

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2018.06.006

曹玉平, 邓飞艳, 焦树林, 等. 红水河龙滩水库夏季  $\text{CO}_2$  分压分布特征及影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 521-527.

CAO Yu-ping, DENG Fei-yan, JIAO Shu-lin, et al. Research of Distribution Characteristics and Influencing Factors of  $p_{\text{CO}_2}$  in Hong-shui River Longtan Reservoir in Summer[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(6): 521-527.

## 红水河龙滩水库夏季 $\text{CO}_2$ 分压分布特征及影响因素

曹玉平, 邓飞艳, 焦树林<sup>①</sup>, 袁热林, 张倩 (贵州师范大学地理与环境科学学院/贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 为研究红水河龙滩水库的  $\text{CO}_2$  浓度分布及影响因素, 于2016年7月对红水河河段龙滩水库进行定点采样, 测定水体理化参数并计算水体表层  $\text{CO}_2$  分压( $p_{\text{CO}_2}$ )。结果表明: 坝前到红水河入库水体表层  $p_{\text{CO}_2}$  值分3个区间, 坝前至库中在 64.28~152.56 Pa 之间, 库中过渡带在 161.57~257.57 Pa 之间, 入库水体在 126.45~264.29 Pa 之间, 入库水体和过渡区的  $p_{\text{CO}_2}$  均高于坝前。相关分析表明: 表层水体  $p_{\text{CO}_2}$  与电导率、总溶解固体物(TDS)、氧化还原电位(ORP)呈显著正相关, 与 pH 值呈显著负相关, 说明水生生物光合-呼吸作用、碳酸盐岩溶体系是影响水库  $p_{\text{CO}_2}$  变化的重要因素。水库  $\text{CO}_2$  释放通量范围为 9.06~78.80  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 均值为 45.96  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 库区表层水体表现为大气  $\text{CO}_2$  的源, 呈现坝前  $\text{CO}_2$  排放弱源过度到上游碳排放强源的空间变化特征, 说明河流水体流经水库作用减缓了  $\text{CO}_2$  释放。

**关键词:** 龙滩水库;  $\text{CO}_2$  分压;  $\text{CO}_2$  排放通量; 相关分析

**中图分类号:** X82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2018)06-0521-07

**Research of Distribution Characteristics and Influencing Factors of  $p_{\text{CO}_2}$  in Hong-shui River Longtan Reservoir in Summer.** CAO Yu-ping, DENG Fei-yan, JIAO Shu-lin<sup>①</sup>, YUAN Re-lin, ZHANG Qian (School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University/Key Laboratory of Remote Sensing Application on Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** For studying the  $\text{CO}_2$  emissions of Hongshui River Longtan Reservoir, the underway sampling was carried out to continuously survey the Longtan Reservoir of Hongshui River using a professional water sampler in July 2016. The partial pressure of  $\text{CO}_2$  ( $p_{\text{CO}_2}$ ) are calculated using the water-chemical balance and the Henry's law. The results show that the data of  $p_{\text{CO}_2}$  values on the surface water were divided into three intervals because the data of  $p_{\text{CO}_2}$  values on the surface from near the dam to the middle section ranged from 64.28 to 152.56 Pa, the transition zone of the middle section ranged from 161.57 to 257.57 Pa, as well as inflow waters ranged from 126.45 to 264.29 Pa, which was higher than that of  $p_{\text{CO}_2}$  before the dam. There was a significant positive correlation on surface water  $p_{\text{CO}_2}$  with its TDS, Cond and ORP, and a significant negative correlation on surface water  $p_{\text{CO}_2}$  with pH, which suggests aquatic biosynthesis-respiration, carbonate karst system are important factors affecting the change of reservoir  $p_{\text{CO}_2}$ . Reservoir  $\text{CO}_2$  flux had a increasing trend from the dam to the end of the tail reservoir with the mean value of the  $\text{CO}_2$  flux being 45.96  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  and ranged from 9.06 to 78.80  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Reservoir water showed an atmospheric  $\text{CO}_2$  source with an obvious variation characteristics changing from weak carbon source before the dam to strong carbon source to the upstream, which implies the river type reservoir would slow down the carbon emission of river water.

**Key words:** Longtan Reservoir; partial pressure of carbon dioxide; the  $\text{CO}_2$  emission flux; co-relationship analysis

全球气候变暖引发的一系列生态与环境问题已引起人们对温室气体“源/汇”的广泛关注<sup>[1]</sup>, 特别是水库(湖泊)、河流等水生生态系统的温室气体排放<sup>[2]</sup>。水生生态系统作为温室气体重要的源和汇, 对大气环境中温室气体调节具有重要作用<sup>[3]</sup>。水库是重要的陆地水生生态系统之一, 也是温室气

体的重要排放源, 探讨水库温室气体排放及其影响

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 贵州省国内一流学科建设项目(黔教科研发[2017]85号); 国家自然科学基金(41263011)

① 通信作者 E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

因素有利于精确估算水库温室气体排放量和减少水利工程与水电开发过程中水库温室气体的排放<sup>[4]</sup>。

水库碳排放研究最早始于1993年, DUCHEMIN等<sup>[5]</sup>最先对水库水-气界面温室气体通量进行观测。WALSH<sup>[6]</sup>认为水库是大气温室气体重要排放源;目前国内外研究主要集中在水库的碳/汇源上。严国安等<sup>[7]</sup>认为水库作为CO<sub>2</sub>的源这一结果并不适用于大多数水库,仅限于水库淹没地是泥炭地或浅水库区时;李双等<sup>[8]</sup>对三峡水库库区梅溪河的研究表明其库区支流为大气中CO<sub>2</sub>的汇,而库区干流表现为CO<sub>2</sub>的源;李健鸿等<sup>[9]</sup>对不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量的研究发现大龙洞水库库区和出库水体均为大气CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的源,五里峡水库库区总体上为大气CO<sub>2</sub>的汇和CH<sub>4</sub>的源,出库水体均为大气CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>的源,思安江水库库区均为大气CO<sub>2</sub>的汇和CH<sub>4</sub>的源。诸多学者对西南喀斯特地区水库开展了碳排放和CO<sub>2</sub>交换通量的研究<sup>[10-15]</sup>。国内外此前的研究大多集中在热带<sup>[6,16]</sup>、温带<sup>[17]</sup>水库,对喀斯特地区深水河道型水库的研究较少。笔者实地监测了红水河龙滩水库丰水期表层水体的pH值、总溶解固体(TDS)、温度、碱度和氧化还原电位(ORP)等要素,

分析水库水体CO<sub>2</sub>分压( $p_{\text{CO}_2}$ )的空间分布规律,并根据水体温度、pH值、ORP等理化因子和水库水体 $p_{\text{CO}_2}$ 分布之间的关系,探讨龙滩水库丰水期水体 $p_{\text{CO}_2}$ 的控制机制。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

红水河是珠江水系西江的上游干流,发源于云南省沾益县马雄山,其源头为南盘江,在西林县与清水江汇合后进入广西、贵州边境,成为黔桂两省区的界河。龙滩水库(25°04' N, 107°01' E~25°12' N, 106°39' E)位于红水河中游,西起贵州省黔东南自治州册亨县,东至广西壮族自治区河池市天峨县。研究区属于亚热带季风气候区,年均气温达20℃,多年平均降水量为1335 mm。龙滩水库属于干流型深水水库,坝址以上流域面积为9.85 km<sup>2</sup>,占红水河流域面积的71%,库容达273×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,回水区长度120 km,正常蓄水深度为378 m,最大水深为173.5 m,平均水深为92.7 m。

### 1.2 样品的采集与分析

为采集龙滩水库水体样品,于2016年7月16日从龙滩水库坝前沿红水河干流逆流而上分别采集33个水样点(图1)。

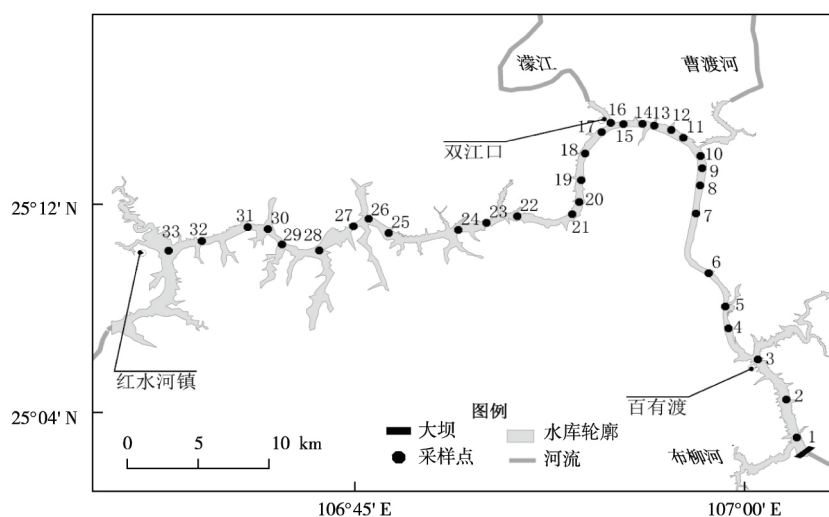


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Sampling distribution map

全程乘船采用专业采水器连续走航对各采样点进行水质参数和 $p_{\text{CO}_2}$ 的监测。采用美国 Myron 公司生产的 Ultru-II (6P) 多数水质仪现场测定水样的温度 ORP、pH 值、电导率和 TDS 等水质参数,现场用稀盐酸滴定水样碱度(ALK)。采集水样用水

库水清洗3次装瓶中,带回实验室用 HI 83200 多参数水质测定仪分析检定样品中阴阳离子含量。用 GPS 对采样路线进行轨迹记录和定点,用 Google Earth 7.15 和 Arcgis 10.2 软件对采样路线和地点进行空间分析制图,确定采样空间轨迹和位置(图1)。

### 1.3 数据处理

运用连续走航所测定的水温、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、pH 值等参数,根据水体碳酸含量平衡原理利用亨利定律及相关公式计算水库水体的  $p_{\text{CO}_2}$ <sup>[8-11]</sup>。采用 Excel 2016、SPSS 19.0 和 Origin 9.0 软件进行数据分析。

### 1.4 CO<sub>2</sub> 扩散通量计算

水-气界面的 CO<sub>2</sub> 扩散主要受制于大气和水体中的 CO<sub>2</sub> 分压之差、温度、风速和河水流速等因素。通常水-气 CO<sub>2</sub> 释放通量计算公式<sup>[18-19]</sup>为

$$F = K \times (p_{\text{CO}_{2w}} - p_{\text{CO}_{2a}}) \quad (1)$$

式(1)中,  $F$  为水-气 CO<sub>2</sub> 释放通量, mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>;  $K$  为 CO<sub>2</sub> 的水-气交换系数;  $p_{\text{CO}_{2w}}$  为水体 CO<sub>2</sub> 分压, Pa;  $p_{\text{CO}_{2a}}$  为大气 CO<sub>2</sub> 分压, Pa。采用 WANNINK-HOF<sup>[20]</sup>提出的方法计算龙滩水库表层水体的水-气 CO<sub>2</sub> 交换系数:

$$K = b \times U \times (600/S_t)^{1/2} \quad (2)$$

式(2)中,  $U$  为风速, m · s<sup>-1</sup>; 当  $U$  为瞬时风速时  $b = 0.31$ ;  $U$  为平均风速时  $b = 0.39$ ;  $S_t$  为  $t$  °C 下 CO<sub>2</sub> 的 Schmidt 常数。  $S_t$  计算公式为

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

## 2 结果与分析

### 2.1 库区表层水体 $p_{\text{CO}_2}$ 分布

从图2可知,从坝前到库尾,水库表层水体  $p_{\text{CO}_2}$  变化显著,总体呈上升趋势。坝前至库中在 64.28 ~ 152.56 Pa 之间,库中过渡带在 161.57 ~ 257.57 Pa 之间,库尾入库水体在 126.45 ~ 264.29 Pa 之间,整个库区水面  $p_{\text{CO}_2}$  平均值为 171.26 Pa。最高值出现在库尾的 31 号采样点,为 264.29 Pa。由于此处为水库水体与红河河水交接明显处,水体分界较分明,加之是库湾和河流入口,水体有机质含量高,浊度大,削弱了水体的光合作用,有机质分解释放大量 CO<sub>2</sub>,降低了水体氧含量,导致 ORP 和 pH 值偏低,  $p_{\text{CO}_2}$  值很高。  $p_{\text{CO}_2}$  最低点位于坝前 2 号采样点 (64.28 Pa),可能是因为坝前水体更新慢,流速缓,有利于浮游植物生长,光合作用明显增强,水体中 CO<sub>2</sub> 被大量吸收导致水体  $p_{\text{CO}_2}$  降低。

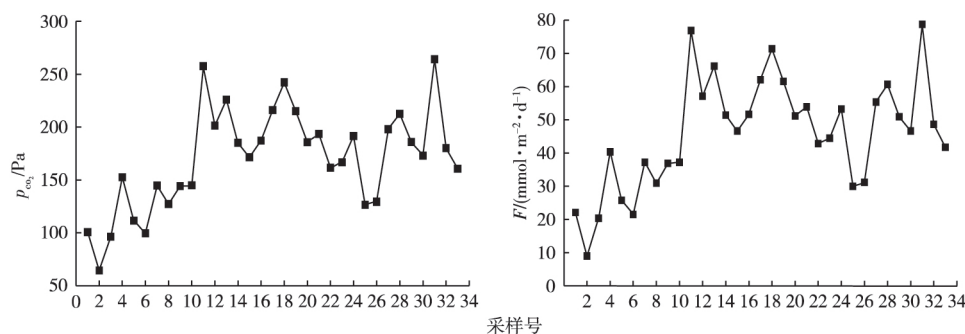


图2 库区表层 CO<sub>2</sub> 分压( $p_{\text{CO}_2}$ )及释放通量( $F$ )分布

Fig. 2 Distribution of  $p_{\text{CO}_2}$  and out-grassing in surface water

### 2.2 水质参数监测结果

从图3可知,水库表层水体温度为 29.2 ~ 31 °C,均温为 30.27 °C,温度空间变化差异不大,在库湾和峡谷地区(6~12号点)水体温度较低。电导率为 191.2 ~ 264.1 μS · cm<sup>-1</sup>,均值为 238.42 μS · cm<sup>-1</sup>。电导率越高,溶解性盐含量也越高,TDS 含量也越高; $\rho(\text{TDS})$  为 121.1 ~ 168.2 mg · L<sup>-1</sup>,均值为 152.14 mg · L<sup>-1</sup>,两者呈显著正相关关系(表1),电导率和 TDS 从坝前向上游地区逐渐升高(图3)。水体 pH 值为 7.80 ~ 8.39,呈弱碱性,从坝前逐渐向上游地区递减,与电导率和 TDS 含量空间分布趋势相反。ORP 值为 39 ~ 144 mV,均值为 64.76 mV。

受碳酸盐体系的影响,水体 ALK 值为 1.8 ~ 3.3 mmol · L<sup>-1</sup>,均值为 2.44 mmol · L<sup>-1</sup>。ORP 含量与 ALK 呈显著正相关(表1),且从坝前向上游逐渐升高。

## 3 讨论

### 3.1 库区表层水体 $p_{\text{CO}_2}$ 影响因素分析

当前研究认为影响河流  $p_{\text{CO}_2}$  的过程主要包括:(1)土壤 CO<sub>2</sub> 的输入;(2)碳酸盐岩矿物的溶解与沉淀;(3)水体中有机质的原位呼吸和降解及水生植物的光合作用;(4)从水体到大气的 CO<sub>2</sub> 脱气。前面 2 个过程主要是增加水体  $p_{\text{CO}_2}$ ,降低 pH 值;后面

2 个过程则降低水体  $p_{\text{CO}_2}$ , 提高 pH 值。水库蓄水后, 坝前水体水动力条件减弱, 利于浮游植物的生

长, 光合作用加强, 消耗表层水体溶解的  $\text{CO}_2$ , 导致水体  $p_{\text{CO}_2}$  降低<sup>[21-22]</sup>。

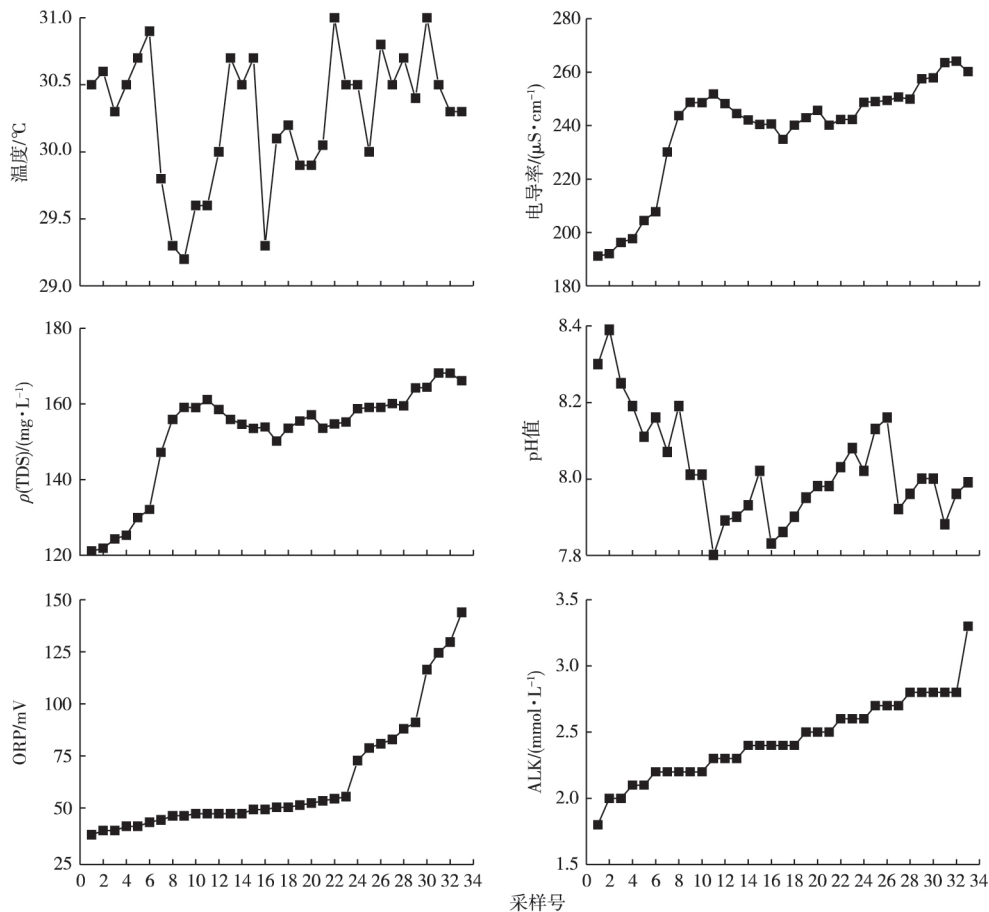


图 3 库区表层水质参数分布

Fig. 3 Distribution of surface water quality parameters

表 1 各变量之间相关性分析

Table 1 Correlation analysis between variables

指标	$t$	电导率	TDS 含量	pH 值	ORP	ALK
电导率	-0.07					
TDS 含量	-0.10	0.99**				
pH 值	0.28	-0.44**	-0.45**			
ORP	0.15	0.80**	0.79**	-0.41*		
ALK	0.19	0.78**	0.77**	-0.40*	0.99**	
$p_{\text{CO}_2}$	-0.14	0.41*	0.41*	-0.90**	0.47**	0.45**

\*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。 $t$  为温度,TDS 为总溶解固体,ORP 为氧化还原电位,ALK 为碱度  $p_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  分压。

线性回归分析(图 4)显示,pH 值与  $p_{\text{CO}_2}$  呈显著负相关关系,水库蓄水后坝前水体水动力条件减弱,利于浮游植物的生长,浮游植物光合作用加强,消耗表层水体溶解的  $\text{CO}_2$ ,导致水体  $p_{\text{CO}_2}$  降低。有机质降解释放的营养盐也可以被浮游植物生长所利用;库尾处大量入库水体流入河流,带来大量陆

源有机质,水流速度较快,处于“河流-水库”过渡期的水体主要受异养呼吸作用的控制,消耗流域上游带来的陆源有机碳和水体溶解态氧,释放  $\text{CO}_2$ 。因此,上游水体表现出低 pH 值、高  $p_{\text{CO}_2}$ 。ORP、电导率、TDS 与  $p_{\text{CO}_2}$  存在显著正相关关系,ORP 体现整个水环境的宏观氧化和还原性,库区作为上游物质的

汇入区,水环境的氧化还原性对库区  $p_{\text{CO}_2}$  产生重要影响。流域化学侵蚀过程中,河流断面水体的 TDS 量是化学侵蚀强度的主要标志<sup>[23-24]</sup>。喀斯特地区流域化学侵蚀强度很大,主要表现在富含碳酸的水体对可溶岩的溶蚀作用,回归分析表明电导率与

TDS 呈显著正相关(表 1),TDS 含量越高,电导率就越大,龙滩水库位于喀斯特流域,库区中水体富含碳酸盐,碳酸盐沉积作用释放  $\text{CO}_2$ ,使水中  $p_{\text{CO}_2}$  升高。

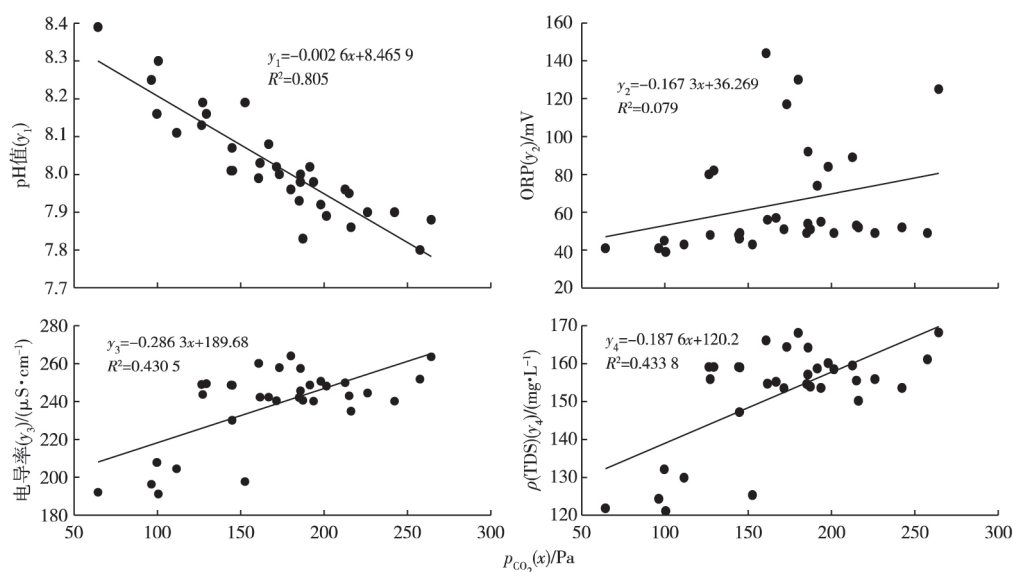


图 4  $p_{\text{CO}_2}$  与水质参数线性回归分析

Fig. 4 Linear regression analysis of water quality parameters and  $p_{\text{CO}_2}$

### 3.2 表层水体 $\text{CO}_2$ 释放通量

采样当天的气候情况以及采样结果,显示风速较匀速,故选取当天当地气象部门发布的气候要素来确定风速,取平均风速下的常数值,大气  $p_{\text{CO}_2}$  取 39 Pa,此与张龙军等<sup>[25]</sup>的研究取值接近。根据式(1)~(2)计算出表层水体  $\text{CO}_2$  释放通量在  $9.06 \sim 78.8 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  之间,平均值为  $45.96 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。坝前  $\text{CO}_2$  释放通量最低,距离大坝越远,  $\text{CO}_2$  释放通量慢慢升高,接近库尾处达到最大值。释放通量空间分布呈现从坝前向上游地区逐渐升高的趋势,说明河流经过水库作用后减缓了  $\text{CO}_2$  的排放。

### 3.3 与世界其他水体 $\text{CO}_2$ 释放通量的比较

龙滩水库为典型的河道型水库,水库表层  $p_{\text{CO}_2}$  最大值达 264.29 Pa。  $\text{CO}_2$  释放通量相对居中,平均值为  $45.96 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。与其他河流、水库(表 2)相比,热带地区的亚马逊河(Amazon)、弗纳斯(Furnas)、卡鲁阿(Curua-Una)水库通量分别为  $545.18$ 、 $7.1$  和  $7.7 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;亚热带、温带地区部分河流表现为大气  $\text{CO}_2$  源,部分河流表现为大气  $\text{CO}_2$  汇。从表 2 可以看出,大多数河流、水库

表现为  $\text{CO}_2$  源,现有研究的热带地区河流和水库水气界面  $\text{CO}_2$  通量普遍高于亚热带和温带地区。不同的河流、水库水动力条件存在差异,生态环境也不同,其  $\text{CO}_2$  释放通量也各不相同。龙滩水库丰水期气温偏高,降水量较丰富,植被生长旺盛,喀斯特流域的物理侵蚀和化学风化比较强烈,汇入河流系统溶解的无机碳较多,使之成为重要的温室气体排放源。

## 4 结论

(1) 龙滩水库建成后水动力条件发生改变,水体理化性质呈显著差异。坝前到红水河入库水体表层  $p_{\text{CO}_2}$  值分 3 个区间,坝前至库中在  $64.28 \sim 152.56 \text{ Pa}$  之间,库中过渡带在  $161.57 \sim 257.57 \text{ Pa}$  之间,入库水体在  $126.45 \sim 264.29 \text{ Pa}$  之间,入库水体和过渡区  $p_{\text{CO}_2}$  均高于坝前。相关性分析表明,表层水体  $p_{\text{CO}_2}$  与 TDS、pH 值、ORP 和电导率存在显著相关性。pH 值和  $p_{\text{CO}_2}$  呈显著负相关关系,而 ORP、TDS、电导率和  $p_{\text{CO}_2}$  呈显著正相关关系,说明河流呼吸作用和植物光合作用影响水体  $p_{\text{CO}_2}$  的分布。

表2 现有研究中世界主要研究河流、水库 CO<sub>2</sub> 分压( $p_{\text{CO}_2}$ ) 和 CO<sub>2</sub> 排放通量Table 2  $p_{\text{CO}_2}$  and CO<sub>2</sub> emissions of rivers and reservoirs in the world

类型	名称	国家	气候带	$p_{\text{CO}_2}/\text{Pa}$	水气界面 CO <sub>2</sub> 通量/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	来源文献
河流	亚马逊	巴西	热带	295.04	545.18	[26]
	梅溪河	中国	亚热带	6.80~7.50	-7.48	[8]
	赣江	中国	亚热带		201.86	[14]
	香溪河	中国	亚热带	4.96	-35.17	[27]
	圣劳伦斯	加拿大	温带		118.29	[28]
水库	三峡水库	中国	亚热带		149.52	[29]
	弗纳斯	巴西	热带	0.71~312.86	7.10	[30]
	卡鲁阿	巴西	热带	39.18~149.64	7.70	[30]
	洪家渡水库	中国	亚热带	59.80	6.14	[10]
	万安水库	中国	亚热带		12.74	[14]
	达沃斯	美国	温带		-23.40	[31]
	龙滩水库	中国	亚热带	171.26	45.96	笔者研究

(2) 龙滩水库表层水体 CO<sub>2</sub> 释放通量在 9.06~78.8 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 之间,平均值为 45.96 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>。经过水库作用后,原始河流 CO<sub>2</sub> 释放特征发生改变,库区 CO<sub>2</sub> 释放通量出现从坝前向上游递增的趋势,水库作用减缓了河流 CO<sub>2</sub> 的排放,库区表层水体表现为碳源。与世界范围河流、水库 CO<sub>2</sub> 释放通量相比,龙滩水库 CO<sub>2</sub> 释放通量低于热带地区,高于温带地区。

## 参考文献:

- [1] DUC N T, SILVERSTEIN S, LUNDMARK L *et al.* Automated Flux Chamber for Investigating Gas Flux at Water-Air Interfaces [J]. *Environmental Science & Technology* 2013, 47(2): 968-975.
- [2] BASTIEN J, DEMARTY M. Spatio-Temporal Variation of Gross CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Diffusive Emissions From Australian Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems, and Estimation of Net Reservoir Emissions [J]. *Lakes and Reservoirs* 2013, 18(2): 115-127.
- [3] 杨平, 仝川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展 [J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6868-6880. [YANG Ping, TONG Chuan. Emission Paths and Measurement Methods for Greenhouse Gas Fluxes From Freshwater Ecosystems: A Review [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2015, 35(20): 6868-6880.]
- [4] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2377-2384. [ZHAO Xiao-jie, ZHAO Tong-qian, ZHENG Hua, *et al.* Greenhouse Gas Emission From Reservoir and Its Influence Factors [J]. *Environmental Science* 2008, 29(8): 2377-2384.]
- [5] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R *et al.* Production of the Greenhouse Gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Buried Hydroelectric Reservoirs of the Boreal Region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 529-540.
- [6] WALSH J J. Importance of Continental Margins in the Marine Biogeochemical Cycling of Carbon and Nitrogen [J]. *Nature*, 1991, 350: 53-55.
- [7] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO<sub>2</sub> 的汇 [J]. *生态学报*, 2001, 21(5): 827-833. [YAN Guo-an, LIU Yong-ding. Aquatic Ecosystems: Carbon Cycle and as Atmospheric CO<sub>2</sub> Sink [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2001, 21(5): 827-833.]
- [8] 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释放通量 [J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 885-891. [LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, *et al.* Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer [J]. *Environmental Science* 2014, 35(3): 885-891.]
- [9] 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 等. 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(11): 4032-4042. [LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, *et al.* Summer Greenhouse Gases Exchange Flux Across Water-Air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China [J]. *Environmental Sciences*, 2015, 36(11): 4032-4042.]
- [10] 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释放通量 [J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1193-1199. [YU Yuan-xiu, LIU Cong-qiang, WANG Fu-shun, *et al.* Spatiotemporal Characteristics and Diffusion Fluxes of Partial Pressure of Dioxide Carbon ( $p_{\text{CO}_2}$ ) in Hongjiadu Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology* 2008, 27(7): 1193-1199.]
- [11] 彭希, 刘丛强, 王宝利, 等. 河流-水库体系水体表层  $p_{\text{CO}_2}$  时空变化特征及其释放通量: 以六冲河、洪家渡水库、红枫湖为例 [J]. *地球与环境*, 2013, 41(2): 97-103. [PEN Xi, LIU Cong-qiang, WANG Bao-li, *et al.* Spatiotemporal Characteristics and Diffusion Fluxes of Partial Pressure of Dioxide Carbon ( $p_{\text{CO}_2}$ ) in the River-Reservoir System as Exemplified Liuchonghe River, Hongjiadu Reservoir and Hongfeng Lake [J]. *Earth and Environment* 2013, 41(2): 97-103.]
- [12] 吕迎春, 刘丛强, 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): 106-110. [LÜ Ying-chun, LIU Cong-qiang, 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): 106-110.]
- [13] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河春季水华期  $p_{\text{CO}_2}$  及影响因素分析 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 829-838. [GUO Jin-



- song JIANG Tao LI Zhe *et al.* 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 [J]. *Advances in Water Science* 2011 22(6): 829–838.]
- [14] 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. [MEI Hang-yuan, WANG Fu-shun, YAO Chen-chen, *et al.* Diffusion Flux Partial Pressure of Dioxide Carbon in Wan'an Reservoir in Spring [J]. *Environmental Science* 2011 32(1): 58–63.]
- [15] 赵登忠, 谭德宝, 汪朝辉, 等. 清江流域水布垭水库温室气体交换通量监测与分析研究 [J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(10): 197–204. [ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, WANG Zhao-hui, *et al.* Measurement and Analysis of Greenhouse Gas Flux Form Shuibuya Reservoir in Qingjiang River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* 2011 28(10): 197–204.]
- [16] LOUIS V L, KELLY C A, DUCHEMIN É *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate [J]. *BioScience* 2000 50(9): 766–775.
- [17] EUGENI B, BOAZ L, BOAZ L. Dynamics of the Carbon Dioxide System in the Dead Sea [J]. *Geochemica Et Cosmochimica Acta*, 2001 65(3): 355–368.
- [18] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 pCO<sub>2</sub> 控制因素及水-气界面通量 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 227–235. [ZHANG Long-jun, XU Xue-mei, WEN Zhi-chao. Control Factors of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Degassing Fluxes From the Yellow River in Autumn [J]. *Advances in Water Science* 2009 20(2): 227–235.]
- [19] 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<sub>2</sub> 特征及释放通量 [J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 40–48. [ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong. Partial Pressure of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Degassing Fluxes of Huayankou Station Affected by Xiaolangdi Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015 36(1): 40–48.]
- [20] WANNINKHOF R. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992 97(C5): 7373–7382.
- [21] TELMER K, VEIZER J. Carbon Fluxes pCO<sub>2</sub> and Substrate Weathering in a Large Northern River Basin, Canada: Carbon Isotope Perspectives [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/2/3/4): 61–86.
- [22] 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. [SU Zheng, ZHANG Long-jun, WANG Xiao-liang. Influencing Factors of Partial Pressure of CO<sub>2</sub> in Huanghe (Yellow) River [J]. *Marine Sciences*, 2005 29(4): 41–44.]
- [23] 焦树林, 刘丽, 孙婷, 等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应 [J]. *地理研究*, 2013, 32(6): 1025–1032. [JIAO Shu-lin, LIU Li, SUN Ting, *et al.* Hydrological Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in Chemical Weathering Processes of in Sanchahe Watershed [J]. *Geography Research*, 2013, 32(6): 1025–1032.]
- [24] 焦树林, 罗福家, 梁虹, 等. 乌江源区阳长流域化学侵蚀作用的碳汇效应 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 44–47. [JIAO Shu-lin, LUO Fu-jia, LIANG Hong, *et al.* The Atmospheric CO<sub>2</sub> Consumption in the Chemical Weathering Processes of the Yangchang Hydrological Stations Basin in Wujiang River Source Drainage Basins Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 44–47.]
- [25] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 pCO<sub>2</sub> 控制因素及水-气界面通量 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 227–235. [ZHANG Long-jun, XU Xue-mei, WEN Zhi-chao. Control Factors of pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Degassing Fluxes From the Yellow River in Autumn [J]. *Advances in Water Science* 2009 20(2): 227–235.]
- [26] HENRIQUE O S, VANIA N, NICHOLAS D *et al.* Carbon Dioxide Emissions Along the Lower Amazon River [J]. *Frontiers in Marine Science* 2017 4: 1–12.
- [27] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季 pCO<sub>2</sub> 与浮游植物生物量的关系 [J]. *环境科学*, 2013, 34(5): 1754–1760. [YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, *et al.* Relationship Between pCO<sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring [J]. *Environmental Science* 2013 34(5): 1754–1760.]
- [28] HELIE J F, HILLAIRE M C, RONDEAU B. Seasonal Changes in the Sources and Fluxes of Dissolved Inorganic Carbon Through the St. Lawrence River-Isotopic and Chemical Constraint [J]. *Chemical Geology* 2002, 186(1/2): 117–138.
- [29] HUANG Y, YASARER M W L, LI Z, *et al.* Air-Water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Fluxes Along a River-Reservoir Continuum: Case Study in the Pengxi River a Tributary of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189: 223.
- [30] JOSE R, NATHAN B, RAQUEL M *et al.* Spatially Resolved Measurements of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Concentration and Gas Exchange Velocity Highly Influence Carbon Emission Estimates of Reservoirs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(2): 607–615.
- [31] SOUMIS N, DUCHEMIN E, CANUEL R *et al.* Greenhouse Gas Emissions From Reservoirs of the Western United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles* 2004, 18(3): 3022–3032.

作者简介: 曹玉平(1993—), 男, 湖南怀化人, 硕士生, 研究方向为水文水资源与地理信息系统。E-mail: 1329991949@qq.com

(责任编辑: 陈 昕)