

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.071

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



三峡库区低水位运行期库尾支流筑坝对其水体 CO₂ 分压及排放的影响

徐强,李宏,白小霞,程呈,李琨,何强

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:为探究三峡库区低水位运行期间库尾支流河坝对其上下游水体 CO₂ 分压、水气界面扩散通量的影响,于2019年8月对三峡库区库尾典型筑坝支流御临河进行采样研究。原位测定关键理化环境因子,采用顶空平衡法,结合亨利定律和薄边界层理论计算水体 CO₂ 分压(p_{CO_2})及水气界面扩散通量(Flux(CO₂))。结果表明,库区低水位运行期御临河水体表层 p_{CO_2} 为 54.55~336.73 Pa,均值为 206.68 Pa,Flux(CO₂)为 1.65~67.84 mmol/(m²·d),均值为 39.01 mmol/(m²·d),表现为大气 CO₂ 排放源排放水平显著高于三峡库区中下游支流。御临河受其下游筑坝影响,河坝上游较近河段表现为湖泊型水体(流速 $v < 0.05$ m/s),上游较远河段和下游表现为过渡型水体($v = 0.05 \sim 0.2$ m/s)。湖泊型水体 p_{CO_2} 和 Flux(CO₂)显著低于过渡型水体,且 p_{CO_2} 随水深增加迅速增大。相关性分析及多元逐步回归分析表明,库区低水位运行期御临河 p_{CO_2} 及 Flux(CO₂)受水温、pH、DO、Chl-a 等理化环境指标影响显著,Chl-a 是影响 p_{CO_2} 的最主要因素, p_{CO_2} 是影响 Flux(CO₂)的最主要因素。

关键词:三峡库区;筑坝支流;二氧化碳分压;二氧化碳扩散通量;影响因素

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)06-0185-11

The impact of damming on the partial pressure and release of CO₂ in tail tributary of the Three Gorges Reservoir during low water level period

Xu Qiang, Li Hong, Bai Xiaoxia, Cheng Cheng, Li Kun, He Qiang

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To investigate the impact of damming on CO₂ partial pressure and CO₂ release from water-air interface in tail tributary of the Three Gorges Reservoir during low water level period, the Yulin River, one of the dam-building tail tributaries of Three Gorges Reservoir was sampled in August 2019. The key physical and chemical environmental factors were measured in situ, the CO₂ partial pressure (p_{CO_2}) and water-air interface diffusion flux (Flux(CO₂)) were calculated by headspace equilibrium method combined

收稿日期:2020-03-26

基金项目:国家自然科学基金(51779020);国家重点研发计划(2017YFC0404703)。

作者简介:徐强(1994-),男,主要从事水体污染控制与修复技术研究,E-mail:xq9408@126.com。

何强(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:hq0980@126.com。

Received:2020-03-26

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51779020); National Key Research and Development Project(2017YFC0404703)

Author brief: Xu Qiang (1994-), main research interest: water pollution control and repair technology, E-mail: xq9408@126.com.

He Qiang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hq0980@126.com.

with Henry's law and thin boundary layer theory. The results show that the surface water p_{CO_2} of the Yulin River during low water level period is 54.55 ~ 336.73 Pa, with an average of 206.68 Pa, the Flux(CO_2) is 1.65 ~ 67.84 mmol/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), with an average of 39.01 mmol/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), which is the source of atmospheric CO_2 emission. The emission level of CO_2 from the Yulin River is significantly higher than that of the tributaries in the middle and lower reaches of the Three Gorges Reservoir area. The near reach of the upstream of the dam is lake-type's water (velocity < 0.05 m/s), while the far reach of the upstream and downstream are transition-type's water (velocity: 0.05 ~ 0.2 m/s). The p_{CO_2} and Flux(CO_2) of lake-type's water are significantly lower than that of transition-type's water, and p_{CO_2} increases rapidly with the increase of water depth. Correlation analysis and multiple stepwise regression analysis show that p_{CO_2} and Flux(CO_2) in the Yulin River during low water level period were significantly affected by physical and chemical environmental indexes such as water temperature, pH, DO and Chl-a, and Chl-a is the most important factor affecting p_{CO_2} , while p_{CO_2} is the most important factor affecting Flux(CO_2).

Keywords: the Three Gorges Reservoir; dam-building tributary; partial pressure of carbon dioxide; diffusion flux of carbon dioxide; influence factors

碳循环与全球气候变化有着密不可分的联系,探究碳迁移转化机制、估算全球碳排放意义重大。已有研究表明,河流筑坝形成的水库对全球温室气体排放有重要贡献,近年来受到越来越多关注^[1-2]。Barros 等^[3]估算全球人工水库 CO_2 排放量 48 Tg/a, Li 等^[4]对中国已有湖泊和水库 CO_2 排放研究进行总结,估算中国湖泊和水库 CO_2 排放量为 25.2 (20.8~29.5) Tg/a, 并指出目前针对人工水库的温室气体排放研究存在诸多空白区域,使得对 CO_2 等温室气体排放量的估值仍存在很大不确定性。

三峡水库是亚热带气候条件下的超大型水库,为满足防洪、发电和航运等要求,库区水位按 175 m (枯水期)—145 m (汛期)—155 m (消落期) 周期运行,与已有较多研究的北方水库和热带水库有显著差异^[5]。同时,三峡库区内长江支流众多,为了减小支流消落带面积、营造稳定人居环境、利于防洪灌溉或水力发电等,在库区支流河道上筑坝现象普遍;第一次全国水利普查数据^[6]显示,截至 2011 年,三峡库区内仅嘉陵江、乌江支流部分河段上便有 536 座大坝。密集的筑坝显著地改变了水体物理、化学及生物特性^[7],使得河流湖沼化发育明显,对水体 CO_2 产排过程产生重大影响^[1]。然而,目前针对三峡库区温室气体产排机制的研究仍然较少^[8],有限的研究也主要集中于库区中下游干支流常年回水区域^[9-10],对库尾支流的研究较少,且未重点关注支流筑坝对其自身水体温室气体产排的影响。事实上,受现有调度方式的影响,库尾支流形成了与库中、库

首支流不同的水力场,其受回水顶托的影响较处于常年回水区的库首支流弱,回水区水体滞留时间相应较短,导致支流生境特征、生态结构和功能与库中、库首支流存在显著差异^[11],由此可能带来不同的温室气体产排特征。

三峡库区处于低水位运行期时(6月—9月),长江干流水位低,位于库尾的支流筑坝使得其河坝上下游水位高差较大,水动力条件差异明显,河坝上游水体水力停留时间显著大于下游,由此可能导致支流河坝上下游水体 CO_2 产排过程存在较大差异。研究此调度阶段库尾筑坝支流 CO_2 产排过程及其影响因素对全面理解库区碳循环过程具有重要的科学意义。鉴于此,笔者以三峡库区库尾典型筑坝支流——御临河为研究对象,测定库区低水位运行期间该河流生态调节坝上下游水体 CO_2 分压和水-气界面扩散通量,并分析其影响机制,以期为进一步理解三峡库区支流筑坝对其 CO_2 产排的影响、估算三峡水库在全球 CO_2 排放中的贡献等科学问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

御临河,原名太洪江,发源自四川省大竹县华蓥山脉,止于重庆市渝北区洛碛镇箭沱村与江北区五宝镇新山村之间的长江口,全长约 218.2 km,河口多年平均流量 50.72 m^3/s ,流域面积 3 861 km^2 。御临河地处亚热带大陆性季风性气候区,温湿凉热、四季分明,城区最高气温可达 40 $^{\circ}\text{C}$,年均降雨量达

1 000~1 400 mm^[12]。御临河与长江汇合口距下游三峡大坝约 548 km,其作为三峡水库库尾重要一级支流,受到库区周期性调度影响较大。研究区域位于重庆市渝北区境内御临河下游部分河段(29°39'0"—29°48'0"N,106°48'0"—106°55'30" E)(图 1)。

御临河生态调节坝(29°39'31.95"N,106°52'11.55"E)

位于御临河下游河段洛碛镇郑家湾,距御临河与长江汇合口约 2.7 km(如图 1 所示)。生态调节坝由景观钢坝、调度控制闸(兼导流明渠)组成,水库正常蓄水位 172.2 m,正常库容 1 082 万 m³,工程等级为 III 等中型工程。生态调节坝上游形成的河道型水库为三峡水库的库中库。

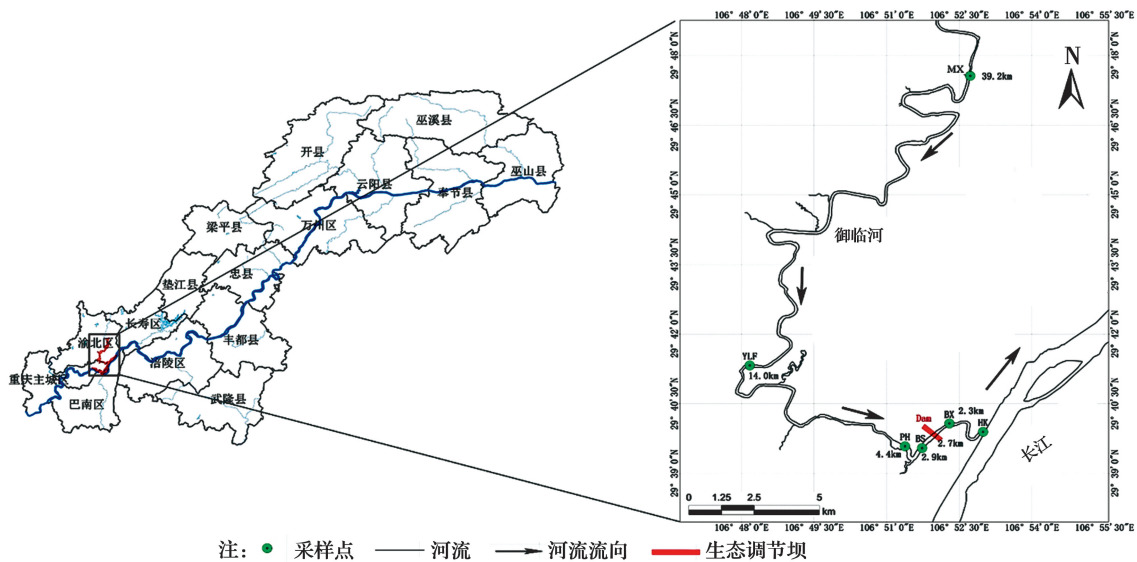


图 1 三峡库区御临河区位及采样点分布图

Fig. 1 The location of the Yulin River in the Three Gorges Reservoir area and the sampling sites

1.2 采样与分析方法

1.2.1 水样采集及指标测定方法 2019 年 8 月 21 日—8 月 22 日对御临河河口至梅溪河段进行走航式采样监测,根据长江海事局水位公告,采样期间为三峡库区低水位运行期,三峡大坝坝前水位 146.1 m,御临河河口处长江水位 159.0 m,御临河生态调节坝蓄水位 172.2 m。根据研究内容和御临河流域情况,共布设 6 个垂直采样点,由上游至下游依次为:梅溪(MX,上游自然河段,水深 7.5 m)、御临府(YLF,城市开发区,水深 10.5 m)、排花(PH,下游河湾,水深 17.0 m)、坝上(BS,生态调节坝上游 200 m,水深 17.5m)、坝下(BX 生态调节坝下游 400 m,水深 5.5 m)、河口(HK,御临河与长江汇合口,水深 7.5 m)。各垂直采样点均位于河道深泓线上,位置见图 1,现场情况如图 2。

利用智能多频走航式多普勒剖面仪(RiverSurveyor M9,美国 SonTek)对御临河各取样断面进行走航观测,测定各个河流断面形状、水深、流速、流量等水文



图 2 御临河各采样点现场图

Fig. 2 Scenes of the sampling sites in the Yulin River

指标。使用容量为 5 L、带有配重的有机玻璃采样器完成河流水体的垂向分层采样。根据各采样点河流水深,分层采集河流表层 0.5 m、底层 0.5 m 及中间 3~4 层水体。使用密闭性良好的棕色血清瓶(容量 130 mL,带厚度为 2 cm 的硅胶塞)原位密闭封装水样,用于水体二氧化碳分压(p_{CO_2})测定,每个取样点位做三平行采样。同时使用 1.0 L 聚乙烯采样瓶采集水样,用于实验室测定叶绿素 a(Chl-a)等指标。使用 100 mL 聚乙烯医用灭菌针筒抽取水面上方

1.0 m处环境空气,注入提前抽好真空的铝箔集气袋(E-Switch牌),用于实验室测定水面上方空气二氧化碳分压 $p_{\text{CO}_2(\text{air})}$ 。所有水样及气样采集后均放入冷藏箱低温保存,当天运回实验室,并于 48 h 内分析测试完毕。

使用 Hydrolab DS5X 便携式多参数水质分析仪(美国 HACH)原位逐米测定水体温度(T)、pH、DO;使用便携式浊度仪(美国 HACH)原位测定水体浊度;使用手持式风速计测定环境风速及温度;用丙酮萃取分光光度法测定叶绿素 a(Chl-a)。野外取样检测所用设备仪器均在使用前通过标准校正方法完成校正。

1.2.2 CO_2 分压及水-气界面扩散通量计算 水体二氧化碳分压(p_{CO_2})采用顶空平衡法,利用亨利定律计算得到^[13-14]。往装满水样的 130 mL 棕色密闭血清瓶中通入 50 mL 高纯氮气(99.999%),排出 50 mL水后瓶内上部形成顶空。剧烈摇晃震荡顶空瓶 60 s 后于室温(25 °C)静置 15 min,使瓶内气液两相达到平衡状态。抽取上部顶空气体,利用气相色谱仪测定气体 CO_2 含量。

p_{CO_2} 利用亨利定律,通过式(1)计算得到^[15]。

$$p_{\text{CO}_2} = C_{\text{aq}}/K_{\text{H}} \quad (1)$$

式中: p_{CO_2} 为水体 CO_2 分压,Pa; K_{H} 为亨利系数^[16],mol/(L·Pa); C_{aq} 为水体 CO_2 浓度,mol/L,采用式(2)进行计算^[17]。

$$C_{\text{aq}} = \frac{P}{RT}(K_{\text{H}} \cdot RT + V_{\text{g}}/V_{\text{l}}) \quad (2)$$

式中: P 为血清瓶内气液两相平衡体系上部顶空 CO_2 分压,Pa,由气相色谱实测得到; R 为气体常数,L·Pa/(mol·K); T 为平衡体系温度,K; V_{g} 为平衡体系内顶空体积,L; V_{l} 为平衡体系内液相体积,L。

CO_2 水气界面扩散通量[Flux(CO_2)]利用薄边界层模型法,通过式(3)计算得到^[18]。

$$\text{Flux}(\text{CO}_2) = K_{\text{T}} \cdot K_{\text{H}}[p_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2(\text{air})}] \quad (3)$$

式中: K_{T} 为水-气界面 CO_2 的传输系数,cm/h,通过式(4)计算得到^[19]。

$$K_{\text{T}} = K_{600} \times \left(\frac{600}{S_{\text{cCO}_2}}\right)^n \quad (4)$$

式中: K_{600} 通过式(5)计算得到^[13]; S_{cCO_2} 是给定温度下的斯密特数,通过式(6)计算得到^[20]。

$$K_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7} \quad (5)$$

$$S_{\text{cCO}_2} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (6)$$

式中: t 为表层水温度,°C; U_{10} 为取样点水面上方 10 m 处风速,m/s,可由式(7)计算得到^[21];式(4)中 n 为斯密特数指数,取决于 U_{10} (当 $U_{10} > 3.7$ m/s 时, $n=0.5$;当 $U_{10} < 3.7$ m/s 时, $n=0.75$)。

$$U_{10} = 1.22U_1 \quad (7)$$

式中: U_1 为取样点水面上方 1.0 m 处平均风速,m/s。

1.3 数据分析方法

使用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析,包括数据正态分布检验、Spearman 相关性分析和一元回归、多元线性逐步回归分析,并采用 Origin 2018 软件完成制图。

2 结果与讨论

2.1 御临河各取样点理化参数分布特征

三峡库区低水位运行期御临河生态调节坝上下游流速差异明显。根据流速情况,可将河道型水库划分为河流型水体($v > 0.2$ m/s)、过渡型水体($v = 0.05 \sim 0.2$ m/s)和湖泊型水体($v < 0.05$ m/s)^[22]。根据监测结果,生态调节坝(Dam)至上游 YLF 采样点间河道(BS、PH、YLF)水体流速缓慢,介于 0.02~0.03 m/s之间,属于典型的湖泊型水体,上游距坝较远的 MX 采样点($v = 0.06$ m/s)属于过渡型水体,流速从上游至调节坝呈现逐渐递减的规律。生态调节坝下游(BX、HK)受调节坝溢流跌水冲击影响较大,其河面较窄,流速显著大于上游,介于 0.12~0.16 m/s之间,属于过渡型水体。

各采样点关键理化指标监测结果如图 3 所示。受夏季高温影响(表层水温 31.24~35.20 °C),HK、BS、PH、YLF 等 4 个采样点水温随水深的变化均存在拐点,垂向分层现象明显。其中,BS、PH、YLF 等 3 个采样点拐点出现在水深 3 m 处,HK 采样点水体紊动性较强,拐点出现在水深 5 m 处,拐点以上水温变化速率(0.48~0.89 °C/m)显著大于拐点以下(0.11~0.26 °C/m)。MX、BX 两个采样点剖面水温(T)随水深(Depth)变化极小,未出现分层现象。其原因是水体夏季温度分层现象受气象及水文等因素多重影响,MX 采样点位于御临河上游自然河段,受筑坝及人类活动影响较小,水深较浅(7.5 m),流速在生态调节坝上游 4 个采样点中最大,故水温无明显分层;BX 采样点水深最浅(5.5 m),受调节坝溢流跌水冲刷,平均流速最大($v = 0.16$ m/s),上下层水体混合均匀,难以形成温度垂向分层。

如图 3 所示,各采样点 DO 变化差异明显。HK、BX、BS、PH、YLF、MX 等 6 个采样点表层水体 DO 饱和度分别为 108%、119%、221%、246%、184%、98%,均处于高度饱和或过饱和状态。从采样点剖面垂向变化上看,生态调节坝上游湖泊型水体河段中 BS、PH、YLF 等 3 个采样点剖面 DO 随水深的增加显著降低,且均在水深 6~7 m 处形成明显的 DO 变化拐点,拐点以上 DO 变化速率[1.14~1.76 (mg/L)/m]远大于拐点以下[0.10~0.33 (mg/L)/m]。对比叶绿素 a(Chl-a)的分布特征发现,各采样点剖面 Chl-a 随水深变化规律与 DO 基本一致,且 BS、PH、YLF 等 3 个采样点剖面 Chl-a 亦在水深 6 m 处形成变化拐点。对 DO 与 Chl-a 进行相关性分析,结果表明,二者正相关性非常显著($p < 0.01$)。其原因为筑坝导致坝前水位升高、流速减缓、营养盐堆积,进而形成了良好的浮游植物、藻类生长环境,夏季温度较高,表层水体光照充足,浮游植物及藻类进行光合作用不断向水体中释放 O₂。同时,光照强度随水深增大而迅速减弱,导致光合作用产 O₂ 强度衰减,Chl-a 与 DO 同步降低并形成一致的变化拐点。过渡型水体河段中 HK、BX、MX 等 3 个采样点剖面 DO 和 Chl-a 浓度变化幅度远小于其余采样点,分析认为, HK、BX、MX 等 3 个采样点水深较小、流速较大,不利于表层水体中浮游植物的稳定、大量增殖,导致其水中浮游植物量和光合作用强度较小且在剖面垂向上无明显变化。

pH 值受流域岩性、气候、碳酸盐平衡、光合/呼吸作用平衡等多因素影响,整体上看,御临河各采样点水体 pH 值均为碱性(7.50~9.39)(见图 3)。从上下游空间变化上看,各采样点表层水体 pH 值大小差异明显,表现为湖泊型水体河段 pH 值(8.90~9.39)显著大于过渡型水体河段(8.19~8.37);从水体剖面 pH 垂向分布变化来看,各采样点剖面 pH 变化与各自 DO、Chl-a 变化趋势一致,采样点间差异明显。湖泊型水体河段 3 个采样点 pH 值随水深增加而降低的幅度明显大于过渡型河段,分别为 9.39~7.55、9.31~7.51、8.90~7.67,极差均超过 1.2,这与李双等^[23]对梅溪河的观测结果相似。

2.2 御临河采样点剖面 p_{CO₂} 分布特征分析

图 4 为御临河各采样点水体剖面 p_{CO₂} 分布情况。从图 4 可看出,各采样点间表层水体 p_{CO₂} 有显著差异,

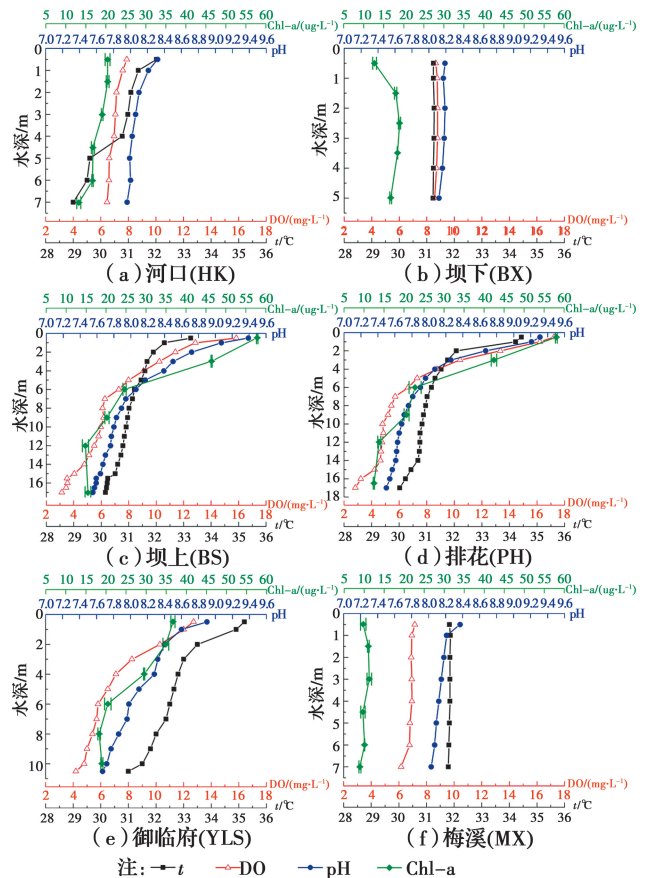


图 3 御临河各采样点水温(t)、DO、pH、Chl-a 剖面分布
Fig. 3 Temperature (t), DO, pH and Chl-a distribution profile at different sampling sites of the Yulin River

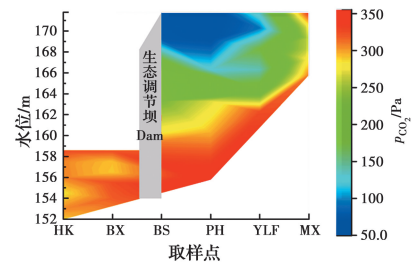


图 4 御临河水体二氧化碳分压(p_{CO_2})空间分布格局
Fig. 4 Spatial pattern of carbon dioxide partial pressure (p_{CO_2}) in the Yulin River

介于 54.55~336.73 Pa 之间,平均值为 206.68 Pa。对 6 个采样点表层水体 p_{CO_2} 的大小排序为: MX (336.73 Pa) > HK (323.78 Pa) > BX (322.05 Pa) > YLF (137.16 Pa) > BS (65.81 Pa) > PH (54.55 Pa), 湖泊型水体河段 (BS、PH、YLF) 表层水体 p_{CO_2} (均值 85.84 Pa) 显著低于过渡型水体河段 (HK、BX、MX) (均值 327.52 Pa), 从生态调节坝上游 p_{CO_2} 逐步升高。研究区域表层水体 p_{CO_2} 是采样点水面上方环境空气 CO₂ 分压的 1.12~6.55 倍, 为大气环境的潜在

CO₂ 排放源。湖泊型水体河段从表层至底层 p_{CO_2} 出现了明显的分层现象, p_{CO_2} 随水深的加大而急剧增大, 变化范围为(85.84±36.58)~(338.96±11.74) Pa, 底层水体 CO₂ 达到高度过饱和。过渡型水体河段 p_{CO_2} 随水深变化不大, 但均为高度过饱和, 变化范围为(281.32±14.30)~(327.52±6.55) Pa。

2.3 御临河各采样点水-气界面 CO₂ 扩散通量

如图 5 所示, 御临河水-气界面 CO₂ 扩散通量 [Flux (CO₂)] 变化范围为 1.65~67.84 mmol/(m²·d), 最小值出现在 PH, 最大值出现在 HK, 平均值为 39.01 mmol/(m²·d), 各采样点 Flux(CO₂) 差异明显。从空间分布上看, 各采样点水体均表现为大气环境的碳源, 不断向环境中释放 CO₂, 但湖泊型水体河段 Flux(CO₂) (1.65~26.84 mmol/(m²·d), 均值为 10.96 mmol/(m²·d)) 显著低于过渡型水体河段(66.45~67.84 mmol/(m²·d), 平均值为 67.06 mmol/(m²·d)), 与表层水体 p_{CO_2} 变化趋势一致, Flux (CO₂) 从生态调节坝至上游升高趋势明显。

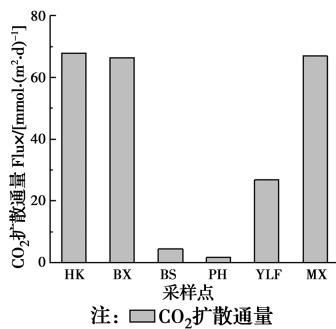


图 5 御临河不同采样点 CO₂ 扩散通量 Flux (CO₂)

Fig. 5 Carbon dioxide flux at different sampling sites of the Yulin River

2.4 御临河水体 p_{CO_2} 、Flux (CO₂) 与关键环境因子关系

河流水体理化环境对水生生物的生长代谢有显著影响, 最终形成水体 CO₂ 分压和水-气界面扩散排放时空格局^[24-25]。通过对御临河 p_{CO_2} 、Flux(CO₂)

与水体各参数的相关性分析, 探究其关键环境驱动因子及影响机制。利用 SPSS 22.0 软件进行分析, 首先对数据进行正态分布检验, 结果显示其不服从正态分布, 故相关性分析时采用 Spearman 相关系数, 分析结果如表 1 所示。

根据表 1 可知, 御临河水体 p_{CO_2} 与叶绿素 a (Chl-a) 呈显著负相关(相关系数 $R = -0.631$, $p < 0.01$), 说明御临河水体 p_{CO_2} 受浮游植物及藻类的光合作用影响明显, 这与 Neal 等^[26] 对英国泰晤士河的研究结果一致。根据御临河水体 p_{CO_2} 的监测结果, 在空间分布上, 御临河表层 p_{CO_2} 整体表现为生态调节坝上游近坝水体显著小于下游, 从调节坝至上游呈升高趋势。分析原因, 可能是调节坝上游湖泊型水体河段 Chl-a 含量高, 水体中浮游藻类、植物远多于下游, 光合作用消耗大量 CO₂; 而下游水体扰动大, 水生生物呼吸作用释放 CO₂ 占主导。上游随着与生态调节坝距离的增加, 水体受筑坝导致营养盐堆积的影响逐渐减小, 藻类减少, 光合作用强度降低, 水中溶存 CO₂ 含量升高。MX 采样点位于上游自然河段, 两岸开发较少, 用地以自然林地为主, 距生态调节坝最远, 受人类活动及筑坝影响较小, 属过渡型水体, Chl-a 含量最低, p_{CO_2} 达到调节坝下游水平。从采样点水体垂向分布上看, 湖泊型河段 Chl-a 随水深增大而逐步下降, 光合作用减弱, 水生生物呼吸作用增强、产生 CO₂ 增多, 这也解释了图 4 中 BS、PH、YLF 等 3 个采样点水体 p_{CO_2} 从表层至底层出现明显增大的现象, 同时, 说明呼吸作用是维持御临河水体 CO₂ 过饱和的关键因素。李双等^[23]、傅家楠等^[27]、冉景江等^[28] 研究者在夏季对三峡库区支流朱衣河、梅溪河、草堂河、小江回水区水体 p_{CO_2} 的研究中也发现了类似的垂向分层现象。进一步利用 SPSS 22.0 软件对 p_{CO_2} 与 Chl-a 做一元线性回归, 得到回归方程为 $p_{\text{CO}_2} = 378.783 - 6.181\text{Chl-a}$ ($R^2 = 0.720$, $p < 0.01$), 方程拟合度较好。

表 1 御临河 p_{CO_2} 、Flux (CO₂) 与水体各参数 Spearman 相关性分析

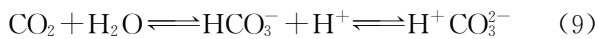
Table 1 Spearman correlation analysis between p_{CO_2} 、Flux (CO₂) and water parameters in the Yulin River

参数	t	DO	pH	Chl-a	p_{CO_2}	Flux(CO ₂)
t	1.000					
DO	0.704**	1.000				
pH	0.807**	0.956**	1.000			
Chl-a	0.315	0.510**	0.391*	1.000		
p_{CO_2}	-0.486**	-0.385*	-0.370*	-0.631**	1.000	
Flux(CO ₂)	-0.600	-0.943**	-0.771	-0.829*	0.943**	1.000

注: ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平(双侧)上相关性显著; * 表示在 $\alpha=0.05$ 水平(双侧)上相关性显著。

御临河水体 p_{CO_2} 与水温(t)、pH 值均呈显著负相关,这与许多学者的研究结论一致^[24, 29-30]。已有研究表明,水温通常通过直接影响 CO₂ 在水体中的溶解度和间接影响浮游动植物、藻类的光合/呼吸作用来影响 CO₂ 在水体中的产生、消耗及扩散过程^[31]。水温升高,一方面会降低 CO₂ 溶解度,另一方面也会提高水中微生物活性,导致呼吸作用的加快和 CO₂ 的增多,适宜的水温能使藻类大量繁殖,光合作用的增强又能消耗水中溶存 CO₂,最终使水体 CO₂ 含量达到平衡。同时,采样期间御临河表层水温较高,调节坝上游湖泊型水体河段水深大、水动力条件弱,水体出现明显的热分层(图 3),这不利于上下水体的充分交换^[32],底层水生生物呼吸作用产生的 CO₂ 不能向表层顺畅扩散是导致底层 CO₂ 显著高于表层的又一潜在原因。

pH 值对水体碳酸盐体系有显著影响,与 p_{CO_2} 密切相关^[33-34]。根据光合/呼吸作用总反应关系式(8)及水体中碳酸盐平衡关系式(9)可知,强烈的光合作用消耗水体中大量溶存 CO₂, p_{CO_2} 显著降低,导致方程(9)平衡向左移动, $[\text{H}^+]$ 降低,pH 值显著升高,这也是御临河 pH 值在上下游和水面剖面垂向分布上存在明显变化的原因。



御临河水体 p_{CO_2} 与溶解氧(DO)呈显著负相关(相关系数 $R = -0.385$, $p < 0.05$),这与其他学者的研究结果吻合^[27, 35-36]。御临河受生态调节坝影响,水生生物生长代谢有明显的空间变异格局,水体 DO 浓度受多重因素影响,一方面,水中植物及藻类光合作用产生 O₂,另一方面,水生生物呼吸作用消耗 O₂,同时 O₂ 在水中溶解度亦受到水温等因素影响。对 p_{CO_2} 与 DO、 t 、pH 做一元线性回归,得到回归方程分别为

$$p_{\text{CO}_2} = 403.006 - 20.701\text{O}_2 \quad (R^2 = 0.432, p < 0.01); p_{\text{CO}_2} = 1757.142 - 47.921t \quad (R^2 = 0.394, p < 0.01); p_{\text{CO}_2} = 1382.290 - 139.821\text{pH} \quad (R^2 = 0.369, p < 0.01)。$$

进一步利用逐步回归分析法建立御临河 p_{CO_2} 与各理化因子的最优回归方程,得到

$$p_{\text{CO}_2} = 378.783 - 6.181\text{Chl-a} \quad (R^2 = 0.720, p < 0.01)$$

结果表明,除 Chl-a 外的其余因素在逐步回归

的过程中被逐一剔除,Chl-a 标准化偏回归系数为 -0.709 ,说明叶绿素 a 是影响御临河水体 p_{CO_2} 的最主要因素。回归方程对 p_{CO_2} 的拟合度较高,方程中各项系数经 T 检验均为显著,方差分析表明,此回归模型具有显著的统计学意义。

已有研究表明,CO₂ 水-气界面扩散通量受风速、温度、微生物活动等多因素共同影响^[37-38]。气象监测站数据显示,受地形影响,研究区域常年风速较低,介于 $0.5 \sim 2.5$ m/s,取样期间各采样点风速变化不大,约为 1.0 m/s。对御临河水-气界面 CO₂ 扩散通量 Flux(CO₂)与表层水体各参数相关性分析显示,Flux(CO₂)与 p_{CO_2} 呈显著正相关($p < 0.01$);与 Chl-a 及 DO 呈显著负相关($p < 0.01$),其他学者^[10, 39]对三峡库区支流的研究也发现相似规律。进一步对各因素进行逐步回归分析发现, p_{CO_2} 是影响 Flux(CO₂)的最主要因素(标准化偏回归系数为 0.997),拟合方程为 $\text{Flux}(\text{CO}_2) = -9.583 + 0.235 \cdot p_{\text{CO}_2}$ ($R^2 = 0.992$, $p < 0.01$)。御临河 BS、PH 采样点水体 p_{CO_2} 与大气环境接近,其余采样点远高于大气环境,Flux(CO₂)与表层水体 p_{CO_2} 变化趋势一致,解释了御临河 Flux(CO₂)的空间分布格局,秦宇等^[35]对彭溪河的观测也有相同发现。

2.5 御临河水体 p_{CO_2} 、Flux(CO₂)与已有研究比较

表 2 汇总了近年来部分学者对低水位运行期间三峡库区不同区域河流及同期典型湖泊水库 CO₂ 分压及扩散通量的研究情况。Li 等^[8]通过对三峡库区内 36 条一级支流、27 条二级支流的大范围取样观测得出库区夏季水体 CO₂ 分压为 129.29 ± 118.15 Pa,观测值变化范围较大,御临河(均值 206.68 Pa)处于较高水平。整体上看,低水位运行期间三峡库区库尾支流 CO₂ 分压和大气扩散通量显著高于库中、库首支流(表 2),表现为明显的大气 CO₂“源”,库中、库首部分支流水体则呈现为大气 CO₂的“汇”。其原因可能是受三峡大坝回水区影响,库中、库首支流水动力条件弱于库尾,夏季光照充足,水体中藻类及浮游植物的生物泵作用显著降低了 CO₂ 分压和排放量^[40],李哲等^[11]对三峡库区库尾、库中支流温室气体排放差异的研究也得出一致结论。根据表 2,三峡库区支流 CO₂ 释放水平整体低于干流,原因可能是三峡库区低水位运行期间,长江干流流量、流速大于支流,水体扰动性强,不利于浮游植物及藻类生长,水生生物呼吸作用占主导,水体 CO₂ 含量高。

表 2 不同水体夏季 p_{CO_2} 与 Flux (CO_2) 对比
Table 2 Comparison of p_{CO_2} and Flux (CO_2) in different waters in summer

水体类型	名称	国家	气候带	p_{CO_2} / Pa	Flux(CO_2) / [mmol · (m ² · d) ⁻¹]	参考文献
三峡库区库首	香溪河	中国	亚热带	15.20~24.32	-4.74±1.15	[41]
	香溪河	中国	亚热带		0.18	[31]
	香溪河	中国	亚热带		-49±10	[5]
	大宁河	中国	亚热带		25±30	[5]
	长江	中国	亚热带	93.22~115.51	83.7±14.1	[41]
河流	草堂河	中国	亚热带		-6.97	[27]
	梅溪河	中国	亚热带	6.8~7.5	-7.48	[23]
	朱衣河	中国	亚热带	14.9~190.3	-6.86~20.83	[27,42]
	彭溪河(小江)	中国	亚热带	15.40±7.19	-0.58~2.68	[28,43]
	彭溪河高阳回水区	中国	亚热带	7.30~21.78	-4.08~-7.92	[9]
三峡库区库尾	长江	中国	亚热带	201.4~268.0	39.58~51.05	[23,42]
	龙溪河	中国	亚热带		175.2±45.6	[11]
	竹溪河	中国	亚热带	86.2±7.7	87.8±27.5	[29]
	御临河	中国	亚热带	54.5~336.7	1.65~67.84	本研究
湖泊	巢湖	中国	亚热带		7.88±4.25	[44]
	龙滩水库	中国	亚热带	64.50~294.22	2.73~28.95	[45]
	新丰江水库	中国	亚热带	101.22	20.78	[46]
水库	红枫湖水库	中国	亚热带		15	[47]

御临河作为三峡库区库尾筑坝支流,在库区低水位运行期 CO_2 排放空间格局受其下游生态调节坝影响显著。生态调节坝上游湖泊型水体河段 CO_2 释放通量较小(1.65~26.84 mmol/(m² · d)),与表 2 中部分湖泊水库及三峡库区库首支流相近;御临河上游受筑坝影响较小的河段及调节坝下游河段 CO_2 释放通量大(66.45~67.84 mmol/(m² · d)),更趋近于三峡库区库尾支流较高的 CO_2 释放水平。

3 结论

1) 三峡库区低水位运行期间,库尾支流御临河上生态调节坝对其上下游河段水动力、水化学及水生态特征均有显著影响。坝上游较近河段表现为湖泊型水体(流速 $v < 0.05$ m/s),水温(t)、DO、pH、Chl-a 等理化指标在水体剖面上呈现明显的垂向分层;坝上游较远河段和坝下游河段表现为过渡型水体($v = 0.05 \sim 0.20$ m/s),各指标分层现象不明显。

2) 库区低水位运行期间御临河表层水体 p_{CO_2} 为 54.55~336.73 Pa,是环境空气的 1.12~6.55 倍。受筑坝影响,不同河段水体 p_{CO_2} 空间分布差异较大:

对于表层水体 p_{CO_2} ,湖泊型水体河段(54.55~137.16 Pa)显著低于过渡型水体河段(322.05~336.73 Pa),从调节坝至上游呈现升高趋势;从水体剖面垂向变化上看,湖泊型水体河段 p_{CO_2} 出现明显的由表层(均值 85.84 Pa)至底层(均值 338.96 Pa)迅速增大的垂向分层现象,而过渡型水体分层现象不明显。御临河水体 p_{CO_2} 与 Chl-a、 t 、DO、pH 均呈显著负相关,Chl-a 是影响水体 p_{CO_2} 的最主要因素。

3) 库区低水位运行期间御临河 Flux(CO_2) 为 1.65~67.84 mmol/(m² · d),整体表现为大气 CO_2 排放源,但受筑坝影响,不同河段 CO_2 排放量差异明显,表现为湖泊型水体河段(均值 10.96 mmol/(m² · d))远低于过渡型水体河段(均值 67.06 mmol/(m² · d)),从调节坝至上游增加趋势明显。御临河水体 Flux(CO_2) 与 p_{CO_2} 显著正相关,与 DO、Chl-a 显著负相关, p_{CO_2} 是影响 Flux(CO_2) 的最主要因素。

4) 库区低水位运行期间,御临河过渡型水体河段 p_{CO_2} 与 Flux(CO_2) 在库区呈较高水平,明显高于库首、库中支流,但其生态调节坝上游湖泊型水体河

段受浮游植物光合作用影响, p_{CO_2} 、Flux(CO₂)较低,与库首支流及其余湖泊水库接近。

参考文献:

- [1] SHI W Q, CHEN Q W, YI Q T, et al. Carbon emission from cascade reservoirs: spatial heterogeneity and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12175-12181.
- [2] BEDNAŘÍK A, BLASER M, MATOUŠŮA, et al. Effect of weir impoundments on methane dynamics in a river [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 584/585: 164-174.
- [3] 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.
- [4] LI S Y, BUSH R T, SANTOS I R, et al. Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs [J]. *Water Research*, 2018, 147: 13-24.
- [5] ZHAO Y J, WU B F, ZENG Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. *Biogeosciences*, 2012, 10(2): 1219-1230.
- [6] 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会. 全国水利普查数据汇编[G]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [7] LI Z, LU L H, GUO J S, et al. Responses of spatial-temporal dynamics of bacterioplankton community to large-scale reservoir operation: a case study in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 42469.
- [8] LI S Y, NI M F, MAO R, et al. Riverine CO₂ supersaturation and outgassing in a subtropical monsoonal mountainous area (Three Gorges Reservoir Region) of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 460-469.
- [9] 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CO₂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 p_{CO_2} 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. (in Chinese)
- [10] HUANG W M, BI Y H, HU Z Y, et al. Spatio-temporal variations of GHG emissions from surface water of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region, China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 28-32.
- [11] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面CO₂、CH₄通量比较初探[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 1008-1016.
LI Z, BAI L, GUO J S, et al. Comparative study on water-air CO₂, CH₄ flux in two tributaries in the Three Gorges reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 1008-1016. (in Chinese)
- [12] 刘昊航. 御临河回水区富营养化评价与营养状态成因探究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LIU H H. Study on eutrophication evaluation and nutritional status in backwater area of Yulin river [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [13] COLE J J, CARACO N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(4): 647-656
- [14] ABRIL G, GUÉRIN F, RICHARD S, et al. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (PetitSaut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB40074.
- [15] WEN Z D, SONG K S, ZHAO Y, et al. Carbon dioxide and methane supersaturation in lakes of semi-humid/semi-arid region, Northeastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 138: 65-73.
- [16] SANDER R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(8): 4399-4981.
- [17] JOHNSON K M, HUGHES J E, DONAGHAY P L, et al. Bottle-calibration static head space method for the determination of methane Dissolved in seawater [J]. *Analytical Chemistry*, 1990, 62(21): 2408-2412.
- [18] CAI W J, WANG Y C. The chemistry, fluxes, and sources of carbon dioxide in the estuarine waters of the Satilla and Altamaha Rivers, Georgia [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(4): 657-668.
- [19] JÄHNE B, HEINZ G, DIETRICH W. Measurement of the diffusion coefficients of sparingly soluble gases in water [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C10): 10767-10776.
- [20] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97 (C5) 7373-7382.
- [21] CRUSIUS J, WANNINKHOF R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J].

- Limnology and Oceanography, 2003, 48 (3) 1010-1017.
- [22] 焦军丽, 马巍, 裴倩楠, 等. 三峡库区支流库湾水体富营养化演变特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6): 544-548.
JIAO J L, MA W, PEI Q N, et al. Study on the characteristics of eutrophication evolution of tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(6): 544-548. (in Chinese)
- [23] 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. (in Chinese)
- [24] 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 等. 快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2827-2839.
LIU T T, WANG X F, YUAN X Z, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of greenhouse gas emissions from rivers in a rapidly urbanizing area [J]. Environmental Science, 2019, 40 (6): 2827-2839. (in Chinese)
- [25] HU B B, WANG D Q, ZHOU J, et al. Greenhouse gases emission from the sewage draining rivers [J]. Science of The Total Environment, 2018, 612: 1454-1462.
- [26] NEAL C, HARROW M, WILLIAMS R J. Dissolved carbon dioxide and oxygen in the River Thames: Spring-summer 1997 [J]. Science of The Total Environment, 1998, 210/211: 205-217.
- [27] 傅家楠, 操满, 邓兵, 等. 三峡库区高水位运行期典型干支流水体 CO₂ 分压及其水面通量特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 64-72.
FU J N, CAO M, DENG B, et al. Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in typical mainstream and tributaries of the Three Gorges reservoir during high water level period [J]. Earth and Environment, 2016, 44(1): 64-72. (in Chinese)
- [28] 冉景江, 林初学, 郭劲松, 等. 三峡库区小江回水区二氧化碳分压的时空变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(8): 976-982.
RAN J J, LIN C X, GUO J S, et al. Spatial and temporal variation of carbon dioxide partial pressure over the Xiaojiang river backwater area of the Three Gorges reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(8): 976-982. (in Chinese)
- [29] 罗佳宸, 李思悦. 三峡库区典型河流水-气界面 CO₂ 通量日变化观测及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5217-5226.
LUO J C, LI S Y. Daily variation of CO₂ flux at water-air interface and analysis of its affecting factors in a typical river of the Three Gorges reservoir [J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 5217-5226. (in Chinese)
- [30] NATCHIMUTHU S, PANNEER SELVAM B, BASTVIKEN D. Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond [J]. Biogeochemistry, 2014, 119(1/2/3): 403-413.
- [31] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1471-1475.
WANG L, XIAO S B, LIU D F, et al. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi river in summer and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1471-1475. (in Chinese)
- [32] ZHANG Y L, WU Z X, LIU M L, et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59 (4) 1193-1202
- [33] SCHRIER-UIJL A P, VERAART A J, LEFFELAAR P A, et al. Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands [J]. Biogeochemistry, 2011, 102(1/2/3): 265-279.
- [34] 赵梦, 焦树林, 梁虹, 等. 万峰湖水库回水区二氧化碳分压及扩散通量特征时空变化[J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1307-1317.
ZHAO M, JIAO S L, LIANG H, et al. Temporal and spatial variation of carbon dioxide partial pressure and exchange flux characteristics in the backwater area of Wanfeng Lake Reservoir [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(6): 1307-1317. (in Chinese)
- [35] 秦宇, 王紫薇, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂ 与 CH₄ 通量特征及影响因素初探[J]. 地球环境学报, 2019, 10(2): 177-189.
QIN Y, WANG Z W, LI Z, et al. CO₂ and CH₄ flux across water-air interface and environmental factors in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(2): 177-189. (in Chinese)

- [36] ZHAI W D, DAI M H, CAI W J, et al. High partial pressure of CO₂ and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2005, 93(1): 21-32.
- [37] 赫斌, 李哲, 姚骁, 等. 三峡澎溪河水-气界面温室气体模型估算及其敏感性分析[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 705-712.
HE B, LI Z, YAO X, et al. The model estimation and sensitivity analysis of greenhouse gas on water-air interface in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(3): 705-712. (in Chinese)
- [38] 曹玉平, 袁热林, 焦树林, 等. 光照水库夏季分层期间二氧化碳分压分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(6): 15-21.
CAO Y P, YUAN R L, JIAO S L, et al. Distribution characteristics of partial pressure of carbon dioxide during thermal stratification in summer in Guangzhao reservoir [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(6): 15-21. (in Chinese)
- [39] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 546-553.
ZHAO Y, ZENG Y, WU B F, et al. Observation on greenhouse gas emissions from Xiangxi River in Three Gorges Region [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 546-553. (in Chinese)
- [40] DE KLUIJVER A, YU J L, HOUTEKAMER M, et al. Cyanobacteria as a carbon source for zooplankton in eutrophic Lake Taihu, China, measured by ¹³C labeling and fatty acid biomarkers [J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(4): 1245-1254
- [41] 姚臣谌, 张靖, 吴以赢, 等. 三峡坝区干流及香溪河库湾水体秋季二氧化碳分压[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 152-157.
YAO C C, ZHANG J, WU Y Y, et al. Partial pressure of water body Dissolved carbon dioxide in mainstream and Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir area in autumn [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 152-157. (in Chinese)
- [42] 魏浩斌, 吴学谦, 操满, 等. 三峡库区干流及库湾支流(朱衣河)夏季 CO₂ 分压及扩散通量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2016, 22(4): 497-504.
WEI H B, WU X Q, CAO M, et al. Partial pressure and diffusion flux of Dissolved carbon dioxide in mainstream and tributary (Zhuyi River) of the Three Gorges Reservoir in summer [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2016, 22(4): 497-504. (in Chinese)
- [43] 蒋滔, 郭劲松, 李哲, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1463-1470.
JIANG T, GUO J S, LI Z, et al. Air-water surface greenhouse gas flux in Pengxi river at different operational stages of the Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1463-1470. (in Chinese)
- [44] 齐天赐, 肖启涛, 苗雨青, 等. 巢湖水体二氧化碳浓度时空分布特征及其水-气交换通量[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 766-778.
QI T C, XIAO Q T, MIAO Y Q, et al. Temporal and spatial variation of carbon dioxide concentration and its exchange fluxes in Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 766-778. (in Chinese)
- [45] 赵宗权, 曹玉平, 焦树林, 等. 龙滩水库表层水体 CO₂ 分压和水化学特征[J]. *湿地科学*, 2018, 16(6): 793-800.
ZHAO Z Q, CAO Y P, JIAO S L, et al. Partial pressure of carbon dioxide and hydrochemical characteristics of surface water in the Longtan reservoir [J]. *Wetland Science*, 2018, 16(6): 793-800. (in Chinese)
- [46] 周梅, 叶丽菲, 张超, 等. 广东新丰江水库表层水体 CO₂ 分压及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(3): 770-781.
ZHOU M, YE L F, ZHANG C, et al. Partial pressure of carbon dioxide in the Xinfengjiang Reservoir of Guangdong Province and its influencing factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(3): 770-781. (in Chinese)
- [47] 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.

(编辑 王秀玲)