

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20111125. 1636. 012

# 三峡水库澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析

郭劲松<sup>1</sup>, 蒋 滔<sup>1</sup>, 李 哲<sup>1</sup>, 陈永柏<sup>2</sup>, 孙志禹<sup>2</sup>

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** 在三峡水库澎溪河回水区春季水华连续暴发期间(2010 年 4 月 10 日至 5 月 25 日), 对渠马至河口总计 5 个采样断面进行监测。结果表明水华期间水体叶绿素 a(Chla), 溶解氧(DO)及  $\text{CO}_2$  分压( $p(\text{CO}_2)$ )分层现象明显, 表层水体受浮游植物光合作用的影响  $p(\text{CO}_2)$  较低, 并且日照充足时, 水体为  $\text{CO}_2$  的汇。研究期间表层水体  $p(\text{CO}_2)$  最小值出现在 4 月 25 日双江断面, 为 4.3 Pa, 吸收通量为  $-0.28 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。 $p(\text{CO}_2)$  随水深迅速增加, 并在 10~15 m 趋于稳定。偏最小二乘回归分析(PLS)表明澎溪河水华期间, 浮游植物的生长代谢是控制  $p(\text{CO}_2)$  的关键因素, 水温与  $p(\text{CO}_2)$  负相关, 但并不构成对  $p(\text{CO}_2)$  的绝对影响。通过引用  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}_0}$  参数, 观测到了澎溪河水体水华暴发的 3 个阶段, 期间澎溪河表层水体经历了从碳汇到碳源最后又回到碳汇的过程。

**关键词:** 水华; 二氧化碳分压; 偏最小二乘法; 碳源/汇

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2011)06-0829-10

水华被认为是水体中单一藻类大量繁殖的一种自然生态现象<sup>[1]</sup>。通常淡水生态系统被认为是大气重要的碳源<sup>[2-3]</sup>, 而水华期间浮游植物生长代谢会对水环境产生巨大的改变。研究表明, 营养盐及浮游生物数量的增加会改变水体功能结构, 使之由异养型向自养型转变, 并且降低表层水体  $p(\text{CO}_2)$  与大气之间的差距, 促进水中碳的“生物泵”运行, 对水体碳循环产生显著的影响<sup>[4-6]</sup>。三峡蓄水以来, 支流回水区水华暴发问题备受关注<sup>[7-9]</sup>, 但水华期间碳循环及  $p(\text{CO}_2)$  的分布特征尚不十分明晰, 因此对其潜在的碳生态过程的研究具有重要的科学意义。

本文针对三峡水库中段北岸澎溪河(小江)回水区段, 于 2010 年 4 月 10 日至 5 月 25 日对该区域水华敏感期进行了跟踪研究, 结合同期水体主要理化指标(水温、pH 值、电导率、溶解氧、叶绿素 a 等)的观测结果, 探讨分析了澎溪河回水区春季水华期间水体  $p(\text{CO}_2)$  与各理化要素的潜在联系和影响机制, 以期为进一步认识该水域水华现象与碳形态的分布特征提供基础。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区域

自 2006 年冬季, 笔者所在科研团队开始对澎溪河回水区流域生态环境问题展开了全面跟踪观测研究。在流域 145 m 水位以下回水区段(全长约 40 km)自上而下分别设置了 5 个常规采样断面(渠马渡口、高阳平湖、黄石镇、双江大桥以及澎溪河河口)。从前期的监测数据发现, 每年 4~5 月份为澎溪河流域水华易暴发期, 如 2007 年 5 月流域高阳至双江段出现了蓝藻水华(鱼腥藻(*Anabaena sp.*)、束丝藻(*Aphanizom enon sp.*)为优势藻种); 2008 年 4~5 月该区域又出现了角甲藻(*Ceratium sp.*)水华, 并伴有微囊藻(*Microcystis sp.*)和鱼腥

收稿日期: 2010-10-18; 网络出版时间: 2011-11-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20111125.1636.012.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB955904-04); 国家自然科学基金资助项目(51009155)

作者简介: 郭劲松(1963-), 男, 四川绵阳人, 教授, 博士, 主要从事三峡水库生态环境方面研究。

E-mail: Guo0768@equ.edu.cn

通信作者: 李 哲, E-mail: ZheLi81@sina.com

藻疯长现象<sup>[4]</sup>。2010年4~5月同样对上述5个断面进行每月两次(10~11日、25日)的样品采集及实验分析工作。

### 1.2 样品采集与分析方法

每月两次对上游渠马至下游河口断面进行水样的采集,第一次的样品采集中,渠马至黄石断面于每月10日采集完毕,而双江至河口断面于次日采集完毕,第二次的样品采集工作于当月25日进行,且5断面均在1d内采集完毕。各断面采样点位于河道深泓线处。现场采用YSI® ProODO溶解氧仪测定水温及溶解氧(DO)(精度分别为0.1℃、0.01 mg/L);YSI® 63型pH/电导率测量仪测定水体pH值、电导率(cond)(精度分别为0.01个pH、0.1 μv/cm);水下光合作用有效强度(PAR)采用美国LI-COR® 192SA水下光量子仪测定(精度0.01 μmol/(m<sup>2</sup>·s));碱度(TA)采用HACH®公司的微量滴定器及标准硫酸溶液现场滴定(精度为1.25 μL),水体中p(CO<sub>2</sub>)根据pH、碱度及亨利常数计算而得<sup>[10-12]</sup>。野外测量仪器在采样工作前都已经过标准校正程序。现场测试结束后,将各断面水样带回实验室于48h内完成其它指标的分析测试工作,包括Chla以及溶解性有机碳(DOC)。其中Chla的测定采用丙酮萃取分光光度法;DOC采用水样过450℃烘干4h的Whatman® GF/F玻璃纤维滤纸,用岛津® TOC-V总碳分析仪分析过滤液测定<sup>[5,8]</sup>。各断面水体现场指标及实验室指标的分层采样详见表1。

表1 各断面水体分层观测明细  
Table 1 Observation of water stratification schedule

断面	现场理化指标		
	水温、pH、cond、DO、碱度	DOC	叶绿素、PAR(0.5~8 m)
渠马	0.5 m	0.5 m	0.5 m
高阳	0.5、1、2、3、5、8、10 m	0.5、2、2、5、10 m	0.5、1、2、3、5、8、10 m
黄石	0.5、1、2、3、5、8、10、15、20、25、30 m	0.5、5、10、20、30 m	0.5、1、2、3、5、8、10、15 m
双江	0.5、1、2、3、5、8、10、15、20、25、30 m	0.5、5、10、20、30 m	0.5、1、2、3、5、8、10、15 m
河口	0.5、1、2、3、5、8、10、15、20、25、30 m	0.5、5、10、20、30 m	0.5、1、2、3、5、8、10、15 m

注:每月25日采样过程仅对各断面表层0.5 m水样DOC分析。

### 1.3 p(CO<sub>2</sub>)以及通量的计算

水体中溶解性无机碳主要由CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>以及CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>构成。通常pH、水温和水溶液中离子强度是控制这4种无机碳形态浓度分布的主要因素,因淡水系统中离子强度可忽略不计,那么根据CO<sub>2</sub>在水溶液中的碳酸平衡原理,可通过下式计算水体中p(CO<sub>2</sub>)<sup>[11]</sup>。

$$p(\text{CO}_2)_w = \frac{c(\text{H}_2\text{CO}_3^*)}{K_{\text{CO}_2}} = \frac{c(\text{H}^+)c(\text{HCO}_3^-)}{K_{\text{CO}_2}K_1} \quad (1)$$

式中 p(CO<sub>2</sub>)<sub>w</sub> 为水中CO<sub>2</sub>分压, Pa; K<sub>CO<sub>2</sub></sub>、K<sub>1</sub> 为平衡常数; c(H<sup>+</sup>)、c(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 分别为水中H<sup>+</sup>及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度, mol/L。

水气界面CO<sub>2</sub>交换通量受表层水体与水面上大气中CO<sub>2</sub>的分压差和气体交换系数影响,而气体交换系数又受流速、风速、温度等因素影响。对于淡水水体,水气界面CO<sub>2</sub>交换通量(正为释放、负为吸收)可由式(2)计算得出<sup>[13-14]</sup>:

$$F_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2}K_0(p(\text{CO}_2)_w - p(\text{CO}_2)_a) \quad (2)$$

式中 F<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为水气界面CO<sub>2</sub>通量, mmol/(m<sup>2</sup>·h); K<sub>0</sub> 为水中的CO<sub>2</sub>溶解度, mol/(L·Pa); k<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为CO<sub>2</sub>交换系数, cm/h; p(CO<sub>2</sub>)<sub>w</sub> 为表层水中CO<sub>2</sub>分压, Pa; p(CO<sub>2</sub>)<sub>a</sub> 为大气中CO<sub>2</sub>分压, Pa。

当风速 u < 3 m/s 时, k<sub>CO<sub>2</sub></sub> 可用式(3)求得

$$k_{\text{CO}_2} = k_{600}(600^{0.67})(Sc^{0.67})^{-1} \quad (u < 3 \text{ m/s}) \quad (3)$$

式中 k<sub>600</sub> 为六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体的交换系数, cm/h, 采用目前湖泊水体较常用方法计算(式(4))<sup>[15-16]</sup>; Sc 为 t℃ 下二氧化碳的 Schmidt 常数, 对淡水而言按式(5)进行计算<sup>[17]</sup>:

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7} \quad (4)$$

$$S_c = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (5)$$

式中  $U_{10}$  为水面上方 10 m 风速, m/s。

### 1.4 超额 $\text{CO}_2$ ( $E_p(\text{CO}_2)$ ) 及表观溶解氧 ( $A_{\text{DO}}$ )

生物消耗易降解有机物的好氧呼吸作用是水体中  $\text{CO}_2$  的重要来源, 生物好氧呼吸作用可以用下式表示<sup>[18]</sup>:



理论上当生物好氧呼吸作用利用的有机质完全由浮游植物构成时, 产生的  $\text{CO}_2$  与消耗的溶解氧之比为 124/138 (约 0.9)。但目前普遍认为异养呼吸作用并不会消耗水体中的  $\text{HCO}_3^-$ , 故经典的 Redfield 比值为 106/138 (约 0.77)<sup>[18]</sup>。因此, 为了评价内源呼吸是否是控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的主要因素, 通常会引入两个水质参数:  $E_p(\text{CO}_2)$  和  $A_{\text{DO}}$ 。其中,  $E_p(\text{CO}_2) = c(\text{CO}_2)^* - c(\text{CO}_2)_{\text{eq}}$ ;  $A_{\text{DO}} = c(\text{O}_2)_{\text{eq}} - c(\text{O}_2)^*$ 。式中,  $c(\text{CO}_2)^*$  为现场观测的水体  $\text{CO}_2$  浓度 ( $\mu\text{mol/L}$ );  $c(\text{CO}_2)_{\text{eq}}$  为现场水温气压条件下水体  $\text{CO}_2$  达到饱和状态时所对应的浓度 ( $\mu\text{mol/L}$ );  $c(\text{O}_2)_{\text{eq}}$  为现场水温气压条件下水体饱和溶解氧 ( $\mu\text{mol/L}$ );  $c(\text{O}_2)^*$  为现场观测溶解氧 ( $\mu\text{mol/L}$ )。  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{DO}}$  的大小取决于异养细菌所利用的有机质的组成。

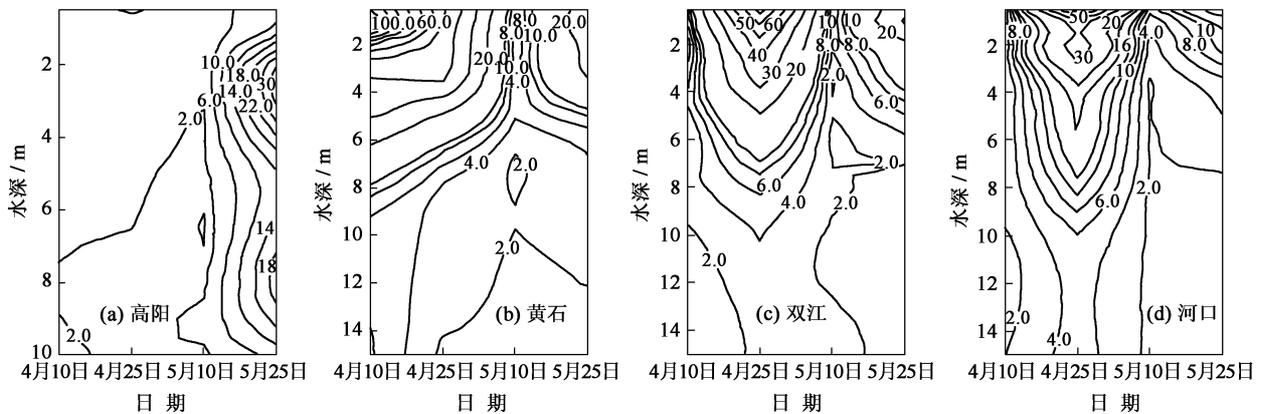
### 1.5 数据分析方法

本文采用偏最小二乘法 (PLS) 对  $p(\text{CO}_2)$  及各理化指标 (pH、TA、DO、cond、水温、Chla、DOC) 进行回归分析<sup>[19]</sup>。偏最小二乘法被称为第二代回归方法, 该方法易于辨识系统信息与噪声, 甚至是一些非随机性的噪声, 并且本研究自变量存在严重多重相关性, 因此采用这一方法十分合理, 而且与主成分分析以及逐步回归分析相比, 该方法得出的每一个自变量的回归系数更容易解释。另外, 回归分析得出的  $F_{\text{VIP}}$  (variable influence on projection parameter) 参数可以反映自变量对应变量的相关性大小,  $F_{\text{VIP}} > 1$  表明自变量对  $p(\text{CO}_2)$  的贡献很大, 当  $F_{\text{VIP}} < 0.5$  时则无影响<sup>[20]</sup>。所有 PLS 分析均在 SIMCA-P 12.0 上完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 Chla 时空变化特征

2010 年 4 月 10 日至 5 月 25 日, 澎溪河下游渠马至河口断面共暴发了两次水华。第一次出现在 4 月 10 日渠马及黄石断面 (渠马断面只对表层 0.5 m Chla 进行监测, 故未纳入下图中), 其中, 渠马断面为鱼腥藻水华, Chla 浓度 17.06  $\mu\text{g/L}$ , 黄石断面为硅藻水华, Chla 浓度高达 108.99  $\mu\text{g/L}$  (见图 1)。而此时高阳、双江及河口断面, Chla 浓度分别仅有 4.58  $\mu\text{g/L}$ , 4.94  $\mu\text{g/L}$  和 1.82  $\mu\text{g/L}$ , 镜验结果也没有明显的优势藻种, 故该



注:  $c(\text{Chla})$  等值线单位为  $\mu\text{g/L}$

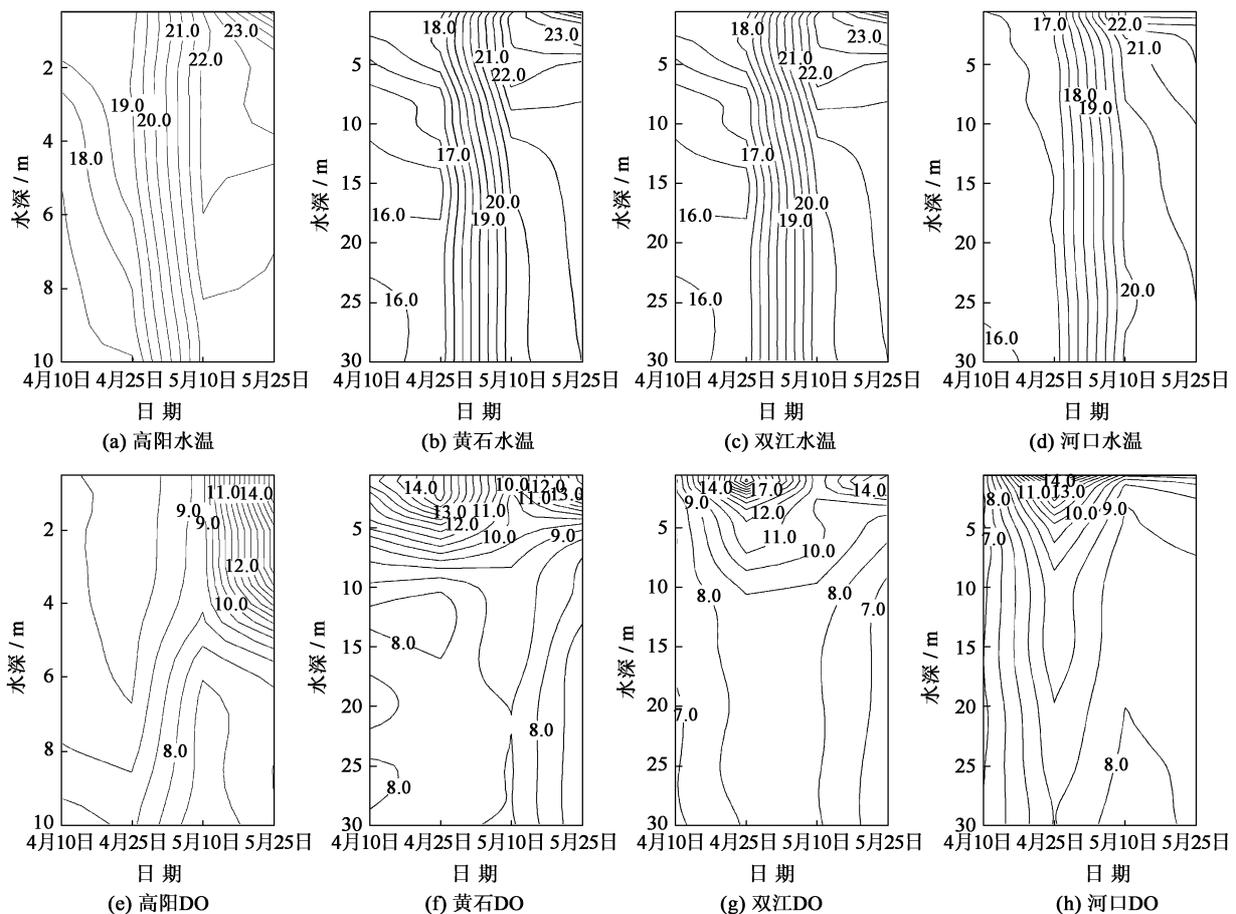
图 1 2010 年水华期间水体 Chla 垂直分布特征

Fig. 1 Variation of vertical distributions of Chla in the water in phytoplankton bloom period, 2010

3个断面未形成水华。4月25日,黄石至河口断面均呈现高叶绿素浓度,高生物量的水华现象,其中硅藻为绝对优势藻种,3个断面的Chla浓度分别为 $51.68 \mu\text{g/L}$ ,  $74.69 \mu\text{g/L}$ 及 $67.83 \mu\text{g/L}$ 。这次3个断面同时监测到硅藻水华,推测是硅藻从黄石断面顺水流下移所致。水华期间,水体Chla浓度分层明显(见图1),5 m以上水体Chla浓度均较高,以后则迅速下降,10 m以下仅有 $2 \mu\text{g/L}$ 左右。5月10日各断面Chla浓度下降到 $6.84 \mu\text{g/L}$ 以下,渠马断面最小,只有 $1.62 \mu\text{g/L}$ ,且水体Chla分层现象消失。5月下旬观测期间澎溪河流域自渠马以下河段出现鱼腥藻水华,肉眼可见其零星蓝藻絮团。期间Chla浓度最大值出现在双江1 m水层,为 $31.06 \mu\text{g/L}$ ,观测期间Chla分层现象再一次显著起来。

## 2.2 水温及DO时空变化特征

高阳至河口断面水温的时空变化特征如图2所示(渠马断面只对表层0.5 m水体进行监测,故没有纳入图中)。4个断面的温度垂向特征十分相似,从4月10日至5月10日,各采样点上下水层水温差异不明显,平均为 $1 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 。5月10日以后澎溪河水体逐渐出现热分层,水温由表层的平均 $25^\circ\text{C}$ ,下降到底层的 $20^\circ\text{C}$ ,且5 m以上水温下降较快,5 m以下这一下降趋势明显降低。水体DO分层特征与温度并不十分一致,4月10日除黄石断面外,水温与DO都没有明显的分层现象,而4月25日,随着黄石至河口断面水华的暴发,水中DO出现了明显的分层,黄石、双江及河口断面DO浓度分别从表层的 $14.7 \text{ mg/L}$ 、 $20.8 \text{ mg/L}$ 、 $15.2 \text{ mg/L}$ 下降到底层的约 $8.3 \text{ mg/L}$ 。5月10日各断面DO分层现象消失直到当月下旬新一轮水华暴发为止。5月下旬这次水华除河口断面外,其它3个断面DO分层均十分显著,表层水体DO浓度分别高达 $15.9 \text{ mg/L}$ 、 $14.4 \text{ mg/L}$ 和 $14.9 \text{ mg/L}$ 。另外,澎溪河出现的这两次水华暴发过程中,8 m以上水体溶解氧均为过饱

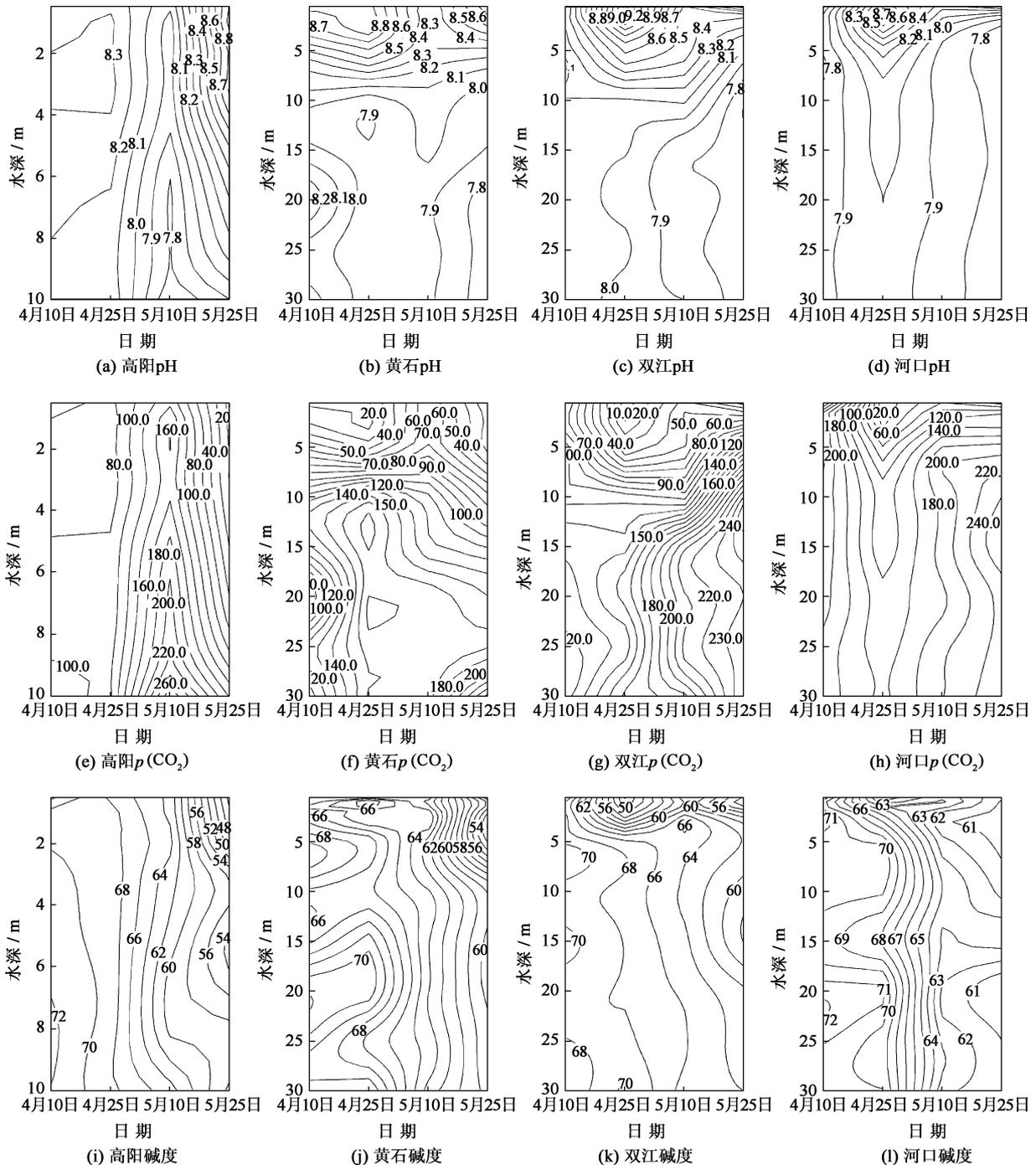


注:水温及DO等值线单位分别为 $^\circ\text{C}$ 、 $\text{mg/L}$

图2 2010年水华期间水体温度及DO垂直分布特征

Fig. 2 Variation of vertical distributions of water temperature and DO in the water in phytoplankton bloom period, 2010

和, 而 8m 以下则略低于饱和值。



注:  $p(\text{CO}_2)$  及碱度等值线单位分别为 Pa、mg/L (CaO)

图 3 2010 年水华期间水体 pH、 $p(\text{CO}_2)$  及碱度垂直分布特征

Fig. 3 Variation of vertical distributions of pH,  $p(\text{CO}_2)$  and alkalinity in the water in phytoplankton bloom period, 2010

### 2.3 水体 pH、 $p(\text{CO}_2)$ 及碱度的时空变化特征

利用 pH、碱度及亨利系数计算得出的澎溪河高阳至河口断面水体  $p(\text{CO}_2)$  时空变化如图 3 所示。pH 与  $p(\text{CO}_2)$  的时空分布特征有着明显的相似性。澎溪河水体除 4 月 10 日的河口断面外, 均呈现表层水体  $p(\text{CO}_2)$

低于底层,而表层 pH 高于底层的空间分布特征。4 月 10 日采样期间,黄石  $p(\text{CO}_2)$  由表层的 17.1 Pa 增加到底层的 118.5 Pa 左右, pH 由表层的 8.88 下降到底层的 8.14, 碱度由表层的 63.4 mg/L (CaO) 增加到底层的约 70 mg/L。而其它 3 个断面  $p(\text{CO}_2)$ 、pH 及碱度上下两层差异不明显。4 月下旬,除高阳断面外,其余 3 个断面水体  $p(\text{CO}_2)$ 、pH 及碱度分层显著,表层水体  $p(\text{CO}_2)$  均小于大气平均水平 38.2 Pa<sup>[21]</sup>, 分别为 18.1 Pa、4.3 Pa 及 26.1 Pa; pH 为 8.84、9.33 及 8.68; 碱度为 62.7 mg/L、47.8 mg/L 及 61 mg/L。5 月上旬,澎溪河水华消失,但黄石以下断面  $p(\text{CO}_2)$  分层仍较为明显,只是各断面表层水体  $p(\text{CO}_2)$  略高于大气。5 月 25 日,澎溪河第二次水华期间,渠马以下水体(除河口断面外)表层  $p(\text{CO}_2)$  均降到大气水平以下或接近该水平,其中最小值出现在高阳断面,仅有 12.4 Pa,且水体  $p(\text{CO}_2)$ 、pH 及碱度分层现象十分显著。研究结果显示,水华期间澎溪河水体 2~3 m 为  $p(\text{CO}_2)$  分界点,分界点以上水体  $p(\text{CO}_2)$  变化不大,其下则迅速增加,并在 10~15 m 水层间趋于稳定。

### 3 讨 论

#### 3.1 各理化指标与水体 $p(\text{CO}_2)$ 的相互关系及影响机理

采用偏最小二乘法对  $p(\text{CO}_2)$  及各理化指标(DO、cond、水温、Chla、DOC 等)进行回归分析,由于  $p(\text{CO}_2)$  是通过 pH 计算得出,故 pH 不纳入回归分析中。分析得出的偏最小二乘回归结果如图 4 所示。回归模型将自变量分成了两个主成分,第一主成分( $W_{c1}$ )包含了 44.6% 的数据,并解释了 73.6% 的  $p(\text{CO}_2)$  变化。第二主成分( $W_{c2}$ )包含了 29.2% 的自变量数据,并与第一主成分一起解释了 82.2% 的  $p(\text{CO}_2)$  变化。从图 4 可以看出,对于整个水体而言,DO、Chla 与  $p(\text{CO}_2)$  都极其负相关,其  $F_{VIP}$  值分别高达 1.65 和 1.32(见表 2)。从 Chla、DO 以及  $p(\text{CO}_2)$ (图 1、图 2、图 3)的垂向分布也可以看出, $p(\text{CO}_2)$  与其都有明显的一致性。水华暴发期间,Chla 的分层现象导致不同水层光合作用强度的差异,从而引起水体 DO 和  $p(\text{CO}_2)$  的分层,又因为浮游植物主要集中在表水层,特别是 2~3 m 以上水体,故该层水体  $p(\text{CO}_2)$  变化较低,强烈的光合作用使得该层  $p(\text{CO}_2)$  低于大气平均水平,而 DO 均处于饱和状态。而 3 m 以下水体由于光合作用变弱,呼吸及有机物的矿化作用仍在继续,故  $p(\text{CO}_2)$  急剧增加,而 DO 也迅速降低,并在 10 m 左右趋于稳定范围。水华暴发过后,细菌分解表层水体中的浮游植物,使上层水体  $\text{CO}_2$  再一次过饱和。由此可见,澎溪河水华期间浮游植物生产是控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的关键因素<sup>[22]</sup>。回归分析表明,虽然期间水温与  $p(\text{CO}_2)$  负相关,但由于相关性较低( $F_{VIP} < 1$ ),不构成对  $p(\text{CO}_2)$  的绝对影响,这与 Sobek 的研究结果是一致的<sup>[19]</sup>。水华前期由于澎溪河水温不分层,水体上下层混合较均匀,故  $p(\text{CO}_2)$  也没有明显分层现象;5 月 10 日由于温度上升,水体开始出现热分层,下层水体呼吸及矿化作用积累的  $\text{CO}_2$  很难传递至上层,因此即使不发生水华,水体  $p(\text{CO}_2)$  仍保持分层现象。图 4 中碱度与  $p(\text{CO}_2)$  有一定的正相关性,是因为水华期间浮游植物光合作用会吸收水体中的 N、P 等营养物质,从而使表层水体碱度降低<sup>[23]</sup>,出现碱度分层的现象,而水华结束后,这一现象随即消失(见图 3)。研究发现,DOC 与  $p(\text{CO}_2)$  弱负相关,作者推测可能存在以下两种原因:① DOC 的生物可降解性决定了其同  $p(\text{CO}_2)$  的相关性。水中浮游植物新陈代谢产生的大量 DOC 可以很快被细菌降解,而来自于陆源的腐殖质等则不易生物降解,需要 1 年甚至更长时间才能彻底消耗殆尽<sup>[24-25]</sup>。② Sobek S 与其它研究者得出的  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 正相关的结论是基于对湖泊水体的研究<sup>[19]</sup>,对于水库而言纵向输移与垂向混合的生境特征迫使其水生生态系统具有开放性特点,同湖泊有较大差异。Soumis 的研究结果也间接证实了水库  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 不相关这一现象的存在<sup>[26]</sup>。电导率及 PAR 与  $p(\text{CO}_2)$  负相关,但由于它们太靠近中心,所以与  $p(\text{CO}_2)$  相关性很弱,可忽略不计。

表 2  $p(\text{CO}_2)$  与环境因子的 PLS 回归分析

Table 2 PLS analysis between  $p(\text{CO}_2)$  and environment factors

变量	$F_{\text{VIP}}$	变量	$F_{\text{VIP}}$
DO	1.65	水温	0.71
Chla	1.32	cond	0.46
TA	1.02	PAR	0.43
DOC	0.77		

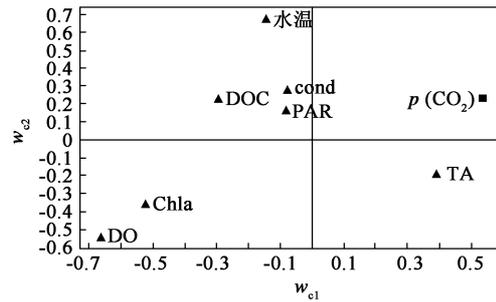


图 4 偏最小二乘相关性分析

Fig. 4 Loadings plot of the PLS regression analysis

### 3.2 生物好氧呼吸作用对澎溪河水体 $p(\text{CO}_2)$ 的影响

本文引用  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}0}$  值来评价水华过程中浮游植物主导水体  $p(\text{CO}_2)$  变化的过程。一般认为该值在 0.62 ~ 0.79 之间, 说明生物内源呼吸是控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的主要因素<sup>[18]</sup>。Zhai 研究发现珠江口各季节  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}0}$  在 0.53 ~ 0.78 之间, 表明生物好氧呼吸作用是控制珠江口  $p(\text{CO}_2)$  的主要原因<sup>[18]</sup>。澎溪河研究结果如图 5 所示, 从 4 月 10 日到 5 月 25 日, 根据  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}0}$  (各图斜率), 发现澎溪河水华发生过程分为明显 3 个阶段: 水华发生初期即 4 月 10 日, 除河口断面外(直线上方未拟合的点), 其余 3 个断面  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}0} = 0.30$ , 小于生物好氧呼吸作用控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的理论下限 0.62, 说明此时水体浮游植物生长力强, 强烈的光合作用使得水体溶解性  $\text{CO}_2$  的利用效率很高, 分解、呼吸作用都相对较弱, 新产生的  $\text{CO}_2$  很快就又被用于合成代谢; 4 月 25 日为浮游植物生长旺盛期, 高阳以下断面 Chla 浓度均较高, 无论是表层水体(直线 A), 还是下层水体(直线 B), 内源呼吸均不是控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的主要因素, 但下层水体内源呼吸的贡献要强于表层水体; 第三阶段为 5 月 10 日浮游植物生长末期, 此时藻类已经大量死亡, Chla 浓度明显低于第二阶段, 藻类光合作用较弱, 水体表层  $p(\text{CO}_2)$  再次高于大气平均水平。该阶段整个小江水体  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}0} = 0.67$ , 说明生物好氧呼吸内源有机碳是控制水体  $p(\text{CO}_2)$  的主要因素。5 月 25 日, 澎溪河进入下一轮水华暴发期, 从

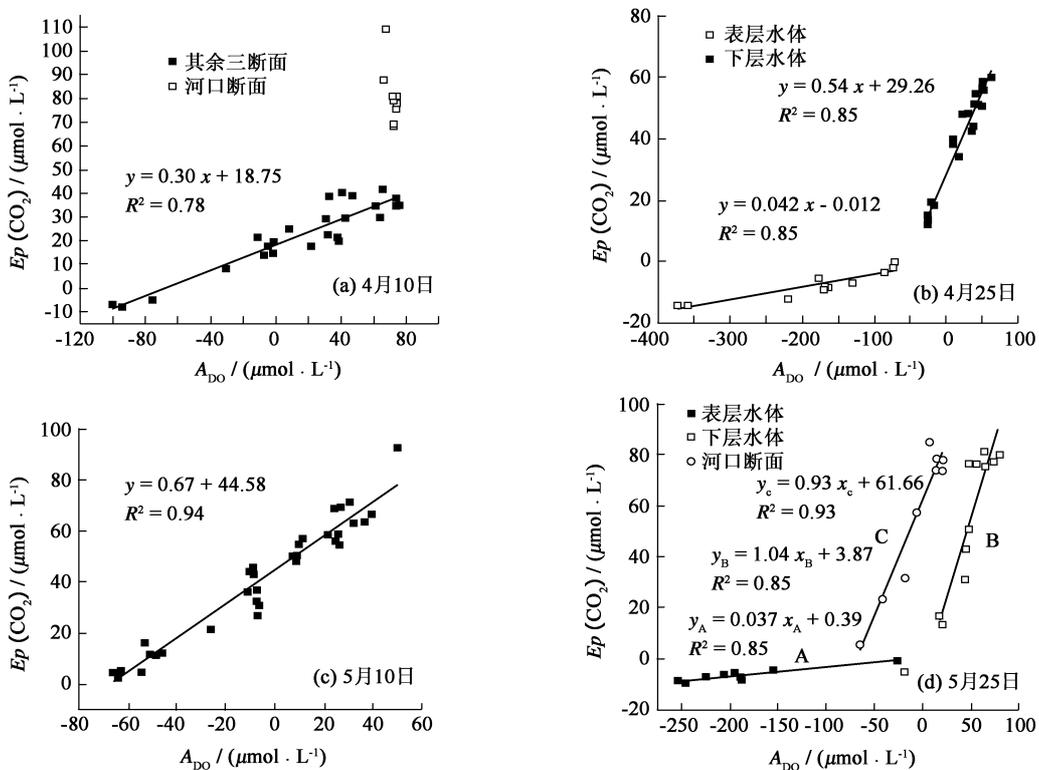


图 5 水华期间  $E_p(\text{CO}_2)$  与  $A_{\text{D}0}$  的相关关系

Fig. 5 Correlation between  $E_p(\text{CO}_2)$  and  $A_{\text{D}0}$  in phytoplankton bloom period

图5可以看出,除河口断面外,其余3个断面表层水体(直线A)以碳合成为主,  $E_p(\text{CO}_2)/A_{\text{D}_0} < 0.62$ , 表层水体  $p(\text{CO}_2)$  小于大气平均值,而下部水体(直线B)及河口断面(直线C)则仍以呼吸作用为主,且内源呼吸已不足以解释如此高浓度的  $\text{CO}_2$ , 外源有机碳的降解及无机碳的汇入成为小江水体  $\text{CO}_2$  的另一重要来源,期间整个水体  $p(\text{CO}_2)$  分层现象明显。

### 3.3 水华期间水体 $\text{CO}_2$ 扩散通量

大气平均  $p(\text{CO}_2)$  为 38.2 Pa, 利用 Fick 定律可以计算出澎溪河水华期间水气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量(图6)。澎溪河水华暴发时,水体中的溶解态  $\text{CO}_2$  已不够浮游植物光合作用所需,大气中  $\text{CO}_2$  成为其重要来源,如4

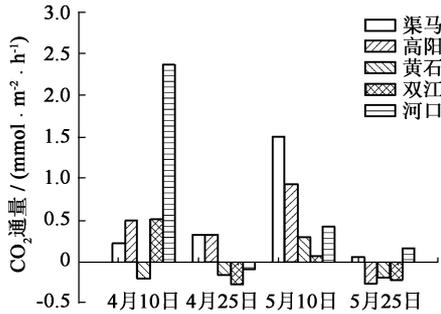


图6 2010年水华期间水气界面  $\text{CO}_2$  通量

Fig. 6 Exchange flux of  $\text{CO}_2$  between water and air in phytoplankton bloom period

15~25℃之间,这样水体  $p(\text{CO}_2)$  的计算误差则保持在 6.7% 以内,传递到  $\text{CO}_2$  通量计算误差也较低,本质上并不对研究结果产生影响,只是在当水体  $p(\text{CO}_2)$  接近大气平均水平时,计算通量才产生较大的偏差。

## 4 结 论

澎溪河 2010 年 4~5 月份总共发生两次大规模水华,观测到了第一次水华全期以及第二次水华初期过程。水华暴发期间水体 Chla、 $p(\text{CO}_2)$  及 DO 分层现象明显,表层水体受浮游植物光合作用的影响  $p(\text{CO}_2)$  比底层低,并随水深逐渐增加,在 10~15 m 水层间趋于稳定。

研究期间澎溪河表层水体经历了从碳汇到碳源然后又到碳汇的过程。水华期间表层水体主要是一个碳汇的过程,期间观测到的最大碳吸收通量为  $-0.28 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。水华发生后期,藻类已经死亡,光合作用作用减弱,水体由碳汇变为碳源。浮游植物和细菌的协同作用是控制澎溪河水体  $p(\text{CO}_2)$  的主要因素。

### 参考文献:

- [1] CARSTENSEN J, PETER H, ANNA-STIINA H. Summer algal blooms in shallow estuaries: Definition, mechanisms, and link to eutrophication[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(1): 370-384.
- [2] COLE J J, 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.
- [3] COLE J J, CARACO N F, KLING G W, et al. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes[J]. *Science*, 1994, 265: 1568-1578.
- [4] COLE J J, PACE M L, CARPENTER S R, et al. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(8): 1718-1730.
- [5] BATE N R, MATHIS J T, JEFFRIE M A, et al. Air-sea  $\text{CO}_2$  fluxes on the Bering Sea shelf[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(5): 1237-1253.
- [6] URABE J, IWATA T, YAGAMI Y. Within-lake and watershed determinants of carbon dioxide in surface water: A comparative analysis of a variety of lakes in the Japanese Islands[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 65(1): 49-60.

- [7] 郭劲松, 张超, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区水华高发期浮游植物群落结构特征研究[J]. 科技导报: 北京, 2008, 26(17): 70-75. (GUO Jin-song, ZHANG Chao, FANG Fang, et al. Study on features of phytoplankton community in Xiaojiang River backwater area in Three Gorges Reservoir during spring and summer time[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(17): 70-75. (in Chinese))
- [8] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 36-44. (LI Zhe, FANG Fang, GUO Jin-song, et al. Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1): 36-44. (in Chinese))
- [9] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 301-309. (LI Zhe, GUO Jin-song, FANG Fang, et al. Seasonal variation of cyanobacteria and its potential relationship with key environmental factors in Xiaojiang backwater Area, Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 301-309. (in Chinese))
- [10] 刘丛强, 吕迎春, 王仕禄, 等. 红枫湖夏季分层期间  $p(\text{CO}_2)$  分布规律的研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 107-110. (LIU Cong-qiang, LÜ Ying-chun, WANG Shi-lu, et al. Distribution of  $p(\text{CO}_2)$  in Hongfeng lake in summer stratification[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 107-110. (in Chinese))
- [11] 刘丛强, 喻元秀, 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. (LIU Cong-qiang, YU Yuan-xiu, WANG Fu-shun, et al. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Hongjiadu reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1193-1199. (in Chinese))
- [12] ROLAND F, VIDAL L, PACHECO F, et al. Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs [J]. Aquatic Sciences-Research Across Boundaries, 2010, 72(3): 283-293.
- [13] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 水库水气界面温室气体通量监测方法综述[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 136-146. (ZHAO Yan, ZENG Yuan, WU Bing-fang, et al. Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 136-146. (in Chinese)).
- [14] 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.
- [15] JONSSON A, KARLSSON J, JONSSON M, et al. Sources of carbon dioxide supersaturation in Clearwater and Humic Lakes in Northern Sweden[J]. Ecosystems, 2003, 6(3): 224-235.
- [16] OJALA A, BELLIDO J L, TOLONEN T, et al. Carbon gas fluxes from a brown-water and a clear-water lake in the boreal zone during a summer with extreme rain events[J]. Limnology and Oceanography, 2011, 56(1): 61-76.
- [17] 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.
- [18] ZHAI Wei-dong, DAI Min-hai, CAI Wei-jun, et al. High partial pressure of  $\text{CO}_2$  and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: The Pearl River estuary, China[J]. Marine Chemistry, 2005, 93(1): 21-32.
- [19] SOBEK S, TRANVIK L J, COLE J J. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(2): 1-10.
- [20] ÅBERG J, JANSSON M, JONSSON A. Importance of water temperature and thermal stratification dynamics for temporal variation of surface water  $\text{CO}_2$  in a boreal lake[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: 1-10
- [21] IPCC. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 95-127.
- [22] 刘丛强, 吕迎春, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖  $p(\text{CO}_2)$  季节变化研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2674-2681. (LIU Cong-qiang, LÜ Ying-chun, WANG Shi-lu, et al. Seasonal Variability of  $p(\text{CO}_2)$  in the two karst reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou province, China[J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2674-2681. (in Chinese))
- [23] DAVIES J M, HESSLEIN R H, KELLY C A, et al.  $p\text{CO}_2$  method for measuring photosynthesis and respiration in freshwater lakes [J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(4): 385-395.
- [24] KIRCHMAN D L, SUZUKI Y, GARSIDE C, et al. High turnover rates of dissolved organic carbon during a spring phytoplankton bloom[J]. Nature, 1991, 352: 612-614.

- [25] NORMAN B, ZWEIFEL U L, HOPKINSON C S, et al. Production and utilization of dissolved organic carbon during an experimental diatom bloom[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(5): 898-907.
- [26] SOUMI 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.

## Analysis on partial pressure of CO<sub>2</sub> and influencing factors during spring phytoplankton bloom in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir\*

GUO Jin-song<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, CHEN Yong-bo<sup>2</sup>, SUN Zhi-yu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443000, China)

**Abstract:** Monitoring of the partial pressure of CO<sub>2</sub> ( $p(\text{CO}_2)$ ) was conducted in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir. Water samples were taken from the five cross sections in the Quma-Heikou reach of Xiaojiang River during the spring phytoplankton bloom from April 10 through May 25, 2010. Results show that there are obvious stratifications of chlorophyll a (Chla), dissolved oxygen (DO), and  $p(\text{CO}_2)$  in water columns. The value for  $p(\text{CO}_2)$  is low in surface water due to phytoplankton photosynthesis effects. The surface water can be the CO<sub>2</sub> sink if sufficient sunshine presents. A minimum value of 4.3 Pa for  $p(\text{CO}_2)$  was observed from the cross section of Shuangjiang on April 25, with an absorption flux of  $-0.28 \text{ mmol/m}^2/\text{h}$ . The value for  $p(\text{CO}_2)$  increases vertically with the water depth, and will be stabilized in the 10 – 15m layer of water. The partial least squares regression analysis reveals that the growth and metabolism of phytoplankton in the surface water are the key factors controlling  $p(\text{CO}_2)$ . A negative relationship between the water temperature and  $p(\text{CO}_2)$  has been found, but its influence on  $p(\text{CO}_2)$  is minimum. Using the indices of Excess  $p(\text{CO}_2)$  ( $Ep(\text{CO}_2)$ ) and apparent oxygen utilization ( $A_{\text{DO}}$ ), a three-stage bloom of phytoplankton in the Xiaojiang River was observed, during which, the surface water had gone through a sink-source-sink cycle for CO<sub>2</sub>.

**Key words:** phytoplankton bloom; partial pressure of CO<sub>2</sub>; partial least squares regression analysis; carbon sink/source

---

\* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB955904-04) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51009155).