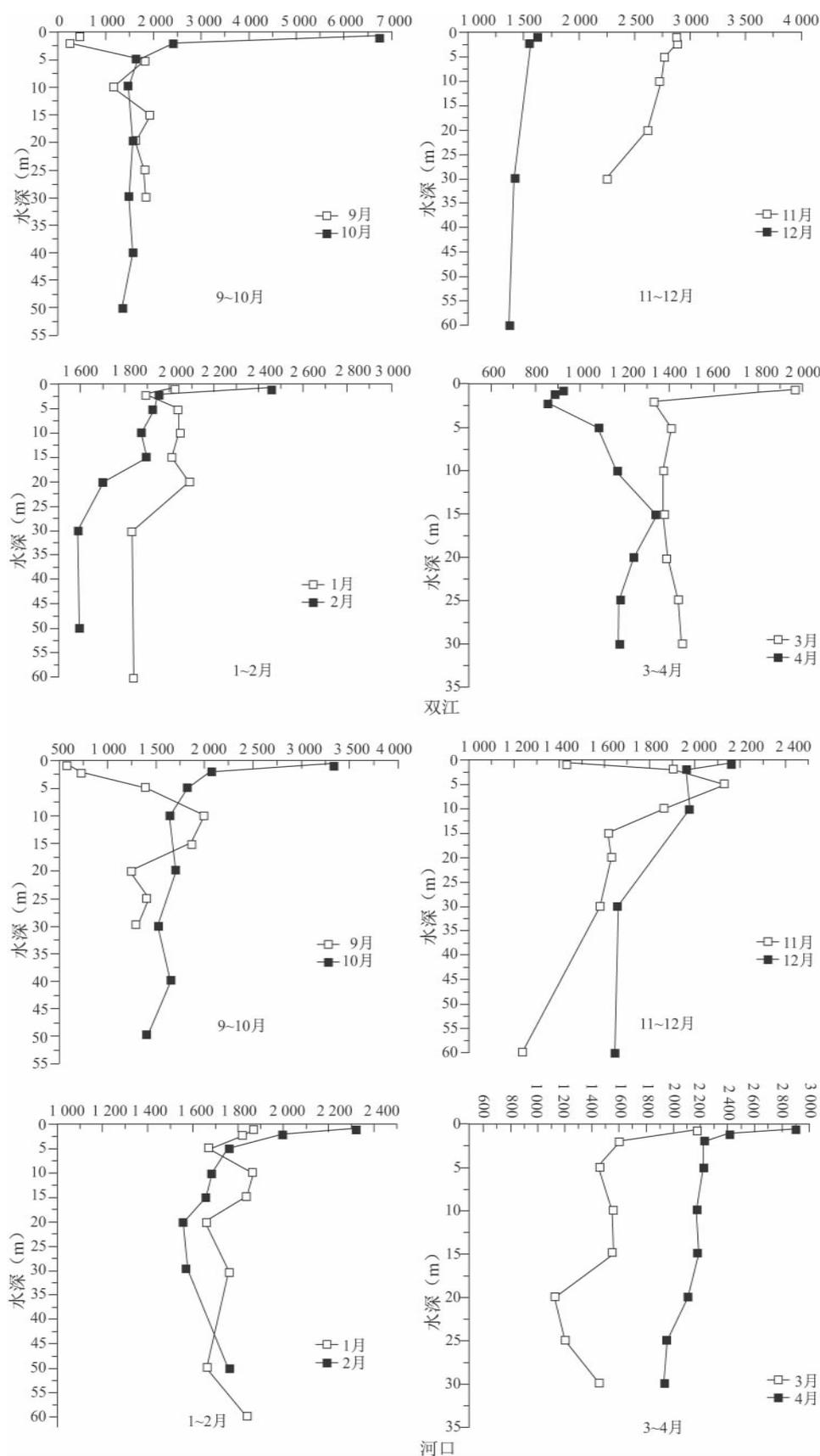


图 4 小江回水区主要断面二氧化碳分压月变化情况(横坐标单位: μatm)

Fig. 4 CO_2 Separate Pressure Changes Ever Month in the Main Region of Xiao Jiang River Backwater Zone(abscissa unit: μatm)

止汇入 CO_2 。10 月份到 12 月份,所测段面水体 pCO_2 高于大气中 CO_2 平均水平,并在 10、11 月份分别达到峰值。另外, pCO_2 也随深度逐渐降低。3、4 月份该区域水体出现富营养化现象,藻类得到大量繁殖,水体中的叶绿素含量增加,水体的光合作用增强,使得水体中的 pCO_2 降低,部分区域出现总体上 CO_2 的汇的现象,但是在河口区域,随着三峡水库进行的防洪调度,3、4 月份三峡库区水位开始降低到 155 m 左右的防洪低水位,库区水流速度加大,相应的支流水流速度也在加大,支流上的水华随水流流向长江干流,河口区域作为支流与干流交汇区,支流水体受干流水体的顶托,大量死亡的藻类聚集该区域,从而导致该区域的呼吸作用加强,水体表面的 pCO_2 含量增加,这种现象在靠近河口不远的双江区域也得到了体现。

表 1 给出了在小江回水区的双江的主要段面的各水层不同指标的日平均垂直变化特征,通过对该区域 CO_2 浓度与水质有关参数进行相关分析,可以看出无论哪一时段, pCO_2 与水温、pH 及 DO 均呈明显的负相关性,这与许多学者的研究结果是一致的,本研究所得的相关系数分别为 $r(\text{pCO}_2 - \text{水温}) = 0.964$; $r(\text{pCO}_2 - \text{pH}) = 0.992$; $r(\text{pCO}_2 - \text{DO}) = 0.991$ ($p < 0.01, n = 28$)。

表 1 水层各指标日平均垂直变化统计表 (avg. \pm S. D)
Tab. 1 TAB of the Each Level Water Index Daily Average Vertical Variations (avg. \pm S. D)

水深(m)	pCO_2 (μatm)	水温($^{\circ}\text{C}$)	pH	溶解氧 (mg/L)
0.5	152 \pm 71	32.8 \pm 1.2	8.86 \pm 0.21	16.54 \pm 1.38
1.0	157 \pm 81	32.2 \pm 0.6	8.87 \pm 0.21	16.91 \pm 1.49
2.0	590 \pm 293	29.8 \pm 0.5	8.35 \pm 0.22	11.26 \pm 1.97
3.0	1 002 \pm 392	29.3 \pm 0.5	8.18 \pm 0.20	9.48 \pm 2.32
5.0	2 018 \pm 162	28.2 \pm 0.3	7.88 \pm 0.05	6.44 \pm 0.77
8.0	3 845 \pm 239	26.2 \pm 0.3	7.58 \pm 0.02	4.11 \pm 0.28
10.0	4 568 \pm 1 089	25.5 \pm 0.1	7.49 \pm 0.08	3.32 \pm 0.77

研究表明水中 CO_2 分压 (pCO_2) 的时空分布在一定程度上反映了水中碳的环境地化特征。水体溶解态 CO_2 主要来自底层沉积物的呼吸、水体中有机物的矿化,以及通过地表-地下径流所带入的陆生植物呼吸和岩石风化所产生的 CO_2 , 水体中 CO_2 的迁移转化涉及到水体内部的无机碳和有机碳之间的循环。

参考文献:

- [1] 方芳,翟端端,郭劲松,等.三峡水库小江回水区溶解有机物的三维荧光光谱特征[J].长江流域资源与环境,2010,19(3):323~327.
- [2] 王仕禄,万国江,刘丛强,等.云贵高原湖泊 CO_2 的地球化学变化及其大气 CO_2 源汇效应[J].第四纪研究,2003,23(5):581.
- [3] 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,2008,27:1193~1199.
- [4] 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 $\text{P}(\text{CO}_2)$ 季节变化研究[J].环境科学,2007,28(18):2674~2681.
- [5] 王桂胜.长江干流及其河口水体 pCO_2 的分布与影响因素的初步研究[D].青岛:中国海洋大学,2007.
- [6] RICHEY J E., MELACK J M, AUFDENKAMPE A K, et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO_2 [J]. Nature, 2002, 416: 617~620.
- [7] FRANKIGNOULLE M, ABRIL G, BORGES A, et al. Carbon dioxide emission from European estuaries [J]. Nature, 1998, 282: 434~436.
- [8] RAYMOND P A, BAUER J E, COLE J J. Atmospheric CO_2 evasion, dissolved inorganic carbon production, and net heterotrophy in the York River estuary [J]. Limnol Oceanogr, 2000, 33: 551~561.
- [9] DUARTE C M, AGUSTI S. The CO_2 balance of unproductive aquatic ecosystems [J]. Science, 1998, 281: 234~236.
- [10] JONSSON A, KARLSSON J, JANSSON M, et al. Sources of carbon dioxide supersaturation in Clearwater and Humic Lakes in Northern Sweden [J]. Ecosystems, 2003, 6: 224~235.
- [11] BILLET M F, GARNETT M H, HARVEY F. UK peatland streams release old carbon dioxide to the atmosphere and young dissolved organic carbon to rivers [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34: L23401. doi: 10.1029/2007GL031797.
- [12] WALDRON S, SCOTT E M, SOULSBY C. Stable isotope analysis reveals lower-order river dissolved inorganic carbon pools are highly dynamic [J]. Environ Sci Technol, 2007, 41: 6156~6162.
- [13] YAO G, GAO Q, WANG Z, et al. Dynamics of CO_2 partial pressure and CO_2 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.
- [14] 刘丛强.生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M].北京:科学出版社,2007.

SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF CARBON DIOXIDE PARTIAL PRESSURE OVER THE XIAOJIANG RIVER BACKWATER AREA OF THE THREE GORGES RESERVOIR

RAN Jing-jiang^{1,2}, LIN Chu-xue¹, GUO Jin-song², CHEN Yong-bo¹, JIANG Tao²

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China;

2. Department of Urban Construction and Environmental Engineer, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Many related physical and chemical parameters of surface and inner water body at the typical profiles of backwater area over the intersected segment of Three Gorge Reservoir and Xiaojiang River were measured from Sept. 2009 to Apr. 2010. And carbon dioxide partial pressure of water body in this region was calculated using hydrochemical balance model from the hydrochemical parameters mentioned above. Then the spatial and temporal distribution of carbon dioxide partial pressure in this region was acquired from this method and observed data. After analyzing the related parameters of the water quality and the CO₂ separate pressure the correlation coefficient was obtained and pointed out the relationship between CO₂ separate pressure and water carbon cycle. The study could provide a representative case for Three Gorge Reservoir and other homologous reservoirs by analyzing the spatial and temporal distributed characteristics of carbon dioxide partial pressure over the typical backwater area of Three Gorge Reservoir and Xiaojiang River basin, and it also played a key role for further studying greenhouse gas emission from reservoirs.

Key words: the Three Gorge Reservoir; Xiaojiang River backwater area; carbon dioxide partial pressure; feature analysis