

张洁,焦树林,曹玉平,等.万峰湖水库冬季CO<sub>2</sub>通量与p(CO<sub>2</sub>)分布特征及形成机制[J].环境科学与技术,2020,43(4):87-96. Zhang Jie, Jiao Shulin, Cao Yuping, et al. Distribution characteristics and formation mechanism of CO<sub>2</sub> flux and p(CO<sub>2</sub>) of Wanfenghu Lake Reservoir in winter[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(4): 87-96.

# 万峰湖水库冬季CO<sub>2</sub>通量与p(CO<sub>2</sub>)分布特征及形成机制

张洁<sup>1,2</sup>, 焦树林<sup>1,2\*</sup>, 曹玉平<sup>1,2</sup>, 莫跃爽<sup>1,2</sup>, 赵梦<sup>1,2</sup>, 赵宗权<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:**为研究万峰湖水库冬季CO<sub>2</sub>通量与p(CO<sub>2</sub>)分布特征及形成机制,作者于2017年2月对万峰湖水库进行走航采样研究,结果表明:水平方向上,p(CO<sub>2</sub>)取值范围为158.65~371.53 Pa,均值为254.17 Pa;CO<sub>2</sub>通量取值范围为39.35~102.83 mmol/(m<sup>2</sup>·d),均值为65.21 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。垂直剖面上,CO<sub>2</sub>分压与CO<sub>2</sub>通量随水深增加而增加,均值分别为423.50 Pa、114.87 mmol/(m<sup>2</sup>·d),总体表现为CO<sub>2</sub>的“源”,且回水区>干流>马岭河支流。表层p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量变化速率为F-1>F-4>F-2>F-3,温跃层为F-1>F-3>F-2>F-4,低温层为F-4>F-1。与其他气候带河流、湖泊、水库相比,CO<sub>2</sub>通量处于中等偏高水平。马岭河支流、干流和回水区p(CO<sub>2</sub>)形成机制分别与浮游植物的呼吸作用、有机质的降解、外源河流的输入、碳酸盐的沉淀及底泥溢出的CO<sub>2</sub>有关。同时,回水区封闭库湾的“死水”区域也是导致p(CO<sub>2</sub>)及CO<sub>2</sub>通量高的又一原因。

**关键词:**CO<sub>2</sub>分压; CO<sub>2</sub>扩散通量; 形成机制; 万峰湖水库

**中图分类号:**X524 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.04.014 **文章编号:**1003-6504(2020)04-0087-10

## Distribution Characteristics and Formation Mechanism of CO<sub>2</sub> Flux and p(CO<sub>2</sub>) of Wanfenghu Lake Reservoir in Winter

ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, JIAO Shulin<sup>1,2\*</sup>, CAO Yuping<sup>1,2</sup>, MO Yueshuang<sup>1,2</sup>,

ZHAO Meng<sup>1,2</sup>, ZHAO Zongquan<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Key Laboratory of Remote Sensing Application on Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to study the distribution characteristics and formation mechanism of CO<sub>2</sub> flux and p(CO<sub>2</sub>) in Wanfenghu Lake Reservoir in winter, a navigational sampling study was carried out in February 2017. The results show that in the horizontal direction, the range of p(CO<sub>2</sub>) is 158.65~371.53 Pa, with the average value of 254.17 Pa; the range of CO<sub>2</sub> flux is 39.35~102.83 mmol/(m<sup>2</sup>·d), with the average value as 65.21 mmol/(m<sup>2</sup>·d). On the vertical profile, the partial pressure of CO<sub>2</sub> and the flux of CO<sub>2</sub> increase with the increase of water depth, with the average values being 423.50 Pa and 114.87 mmol/(m<sup>2</sup>·d), respectively. They are generally the “source” of CO<sub>2</sub>, with the backwater area>mainstream>a tributary of Maling River. The change rate of p(CO<sub>2</sub>) and CO<sub>2</sub> flux in the surface water layer is F-1>F-4>F-2>F-3, the thermocline is F-1>F-3>F-2>F-4, and the cryogenic layer is F-4>F-1. Compared with other climatic zones rivers, lakes, and reservoirs, CO<sub>2</sub> flux is at a moderately high level. The formation mechanism of p(CO<sub>2</sub>) in the tributaries of Maling River, mainstream and backwater area is related to the respiration of phytoplankton, the degradation of organic matter, the input of external rivers, the precipitation of carbonates and the CO<sub>2</sub> spilled from the bottom sludge. At the same time, the “dead water” area of the closed reservoir bay in the backwater area is another reason for the high flux of p(CO<sub>2</sub>) and CO<sub>2</sub>.

**Key words:** partial pressure of CO<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> diffusion flux; formation mechanism; Wanfenghu Lake Reservoir

河流是连接大气和海洋物质与能量交换的通道, CH<sub>4</sub>等温室气体。由于社会经济的发展 and 城市人口的增加,自然界能通过河流向大气和海洋中吸收或释放CO<sub>2</sub>、增加,为满足饮水、发电、灌溉及防洪等功能,人类开

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2020-03-03;修回2020-04-05

基金项目:喀斯特峡谷成库的河流溶解无机碳行为及生态调度研究(黔科合基础[2020]1Y252);贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号) China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作者简介:张洁(1992-),女,硕士研究生,研究方向为岩溶水资源与GIS,(电子信箱)1843215165@qq.com;\*通讯作者,(电子信箱)jiaoshulin@gznu.edu.cn。

始在许多大型河流上筑坝建库<sup>[1]</sup>。水库的建立使得库中水动力条件及水化学特征发生改变,比如水中无机物含量增加,浮游植物呼吸作用生成 $\text{CO}_2$ ,以及水库底泥中有机质释放 $\text{CO}_2$ 等,这些现象增加了水中 $\text{CO}_2$ 的含量,也促进了水库中碳的循环<sup>[2,3]</sup>。现今河流水库对温室气体的“源”“汇”贡献以及水库中 $\text{CO}_2$ 分压主要形成机制开始受到人们的关注<sup>[4-7]</sup>。

国内外学者对河流、水库中 $\text{CO}_2$ 含量及 $\text{CO}_2$ 通量做了大量研究。田明扬在对黄河源区 $\text{CO}_2$ 逸出的时空变化分析中得出源区内水体 $p(\text{CO}_2)$ 介于 $441\sim 2\,441\,\mu\text{atm}$ 之间,并表现为向大气释放 $\text{CO}_2$ <sup>[8]</sup>。郭劲松等认为夏季三峡水库支流澎溪河回水区的水体对 $\text{CO}_2$ 具有吸收作用,表现为 $\text{CO}_2$ 的“汇”,而库区干流表现为 $\text{CO}_2$ 的“源”<sup>[9]</sup>。在对河道型水库——万安水库入库水体和出库水体水中 $p(\text{CO}_2)$ 的研究中,发现水库入库前、库区及出库水体水中的 $p(\text{CO}_2)$ 含量表现为库前<库区<出库水体,整个水库表现为大气 $\text{CO}_2$ 的“源”<sup>[10]</sup>。岩溶地区水库中很大一部分 $\text{CO}_2$ 来自于碳酸盐岩的释放,李丽等在研究广西柳州地下河补给的地表溪流时发现,地下河出口的 $\text{CO}_2$ 通量高达 $445.72\,\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ <sup>[11]</sup>。而St Louis等在对温带水库Kinsbasket的研究中得出该水库中 $\text{CO}_2$ 通量为 $12.05\,\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,热带地区Miranda水库中 $\text{CO}_2$ 通量是Kinsbasket水库的8倍<sup>[12,13]</sup>。

万峰湖水库为典型的河道型岩溶水库,目前人们对万峰湖水库的研究主要集中在水体富营养化分析上<sup>[14]</sup>;对万峰湖水库 $p(\text{CO}_2)$ 及通量的研究主要集中在夏季(丰水期),而对冬季(枯水期)的水化学特征、 $p(\text{CO}_2)$ 及通量的研究较少<sup>[15,16]</sup>。本文将对万峰湖干、支流、回水区冬季表层与剖面上 $\text{CO}_2$ 通量与 $p(\text{CO}_2)$ 分布特征及形成机制进行分析研究,旨在发现冬季万峰湖水库 $\text{CO}_2$ 含量与大气的“交换”关系,并为整治河流水库水环境和改善温室气体排放量提供科学参考。

## 1 研究区概况

万峰湖位于珠江源头南盘江中段( $104^\circ31'\sim 105^\circ01'\text{E}$ ,  $24^\circ37'\sim 25^\circ23'\text{N}$ ),属亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨。主库在贵州黔西南兴义市,湖面面积 $176\,\text{km}^2$ ,主航道长约 $128\,\text{km}$ ,水库最宽为 $20\,\text{km}$ ,最深为 $100\,\text{m}$ <sup>[17]</sup>,总库容 $102.6\times 10^8\,\text{m}^3$ ,多年平均流量为 $612\,\text{m}^3/\text{s}$ <sup>[15]</sup>,多年平均径流量为 $1.93\times 10^{10}\,\text{m}^3$ ,平均换水周期为 $194\,\text{d}$ <sup>[18]</sup>。水库周围主要以白云岩、灰岩为主,碳酸盐岩高度发育<sup>[15]</sup>,为典型的喀斯特深水水库。水库属中度营养化水库,库中浮游植物生长旺盛,主要以蓝藻、硅藻为主,从水库表层到库底,浮游植物总量随着水位的加深而减少,在夏季

0~10 m水深处浮游植物丰度最高,在冬季0~50 m水深处浮游植物丰度最高,且水库下层浮游植物数量表现为冬季高于夏季<sup>[19]</sup>。水库建库后,由于旅游开发,水库上游城镇的扩张、工业污水大量排放以及库区渔业养殖的开发,使得水库至建库后出现一系列的水体污染现象,导致总磷、总氮严重超标<sup>[20]</sup>。

## 2 研究方法

本研究以万峰湖水库为研究对象,利用GPS于2017年2月从坝前下水库逆行向其干流和支流走航采取30个采样点,并获得其地理坐标。其中表层26个,分别对大坝出水口(F-1)、支流与主干流水体交汇处(F-2)、支流库湾处(F-3)、主干流(F-4)4个具有代表性的断面进行每隔10 m的分层采样,直到采取到库底底泥为止,其中F-1最深100 m、F-2最深60 m、F-3最深40 m、F-4最深80 m(图1)。采样当天风速为 $0.3\sim 1.5\,\text{m/s}$ ,当日天气晴朗。利用美国麦隆公司生产的Ultra-II(6P)水质参数仪现场测定监测样点水体的酸碱度(pH)、温度( $t$ )、电导率(Cond)、总溶解固体物(TDS)、氧化还原电位(ORP)、碱度(ALK),并利用ArcGIS地理系统软件、SPSS对研究区进行绘图和水化学参数数据分析。研究区的二氧化碳分压值可用碳酸平衡原理及亨利定律计算得到,水中的溶解无机碳包括 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{CO}_2$ 。水中的各成分达到平衡时,其各成分在水中的浓度与pH、水温及各离子浓度有关<sup>[4,21-24]</sup>。

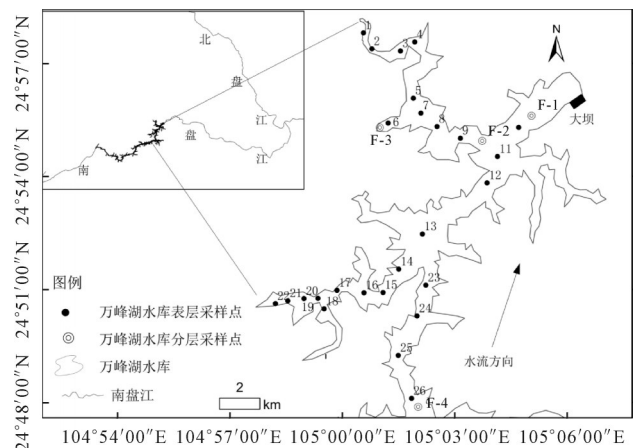
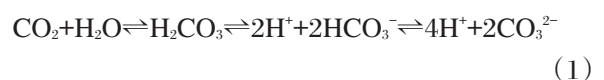


图1 万峰湖水库采样点分布图  
Fig.1 Distribution map of sampling points of Wanfenghu Lake Reservoir

碳酸盐在水中的平衡关系为:



$p(\text{CO}_2)$ 计算公式<sup>[24]</sup>:

$$K_1 = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad (2)$$

$$K_2 = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-] \quad (3)$$

$$K_{\text{CO}_2} = [\text{H}_2\text{CO}_3^*]/p(\text{CO}_2) \quad (4)$$

式(2)~(4)中,CO<sub>2</sub>平衡常数用 $K_{\text{CO}_2}$ 表示, $K_1$ 、 $K_2$ 分别表示第一级和第二级碳酸解离常数。各常数的算法表达式如下<sup>[25]</sup>:

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

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

$$pK_2 = 9 \times 10^{-5} t^2 - 0.013 t + 10.62 \quad (7)$$

$pK = -\lg K$ ,  $t$ 为水温,由上式可得到二氧化碳分压( $p(\text{CO}_2)$ )的计算公式:

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

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

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

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

式(8)~(11)中, $\alpha(\text{H}^+)$ 、 $\alpha(\text{HCO}_3^-)$ 分别表示 $\text{H}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的浓度, $I$ 为水中离子强度。

CO<sub>2</sub>扩散通量 $F$ 计算公式<sup>[25-27]</sup>:

$$F = K \times (C_w - C_{\text{air}}) \quad (12)$$

$$C_w = K_{\text{CO}_2} \times p(\text{CO}_2) \quad (13)$$

$$C_{\text{air}} = [p(\text{CO}_2) \times 101.325] / [8.314 \times (273.15 + t)] \quad (14)$$

$$K = k \times r \quad (15)$$

$$k = b U^2 (600 / Sct)^{1/2}, (U < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (16)$$

$$Sct = 1911.1 - 118.11 \times t + 3.4527 \times t^2 - 0.04132 \times t^3 \quad (17)$$

$$\ln r = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + S\% \times [B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (18)$$

式(12)~(18)中, $K$ 为CO<sub>2</sub>水-气扩散系数,它与水体的流速,风速、温度等因素有关; $F$ 为CO<sub>2</sub>扩散通量, $C_w$ 表示水中 $p(\text{CO}_2)$ , $C_{\text{air}}$ 表示空气中 $p(\text{CO}_2)$ (本研究取40.63 Pa); $k$ 为气体交换速率, $r$ 为某温压条件下CO<sub>2</sub>溶解度, $U$ 为风速,当 $U$ 为瞬时速度时, $b=0.31$ , $U$ 取平均风速时, $b=0.39$ ;Sct为摄氏温度下Schmidt常数; $T$ 为摄氏温度; $S$ 为盐度; $A_1=-58.0931$ , $A_2=90.5096$ , $A_3=22.2940$ , $B_1=0.02766$ , $B_2=-0.025888$ , $B_3=0.0050578$ 。采样时间为冬季,平均风速取0.9 m/s;当 $F>0$ 时,水体向大气中释放CO<sub>2</sub>,当 $F<0$ 时,水体吸收大气中的CO<sub>2</sub>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 研究区水化学特征分析

水平方向上,冬季万峰湖水温在17.92~21.29℃之间,平均值为19.75℃,以马岭河支流中游温度最高,水温分布特征为马岭河支流>干流>回水区。水库冬季pH范围为7.81~8.11,平均值为7.97,其中马岭河支流pH(8.02)>干流pH(8.01)>回水区pH(7.90),总体上呈弱碱性。TDS的取值范围为248~286.66 mg/L,

平均值为268.46 mg/L;Cond取值范围为376.05~423.79 μS/cm,平均值为401.14 μS/cm,两者在大坝处出现最大值,在马岭河支流采样点F-3处出现最小值。ORP取值范围为123~215 mV,ALK取值范围为3.32~4.19 mmol/L,最大值出现在回水区,最小值在干流的采样点10处。

垂直剖面上(图2(a)~(f)),温度随着水体深度的增加而逐渐降低,根据变化速率不同大致分为3个水层,0~10 m为表水层,10~60 m为温跃层,60 m以下为低温层<sup>[16,28]</sup>。受温度在水库垂直剖面分层的影响,水库中化学参数pH、TDS、ORP、Cond也发生分层现象<sup>[29,30]</sup>。pH随温度的减小而减小,最高pH(8.12)在F-3表层,最低pH(7.47)在F-1点100 m水深处,整体呈弱碱性。

ORP在0~10 m随水体深度增加而增加,万峰湖水库常年能见度不超过3 m<sup>[31]</sup>,水体处于氧化环境,水生生物通过光合作用释放O<sub>2</sub>。在10~60 m水深处光照强度弱,导致水生生物光合作用降低至与呼吸作用基本相持,水中ORP保持不变,60 m后急剧减小,到水深72 m后出现负值。ALK最大值(4.3 mmol/L)在干流F-4(革布)80 m水深处,最小值(3.3 mmol/L)在支流上游F-3(马岭河上游),ALK从表层到底层取值波动大,总体呈上升趋势。TDS(284.6 mg/L)与Cond(423.9 μS/cm)的最大值与最小值都在F-3,最小值在水体表层,分别为248 mg/L、373.1 μS/cm,最大值在20 m处,分别为298.1 mg/L、440.3 μS/cm。TDS和Cond在垂直方向上从表层向底层逐渐增加,在水深0~30 m处增加速度最快,这主要是因为万峰湖水库为典型河道型岩溶深水水库,接近表层的水受到风力及换水周期的影响较大,受物理侵蚀作用,溶解大量碳酸盐岩。随着水深的增加,水体物理性质趋于稳定,此后30~100 m水深处,TDS和Cond缓慢增加。

#### 3.2 研究区p(CO<sub>2</sub>)及CO<sub>2</sub>通量分布特征

万峰湖水库冬季水体表层 $p(\text{CO}_2)$ 在干流大坝处值最大,为371.53 Pa,最小值在马岭河支流采样点F-3处,其值为158.65 Pa,平均值为248.65 Pa。CO<sub>2</sub>通量最值与 $p(\text{CO}_2)$ 最值位置相对应,最大值为102.83 mmol/(m<sup>2</sup>·d),最小值为39.35 mmol/(m<sup>2</sup>·d),均值为65.21 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。从上游到下游,马岭河支流 $p(\text{CO}_2)$ 及CO<sub>2</sub>通量先减少后增加,回水区的 $p(\text{CO}_2)$ 及CO<sub>2</sub>通量总体趋于稳定,而在干流处, $p(\text{CO}_2)$ 及CO<sub>2</sub>通量逐渐增加。总的来说,马岭河支流CO<sub>2</sub>通量均值为58.20 mmol/(m<sup>2</sup>·d), $p(\text{CO}_2)$ 均值为221.50 Pa,是大气 $p(\text{CO}_2)$ (40.63 Pa)的5.5倍,表现为CO<sub>2</sub>的“源”。回水区 $p(\text{CO}_2)$ 平均值为293.99 Pa,为大气 $p(\text{CO}_2)$ 的7.2倍,CO<sub>2</sub>通量为77.04 mmol/(m<sup>2</sup>·d),



表现为 $\text{CO}_2$ 的“源”。干流是各支流水流汇集处,其水化学特征除了受自身水体及河流底泥中有机质的影响外,还受到各支流的化学、物理因素影响。在干流处 $p(\text{CO}_2)$ 为237.72Pa,是大气 $p(\text{CO}_2)$ 的5.8倍, $\text{CO}_2$ 通量为62.10  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,表现为 $\text{CO}_2$ 的“源”。万峰湖水库冬季 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量分布特征为回水区>干流>马岭河支流。

从水库表层到底部(图2(g)(h)), $p(\text{CO}_2)$ 与 $\text{CO}_2$ 通量逐渐增加,取值范围分别为179.98~755.67 Pa和39.34~212.50  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,最小值约为最大值的5倍,均值分别为423.50 Pa和114.87  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。总体呈现出水库越深, $p(\text{CO}_2)$ 与 $\text{CO}_2$ 通量越大,且释放的 $p(\text{CO}_2)$ 为大气 $\text{CO}_2$ 分压的4~18倍,远远大于大气 $p(\text{CO}_2)$ (40.63 Pa),表现为 $\text{CO}_2$ 的“源”。

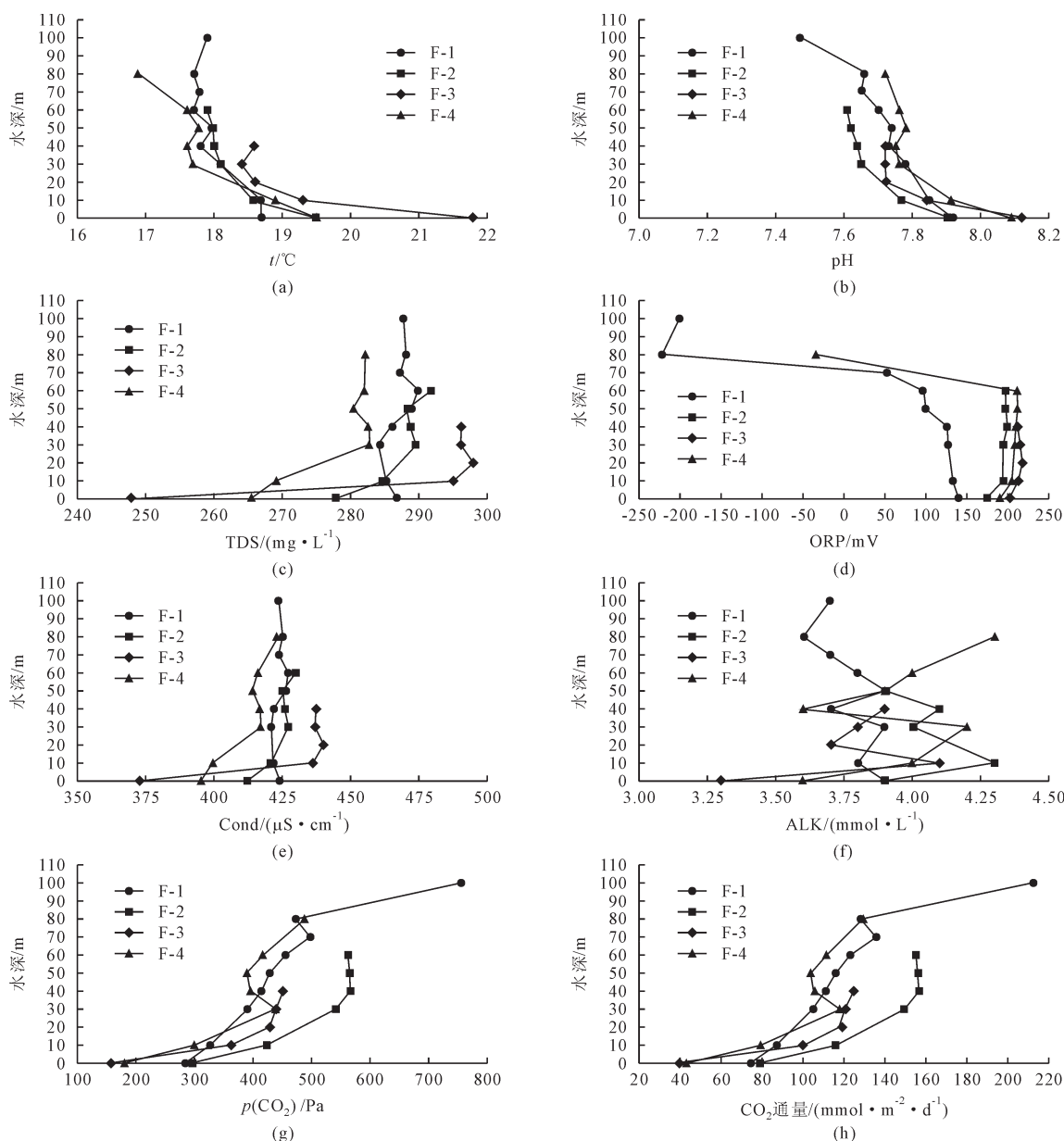


图2 垂直剖面上水化学参数分布图  
Fig.2 Water chemical parameter distribution maps on vertical sections

## 4 讨论

### 4.1 夏冬季水环境特征比较分析

用万峰湖水库夏季干流、马岭河支流以及回水区的水化学参数结果与本文做对比。结果表明夏季除了温度和pH高于冬季,其余的水化学参数均为冬季高于夏季(表1)。主要原因在于夏季降水量大、温度高,

降水的输入能够稀释水库中各种含碳有机物和无机物<sup>[15]</sup>;而高温能释放出水中溶解的 $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_2$ 能与水反应生成碳酸,碳酸在水中的存在形式包括 $\text{HCO}_3^-$ , $\text{HCO}_3^-$ 是弱酸根离子,温度越高,水中溶解 $\text{CO}_2$ 越低, $\text{HCO}_3^-$ 含量越低,最终导致pH升高。万峰湖水库换水周期为194 d<sup>[18]</sup>,平均1年换水2次,且水库为岩溶深水水库,流域面积大,水库较深,导致底层水团滞留时间

长,无法与外界进行充足的水化学物质交换。水体的热分层现象抑制了水体物质的对流交换<sup>[28]</sup>,冬季上层水体中浮游植物由于缺乏光照,光合作用较低,难以满足自身生理所需物资能量,死亡后沉于水库底层,沉积后通过降解形成水库底泥释放大量有机质和CO<sub>2</sub>。无论是夏季还是冬季,浮游植物都需进行呼吸作用,冬季光照时间短,光合作用弱,但植物呼吸作用释放CO<sub>2</sub>一直存在。随着水深增加,光合作用逐渐降低,呼吸作用

逐渐增强并不断吸收氧气释放CO<sub>2</sub>,使得水中p(CO<sub>2</sub>)增加。此外,水库附近工厂污水的排放和大量的网箱养殖使得水中氮、磷含量升高<sup>[19]</sup>,水库的真光层深度低于夏季,随着水深的增加,水体发生厌氧作用将水中的有机质降解形成含氮、磷的营养盐和CO<sub>2</sub>,而且冬季下层水中浮游植物丰度高于夏季,营养盐的增加也会促进水中各种藻类植物的生长,增强了植物的呼吸作用<sup>[17]</sup>,这也使得冬季水体中p(CO<sub>2</sub>)高于夏季。

表1  水库夏季和冬季水化学参数平均值对照表  
Table 1  Comparison of average water chemical parameters of reservoirs in summer and winter

研究对象	季节	t/℃	pH	TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )	ORP/mV	ALK/(mmol·L <sup>-1</sup> )	Cond/(μS·cm <sup>-1</sup> )	p(CO <sub>2</sub> )/Pa	CO <sub>2</sub> 通量/(mmol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )
干流	夏季 <sup>[15]</sup>	28.36	8~8.2	209.36	145~170	2.99~3.38	325	184.03	15.30
	冬季	19.91	7.9~8.12	269.58	183.6	3.82	401.25	237.72	62.10
马岭河支流	夏季 <sup>[16]</sup>	28.53	7.7~8.16	212.78	140.07	2.5~3.2	327.86	216.78	19.72
	冬季	20.75	8.02	263.62	191	3.65	392.74	221.50	58.20
回水区	夏季 <sup>[17]</sup>	28.54	7.99	203.88	139.15	2.98	316.48	219.58	37.1
	冬季	18.54	7.90	276.86	196.33	3.86	409.49	293.99	77.04

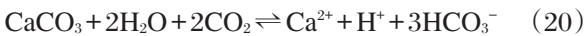
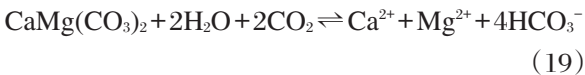
注:表中没有均值的用取值范围代替。

4.2  p(CO<sub>2</sub>)形成机制探究

岩溶水库的CO<sub>2</sub>来源方式多种多样,包括地下水的输入,与大气的交换,周围矿物的风化,植物的呼吸作用,有机碳、矿物质的溶解,碳酸盐矿物的沉淀等<sup>[32]</sup>。

CO<sub>2</sub>在适当的温度下能溶于水,并以H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和CO<sub>2</sub>分子形式存在于水中<sup>[33]</sup>。温度过高时,水中CO<sub>2</sub>溢出释放到大气中,当水中CO<sub>2</sub>含量增加时,水中的p(CO<sub>2</sub>)也相应增加。万峰湖水库为典型的喀斯特岩溶水库,库区主要以白云岩[CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]

和灰岩(CaCO<sub>3</sub>)为主,其解离方程式如下<sup>[16,34]</sup>:



冬季水库干流TDS为254.3~286.9 mg/L、回水区为274.3~280.5 mg/L、马岭河支流为248~283.3 mg/L,TDS>200 mg/L,属于高矿化度岩溶水库。从相关性来看(表2~4),干流和马岭河支流中p(CO<sub>2</sub>)与TDS都呈显著正相关,相关系数r分别为0.697、0.673(p<0.05);干流

表2  万峰湖水库冬季干流p(CO<sub>2</sub>)与各理化参数的相关性  
Table 2  Correlation between p(CO<sub>2</sub>) and physical and chemical parameters in mainstream of Wanfenghu Reservoir in winter

	t	pH	Cond	TDS	ORP	ALK
t	1					
pH	0.395	1				
Cond	-0.761*	-0.774**	1			
TDS	-0.761*	-0.774**	0.998**	1		
ORP	0.557	0.343	-0.280	-0.280	1	
ALK	-0.284	-0.369	0.404	0.404	-0.186	1
p(CO <sub>2</sub> )	-0.387	-0.957**	0.687*	0.697*	-0.607*	0.562

注:\*\*表示在0.01水平上(双侧)显著相关;\*表示在0.05水平上(双侧)显著相关,下同。

表3  万峰湖水库冬季马岭河支流p(CO<sub>2</sub>)与各理化参数的相关性  
Table 3  Correlation between p(CO<sub>2</sub>) and physical and chemical parameters in tributary of Wanfenghu Reservoir in winter

	t	pH	Cond	TDS	ORP	ALK
t	1					
pH	0.648*	1				
Cond	-0.897**	-0.638*	1			
TDS	-0.875**	-0.647*	0.964**	1		
ORP	0.511	0.535	0.416	0.479	1	
ALK	-0.401	-0.458	0.480	0.564	-0.877**	1
p(CO <sub>2</sub> )	-0.656*	-0.940**	0.671*	0.673*	-0.594	0.554

表4 万峰湖水库冬季回水区 $p(\text{CO}_2)$ 与各理化参数的相关性Table 4 Correlation between  $\text{PCO}_2$  and physical and chemical parameters in backwater area of Wanfenghu Reservoir in winter

	$t$	pH	Cond	TDS	ORP	ALK
$t$	1					
pH	0.131	1				
Cond	-0.790*	-0.092	1			
TDS	-0.815**	-0.050	0.983**	1		
ORP	0.274	-0.249	-0.603	-0.628	1	
ALK	-0.116	-0.088	-0.055	-0.055	-0.226	1
$p(\text{CO}_2)$	-0.235	-0.824**	0.033	0.017	0.117	0.605*

与马岭河支流的 $p(\text{CO}_2)$ 受到TDS的影响,且干流水中 $p(\text{CO}_2)$ 受到TDS的影响高于马岭河支流。当水中溶有大量 $\text{CO}_2$ 时,水体将呈酸性,pH值降低。万峰湖水库干流、马岭河支流及回水区水体 $p(\text{CO}_2)$ 与pH都呈显著负相关性,相关系数 $r$ 分别为-0.957、-0.940、-0.824( $p<0.01$ ),且干流水体 $p(\text{CO}_2)$ 与pH相关性最显著,这与TDS主要控制干流水体中的 $p(\text{CO}_2)$ 有关。

4个分层采样点的 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量变化速率不同,表水层变化速率为 $\text{F-1}>\text{F-4}>\text{F-2}>\text{F-3}$ ,温跃层变化速率为 $\text{F-1}>\text{F-3}>\text{F-2}>\text{F-4}$ ,低温层变化速率为 $\text{F-4}>\text{F-1}$ 。在表水层和温跃层,F-1的增长速率最大,主要因为F-1在下游水坝附近,各处水体汇集主干流处,水库水体流量大,水体截面积大,浮游植物量大,使得 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量增长快。低温层水体中F-4采样点 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量增长速率大于F-1,主要由于F-4水深低于F-1,F-4中底泥和有机质的降解补充了水体中的 $\text{CO}_2$ ,使得其 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量增长快于F-1。从水库表层到底部,光合作用降低,特别是在冬季,水温较低,阳光不充分,辐射弱,光合作用时间短,呼吸作用大于光合作用。 $p(\text{CO}_2)$ 和 $\text{CO}_2$ 通量随水库水深的增加而增加,水层越深 $p(\text{CO}_2)$ 越高主要与水库底层淤泥中有机质的释放、碳酸盐岩的溶解以及浮游植物呼吸作用释放 $\text{CO}_2$ 有关<sup>[10,24]</sup>。

万峰湖水库长年水体能见度在3 m左右,且水中含有大量的浮游植物<sup>[19,31]</sup>。浮游植物能通过光合-呼吸作用吸收或释放 $\text{CO}_2$ ,光合-呼吸作用过程为<sup>[16,34]</sup>:

$106\text{CO}_2 + 16\text{HNO}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 122\text{H}_2\text{O} + 18\text{H}^+ + \text{微量元素} + \text{太阳能} \rightleftharpoons (\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4 + 133\text{O}_2$  (21)

万峰湖水库的 $p(\text{CO}_2)$ 与ORP存在负相关性,ORP越大, $p(\text{CO}_2)$ 越小,水中的 $\text{CO}_2$ 含量越低,当浮游植物进行光合作用时,水体中ORP含量增加,当浮游植物进行呼吸作用时,水体中ORP含量减少<sup>[35]</sup>。 $p(\text{CO}_2)$ 与ORP在干流处的相关系数 $r=-0.607(p<0.05)$ ,呈显著负相关,大于马岭河支流( $r=-0.594$ )和回水区( $r=-0.117$ ),说明干流 $p(\text{CO}_2)$ 受到ORP的影响最大,干流中 $\text{CO}_2$ 含

量受到浮游植物呼吸作用的影响最大,而马岭河支流的 $p(\text{CO}_2)$ 与ORP的相关性不明显,说明马岭河支流浮游植物的呼吸作用小于干流水库,浮游植物呼吸作用释放的 $\text{CO}_2$ 仅仅是造成 $p(\text{CO}_2)$ 高的一部分原因,马岭河支流外源水的输入带入含碳有机物可能是其 $p(\text{CO}_2)$ 高的主要原因。

回水区 $p(\text{CO}_2)$ 与 $t$ 、Cond、TDS、ORP的相关性都很小,但与碱度ALK呈正相关, $r=0.605(p<0.05)$ ,相关性显著。ALK包括硅酸盐、硼酸盐、氨、有机碱、硫化物和磷酸,但在以碳酸盐岩为主导的万峰湖水库,ALK主要以碳酸盐的形式存在<sup>[36]</sup>。回水区中 $\text{CO}_3^{2-}$ 能与水中的 $\text{Ca}^+$ 和 $\text{Mg}^+$ 反应生成碳酸盐沉淀,一部分留在水库库底进行下一次的流域碳的循环,另一部分在水流带动下流出该水域<sup>[35]</sup>。由于冬季降水量少,水体流速慢,再加上水温低,回水区的 $\text{CO}_2$ 以沉淀的形式留在回水区,在底泥中有机物分解释放 $\text{CO}_2$ 时,伴随着部分热量的溢出,使得沉淀的碳酸盐部分溶解释放 $\text{CO}_2$ ,这是影响回水区 $p(\text{CO}_2)$ 的主要原因<sup>[37,38]</sup>。加上回水区处存在的工厂排放大量含氮、磷的营养盐,造成水体富营养化,使得水中 $\text{CO}_2$ 增加,这也是造成回水区 $p(\text{CO}_2)$ 高的又一原因<sup>[15]</sup>。

总的来说,万峰湖水库冬季是大气 $\text{CO}_2$ 的“源”,造成冬季万峰湖水库干流 $p(\text{CO}_2)$ 高的原因是碳酸盐岩在水中的溶解作用以及水中浮游植物的呼吸作用,而马岭河支流中 $p(\text{CO}_2)$ 高的主要原因是水库支流中碳酸盐岩的溶蚀及外援河流的输入。回水区中 $p(\text{CO}_2)$ 高是因为受到沉淀的碳酸盐和工厂氮、磷等富营养化加重的影响,再加上回水区处有很多小型库湾,库湾处流速、风速小,属于“死水”区域,生物活性、水化学参数物理及化学性质受到限制,使得 $p(\text{CO}_2)$ 及 $\text{CO}_2$ 通量比干流及马岭河支流高<sup>[39-41]</sup>。

#### 4.3 与世界其他湖泊、河流、水库 $\text{CO}_2$ 通量做比较

万峰湖水库属岩溶地区河道型水库,在冬季 $\text{CO}_2$ 通量取值范围为39.35~102.83 mmol/(m<sup>2</sup>·d),均值为65.21 mmol/(m<sup>2</sup>·d),见表5。相比于世界上其他河流、

表5 国内外主要河流、湖泊、水库中CO<sub>2</sub>通量比较  
Table 5 Comparison of CO<sub>2</sub> flux in major rivers, lakes and reservoirs at home and abroad

	名称	国家	气候带	CO <sub>2</sub> 扩散通量/(mmol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	数据来源
河流	黄河	中国	温带	1.97	张龙军等 <sup>[38]</sup>
	长江	中国	亚热带	15.5~34.2	Zhai W D et al <sup>[41]</sup>
	西江下游	中国	亚热带	69.7~130	Yao G R et al <sup>[42]</sup>
	Amazon	巴西	热带	559.30	Richey J E et al <sup>[22]</sup>
湖泊	洞庭湖	中国	亚热带	-23.78	陈永根等 <sup>[43]</sup>
	巢湖	中国	亚热带	-16.08	陈永根等 <sup>[43]</sup>
	鄱阳湖	中国	亚热带	32.72	陈永根等 <sup>[43]</sup>
	洪家渡水库	中国	亚热带	6.14	刘丛强等 <sup>[4]</sup>
水库	Porttipahta	芬兰	温带	35	Jari T H et al <sup>[44]</sup>
	Kinsbasket	加拿大	温带	12.05	St Louis V L et al <sup>[12]</sup>
	Miranda	巴西	热带	98.58	Dos Santos M A et al <sup>[13]</sup>
	Serrada Mesa	巴西	热带	90.91	St Louis V L et al <sup>[12]</sup>
	龙滩水库	中国	亚热带	49.07	赵宗权等 <sup>[45]</sup>
	红枫湖	中国	亚热带	20.20	吕迎春等 <sup>[30]</sup>
	万峰水库	中国	亚热带	65.21	本研究

湖泊和水库,万峰湖水库CO<sub>2</sub>通量高于温带河流、水库,低于热带河流、水库。而与其他亚热带河流、湖泊、水库相比,CO<sub>2</sub>通量处于中等偏高水平。

## 5 结论

(1)万峰湖水库冬季表层p(CO<sub>2</sub>)取值范围为158.65~371.53 Pa,均值为254.17 Pa,CO<sub>2</sub>通量取值范围为39.35~102.83 mmol/(m<sup>2</sup>·d),均值为65.21 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。垂直方向上p(CO<sub>2</sub>)取值范围为179.98~755.67 Pa,CO<sub>2</sub>通量范围为39.34~212.50 mmol/(m<sup>2</sup>·d),均值分别为423.50 Pa和114.87 mmol/(m<sup>2</sup>·d),整体表现为大气CO<sub>2</sub>的“源”。p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量分布特征为回水区>干流>马岭河支流。

(2)4个采样点p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量变化速率不同,在表水层p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量变化速率为F-1>F-4>F-2>F-3,温跃层p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量变化速率为F-1>F-3>F-2>F-4,低温层p(CO<sub>2</sub>)和CO<sub>2</sub>通量变化速率为F-4>F-1。

(3)造成万峰湖水库冬季干流p(CO<sub>2</sub>)高的原因是碳酸盐岩在水中的溶解作用以及水中浮游植物的呼吸作用,马岭河支流中的CO<sub>2</sub>来源于碳酸盐岩的溶蚀,可能也伴随着外援河流的输入,而回水区中p(CO<sub>2</sub>)受到沉淀的碳酸盐和工厂氮、磷等富营养化加重的影响,同时,水库支流及回水区的封闭库湾的“死水”区域也是导致p(CO<sub>2</sub>)及CO<sub>2</sub>通量高的又一原因。

机碳时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2012,32(3):654-661.

Wu Qixin, Han Guilin, Tang Yang. Temporal and spatial variation of water chemistry and dissolved inorganic carbon isotope characterization in Three Gorges Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(3):654-661.

- [2] 喻阳华,王颖,杨丹丽,等. 赤水河黔西北段植物群落物种多样性特征[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2019,37(4):1-6.

Yu Yanghua, Wang Ying, Yang Danli, et al. Species diversity characteristics of forest community in northwestern Guizhou section of Chishui River[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition, 2019,37(4):1-6.

- [3] 李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2018,36(2):1-8.

Li Qiuhua. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou plateau reservoirs[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition, 2018,36(2):1-8.

- [4] 刘丛强,汪福顺,王宝利,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[J]. 生态学杂志, 2008(7):1193-1199.

Liu Congqiang, Wang Fushun, Wang Baoli, et al. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Hongjiadu Reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008(7):1193-1199.

- [5] 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.

- [6] Rudd J, Harris R, Kelly C A, et al. Are hydroelectric reser-

- [1] 吴起鑫,韩贵琳,唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无



- voirs significant sources of greenhouse gases[J]. *Ambio*, 1993,22:246-248.
- [7] Luc G. Greenhouse gas emissions from hydropower[J]. *Energy Policy*, 1997,25(1):7-13.
- [8] 田明扬. 黄河源区不同地表覆盖类型下河流二氧化碳逸出的时空变化特征分析[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2018.  
Tian Mingyang. Spatial and Temporal Variation of Riverine CO<sub>2</sub> Outgassing under Different Land Cover Types in the Yellow Source Region[D]. Hohhot: Mongolian University, 2018.
- [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 CO<sub>2</sub> 分压日变化特性[J]. *湖泊科学*, 2012,24(2):190-196.  
Guo Jinsong, Jiang Tao, Li Zhe, et al. Diurnal variation characteristics of  $p(\text{CO}_2)$  in the summer water column of Gaoyang backwater area in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Science*, 2012,24(2):190-196.
- [10] 梅航远,汪福顺,姚臣谏,等. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究[J]. *环境科学*, 2011,32(1):58-63.  
Mei Hangyuan, Wang Fushun, Yao Chenchen, et al. Diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Wan'an Reservoir in spring[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):58-63.
- [11] 李丽,蒲俊兵,李建鸿,等. 亚热带典型岩溶溪流水气界面 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 Li, Pu Junbing, Li Jianhong, 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[J]. *Environmental Science*, 2016,37(7):2487-2495.
- [12] St Louis V L, Kelly C A. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. *Bioence*, 2000,50(9):766-775.
- [13] Dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants[J]. *Energy Policy*, 2006,34(4):481-488.
- [14] 杨文丽,夏品华,李惠男,等. 万峰湖水体浮游植物调查及富营养化评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2018,30(1):41-45.  
Yang Wenli, Xia Pinhua, Li Huinan, et al. Phytoplankton investigation and eutrophication evaluation of Wanfeng Reservoir[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018,30(1):41-45.
- [15] 张倩,焦树林,梁虹,等. 喀斯特地区水库回水区夏季水体二氧化碳分压变化特征及交换通量研究[J]. *水文*, 2018,38(1):28-34.  
Zhang Qian, Jiao Shulin, Liang Hong, et al. Partial pressure variation and diffusion flux of CO<sub>2</sub> in reservoir backwater area in Karst zone in summer[J]. *Journal of China Hydrology*, 2018,38(1):28-34.
- [16] 曹玉平,袁热林,焦树林,等. 岩溶深水水库干流及支流夏季二氧化碳分压及扩散通量[J]. *环境科学学报*, 2018,38(2):780-787.  
Cao Yuping, Yuan Relin, Jiao Shulin, et al. Partial pressure of carbon dioxide and diffusion fluxes in mainstream and tributary of karst deeply reservoir in summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(2):780-787.
- [17] 曹玉平,焦树林,邓飞艳,等. 马岭河河口段水-气界面二氧化碳排放特征[J]. *环境科学与技术*, 2018,41(12):195-199, 205.  
Cao Yuping, Jiao Shulin, Deng Feiyan, et al. Characteristics of air-water CO<sub>2</sub> exchange in estuary of Malinhe River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12): 195-199,205.
- [18] 刘泽钧,包亚军. 天生桥一级水电站大坝运行管理[J]. *贵州水力发电*, 2004(4):45-47,67.  
Liu Zejun, Bao Yajun. Dam operation management of Tianshengqiao Hydropower Station[J]. *Guizhou Water Power*, 2004(4):45-47,67.
- [19] 李秋华,商立海,李广辉,等. 万峰湖浮游植物群落的时空分布[J]. *生态学杂志*, 2011,30(5):1031-1038.  
Li Qiuhua, Shang Lihai, Li Guanghui, et al. Spatiotemporal distribution of phytoplankton community in Wanfeng Lake [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011,30(5):1031-1038.
- [20] 瞿丽雅,孙嘉龙,董泽琴. 万峰湖水水质评价及水白菜成因初探[J]. *贵州农业科学*, 2008(3):167-169.  
Qu Liya, Sun Jialong, Dong Zeqin. Evaluation of water quality of Wanfeng Lake and its reason of water lettuce pollution [J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2008(3):167-169.
- [21] Marcus W, Shi B I, Ouml, et al. Temporal and spatial variability of dissolved inorganic carbon in a boreal stream network: concentrations and downstream fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2010, 115(G02014): 384-397.
- [22] Richey J E, Devol A H, Wofsy S C, et al. Biogenic gases and the oxidation and reduction of carbon in Amazon River and flood plain waters[J]. *Limnology & Oceanography*, 1988,33(4):551-561.
- [23] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, et al. High partial pressure of CO<sub>2</sub> and its maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 2005, 93(1):21-32.
- [24] 钱娟婷,吴起鑫,安艳玲,等. 三岔河  $p(\text{CO}_2)$  特征及水-气界面通量分析[J]. *中国环境科学*, 2017,37(6):2263-2269.  
Qian Juanting, Wu Qixin, An Yanling, et al. Partial pressure of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> outgassing fluxes of Sancha River[J]. *China Environmental Science*, 2017,37(6):2263-2269.
- [25] 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 Shuang, Wang Yuchun, Cao Man, et al. Partial pressure



- and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the main-stream and tributary of the central Three Gorges Reservoir in summer[J]. *Environmental Science*, 2014,35(3):885-891.
- [26] 傅家楠,操满,邓兵,等. 三峡库区高水位运行期典型干流水体CO<sub>2</sub>分压及其水面通量特征[J]. *地球与环境*, 2016,44(1):64-72.
- Fu Jianan, Cao Man, Deng Bing, et al. Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in typical main-stream and tributaries of the Three Gorges Reservoir during high water level period[J]. *Earth and Environment*, 2016,44(1):64-72.
- [27] 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CO<sub>2</sub>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 Haobin, Wu Xueqian, Cao Man, et al. Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in main-stream and tributary (Zhuyi River) of the Three Gorges Reservoir in summer[J]. *Journal of Shanghai University: Natural Science Edition*, 2016,22(4):497-504.
- [28] 白杨,张运林,周永强,等. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2016,47(5):906-914.
- Bai Yang, Zhang Yunlin, Zhou Yongqiang, et al. Spatial distribution of the thermal stratification in Qiandao Lake and its influencing factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016,47(5):906-914.
- [29] 王煜,戴会超. 大型水库水温分层影响及防治措施[J]. *三峡大学学报:自然科版*, 2009,31(6):11-14,28.
- Wang Yu, Dai Huichao. Effects of water temperature delamination in large-scale reservoirs and protection methods[J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Science Edition*, 2009,31(6):11-14,28.
- [30] 吕迎春,刘从强,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[J]. *水科学进展*, 2008(1):106-110.
- Lyu Yingchun, Liu Congqiang, Wang Shilu, et al. Distribution of p(CO<sub>2</sub>) in Hongfeng Lake in summer stratification[J]. *Advances in Water Science*, 2008(1):106-110.
- [31] Beyruth Z. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga Reservoir, So Paulo State, Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 2000,424:51-65.
- [32] 陈银波. 喀斯特小流域水-气界面二氧化碳释放及其影响因素研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019.
- Chen Yinbo. Carbon Dioxide Release from Water-Air Interface in Karst Watershed and Its Influencing Factors[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [33] 赵登忠,谭德宝,李翀,等. 隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2017,38(3):954-963.
- Zhao Dengzhong, Tan Debao, Li Chong, et al. Temporal and spatial variations and influential factors of carbon dioxide emissions from Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China[J]. *Environmental Science*, 2017,38(3):954-963.
- [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 Meng, Jiao Shulin, Liang Hong, et al. Temporal and spatial variation of carbon dioxide partial pressure and exchange flux characteristics in the backwater area of Wan-feng Lake Reservoir[J]. *Environmental Chemistry*, 2019,38(6):1307-1317.
- [35] 马双忱,于燕飞,徐涛,等. ORP在水环境污染防控方面的应用[J]. *工业水处理*, 2020,40(2):14-18,27.
- Ma Shuangchen, Yu Yanfei, Xu Tao, et al. Application of ORP in water environment pollution prevention and control [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020,40(2):14-18,27.
- [36] 梁顺田,王雨春,胡明明,等. 夏季朱衣河二氧化碳分压分布特征及影响因素分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017,15(2):153-160.
- Liang Shuntian, Wang Yuchun, Hu Mingming, et al. Distributions of partial pressure of carbon dioxide and its affecting factors in Zhuyi River in summer[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, 15(2):153-160.
- [37] 万国江,白占国. 论碳酸盐岩侵蚀与环境变化-以黔中地区为例[J]. *第四纪研究*, 1998(3):279.
- Wan Guojiang, Bai Zhanguo. On carbonate rock erosion and environmental changes-a case study in central Guizhou[J]. *Quaternary Science*, 1998(3):279.
- [38] 张龙军,徐雪梅,温志超. 秋季黄河p(CO<sub>2</sub>)控制因素及水-气界面通量[J]. *水科学进展*, 2009,20(2):227-235.
- Zhang Longjun, Xu Xuemei, Wen Zhichao. Control factors of p(CO<sub>2</sub>) and CO<sub>2</sub> degassing fluxes from the Yellow River in autumn[J]. *Advances in Water Science*, 2009,20(2):227-235.
- [39] 焦树林,刘丽,孙婷,等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应[J]. *地理研究*, 2013,32(6):1025-1032.
- Jiao Shulin, Liu Li, Sun Ting, et al. Hydrological characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of the Sanchahe watershed[J]. *Geographical Research*, 2013,32(6):1025-1032.
- [40] 覃小群,蒋忠诚,张连凯,等. 珠江流域碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气CO<sub>2</sub>汇的效应[J]. *地质通报*, 2015,34(9):1749-1757.
- Qin Xiaoqun, Jiang Zhongcheng, Zhang Liankai, et al. The difference of the weathering rate between carbonate rocks and silicate rocks and its effects on the atmospheric CO<sub>2</sub> consumption in the Pearl River Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015,34(9):1749-1757.
- [41] 翟武,戴明,高旭,等. 长江中下游内河碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气CO<sub>2</sub>汇的效应[J]. *海洋化学*, 2007,107:342-356.
- Zhai W, Dai M, Gao X, et al. Carbonate system and CO<sub>2</sub> degassing fluxes in the inner estuary of Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Marine Chemistry*, 2007,107:342-356.

- [42] Yao G R, Gao Q Z, Wang Z G, 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[J]. Science of the Total Environment, 2007,376:255-266.
- [43] 陈永根,李香华,胡志新,等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 CO<sub>2</sub>通量[J]. 生态环境, 2006(4):665-669.  
Chen Yonggen, Li Xianghua, Hu Zhixin, et al. Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lakes in China in winter[J]. Ecology and Environment, 2006(4): 665-669.
- [44] Jari T H, Jukka A, Anu L, et al. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. Chemosphere, 2003,52(3).
- [45] 赵宗权,曹玉平,焦树林,等. 龙滩水库表层水体 CO<sub>2</sub>分压和水化学特征[J]. 湿地科学, 2018,16(6):793-800.  
Zhao Zongquan, Cao Yuping, Jiao Shulin, et al. Partial pressure of carbon dioxide and hydrochemical characteristics of surface water in Longtan Reservoir[J]. Wetland Science, 2018,16(6):793-800.