

# 三峡水库支流水文情势差异对水-气界面二氧化碳释放通量特征的影响

程 瑶<sup>1,2,3\*</sup> 王雨春<sup>2,3</sup> 胡明明<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>河北工程大学, 河北邯郸 056001; <sup>2</sup>中国水利水电科学研究院, 北京 100038; <sup>3</sup>中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘 要** 选取三峡水库支流朱衣河、草堂河及其毗邻干流为研究区域, 于 2015 年 3 月开展了春季水华易发期水-气界面温室气体及相关环境因子的动态观测。结果表明: 该时段内, 三峡水库干流总体表现为释放 CO<sub>2</sub> 的“源”, 其通量为 85.01 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>; 在受干流泄水影响较小的朱衣河回水区, 表现为强烈吸收 CO<sub>2</sub> 的“汇”, 其通量变化范围为 -73.26 ~ -30.38 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>; 而因“狭管效应”受干流强烈影响的草堂河支流回水区, 则表现为相对较弱的 CO<sub>2</sub> 释放“源”, 其通量变化范围为 81.43 ~ 136.72 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>。相关分析表明, 三峡水库干支流不同水域 CO<sub>2</sub> 释放通量与浮游植物初级生产力呈显著相关关系。由于受到工程调度影响, 干流、支流回水区不同水域水文情势的差别, 导致了浮游植物生物量和碳转换利用强度的空间差异, 可能是形成三峡水库水气界面 CO<sub>2</sub> “源、汇”特征分布高度异质性的主要原因。

**关键词** 三峡水库; 支流; 二氧化碳; 温室气体; 通量

**Influence of different water regimes of tributaries in Three Gorges Reservoir on air-water interface CO<sub>2</sub> fluxes.** CHENG Yao<sup>1,2,3\*</sup>, WANG Yu-chun<sup>2,3</sup>, HU Ming-ming<sup>2,3</sup> (<sup>1</sup> Hebei University of Engineer, Handan 056001, Hebei, China; <sup>2</sup> China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; <sup>3</sup> State Key Laboratory of Simulation and Regulation of water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China).

**Abstract:** Zhuyi River, Caotang River, two tributaries of Three Gorges Reservoir (TGR), and its adjacent mainstream were selected as survey area. In the spring algal bloom period, the air-water interface greenhouse gas fluxes in relation to environmental factors were observed in March, 2015. The results showed that during this period, the mainstream of TGR was a source of CO<sub>2</sub> and its flux was 85.01 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>. Zhuyi River, slightly influenced by the mainstream, was a sink of CO<sub>2</sub>, and its flux ranged from -73.26 to -30.38 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>. However, Caotang River, intensely influenced by the mainstream, was a weak source of CO<sub>2</sub>, and its flux ranged from 81.43 to 136.72 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>. Correlation analysis showed that the CO<sub>2</sub> fluxes of different areas in TGR had a significant correlation with primary productivity of plankton. Influenced by the TGR operation, the difference of water regimes in different water areas in mainstream and tributaries resulted in spatial difference of biomass of plankton and intensity of carbon conversion and utilization, which would be the main factor for the high heterogeneity in the source or sink for air-water interfaces CO<sub>2</sub> in TGR.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; tributary; carbon dioxide; greenhouse gas; flux.

“十二五”国家水体污染防治重大科技专项(2012ZX07104-001)、国家自然科学基金项目(51509066、51309252 和 51179205)、流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(21016zy04)和河北省重点基础研究项目(14964206D-3)资助。

收稿日期: 2016-05-03 接受日期: 2016-09-19

\* 通讯作者 E-mail: chengyao1108@163.com

人类活动引起的地球大气中温室气体,特别是  $\text{CO}_2$  浓度的剧增与近百年以来全球气候变暖密切相关(Pachauri *et al.*, 2007)。淡水水库是向大气排放温室气体的潜在来源,被淹没库区中的有机质会分解成为腐殖酸、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、N、P 等(周广胜, 2003),其中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  是温室气体。水库温室气体排放是一个复杂的过程,具有很大的不确定性,受大气压力变化(Casper *et al.*, 2000)、水流流速的变化(Scranton *et al.*, 1993)、静水压力的变化(Joyce, 2003)、沉积物表面剪切应力(Smith *et al.*, 2000)等因素的影响,水体温室气体通量特征时空变化显著(UNESCO/IHA, 2008),因此需要对水库温室气体产生过程中的众多因素进行细致的观测与分析(Lambert *et al.*, 2005)。

三峡水库自 2003 年蓄水以来,在产生巨大经济、社会效益的同时,其温室气体效应也受到密切关注。目前的监测结果虽然初步揭示了三峡水库温室气体排放的部分特征(赵炎等, 2011; 王亮等, 2012; 李哲等, 2013, 2014; 李双, 2014)。本文选取三峡水库 2 条不同类型的支流及其毗邻干流为研究区域,在 2015 年 3 月 29 日开展了温室气体通量观测,分析春季水华易发期水-气界面温室气体“源、汇”特征及其影响因素,并区分不同类型支流水-气界面温室气体通量特征。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

朱衣河、草堂河均为位于重庆市奉节县,距离三峡大坝约 156 km,是长江的一级支流。朱衣河库湾长约 5.5 km,草堂河库湾长约 7 km,分别在 2 条河回水末端、库湾中部和干支流交汇处设置观测点(图 1),对水-气界面  $\text{CO}_2$  释放通量特征进行观测,分析不同类型支流的  $\text{CO}_2$  通量特征。

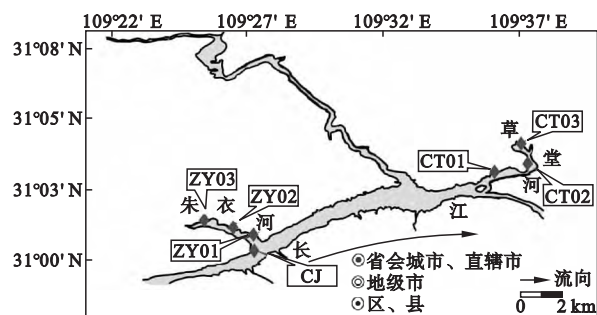


图 1 研究区域及采样点示意图

Fig.1 Study area and sampling sites

### 1.2 数据采集

本研究在 2015 年 3 月 29 日 10:00—15:00 开展了温室气体通量原位观测。观测主要指标为水气界面  $\text{CO}_2$  交换通量,水体理化参数和气象因子。

$\text{CO}_2$  通量监测采用密闭式“动态通量箱法”进行测定。分析仪器为 Los Gatos Research(LGR)公司的 DLT-400 型温室气体分析仪(Greenhouse Gas Analyzer, GGA),其主要技术指标如下:不确定性 <1%;测量范围为  $200 \sim 20000 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ ;数据输出间隔为  $1 \text{ s}^{-1}$ 。气样采集设备为圆柱型(直径 0.3 m,高 0.5 m)不锈钢材质通量箱,在箱顶设低速微型风扇以保证箱内空气充分混合;在箱外设保温层及反光膜,以保证箱内温度稳定;在箱顶设置 2 气体穿板接头,并采用 Teflon 管与温室气体分析仪相连,以保证管路系统对气体的吸附性最小;在通量箱下部设充气橡胶气胎,以保证通量箱能箱口浸入水中,且箱体浮在水面上。采样前将箱口水平放置约 2~5 min,以便箱内充满空气;采样时将采样箱置于水面,使箱口浸入水中监测 5 min,并保证箱内空气与外界隔绝,每个监测点重复 3 次。

在对  $\text{CO}_2$  通量监测的同时用 YSI EXO2 多参数水质监测仪进行支流库湾水体理化指标观测,气温、气压、使用 Kestrel 4500 手持气象站进行观测,气温精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,气压精度为  $\pm 1.5 \text{ hPa}$ 。

### 1.3 气体通量计算

水-气界面气体释放通量是指单位时间内单位面积上气体变化量,正值表示气体从水体向大气释放,负值表示水体吸收大气中的气体。气体释放通量  $F$  为:

$$F[\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}] = \frac{\rho[\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot V[\text{m}^3]}{A[\text{m}^2] \cdot M[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}] \times 10^{-3}} \cdot \frac{dC[\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}] \times 10^{-6}}{dt[\text{d}]} \quad (1)$$

由克拉伯龙方程可知:

$$\rho = \frac{M[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}] \cdot P[\text{kPa}] \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}}{R[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot N \cdot \text{m} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot T[\text{K}]} \\ = \frac{M \cdot P}{R \cdot T} \times 10^3 [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$$

带入式(1)中,可得:

$$F[\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}] = \frac{M[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}] \cdot P[\text{kPa}]}{R[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \cdot T[\text{K}]} \cdot \frac{V[\text{m}^3] \cdot dC[\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}]}{A[\text{m}^2] \cdot M[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}] \cdot dt[\text{d}]} \\ = \frac{P \cdot V}{8.31 \cdot (273.15 + T[^\circ\text{C}]) \cdot A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

式中  $F$  为气体释放通量 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )  $\rho$  为观测气体的密度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )  $V$  为采样箱水面以上体积 ( $\text{m}^3$ )  $C$  为气体体积浓度 ( $\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}$ )  $A$  为采样箱横截面积 ( $\text{m}^2$ )  $t$  为时间 ( $\text{d}$ )  $M$  为气体摩尔质量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )  $P$  为气压 ( $\text{kPa}$ )  $R$  为气体摩尔常数 ( $8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )  $T$  为热力学温度 ( $\text{K}$ )。

用式 (2) 将每次观测记录的 5 min 的温室气体数据进行回归分析, 计算单次观测的释放通量, 将 3 次重复观测的平均值作为该观测点的水气界面  $\text{CO}_2$  交换通量。

2 结果与分析

2.1 支流水-气界面  $\text{CO}_2$  通量

该时段内水-气界面  $\text{CO}_2$  通量呈现明显的空间变化(图 2)。三峡水库长江干流的通量为 ( $85.01 \pm 0.69$ )  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 朱衣河的通量分别为 ( $-49.57 \pm 3.93$ )、( $-73.26 \pm 2.72$ )、( $-30.38 \pm 2.72$ )  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 草堂河的通量分别为 ( $136.72 \pm 10.83$ )、( $81.43 \pm 6.02$ )、( $89.58 \pm 8.02$ )  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。朱衣河通量的总体表现为流中部吸收最大, 干支流交汇的河口吸收最小; 草堂河通量的总体表现为干支流交汇处释放量最大, 支流中部与回水区末端相对较小。针对本次监测成果可以看出, 同一河流不同空间位置  $\text{CO}_2$  通量具有明显差异, 位置毗邻的不同河流间  $\text{CO}_2$  通量也呈现显著的“源、汇”差异。

2.2 支流库湾水文情势

本次观测的水文情势结果如表 1 所示, 支流内部沿程水温分布如图 3 所示。朱衣河的表层水温高于草堂河, 同时朱衣河正处于水华过程中, 叶绿素 a 浓度远远高于草堂河。2 条支流的水温和浮游植物

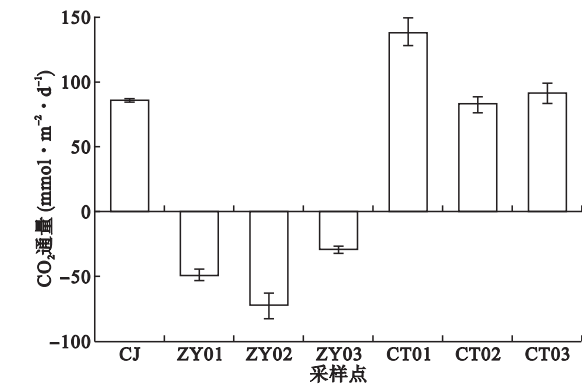


图 2 采样点水-气界面  $\text{CO}_2$  通量  
Fig.2 Air-water interfaces  $\text{CO}_2$  fluxes

表 1 采样点水文情势  
Table 1 Water regime of sampling sites

采样点	表层水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	底层水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	跃层厚度 ( $\text{m}$ )	叶绿素 a ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )
CJ	14.5	13.3	0.0	0.63
ZY01	18.6	13.3	4.0	98.00
ZY02	21.4	13.3	4.0	74.76
ZY03	21.1	13.3	4.5	78.82
CT01	14.8	13.0	2.5	0.91
CT02	17.9	13.0	2.0	0.42
CT03	17.2	13.0	4.0	0.32

呈现空间分布的特征, 并且 2 条支流的分布特征显著不同。

3 讨论

3.1  $\text{CO}_2$  释放通量的影响因素

水库温室气体中二氧化碳的释放通量受众多因素的影响, 包括水质参数、水体碳含量和气象条件等因素。本研究采用相关分析法对  $\text{CO}_2$  通量与水体理化指标(水温、电导率、pH、溶解氧、叶绿素 a 等)、环境因素(图 4) 进行相关分析, 各因素之间相关分析矩阵如表 2 所示。

水-气界面  $\text{CO}_2$  通量分别与叶绿素 a、pH、溶解氧呈显著的负相关。这 3 个水体理化指标与浮游植物的生长代谢密切联系。首先, 高叶绿素 a 浓度表征水体中浮游植物生物量越高, 同时也说明了浮游植物的光合作用越强烈。  $106\text{CO}_2 + 16\text{NO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-} + 122\text{H}_2\text{O} + 18\text{H}^+ \rightarrow \text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P} + 138\text{O}_2$ , 这个方程可以用来理解藻类生长对营养盐的吸收和对碳的固定(Stumm *et al.*, 1981)。浮游植物强烈的光合作用会大量吸收水体中  $\text{CO}_2$ , 引起水体  $\text{CO}_2$  不饱和, 水体较低的  $p(\text{CO}_2)$  会有利于大气环境中  $\text{CO}_2$  进入水体中(Tremblay *et al.*, 2005), 呈现为强烈吸收  $\text{CO}_2$  的“汇”。此外, 浮游植物的光合作用还造成了对碳的

表 2  $\text{CO}_2$  通量与环境因素相关分析矩阵  
Table 2 Correlation matrix of  $\text{CO}_2$  fluxes and environmental factors

指标	$\text{CO}_2$ 通量	叶绿素 a	电导率	pH	溶解氧	表层水温
叶绿素 a	-0.945 **					
电导率	0.354	-0.465				
pH	-0.968 **	0.958 **	-0.450			
溶解氧	-0.936 **	0.945 **	-0.317	0.939 **		
表层水温	-0.863 **	0.769 *	0.111	0.829 *	0.876 **	
气压	-0.721	0.777 *	-0.457	0.652	0.782 *	0.495

\* 表示在 0.05 水平下相关性显著, \*\* 表示在 0.01 水平下相关性显著。

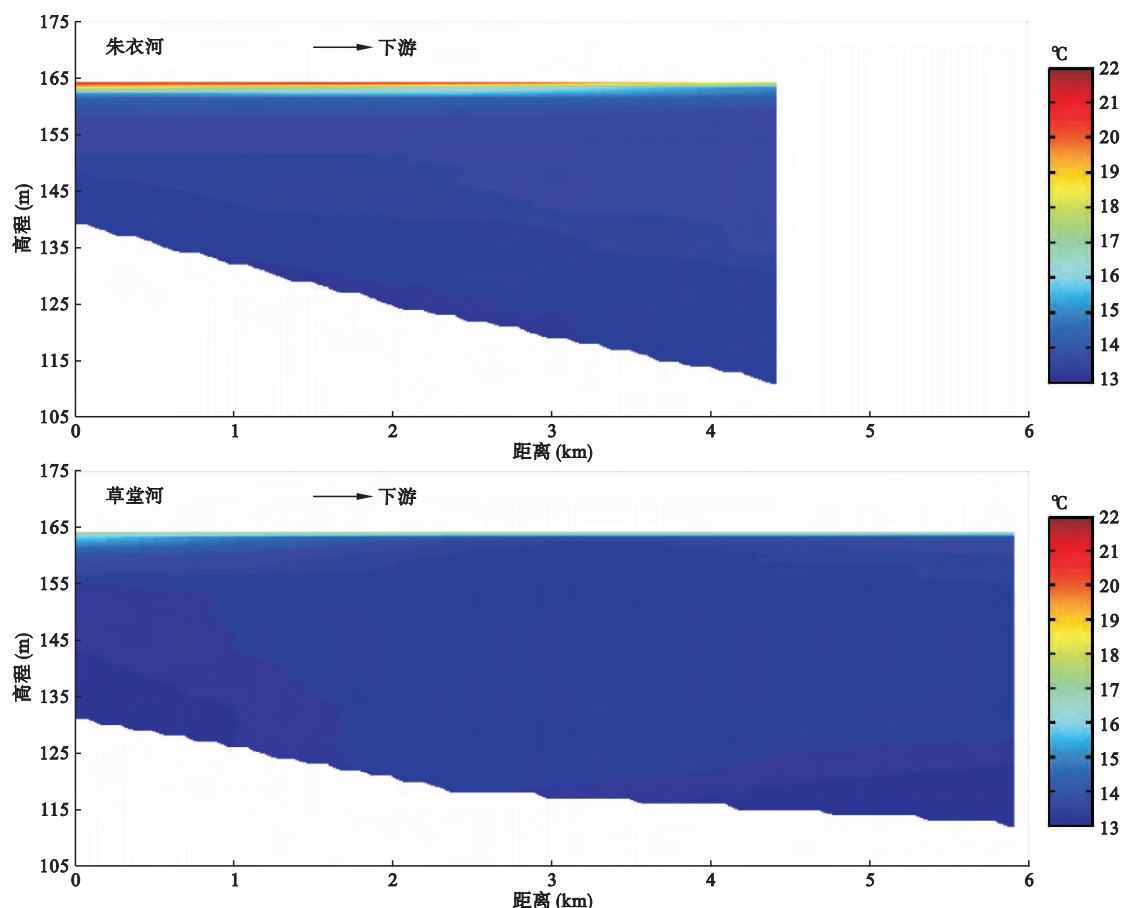


图3 朱衣河及草堂河水温剖面

Fig.3 Vertical temperature profile of tributaries

吸收固定转化利用程度增加,改变了水中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的分布,使得水中 pH 值升高,因此 pH 与  $\text{CO}_2$  通量呈现负相关 (Schrier-Uijl *et al.*, 2011; 蒋滔等, 2012)。浮游植物光合作用释放的  $\text{O}_2$  会导致表层水体溶解氧升高,这也是溶解氧与  $\text{CO}_2$  通量呈现负相关的原因。

表层水温与叶绿素 a、水-气界面  $\text{CO}_2$  通量、呈现相关关系。已有的研究表明,水温是限制浮游植物生长的主要因子之一 (Ji, 2008),适宜的表层水温有利于浮游植物的生长。季节变化及三峡库区特殊的调度方式,导致支流水体在春季有明显分层 (付莉等, 2015),春季水温分层发育导致水体混合层深度突然减小是春季水华暴发的直接诱因 (刘流等, 2012),表层水体受浮游植物光合作用的影响  $p(\text{CO}_2)$  较低,水体为  $\text{CO}_2$  的汇 (郭劲松等, 2011)。这是表层水温、水-气界面  $\text{CO}_2$  通量、叶绿素 a 三者之间均有较显著的相关的原因。

朱衣河不仅在水-气界面  $\text{CO}_2$  通量上与草堂河

和长江干流有明显差别,而且表层水温、叶绿素浓度、溶解氧浓度和 pH 值也明显高于草堂河和长江,这说明朱衣河区域受浮游植物光合作用影响较大,因而表现为吸收  $\text{CO}_2$  的“汇”,草堂河与长江干流一致,受浮游植物光合作用影响较小,表现为释放  $\text{CO}_2$  “源”。两条河流在碳的“源、汇”特征和基本水质参数上表现出的区别,也表明三峡水库蓄水后,这两条支流处于不同的营养体系。

通过以上分析可以看出,虽然水-气界面  $\text{CO}_2$  通量与叶绿素 a、pH、溶解氧、表层水温、均有较为显著的相关关系,并且这些因素之间还存在相关关系,但是表层水温和叶绿素 a (浮游植物生物量) 是影响  $\text{CO}_2$  通量的直接因素。由于 2 条支流库湾长度相近、位置毗邻,所以在泄水期长江干流对支流影响程度的不同,即水文情势差异是造成这两条支流水温和浮游植物生物量差异的潜在原因。

### 3.2 支流库湾水文情势差异的影响

研究表明,虽然朱衣河、草堂河地理长度相近、

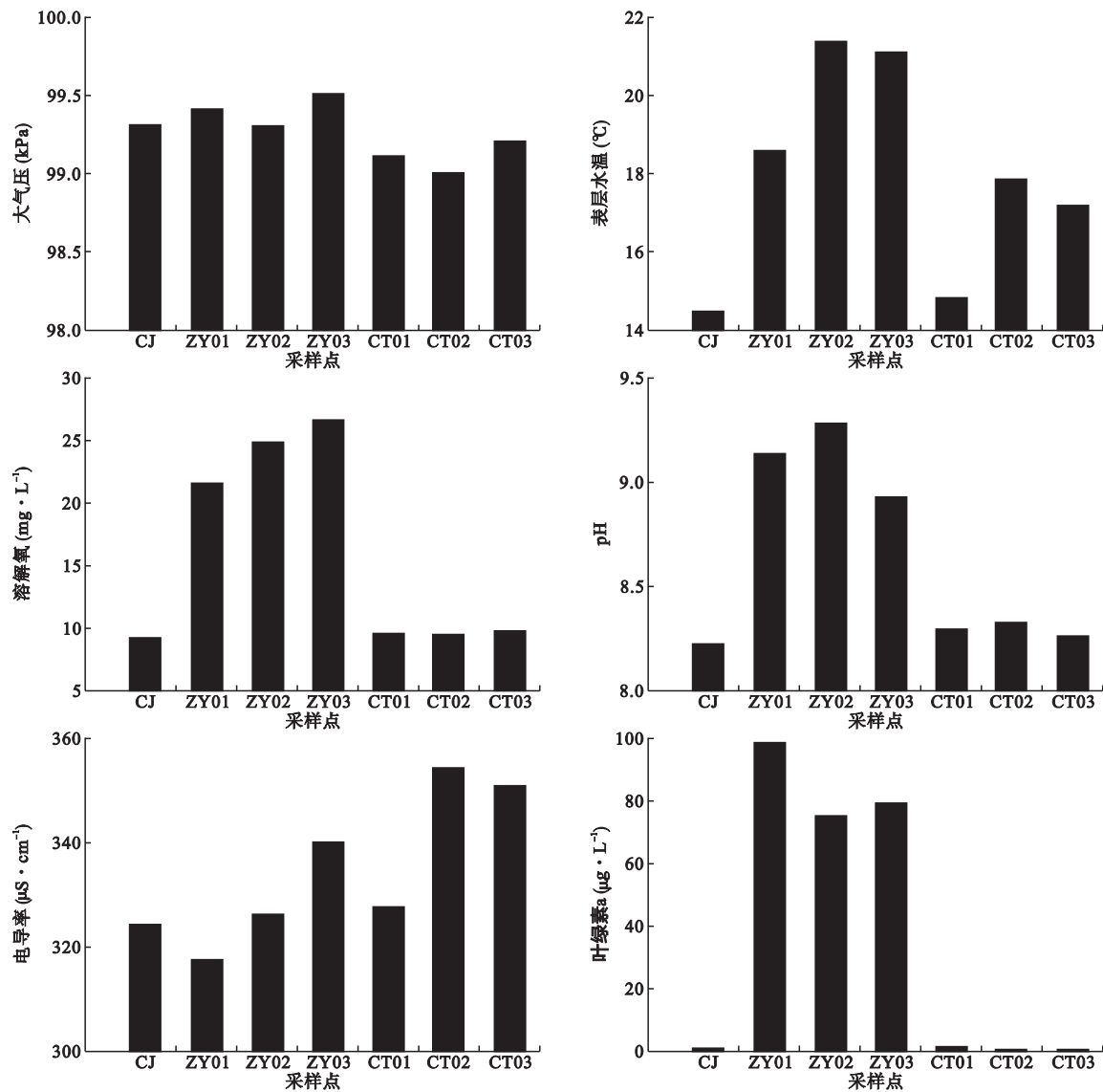


图4 采样点环境因子

Fig.4 Environmental factors of sampling sites

地理位置毗邻,但是在三峡水库在春季泄水期,朱衣河与草堂河干支流交汇处的流场有显著差异,流速呈空间分布特征,因此会造成两支流具有较大的水文情势差异。朱衣河流向为 $120^\circ$ ,与长江干流成 $60^\circ$ 角,支流水体正好顺势汇入长江,其河口断面的流速较小,长江的水体可以从河口断面的各个方向倒灌进入支流。3月为三峡水库的泄水期,长江干流主要从表层和中层倒灌入支流(罗光富,2014)。由于受长江干流影响相对较小,因此支流内部表层水温较高,为 $21.4 \sim 18.6^\circ\text{C}$ ,比长江高 $4.1 \sim 6.9^\circ\text{C}$ ,底层水温与长江均为 $13.3^\circ\text{C}$ ,从支流库湾末端到干支流交汇处,温跃层厚度保持 $4.0\text{ m}$ 左右。支流内部形成了稳定的水温分层,为浮游植物的生长提供

了良好的生境。浮游植物在良好的生境中不断生长、聚集,最终形成较高的浮游植物生物量,叶绿素a浓度 $74.76 \sim 98.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游植物的光合作用,不断地吸收水中的 $\text{CO}_2$ 导致朱衣河表现为吸收 $\text{CO}_2$ 的“汇”。

草堂河的流向为 $240^\circ$ ,与长江干流相逆,长江水体由惯性作用可以直接汇入草堂河,并且长江干流在与草堂河交汇处断面宽度缩小了 $60\%$ ,造成草堂河口的平均流速与流量都大,3月泄水期草堂河的流速特征表现为上层为长江倒灌水体,下层为草堂河向干流汇入水体。与朱衣河相比,草堂河倒灌水体界限清晰,水体体积大,流量大(罗光富,2014)。草堂河受长江干流影响相对较大,因此表



层水温较低,为 14.8~17.9 ℃,仅比长江高 0.3~3.5 ℃,底层水温为 13.0 ℃,比长江低 0.3 ℃,从支流库湾末端到干支流交汇处,温跃层厚度由 4.0 m 减小至 2.0 m。草堂河比朱衣河表层水温低 3.5~3.9 ℃,温跃层厚度小 2.0 m。这使得草堂河并没有像朱衣河一样形成浮游植物生长的良好生境,叶绿素 a 浓度仅有 0.32~0.91 μg · L<sup>-1</sup>,支流内较低的浮游植物生物量加上支流内较大的流速,使得草堂河表现为释放 CO<sub>2</sub>的“源”。

研究表明,支流在三峡库区内的空间差异(库中、库尾)会造成其水域生态系统的差别,继而会造成支流温室气体通量差异(李哲等,2013)。本次观测的结果也表明,朱衣河与草堂河虽然同处于库区中部,但由于具有显著的水文情势差异,因此支流温室气体通量也呈现显著的“源、汇”差异。

李哲等用“静态通量箱法”在三峡库区中部的澎溪河和库区尾部的龙溪河分别开展了水-气界面温室气体观测(李哲等,2013),并指出 2 条河流在

春季的 CO<sub>2</sub>通量约为-72~72 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>,与本文的观测结果相十分接近;在三峡库区中其他河流在夏季或秋季的水华期的研究结果(赵炎等,2011;王亮等,2012;李双,2014;李哲等,2014)也与本次观测相接近,因此本次观测具有一定代表性。

世界上主要水库、河流的水气界面 CO<sub>2</sub>交换通量如表 3 所示,可以看出,大多数河流都表现为释放 CO<sub>2</sub>的“源”,其中处于热带地区的河流释放量最大,亚热带河流次之,温带河流在三者中最低。水库水气界面 CO<sub>2</sub>的交换量明显低于河流,处于不同气候带水库的 CO<sub>2</sub>通量与河流类似,表现为热带地区最高,亚热带次之,温带最低,部分温带水库表现为吸收 CO<sub>2</sub>的“汇”。

对于三峡水库春季泄水期而言,干流水气界面 CO<sub>2</sub>交换通量,远远低于热带河流 Amazon,也低于同处于亚热带地区的西江和赣江,与温带河流 St. Lawrence 和 Ottawa CO<sub>2</sub>交换通量相接近,这说明三峡水库蓄水后,长江干流水气界面 CO<sub>2</sub>交换通量与

表 3 世界上主要水库、河流水气界面 CO<sub>2</sub>通量  
Table 3 Air-water interfaces CO<sub>2</sub> fluxes of main reservoirs and rivers in the world

水体类型	名称	国家	气候带	CO <sub>2</sub> 通量( mmol · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )	文献
水库	Petit Saut	圭亚那	热带	101.36	St Louis <i>et al.</i> 2000
	Lokkaf	芬兰	温带	24.00	Huttunen <i>et al.</i> 2002
	Porttipahta	芬兰	温带	35.00	Huttunen <i>et al.</i> 2002
	Dworshak	美国	温带	-23.41	Soumis <i>et al.</i> 2004
	Shasta	美国	温带	30.82	Soumis <i>et al.</i> 2004
	Curua-Una	巴西	热带	65.91	dos Santos <i>et al.</i> 2006
	Tucurui	巴西	热带	192.61	dos Santos <i>et al.</i> 2006
	Samuel	巴西	热带	361.77	St Louis <i>et al.</i> 2000
	Laforge-1	加拿大	温带	52.27	St Louis <i>et al.</i> 2000
	Eastmain Opinica	加拿大	温带	78.41	St Louis <i>et al.</i> 2000
	Kinsbasket	加拿大	温带	12.05	St Louis <i>et al.</i> 2000
	洪家渡水库	中国	亚热带	11.25	彭希等 2013
	万安水库	中国	亚热带	12.74	梅航远等 2011
	新安江水库	中国	亚热带	7.03	姚臣谔等 2010
	丰满水库	中国	温带	-5.6	吴以赢等 2011
	镜泊湖水库	中国	温带	-7.8	吴以赢等 2011
河流	Amazon	巴西	热带	559.30	Ternon <i>et al.</i> 2000
	西江	中国	亚热带	273.55	Yao <i>et al.</i> 2007
	St. Lawrence	加拿大	温带	118.29	Hélie <i>et al.</i> 2002
	Ottawa	加拿大	温带	105.43	Telmer <i>et al.</i> 1999
	赣江	中国	亚热带	201.86	梅航远等 2011
	香溪河( 秋季)	中国	亚热带	-4.74	姚臣谔等 2010
	长江干流( 香溪镇段)	中国	亚热带	83.70	姚臣谔等 2010
	彭溪河	中国	亚热带	17.04	李哲等 2013
	龙溪河	中国	亚热带	175.20	李哲等 2013

亚热带、温带河流排放水平相当,在 $\text{CO}_2$ 交换通量这一点上依然保持了河流的状态。三峡水库支流如香溪河、朱衣河、龙溪河、彭溪河则表现为吸收 $\text{CO}_2$ 的“汇”,或者微弱的释放 $\text{CO}_2$ “源”与亚热带和温带水库相类似,但是草堂河与长江干流相一致,表现为明显释放 $\text{CO}_2$ 的“源”,保持了河流的排放水平。这说明受三峡水库蓄水的影响,三峡水库支流水气界面 $\text{CO}_2$ 交换通量有显著的类型变化,部分支流 $\text{CO}_2$ 交换通量趋近于水库水平,部分支流趋近与河流水平。

#### 4 结 论

在春季泄水期,三峡库区中部2条不同支流库湾具有截然不同 $\text{CO}_2$ 通量特征。朱衣河表现为吸收 $\text{CO}_2$ 的“汇”,其通量变化范围为 $-73.26 \sim -30.38 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;草堂河则表现为释放 $\text{CO}_2$ “源”,其通量变化范围为 $81.43 \sim 136.72 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

三峡水库干流水气界面 $\text{CO}_2$ 交换通量与亚热带、温带河流排放水平相当,在 $\text{CO}_2$ 交换通量这一点上依然保持了河流的状态;支流水气界面 $\text{CO}_2$ 交换通量有显著的类型变化,朱衣河回水区 $\text{CO}_2$ 交换通量趋近于水库水平,而草堂回水区 $\text{CO}_2$ 交换通量趋近与河流水平。这说明受三峡水库蓄水的影响,部分支流不但发生水文情势的转变,而且还发生水环境和水生态的转变,导致其水气界面的碳交换从“河流型”转换为“水库型”。

$\text{CO}_2$ 通量与表层水温、浮游植物初级生产力呈相关关系。由于受到工程调度影响,干流、支流回水区不同水域水文情势的差别,导致了浮游植物生物量和碳转换利用强度的空间差异,可能是形成三峡水库水气界面 $\text{CO}_2$ “源、汇”特征分布高度异质性的主要原因。

#### 参考文献

付 莉,张 磊,蔚建军,等. 2015. 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长. 环境工程学报, (5): 2265-2271.  
郭劲松,蒋 滔,李 哲,等. 2011. 三峡水库澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析. 水科学进展, 22(6): 829-838.  
蒋 滔,郭劲松,李 哲,等. 2012. 三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探. 环境科学, 33(5): 1463-1470.  
李 双. 2014. 三峡水库库中地区典型干、支流水体 $p(\text{CO}_2)$ 的时空分布及影响因素研究(硕士学位论文). 上海: 上海大学.  
李 哲,白 镭,郭劲松,等. 2013. 三峡水库两条支流水-

气界面 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 通量比较初探. 环境科学, 34(3): 1008-1016.  
李 哲,姚 骁,何 萍,等. 2014. 三峡水库澎溪河水-气界面 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 扩散通量昼夜动态初探. 湖泊科学, 26(4): 576-584.  
刘 流,刘德富,肖尚斌,等. 2012. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响. 环境科学, 33(9): 3046-3050.  
罗光富. 2014. 支流河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响(硕士学位论文). 上海: 华东师范大学.  
梅航远,汪福顺,姚臣谔,等. 2011. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究. 环境科学, 32(1): 58-63.  
彭 希,刘丛强,王宝利,等. 2013. 河流-水库体系水体表层 $p\text{CO}_2$ 时空变化特征及其扩散通量——以六冲河、洪家渡水库,红枫湖为例. 地球与环境, (2): 97-103.  
王 亮,肖尚斌,刘德富,等. 2012. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析. 环境科学, 33(5): 1471-1475.  
吴以赢,汪福顺,刘丛强,等. 2011. 中国东北泥炭发育地区人工水库的 $\text{CO}_2$ 调控作用. 地球化学, 40(6): 545-551.  
姚臣谔,汪福顺,吴以赢,等. 2010. 新安江水库水体春季二氧化碳分压的分布规律研究. 地球环境学报, 1(2): 150-156.  
赵 炎,曾 源,吴炳方,等. 2011. 三峡水库香溪河支流流域温室气体排放通量观测. 水科学进展, 22(4): 546-553.  
周广胜. 2003. 全球碳循环. 北京: 气象出版社.  
Casper P, Maberly SC, Hall GH, et al. 2000. Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere. Biogeochemistry, 49: 1-19.  
dos Santos MA, Rosa LP, Sikar B, et al. 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. Energy Policy, 34: 481-488.  
Hélie JF, Hillaire-Marcel C, Rondeau B. 2002. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River: Isotopic and chemical constraint. Chemical Geology, 186: 117-138.  
Huttunen JT, Väisänen TS, Heikkinen M, et al. 2002. Exchange of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  between the atmosphere and two northern boreal ponds with catchments dominated by peatlands or forests. Plant and Soil, 242: 137-146.  
Ji ZG. 2008. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Hoboken: John Wiley & Sons.  
Joyce J. 2003. Physical controls on methane ebullition from reservoirs and lakes. Environmental & Engineering Geoscience, 9: 167-178.  
Lambert M, Fréchette JL. 2005. Analytical techniques for measuring fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from hydroelectric reservoirs and natural water bodies// Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, eds. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments, Environmental Science Series. New York: Springer-Verlag: 37-60.  
Pachauri RK, Reisinger A. 2007. Contribution of working groups

- I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104.
- Schrier-Uijl AP, Veraart AJ, Leffelaar PA, et al. 2011. Release of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, **102**: 265–279.
- Scranton MI, Patrick C, Angelis MA, et al. 1993. The importance of episodic events in controlling the flux of methane from an anoxic basin. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**: 491–507.
- Smith LK, Lewis Jr WM, Chanton JP, et al. 2000. Methane emissions from the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Biogeochemistry*, **51**: 113–140.
- Soumis N, Duchemin É, Canuel R, et al. 2004. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States. *Global Biogeochemical Cycles*, **18**, DOI: 10.1029/2003GB002197View.
- St Louis VL, Kelly CA, Duchemin É, et al. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, **50**: 766–775.
- Stumm W, Morgan JJ. 1981. *Aquatic Chemistry* (2nd ed.). New York: Wiley & Sons.
- Telmer K, Veizer J. 1999. Carbon fluxes, pCO<sub>2</sub> and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: Carbon isotope perspectives. *Chemical Geology*, **159**: 61–86.
- Ternon JF, Oudot C, Dessier A, et al. 2000. A seasonal tropical sink for atmospheric CO<sub>2</sub> in the Atlantic ocean: The role of the Amazon River discharge. *Marine Chemistry*, **68**: 183–201.
- Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, et al. 2005. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes. *Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*, Environmental Science Series. New York: Springer-Verlag: 529–560.
- UNESCO/IHA. 2008. Assessment of the GHG status of freshwater reservoirs: Scoping paper. Working on Group on Greenhouse Gas Status of Freshwater Reservoirs. International Hydrological Programme. 28. IHP/GHG-WG/3.
- Yao G, Gao Q, Wang Z, et al. 2007. 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*, **376**: 255–266.
- 
- 作者简介 程 瑶,男,1982年生,讲师,博士研究生,主要研究方向为河流生态修复。E-mail: chengyao1108@163.com  
责任编辑 魏中青
-