

# 隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素

赵登忠<sup>1</sup>, 谭德宝<sup>1</sup>, 李翀<sup>2</sup>, 申邵洪<sup>1</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

**摘要:** 随着气候变化研究的深入, 大型河流拦截工程对水域碳循环及温室气体交换的影响引起越来越多的关注. 为了评估河流拦截工程对水域生态系统碳循环和二氧化碳交换通量时空分布模式的影响, 选择清江隔河岩水库作为典型案例, 采用在线分析仪与浮箱相结合的方法, 在 2015 年 3 月至 2016 年 2 月期间开展了完整水文年连续观测实验, 获取了水库坝前、上游、支流、消落带与库湾等典型区域二氧化碳通量数据. 数据分析结果表明隔河岩水库水气界面二氧化碳平均通量为  $(55.6918 \pm 66.3329) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 呈现年内冬季高其他季节低的时间变化规律, 空间上则表现为水库消落带坝前较低、典型库湾区域较高的分布格局. 作为水库背景的库尾断面渔峡口区域二氧化碳通量季节变化非常稳定, 在大部分时间内反而高于坝前和消落带断面的二氧化碳通量. 数据分析表明二氧化碳通量时空分布格局受到水温、pH 值和水体碳浓度的显著影响, 但其相关程度受到季节和蓄水的双重影响.

**关键词:** 清江流域; 隔河岩水库; 水库碳循环; 二氧化碳通量; 时空变化规律

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0954-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201607086

## Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China

ZHAO Deng-zhong<sup>1</sup>, TAN De-bao<sup>1</sup>, LI Chong<sup>2</sup>, SHEN Shao-hong<sup>1</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute (CRSRI), Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Greenhouse gas emission from aquatic ecosystem will affect climate change on the regional and global scale. So large river interception project which affects the carbon cycle model and greenhouse gas emission from aquatic ecosystem has provoked more and more attentions in recent years. In order to understand and evaluate the effects of typical hydropower project construction on the aquatic ecosystem and carbon cycle, the Geheyan Reservoir, a typical river interception project, was selected as a typical case in this paper for measuring carbon dioxide fluxes from interface between water and atmosphere from March, 2015 to February, 2016. The integration of the online gas analyzer and floating box was used to obtain carbon dioxide fluxes from interface between water and atmosphere. Data was obtained over the before dam, upstream, tributary, drawdown area and bay area respectively for understanding the spatial Heterogeneity of carbon dioxide fluxes. Data analysis showed that yearly mean fluxes of carbon dioxide from the Geheyan Reservoir was  $(55.6918 \pm 66.3329) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  during measurement, which indicated that the temporal distribution was higher in winter and lower in other seasons and the spatial variation was higher in typical bay and lower before dam as well as drawdown zone over the reservoir. Moreover, the seasonal variation of carbon dioxide fluxes from the interface between water and atmosphere was very stable at Yuxiakou measurement points as a typical background area of the reservoir, which was unexpectedly higher than those before dam and drawdown zone in the most months during measurement. The results from data analysis also indicated that the spatial and temporal variation of carbon dioxide fluxes from the Geheyan Reservoir was affected by water quality parameters such as dissolved oxygen, chlorophyll, pH, water temperature and conductivity and carbon in water, but the relationship between carbon dioxide fluxes and other parameter was very different within each season and impound period. So the results above will provide more supports for understanding the import pathway and transfer of aquatic carbon cycle caused by large river interception project in China.

**Key words:** Qingjiang River Basin; Geheyan Reservoir; carbon cycle from reservoir; carbon dioxide fluxes; spatial and temporal distribution

为了充分利用水能资源获取水电清洁能源,我国在长江、黄河等大江大河干支流开发建设了大量的河流拦截工程,由此形成的梯级水库群在水资源利用与农业灌溉、防洪抗旱和水电清洁能源供给等方面做出了重要贡献<sup>[1~4]</sup>. 但大型梯级水库通过消落带陆源输入和自源生物活动等途径,改变了原有自然状态下河流生态系统碳循环模式,对水体重要营养盐生物地球化学过程产生扰动,对水域温室气

体源汇时空变化具有不可忽视的影响<sup>[5~8]</sup>. 国内外科学家已采取原位监测、模型构建与模拟、实验室

收稿日期: 2016-07-13; 修订日期: 2016-09-28

基金项目: 中国长江三峡集团公司环境保护科研项目(0799562); 科技部软科学研究计划项目(2012GX2B008); 水利部中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2015018/KJ, CKSF2016263/KJ); 中国清洁发展机制基金赠款项目(2013015)

作者简介: 赵登忠(1978~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为内陆水域碳循环与温室气体排放, E-mail: njuzhaodz@163.com

分析和空间遥感等多种手段,对梯级水库温室气体源汇变化开展了大量的研究<sup>[9~13]</sup>,初步认为水库仅在建成蓄水初期显著改变河流温室气体源汇时空分布格局,随着蓄水进入日常管理阶段将逐渐稳定至类似湖泊的状态<sup>[14]</sup>。当前这些典型水库研究案例主要分布于加拿大魁北克、法属圭亚那、巴拿马、巴西亚马逊、老挝和中国长江流域三峡水库、水布垭水库、乌江梯级水库等不同气候带和不同地理区域<sup>[15~23]</sup>。虽然水库温室气体源汇变化与库龄和所在纬度具有强烈的相关关系<sup>[24]</sup>,但研究结果显示处于不同运行阶段的水库表现出强烈的个案特征,对水体碳源辨识、交换途径、迁移转化过程、消落带影响等机制性问题还未真正理解<sup>[25~29]</sup>。由于我国长江上游流域梯级水库属于河道峡谷型水库,在水文特征、碳传输迁移模式、洪水调度管理方式等方面与国外湖泊型水库显著不同,水库温室气体源汇变化机制更为复杂<sup>[30~34]</sup>。目前,我国河道峡谷型水库温室气体研究案例仅在水库干流或支流进行监测研究,覆盖整个水库关键区域的研究案例并不多见。因此,本文以占据温室气体最大比例的二氧化碳为研究对象,选择全部完成水电梯级开发的隔河岩水

库为研究区,再固定断面定期开展完整水文年的连续观测实验,分析二氧化碳通量时空变化特征及其影响因素,以期理解水库温室气体源汇变化机制提供重要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

隔河岩水库位于长江重要支流清江流域,属于典型的河道峡谷型水库,稳定蓄水后被开发成为清江画廊国家 5A 级风景区,库区具有矿业开发、城镇居民、农业种植、渔业养殖等人类活动(见图 1),两岸及库底多为石质本底,水面宽度约为 2~5 km,水库淹没的植被及土壤较少,在水库建设以前开展了大规模的清库工作,通过水库洪水调度可解决清江下游 20 年一遇防洪问题并减轻长江荆江河段的洪水威胁。隔河岩水库于 1987 年开工,1993 年首台机组发电,1996 年建成蓄水,主要建筑物为重力拱坝最大坝高 151 m,坝顶长 653.5 m,水库总容积为 34.54 亿 m<sup>3</sup>,电站总装机容量为 121.2 万 kW,年发电量 30.4 万 kW·h,一座两级垂直升船机,通航吨位为 300 t,水库深水航道 91 km,升船机年单向通过能力为 170 万 t<sup>[35]</sup>。

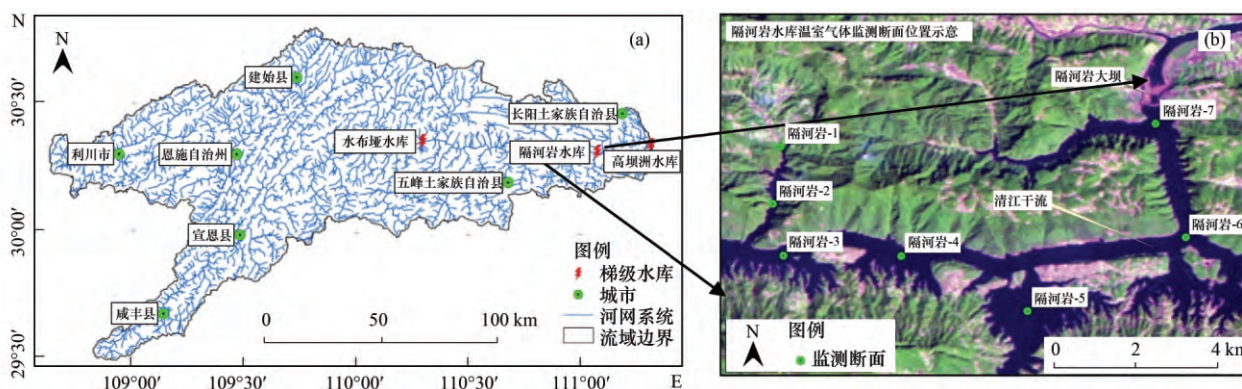


图 1 清江流域隔河岩水库位置和监测断面示意

Fig. 1 Schematic map of greenhouse gas monitoring sites over the Geheyan Reservoir of the Qingjiang River Basin

### 1.2 观测实验方法

为了完全覆盖隔河岩水库典型区域,实验方案在水库库尾(渔峡口)、消落带(隔河岩-1)、支流(隔河岩-2)、上游(隔河岩-3)、中游(隔河岩-4)、库湾(隔河岩-5)、干支流交汇口(隔河岩-6)、坝前(隔河岩-7)等设置了 8 个观测点,其中背景代表性断面渔峡口由于距离隔河岩大坝较远,未在图 1(b)中显示出来。采取痕量气体在线分析仪和浮箱相结合的方法,在 2015 年 3 月至 2016 年 2 月完整水文年每个月 15~20 日定期定点开展观测实验,获取水库水气界面二氧化碳交换通量。由于时间与设备数

量限制,每个观测点每月测定 1 次,观测时间固定在 09:00~17:00 之间,每次测定持续时间为 15 min,测定时间间隔为 30 min。观测指标包括二氧化碳通量、表层水体溶解氧、叶绿素、水温、传导率、pH 值、表层水体无机碳、有机碳、溶解有机碳和颗粒有机碳等,其中浮箱内二氧化碳体积分数由美国 Picarro-G2301 温室气体在线分析仪测定,该设备已被国际水电协会等国际组织推荐在南极冰川、高原草甸、河流湖泊等各种下垫面的野外实验广泛使用,二氧化碳测量精度可达  $70 \times 10^{-9}$ 。水环境指标采用美国 HACH Hydro-lab 便携式水质分析仪在线

获取,水体碳指标在野外采集水样 550 mL,然后送回实验室在 48 h 内利用德国元素公司 vario TOC 分析仪测试获得,该设备采用燃烧氧化-非分散红外吸收法[依据来源于中华人民共和国国家环境保护标准(HJ 501-2009)]进行分析测试,检测精度为  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,能够满足观测实验精度要求。

### 1.3 二氧化碳通量计算方法

二氧化碳通量指单位时间内通过单位面积的质量,正值表示从水体向大气排放,负值则表示水体从大气中吸收该气体。该研究方案利用 Picarro-G2301 温室气体分析仪以 1 s 的时间间隔在线检测浮箱内部二氧化碳浓度变化,然后根据变化斜率和浮箱尺寸参数计算获得<sup>[36]</sup>。详细计算公式如下:

$$\text{Flux} = \frac{k \times F_1 \times F_2 \times V}{S} \quad (1)$$

式中,Flux 表示水库水气界面二氧化碳通量 [ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ];  $k$  表示浮箱内二氧化碳浓度随时间变化的斜率 ( $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ );  $V$  是浮箱内的气体体积 ( $\text{m}^3$ );  $S$  是浮箱覆盖水面的面积 ( $\text{m}^2$ );  $F_1$  是标准温度和气压下二氧化碳体积分数  $10^{-6}$  到  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  单位的转换因子 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $F_2$  是标准温度和气压下从  $s$  到  $h$  的时间转换因子 ( $3600 \text{ s} \cdot \text{h}^{-1}$ ); 其中  $F_1$  计算方法如下<sup>[36]</sup>:

$$F_1 = \frac{C \times M \times p}{8.3144 \times (273.13 + T)} \quad (2)$$

式中, $C$  是二氧化碳体积分数 ( $10^{-6}$ );  $M$  是二氧化碳摩尔质量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $p$  是浮箱内大气压 (kPa);  $T$  是浮箱内气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 隔河岩水库二氧化碳通量分析

隔河岩水库二氧化碳平均通量每个月份、每个季节和全年二氧化碳平均通量的变化范围、平均通量及标准偏差等统计分析结果如表 1 所示。从中可以看出,观测期间隔河岩水库水气界面二氧化碳年平均通量为  $(55.6918 \pm 66.3329) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,总体上在  $-39.2469 \sim 330.2623 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  之间变化,从 2015 年 3 月开始逐渐降低至吸收状态,然后逐渐升高至峰值,最后逐渐下降,呈现冬季高其他季节低的变化规律。其中,二氧化碳月平均通量在 2016 年 1 月最高,达到  $(138.5493 \pm 104.0254) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而在 2016 年 5 月总体上呈现吸收状态,月平均通量达到  $(-26.0032 \pm 12.2112) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。在所有观测月份中,2016 年 1 月二

氧化碳通量变化幅度最大,其波动范围为  $18.9940 \sim 330.2623 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而在夏季的 2015 年 8 月,二氧化碳通量变化范围最小,仅在  $-5.9211 \sim 8.8372 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  之间波动。从季节变化角度分析,夏季二氧化碳平均通量最低,仅为  $(9.0509 \pm 7.4294) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而冬季平均通量最高,达到  $(132.1529 \pm 15.6193) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。隔河岩水库水气界面二氧化碳通量总体上在冬季达到最大值,同时变化幅度也达到最大程度,夏季的排放通量最低,在整个水库范围内变化较小。

隔河岩水库二氧化碳年平均通量总体上呈现出典型库湾较高而在消落带和坝前断面较低甚至低于典型背景断面的空间分布格局,在  $10.5517 \sim 93.9712 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  之间的范围内变化。二氧化碳通量在位于支流消落带的隔河岩-1 观测断面表现为最低值,仅为  $10.4712 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,低于水库背景断面的渔峡口的  $56.0576 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。通过表 2 中的水环境指标观测数据分析可以发现,隔河岩-1 断面处的表层水体叶绿素浓度在所在断面中显著偏高,达到  $0.4081 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,表明消落带区域有更多的陆源有机质输入或者水体藻类自源性有机质,水体溶解氧也处于较高的水平,达到  $6.1386 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其原因可能是该区域水体较浅导致表层水体溶解更多的氧气,同时较低的二氧化碳通量耗氧量较低。二氧化碳年平均通量最高值则位于典型库湾的隔河岩-5 观测断面区域,达到  $93.9712$

表 1 隔河岩水库水气界面二氧化碳通量  
观测结果<sup>1)</sup> /  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

Table 1 Carbon dioxide fluxes between water and atmosphere  
over the Geheyan Reservoir/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

观测时间	通量变化范围	平均通量
2015 年 3 月	16.9938 ~ 110.2760	63.7794 ± 37.8037
2015 年 4 月	-12.8655 ~ 61.3870	6.9734 ± 25.3871
2015 年 5 月	-39.2469 ~ -21.1221	-26.0032 ± 12.2112
2015 年 6 月	-19.8811 ~ 48.9330	7.8900 ± 20.3805
2015 年 7 月	-32.0203 ~ 144.6022	16.9924 ± 53.3766
2015 年 8 月	-5.9211 ~ 8.8372	2.2702 ± 5.6269
2015 年 9 月	-0.6507 ~ 38.0082	15.3065 ± 13.7126
2015 年 10 月	-15.4107 ~ 82.1350	20.5167 ± 31.6832
2015 年 11 月	55.1523 ~ 306.6660	164.1170 ± 89.0125
2015 年 12 月	11.7073 ~ 243.9953	143.5587 ± 84.7218
2016 年 1 月	18.9940 ~ 330.2623	138.5493 ± 104.0254
2016 年 2 月	18.4881 ~ 184.6389	114.3507 ± 63.8722
春季	-39.2469 ~ 110.2760	14.9165 ± 45.4153
夏季	-32.0203 ~ 144.6022	9.0509 ± 7.4294
秋季	-15.4107 ~ 306.6660	66.6467 ± 84.4519
冬季	11.7073 ~ 330.2623	132.1529 ± 15.6193
全年	-39.2469 ~ 330.2623	55.6918 ± 66.3329

1) 表中统计数据使用的断面数量为 8 个,下同

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 由于该区域类似于静水湖泊, 导致水体流速缓慢, 垂直和水平两个尺度水体交换迟缓, 导致水体热量不易扩散, 数据也表明该区域水体温度为  $20.732\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 明显比其他断面偏高, 加速了水体碳的扩散作用。另外隔河岩-5 观测断面表层水体总碳为  $19.794\text{ }3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 明显比其他观测断面偏低, 说明较多的水体碳以二氧化碳方式向大气释放。需要得到更多关注的是坝前观测断面隔河岩-7 二氧化碳年平均通量仅为  $44.567\text{ }3\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 低于大部分其他断面, 从表 2 可以看出该断面表层水体电导率仅为  $254.119\text{ }1\text{ }\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 显著比其他断面偏低, 表明该断面表层水体阴阳离子浓度较低影响到水体碳的释放。作为典型背景断面的渔峡口断面, 其年平均通量为  $56.057\text{ }6\text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 其水环境条件与其他观测断面差异较大, 表层水体温度为  $18.200\text{ }7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 比其他断面显著偏低, pH 值为  $8.043\text{ }4$  同样偏低, 溶解氧和叶绿素分别为  $5.662\text{ }1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.247\text{ }0\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相对于其他断面均偏低, 但二氧化碳平均通量却高于消落带和坝前断面。综上所述, 分别作为陆源输入和水体碳累积作用典型区域

的消落带和坝前断面, 其二氧化碳年平均通量并没有表现为特别显著的碳源, 甚至低于渔峡口背景断面的通量水平, 一定程度上表现为碳“汇”。

2.2 影响因素变化分析

为了分析隔河岩水库二氧化碳通量影响因素, 研究方案同步观测了水库表层水体溶解氧、叶绿素、水体温度、电导率 pH 值等水环境理化指标以及总碳、总无机碳和总有机碳参数, 的水体碳浓度情况, 每个断面的水环境指标平均浓度及水体碳浓度如表 2 所示。分析结果显示, 隔河岩水库表层水体温度在完整年度内呈现出在  $12\sim30\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间的范围内变化特征, 而溶解氧浓度在  $4\sim10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间变化, 在所有观测断面中位于水库库尾的渔峡口溶解氧浓度最低, 仅为  $5.662\text{ }1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而所有断面表层水体 pH 值在  $8.0$  左右波动, 说明水体整体上表现为偏碱性。水体叶绿素浓度是浮游植物初级生产力的重要体现, 可以通过光合作用将无机碳转化为有机碳, 水体叶绿素浓度变化幅度较大, 其中在蓄水开始阶段的 2015 年 9 月最高, 达到  $0.784\text{ }6\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表 2 隔河岩水库典型观测断面二氧化碳平均通量及其影响因素

Table 2 Relationship between mean carbon dioxide fluxes and parameters at each site over the Geheyan Reservoir										
观测断面名称	CO <sub>2</sub> 通量 / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	水温 / $^{\circ}\text{C}$	pH	电导率 / $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	溶解氧 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	叶绿素 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	水体总碳 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总无机碳 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	总有机碳 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
渔峡口	56.057 6	18.200 7	8.043 4	281.634 5	5.662 1	0.247 0	26.493 3	24.675 0	1.818 3	
隔河岩-1	10.471 2	20.259 1	8.353 9	280.101 0	6.138 6	0.408 1	21.812 5	19.982 5	1.827 5	
隔河岩-2	40.156 9	20.228 5	8.406 2	280.127 8	6.235 3	0.346 5	23.480 0	22.230 0	1.247 5	
隔河岩-3	62.729 8	20.403 0	8.394 0	280.346 3	6.178 1	0.301 7	21.486 3	19.771 3	1.715 0	
隔河岩-4	75.197 2	20.172 2	8.451 1	280.600 5	6.269 9	0.322 5	21.471 3	19.733 8	1.732 5	
隔河岩-5	93.971 2	20.732 0	8.341 5	282.647 9	5.993 7	0.370 5	19.794 3	18.415 7	1.378 6	
隔河岩-6	73.660 8	20.307 3	8.411 1	279.151 6	6.075 7	0.394 8	21.162 5	19.601 3	1.561 3	
隔河岩-7	44.567 3	20.561 6	8.451 8	254.119 1	5.700 5	0.375 8	22.7400	21.056 3	1.683 8	

隔河岩水库水体碳以无机碳为主, 有机碳只占据较低的比例, 位于水库典型库湾区的隔河岩-5 断面水体碳浓度最低, 而其二氧化碳排放通量最高, 说明在水流速度较慢的库湾区域大部分水体碳以气体方式排放到大气中。位于水库消落带的 1 号和 2 号断面的水体碳浓度处于较高的水平, 在位于支流与干流交汇区域的 2 号断面无机碳相对较低, 有机碳相对较高, 说明支流水流速度较慢的情况下生物活动比较活跃, 陆地输入有机质数量较高。但在渔峡口断面水体碳浓度为最高水平, 以无机碳为主, 相对于其他断面而言无机碳比例明显偏高, 说明该区域水体碳主要来源于库岸岩石风化分解与无机物输入, 消落带植被土壤有机质输入和水生生物活动只占据较小的比例。

3 讨论

3.1 典型区域二氧化碳通量时间变化机制

由于受到众多因素的影响, 水库二氧化碳通量在时空尺度上存在着显著的差异。因此, 研究方案选择隔河岩水库库湾、支流消落带、库尾背景及坝前等观测断面代表水库典型区域, 探讨典型区域二氧化碳通量时间变化机制的异同。图 2 分别表示了渔峡口、支流消落带、典型库湾、坝前和全部断面月平均通量的时间变化规律。从中可以看出, 二氧化碳月平均通量在 11 月明显升高至全年最高排放状态, 其原因可能是随着水位升高, 通过地表径流汇入水库积累了大量的水体碳含量, 表层水体 pH 值达到全年最低的  $7.917\text{ }3$ , 水体碳以气体形式向大气



排放,消耗了水体大量的氧,导致溶解氧指标降低为全年最低,仅为 $4.3788 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。隔河岩水库坝前断面(隔河岩-7)在2015年4~7月和10月二氧化碳均处于吸收状态,其中在5月吸收通量最多,达到 $-36.1931 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,该断面在4个典型观测断面中处于吸收状态的月份最多,其平均通量仅为 $44.5673 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。与全年月平均通量时间变化趋势相比,同样吸收状态月份较多。在该断面排放的月份中,2015年12月二氧化碳通量达到最高值,达到 $178.9384 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,该月份平均水体温度仅为 $16.0519^\circ\text{C}$ ,同时在整个冬季的2015年12月、2016年1月和2月二氧化碳平均通量均处于高位状态。因此,总体上讲坝前断面二氧化碳通量在气温较高的夏季处于吸收状态,而在严寒的冬季处于排放状态,但在同样处于蓄水期的春季则逐渐转变为吸收状态。

隔河岩水库典型库湾观测断面(隔河岩-5)二氧化碳通量在2015年4月由于观测实验中Picarro温室气体分析仪测的浮箱内部二氧化碳浓度变化并不显著导致数据缺乏。从图2中可以看出该断面位于水库典型库湾中心,水体流速缓慢,水环境条件类似较为封闭的湖泊,在库湾连续区域具有大量的鱼类养殖网箱,可能会影响水体营养盐和碳的累积分布。从图2中可以看出,该断面在全年中只有2015年5月和8月处于吸收状态,其他月份均处于排放状态,在观测期间的二氧化碳平均通量为 $93.9712 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。吸收水平最高的2015年5月二氧化碳通量为 $-21.1221 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而在同属于春季的3月还表现为较高的排放状态,因此该断面在春季的3个月份中二氧化碳通量处于由排放向吸收状态逐渐转化的过程。该断面在夏季同样表现为微弱的排放,季节平均通量仅为 $9.0159 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而进入9月后通量水平则逐渐升高,在冬季的2016年1月达到最高,达到 $330.2623 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的峰值,也是隔河岩水库所有断面在观测期间的最高峰。因此,隔河岩水库典型库湾断面二氧化碳通量整体上呈现夏季处于微弱的排放状态,秋季处于逐渐增强的过程,冬季则达到全年的最高峰,而在春季则处于由排放向吸收转化的过程。

水库与河流湖泊等水域最显著的区别在于定期周期性蓄水产生了较大面积的消落带,从而影响了流域内部陆地碳输入的时空变化格局,并且一定程度上对水体碳具有累积作用,影响了水气碳交换的速度和方式<sup>[37]</sup>。因此,研究方案选择隔河岩水库典

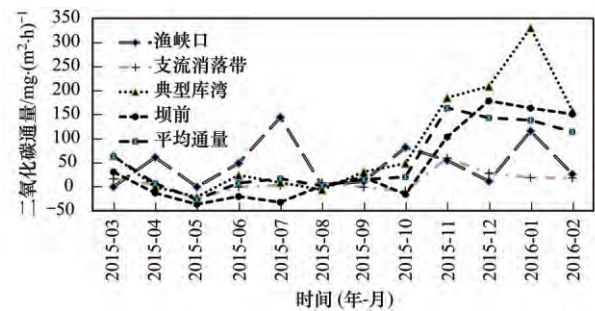


图2 清江流域隔河岩水库典型断面月平均通量时间变化示意

Fig. 2 Temporal variation of monthly carbon dioxide fluxes at typical sites in the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin

型支流消落带作为观测断面,消落带代表性断面(隔河岩-1)水气界面二氧化碳交换通量的时间变化趋势可以从图2中看出。该断面二氧化碳通量在2015年11月达到最高,为 $59.9738 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,但观测期间每个月份均在 $60.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以外,在2015年5月、9月和10月还呈现为吸收的状态。与坝前断面和典型库湾断面不同,该断面除了2015年11月以外,冬季的其他月份二氧化碳通量均在 $30.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以下,并没有表现出特别显著的排放水平。与其他断面相同,二氧化碳在该断面夏季呈现为微弱排放的状态,其平均通量仅为 $3.9859 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,几乎接近于零通量。因此,隔河岩水库在支流消落带区域二氧化碳并没有出现显著的排放水平,在时间变化方面与其他断面一致。

为了评估河流拦截工程隔河岩水库对二氧化碳通量的影响,研究方案在水库库尾区域设置了渔峡口观测断面,该断面二氧化碳通量在全年内每个月份的时间变化趋势如图2所示。从中可以看出,渔峡口背景代表性断面二氧化碳通量时间变化规律与其他断面具有显著的区别,总体上并没有表现夏季微弱排放和冬季显著排放的特点,二氧化碳通量最高值出现在2015年夏季的7月,达到 $144.6022 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,次高峰则出现在冬季的2016年1月,通量水平为 $116.0454 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,其他月份均在 $100.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以下,同样在2015年8月达到最低值,仅为 $2.7533 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,接近于零排放。迥异于其他断面时间变化格局的夏季的二氧化碳平均通量为 $65.4302 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,而在其他断面夏季一般表现为微弱的排放水平。另外,如果以季节为时间单元,该断面在春夏秋冬这4个季节的二氧化碳平均通量分别为 $61.3870$ 、 $65.4302$ 、 $49.5010$ 和 $51.4651 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,可以看出该断面二氧化碳平均通量的季节变化并不强烈,变化范

围较小,与其他断面的季节变化相比较为稳定。与渔峡口库尾背景代表性断面相比,隔河岩水库其他断面在夏季整体上应该属于吸收状态,水库蓄水减弱了水体碳以二氧化碳形式的排放通量,一定程度上相当于从大气中“吸收”了大量的二氧化碳气体,具有一定的“固碳”作用,成为碳“汇”。在其他断面表现为典型排放的冬季,该断面二氧化碳平均通量相对于支流消落带观测断面较高,与坝前和典型库湾断面相比相对较低。

### 3.2 不同季节二氧化碳通量空间变异规律

年度内季节变化使得水库水体水文特征、物质输送模式、生物活动产生显著的改变,因此水库水气界面二氧化碳通量在每个季节内可能产生更加明显的空间变异。因此,研究方案分别将3~5月作为春季,将6~8月作为夏季,将9~11月作为秋季,将12月~次年2月作为冬季,分析不同季节二氧化碳平均通量的空间变异规律如图3所示,其中分别将春夏秋冬以及全年平均通量展示出来,便于季节与全年的通量比较分析。从图3中可以看出,在渔峡口以及支流消落带代表性断面隔河岩-1区域,二氧化碳平均通量的季节变化和年度平均水平较为接近,而越接近坝前断面5个时间段之间的差异更加显著,其中冬季二氧化碳平均通量的空间变异最为明显。

从图3中的春季空间分布可以看出,隔河岩水库春季二氧化碳平均通量在 $-5.9851 \sim 25.5331 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 以内波动,季节平均通量为 $(14.9165 \pm 45.4153) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,呈现出消落带和坝前区域较高而在典型库湾及干流较低的总体空间变化趋势。尤其是相对于较高通量水平的背景代表断面渔峡口,其他7个断面二氧化碳季节平均通量均属于低水平,其中在消落带和坝前区域的断面还表现为吸收状态。从图3中可以看出,夏季二氧化碳通量整体变化范围为 $-16.5171 \sim 9.0159 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,夏季平均通量为 $(9.0509 \pm 7.4294) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,处于全年最低水平,接近于零通量水平。该季节与春季同样呈现为消落带和坝前区域较低而典型库湾区域较高的空间分布特点,尤其是坝前观测断面的通量为 $-16.5171 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,与春季相比吸收状态更加显著,水库库尾区域的背景代表断面渔峡口同样处于显著的排放状态。秋季为水库蓄水开始阶段,从图3中可以看出,该季节所有断面二氧化碳均处于排放状态,没有任何区域表现为吸收状态,其通量在 $16.8991 \sim 109.656$

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间变化,与春季和夏季相比变化幅度增大,整个季节的平均通量为 $(66.6467 \pm 84.4519) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,其空间分布格局呈现为消落带和坝前区域较低、典型库湾和干流较高的特点,与其他季节相似但其差异幅度大得多,尤其是相对于库尾背景代表性断面渔峡口区域,二氧化碳通量在库湾和干流区域要高得多,但消落带和坝前断面依然比渔峡口断面低。隔河岩水库冬季二氧化碳在所有区域均处于排放状态,其季节平均通量为 $(132.1529 \pm 15.6193) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,在 $22.1431 \sim 232.444 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间的范围内波动。冬季二氧化碳通量呈现为消落带较低而其他区域较高的空间分布趋势,但在水库库湾区域呈现尤其显著的高排放状态,尤其是除消落带区域的低排放以外其他断面所在的区域均显著高于渔峡口库尾区域,说明该季节水库尤其是典型库湾地区处于向大气排放二氧化碳的状态。

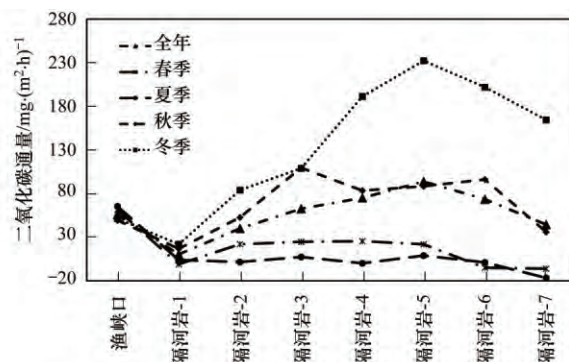


图3 清江流域隔河岩水库二氧化碳季节及年度平均通量空间变化示意

Fig. 3 Spatial distribution of seasonal and yearly mean carbon dioxide fluxes in the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin

### 3.3 水环境因素影响机制

河流拦截工程尤其是水库碳循环过程受到水环境因素、蓄水管理、水体滞留时间等重要因素的影响。水库水温度的时空变化将引起水流运动模式和水生物繁殖活动发生改变,从而对以水体为载体的物质迁移模式和分解速度产生影响。水体pH值与有机质分解之间也存在相互反馈的关系,改变水体碳酸盐的浓度,从而影响二氧化碳交换通量的排放与吸收。水体溶解氧和叶绿素反映了水生生物的光合作用强烈程度,也会对水体二氧化碳通量产生不可忽视的影响。水体溶解氧主要来源于植物光合作用及大气输入,而植物的呼吸作用和水体有机质的分解则需要消耗大量的氧气。但隔河岩水库二氧化碳通量与表层水体溶解氧浓度并没有表现出显

著的相关关系,其相关系数仅为 0.072,此规律与已有报道中甲烷通量与溶解氧之间的关系存在显著的区别<sup>[38]</sup>。在所有观测断面中位于水库库尾的渔峡口溶解氧浓度最低,仅为  $5.6621 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,但二氧化碳平均通量并不是最高的,说明有机质分解耗氧并不是水体溶解氧减少的主要因素,植物呼吸作用可能占据更大的比例。水体叶绿素浓度是浮游植物初级生产力的重要体现,通过光合作用将无机碳转化为有机碳。但在隔河岩水库叶绿素浓度与二氧化碳交换通量并没有表现出显著的相关关系,说明水体叶绿素并没有及时通过有机质分解释放到大气中。

从图 4 可以看出,隔河岩水库二氧化碳通量与水体温度及 pH 值具有较为显著的相关关系,水体温度是影响水气界面二氧化碳交换的主要因素,并且呈现为反相关关系,这与该水库夏季二氧化碳通量较低而在秋冬季较高的时间变化特点相一致的。由于 pH 值是水体阴阳离子尤其是碳酸根离子等无机碳浓度的综合反映,隔河岩水库二氧化碳通量与水体 pH 值呈现出较为显著的负相关关系。虽然图

4 中显示的水环境参数与二氧化碳通量的相关性并不是特别显著,但从中可能看出两者的相关性存在典型的季节性,在二氧化碳通量高于  $100 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  的 2015 年 11 月和 12 月以及 2016 年 1 月和 2 月,与其他月份相比相对独立,与水环境参数的相关更加显著。从表 2 可以看出,位于库尾区域的典型背景值观测断面渔峡口在水环境指标表现出与水库其他断面明显不同的特征,其水温、pH 值、溶解氧以及叶绿素指标均是最低的,说明水库蓄水对原有的河流水环境特征形成了一定的扰动。但是扰动对于水库二氧化碳通量并不必然具有放大作用,在消落带与坝前断面还具有减弱作用。

### 3.4 表层水体碳浓度因素影响机制

水库水体碳以溶解和颗粒两种形态的有机碳、无机碳和生物有机碳存在,是水气界面二氧化碳交换通量的物质基础,主要来源于消落带淹没植被和土壤、流域陆源有机物径流输入以及水体浮游植物自生有机物等多种途径,其中溶解无机碳以  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  离子等形式为主,来源于溶

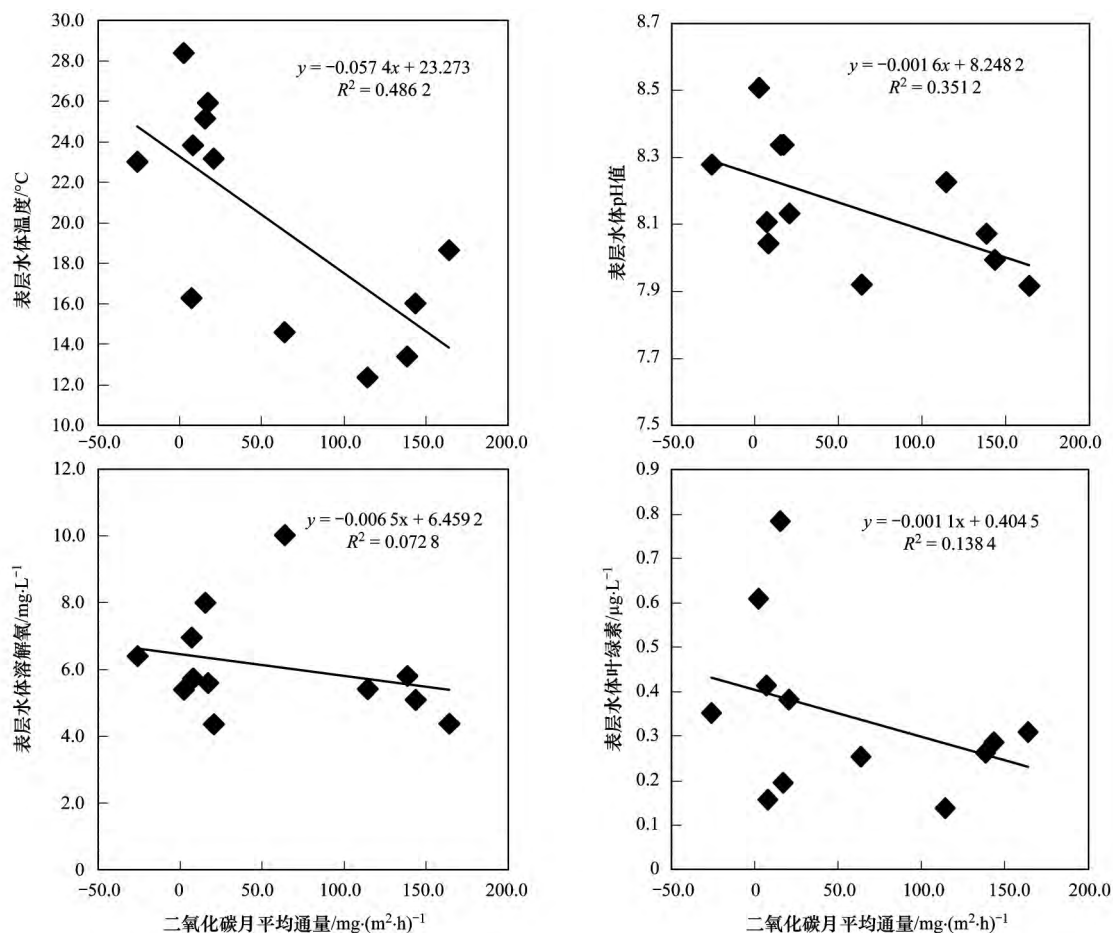


图 4 清江流域隔河岩水库水气界面二氧化碳月平均通量与水环境因素之间的响应关系

Fig. 4 Relationship between monthly mean carbon dioxide fluxes and water quality parameters in the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin

解有机质微生物降解和沉积物再悬浮作用等, 水体有机碳可以反映水体有机污染的程度, 来源于径流输入、水生植物光合作用以及有机物降解等过程. 河流拦截工程的累积作用对水体水文动力学特征将产生重要的影响, 改变了水体碳的时空变化格局和纵向输移规律, 可能对二氧化碳交换通量产生较大的影响. 图 5 为隔河岩水库水体碳浓度与二氧化碳通量之间的相关关系示意, 其中图 5 (d) 为二氧化碳通量与无机碳和有机碳之比的相关关系示意. 从图 5 (a) 和图 5 (b) 中可以发现, 水体总碳和无机碳与二氧化碳通量的关系非常相似, 而有机碳和两者之比与二氧化碳通量的关系

则较为相似, 并且均不是线性相关关系, 其相关系数均在 0.5 以上. 另外从图 5 中可以看出二氧化碳通量在  $100 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  以上时两者的相关关系发生改变, 而月平均通量在  $100.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  以上的月份为 2015 年 11 月和 12 月以及 2016 年 1 月和 2 月, 均属于冬季气温较低而水库处于蓄水阶段的时间. 如果将上述月份单独分析二氧化碳通量与水体碳之间的关系, 则其相关系数高得多, 可以达到 0.866. 上述现象在一定程度上表明大型河流拦截工程改变了原有的水生生态系统以及生源物质的迁移转化规律, 从而影响了水气界面二氧化碳的吸收与排放及其通量.

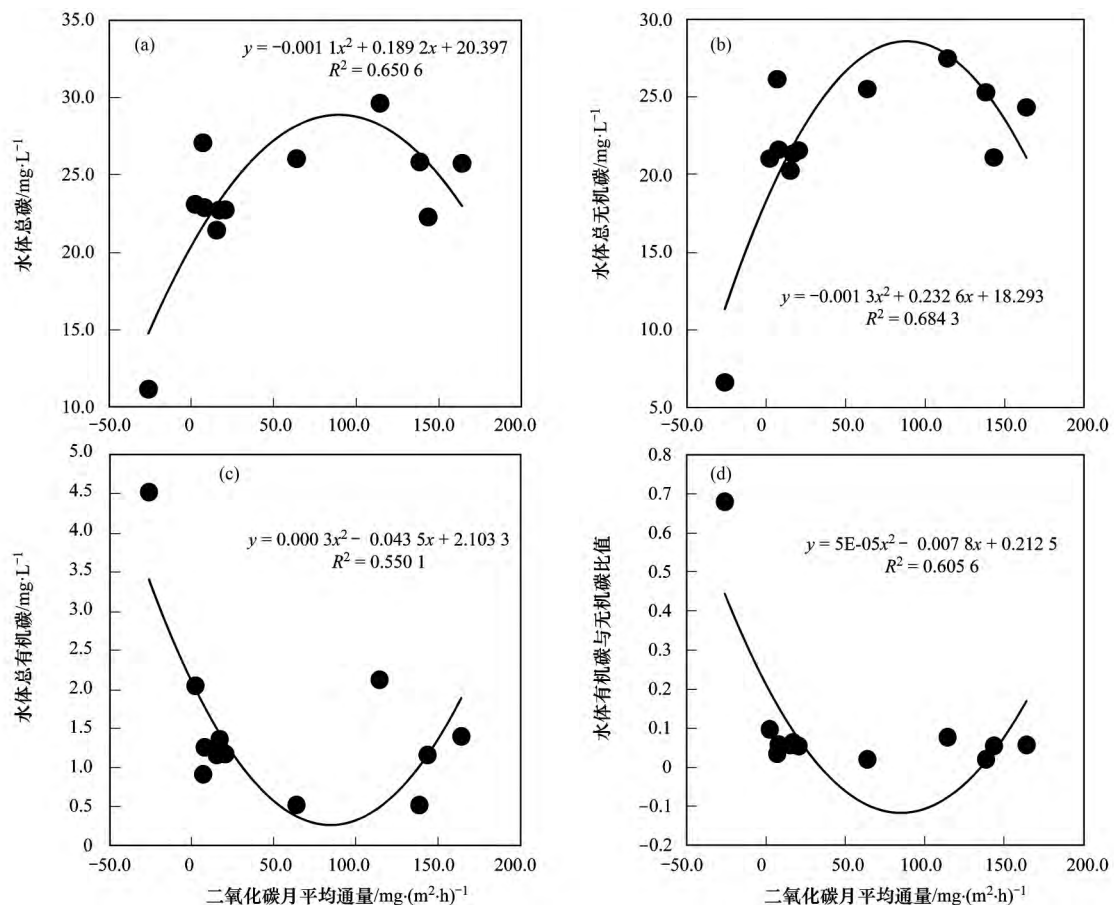


图 5 隔河岩水库水气界面二氧化碳月平均通量与水体碳浓度相关关系示意

Fig. 5 Relationship between monthly mean carbon dioxide fluxes and carbon concentration in surface water in the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin

#### 4 结论

(1) 隔河岩水库水气界面二氧化碳平均通量为  $(55.6918 \pm 66.3329) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 完整水文年度内呈现冬季显著高于其他时间的变化规律, 水库消落带和坝前断面较低而典型库湾区域较高的空间分布格局.

(2) 作为水库背景的库尾断面渔峡口二氧化碳通量季节变化非常稳定, 在大部分时间内反而高于坝前和消落带断面, 总体上隔河岩水库成为较弱的“碳汇”.

(3) 隔河岩水库二氧化碳通量时空分布格局显著受到水温、pH 值和水体碳浓度的影响, 但其相关程度受到季节和蓄水因素的双重影响.



致谢: 感谢长江水利委员会长江科学院沈松勇硕士研究生、骆腾飞博士研究生野外观测实验中的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 隋欣, 廖文根. 中国水电温室气体减排作用分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(2): 133-137.  
Sui X, Liao W G. Analysis of greenhouse gas emission reduction of hydropower in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(2): 133-137.
- [2] 李海英, 冯顺新, 廖文根. 全球气候变化背景下国际水电发展态势[J]. 中国水能及电气化, 2010, (10): 29-37.  
Li H Y, Feng S X, Liao W G. Development trend of international hydropower in the background of global climate change[J]. China Water Power & Electrification, 2010, (10): 29-37.
- [3] 王文铭, 艾尉. 低碳经济背景下我国水电发展前景分析及建议[J]. 中国水利, 2010, (14): 25-26.  
Wang W M, Ai W. Analysis on the perspective of hydropower development in China at the background of low-carbon economy and advices[J]. China Water Resources, 2010, (14): 25-26.
- [4] 林初学. 水坝工程建设争议的哲学思辨[J]. 中国三峡建设, 2006, (6): 11-15.
- [5] Jeong J J, Bartsch S, Fleckenstein J H, et al. Differential storm responses of dissolved and particulate organic carbon in a mountainous headwater stream, investigated by high-frequency, in situ optical measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117(G3): G03013.
- [6] Ferland M E, del Giorgio P A, Teodoru C R, et al. Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Québec[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): GB0E04.
- [7] Larsen S, Andersen T, Hessen D O. Predicting organic carbon in lakes from climate drivers and catchment properties[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(3): GB3007.
- [8] Umezawa T, Machida T, Aoki S, et al. Contributions of natural and anthropogenic sources to atmospheric methane variations over western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): GB4009.
- [9] Sha C Y, Mitsch W J, Mander ü, et al. Methane emissions from freshwater riverine wetlands[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(1): 16-24.
- [10] Zhu R B, Liu Y S, Xu H, et al. Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(3): 304-311.
- [11] Zhou H Y, Yin X J, Yang Q H, et al. Distribution, source and flux of methane in the western Pearl River Estuary and northern South China Sea[J]. Marine Chemistry, 2009, 117(1-4): 21-31.
- [12] Xing Y P, Xie P, Yang H, et al. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(30): 5532-5540.
- [13] Larmola T, Alm J, Juutinen S, et al. Contribution of vegetated littoral zone to winter fluxes of carbon dioxide and methane from boreal lakes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D19): D19102.
- [14] Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, et al. Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments: environmental science and engineering[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 2005. 233-250.
- [15] Delmas R, Galy-Lacaux C, Richard S. Emissions of greenhouse gases from the tropical hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) compared with emissions from thermal alternatives[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(4): 993-1003.
- [16] Duan X N, Wang X K, Mu Y J, et al. Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(25): 4479-4487.
- [17] Abril G, Guérin F, Richard S, et al. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana)[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(4): GB4007.
- [18] Roehm C, Tremblay A. Role of turbines in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Québec, Canada[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D24): D24102.
- [19] Chen H, Wu Y Y, Yuan X Z, et al. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D18): D18301.
- [20] Wang F S, Wang B L, Liu C Q, et al. Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(23): 3827-3834.
- [21] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal aspects of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir, China[J]. Biogeosciences Discussions, 2012, 9(10): 14503-14535.
- [22] Yang L, Lu F, Wang X K, et al. Surface methane emissions from different land use types during various water levels in three major drawdown areas of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D10): D10109.
- [23] 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 D Z, Tan D B, Wang Z H, et al. Measurement and analysis of greenhouse gas fluxes from Shuibuya Reservoir in Qingjiang River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(10): 197-204.
- [24] Barros N, Cole J J, Tranvik L J, et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(9): 593-596.
- [25] Strachan I B, Tremblay A, Pelletier L, et al. Does the creation of a boreal hydroelectric reservoir result in a net change in evaporation? [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 886-899.
- [26] Kim Y, Roulet N T, Li C S, et al. Simulating carbon dioxide exchange in boreal ecosystems flooded by reservoirs[J]. Ecological Modelling, 2016, 327: 1-17.
- [27] Wang W F, Roulet N T, Kim Y, et al. Integrating aquatic and terrestrial biogeochemical model to predict effects of reservoir creation on CO<sub>2</sub> emissions[J]. Biogeosciences Discussions, 2016, doi: 10.5194/bg-2016-100.

- [28] 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 J H, Pu J B, Sun P A, *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 Science, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- [29] 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.  
Li S, Wang Y C, Cao M, *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.
- [30] 赵登忠, 林初学, 谭德宝, 等. 清江流域水布垭水库二氧化碳大气廓线空间分布及其水环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(12): 1495-1501.  
Zhao D Z, Lin C X, Tan D B, *et al.* Spatial and vertical distribution of carbon dioxide concentration and aquatic environmental effect in the Shuibuya reservoir over the Qingjiang River Basin, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(12): 1495-1501.
- [31] 汪朝辉, 杜清运, 赵登忠. 水布垭水库 CO<sub>2</sub> 排放通量时空特征及其与环境因子的响应研究[J]. 水力发电学报, 2012, **31**(2): 146-151.  
Wang Z H, Du Q Y, Zhao D Z. Study on spatiotemporal characteristics of CO<sub>2</sub> emission and effects of environmental factors in Shuibuya reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, **31**(2): 146-151.
- [32] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 384-396.  
Liu C Q, Wang F S, Wang Y C, *et al.* Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(4): 384-396.
- [33] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河流域高阳回水区夏季水体 CO<sub>2</sub> 分压日变化特性[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 190-196.  
Guo J S, Jiang T, Li Z, *et al.* Diurnal variation characteristics of pCO<sub>2</sub> in the Summer water column of Gaoyang backwater area in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(2): 190-196.
- [34] 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 等. 亚热带典型岩溶溪流气界面 CO<sub>2</sub> 交换通量变化过程及其环境影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2487-2495.  
Li L, Pu J B, Li J H, *et al.* Variations of CO<sub>2</sub> exchange fluxes across water-air interface and environmental meaning in a surface stream in subtropical Karst area, SW China [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2487-2495.
- [35] 水利部长江水利委员会. 隔河岩水利枢纽综合设计报告[R]. 1986. 3-7.
- [36] Goldenfum J. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs[M]. UK: The International Hydropower Association, 2010. 71-72.
- [37] Cai Y H, Guo L D, Wang X R, *et al.* Abundance, stable isotopic composition, and export fluxes of DOC, POC, and DIC from the Lower Mississippi River during 2006-2008 [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, **120**(11): 2273-2288.
- [38] Chanudet V, Descloux S, Harby A, *et al.* Gross CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(24): 5382-5391.