

## 广东新丰江水库表层水体 CO<sub>2</sub> 分压及其影响因素\*

周梅<sup>1</sup>, 叶丽菲<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 李元<sup>1</sup>, 唐文魁<sup>1</sup>, 高全洲<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275)

(2: 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 于2012年7月和2013年1月定点采集新丰江水库表层水样, 测定水样的理化及生物学参数, 计算水体中二氧化碳分压( $p(\text{CO}_2)$ )大小并分析其时空变化, 探讨新丰江水库  $p(\text{CO}_2)$  的影响因素及其 CO<sub>2</sub> 源/汇机制. 结果表明: 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  变化范围为 16~3545  $\mu\text{atm}$ , 均值为 999  $\mu\text{atm}$ , 从水库上游到坝前  $p(\text{CO}_2)$  逐渐升高; 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  变化范围为 399~1355  $\mu\text{atm}$ , 均值为 756  $\mu\text{atm}$ , 从水库上游到坝前  $p(\text{CO}_2)$  呈下降趋势. 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  受温度影响较小, 与营养盐 ( $\text{NO}_3^-$ 、DSi) 浓度呈正相关, 与叶绿素 a (Chl.a)、溶解有机碳 (DOC) 浓度呈负相关, 与溶解无机碳 (DIC) 浓度没有明显相关性; 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  受温度影响也较小, 受碳酸盐体系的影响, 与  $\text{NO}_3^-$ 、DSi、Chl.a、DIC 浓度呈正相关, 与 DOC 浓度没有明显相关性. 新丰江水库相对于大气来说是一个通量值偏低的 CO<sub>2</sub> 源.

**关键词:** 新丰江水库; 二氧化碳分压; 水质参数; CO<sub>2</sub> 扩散通量; 影响因素

## Partial pressure of carbon dioxide in the Xinfengjiang Reservoir of Guangdong Province and its influencing factors

ZHOU Mei<sup>1</sup>, YE Lifei<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, TANG Wenkui<sup>1</sup> & GAO Quanzhou<sup>1,2\*\*</sup>

(1: Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P.R.China)

(2: Guangdong Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, P.R.China)

**Abstract:** In order to understand the influencing factors and the diffusion characteristics of CO<sub>2</sub> partial pressure ( $p(\text{CO}_2)$ ) and CO<sub>2</sub> source/sink mechanism in the Xinfengjiang Reservoir, the physicochemical and biological quality parameters of surface water samples collected in July 2012 and January 2013 were measured, and the value of  $p(\text{CO}_2)$  in water was calculated as well. The results showed that: In wet season, the  $p(\text{CO}_2)$  ranged from 16 to 3545  $\mu\text{atm}$  with an average of 999  $\mu\text{atm}$ , which increased from the reservoir head region to the dam; During dry season,  $p(\text{CO}_2)$  ranged from 399 to 1355  $\mu\text{atm}$  with an average of 756  $\mu\text{atm}$ , which decreased from the reservoir head region to the dam.  $p(\text{CO}_2)$  was less likely affected by the temperature in both wet and dry season. In wet season, there was no obvious relationship between  $p(\text{CO}_2)$  and dissolved inorganic carbon (DIC).  $p(\text{CO}_2)$  was positively correlated with nutrient salts ( $\text{NO}_3^-$ , DSi) concentrations, but negatively correlated with chlorophyll-a (Chl.a) and dissolved organic carbon (DOC) concentrations; In dry season, owing to the carbonate systems, there was no significant correlation between  $p(\text{CO}_2)$  and DOC concentration, whereas it was positively associated with  $\text{NO}_3^-$ , DSi, Chl.a and DIC concentrations. The Xinfengjiang Reservoir was the CO<sub>2</sub> source to the atmosphere with a low flux value.

**Keywords:** Xinfengjiang Reservoir; partial pressure of carbon dioxide; water quality parameters; CO<sub>2</sub> degassing fluxes; influencing factor

近年来, 温室气体引起的全球变暖问题日益受到关注. 尽管二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 是大气中的微量气体, 但却是引起全球升温的最重要温室气体<sup>[1]</sup>. IPCC 第五次报告指出, 自工业革命以来 CO<sub>2</sub> 浓度已增加 40%<sup>[2]</sup>, 大

\* 广东省自然科学基金重点项目 (2014A030311003) 和国家自然科学基金项目 (41071054) 联合资助. 2017-04-18 收稿; 2017-09-19 收修改稿. 周梅 (1992 ~), 女, 硕士研究生; E-mail: meidaidai@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: eesgqz@mail.sysu.edu.cn.

气中 CO<sub>2</sub> 浓度急剧上升主要是由化石燃料的燃烧和水泥生产所导致的<sup>[3]</sup>. 修建开发可再生能源的基础设施为减少大气中 CO<sub>2</sub> 浓度进而缓解温室效应提供了可能, 其中水库因具有灌溉、发电、防洪和养鱼等多种经济效益而被广泛重视. 我国是世界上建立水库数量最多的国家, 截止到 2011 年底, 我国共有 98002 座水库, 总库容约为  $9.323 \times 10^{11} \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>.

水库修建给当地带来巨大经济和社会效益的同时, 也附带产生一系列生态环境问题. 人工水库的建立可能会增加温室气体排放、影响库区周围的碳循环机制以及流域内生态系统的平衡. 近来的一些研究表明人工水库可能是大气 CO<sub>2</sub> 的源<sup>[5-8]</sup>. 水库向大气排放温室气体的过程较为复杂, 受流域地表理化和生物学性质、人类活动以及水体碳酸盐体系等因素的影响, 水库温室气体的源/汇变化表现出一定的地域差异性. 已有研究发现, 热带和寒温带的水库向大气中排放大量 CO<sub>2</sub><sup>[6,9-11]</sup>, 其中热带水力发电站向大气排放量更大, 如巴西 Curuá-Una 水库温室气体排放量比利用石油发电所释放出的温室气体还要多 3.6 倍<sup>[11]</sup>. 地处寒温带的加拿大境内水库的温室气体通量要低得多<sup>[10, 12]</sup>, 但瑞士温带水库 Wohlen 湖的 CH<sub>4</sub> 排放通量却高于热带水库<sup>[13]</sup>, 这说明水库温室气体的排放具有地域性和类型差别性. 我国水库数量众多、分布较广且呈逐年增多的趋势. 已有研究表明它们多为大气 CO<sub>2</sub> 的源, 但存在明显的通量差别<sup>[14-16]</sup>. 因此, 正确衡量我国各类具有代表性的水库水-气界面 CO<sub>2</sub> 交换通量对于系统地了解水库在全球或区域碳循环中的角色具有重要意义.

新丰江水库又名万绿湖, 是具有发电、防洪、灌溉和航运等综合效益的大型水利工程. 该水库位于南亚热带, 水温较高, 水力滞留时间长; 水库流域的降水丰富, 年际和年内的降水不均匀<sup>[17]</sup>, 其水文及气候条件都对水库的碳源/汇估算有一定影响. 基于此本文对新丰江水库丰水期和枯水期的表层水体进行定点采样, 分析  $p(\text{CO}_2)$  的时空变化及其影响因素, 并计算 CO<sub>2</sub> 的扩散通量, 探讨南亚热带大型深水贫营养水库——新丰江水库 CO<sub>2</sub> 的源/汇问题.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

新丰江水库 (23°43'~24°10'N, 114°15'~114°45'E) 位于亚热带季风区的新丰江下游, 由距广东省河源市区 6 km 的亚婆山峡谷修筑拦河大坝蓄水形成, 多年平均水深为 28.7 m, 最大水深为 93 m, 水库水质为地表水 I 类标准<sup>[18-19]</sup>. 水库正常蓄水位水域面积为 364 km<sup>2</sup>, 年平均气温为 20.8℃, 年均降水量为 1974.7 mm (最大为 2857.5 mm, 最小为 1261.2 mm)<sup>[17]</sup>. 库区周围为低山丘陵, 土壤为赤红壤, 地带性植被为亚热带常绿阔叶林.

### 1.2 样品采集与分析

2012 年 7 月 23—24 日 (丰水期) 和 2013 年 1 月 5—6 日 (枯水期) 乘船以 5 km/h 的速度航行, 每隔 15 min 用抽水泵 (广州钜豪 OHZ-128A) 采集水库表层 0.5 m 深水样并用 GPS 记录采样点位置 (图 1).

水温 (T)、pH 值、叶绿素 a (Chl.a) 浓度和溶解氧 (DO) 浓度使用 Ultrameter™ Model 6P 型便携式电导率仪 (美国 Myron L 公司) 和 Hydrolab DS5 (美国 Hach 公司) 现场测量, 测试精度分别为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.01$ 、 $\pm 0.01 \mu\text{g/L}$  和  $\pm 0.01 \text{ mg/L}$ . 阴离子 ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ )、阳离子 ( $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$ )、溶解硅 (DSi)、溶解无机碳 (DIC)、溶解有机碳 (DOC) 以及碱度 (Alkalinity, Alk) 等指标需将水样装入聚乙烯瓶中带回实验室测定, 其中阴离子采用 ICS-900 型离子色谱仪 (美国戴安) 测定, 阳离子和 DSi 浓度采用 IRIS (HR) 型全谱直读等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES, 美国 TJA) 测定, DIC 和 DOC 浓度采用 TOC-V 型总有机碳分析仪 (日本岛津) 测定, Alk 采用 TIM856 型自动滴定仪 (Radiometer) 测定. 在盛装水样前抽取现场水体清洗采样瓶 3 次以上, 盛装过程中尽量避免出现空隙, 将水样密封后装入黑色塑料袋中储存在阴暗处, 为避免微生物活动影响, 在测 DOC 的滤液中加入一滴过饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液. 将采集的样品带回实验室后 4℃ 左右冷藏并在一周内完成测定. 采集的样品用孔径为 0.7 μm 的滤膜 (Whatman GF/F) 过滤, 滤膜使用前用锡纸包装放入马弗炉 (上海康路 5-12 型号) 在 450℃ 温度下灼烧 24 h. 样品过滤后将滤液装入用去离子水充分清洗的聚乙烯瓶.

### 1.3 基于水化学平衡的 $p(\text{CO}_2)$ 计算

理论上, 水体中溶解无机碳 (DIC) 由重碳酸盐 ( $\text{HCO}_3^-$ )、碳酸根离子 ( $\text{CO}_3^{2-}$ )、碳酸 ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) 和溶解态 CO<sub>2</sub> (aq) 组成, 水溶液平衡时各个组分的浓度与 pH 值、温度和离子强度有关<sup>[20]</sup>. 根据 pH、 $\text{HCO}_3^-$ 、亨利常数 ( $K_h$ )

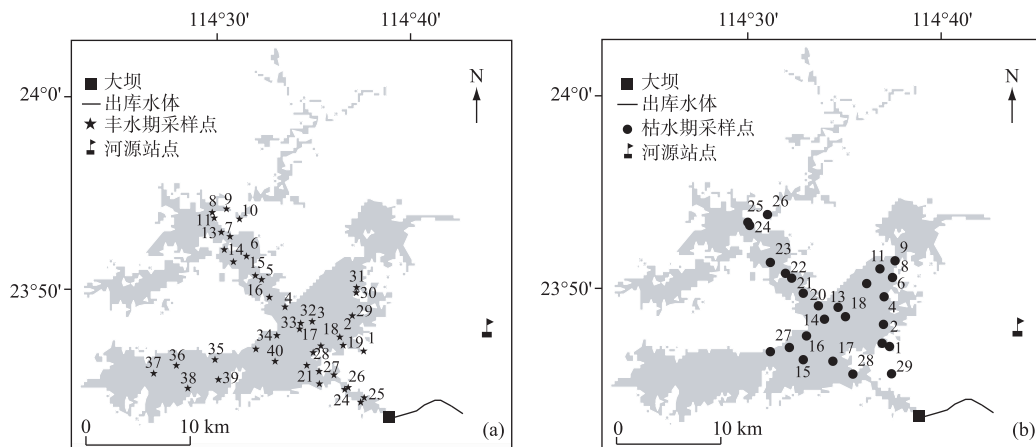
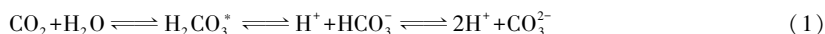


图1 新丰江水库丰水期(a)和枯水期(b)采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

以及水中主要离子含量可计算碳酸盐体系中的  $p(\text{CO}_2)$ , 其反应可用下列各式表达<sup>[21]</sup>:



$$K_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / [p(\text{CO}_2)] \quad (2)$$

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad (3)$$

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] \quad (4)$$

式中,  $K_i$  为平衡常数, 通过下式计算<sup>[21-22]</sup>:

$$pK_{\text{CO}_2} = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.016 T + 1.11 \quad (5)$$

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

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

式中,  $pK_{\text{CO}_2}$ ,  $pK_1$  和  $pK_2$  分别表示  $K_{\text{CO}_2}$ ,  $K_1$  和  $K_2$  的负对数, 其中  $T$  表示水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

根据亨利定律,  $p(\text{CO}_2)$  可由下式计算:

$$p(\text{CO}_2) = [\text{H}_2\text{CO}_3^*] / K_{\text{CO}_2} = \alpha(\text{H}^+) \cdot \alpha(\text{HCO}_3^-) / (K_{\text{CO}_2} \cdot K_1) \quad (8)$$

式中,  $\alpha(\text{H}^+)$  和  $\alpha(\text{HCO}_3^-)$  分别表示  $\text{H}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  的离子活度, 可由下式计算:

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

$$\alpha(\text{HCO}_3^-) = [\text{HCO}_3^-] \times 10^{-0.5\sqrt{I}} \quad (10)$$

$$I = 0.5([\text{K}^+] + 4[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Na}^+] + 4[\text{Mg}^{2+}] + [\text{Cl}^-] + 4[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-]) / 1000000 \quad (11)$$

式中,  $I$  表示离子强度.

#### 1.4 水—气界面 $\text{CO}_2$ 扩散通量的计算

水—气界面  $\text{CO}_2$  扩散受到大气和水体中  $p(\text{CO}_2)$  之差、温度、盐度、风速等因素影响. 水—气二氧化碳扩散通量计算公式为:

$$F_{\text{CO}_2} = k_0 \cdot k_{\text{CO}_2} \cdot \Delta p(\text{CO}_2) \quad (12)$$

式中,  $F_{\text{CO}_2}$  为水—气  $\text{CO}_2$  扩散通量 ( $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ),  $k_0$  为某气温条件下  $\text{CO}_2$  溶解度 ( $\text{mol}/\text{L} \cdot \text{atm}$ ),  $k_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  交换系数 ( $\text{cm}/\text{h}$ ),  $\Delta p(\text{CO}_2) = p(\text{CO}_2)_{(\text{water})} - p(\text{CO}_2)_{(\text{air})}$ , 表示水体  $p(\text{CO}_2)$  与大气  $p(\text{CO}_2)$  的差值,  $p(\text{CO}_2)_{(\text{air})}$  由 Vaisala CARBOCAP 手持式二氧化碳测量仪 GM70 (Vaisala 公司生产) 测定. 若水体  $p(\text{CO}_2)$  高于大气  $p(\text{CO}_2)$ ,  $F_{\text{CO}_2}$  为正, 表示水体是大气的源, 向大气释放  $\text{CO}_2$ ; 若水体  $p(\text{CO}_2)$  低于大气  $p(\text{CO}_2)$ ,  $F_{\text{CO}_2}$  为负, 表示水体是大气的汇, 从大气吸收  $\text{CO}_2$ .

$k_0$  大小受到水体中温度、盐度、压强等因素的影响, 其计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\ln k_0 = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (13)$$

式中,常数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  分别为 -58.0931、90.5069、22.2940、0.027766、-0.025888 和 0.0050578。 $S$  为盐度(‰), $T$  为开尔文温度(K)。

$k_{CO_2}$  是水—气 CO<sub>2</sub> 扩散通量计算的关键,但由于  $k_{CO_2}$  的计算方式较多,其选取与估算仍存在很大争议,其中比较常用的有以下 3 种计算模式。

在海洋研究中应用较为广泛的为 Wanninkhof<sup>[24]</sup> 模式:

$$k_{CO_{2max}} = 0.39U^2(Sc/600)^{-0.5} \quad (14)$$

在湖泊、水库研究中应用较多的是 Cole<sup>[20]</sup> 和 Upstill<sup>[25]</sup> 模式:

$$k_{CO_{2max}} = k_{600}(600^{0.67})/Sc^{0.67} \quad (15)$$

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U^{1.7} \quad (16)$$

$$k_{CO_{2max}} = 1.11U + 0.35 \quad (17)$$

式中, $U$  为采样时间点的平均风速(m/s),数据来自气象数据共享网站(<http://data.cma.cn/>)中国地面国际交换站日值数据集河源站点。 $Sc$  是在  $t^\circ\text{C}$  下 CO<sub>2</sub> 的 Schmidt 常数,其计算公式为:  $Sc = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3$ 。

### 1.5 数据处理

运用 Excel 2013 软件对数据进行统计计算,运用 ArcGIS 10.0 和 Origin 9.0 软件制作图表,运用 SPSS 19.0 软件对数据进行相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 新丰江水库水质参数变化

水质参数反映水体的理化及生物学性质。温度主要影响水体的物理性质,表层水温高低间接反映了太阳辐射的强弱,是水体对外界气候变化的综合性响应。水库水温季节性变化较为明显,丰水期的水温高出枯水期近 15℃(表 1),这会导致丰水期水体出现温度分层现象<sup>[14]</sup>,进而阻碍表层水体与下层水体之间物质、能量交换,影响 CO<sub>2</sub> 扩散通量的大小和方向。pH 值受到水生生物光合作用和呼吸作用以及水中碳酸盐平衡体系的共同影响,在一定程度上影响着物质的转化和迁移。新丰江水库水体的 pH 值季节差别不大,均为弱碱性,这是因为浮游植物光合作用吸收大量 CO<sub>2</sub>,释放大量的 O<sub>2</sub>,使 pH 升高,此外水中还含有大量 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 等离子,因此水库水体 pH 值整体呈现弱碱性。丰水期和枯水期 Chl.a 浓度的变异系数分别为 56.74%

表 1 新丰江水库表层水体水质参数

Tab.1 Quality parameters of surface water in the Xinfengjiang Reservoir

季节	特征值	T/°C	pH	DO/ (mg/L)	Chl.a/ (μg/L)	DSi/ (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg/L)	Alk/ (μmol/L)	DOC/ (mg/L)	DIC/ (mg/L)
丰水期	最大值	30.9	9.27	9.35	7.75	2.90	1.76	479.41	1.41	5.33
	最小值	28.0	6.29	7.11	1.18	0.79	0.27	424.38	0.97	4.38
	中值	29.5	7.50	7.86	1.79	2.63	1.46	441.97	1.04	4.89
	平均值	29.7	7.79	7.86	2.15	2.42	1.26	444.47	1.09	4.91
	标准差	0.74	0.69	0.55	1.22	0.51	0.45	11.34	0.11	0.17
	变异系数/%	2.50	8.85	6.94	56.74	21.26	35.42	2.55	10.06	3.50
枯水期	最大值	17.1	7.83	8.81	6.32	3.53	2.16	612.95	0.91	7.44
	最小值	16.1	7.37	7.37	1.2	2.74	1.68	468.31	0.73	5.46
	中值	16.9	7.60	8.53	3.73	2.88	1.83	480.40	0.81	5.71
	平均值	16.7	7.59	8.36	3.36	2.95	1.85	501.14	0.81	5.94
	标准差	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	变异系数/%	1.67	1.27	5.21	45.86	6.71	6.33	8.38	6.52	9.26

和 45.86%, 说明水体 Chl.a 的稳定性较弱, 并且丰水期水体 Chl.a 与枯水期相比较不稳定, 同时说明水库中 Chl.a 分布极不均衡. 丰水期的 DO 浓度较枯水期低, 因为丰水期水温较高, 微生物代谢耗氧量大<sup>[26]</sup>. 丰水期 DOC 浓度大于枯水期, 说明随着降雨的增加, 水库输入了一定的陆源 DOC. 此外, 丰水期水体中的 Chl.a、DSi、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Alk 和 DIC 浓度也均小于枯水期, 反映出丰水期水体对稀释效应的响应<sup>[27]</sup>.

## 2.2 新丰江水库 $p(\text{CO}_2)$ 的时空变异

新丰江水库  $p(\text{CO}_2)$  的分布存在较大的季节性差异. 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  从水库上游到坝前逐渐升高 (图 2a), 在坝前狭窄的水道前以及水库西南侧达到最高, 为 3545  $\mu\text{atm}$ ; 在丰水期 14<sup>#</sup> 采样点,  $p(\text{CO}_2)$  达到最小值, 为 16  $\mu\text{atm}$ . 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  值从水库上游到坝前呈下降趋势 (图 2b), 其变化趋势与丰水期相反. 在水库上段的枯水期 21<sup>#</sup> 采样点,  $p(\text{CO}_2)$  达到最大值, 为 1355  $\mu\text{atm}$ ; 在水库下段的枯水期 1<sup>#</sup> 采样点,  $p(\text{CO}_2)$  达到最小值 (399  $\mu\text{atm}$ ).  $p(\text{CO}_2)$  均值在丰水期 (999  $\mu\text{atm}$ ) 大于枯水期 (756  $\mu\text{atm}$ ), 这是因为丰水期水库上游带来大量有机物, 为生物呼吸作用和分解作用提供营养物质, 产生大量  $\text{CO}_2$ . 新丰江水库表层水体丰水期和枯水期  $p(\text{CO}_2)$  均值为 877  $\mu\text{atm}$ , 略小于全球湖泊平均值 1000  $\mu\text{atm}$ <sup>[28]</sup>, 但远大于现今全球大气  $\text{CO}_2$  平均浓度 (409  $\mu\text{atm}$ )<sup>[29]</sup>.

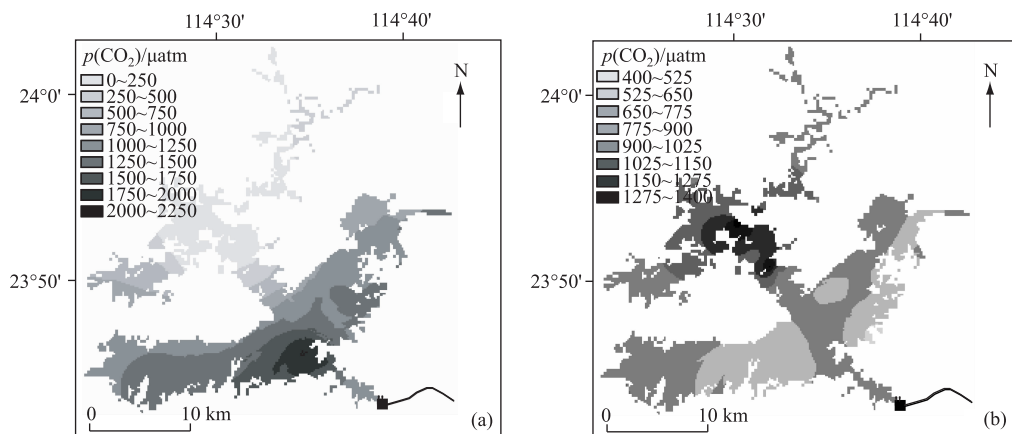


图 2 新丰江水库丰水期(a)和枯水期(b)  $p(\text{CO}_2)$  的时空变化

Fig.2 Temporal and spatial variation of  $p(\text{CO}_2)$  in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

## 3 讨论

### 3.1 水体 $p(\text{CO}_2)$ 的影响因素

3.1.1  $p(\text{CO}_2)$  与温度的关系 温度会影响碳酸盐的热力学平衡, 一般情况下,  $p(\text{CO}_2)$  随着温度的升高而增大<sup>[30]</sup>. 新丰江水库丰水期和枯水期表层水温分别为 28~30.9 $^{\circ}\text{C}$  和 16.13~17.13 $^{\circ}\text{C}$ , 其变化范围均小于 2 $^{\circ}\text{C}$ , 对水库  $p(\text{CO}_2)$  影响较小. 本文利用 Zhai 等<sup>[31]</sup> 的温度校正的经验公式将丰水期和枯水期  $p(\text{CO}_2)$  矫正到丰水期和枯水期的平均温度, 具体计算公式为:

$$Np(\text{CO}_2) = p(\text{CO}_2) \cdot \exp[(0.215S + 1.875)(T_{\text{mean}} - T_{\text{obs}})/100] \quad (18)$$

式中,  $T_{\text{obs}}$  和  $T_{\text{mean}}$  分别为原位实测水温和采样期间平均水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $S$  为盐度 (‰),  $p(\text{CO}_2)$  为实测  $p(\text{CO}_2)$ . 校正之后的  $p(\text{CO}_2)$  ( $Np(\text{CO}_2)$ ) 分布趋势与校正前一致. 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  校正后为 16.51~3626.41  $\mu\text{atm}$ , 平均值增加了 20.12  $\mu\text{atm}$ ; 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  校正后为 397.68~362.95  $\mu\text{atm}$ , 平均值增加了 0.57  $\mu\text{atm}$ . 温度的校正并没有显著改变新丰江水库  $p(\text{CO}_2)$  的源/汇角色, 说明温度对采样时水库丰水期和枯水期  $p(\text{CO}_2)$  分布的影响较小.

3.1.2  $p(\text{CO}_2)$  与营养盐 DSi、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度的关系 营养盐是浮游植物的生长的限制性因素<sup>[32]</sup>, 其浓度高低在一定程度上影响有机物的生产速率. 丰水期与枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、DSi 浓度均呈显著正相关 (图 3). 但丰水

期和枯水期影响  $p(\text{CO}_2)$  与  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 浓度相互关系的因素却不尽相同. 丰水期  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 浓度与  $p(\text{CO}_2)$  从水库上游到坝前逐渐升高, 而枯水期  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 浓度与  $p(\text{CO}_2)$  则呈下降趋势. 丰水期在 8<sup>#</sup>~11<sup>#</sup> 采样点(水库上游) Chl.a 浓度均较高(均在 3  $\mu\text{g}/\text{L}$  以上, 在 10<sup>#</sup> 采样点达到 7.75  $\mu\text{g}/\text{L}$ ),  $\text{NO}_3^-$  和 DSi 浓度在此处达到最小 ( $\text{NO}_3^-$  浓度低于 0.5 mg/L, DSi 浓度低于 1.5 mg/L), 这间接表明浮游植物由于吸收了大量  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 进行光合作用, 其生长较为茂盛, 进而影响  $p(\text{CO}_2)$  的大小. 而枯水期在 25<sup>#</sup>、26<sup>#</sup> 采样点处(丰水期 8<sup>#</sup>~11<sup>#</sup> 采样点附近)  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 浓度却达到最高, 这与枯水期水库中的微生物对有机质的降解有关<sup>[33]</sup>, 当枯水期 DO 浓度取最小值 7.37 mg/L 时, DSi 和  $\text{NO}_3^-$  浓度较大, 分别为 3.08 和 1.98 mg/L, 此时的  $p(\text{CO}_2)$  与枯水期  $p(\text{CO}_2)$  最大值相近, 高达 1310.16  $\mu\text{atm}$ . 这意味随着微生物分解作用增强, DO 浓度随之减少, 产生大量营养盐以及  $\text{CO}_2$ , 使  $p(\text{CO}_2)$  升高.

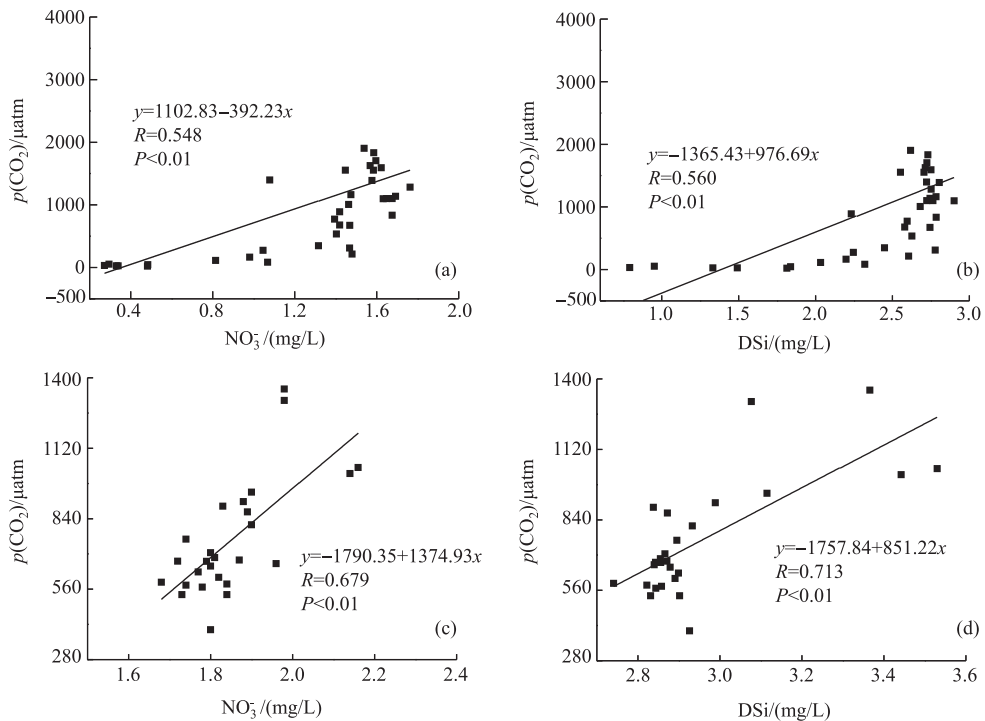
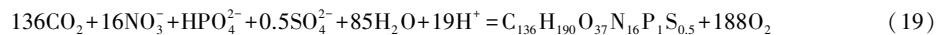


图3 新丰江水库丰水期(a,b)和枯水期(c,d)  $p(\text{CO}_2)$  与  $\text{NO}_3^-$  和 DSi 浓度的相互关系

Fig.3 Relationship among  $p(\text{CO}_2)$ ,  $\text{NO}_3^-$  and DSi concentrations in wet(a, b) and dry(c, d) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

3.1.3  $p(\text{CO}_2)$  与生物活动的关系 水中 Chl.a 浓度可以定量表征浮游植物的量<sup>[34]</sup>, 浮游植物则通过光合作用吸收水体中的  $\text{CO}_2$ , 使水中的  $p(\text{CO}_2)$  降低, 浮游植物的光合作用表达式为:



新丰江水库中的浮游植物种类繁多, 丰水期以蓝、绿藻为主, 枯水期以硅藻为优势种群<sup>[17,19]</sup>. 水库位于华南地区, 丰水期降雨充沛, 水体中携带大量上游冲刷下来的陆源性营养物<sup>[35]</sup>. 水中浮游植物吸收水体中的  $\text{NO}_3^-$ 、DSi 以及  $\text{CO}_2$  进行光合作用, 使水中 pH 升高, 从而使  $p(\text{CO}_2)$  降低, 因此丰水期 Chl.a 浓度与  $p(\text{CO}_2)$  呈负相关(图 4a)<sup>[36]</sup>. 此外丰沛的降雨还带来了上游水体中的泥沙和悬浮物, 水库的透光度降低, 这影响了浮游植物的光合作用强度, 因此水体 Chl.a 浓度达到最大值 7.75  $\mu\text{g}/\text{L}$  时, 水体中的  $p(\text{CO}_2)$  (30.77  $\mu\text{atm}$ ) 仍然大于丰水期  $p(\text{CO}_2)$  的最小值. 这说明丰水期浮游植物的光合作用是受到限制的, 光合作用并不是影响水中  $p(\text{CO}_2)$  大小的唯一因素. 此外, 悬浮物能在一定程度上影响浮游动物对浮游植物的捕食<sup>[37]</sup>, 降低 Chl.a

浓度进而影响水中  $p(\text{CO}_2)$  大小. 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与 Chl.a 浓度呈正相关(图 4b), Zhang 等<sup>[38]</sup> 发现由于浮游动物的摄食作用南黄海春末  $p(\text{CO}_2)$  与 Chl.a 呈正相关关系. 新丰江水库的浮游动物有 22 种, 丰水期以轮虫为主, 枯水期以挠足类浮游动物为主, 枯水期生物量大于丰水期<sup>[18,39]</sup>. 因此枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与 Chl.a 浓度呈正相关, 这可能与浮游动物的摄食有关.

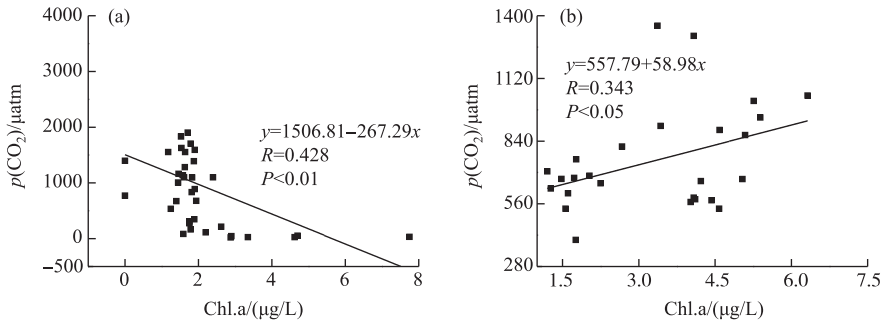


图 4 新丰江水库丰水期(a)和枯水期(b) $p(\text{CO}_2)$ 与 Chl.a 浓度的相互关系

Fig.4 Relationship between  $p(\text{CO}_2)$  and Chl.a concentration in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

3.1.4  $p(\text{CO}_2)$  与 DIC、DOC 浓度的关系 枯水期 DIC 浓度大于丰水期, 这是因为丰水期径流量较大, 水体发生稀释效应<sup>[27]</sup>. 在枯水期 23<sup>#</sup> 采样点, DIC 浓度出现最大值(7.44 mg/L), 同时  $\text{NO}_3^-$ 、ALK、Chl.a 和 DSi 浓度均达到最大,  $p(\text{CO}_2)$  高达 1043.04  $\mu\text{atm}$ . 新丰江水库的 DIC 浓度与亚马逊河的 DIC 浓度<sup>[40]</sup> 相近, 但远远低于黄河河流水体<sup>[41]</sup> 和密西西北河<sup>[42]</sup> 水体的 DIC 浓度. 珠江口水体  $p(\text{CO}_2)$  主要受到呼吸作用的影响, 其  $p(\text{CO}_2)$  与 DIC 浓度呈负相关<sup>[31]</sup>. 而黄河的水体  $p(\text{CO}_2)$  主要受到碳酸盐平衡体系控制,  $p(\text{CO}_2)$  与 DIC 浓度呈正相关<sup>[41]</sup>. 泰晤士河的  $p(\text{CO}_2)$  由于受到光合作用和呼吸作用双重影响, 与 DIC 浓度无明显相关性<sup>[43]</sup>, 新丰江水库研究结果与之一致(图 5a), 说明新丰江水库丰水期的  $p(\text{CO}_2)$  受到浮游植物的光合作用和微生物、藻类的呼吸作用影响. 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与 DIC 浓度呈正相关(图 5b), 表明枯水期水库中水体通过碳酸盐系统水化学平衡原理<sup>[41]</sup>, 调整  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{CO}_3$  等 DIC 浓度的各分量, 而在一定程度上控制水中的  $p(\text{CO}_2)$  大小.

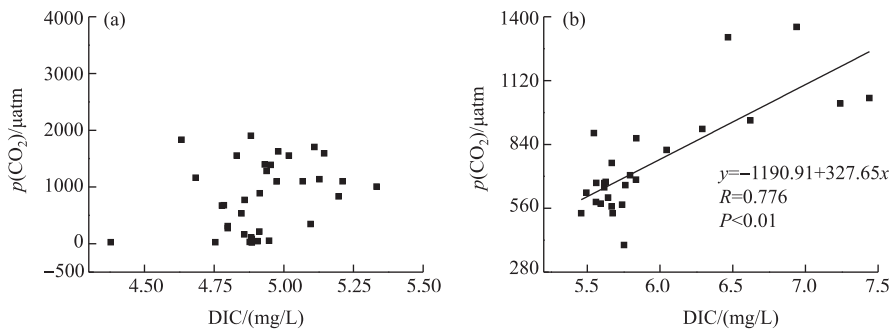


图 5 新丰江水库丰水期(a)和枯水期(b) $p(\text{CO}_2)$ 与 DIC 浓度的相互关系

Fig.5 Relationship between  $p(\text{CO}_2)$  and DIC concentration in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

水库中的 DOC 来源分为内源 DOC 和外源 DOC. 内源 DOC 指的是水库浮游植物光合作用、细菌分解作用等产生的有机物; 外源 DOC 指来自土壤有机物降解和人类生产、生活的排废物<sup>[21,26-27]</sup>. 在富含有机碳的湖泊或者水库中, 微生物对外源 DOC 进行降解,  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度呈现良好的正相关性; 而土壤层薄弱, 外

源 DOC 输入较低的水库或湖泊,  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度呈负相关; 水库中浮游植物吸收 CO<sub>2</sub> 进行光合作用产生有机物,  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度也呈负相关<sup>[44]</sup>. 新丰江水库丰水期  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度呈负相关(图 6a), 这是因为新丰江水库水力滞留时间长达 2 a<sup>[18]</sup>, 其 DOC 可能以内源 DOC 为主. 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度没有明显相关性(图 6b), 是因为枯水期浮游植物光进行合作用产生 CO<sub>2</sub> 但是其作用弱于丰水期, 同时细菌利用内源 DOC 进行呼吸作用释放 CO<sub>2</sub>, 枯水期水库 CO<sub>2</sub> 吸收与释放受到两个相反过程的限制.

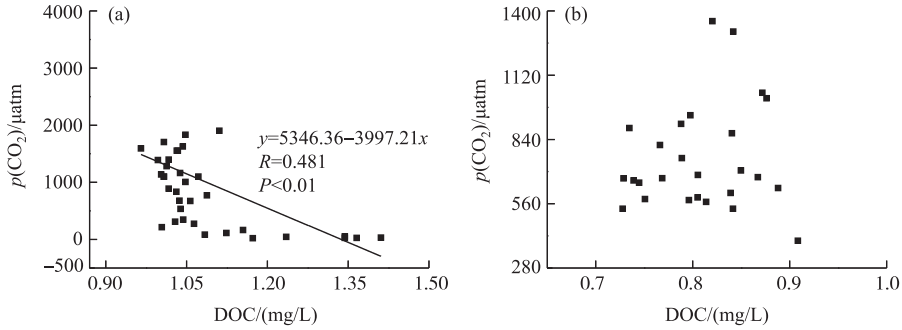


图 6 新丰江水库丰水期(a)和枯水期(b)  $p(\text{CO}_2)$  与 DOC 浓度的相互关系

Fig.6 Relationship between  $p(\text{CO}_2)$  and DOC concentration in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir

### 3.2 新丰江水库水—气界面的 CO<sub>2</sub> 交换通量

气体交换系数  $k_{\text{CO}_2}$  的选取对水—气界面的 CO<sub>2</sub> 交换通量 ( $F_{\text{CO}_2}$ ) 的计算至关重要, 其大小受到水电导率、流速、风速等众多因素的影响<sup>[45]</sup>. 水库与海洋在水流模式及底部地貌形态方面相差甚远<sup>[46-47]</sup>. 水库水域面积远小于海洋且地处内陆, 与陆地生态系统的物质、能量、信息交换强烈, 因此 Wanninkhof 模式计算出来的  $k_{\text{CO}_2}$  与基于水库、湖泊计算出来的  $k_{\text{CO}_2}$  略有不同(表 2), 故不选取 Wanninkhof 模式计算新丰江水库  $F_{\text{CO}_2}$ , 而选取基于水库、湖泊的  $k_{\text{CO}_2}$  计算模式计算新丰江水库  $F_{\text{CO}_2}$ .

表 2 不同模式计算的  $F_{\text{CO}_2}$

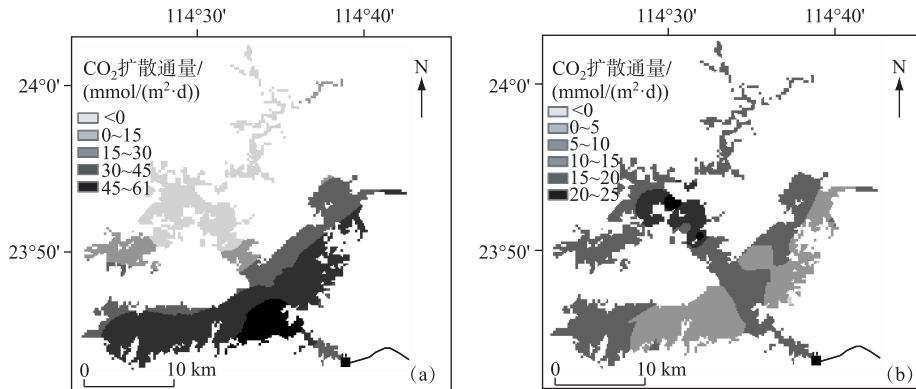
Tab.2 Values of  $F_{\text{CO}_2}$  calculated by different patterns

模式	时间	$k_{\text{CO}_2}/$ (cm/h)	$F_{\text{CO}_2}/(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$			
			平均值	最大值	最小值	标准差
Wanninkhof	丰水期	7.41	36.18	172.39	-16.30	46.54
	枯水期	1.82	21.67	68.55	-6.32	18.16
Cole	丰水期	5.86	24.77	132.04	-16.75	36.71
	枯水期	2.62	7.50	23.76	-2.18	6.30
Upstill	丰水期	4.62	20.04	105.79	-12.87	29.22
	枯水期	2.85	8.11	25.53	-2.38	6.76

将基于 Cole 和 Upstill 模式计算的  $F_{\text{CO}_2}$  求平均值后, 在 ArcGIS 中运用 Kriging 插值方法得出新丰江水库丰水期和枯水期的  $F_{\text{CO}_2}$  (图 7). 丰水期  $F_{\text{CO}_2}$  从水库上游到坝前逐渐增大, 在水库上段  $F_{\text{CO}_2}$  为负值, 是大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 在水库下段  $F_{\text{CO}_2}$  均为正值, 是大气 CO<sub>2</sub> 的源; 枯水期  $F_{\text{CO}_2}$  从水库上游到坝前逐渐减小, 总的来说是大气 CO<sub>2</sub> 的源, 只有在 1<sup>#</sup> 采样点  $F_{\text{CO}_2}$  为负值, 其余均为正值. 总而言之, 枯水期和丰水期  $F_{\text{CO}_2}$  均值为正值且丰水期  $F_{\text{CO}_2}$  较枯水期大, 因此新丰江水库是一个大气 CO<sub>2</sub> 源. 在 ArcGIS 中运用区域统计分析求得新丰江水库丰水期和枯水期  $F_{\text{CO}_2}$  的均值分别为 20.78 和 8.09 mmol/(m<sup>2</sup>·d).

由表 3 可知亚热带水库  $F_{\text{CO}_2}$  值略大于部分温带水库, 但远远小于热带水库. 新丰江水库  $F_{\text{CO}_2}$  不仅小于世界上水力发电的水库, 而且与中国其他水库相比也较小. 这是因为新丰江水库属于贫营养水库, 水库中 CO<sub>2</sub>



图7 新丰江水库枯水期(a)和丰水期(b)表层CO<sub>2</sub>扩散通量Fig.7 Surface degassing flux of CO<sub>2</sub> in wet (a) and dry (b) seasons in the Xinfengjiang Reservoir表3 世界主要水库的  $F_{CO_2}$  比较Tab.3 Values of  $F_{CO_2}$  of main reservoirs in the world

位置	水库	国家	水面面积/ km <sup>2</sup>	营养水平	$F_{CO_2}$ / (mmol/(m <sup>2</sup> ·d))	库龄/a	参考文献
热带	Samuel	巴西	559	—	169.25	4	[7]
	Tucuru'	巴西	2430	—	192.61	8	[7]
	Balbina	巴西	1770	—	314.65	18	[48]
温带	Wallula	美国	157	—	-7.9	47	[49]
	Dworkshak	美国	37	—	-27.3	28	[49]
	Shasta	美国	77	—	28.3	57	[49]
亚热带	红枫湖水库	中国	57.3	富营养	15	50	[50]
	百花湖水库	中国	14.5	富营养	23	48	[50]
	洪岩水库	中国	—	富营养	24	37	[50]
	修文水库	中国	—	富营养	47	48	[50]
	万安水库	中国	107.5	中营养	12.74	19	[15]
	洪家渡水库	中国	80.5	中营养	6.14	6	[51]
	三峡水库	中国	—	中营养	89	7	[16]
	新丰江水库	中国	364	贫营养	丰水期 20.78 枯水期 8.09	55	本研究
全球	水力发电水库				32.2		[52]

“—”表示数据缺失。

的释放与水库沉积物中有机物的种类和数量等有关<sup>[33]</sup>。新丰江水库地处亚热带季风区,温度相对于巴西等热带地区较低,有机碳的降解率较低,其次新丰江水库为山谷型水库,水库淹没面积较小,并且库区内生态环境较好,有机质含量相对较小,因此生物代谢产生的CO<sub>2</sub>较少, $F_{CO_2}$ 值也较低。此外,从建库至2013年新丰江水库已有55 a历史,随着蓄水年限的延长,水库淹没区域的有机质降解强度逐渐下降,温室气体释放通量逐渐降低,这与Louis等<sup>[6]</sup>在美国Wisconsin州内对不同库龄水库的温室气体排放研究结果相似。

#### 4 结论

运用2012年7月和2013年1月新丰江水库的水质参数,计算新丰江水库 $p(CO_2)$ 并讨论其时空分布与影响因素,最后计算新丰江水库的CO<sub>2</sub>扩散通量,可得到以下结论:

1)新丰江水库  $p(\text{CO}_2)$  变化有明显季节性. 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  从水库上游到坝前逐渐升高, 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  从水库上游到坝前呈下降趋势.

2)新丰江水库丰水期和枯水期  $p(\text{CO}_2)$  受温度影响均较小, 丰水期  $p(\text{CO}_2)$  与  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{DSi}$  浓度呈正相关, 与  $\text{Chl.a}$  和  $\text{DOC}$  浓度呈显著负相关, 与  $\text{DIC}$  浓度没有明显相关性; 枯水期  $p(\text{CO}_2)$  与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{DSi}$ 、 $\text{Chl.a}$  和  $\text{DIC}$  浓度均呈显著正相关, 与  $\text{DOC}$  浓度没有明显相关性.

3)运用 Wanninkhof、Cole、Upstill 模式计算出来的新丰江水库全年 CO<sub>2</sub> 扩散通量均值均为正值, 且丰水期 CO<sub>2</sub> 扩散通量较枯水期大. 水库 CO<sub>2</sub> 扩散通量略大于部分温带地区, 但远远小于热带地区. 总的来说新丰江水库是一个通量值偏低的大气 CO<sub>2</sub> 源.

## 5 参考文献

- [ 1 ] Gao QZ, Shen CD. Riverine carbon flux and continental erosion. *Advance in Earth Sciences*, 1998, **13**(4): 369-375. [ 高全洲, 沈承德. 河流碳通量与陆地侵蚀研究. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 369-375.]
- [ 2 ] IPCC. Working group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report-climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013; chapter 6-10.
- [ 3 ] Sabine CL, Feely RA, Gruber N *et al.* The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science*, 2004, **305**(5682): 367-371. DOI: 10.1126/science.1097403.
- [ 4 ] Sun ZG, Zhang L, Duan ZD. The quantity and distribution of reservoir engineering in China. *China Water Resources*, 2013, **48**(7): 10-11. [ 孙振刚, 张岚, 段中德. 我国水库工程数量及分布. 中国水利, 2013, **48**(7): 10-11.]
- [ 5 ] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R *et al.* Production of the greenhouse gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 737-757. DOI: 10.1029/95GB02202.
- [ 6 ] Louis VLS, Kelly CA, Duchemin E *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience*, 2000, **50**(9): 766-775. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2.
- [ 7 ] Santos MAD, Rosa LP, Sikar B *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, 2006, **34**(4): 481-488. DOI: 10.1016/j.enpol.2004.06.015.
- [ 8 ] Raymond PA, Hartmann J, Lauerwald R *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355-359. DOI: 10.1038/nature12760.
- [ 9 ] Tremblay A, Lambert M, Gagnon L. Do hydroelectric reservoirs emit greenhouse gases? *Environmental Management*, 2004, **33**(1): S509-S517. DOI: 10.1007/s00267-003-9158-6.
- [ 10 ] Yang L, Lu F, Zhou X *et al.* Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 204-212. DOI: 10.1016/j.chnaes.2013.05.011.
- [ 11 ] Fearnside PM. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's CuruÁ-una Dam. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, **10**(4): 675-691. DOI: 10.1007/s11027-005-7303-7.
- [ 12 ] Demarty M, Bastien J, Tremblay A *et al.* Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Quebec, Canada, measured with automated systems. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(23): 8908-8915. DOI: 10.1021/es8035658.
- [ 13 ] Delsontro T, McGinnis DF, Sobek S *et al.* Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: contribution from bubbling sediments. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2419-2425. DOI: 10.1021/es9031369.
- [ 14 ] Li S, Wang YC, Cao M *et al.* Partial pressure and diffusion flux of mainstream and tributary of the central dissolved carbon dioxide in the Three Gorges Reservoir in summer. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 885-891. [ 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. 环境科学, 2014, **35**(3): 885-891.]
- [ 15 ] Mei HY, Wang FS, Yao CC *et al.* Diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Wan'an Reservoir in spring. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 58-63. [ 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. 环境科学, 2011, **32**(1): 58-63.]
- [ 16 ] Yang L, Lu F, Wang X *et al.* Spatial and seasonal variability of CO<sub>2</sub> flux at the air-water interface of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(11): 2229-2238. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60291-5.
- [ 17 ] Hu R, Lei LM, Han BP. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophy in Xinfengjiang reservoir in southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(10): 4652-4664. [ 胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫

- 营养水库浮游植物群落结构与季节变化——以新丰江水库为例. 生态学报, 2008, 28(10): 4652-4664.]
- [18] Zhao SY, Han BP. Structural analysis of zooplankton community in a large deep oligotrophic reservoir-Xinfengjiang Reservoir, South China. *J Lake Sci*, 2007, 19(3): 305-314. DOI: 10.18307/2007.0312. [赵帅营, 韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析. 湖泊科学, 2007, 19(3): 305-314.]
- [19] Chen LF, Lin QJ, Hu R *et al.* Plankton community in a subtropical large reservoir (Xinfengjiang reservoir). *Ecologic Science*, 2002, 21(2): 104-107. [陈丽芬, 林举贤, 胡韧等. 亚热带大型水库——新丰江水库的浮游生物群落特征. 生态科学, 2002, 21(2): 104-107.]
- [20] Cole JJ, Caraco NF. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>. *Limnology & Oceanography*, 1998, 43(4): 647-656. DOI: 10.4319/lo.1998.43.4.0647.
- [21] Yao G, Gao Q, Wang Z *et al.* Dynamics of CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China. *Science of the Total Environment*, 2007, 376(1/2/3): 255-266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.080.
- [22] Telmer K, Veizer J. Carbon fluxes, pCO<sub>2</sub>, and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/2/3/4): 61-86. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00034-0.
- [23] Weiss RF. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1970, 17(4): 721-735. DOI: 10.1016/0011-7471(70)90037-9.
- [24] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 12(6): 351-362. DOI: 10.1029/92JC00188.
- [25] Upstill-Goddard RC, Watson AJ, Liss PS *et al.* Gas transfer velocities in lakes measured with SF<sub>6</sub>. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 1990, 42(4): 364-377. DOI: 10.3402/tellusb.v42i4.15230.
- [26] Varola M, Siyue L. Biotic and abiotic controls on CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> emission in the Tigris River, Turkey. *Chemical Geology*, 2017, 449(1): 182-193. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.12.003.
- [27] Li S, Lu XX, He M *et al.* Daily CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> outgassing in the upper Yangtze River basin: A case study of the Longchuan River, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 466/467(5): 141-150. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.011.
- [28] Cole JJ, Caraco NF, Kling GW *et al.* Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science*, 1994, 265(5178): 1568-1570. DOI: 10.1126/science.265.5178.1568.
- [29] <https://www.co2.earth/2017.8.9>.
- [30] Takahashi T, Olafsson J, Goddard JG *et al.* Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 843-878. DOI: 10.1029/93GB02263.
- [31] Zhai WD, Dai MH, Cai WJ *et al.* High partial pressure of CO<sub>2</sub> and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: The Pearl River estuary, China. *Marine Chemistry*, 2005, 93(1): 21-32. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.07.003.
- [32] Zhang W, Sun J, Nie HT *et al.* Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4034-4044. [张伟, 孙健, 聂红涛等. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4034-4044.]
- [33] Lv YC, Liu CQ, Wang SL *et al.* Distribution of p(CO<sub>2</sub>) in Hongfeng lake in summer stratification. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 106-110. [吕迎春, 刘丛强, 王仕禄等. 红枫湖夏季分层期间 p(CO<sub>2</sub>) 分布规律的研究. 水科学进展, 2008, 19(1): 106-110.]
- [34] Krasakopoulou E, Rapsomanikis S, Papadopoulos A *et al.* Partial pressure and air-sea CO<sub>2</sub> flux in the Aegean Sea during February 2006. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(11/12): 1477-1488. DOI: 10.1016/j.csr.2009.03.015.
- [35] Yin K. Monsoonal influence on seasonal variations in nutrients and phytoplankton biomass in coastal waters of Hong Kong in the vicinity of the Pearl River estuary. *Marine Ecology*, 2002, 245(4): 111-122. DOI: 10.3354/meps245111.
- [36] Tan Y, Zhang LJ, Wang F *et al.* Summer surface water pCO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> flux at air-sea interface western part of the East China Sea. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 239-245. [谭燕, 张龙军, 王凡等. 夏季东海西部表层海水中的 pCO<sub>2</sub> 及海-气界面通量. 海洋与湖沼, 2004, 35(3): 239-245.]
- [37] Zhou LB, Chen FZ. Effect of sediment resuspension on predation of planktivorous fish on zooplankton. *J Lake Sci*, 2015, 27(5): 911-916. DOI: 10.18307/2015.0518. [周礼斌, 陈非洲. 沉积物再悬浮对食浮游动物鱼类捕食浮游动物的影响. 湖泊科学, 2015, 27(5): 911-916.]

- [38] Zhang L, Xue L, Song M *et al.* Distribution of the surface partial pressure of CO<sub>2</sub> in the southern Yellow Sea and its controls. *Continental Shelf Research*, 2010, **30**(3/4): 293-304. DOI: 10.1016/j.csr.2009.11.009.
- [39] Li Y, Lin QQ, Han BP. Comparative analysis of community structures of planktonic copepods in three large reservoirs, south China. *Ecologic Science*, 2010, **29**(1): 22-29. [李莹, 林秋奇, 韩博平. 三座南亚热带大型水库敞水区桡足类群落结构比较. 生态科学, 2010, **29**(1): 22-29.]
- [40] Temon JF, Oudot C, Dessier A *et al.* A seasonal tropical sink for atmospheric CO<sub>2</sub> in the Atlantic Ocean; the role of the Amazon River discharge. *Marine Chemistry*, 2000, **68**(3): 183-201. DOI: 10.1016/S0304-4203(99)00077-8.
- [41] Su Z, Zhang LJ, Wang XL. Influencing factors of partial pressure of CO<sub>2</sub> in Huanghe (Yellow) River. *Marine Sciences*, 2005, **29**(4): 41-44. [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. 海洋科学, 2005, **29**(4): 41-44.]
- [42] Cai WJ. Riverine inorganic carbon flux and rate of biological uptake in the Mississippi River plume. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(2): 61-79. DOI: 10.1029/2002GL016312.
- [43] Neal C, Harrow M, Williams RJ. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames; Spring-summer 1997. *Science of the Total Environment*, 1998, **210/211**(6): 205-217. DOI: 10.1016/S0048-9697(98)00013-8.
- [44] Lv YC, Liu CQ, Wang SL *et al.* Seasonal variability of  $p(\text{CO}_2)$  in the two Karst reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou Province, China. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2674-2681. [吕迎春, 刘丛强, 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. 环境科学, 2007, **28**(12): 2674-2681.]
- [45] Abril G, Etcheber H, Borges AV *et al.* Excess atmospheric carbon dioxide transported by rivers into the Scheldt estuary. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science*, 2000, **330**(11): 761-768. DOI: 10.1016/S1251-8050(00)00231-7.
- [46] Broecker WS, Peng TH. Gas exchange rates between air and sea. *Tellus*, 1974, **26**(1/2): 21-35. DOI:10.1111/j.2153-3490.1974.tb01640.x.
- [47] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnology & Oceanography*, 2003, **48**(3): 1010-1017. DOI: 10.4319/lo.2003.48.3.1010.
- [48] Kemenes A, Forsberg BR, Melack JM. CO<sub>2</sub> emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2011, **116**(G3): 1-11. DOI: 10.1029/2010JG001465.
- [49] Soumis N, Duchemin É, Canuel RE *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(3): 1-11. DOI: 10.1029/2003GB002197.
- [50] Wang F, Wang B, Liu CQ *et al.* Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(45): 3827-3834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.014.
- [51] Yu YX, Liu CQ, Wang FS *et al.* Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide ( $p\text{CO}_2$ ) in Hongjiadu Reservoir. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(7): 1193-1199. [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. 生态学杂志, 2008, **27**(7): 1193-1199.]
- [52] Barros N, Cole JJ, Tranvik LJ *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(9): 593-596. DOI: 10.1038/ngeo1211.