

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 Yuping, Yuan Relin, Jiao Shulin, 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.

光照水库夏季分层期间二氧化碳分压分布特征

曹玉平^{1,2}, 袁热林^{1,2}, 焦树林^{1,2*}, 张倩^{1,2}, 邓飞艳^{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: 为了解新建水库二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)的空间分布规律,在光照水库夏季分层期间(2016年9月)进行分层采样,获取水体主要的理化参数及测定水体主要营养盐(NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)浓度,根据水化学平衡原理及亨利定律计算水体二氧化碳分压。结果表明:光照水库夏季水温出现热分层且可分为3层,0~10 m为表水层;10~30 m为温跃层;30 m以下为底温层。表层水体 $p\text{CO}_2$ 变化范围为125.30~179.35 Pa,均值147.11 Pa,低于世界河流平均水平,表现为大气 CO_2 的源。 $p\text{CO}_2$ 垂直空间分布随着水深度的增加而升高,库底达到最大值。相关分析表明:光照水库 $p\text{CO}_2$ 与温度(t)、pH、 NH_4^+-N 之间呈极显著负相关,与总溶解固体物(total dissolved solids, TDS)、碱度(alkalinity, ALK)之间呈极显著正相关。水生生物光合作用和呼吸作用、岩溶库区碳酸盐体系是控制光照水库 $p\text{CO}_2$ 的主要机制。

关键词: 光照水库; 二氧化碳分压; 热分层; 理化参数

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.06.003 **文章编号:** 1003-6504(2018)06-0015-07

Distribution Characteristics of Partial Pressure of Carbon Dioxide during Thermal Stratification in Summer in Guangzhao Reservoir

CAO Yuping^{1,2}, YUAN Relin^{1,2}, JIAO Shulin^{1,2*}, ZHANG Qian^{1,2}, DENG Feiyan^{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 understand the distribution of partial pressure of carbon dioxide($p\text{CO}_2$) in the newly built reservoir, water samples were taken by continuous navigation observation and stratified sampling to determine their main physical and chemical parameters and nutrients concentration of NH_4^+-N , NO_3^--N , $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ at karst area reservoir of Guangzhao in September 2016. The partial pressure of CO_2 was calculated using the chemical balance and the Henry's law. The results showed that the water temperature occurred obviously to thermal stratification with three layers including the surface layer(0~10 m), the thermocline layer (10~30 m) as well as the bottom layer (>30 m). The values of partial pressure of carbon dioxide in surface ranged from 125.30 to 179.35 Pa, with the mean values of 147.11 Pa. The values of $p\text{CO}_2$ in the Reservoir was lower than the average values in the world which acted as the source of atmospheric carbon dioxide. In the vertical, the $p\text{CO}_2$ increased with water depth and the maximum value occurred at the bottom of the Reservoir. The $p\text{CO}_2$ was significant negative correlated with temperature (T), pH, NH_4^+-N and was positive correlated with total dissolved solids(TDS) and alkalinity(ALK). Photosynthesis and respiration of aquatic organisms as well as the carbonate system were the main mechanisms influencing the control of $p\text{CO}_2$ in the Reservoir.

Key words: Guangzhao Reservoir; partial pressure of carbon dioxide; thermal stratification; physical and chemical parameters

《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:2017-09-20;修回2017-12-10

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

作者简介:曹玉平(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为水文水资源与GIS,(电子信箱)1329991949@qq.com;*通讯作者,男,教授,博士,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,(电子信箱)jiaoshulin@gznu.edu.cn。

陆地生态系统碳循环及其驱动机制是当前全球变化研究的重要组成部分,是预测未来大气 CO_2 变化及全球气候变暖的关键所在^[1]。陆地生态系统的碳循环主要体现在陆地、湖泊、河流与大气 CO_2 之间的交换,以及通过河流作用向海洋直接的输运碳。河流作为连接陆地与海洋两大碳库的主要通道,每年河流向海洋输送的总有机碳(TOC)和溶解无机碳(DIC)分别为 $0.4\sim 0.8 \text{ Pg/a}$ 和 0.4 Pg/a ^[2]。近年来水能资源作为一种清洁能源被快速推广发展,在河流上截流修建水库的数量呈逐年增加的趋势,目前我国已建有水库97 988座^[3]。筑坝改变河流原始水动力条件,使之成为介于湖泊和河流之间的半自然态水体,由此引起的水环境及水生态系统中生物地球化学循环过程发生改变^[4-6]。碳作为一种生源元素,筑坝对自然状态下河流生态系统碳循环过程和碳迁移转化机制产生影响,进而形成新的水域生态系统和碳循环模式^[7,8]。

河流成库后往往大量淹没陆地原生生态系统,植被在随后的腐化降解过程中逐渐向水体释放无机形式的营养盐(包括N、P等),同时也释放温室气体(如 CO_2 、 CH_4 等)。水体中溶解态 CO_2 主要来自底层沉积物的呼吸^[9]、水体中有机物的矿化以及通过地表地下径流所带入的陆生植物呼吸及岩石风化所产生的 CO_2 ,而水体中 CO_2 的消耗则主要通过浮游植物及高等水生植物的光合作用。生产和消耗两者共同决定了水体 $p\text{CO}_2$ 的分布状况。当表层水体 $p\text{CO}_2$ 高于大气 $p\text{CO}_2$ 时,在水-气界面处通过分子扩散、对流传输等途径向大气释放 CO_2 ,则此时水体便成为所谓的“碳源”,反之则称为“碳汇”^[10-12]。目前,国内外关于河流、水库研究成果较多,但是对于新建水库水体 $p\text{CO}_2$ 分布规律研究比较少见。鉴于此,本文以北盘江新建水库—光照水库为例,分析筑坝后水体主要理化参数性质变化特征,探讨新建水库 $p\text{CO}_2$ 分布规律和影响机制,进一步为水库水资源管理、温室气体排放研究等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北盘江发源于乌蒙山东麓白马梁子东北坡($26^\circ 20' 19'' \text{N}$, $104^\circ 03' 21'' \text{E}$),是红水河左岸最大的支流。流域内属于亚热带季风气候、冬干夏湿气候带。多年平均气温 10.5°C ,多年平均降水 $1\,300\sim 1\,600 \text{ mm}$,植被类型主要为云贵高原半湿润常绿阔叶林和针叶林^[13]。北盘江为典型的喀斯特地区,流域中上游碳酸盐岩分布广泛,在中上游区域二叠系、三叠系碳酸盐岩、含煤岩组分布广泛,岩石主要以灰岩、砂页岩

为主,碳酸盐岩类占整个流域面积的53.4%,下游部分区域分布碎屑岩^[14]。光照水库位于贵州省晴隆县和关岭县交界处的北盘江中游,为北盘江干流上的龙头梯级水电站,坝址以上流域面积 $13\,548 \text{ km}^2$,正常蓄水位为 745 m ,水库总库容 31.45 亿 m^3 ,是我国的“西电东送”第二批攻坚的大型水电工程之一。

1.2 样品采集与分析

于2016年9月3日(阴天,风速 $0.3\sim 1.5 \text{ m/s}$)沿坝前向上游共设置6个垂直采样点,利用GPS仪确定采样点位置,结合Google earth及Arcgis10.1软件绘制采样点分布图(图1)。利用美国Myron L.C.生产的Ultr- II (6P)多数水质仪现场测定水样的温度(t)(精度为 0.1°C)、氧化还原电位(ORP)(精度为 1 mV)、pH(精度为 0.01 pH)、总溶解固体物质(TDS)(精度为 0.1 mg/L)。以甲基橙为指示剂,用稀盐酸现场滴定水样中的碱度(ALK)。每个采样点水样用采水器打水清洗3次后装瓶,密封带回实验室测定营养盐离子。用哈希多参数水质测定仪(HI83200)分析测定样品各营养盐含量,主要包括氨氮(NH_4^+-N),硝态氮(NO_3^--N)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3--}\text{P}$)。

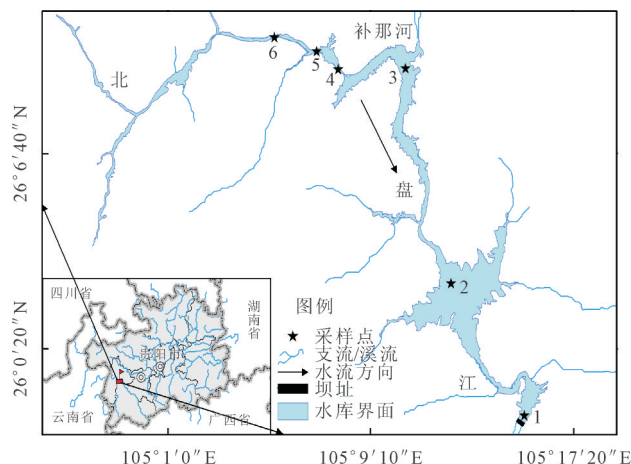


图1 采样点位置示意图

Fig.1 The map of sampling sites

1.3 二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)计算

水体中的溶解无机碳(DIC)主要由溶解态 CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 及 CO_3^{2-} 等组成,各组成含量易受外界环境(主要为pH、水温、水溶液中的离子强度等)的影响而发生相互转化,依据文献^[10-12]根据pH值、碱度(ALK)值以及与温度相关的碳酸盐平衡体系的反应常数 K_1 、 K_2 和 K_{CO_2} ,计算水体 $p\text{CO}_2$:

$$p\text{CO}_2 = c(\text{H}_2\text{CO}_3^*)/K_{\text{CO}_2} = C(\text{H}^+)C(\text{HCO}_3^-)/K_{\text{CO}_2}K_1 \quad (1)$$

式(1)中 $p\text{CO}_2$ 为水中 CO_2 分压,Pa; K_{CO_2} 、 K_1 为平衡常数; $C(\text{H}^+)$ 、 $C(\text{HCO}_3^-)$ 分别为水中 H^+ 及 HCO_3^- 浓度, mol/L。所有数据统计分析在Excel、Origin9.0、SPSS

19.0软件中完成,各参数描述性统计见表1。

2 结果与分析

2.1 水体理化参数变化特征

表层水温为25.8~27.8℃,均温26.75℃,水温变化不大;剖面上水温变化范围为22.4~27.8℃,均温24.14℃,表层和底层水温相差5.4℃,水温变化差异明显。根据温度垂直变化梯度(0.05℃/m)^[15],大致可分为3层:0~10 m为表水层;10~30 m为温跃层;30 m

以下为底温层,30 m水温垂直变化出现拐点,温度随着深度增加先增加后降低(图2(a))。分析其原因,北盘江流域多为峡谷地带,两岸侵蚀严重,本次采样点大多数都处在支流汇入口,容易受支流上游来水的影响产生异重流,扰动底层水体温度分布状况^[16]。

水体pH值在7.76~8.07之间,受碳酸盐体系控制,水体呈弱碱性。pH垂直变化与温度大致上一致,最高值出现表层水体,随着深度的增加pH值逐渐降低(图2(b))。表层光照强度大,水生生物生物量大,

表1 水体理化参数描述统计结果

Table 1 Description of statistical results about physical and chemical parameters in water

项目	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(C_v)	项目	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(C_v)
$t/^\circ\text{C}$	22.40	27.80	24.14	1.37	0.06	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.02	0.35	0.11	0.07	0.64
$\text{TDS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	164.90	222.10	204.11	15.24	0.07	$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2.00	9.00	4.24	1.74	0.41
pH	7.76	8.07	7.92	0.08	0.01	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.01	0.16	0.06	0.04	0.59
ORP/mV	57.00	110.00	80.95	15.71	0.19	$p\text{CO}_2/\text{Pa}$	125.30	396.72	220.78	62.68	0.28
$\text{ALK}/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	1.90	4.90	2.82	0.51	0.18						

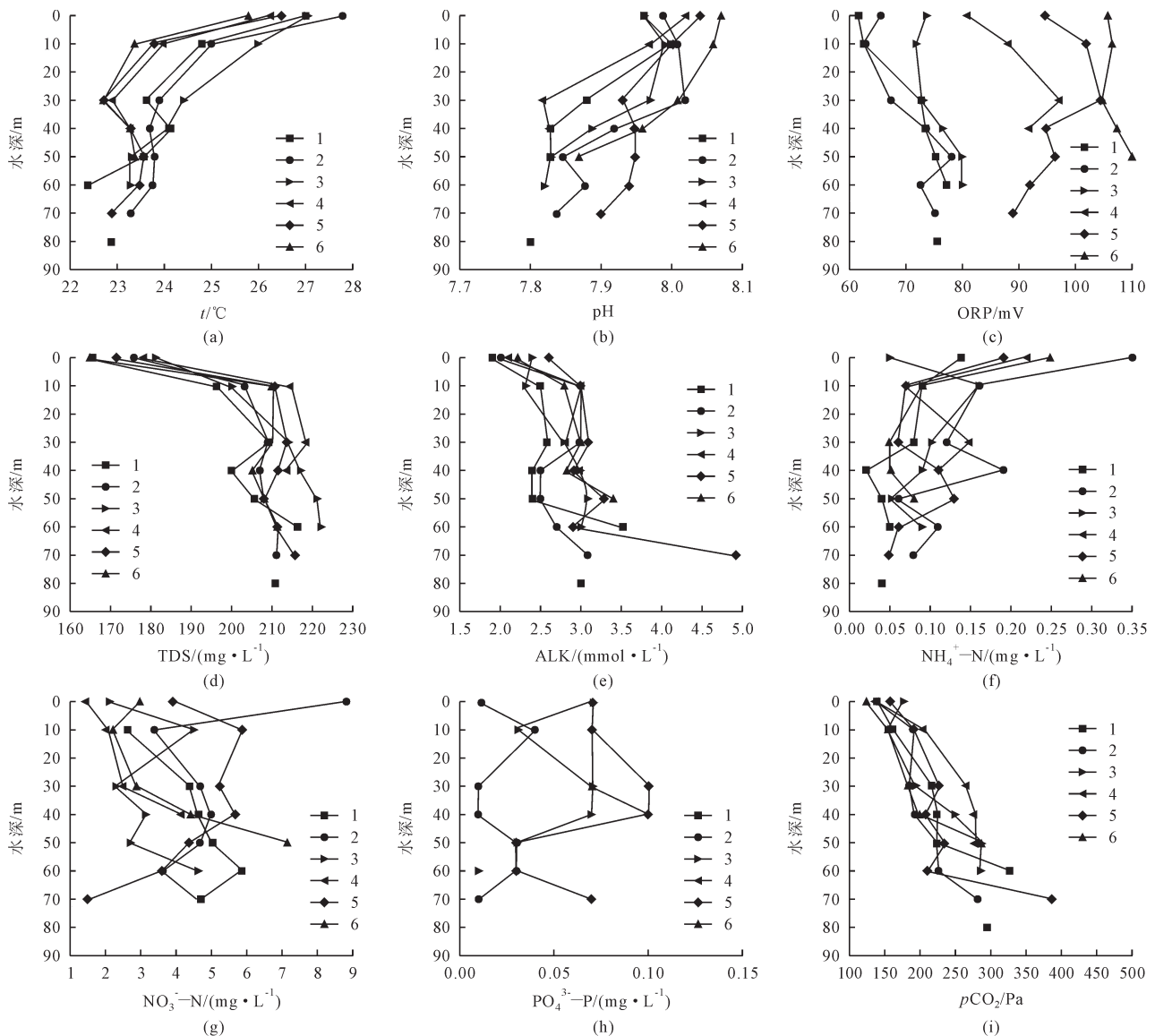


图2 光照水库理化参数、 $p\text{CO}_2$ 分布图

Fig.2 The map of distributions of physical and chemical parameters, $p\text{CO}_2$ in the Guangzhao Reservoir

光合作用强烈吸收大量的 CO_2 ,致使表层水体的pH值较高。而深度水体水生生物光合作用减弱,消耗 CO_2 量较少,同时底层水体滞留时间长,水体pH值变化缓慢,这与邱华北研究万峰湖得出的结论相似^[17]。

ORP在垂直剖面变化与水温、pH变化趋势相反,随着水深度的增加逐渐升高,ORP值为54~110 mV,平均值为80.95 mV,垂直空间变化差异小。表层水体ORP空间分布呈现从上游向坝前逐渐递减的趋势(图2(c))。

TDS浓度为164.9~222.1 mg/L之间,均值204.11 mg/L;呈现从表层向底层逐渐增加的趋势(图2(d)),在30 m处TDS出现最大值,随后垂直变化差异不明显。ALK值为1.9~4.9 mmol/L,均值为2.82 mmol/L。ALK在0~10 m迅速增加,在10 m达到最大值。10 m以下ALK变化随深度的增加变化不明显(图2(e))。

2.2 $p\text{CO}_2$

本次调查的 $p\text{CO}_2$ 分布规律如图2(i)所示,表层水体 $p\text{CO}_2$ 空间分布沿流程方向逐渐升高,最高值出现在3号点(179.35 Pa),最低值出现在6号点(125.30

Pa);处于世界河流中等偏下水平^[18]。上游峡谷地区出现较低 $p\text{CO}_2$ 是因为上游地区河流比降大,水体流速快有利于水-气界面 CO_2 的交换,导致水体中 $p\text{CO}_2$ 降低,在库区由于水面变宽,水体流速变缓,有利于悬浮物质沉积,降低水体的浊度,水生生物光合作用降低,吸收水体溶解的 CO_2 ,也会出现降低的 $p\text{CO}_2$ 分布^[19]。在垂直剖面上, $p\text{CO}_2$ 变化范围为125.30~396.72 Pa,均值为220.78 Pa;随着深度的增加迅速增加,库底达到最大值,这与有机质的沉降和分解释放 CO_2 有关^[1,10]。

2.3 $p\text{CO}_2$ 与水环境关系

表2列出了光照水库 $p\text{CO}_2$ 与各物理化学因素之间的相关分析结果。结果表明: $p\text{CO}_2$ 与 t 、pH、 NH_4^+-N 之间分别存在极显著负相关,与TDS、ALK之间分别存在极显著正相关,与ORP、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 之间相关性不明显。其中,TDS、ORP、ALK与 t 之间存在极显著负相关; NH_4^+-N 与 t 、pH之间存在显著正相关,与TDS之间存在显著负相关。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 与ORP之间存在极显著正相关; NO_3^--N 与pH之间存在极显著负相关。

表2 光照水库 $p\text{CO}_2$ 与各理化参数之间的相关性(Spearman)
Table 2 Correlation between $p\text{CO}_2$ and physicochemical parameters in Guangzhao Reservoir (Spearman)

项目	$t/^\circ\text{C}$	TDS/(mg·L ⁻¹)	pH	ORP/mV	ALK/(mmol·L ⁻¹)	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
TDS/(mg·L ⁻¹)	-0.725**							
pH	0.279	-0.344*						
ORP/mV	-0.574**	0.279	0.241					
ALK/(mmol·L ⁻¹)	-0.731**	0.676**	-0.05	0.507**				
$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.464**	-0.367*	0.402*	-0.109	-0.305			
$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	-0.137	-0.09	-0.343*	-0.081	0.021	-0.057		
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	-0.207	0.054	0.277	0.566**	0.177	-0.143	-0.295	
$p\text{CO}_2/\text{Pa}$	-0.539**	0.611**	-0.866**	0.034	0.482**	-0.490**	0.282	-0.168

注:**表示在置信度(双侧)为0.01时,相关性显著;*表示在置信度(双侧)为0.05时,相关性显著。

3 讨论

水库中的 CO_2 的迁移转化涉及水体内部无机碳和有机碳之间的循环及特定的水体物理、化学环境有关^[10-12],其中包括水温、气温、降雨量、植被类型、pH、水化学组成和营养物质含量、基岩/土壤类型、水中浮游植物和微生物的含量、水力条件以及人类活动等的差异都可能导致水体 $p\text{CO}_2$ 的变化。有研究表明,水生生物光合作用和呼吸作用是影响水体中碳循环的主要生物过程。例如,呼吸作用是抑制亚马逊河和珠江口 $p\text{CO}_2$ 的主要因素^[20,21];光合作用与呼吸作用共同作用泰晤士河 $p\text{CO}_2$ 分布^[22]。目前对于水体中 $p\text{CO}_2$ 的影响机制存在争议不少,因此,为更好地解析影响光照水库 $p\text{CO}_2$ 分布规律的因素及机理,结合水体中各物理、化学参数与 $p\text{CO}_2$ 的相关分析结果,从物理、化学因素2个方面对光照水库 $p\text{CO}_2$ 的迁移转化过程及机

理加以分析。

3.1 物理因素(水温(t)、pH)

水体 $p\text{CO}_2$ 受多种因素的影响,其中温度(t)、pH的影响尤为重要。水温可以影响气体分子的扩散速度及其在水体中的溶解度来影响气体的交换通量^[23]。水温越高,河水对 CO_2 的溶解度降低, CO_2 向大气扩散,使水体 $p\text{CO}_2$ 浓度降低;水温降低, CO_2 向河水溶解量增多, $p\text{CO}_2$ 浓度上升。其次,水温的增减可以影响水体浮游植物的生长,间接的控制水生植物光合和呼吸作用进而影响 $p\text{CO}_2$ 分布。水库与河流在水动力条件上存在严重的差异,水库水体长时间的滞留而表现为自养型生态系统特征^[4]。 $p\text{CO}_2$ 与水温呈显著负相关($r=-0.539$ **, $P<0.01$)(表2);温度是影响光照水库 $p\text{CO}_2$ 主要影响因素。光照水库水体滞留时间较长,库区水体夏季出现热分层现象,导致水体理化参数也出现相应的分层。表层水体受太阳辐射和光照强度的

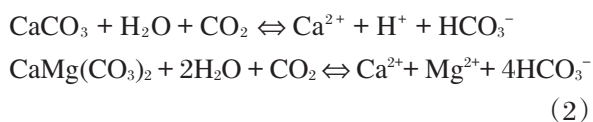
影响较大,水生生物光合作用较强烈,吸收水体中 CO_2 ,导致表层水体 $p\text{CO}_2$ 较低;而随着水深度的增加,光合作用能力减弱,进而转化为呼吸作用或有机质氧化分解释放 CO_2 使得库底层 $p\text{CO}_2$ 较高。这与吕迎春^[24]、汪福顺^[19]等研究红枫湖、万安水库的研究结果一致。

在碳酸岩广泛分布的地区,水体的pH受碳酸盐体系控制,水体一般呈弱碱性^[14]。水体pH值影响水中 CO_2 浓度,当pH较高时,水中的游离的 CO_2 就会转化成碳酸盐,继而成碳酸根离子或者重碳酸根离子,降低水体中 CO_2 的浓度,水中的 CO_2 处于不饱和状态,大气中的 CO_2 进入水体,产生“碳汇”^[25]。同时,水中pH与水体中有机质的分解、微生物的活动和水生物的代谢活动等有关^[26]。在弱碱状态下,水中游离的 CO_2 易于形成碳酸,浮游植物光合作用释放 O_2 ,使水体中氧化还原电位增加,并导致水体表层pH较高。pH与 $p\text{CO}_2$ 呈显著负相关($r=-0.886^{**}$, $P<0.01$) (表2)。这与喻元秀^[10]、焦树林^[12]等研究结果相似,与张军伟等^[27]研究三峡水库结论相反。

3.2 化学因素

3.2.1 碳酸盐体系控制的 $p\text{CO}_2$ 机制

水体中 CO_2 受碳酸盐岩溶蚀控制作用显著^[25]。有研究表明,流经喀斯特地区的地表径流水体中含有较高的 $p\text{CO}_2$ 与大气形成较强的正向梯度浓度,成为大气 CO_2 的源,但是还有学者认为,对于化学侵蚀强度比硅酸盐岩流域强烈的喀斯特流域,河流含有高浓度的TDS,其碳酸盐岩溶蚀作用消耗土壤和大气中的 CO_2 ,并通过水生生物的光合作用等生物地球化学过程而形成大气二氧化碳“失汇”^[28]。本研究区以白云岩($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)和灰岩(CaCO_3)为主,碳酸盐体系发生化学风化的过程中,物质的迁移主要有下列过程表示:

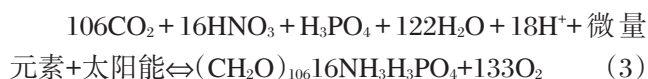


光照水库水体 $p\text{CO}_2$ 与TDS两者呈现较好的正相关性(表2), $p\text{CO}_2$ 随着TDS含量的增加而升高。研究区内含有较高的TDS含量(204.11 mg/L),说明北盘江流域强烈的机械侵蚀富含碳酸盐的可溶性固体物在化学风化的作用下进入水体形成溶解态的无机盐。硫酸主要来源于燃煤或流域盆地硫化物矿物氧化而形成的大气输入。由于硫酸对流域化学侵蚀过程的影响较为复杂,一方面,诸如硫酸和硝酸等强酸可以显著提高流域的化学侵蚀速率;另一方面,化学侵蚀过程中强酸的出现,会抑制碳酸的活性,在流域化学

侵蚀强度提高的情况下,溶蚀的速率反而略有下降^[14,25]。

3.2.2 营养盐对 $p\text{CO}_2$ 的影响

氮、磷(N、P)作为水体中水生生物生长必需的生源元素。水生生物可以利用水体中的营养盐(NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)等进行光合作用(式(3)),营养盐含量的变化可以反映水中浮游植物的数量。水生生物的光合作用和呼吸作用控制的新陈代谢的过程,改变水体碳循环形式。由表2可知, $p\text{CO}_2$ 与 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 表现为负相关,与 NO_3^--N 表现出正相关。在表层浮游植物进行光合作用,同时消耗水中的 CO_2 和 NO_3^--N ,导致表层水体中 $p\text{CO}_2$ 降低。随着水深度的增加,光合作用强度减弱,水体中光合作用产生的有机质在厌氧条件下发生降解,产生 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 CO_2 ,使水中 $p\text{CO}_2$ 随着深度逐渐升高,水体中营养盐的浓度也发生相应的改变。



4 结论

光照水库属于河道峡谷型深水水库,水温夏季出现明显的热分层现象,大致可分为3层,0~10 m为表水层;10~30 m为温跃层;30 m以下为底温层。随着热分层的出现,水体理化参数也出现相应的分层结构。

表层水体 $p\text{CO}_2$ 变化范围为125.30~179.35 Pa,均值147.11 Pa,低于世界河流平均水平。相对于大气 $p\text{CO}_2$,水体 $p\text{CO}_2$ 处于过饱和状态,表现为大气 CO_2 的源。在垂直空间分布上, $p\text{CO}_2$ 随着水深度的增加而升高,在库底达到最大值。

光照水库 $p\text{CO}_2$ 与 t 、pH、 NH_4^+-N 之间分别存在极显著负相关,表层浮游植物进行光合作用,同时消耗水中的 CO_2 和 NO_3^--N ,导致表层水体中 $p\text{CO}_2$ 降低。随着水深度的增加,光合作用强度减弱,水体中光合作用产生的有机质在厌氧条件下发生降解,产生 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 CO_2 ,使水中 $p\text{CO}_2$ 随着深度逐渐升高。说明水生生物光合和呼吸作用是影响水体 $p\text{CO}_2$ 分布的主要原因。同时, $p\text{CO}_2$ 与TDS、ALK之间分别存在极显著正相关,库区高TDS、ALK浓度反映了岩溶区水库的特点;说明光照水库碳酸盐体系也是影响 $p\text{CO}_2$ 分布的机制。

[参考文献]

- [1] 苏征,张龙军,王晓亮.黄河河流水体二氧化碳分压及其影响因素分析[J].海洋科学,2005,29(4):41-44.

- Su Zheng, Zhang Longjun, Wang Xiaoliang. Influencing factors of partial pressure of CO₂ in the Yellow River[J]. Marine Science, 2005, 29(4):41–44.
- [2] K R Dyer. Biogeochemistry of major world rivers, scope 42 [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 1991, 1(2): 189–190.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[DB/OL]. 北京, 2016. [Http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb](http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb). National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistics Yearbook of China[DB/OL]. Beijing, 2016. [Http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb](http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb).
- [4] Hart D D, Johnson T E, Bushawnewton K L, et al. Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration[J]. Bioscience, 2002, 52(8):669–681.
- [5] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7):2574–2581. Dong Chunying, Yu Zuoming, Wu Zhixu, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574–2581.
- [6] Gassama N, Cocirta C, Kasper H U. Use of major and selected trace elements to describe mixing processes in a water reservoir[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2012, 344(1):25–32.
- [7] 李干蓉, 刘丛强, 陈椽, 等. 猫跳河流域梯级水库夏-秋季节溶解无机碳(DIC)含量及其同位素组成的分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(10):2891–2897. Li Ganrong, Liu Congqiang, Chen Chuan, et al. Dissolve inorganic carbon and its carbon isotope composition in cascade reservoir of the Maotiao River during summer and autumn[J]. Environmental Science, 2009, 30(10): 2891–2897.
- [8] 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 河流筑坝拦截的水环境响应: 来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 384–396. Liu Congqiang, Wang Fushun, Wang Yuchun, et al. Responses of aquatic environment to river damming— from the geochemical view[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2009, 18(4): 384–396.
- [9] Jonsson A, Karlsson J, Jansson M, et al. Sources of carbon dioxide supersaturation in clear water and humic lakes in Northern Sweden[J]. Ecosystems, 2003, 6(3):224–235.
- [10] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 洪家渡水库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 Fushun, et al. Spatial and temporal characteristics and diffusion fluxes of carbon dioxide partial pressure ($p\text{CO}_2$) in Hongjiadu Reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1193–1199.
- [11] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 $p\text{CO}_2$ 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 $p\text{CO}_2$ and CO₂ degassing fluxes from the Yellow River in autumn[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2):227–235.
- [12] 焦树林, 刘昆, 高全洲. 西江河口段秋季表层水体 CO₂ 分压的变化特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2):356–361. Jiao Shulin, Liu Kun, Gao Quanzhou. Variation of $p\text{CO}_2$ in the surface water along the waterway of Xijiang River inner estuary in fall[J]. Acta Scientiae Circumstantia, 2008, 28(2): 356–361.
- [13] 杨成华, 安和平. 贵州南、北盘江流域植被类型的卫片解译与制图[J]. 贵州林业科技, 1996, 8(1):55–58. Yang Chenghua, An Heping. Evaluation and mapping of vegetation types in southern and northern Panjiang River watershed[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 1996, 8(1): 55–58.
- [14] 吴起鑫, 韩贵琳, 李富山, 等. 珠江源区南、北盘江丰水期水化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1289–1296. Wu Qixin, Han Guilin, Li Fushan, et al. Characteristics and source analysis of major ions in Nanpanjiang and Beipanjiang at upper Pearl River during wet season[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(7): 1289–1296.
- [15] 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]. Oceanol and Limnologia Sinica, 2016, 47(5):906–914.
- [16] 张士杰, 彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. 水利学报, 2009, 40(10):1254–1258. Zhang Shijie, Peng Wenqi. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir[J]. Journal of Water Conservancy, 2009, 40(10): 1254–1258.
- [17] 邱华北, 商立海, 李秋华, 等. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5):1039–1044. Qiu Huabei, Shang Lihai, Li Qiuhua, et al. Effects of thermal stratification on water environment of Wanfeng Lake [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 1039–1044.
- [18] Cole JJ, Caraco NF. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism[J]. Marine Freshwater Research, 2001, 52(1):101–110.
- [19] 汪福顺, 王宝利, 吴学谦, 等. 中国南方河道型水库 CO₂ 释放研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(1):40–47. Wang Fushun, Wang Baoli, Wu Xueqian, et al. CO₂ release in river reservoir in southern China[J]. Mineralogy and Geochemistry Bulletin, 2017, 36(1): 40–47.
- [20] Richey J E, Melack J K, Aufdenkampe A K, et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetland as a large tropical source of atmospheric CO₂[J]. Nature, 2002, 416(6881):617–620.

- [21] Zhai W D, Dai M H, Cai W J, et al. High partial pressure of CO_2 and maintaining mechanism in a subtropical estuary: the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 2005, 93(1):21-32.
- [22] 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(1):205-207.
- [23] 丁建平,程静,杨建明.溶解性气体对开式循环凝汽器运行特性的影响[J].*热力透平*,2004,33(1): 41-45.
Ding Jianping, Cheng Jing, Yang Jianming. Effects of dissolved gas on operation characteristic of condenser with once-through cooling water system[J]. *Thermodynamic Turbine*, 2004, 33(1): 41-45.
- [24] 吕迎春,刘丛强,王仕禄,等.红枫湖夏季分层期间 $p\text{CO}_2$ 分布规律的研究[J].*水科学进展*,2008, 19(1):106-110.
Lyu Yingchun, Liu Congqiang, Wang Shilu, et al. Distribution of $p\text{CO}_2$ in Hongfeng Lake in summer stratification[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 106-110.
- [25] 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_2 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_2 [J]. *Geological Bulletin*, 2015, 34(9): 1749-1757.
- [26] Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, et al. Biogenic gas production from major Amazon Reservoirs, Brazil[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(7):1443-1450.
- [27] 张军伟,雷丹,肖尚斌,等.三峡库区香溪河秋末至中冬 CO_2 和 CH_4 分压特征分析[J].*环境科学*,2016, 37(8):2924-2931.
Zhang Junwei, Lei Dan, Xiao Shangbin, et al. Partial pressure of carbon dioxide and methane from autumn to winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 2924-2931.
- [28] 李丽,蒲俊兵,李建鸿,等.亚热带典型岩溶流水气界面 CO_2 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_2 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.
- [29] 柴夏,史加达,刘从玉,等.大钟岭水库氮磷营养盐季节变化及其与水质的关系[J].*安徽农业科学*, 2008, 36(13): 5398-5399.
Chai Xia, Shi Jiada, Liu Congyu, et al. Seasonal variety of nitrogen and phosphorous nutrients in Dazhongling Reservoir and its relation with water quality[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(13): 5398-5399.