

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

张 倩^{1,2}, 焦树林^{1,2}, 梁 虹^{1,2}, 邓飞艳^{1,2}, 袁热林^{1,2}, 曹玉平^{1,2}

(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:为了解万峰湖水库回水区夏季水体溶解 CO₂ 变化规律及水体“源/汇”特征,于 2016 年夏季对万峰湖回水区水体溶解 CO₂ 分压进行走航监测,现场利用水质参数仪测定水体物化参数,其余水质参数于实验室进一步测定分析。结果表明:回水区表层水体 pCO₂ 值变化范围在 150.58~220.05Pa 之间;水体剖面上,表层水体 pCO₂ 值最低,随水体深度增加 pCO₂ 值逐渐增大,在 80 m 处到达最大值;回水区不同于大部分云贵高原湖泊和水库,水体 pCO₂ 表现为过饱和状态,经研究分析认为回水区周围环境、水体自身富氧条件与水体中大量物质分解是引起这一现象的主要原因;利用相关公式计算,回水区 CO₂ 释放通量为 27.4~44.2 mmol·(m²·d)⁻¹,均值为 37.1 mmol·(m²·d)⁻¹,水体表现为大气 CO₂ 的“源”。

关键词:万峰湖;回水区;二氧化碳分压;温室气体

中图分类号:P951

文献标识码: A

文章编号:1000-0852(2018)01-0028-07

1 引言

目前,温室效应引发气候变暖已成为全球最为严重的环境问题,二氧化碳含量占温室气体(GHG)总量 80%~85%,碳循环研究是解决温室效应问题的关键。水库作为陆地水生生态系统重要组成部分,对大气 CO₂ 而言具有重要“源/汇”的功能。水库碳循环研究对认识陆地水生生态系统碳循环具有重要意义。

水库 GHG 的产生和释放与水体中有机质密切相关。外源有机质加入、自身有机质降解均是水体 GHG 重要来源。水体中浮游植物、高等水生植物光合作用是水体 CO₂ 消耗的主要方式。水体 CO₂ 生物化学循环决定水体中 pCO₂ 空间变化与碳交换通量。近年来,水库温室气体交换通量研究逐步引起学术界重视^[1]。法国的法属圭亚那 Petit Saul 水库、巴西的 Tucurui 和 Samuel 水库具有极高的 CO₂、CH₄ 水面释放通量^[2-3]。国内研究主要集中在沿海地带^[4-5]、河流入海口水域^[6-7]、

富营养化湖泊、水库^[8-10]。水库碳循环研究案例中,回水区 GHG 通量研究较少见,基于喀斯特地区水库回水区 GHG 通量研究迄今未见报道,喀斯特具有独特的水文地貌特征,针对其特殊水文地貌特征对该区域水库碳循环开展研究具有一定的理论价值和现实意义。鉴于此,本文针对兴义市喀斯特典型发育区万峰湖水库回水区夏季水体 pCO₂ 变化规律及 CO₂ 释放效应进行探究,以期为喀斯特地区同类型水域碳循环研究提供理论参考。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区概况

万峰湖水库位于珠江源头南盘江上(见图 1),属于典型的河道型水库。地理位置处于云贵高原东南斜坡边缘,地势西北高,东南低,区内呈中高山区及中低山区两类地貌,湖面面积 176km²,总库容 102.6×10⁸m³。本次研究选择万峰湖水库回水区作研究对象,回水区

收稿日期:2017-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41263011);贵州省科学技术基金项目(黔科合计省合[2012]7005 号);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)

作者简介:张倩(1994-),女,贵州黔西人,硕士研究生,研究方向为水文水资源与 GIS。E-mail:453236016@qq.com

通讯作者:焦树林(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为喀斯特水文水资源与流域地表过程和环境变化。E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

由主干道马岭河与三条河汊交叉汇合形成。回水区夏季丰水期间最大水深达到80m,人类活动较为密切,区内地势平坦,周围植被生长旺盛,流速极度缓慢,具有类似湖泊水文水动力特征。

2.2 研究方法

2016年9月对万峰湖回水区8个监测点进行水样采集(见图1)。全程走航监测,利用多参数水质仪现场测定温度(*T*)、氧化还原电位(*ORP*)、电导(*Cond*)、总溶解固体颗粒物(*TDS*)、*pH*以及对水体*pCO₂*进行监测,用HCl滴定水体中*HCO₃⁻*,检测其浓度。其余阴阳离子浓度带回实验室检测。监测过程中利用采水器对回水区不同深度进行水样采集,每隔10m采集一次水样。同时,利用GPS对采样点进行定点,运用Google earth以及Arcgis10.1对采样路线和采样点进行空间分析,确定其地理位置(见图1)。

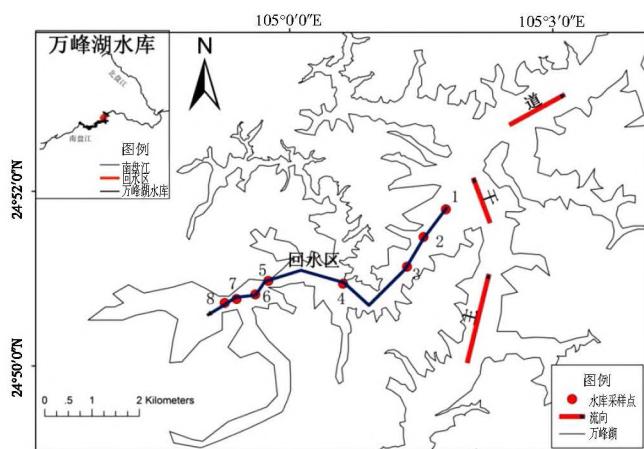


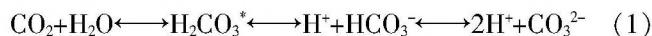
图1 采样点分布示意图

Fig.1 The location of the study area and sampling sites

2.3 数据处理

2.3.1 水体二氧化碳分压计算

回水区水体CO₂分压根据碳酸平衡原理及亨利系数计算,水体中溶解无机碳(DIC)由CO₃²⁻、H₂CO₃、HCO₃⁻、CO₂组成,平衡状态时各成分在水溶液中浓度与水温、*pH*和离子浓度密切相关,其中T、*pH*、HCO₃⁻及阴阳离子均已测出,现根据张永领在黄河花园口站和小浪底站*pCO₂*及扩散通量研究中相关原理及公式计算万峰湖回水区水溶液中二氧化碳分压值^[11]:



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

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

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

CO₂平衡常数由

K_{CO₂}

表示,碳酸第一级和第二级解离常数表示为

K₁

、

K₂

,各平衡常数分别采用以下方程计算:

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

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

$$pK_2 = 19 \times 10^{-5} T^2 - 0.013 T + 10.62 \quad (7)$$

因此,*pCO₂*根据亨利定律运用以下方程计算:

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

式中: $\alpha(\text{H}^+)$ 和 $\alpha(\text{HCO}_3^-)$ 为H⁺和HCO₃⁻在水体中浓度,运用公式(9)、(10)得出,*I*为离子强度,由公式(11)计算:

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

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

$$I = 0.5 \times ([\text{K}^+] + [\text{Ca}^{2+}] \times 4 + [\text{Na}^+] + [\text{Mg}^{2+}] \times 4 + [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] \times 4 + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-]) / 1000 \quad (11)$$

2.3.2 表层水体CO₂交换通量

水~气间交换通量受水气间二氧化碳分压差与气体交换系数控制。根据气象部门公布的气象消息,可确定当天平均风速在0.3~1.5m·s⁻¹之间,回水区地势平坦,流速缓慢。单位时间、单位面积内水~气间CO₂交换通量(*F*)采用前人对水体碳分压研究中公式计算^[11-14]:

$$F = K \times (p\text{CO}_{2w} - p\text{CO}_{2a}) \quad (12)$$

式中:*F*为水~气间CO₂交换通量;*K*为水~气间交换系数,*K*=*k*×*r*,*k*为气体交换输运速率,*r*为某温压条件下的CO₂溶解度;*pCO_{2w}*-*pCO_{2a}*为水体与大气之间CO₂分压差;目前*k*值计算公式较多,根据研究区特点,采用Wanninkhof^[15]于1992年提出的计算水~气界面气体交换输运速率(*k*)公式:

$$k = b U^2 (600 / Sct)^{1/2} \quad (13)$$

式中:*U*为风速,当*U*取瞬时风速时**b**=0.31,取平均风速时**b**=0.39;*Sct*为摄氏温度下Schmidt常数,*Sct*计算公式表示为:

$$Sct = 1911.1 - 118.11 \times t + 3.4527 \times t^2 - 0.04132 \times t^3 \quad (14)$$

溶解度(*r*)计算公式为:

$$Lnr = A_1 + A_2 (100/T) + A_3 \ln(T/100) + S\% \times [B_1 + B_2 (T/100) + B_3 (T/100)^2] \quad (15)$$

式中:*T*为摄氏温度;*S*为盐度;当*r*的单位为10mol/(L·Pa)时,常数A₁=-58.0931,A₂=90.5096,A₃=22.2940,B₁=0.027766,B₂=-0.025888,B₃=0.0050578。由于当天平均风速*U*

在 $0.3\sim1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,根据公式(13)、(14)、(15)求得水~气交换系数(K)值为 $0.182\sim0.303\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, K 取中间值 $0.243\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。最后,算出水~气界面交换通量(F)为 $27.4\sim44.2\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,均值为 $37.1\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。显然,回水区表层水体 CO_2 分压大于大气 CO_2 分压,表层水体向大气释放 CO_2 ,回水区表现为大气 CO_2 的“源”。

3 结果与分析

3.1 研究区水体表层参数变化

数据分析结果表明:回水区各水质参数变化幅度不大(见图2)。夏季水体温度均偏高,水温从河汊与马岭河交叉口至回水区内部变化较为平稳($28.3\sim29^\circ\text{C}$),均值为 28.8°C ,该温度环境利于水生植物活动;pH在第3个点突升后逐渐降低,变化范围 $7.95\sim8.13$,均值8.0,水体呈弱碱性;氧化还原电位(ORP)沿河口交叉处至回水区内部整体呈上升趋势,变化范围在 $117\sim148\text{mV}$ 之间; $Cond$ 与TDS均缓慢下降,变化范围分别为 $302\sim318.4\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $169.2\sim205.8\text{ppm}$;回水区水体 $p\text{CO}_2$ 值偏低,沿交叉处至回水区内部整体呈上升趋势,波动区间在 $150.58\sim220.05\text{Pa}$ 之间,均值

190.8Pa 。 $p\text{CO}_2$ 偏低,pH值偏高表示表层水体水生植物生物活动以光合作用为主。回水区水体 $p\text{CO}_2$ 明显高于大气 $p\text{CO}_2$ (38Pa),水体向空气释放 CO_2 ,表现为大气 CO_2 “源”。

3.2 交汇处水体剖面参数变化

在离水库回水区与水库主干马岭河交汇点20m处(采样点2)进行了水体剖面监测,监测结果发现,水体 $p\text{CO}_2$ 、TDS、 $Cond$ 、pH、 ORP 随水体深度增加均发生明显变化(见图3),表层 $p\text{CO}_2$ 值最低,随水体深度增加显著上升,在80m处达到最大值,变化范围为 $204.75\sim1076.81\text{Pa}$;TDS随水体深度增加同样呈上升趋势,变化范围为 $86.7\sim203.2\text{ppm}$,表明水体中含有大量颗粒物质; ORP 从表层至60m水深处较为稳定,到达70m时急剧下降(-93mV),主要由于回水区深水水体光合作用弱释放的氧气较少,同时深水区有机质含量高,水体颗粒物质及有机质分解释放 CO_2 ,降低含氧量致使水体表现为缺氧状态, ORP 变为负,这与李秋华研究发现万峰湖水体夏季分层明显,且溶解氧在水深60m处过后突降,被有机质、水生生物耗尽水体转为缺氧状态研究结果相符^[16];pH呈递减趋势,变化范围为 $8.01\sim7.41$ 。

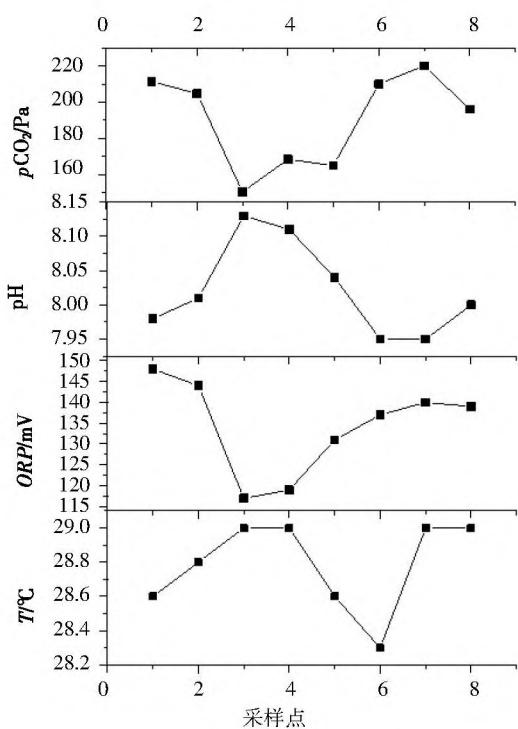


图2 表层水体各水质参数变化

Fig.2 The variation of the surface hydrocarbon parameters

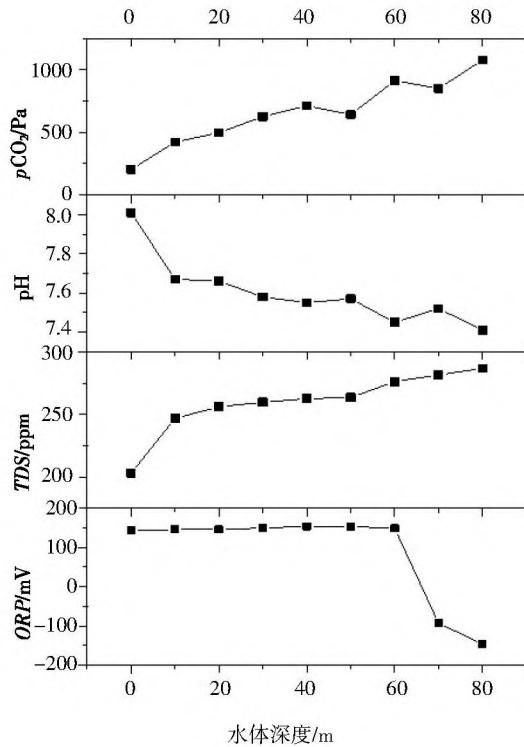


图3 剖面水体各水质参数变化

Fig.3 The variation of the vertical hydrocarbon parameters

4 讨论

4.1 表层水体 $p\text{CO}_2$ 与水化学参数相关性

由图 4 可见,回水区表层水体 $p\text{CO}_2$ 与 ORP 呈正相关关系,水体中高 ORP ,高 $p\text{CO}_2$ 表明浮游植物以光合作用为主,富氧水体促进有机质分解,释放出更多的 CO_2 ,最后,致使 $p\text{CO}_2$ 增大,这一现象可能与水体周围植被及水气间 O_2 交换有关,回水区浮游植物光合作用释放 O_2 加之水气界面 O_2 交换促使回水区水体形成富氧环境。此外,回水区水流速度缓慢,处于干支流交叉部位,水体受到上游干支流顶托作用,致使沉积在水体底部大量的死亡藻类聚集于该区域,呼吸作用加强,最终导致表层水体 $p\text{CO}_2$ 较高;水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH 存在明显负相关关系,水体 CO_2 增加, pH 减小,这主要与回水区地形条件和水动力条件有关,研究区人类活动频繁,周围植被生长茂盛。区内水体淹没的植被以及淋溶到水体中无机盐、营养物质,加之水体流速缓慢,水深深度大,为浮游植物生长提供有利条件,导致回水区水生生态系统由异养体系向自养体系转变,形成回水区独特的“湖泊型”水生生态体系。

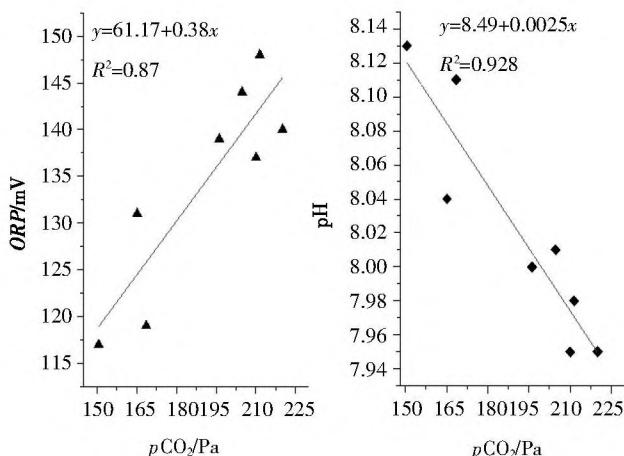


图 4 表层 $p\text{CO}_2$ 与水化学参数线性关系

Fig.4 The relationship between the surface $p\text{CO}_2$ and hydrochemistry parameters

4.2 水体垂直剖面 $p\text{CO}_2$ 与水化学参数相关性

通过对 Cond 、 TDS 、 pH 、 T 与 $p\text{CO}_2$ 线性回归分析发现(见图 5): $p\text{CO}_2$ 与 pH 呈显著负相关关系,而与 Cond 、 TDS 表现为显著正相关, Cond 、 TDS 与 $p\text{CO}_2$ 随水体深度增加持续增大,这可能与万峰湖水库处于喀斯特典型发育区有关,上游水体携带的有机质及回水区周围大量溶解有机碳和颗粒有机碳在回水区沉积、

分解并释放 CO_2 ,最后致使 $p\text{CO}_2$ 增加, pH 降低。水体垂直剖面上 T 降低,水体中化学反应及生物活动受到控制,水体无机碳平衡以呼吸作用为主导,如:自剖面 20m 起, $p\text{CO}_2$ 更高,50m 和 70m 处略微浮动后持续升高,底层达到极值; pH 则更低,经酸碱平衡过程后在 60m 至 80m 出现同类型波动变化。因此,水体垂直剖面表现出:高 TDS 、 Cond ,高 $p\text{CO}_2$,低 pH 特征。

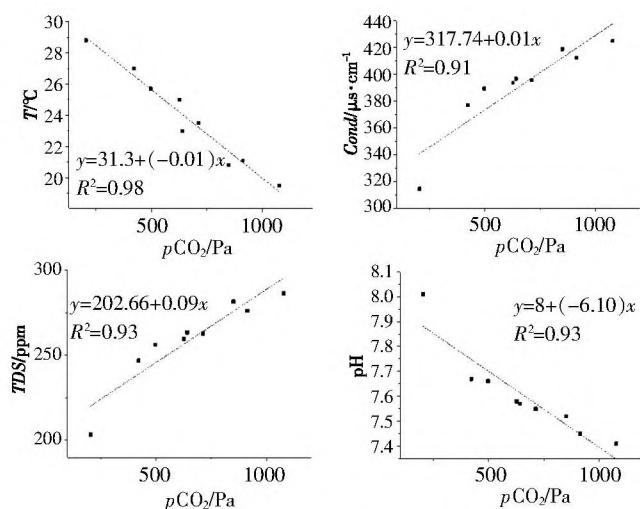


图 5 剖面水体与各水化学参数线性关系
Fig.5 The relationship between the vertical difference hydrochemistry parameters

4.3 与其它水体“源”“汇”特征比较

据相关研究报道(见表 1),大部分水库、湖泊夏季丰水期期间水体 CO_2 出现欠饱和现象。王仕禄研究发现夏季云贵高原湖泊均表现为水体 CO_2 欠饱和状态,吸收 CO_2 成为大气的“汇”^[10];三峡库区高阳回水区夏季水体表现为大气 CO_2 “汇”,由于夏季浮游植物生长及光合作用导致水体溶解 CO_2 降低,水体 $p\text{CO}_2$ 低于大气 $p\text{CO}_2$ ^[17];吴学谦对三峡水库夏季干支流草堂河研究发现由于水体流速快和夏季期间浮游生物强烈光合作用,减缓水体 CO_2 的释放,导致水体溶解 CO_2 低于大气平均值,水体 CO_2 呈欠饱和状态^[18];经本文分析计算,夏季万峰湖回水区 $p\text{CO}_2$ 为 190.83Pa,大气 $p\text{CO}_2$ 为 38Pa。夏季万峰湖回水区表现为向大气释放 CO_2 ,这一现象主要是与研究区周围环境以及水体中大量物质分解有关,表层水体浮游生物仍主要受光合作用控制,深水水体中大量溶解有机碳、溶解无机碳分解释放 CO_2 ,致使夏季万峰湖回水区水体 CO_2 过饱和,表现为大气 CO_2 “源”。

表1 相似水库、河流“源/汇”特征
Table1 The “source”and “sink” feature of the similar reservoirs and rivers

研究区		水环境	$p\text{CO}_2/\text{Pa}$	饱和状态	源/汇	研究学者
云贵高原水库、湖泊	草海 百花湖 泸沽湖	浮游生物生长受控于光合作用消耗 CO_2	低于大气 CO_2 值, $<20\text{Pa}$	欠饱和	汇	王仕禄,等
云贵高原水库、湖泊	阿哈湖 洱海 红枫湖	浮游生物生长受控于光合作用消耗 CO_2	近似与大气 CO_2 平衡, $\approx 38\text{Pa}$	平衡	平衡	王仕禄,等
三峡水库高阳回水区		浮游生物生长且以光合作用为主消耗 CO_2	15.2 ± 0.71	欠饱和	汇	郭劲松,等
三峡水库草堂河		浮游生物主要以光合作用为主, 水体流速快, CO_2 易溢出	15.8	欠饱和	汇	吴学谦,等
本研究		浮游生物以光合作用为主, 同时水体中大量有机碳、无机碳、营养物质分解释放 CO_2	190.83	过饱和	源	本研究

4.4 水气界面 CO_2 交换通量水平

万峰湖为典型河道型水库, 现有水库回水区水气界面 CO_2 释放通量研究较少。万峰湖回水区作为大气 CO_2 “源”, 释放通量均值 $37.1\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。三峡水库小江回水区9月份作为大气 CO_2 的“汇”, 吸收大气中 CO_2 ^[19]。三峡水库澎溪河流域高阳回水区夏季同样表现为大

气 CO_2 的“汇”, 吸收量在 $-0.17 \sim -0.33\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间^[17]。与国内外水库 CO_2 交换通量研究相比, 万峰湖水库回水区释放通量水平整体居中, 高于国内洪家渡水库, 万安水库, 新安江水库释放通量, 低于巴西、加拿大等水库(见表2)。

表2 主要水库水气界面 CO_2 交换通量
Table2 CO_2 flux through the water-air interface of main reservoirs

水库	位置	气候带	交换通量/ $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	文献来源
Samuel	巴西	热带	90.91	Guerin et al, 2008 ^[2]
Xingo	巴西	热带	139.50	Yao et al, 2007 ^[20]
Laforge	加拿大	温带	52.27	Yao et al, 2007 ^[20]
Cabonga	加拿大	温带	18.2	Duchemin E, 1995 ^[21]
F.D.Roosevelt	美国	温带	-23.4	Soumi N, 2004 ^[22]
Dworshak	美国	温带	18.2	Soumi N, 2004 ^[22]
洪家渡水库	中国	亚热带	6.14	喻元秀等, 2008 ^[12]
万安水库(春季)	中国	亚热带	12.74	梅航远等, 2011 ^[23]
新安江水库	中国	亚热带	7.03	姚臣谌等, 2010 ^[24]
红枫湖	中国	亚热带	20.20	刘丛强等, 2007 ^[8]
云贵高原湖泊	中国	亚热带	10.00	王仕禄等, 2003 ^[10]
澎溪河高阳回水区	中国	亚热带	-4.08~7.92	郭劲松等, 2010 ^[17]
万峰湖回水区(夏季)	中国	亚热带	37.1	本研究

5 结论

(1)与现有研究相反, 万峰湖回水区夏季水体向大气释放 CO_2 , 成为大气 CO_2 的“源”。水体 T 、 pH 、 ORP 偏高, $p\text{CO}_2$ 为 $150.58 \sim 220.05\text{Pa}$, 均值为 190.8Pa , 高于大气

$p\text{CO}_2$ 值。通过公式计算得知研究区水体 CO_2 释放通量为 $27.4 \sim 44.2\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $37.1\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2)经线性回归分析表明, 表层水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH 表现为显著负相关关系, 与 ORP 呈显著正相关。浮游生物光合作用释放 O_2 、水气间 O_2 交换促使回水区水

体形成富氧环境,足量的O₂加快了有机质的分解,此外,回水区水体受上游干支流顶托,沉积于深层水体大量的死亡藻类聚集到上层水体中,致使水体中有机质分解,呼吸作用加强,水体pCO₂增大;浮游生物利用水体中CO₂进行光合作用,水体pCO₂增加pH减小。这主要是由于回水区地形及水动力因素有关,水流速度缓慢导致回水区由贫营养异养型湖泊向富营养自养型湖泊转变,最终形成特有的自给自足的循环系统。

(3)回水区水体剖面上,水体深度增加水体pCO₂越大,其值变化范围为204.75~1076.81Pa,分析结果表明水体pCO₂与pH和T负相关,与TDS、Cond呈正相关。水温通过影响浮游生物活动间接影响水体pCO₂和pH值,水体随着深度增加,水体无机碳平衡体系逐渐被浮游生物的“呼吸作用”所控制,pCO₂逐渐增大,pH、T减小。此外,水体内部沉积的大量物质,溶解无机碳,颗粒有机碳受到分解释放CO₂,出现高TDS、Cond,高pCO₂特征。

参考文献:

- [1] 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 mainstream and tributary of the central three gorges reservoir in summer [J]. Environmental Science, 2014,35(3):885~891. (in Chinese))
- [2] Guerin F, Abril G, De Junet A, et al. Anaerobic decomposition of tropical soils and plant material implication for the CO₂ and CH₄ budget of the Peyiy Sant reservoir[J]. Applied Geochemistry, 2008,23:2272~2283.
- [3] St Louis V L, Kelly C A, Duchemin E, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. Bio Science, 2000,50:766~775.
- [4] 薛亮,张龙军.北黄海夏季pCO₂分布及海~气CO₂通量[J].中国海洋大学学报,2011,48(12):22~29.(XUE Liang, ZHANG Longjun. Surface pCO₂ and air-sea CO₂ flux in the northern Yellow Sea during summer [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011,48(12): 22~29. (in Chinese))
- [5] 焦树林,高全洲,刘昆.西江磨刀门水道枯季咸淡水混合特征和二氧化碳分压分布[J].海洋学报,2009,31(6):40~47. (JIAO Shulin, GAO Quanzhou, LIU Kun. Salt freshwater mixing characteristics and the variations of the partial pressure of carbon dioxide along the Modao Gate waterway in the Xijiang River in China in drought season[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009,31(6):40~47. (in Chinese))
- [6] 唐文魁,高全洲.河口二氧化碳水~气交换研究进展[J].地球科学进展,2013,28(9):1007~1014.(TANG Wenkui, GAO Quanzhou. Research advance in air-water CO₂ exchange of estuaries[J]. Advances in Earth Science, 2013,28(9):1007~1014. (in Chinese))
- [7] 马玉,高全洲,唐文魁,等.珠江口表层水体CO₂分压的空间和季节变化[J].中山大学学报(自然科学版),2016,55(3):39~46. (MA Yu, GAO Quanzhou, TANG Wenkui, et al. The spatial and seasonal variations of partial pressure of carbon dioxide in surface water in pearl River Estuary[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016,55(3):39~46. (in Chinese))
- [8] 刘丛强.生物地球化学过程与地表物质循环—西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M].北京:科学出版社,2007. (LIU Congqiang. Biogeochemical Processes and Surface Material Cycles: Cycle of Erosion and Source Elements in Karst Watershed of Southwest China[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 吕迎春,刘丛强,王仕禄,等.贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖pCO₂季节变化研究[J].环境科学,2007,28(12):2674~2681. (LV Yingchun, LIU Congqiang, WANG Shilu, et al. Seasonal variability of pCO₂ in the two karst reservoirs HongFeng and BaiHua lakes in Guizhou province [J]. Environmental Science, 2007,28 (12):2674~2681. (in Chinese))
- [10] 王仕禄,万国江,刘丛强,等.云贵高原湖泊CO₂的地球化学变化及其大气CO₂源汇效应[J].第四纪研究,2003,23(5):581~581. (WANG Shilu, WAN Guojiang, LIU Congqiang, et al. Geochemical changes and its effects on sources or fates of CO₂ in the lakes of Yunnan-Guizhou plateau[J]. Quaternary Sciences, 2003,23(5):581~581. (in Chinese))
- [11] 张永领,杨小林,张东.小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及其扩散通量[J].环境科学,2015,36(1):40~48. (ZHANG Yongling, YANG Xiaolin, ZHANG Dong. Partoal pressure of CO₂ and CO₂ degassing fluxes of Huayuankou and Xiaolangdi station affected by Xiaolangdi reservoir[J]. Environmental Science, 2015,36(1):40~48. (in Chinese))
- [12] 喻元秀,刘丛强,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,2008,27(7):1193~1199. (YU Yuanxiu, LIU Congqiang, WANG Baoli, et al. Spatiompatial characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide (pCO₂) in Hongjiadu reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008,27(7):1193~1199. (in Chinese))
- [13] 袁希功,黄文敏,毕永红,等.香溪河库湾春季pCO₂与浮游植物生物量的关系[J].环境科学,2013,4(5):1754~1760.(YUAN Xigong, HUANG Wenming, BI Yonghong, et al. Relationship between pCO₂ and algal biomass in Xiangxi bay in spring[J]. Environmental Science, 2013,4(5):1754~1760. (in Chinese))
- [14] 张龙军,徐雪梅,温志超.秋季黄河pCO₂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 pCO₂ and CO₂ degassing fluxes from the Yellow River in autumn[J]. Advances in Water Science, 2009,20(2):227~235. (in Chinese))
- [15] Wminkh R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Journal of Geophysical Research, 1992,97(C5): 7373~7382.
- [16] 李秋华,商立海,高廷进,等.喀斯特高原深水水库—万峰湖富营养

- 化分析[J]. 生态科学, 2013,32(2):194–199. (LI Qiuhsua, SHANG Lihai, GAO Tingjing, et al. Eutrophication characteristics of a karst plateau deep-water Wanfeng reservoir[J]. Ecological Science, 2013,32(2):194–199. (in Chinese))
- [17] 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 Jinsong, JIANG Tao, LI Zhe, et al. Analysis on partial pressure of CO₂ and influencing factors during spring phytoplankton bloom in the backwater area of Xiaojiang river in Three Gorges reservoir[J]. Advances in Water Science, 2012,24(2):190–196. (in Chinese))
- [18] 吴学谦,操满,傅家楠,等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量[J]. 上海大学学报, 2015,21(3):311–318. (WU Xueqian, CAO Man, FU Jia'nan, et al. Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the main stream of the three gorge reservoir and the Caotang River in summer[J]. Journal of Shanghai University, 2015,21(3):311–318. (in Chinese))
- [19] 冉景江,林初学. 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 Jingjiang, LIN Chuxue. Spatial an temporal variation of carbon dioxide partial pressure over the Xiaojiang River backwater area of the three gorges reservoir [J]. Resources an Environment in the Yangtze Basin, 2011,20(8):976–982. (in Chinese))
- [20] Yao G, Gao Q, Wang Z, et al. Dynamics of CO₂ partial pressure and CO₂ outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China [J]. Science of the Total Environment, 2007,376(1–3):255–266.
- [21] Duchemin E, Lucotte M. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ buried hydroelectric reservoirs of the Boreal region[J]. Global Biogeochem. Cycles, 2003,9(4):529–540.
- [22] Soumis N, Duchemin E, Canuel R, et al. Greenhouses gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004,1(3):73–73.
- [23] 梅航远,汪福顺,姚臣谌,等. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究 [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. (in Chinese))
- [24] 姚臣谌,汪福顺,吴以瀛,等. 新安江水库水体春季二氧化碳分压的分布规律研究[J]. 地球环境学报, 2010,1(2):150–156. (YAO Chenchen, WANG Fushun, WU Yiying, et al. The vernal distribution of dissolved carbon dioxide ($p\text{CO}_2$) in the Xinanjiang reservoir [J]. Journal of Earth Environment, 2010,1(2):150–156. (in Chinese))

Partial Pressure Variation and Diffusion Flux of CO₂ in Reservoir Backwater Area in Karst Zone in Summer

ZHANG Qian^{1,2}, JIAO Shulin^{1,2}, LIANG Hong^{1,2}, DENG Feiyan^{1,2}, YUAN Relin^{1,2}, CAO Yuping^{1,2}

(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 investigate the CO₂ in water of the backwater area of the Wanfenghu Reservoir in summer, and whether this area is a resource or a sink of the CO₂ in air, the partial pressure of CO₂ in the backwater area was detected by an underway observation system in September 2016. The investigation employed Ultrameter (6P) to detect the water quality parameters in the backwater area, the other parameters were detected in the laboratory. The results show that the $p\text{CO}_2$ in surface water of the backwater area is 150.58–220.05Pa. According to data on different soundings, the $p\text{CO}_2$ in surface water is the lowest and it increases steadily with the depth of water. The $p\text{CO}_2$ goes up after a slight drop at a depth of 50m and reaches a peak at a depth of 80m. The dissolved quantity of CO₂ in the backwater area in summer is supersaturated, different from the undersaturation in most lakes in Yun-Gui Plateau and reservoirs. This phenomenon is relevant to the surroundings, the features of water of the backwater area as well as a large number of sediments and resolvent in it. In reference to interaction formula, the diffusion flux of CO₂ is 27.4–44.2mmol·4 (m²·d)⁻¹ and the mean value is 37.1mmol·(m²·d)⁻¹. The water of the backwater area represents as the resource of the CO₂ in the air.

Key words: Wanfeng Lake; backwater area; pressure of CO₂; greenhouse gases