文章编号:1672-3031(2017)02-0153-08

# 夏季朱衣河二氧化碳分压分布特征及影响因素分析

梁顺田，王雨春，胡明明，王启文
（中国水利水电科学研究院，北京 100038）

**摘要：**为研究夏季三峡水库支流库湾－朱衣河的水体二氧化碳分压($p(CO_2)$)分布特征及影响因素，于2016年7月进行两次分层采样。根据水体的碳酸平衡原理和亨利公式计算水体$p(CO_2)$并利用水体中超额的二氧化碳分压($E_{p(CO_2)}$)和表观耗氧量(AOU)的比值($E_{p(CO_2)}/AOU$)表征生物好氧呼吸作用对$p(CO_2)$影响程度，研究结果为：上游表层水体的$p(CO_2)$变化范围大概在5.14～53.67 Pa，受使水体中$H^+$减小的浮游植物光合作用影响较大，导致碳酸盐平衡向右移动，水体中$CO_2$极不饱和；5 m以下分层水体的$p(CO_2)$随着水深有变大的趋势，变化范围最低是26.04 Pa，最高是117.28 Pa，而$\Delta E_{p(CO_2)}/\Delta AOU$值高达1.04～2.91，远高于评估上限值，其主要受外源碳汇入影响明显；河口的$p(CO_2)$大概为39.93 Pa，$\Delta E_{p(CO_2)}/\Delta AOU$的值为0.64±0.01，受生物好氧呼吸作用影响显著；整体的$p(CO_2)$与温度($T$)、pH、溶解氧(DO)、叶绿素$a$(Chl-a)、硝氮($NO_3^-$)存在显著的负相关关系，与浊度(TD)有显著的正相关性，与溶解有机碳(DOC)无显著相关性。

**关键词：**三峡库湾；水体$p(CO_2)$；表观耗氧量；生物影响；朱衣河
**中图分类号：**X142 **文献标识码：**A **doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr. 2017.02.012

以二氧化碳($CO_2$)为主的温室气体所引发的气候变化以及带来的环境影响已经引起人们极大的关注[1-3]，关于水库以及海洋酸化问题的探究也早已开展[4-6]。关于$CO_2$的水－气界面通量关系比较密切的水体表层水体二氧化碳分压($p(CO_2)$)的研究也日臻完善，国内外已有研究指出河流$p(CO_2)$是受流域地理因素、人为因素与生物因素共同作用的结果，比如我国黄土高原的黄土富含碳酸盐，强烈的物理侵蚀和化学风化过程将大量无机碳输送到黄河，地质因素成为影响黄河水体$p(CO_2)$的主要因素[7-8]。渥太华河流域的土壤呼吸作用和矿物风化是影响河流水体$p(CO_2)$的重要因素[9]。呼吸作用是控制亚马逊河与珠江口$p(CO_2)$的主要因子[10-11]等等。也有研究分析水库、湖泊和河流$p(CO_2)$与水温($T$)、pH、营养盐、溶解性无机碳(DIC)等指标的相关性，证明了水生生物光合作用和呼吸作用对$p(CO_2)$具有显著的控制作用[12-15]。三峡水库建库以来，干支流水体由于蓄水其水位变动处于频繁交换的状态，干流倒灌影响频繁，使得三峡库区生态环境研究成为国内外学者的研究热点[16-19]，其中包括关于三峡水库干、支流不同季节$p(CO_2)$的分布特征，典型因素对$p(CO_2)$的影响程度，以及探究$p(CO_2)$影响下的$CO_2$水－气通量特征等的研究[20-23]。不过对于三峡流域的$p(CO_2)$在典型时期所受内、外源的影响状况的研究，以及长期受干流水体倒灌影响[24]、年内水位受水库泄蓄水影响较大的典型库湾支流－朱衣河的干支流的$p(CO_2)$分布状况研究尚未开展，所以本次选取夏季汛期在朱衣河开展研究，以期为流域典型时期河流碳循环的进一步研究做基础。

收稿日期：2016-10-31
基金项目：国家自然科学基金项目(51309252，51679258)；水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07104-004)；三峡水库温室气体源汇监测与分析研究和三峡工程生态与环境监测系统重点站项目联合资助
作者简介：梁顺田(1991-)，女，河南鹿邑人，硕士，主要从事水生态与水环境化学研究。E-mail：906150961@qq.com
通讯作者：王雨春(1968-)，男，贵阳人，博士，教授级高级工程师，主要从事地球化学方面的研究。
E-mail：wangyc@iwhr.com

## 1　研究区域介绍

三峡水库正常蓄水时(175 m水位)，全长193 km，水域面积可达1 084 $km^2$，总库容393亿 $m^3$，控制流域面积38万 $km^2$[25]。朱衣河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，河流全长31.4 km，流域面积153.6 $km^2$，年均流量2.92 $m^3/s$[26]，距三峡大坝约165 km，处于三峡水库常年回水区中部，受干流水体倒灌影响，年内水位受水库泄蓄水影响较大[24]。流域地形为石灰岩和页岩组成的“U”形盆地，镇内有煤、石膏、花岗岩、石灰岩、铜、铁等矿产资源，尤以煤、石膏、石灰储量丰富。

## 2　实验实施方法

本次研究总共在朱衣河及长江干流交汇处设置4个断面点(ZY01—ZY03，CJZY)，具体采样点布设详见图1及表1，于2016年7月月初、月底对朱衣河定点分层采集水样进行各项指标监测分析。根据本次实验设计所需指标(碱度(ALK)、pH、水温($T$)、溶解氧(DO)、叶绿素α(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)等)对水样进行有规划的采集分装。

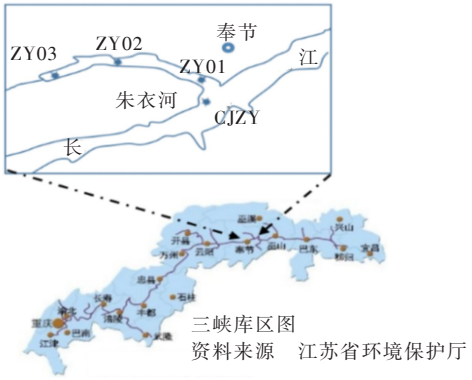


图1　研究区域及采样点位置

表1　采样点地理位置坐标

| 采样点 | 北纬 | 东经 |
|---|---|---|
| ZY03 | 31°1′8.75″ | 109°24′26.32″ |
| ZY02 | 31°1′20.57″ | 109°25′30.56″ |
| ZY01 | 31°0′42.29″ | 109°27′1.93″ |
| CJZY | 30°59′39.28″ | 109°26′44.80″ |

在现场，用YSI-EXO2多参数水质分析仪测定$T$、pH、DO、浊度(TD)等，具体做法是：打开仪器待仪器工作稳定后，垂直放入水体，人工操作仪器，平缓地在水体下放上收；用QCC15-5卡盖式采水器分层采水，采上来的水有一部分现场滴定碱度[27](方法采用《水和废水检测方法》)，一部分用500 mL聚乙烯采样瓶密闭避光保存，24 h内送达实验室进行测量营养盐指标，50 mL玻璃瓶分装并现场注入氯化汞，用于实验室检测溶解性有机碳(DOC)。

采用《水和废水检测方法》中的指导方法在实验室对营养盐等指标进行检测，其中氮指标采用流动注射分析仪法，磷和硅营养盐指标用分光光度计法，两者都是通过要求标准曲线的相关系数≥0.999和利用标准溶液进行中间校准来控制数据质量；其中DOC的测定是用燃烧氧化-非分散红外吸收分析仪Vario TOC测定，提前用高温420 ℃煅烧4 h的GF/F膜过滤玻璃瓶中水样。

碳酸盐在水中有如下平衡关系：$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3^* \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$，根据$CO_2$在水溶液中的碳酸平衡原理及采用亨利系数，计算$p(CO_2)$[28-32]，其中$K_i$为平衡常数。

$$p\left(CO_2\right) = \frac{10^{-pH} \times \left[HCO_3^-\right]}{10^{-pK_{CO_2} - pK_1}}, \tag{1}$$

$$pK_{CO_2} = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016T + 1.11;\ pK_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012T + 6.58; \tag{2}$$

在SPSS、Excel等中进行各指标相关性分析。

## 3　结果与分析

**3.1　营养盐指标结果**　Chl-a指标可以反映水体的浮游植物丰富度，在研究区的河口至上游Chl-a有增长趋势，长江干流水体一维流特征显著，流速会破坏浮游植物生长环境，所以河口含量比较低，为0.77 mg/L，两次采样结果显示上游水体Chl-a含量分别为2.85～18.32 mg/L、22.72～40.48 mg/L，在ZY02处最大。DO表层的变化趋势和Chl-a很一致，随水体分层明显下降，上游表层水体光合作用强烈。水体的浑浊度从河口至上游明显下降，随水深有增大的趋势。硅酸盐(Si)含量大概在5.864～7.24 μg/L范围内，氨氮($NH_4^+$)为0.103～0.533 mg/L，正磷酸盐($PO_4^{3-}$)为0.008～0.071 mg/L，水体属于常见的碱度中碳酸盐体系占主导的水体。溶解性有机碳(DOC)含量在2.198～3.842 mg/L，其他指标值详见表2。

表2　各采样点营养盐等范围值

| 采样点 | FNU | DO/(mg/L) | DOC/(mg/L) | TN/(mg/L) | $NO_3^-$/(mg/L) | $NH_4^+$/(mg/L) | TP/(mg/L) | $PO_4^{3-}$/(mg/L) | Si/(μg/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZY03 | 25.24±14.37 | 8.12±3.70 | 2.88±0.63 | 1.99±0.27 | 1.46±0.16 | 0.20±0.19 | 0.06±0.02 | 0.03±0.02 | 6.39±0.51 |
| ZY02 | 28.25±9.68 | 8.49±2.93 | 3.18±0.37 | 2.13±0.14 | 1.66±0.29 | 0.13±0.08 | 0.07±0.02 | 0.05±0.02 | 6.72±0.58 |
| ZY01 | 32.94±13.54 | 7.60±2.33 | 2.91±0.42 | 2.09±0.11 | 1.69±0.19 | 0.09±0.09 | 0.13±0.20 | 0.05±0.01 | 6.73±0.54 |
| CJZY | 37.14 | 7.27 | 2.62 | 2.03 | 1.79 | 0.11 | 0.07 | 0.06 | 6.44 |

**3.2　二氧化碳分压及其他(碱度、pH、*T*)**　天然水中除了碳酸盐体系，还存在着其他的缓冲物质，在酸滴定中可被滴定的碱还有溶解硅酸盐、硼酸盐、氨、有机碱、硫化物和磷酸。同样，多价金属离子和有机酸等非碳酸类的酸也可以影响天然水的碱中和容量，然而这些非碳酸盐成分中每一种的浓度同化合态碳酸盐相比通常是非常少的。多数情况下，淡水中常见的是硅酸盐($10^{-4}$至$10^{-3}$ mol)。大多数天然水的pH范围在6～9范围内[28]，只有化合态硅物质中的很小部分成为碱度的一部分，而原硅酸又是相当弱的酸[33]。本次研究的水体属于常见的碱度中碳酸盐体系占主导的水体，对河流酸滴定的碱度可以全部看成为碳酸盐成分。

上游表层水体都检测出少量的$CO_3^{2-}$，河口(CJZY)并未检测出$CO_3^{2-}$。从图2可以看出，表层水体碱度自河口至上游有下降的趋势，月底的数值小于月初。从垂向变化来看，河流水体的碱度有分层现象，整体来看水体碱度月初大于月底。水体pH值变化范围为8.04～9.24(图3)，自河口至上游，pH有变大的趋势。pH值也存在明显的分层现象，随着水深和碱度的逐渐增高，pH值存在下降趋势，整体来看月初的pH值小于月底。从空间分布来看，河口表层pH值月初大于月底，而上游表层pH值在月底较大。从图4可以看出，水体表层水温高于中层和底层，5 m以下变化不大，没有水温分层现象。河口断面的水温小于上游断面，整体来看月底的水温要大于月初。从$CO_2$分压的变化情况来看(图5)，在河口处$CO_2$基本处于饱和状态，分压大概为39.93 Pa。从河口到上游表层$p(CO_2)$逐渐变小，水体$CO_2$呈极不饱和状态，表层$p(CO_2)$变化范围在5.14～53.67 Pa。垂向$p(CO_2)$从表层到底层有逐渐变大的趋势，最低是26.04 Pa，最高是117.28 Pa，整条河流在月初的$p(CO_2)$大于月底。见下图2—5。

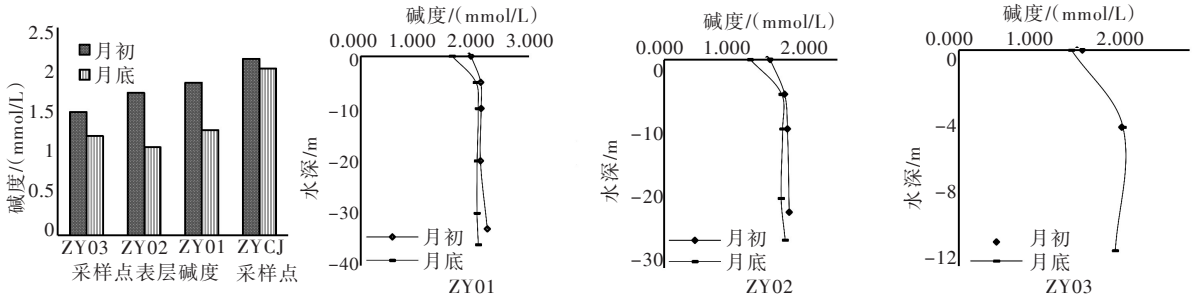


图2　各采样点分层碱度变化及河流横向变化

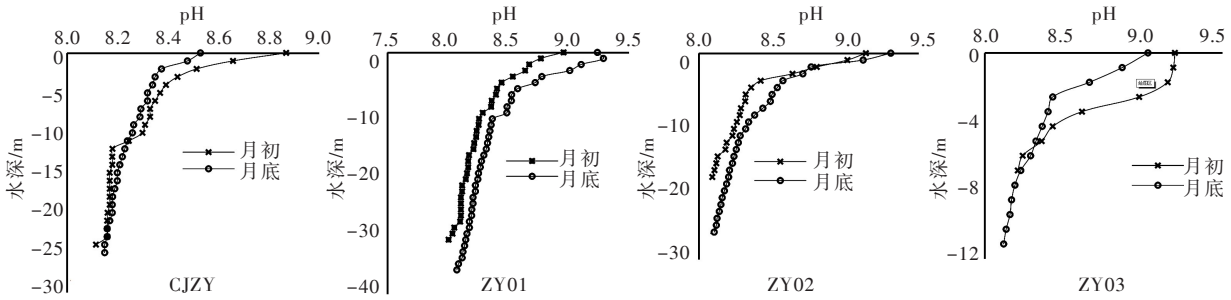


图3　各采样点分层pH变化

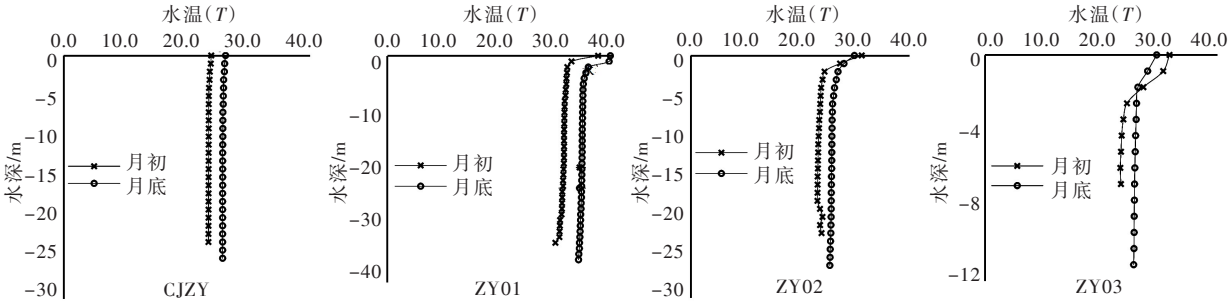


图4　各采样点分层T变化

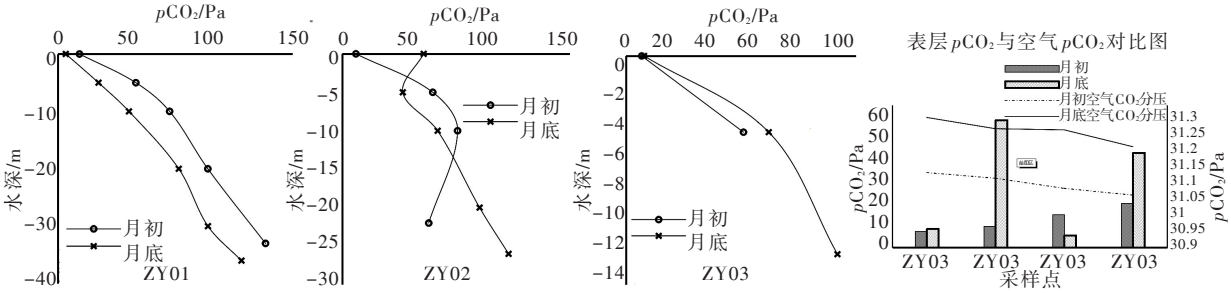


图5　各采样点分层及表层$p(CO_2)$变化

**3.3　超额二氧化碳分压与表观耗氧量比值**　水体生物的好氧呼吸作用直接消耗$O_2$产生$CO_2$，是水体$CO_2$的重要来源，当水体生物好氧呼吸作用不强烈或者受到抑制时，这种情况不仅会直接反映在水体DO的含量上，也使得水体$CO_2$含量相应降低。通常用表观耗氧量（$AOU$）来表征水体DO的偏离量，即实测DO浓度对于饱和浓度的偏离量[34]：

$$AOU = O_{sat} - D_f \tag{3}$$

式中：$AOU$为表观耗氧量；$O_{sat}$为现场水温和气压条件下水体饱和溶解氧（mg/L）；$D_f$为现场实测溶解氧（mg/L）。

水体中超额二氧化碳分压（$\Delta E_{pCO_2}$）和表观耗氧量（$\Delta AOU$）的比值（$\Delta E_{pCO_2}/\Delta AOU$）可以定量表征好氧呼吸对水体$p(CO_2)$的影响程度，其中$\Delta E_{pCO_2}$可表示为：

$$\Delta E_{pCO_2} = pCO_2 - pCO_{2sat} \tag{4}$$

式中：$p(CO_2)$为现场实测水体$CO_2$分压；$pCO_{2sat}$为现场水温和气压条件下水体$CO_2$达到饱和时所对应的$CO_2$分压。当生物好氧呼吸作用所利用的有机质完全来自浮游植物时，按照经典的Redfield比值，$E_{pCO_2}/AOU = 0.77$，然而浮游植物体内的元素比率并不是严格的Redfield比值，$E_{pCO_2}/AOU$值通常在0.62~0.79之间[35]，也有研究发现，在$HCO_3^-$含量较高的水体中，$E_{pCO_2}/AOU$的值可以达到0.90[36]，因此可以把0.90和0.62分别作为生物好氧呼吸作用对$p(CO_2)$的影响程度判别的上下限[37-38]。本次计算结果为：河口表层水体生物好氧呼吸作用对$p(CO_2)$的影响比较明显，大概在0.64±0.01，上游表层水体在接近河口的ZY01值为0.63，其余均小于下限值，变化范围在0.16~0.40之间，而分层水体的计算

$E_{pCO_2}/AOU$ 值高达1.04～2.91，也远远高过评估上限值，说明有其他因素对$p(CO_2)$产生更强的影响。

**3.4　$p(CO_2)$与各指标值相关性分析**　在SPSS软件中进行$p(CO_2)$与各项指标的相关性分析，结果如表3。

表3　$p(CO_2)$与各水质指标相关性分析结果

| | $p(CO_2)$ | $T$ | pH | DO | Chl-a | TD | DOC | $NH_4^+$ | $NO_3^-$ | TP | $PO_4^{3-}$ | Si |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p(CO_2)$ | 1 | | | | | | | | | | | |
| $T$ | −0.633** | 1 | | | | | | | | | | |
| pH | −0.867** | 0.833** | 1 | | | | | | | | | |
| DO | −0.680** | 0.758** | 0.859** | 1 | | | | | | | | |
| Chl-a | −0.476* | 0.697** | 0.738** | 0.808** | 1 | | | | | | | |
| TD | 0.636** | −0.881** | −0.761** | −0.653** | −0.578** | 1 | | | | | | |
| DOC | 0.094 | −0.184 | −0.025 | 0.107 | 0.036 | 0.323 | 1 | | | | | |
| $NH_4^+$ | 0.281 | −0.625** | −0.376 | −0.366 | −0.529** | 0.543** | 0.253 | 1 | | | | |
| $NO_3^-$ | −0.556** | 0.623** | 0.664** | 0.761** | 0.690** | −0.518** | 0.137 | −0.604** | 1 | | | |
| TP | −0.018 | −0.23 | −0.064 | 0.032 | −0.142 | 0.109 | 0.161 | 0.273 | −0.005 | 1 | | |
| $PO_4^{3-}$ | 0.279 | −0.561** | −0.384 | −0.235 | −0.211 | 0.471* | −0.133 | 0.237 | −0.041 | 0.162 | 1 | |
| Si | 0.004 | −0.425* | −0.153 | −0.067 | −0.155 | 0.261 | 0.003 | 0.399* | −0.234 | 0.154 | 0.308 | 1 |

注：**表示相关性在0.01水平上显著，*表示相关性在0.05水平上显著，其他为不具有显著性。

可以看出，$p(CO_2)$与$T$、pH、DO、Chl-a、$NO_3^-$存在显著的负相关关系，与浊度有显著的正相关性，与DOC无相关性。Chl-a与$T$、pH、DO、$NO_3^-$存在显著的正相关关系，与浊度存在显著的负相关性。水体浊度可以定量反映悬浮物总量。$p(CO_2)$所受影响因素来源主要有外源碳酸盐输入和内源有机碳消耗等，国内外大量研究资料都表明，细菌利用水体陆源性DOC是湖泊$CO_2$的主要来源，湖泊表层水中$p(CO_2)$与陆源DOC有良好的相关性[39-44]。不过，当湖泊、河流水体属于富营养化状态，浮游植物光合作用往往是导致夏季湖泊$p(CO_2)$偏低，$CO_2$欠饱和，成为大气$CO_2$的“汇”[45-46]。

表层水体的浮游植物光合作用可以用公式：

$$106CO_2 + 16NO_3^- + HPO_4^{2-} + 122H_2O + 18H^+ \rightarrow \{C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1\} + 138O_2$$

来表示，从分析Chl-a与$T$、pH、$NO_3^-$存在显著的正相关关系来看是符合这样无机到有机碳转换的，本次研究表明，上游表层的植物光合作用导致水体$H^+$减小，碳酸盐平衡反应向右移动，最终使得表层水体$CO_2$极不饱和，在这种情况下水体很容易成为$CO_2$的“汇”区。从分析$p(CO_2)$与$T$、pH、DO、Chl-a存在的显著负相关关系，并且结合表层悬浮物含量很低来看，夏季上游表层水体的$p(CO_2)$主要受浮游植物光合作用影响。另一方面来看，浮游植物光合作用导致水体碳酸盐平衡向右发生，产生的$CO_3^{2-}$很容易与$Ca^+$、$Mg^+$离子发生结合沉淀，沉淀后的碳的变迁有两个方向，一个是随水流流出该流域，另一个是沉积在河流底部，继续参与该流域碳的循环转化，这对于流域河流碳循环有很大的研究意义。

朱衣河流域是石灰岩和页岩组成的“U”形盆地，尤以煤、石膏、石灰储量丰富，受降雨径流侵蚀，水体悬浮物高含碳酸盐。水体浊度可以定量反映悬浮物总量，与张永领等[47]研究的黄河$p(CO_2)$与悬浮物呈显著正相关，是由于高含碳酸盐的泥沙进入水体后，通过增加水体溶解无机碳含量进而增加水体$p(CO_2)$不同的是，研究期间水体浊度远低于黄河，悬浮物对$p(CO_2)$的影响不仅来自通过增加水体溶解无机碳含量的直接影响，还来自于影响水体所受光照强度来影响浮游植物光合作用间接对$p(CO_2)$产生影响等。对于上游分层水体，$p(CO_2)$与浊度有显著正相关性($r$=0.636，$P$<0.01)，与DOC无相关性，$E_{pCO_2}/AOU$ 值也远高上限值，而夏季是流域汛期，降雨量比较频繁，地质高含碳酸盐，可以看出，分层水体$p(CO_2)$所受外源性输入碳酸盐影响比较大。

## 4　结论

（1）夏季朱衣河的$p(CO_2)$与$T$、pH、DO、Chl-a、$NO_3^-$存在显著的负相关关系，与浊度有显著的正相关性，与DOC无相关性；Chl-a与$T$、pH、$NO_3^-$存在显著的正相关关系，与浊度存在显著的负相关性。在夏季汛期，朱衣河的浮游植物光合作用和外源碳的输入仍然是影响水体$p(CO_2)$的主要因素，水体内源碳补给作用不明显。

（2）上游表层水体受浮游植物光合作用影响明显，光合作用导致水体$H^+$减小，碳酸盐平衡向右移动反应出$CO_3^{2-}$，也使得水体$CO_2$极不饱和，$p(CO_2)$变化范围在5.14～53.67 Pa；表层以下水体的$\Delta E_{pCO_2}/\Delta AOU$ 值高达1.04～2.91，远远高于评估上限值，$p(CO_2)$主要受外源碳汇入影响明显，随着水深有增大的趋势，变化范围最低是26.04 Pa，最高是117.28 Pa。河口受生物好氧呼吸作用影响显著，$\Delta E_{pCO_2}/\Delta AOU$ 的值为0.64±0.01，$p(CO_2)$大概为39.93 Pa。

**参　考　文　献：**


[1] TETT S F B, STOTT P A, ALLEN M R, et al. Causes of twentieth century temperature change near the earth's surface[J]. Nature, 1999, 309: 569-572.

[2] ALLAN R, FORSTNER U, SALOMONS W. Greenhouse gas emissions fluxes and process: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [R]. New York: Springer, 2005: 21-34.

[3] CALDEIRA K, WICKETT M E. Anthropogenic carbon and ocean Ph [J]. Nature, 2003, 425: 365.

[4] ORR J C, FABRY V J, AUMONT O, et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impacts on calcifying organisms[J]. Nature, 2005, 437: 681-686.

[5] DONEY S C, FABRY V J, FEELY R A, et al. Ocean acidification: the other $CO_2$ problem[J]. Annu. Rev. Mar. Sci, 2009, 1(1): 169-192.

[6] DUARTE C M, HENDRIKS I E, MOORE T S, et al. Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH[J]. Estuar. Coast, 2013, 36(2): 221-236.

[7] 张龙军，徐雪梅，温志超．秋季黄河$pCO_2$控制因素及水-气界面通量[J]．水科学进展，2009，20(2)：227-235.

[8] 苏征，张龙军，王晓亮．黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析[J]．海洋科学，2005，29(4)：41-44.

[9] TELMER K, VEIZER J. Carbon fluxes, $pCO_2$ and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: Carbon isotope perspectives [J]. Chemical Geology, 1999, 159(1-4): 61-68.

[10] 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.

[11] ZHAI W D, DAI M H, CAI W J, et al. High partial pressure of $CO_2$ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. Marine Chemistry, 2005, 93: 21-32.

[12] 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.

[13] 冉景江，林初学，郭劲松，等．三峡库区小江回水区二氧化碳分压的时空变化特征分析[J]．长江流域资源与环境，2011，20(8)：976-982.

[14] 吕迎春，刘丛强，王仕禄，等．红枫湖夏季分层期间$pCO_2$分布规律的研究[J]．水科学进展，2008，19(1)：106-110.

[15] 吕迎春，刘丛强，王仕禄，等．贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖$p(CO_2)$季节变化研究[J]．环境科学，2007，28(12)：2674-2681.

[16] 王亮，肖尚斌，刘德富，等．香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]．环境科学，2012，33(5)：1471-1475.

[17] XIAO S, WANG Y, LIU D, et al. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(10): 2065-2071.

[18] 黄文敏，朱孔贤，赵玮，等. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析[J]. 环境科学，2013，34(4)：1270-1276.

[19] 李哲，姚骁，何萍等. 三峡水库澎溪河水-气界面 $CO_2$，$CH_4$ 扩散通量昼夜动态初探[J]. 湖泊科学，2014，26(4)：576-584.

[20] 傅家楠，操 满，邓兵，等. 三峡库区高水位运行期典型干支流水体 $CO_2$ 分压及其水面通量特征[J]. 地球与环境，2016，44(1)：64-72.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 袁希功，黄文敏，毕永红，等. 香溪河库湾春季 $pCO_2$ 与浮游植物生物量的关系[J]. 环境科学. 2013，34(5)：1754-1760.

[24] 周子然，邓兵，王雨春，等. 三峡库区干支流水体交换特征初步研究以朱衣河为例[J]. 人民长江，2015，46(22)：1-6.

[25] 吴起鑫，韩贵琳，唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征[J]. 环境科学学报，2012(3)：654-661.

[26] 傅家楠，操满，邓兵，等. 三峡库区高水位运行期典型干支流水体 $CO_2$ 分压及其水面通量特征[J]. 地球与环境，2016，44(1)：64-72.

[27] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京：中国环境科学出版社，2002.

[28] YAO G R, GAO Q Z, WANG Z G, et al. Dynamics of $CO_2$ partial pressure and 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.

[29] KELLY C, RUDD J W M, ST LOUIS V L. Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies[J]. Eos Trans AGU, 1994, 75(29): 332-333.

[30] COLE J J, CARACO N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of $SF_6$[J]. Limnol Oceanogr, 1998, 43(4): 647-56.

[31] DEMARTY M, BASTIEN J, TREMBLAY A, et al. Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Québec, Canada, measured with automated Systems[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(23): 8908-8915.

[32] WEISS R F. Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas[J]. Mar Chem, 1974, 2(3): 203-215.

[33] WERNER Stumm, JAMES J Morgan. Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.[M]. 2nd Ed.1981.

[34] 张正斌，陈镇东，刘莲生，等. 海洋化学原理与应用[M]. 北京：海洋出版社，1999：112-116.

[35] CHEN C T A, LIN C M, HUANG B T, et al. Stoichiometry of carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur and oxygen in the particulate matter of the western North Pacific marginal seas[J]. Marine Chemistry, 1996, 54(1/2): 179-190.

[36] TAYLOR G T, WAY J, Scranton M I. Planktonic carbon cycling and transport in surface waters of the highly urbanized Hudson River estuary[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(5): 1779-1795.

[37] 张龙军，徐雪梅，温志超. 秋季黄河 $pCO_2$ 控制因素及水-气界面通量[J]. 水科学进展，2009，20(2)：227-235.

[38] 苏征，张龙军，王晓亮. 黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析[J]. 海洋科学，2005，29(4)：41-44.

[39] 金相灿，刘鸿亮，屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. 北京：中国环境科学出版社，1990.

[40] BONAN G. Ecological climatology-Concepts and applications[M]. Cambridge University Press, 2002.

[41] MABERLY S C. Diel, episodic and seasonal changes in pH and concentrations of inorganic carbon in a produc-

tive lake[J]. Freshwater Biology, 1996, 35: 579-598.

[42] HOPE D, KRATZ T K, RIERA J L. Relationship between $pCO_2$ and dissolved organic carbon in northernWisconsin lakes[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25: 1442-1445.

[43] RIERA J L, SCHINDLER J E, KRATZ T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clearwater lakes and two bog lakes in northern Wi sconsin, USA[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999, 56: 265-274.

[44] SOBEK S. Carbon Dioxide Supersaturation in Lakes-Causes, Consequences and Sensitivity to Climate Change [D]. Sweden: Uppsala University, 2005. 17-19.

[45] SCHINDLER D W, BRUNSKILL G J, Emerson S, et al. Atmospheric carbon dioxide: its role in maintaining phytoplankton standing crops[J].Science, 1972, 177: 1192-1194.

[46] 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: 1718-1730.

[47] 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 $pCO_2$ 特征及扩散通量[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 40-48.

## Distributions of partial pressure of carbon dioxide and its affecting factors in the Zhuyi River in summer

LIANG Shuntian, WANG Yuchun, HU Mingming, WANG Qiwen

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

**Abstract**: In order to analyze the distribution characteristics of partial pressure of carbon dioxide ($p(CO_2)$) and its affecting factors in Zhuyi River in summer, which is one tributary bay of the Three Gorges Reservoir, stratified sampling had been carried out twice in July 2016. The $p(CO_2)$ was calculated by the chemical balance and Henry's Law, and the ratio $\left(E_{pCO_2}/AOU\right)$ of excess carbon dioxide partial pressure ($E_{pCO_2}$) to pparent oxygen utilization (AOU) was used to measure the effect of biological aerobic respiration on $p(CO_2)$. Results are as follows: In upper surface water, the $p(CO_2)$ varies from about 5.14 to 53.67Pa, and they are mainly influenced by photosynthesis with the decrease of $H^+$ in water, that led to carbonate equilibrium moveing to right and an extremely unsaturated $CO_2$ contained in water. In stratified water (>5 m), the $p(CO_2)$ are mainly influenced by external input carbon, and $p(CO_2)$ increases with the water depth. The lowest and the highest values of $p(CO_2)$ are 26.04Pa and 117.28Pa, respectively. The ratios ($E_{pCO_2}/AOU$) reach up to 1.04 ~ 2.91, which are far higher than the upper limited value. The $p(CO_2)$ in estuaryis is influenced by aerobic respiration evidently, and it is about 39.93Pa and the ratios $\left(E_{pCO_2}/AOU\right)$ are 0.64 ± 0.01. Furthernore, $p(CO_2)$ is negatively correlated with temperature(T), pH, dissolved oxygen(DO), chlorophyll alpha(Chl-a) and nitrate nitrogen($NO_3^-$). Also, $p(CO_2)$ has a significant positive correlation with turbidity (TD), but no significant correlation with dissolved organic carbon(DOC).

**Keyword**: Bay of the Three Gorges Reservoir area; partial pressure of carbon dioxide; apparent oxygen utilization; biotic influence; the Zhuyi River

（责任编辑：韩　昆）