

# 龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>分压和水化学特征

赵宗权<sup>1,2</sup>, 曹玉平<sup>1,2</sup>, 焦树林<sup>1,2\*</sup>, 袁热林<sup>1,2</sup>, 邓飞艳<sup>1,2</sup>, 张 倩<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:**为了探究喀斯特地区岩溶水库水体化学特征和CO<sub>2</sub>源/汇机制,于2016年7月16日和2017年1月7日,在龙滩水库采集了水样,测定水样的理化指标,计算水体CO<sub>2</sub>分压和CO<sub>2</sub>扩散通量。研究表明,在2016年7月16日(丰水期),表层(0~20 cm深度)水体CO<sub>2</sub>分压为64.50~294.22 Pa,平均值为171.48 Pa;在2017年1月7日(枯水期),表层水体CO<sub>2</sub>分压为339.72~575.05 Pa,平均值为466.77 Pa。在7月16日,水体CO<sub>2</sub>分压分别与电导率和总溶解固体物含量显著正相关,在1月7日,其与碱度显著正相关;在两个采样日,水体CO<sub>2</sub>分压都分别与pH、氧化还原电位显著负相关。丰、枯水期的水体CO<sub>2</sub>分压都处于过饱和状态,水体CO<sub>2</sub>向大气中迁移,即此时水体为大气CO<sub>2</sub>的源。在7月16日,水库中水体CO<sub>2</sub>扩散通量为2.73~28.95 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均通量为14.94 mmol/(m<sup>2</sup>·d);在1月7日,其为34.16~61.61 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均通量为49.07 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。

**关键词:**水体CO<sub>2</sub>分压;水体CO<sub>2</sub>扩散通量;水化学特征;龙滩水库

**中图分类号:**X8      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-5948(2018)06-793-08

20世纪90年代,世界各地的用作水电站的水库面积约为60×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。在碳循环中,水库既可以作为碳源,也可以是碳汇。因此,对于水库CO<sub>2</sub>的源/汇机制及其影响因素和水体表层CO<sub>2</sub>交换通量的研究具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。

本研究选取位于红水河中上游的龙滩水库作为研究对象,在丰水期和枯水期,采集龙滩水库的水样,分析库区表层水体二氧化碳分压及其交换通量,以期为进一步研究水库碳循环提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区

龙滩水库(24°48'N~25°15'N, 106°46'E~107°2'E)位于广西壮族自治区河池市的天峨县境内,处在红水河的中上游,为峡谷型深水水库,其坝址以上流域面积约为9.85×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,水域面积为85 km<sup>2</sup>,总库容可达273×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。由于龙滩水库为岩溶区的深水水库,故其水动力特征比天然河流变化大。

龙滩水利枢纽工程是云贵高原东南部的大型水利枢纽工程,兼具防洪、灌溉、航运和发电等功能,目前为国内第二大水电站。

龙滩水库地处云贵高原向广西丘陵的斜坡过渡地带,地势北高南低,山岭纵横,流域内碳酸盐类岩石广布,且以溶蚀和侵蚀地貌为主,其间多地下暗河。该区气候属亚热带季风气候,年平均气温为14.9~19.6℃;年降水量为1 258 mm,降水多集中在5~10月,其降水量占年降水量的70%~80%;年相对湿度为71%~81%;干湿季节分明。

### 1.2 样品采集及测定

于2016年7月16日和2017年1月7日,在龙滩水库分别设置了25个采样点(图1),采集表层水样。2016年7月16日(丰水期),从水库大坝开始,在各采样点采集水样,为了使采样点尽量均匀分布在整个研究区,逆向沿着红水河干流,每间隔约2 km,采集1个水样,共采集了25个水样;采用同样的方法,在2017年1月7日(枯水期),采集了25

收稿日期:2018-04-13;修订日期:2018-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41263011)、贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”项目(黔教科研发[2017]85号)和贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201602)资助。

作者简介:赵宗权(1992-),男,安徽省阜阳人,硕士研究生,从事水文水资源与地理信息系统研究。E-mail: zhaozq1992@126.com

通讯作者:焦树林,教授。E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

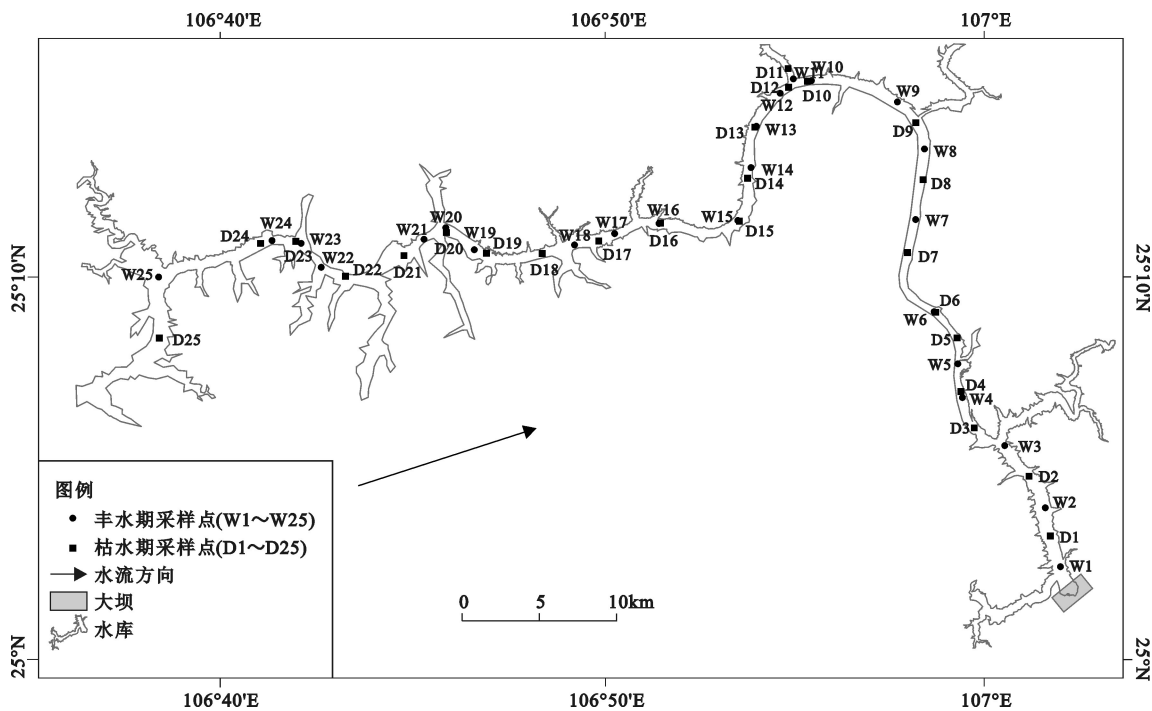


图1 龙滩水库和采样点分布示意图

Fig.1 Sketch map of Longtan Reservoir and locations of the sampling sites

个水样。利用GPS,对所有采样点位都进行了定位。

利用便携手持式多参数水质分析仪(Ultrameter- II (6P), Myron L.Company, 美国),在现场测定水样的pH、总溶解固体含量、氧化还原电位、电导率和水温。采用稀盐酸滴定法,现场测定水样的碱度。将采集到的水样装入用采样点水润洗3次的采样瓶中,带回实验室。在实验室中,利用HANNA—HI83200多参数离子浓度测定仪,测定水样的离子含量。

1.3 计算方法

1.3.1 水体CO<sub>2</sub>分压计算公式

根据碳酸平衡原理和亨利定律<sup>[6-8]</sup>,计算水体CO<sub>2</sub>分压,其计算公式为:

$$p(\text{CO}_2)=[\alpha(\text{H}^+)\times\alpha(\text{HCO}_3^-)]/[K_{\text{CO}_2}\times K_1] \tag{1}$$

$$\alpha(\text{H}^+)=10^{-[\text{pH}]} \tag{2}$$

$$\alpha(\text{HCO}_3^-)=[\text{H}_2\text{CO}_3^*]\times 10^{-0.5\times\sqrt{I}} \tag{3}$$

$$I=0.5\times([\text{K}^+]+[\text{Ca}^{2+}]\times 4+[\text{Na}^+]+[\text{Mg}^{2+}]\times 4+[\text{Cl}^-]+[\text{SO}_4^{2-}]\times 4+[\text{NO}_3^-]+[\text{HCO}_3^-])/1000000 \tag{4}$$

公式(1)中, $\alpha(\text{H}^+)$ (mol/m<sup>3</sup>)和 $\alpha(\text{HCO}_3^-)$ (mol/m<sup>3</sup>)表示H<sup>+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>在水体中的浓度; $K_{\text{CO}_2}$ 为CO<sub>2</sub>平衡常数, $K_1$ 为碳酸第一级解离常数。公式(2)、(3)和(4)中, $I$ (mol/m<sup>3</sup>)为离子强度。

1.3.2 水体CO<sub>2</sub>通量计算公式

水—气界面的CO<sub>2</sub>扩散通量一般由大气和水体中的二氧化碳分压之差、水温、风速和河水流速等因素控制。通常水—气CO<sub>2</sub>扩散通量计算公式<sup>[8-10]</sup>为:

$$F=K\times[p(\text{CO}_2)_w-p(\text{CO}_2)_a] \tag{5}$$

$$K=r\times a \tag{6}$$

公式(5)和(6)中, $F$ [mmol/(m<sup>2</sup>·d)]为水—气CO<sub>2</sub>扩散通量; $K$ (m/s)为CO<sub>2</sub>的水—气交换系数; $p(\text{CO}_2)_w$ (Pa)为水体二氧化碳分压, $p(\text{CO}_2)_a$ (Pa)为大气二氧化碳分压; $r$ (m/s)为淡水水体水—气界面气体传输速率; $a$ (mol/dm<sup>3</sup>)是特定温度下CO<sub>2</sub>的溶解度。

1.4 数据处理

采用斯皮尔曼秩相关分析法,利用SPSS 20软件,对丰水期和枯水期水样的理化参数进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 水体理化指标

丰、枯水期所采样本数量不同,这主要是因为枯水期又增加了支流采样点,为便于对比,尽量选取两个时期相近的采样点,因此,分别在丰、枯水期各选取了25个采样点的水样的理化指标进行分

析。2016年7月16日(丰水期), 水体平均pH为8.04, 而在2017年1月7日(枯水期), 其为7.67; 丰水期水体的平均碱度为2.45 mmol/L, 枯水期其为3.50 mmol/L; 丰水期二者的标准差都略大于枯水期, 但波动幅度极小(表1)。丰水期水库水体电导率、总溶解固体含量的标准差是其在枯水期的2倍左右, 反映了丰水期在水体表层电导率和总溶解固体含量具有较大的波动。丰水期水温极差值为1.8℃, 而枯水期其为2.6℃, 但二者的标准差相差极小, 表明两个时期库区表层(0~20 cm深度)水温都比较稳定。丰水期和枯水期水体的氧化还原电位极差值分别为105 mV和145 mV, 标准差都为30 mV左右, 说明不同采样点水体的氧化还原电位差异很大。总体上, 丰水期水温和水体pH大于枯水期, 枯水期的其它4种指标大于丰水期。

在丰水期, 随着与第一个采样点的距离(与大坝的距离)的增加, 水体pH在减小, 在枯水期水体pH微幅波动变化(图2); 丰水期水体碱度剧烈波动变化, 而枯水期碱度变化较小。无论在丰水期还是在枯水期, 随着与大坝距离的增加, 水体电导率和总溶解固体含量都在波动增大, 在与大坝距离约为25 km处, 其值明显增大, 这是由于该区域有支流汇入所致; 枯水期二者在与大坝距离约为10 km处, 有支流汇入, 出现突变。丰水期和枯水期水温变化不明显; 水体氧化还原电位随着与大坝距离的增加, 变化强烈。

## 2.2 水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量

2016年7月16日, 水体平均CO<sub>2</sub>分压为171.48 Pa, 在2017年1月7日其为166.77 Pa, 二者

标准差具有显著差异, 说明水体的CO<sub>2</sub>分压在整个水库空间变异很大(表2)。丰水期水体CO<sub>2</sub>分压的标准差明显大于枯水期。

2016年7月16日和2017年1月7日, 龙滩水库平均CO<sub>2</sub>交换通量分别为14.94 mmol/(m<sup>2</sup>·d)和49.07 mmol/(m<sup>2</sup>·d), 标准差分别为6.50 mmol/(m<sup>2</sup>·d)和6.08 mmol/(m<sup>2</sup>·d), 说明两个时期CO<sub>2</sub>交换通量在空间上的变化明显小于同期水体CO<sub>2</sub>分压。

在丰水期, 水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量在采样点W4、W9、W13、W21和W24发生突然的变化(图1), 由于这几个采样点附近有支流汇入, 使得附近水体的CO<sub>2</sub>分压和交换通量都比这些采样点低。此外, CO<sub>2</sub>分压和CO<sub>2</sub>交换通量在采样点W1到W9, 增长都比较明显, 在采样点W13到W20, 二者整体降低(图3)。在枯水期, 从采样点D2到D13, 期间库区水体的CO<sub>2</sub>分压和交换通量较高, 整个流域水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量都大致稳定在一个范围内。丰水期水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量远小于枯水期。

## 2.3 水体CO<sub>2</sub>分压与水体理化指标的关系

由于下游筑坝拦截, 水库水动力学条件被改变, 因此, 水体理化性质也随之改变<sup>[4]</sup>。两个时期水体电导率都与总溶解固体含量显著正相关( $n=25, p<0.01$ ), 2016年7月16日(丰水期)水体电导率都与pH、氧化还原电位显著负相关( $n=25, p<0.01$ ), 总溶解固体含量与pH显著负相关( $n=25, p<0.01$ )。此外, 大多数水体理化参数都与大坝距离显著相关( $n=25, p<0.01$ ), 说明库区水体的理化性质随着距大坝距离的增加产生了显著的变化,

表1 丰、枯水期龙滩水库表层水体理化指标统计特征值

Table 1 Statistical characteristic of physico-chemical parameters of surface waters of Longtan Reservoir in wet and dry seasons

采样时间		pH	碱度(mmol/L)	电导率(μS/cm)	总溶解固体质量浓度(mg/L)	水温(℃)	氧化还原电位(mV)
2016年7月 16日(丰水期)	平均值	8.04	2.45	235.24	150.08	30.31	67.44
	中值	8.02	2.40	242.30	154.70	30.50	52.00
	最大值	8.39	3.30	263.60	168.20	31.00	144.00
	最小值	7.80	1.80	191.20	121.10	29.20	39.00
	标准差	0.15	0.33	22.75	14.88	0.48	30.90
2017年1月 7日(枯水期)	平均值	7.67	3.50	367.14	244.78	20.59	92.68
	中值	7.68	3.50	370.90	247.70	20.50	90.00
	最大值	7.78	3.80	373.30	249.60	22.50	199.00
	最小值	7.59	3.20	342.30	226.70	19.90	54.00
	标准差	0.04	0.14	8.79	6.51	0.50	28.89

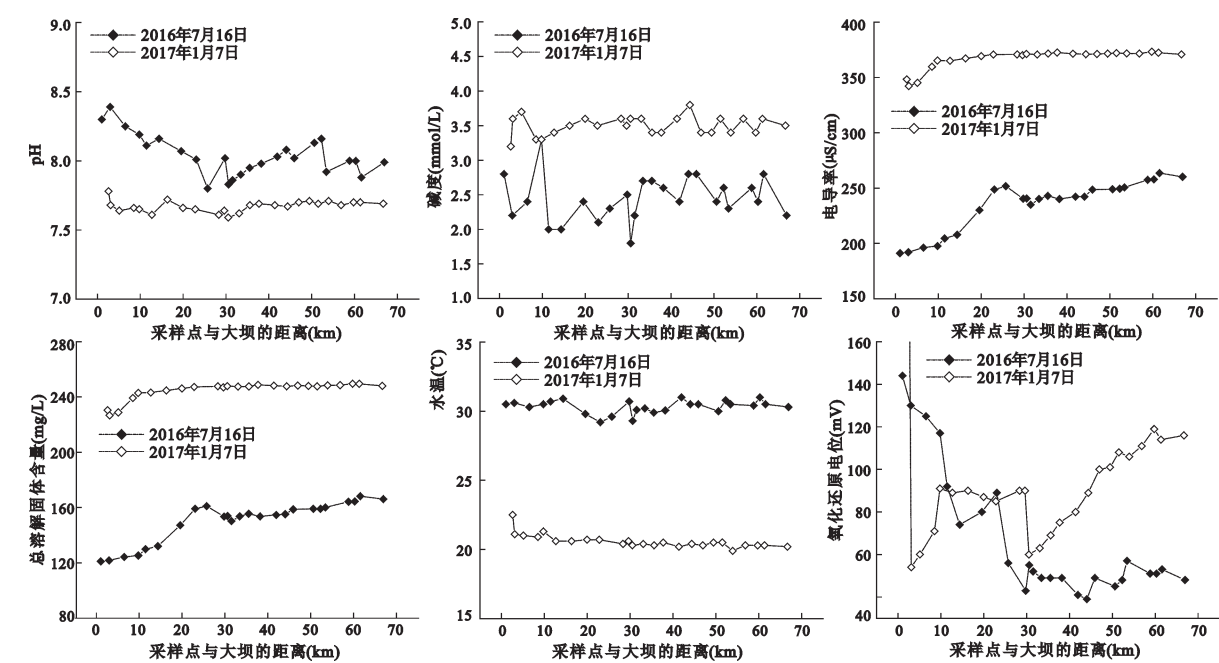


图2 丰、枯期龙滩水库各采样点的表层水体理化指标

Fig.2 Physic-chemical parameters in surface waters at different sampling sites in Longtan Reservoir in wet and dry seasons

表2 丰、枯水期龙滩水库各采样点的表层水体 CO <sub>2</sub> 分压和交换通量			
Table 2 Partial pressure and exchange fluxes of CO <sub>2</sub> in surface waters of different sampling sites in Longtan Reservoir in wet and dry seasons			
采样时间		CO <sub>2</sub> 分压(Pa)	CO <sub>2</sub> 交换通量[mmol/(m <sup>2</sup> ·d)]
	平均值	171.48	14.94
2016年	中值	174.17	15.33
7月16日	最大值	294.22	28.95
(丰水期)	最小值	64.50	2.73
	标准差	57.05	6.50
	平均值	466.77	49.07
2017年	中值	465.13	48.72
1月7日	最大值	575.05	61.61
(枯水期)	最小值	339.72	34.16
	标准差	52.64	6.08

这对水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量将产生显著影响(表3和表4)。

2016年7月16日,表层水体CO<sub>2</sub>分压与总溶解固体含量显著正相关( $n=25, r=0.618, p<0.01$ ) (图4)。在丰水期,库区气温高、雨量大且集中,水体冲刷、侵蚀和溶蚀能力提高。研究区内岩石主要以白云岩和灰岩为主,有部分页岩,这一时期强烈的化学风化作用使岩石在岩溶作用下被溶蚀。由于水流速度较快,水-岩间相互作用并不充分,

因此,对碱度和总溶解固体含量的贡献可能较小。同时,丰水期稀释效应明显,径流量大,当溶质被冲刷进河道时可能会由于河水较快的流速而向下游流去。在枯水期,由于雨量减少,库区水体流速缓慢,稀释效应不明显,有机物和碳酸盐溶解物质进入并较长时间停留在水体中,致使水体碱度和总溶解固体含量增大,同时导致枯水期水体碱度和总溶解固体含量升高。这和2017年1月7日水体CO<sub>2</sub>分压与碱度显著正相关( $n=25, r=0.658, p<0.01$ )相符(图5)。从坝前到上游的红水河镇附近,表层水体的电导率和总溶解固体含量总体上逐渐增加,因此,表层水体CO<sub>2</sub>分压也相应地增加。

丰水期水库的平均水温约为30℃,由于水温能够影响气体的扩散速度及在水中的溶解度<sup>[11]</sup>,因此,较高的水温将会加快水体中的CO<sub>2</sub>的运动速率,导致水体的CO<sub>2</sub>溶解度降低,使水中的CO<sub>2</sub>扩散速度加快并可能逸出水面,从而降低CO<sub>2</sub>分压。相关分析结果表明,丰、枯水期的水温可能并非CO<sub>2</sub>分压变化的直接影响因素(表3和表4)。所以,研究区水温对CO<sub>2</sub>分压增减的影响并不显著。

研究表明,水中的H<sup>+</sup>含量与CO<sub>2</sub>含量成正比,与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量成反比,当CO<sub>2</sub>溶解在水中时,会使水体pH降低,但是当水中CO<sub>2</sub>逸出时,会导致pH



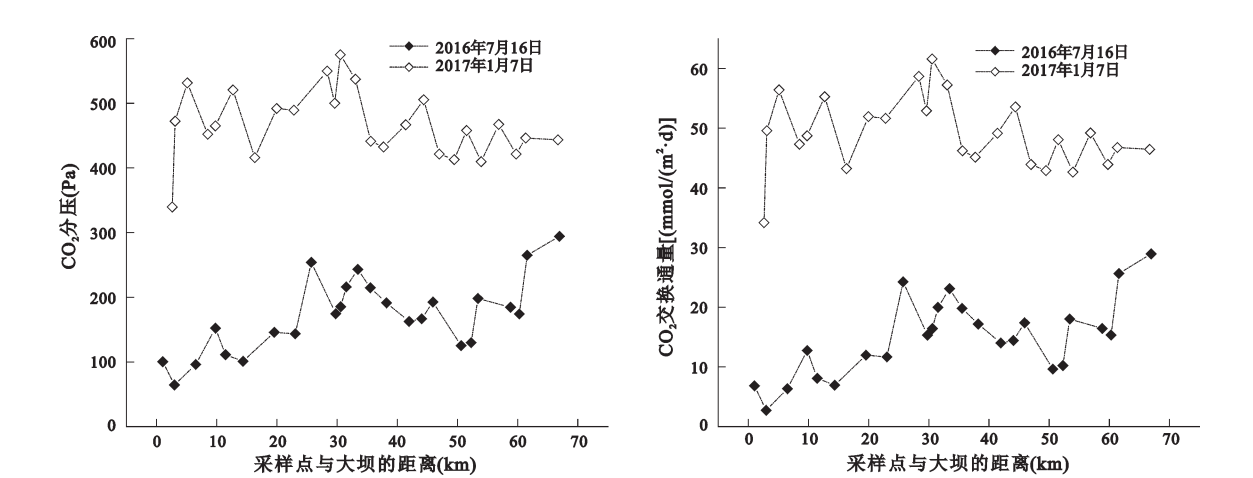


图3 丰、枯期龙滩水库各采样点的表层水体CO<sub>2</sub>分压和交换通量

Fig.3 Partial pressure and exchange fluxes of CO<sub>2</sub> in surface waters of different sampling sites in Longtan Reservoir in wet and dry seasons

表3 丰水期龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>分压与水体理化指标的相关系数

	与大坝的距离	水温	电导率	总溶解固体含量	pH	氧化还原电位	碱度	CO <sub>2</sub> 分压
水温	0.090	1.000						
电导率	0.883**	-0.070	1.000					
总溶解固体含量	0.877**	-0.115	0.996**	1.000				
pH	-0.481*	0.467*	-0.562**	-0.580**	1.000			
氧化还原电位	-0.695**	-0.107	-0.525**	-0.501*	0.289	1.000		
碱度	0.191	0.130	0.053	0.045	0.132	-0.258	1.000	
CO <sub>2</sub> 分压	0.604**	-0.325	0.612**	0.618**	-0.892**	-0.431*	0.156	1.000
CO <sub>2</sub> 交换通量	0.622**	-0.315	0.629**	0.636**	-0.887**	-0.428*	0.166	0.998**

注: \*表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关; \*\*表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关。

表4 枯水期龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>分压与水体理化指标的相关系数

	与大坝的距离	水温	电导率	总溶解固体含量	pH	氧化还原电位	碱度	CO <sub>2</sub> 分压
水温	-0.847**	1.000						
电导率	0.870**	-0.756**	1.000					
总溶解固体含量	0.909**	-0.838**	0.930**	1.000				
pH	0.389	-0.202	0.373	0.362	1.000			
氧化还原电位	0.524**	-0.252	0.370	0.431*	0.611**	1.000		
碱度	0.136	-0.175	0.028	0.057	-0.364	-0.311	1.000	
CO <sub>2</sub> 分压	-0.290	0.139	-0.327	-0.293	-0.931**	-0.568**	0.658**	1.000
CO <sub>2</sub> 交换通量	-0.290	0.139	-0.327	-0.293	-0.931**	-0.568**	0.658**	1.000**

注: \*表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关; \*\*表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关。

增大<sup>[12]</sup>。本研究中,表层水体pH受到碳酸盐岩体系的控制,同时水生植物的光合、呼吸作用也会对身体pH产生显著影响。研究区水体pH为7.80~8.39,呈弱碱性。水体pH与CO<sub>2</sub>分压显著负相关,因此,pH的变化可能是导致水体CO<sub>2</sub>分压发生显著变化的主要原因之一。

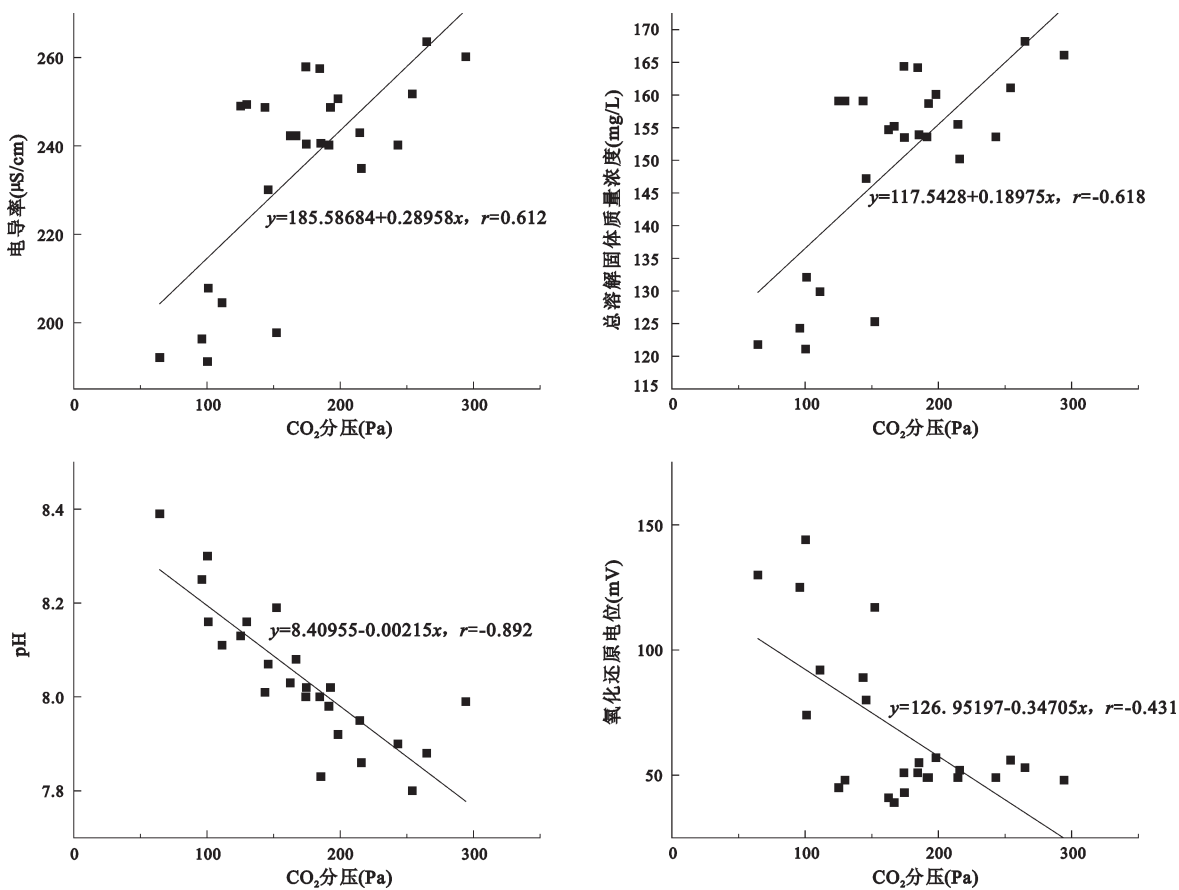


图4 丰水期龙滩水库表层水体 $\text{CO}_2$ 分压与理化指标的关系

Fig.4 Relationship between partial pressure of  $\text{CO}_2$  and physic-chemical parameters of surface waters in Longtan Reservoir in wet season

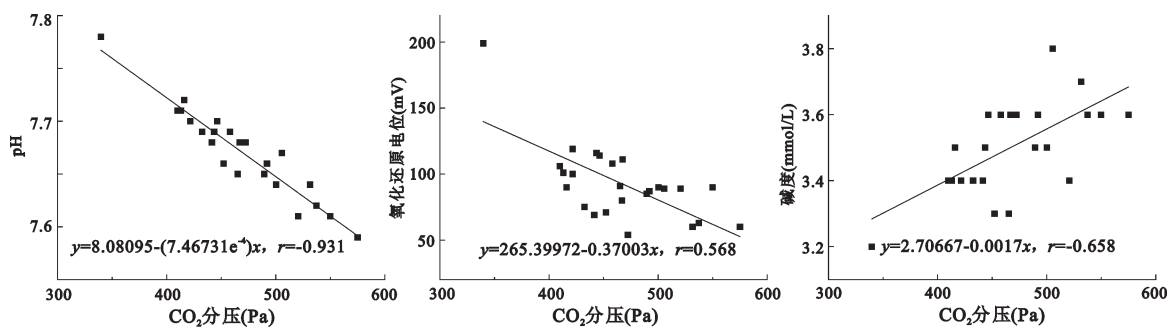


图5 枯水期龙滩水库表层水体 $\text{CO}_2$ 分压与理化指标的关系

Fig.5 Relationship between partial pressure of  $\text{CO}_2$  and physic-chemical parameters of surface waters in Longtan Reservoir in dry season

水体中的每种物质都具有独特的氧化还原性,所以氧化还原电位可以表征水溶液中物质的氧化还原性。当水体中的有机质降解时,一方面,会消耗掉一定量的溶解氧,将导致水体的氧化还原电位降低;另一方面,会产生 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 等氧化产物,使氧化还原电位升高。水体 $\text{CO}_2$ 分压与氧

化还原电位显著负相关,因而氧化还原电位是影响水体 $\text{CO}_2$ 分压的因素。

枯水期时,太阳辐射弱、水体温度较低,但同时有机质的氧化分解速率也降低,此时表层水体氧化还原电位比丰水期有所增大。水体氧化还原电位与 $\text{CO}_2$ 分压显著负相关,氧化还原电位的变

化显著影响了CO<sub>2</sub>分压的变化。

枯水期水体的碱度与CO<sub>2</sub>分压显著正相关,而pH与CO<sub>2</sub>分压显著负相关。研究表明,水体中的CO<sub>2</sub>绝大部分是以游离状态存在的<sup>[12,13]</sup>。在枯水期,降水量少且水流速度较缓慢,使得河流水体与周围岩石的接触时间变长、面积变大,化学反应得以充分进行,导致表层水体中的H<sup>+</sup>增多,故表层水体pH也比丰水期减小约0.37,这说明表层水体pH对CO<sub>2</sub>分压的削弱作用有所降低;表层水体的碱度高于丰水期约1.05,而碱度升高会使水体CO<sub>2</sub>分压增大。

### 3 讨论

两个时期水库表层水体的CO<sub>2</sub>分压都高于大气中的CO<sub>2</sub>分压(40.63 Pa),这说明库区表层水体是大气CO<sub>2</sub>的源,库区水体中溶解的CO<sub>2</sub>会向大气中迁移,表现出与其它水库相似的特征<sup>[2,14]</sup>。其中,丰水期表层水体CO<sub>2</sub>分压为64.50~294.22 Pa,枯水期其则比丰水期要高得多,为339.72~575.05 Pa。由表3可知,表层水体CO<sub>2</sub>的扩散通量与其CO<sub>2</sub>分压显著正相关,CO<sub>2</sub>分压的变化必然影响表层水体CO<sub>2</sub>扩散通量。同时,水体CO<sub>2</sub>的扩散通量也受到水体电导率、总溶解固体含量、pH、碱度和氧化还原电位等的影响。

在丰水期,水库表层水体的CO<sub>2</sub>扩散通量为2.73~28.95 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均扩散通量为14.94 mmol/(m<sup>2</sup>·d);在枯水期,表层水体的CO<sub>2</sub>扩散通量为34.16~61.61 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均扩散通量为49.07 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。与国内外一些水库相比,龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>扩散通量明显低于热带地区的水库[巴西361.77 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[15]</sup>;圭亚那101.36 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[16]</sup>],而与温带地区的水库[(芬兰24 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[17]</sup>;加拿大31.82 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[18]</sup>]相比,差别并不明显。可能是因为与热带地区的水库相比,龙滩水库的有机质降解速率要低一些<sup>[19]</sup>;与同处亚热带地区的国内其它水库水体CO<sub>2</sub>扩散通量(洪家渡6.14 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[2]</sup>;新丰江11.2 mmol/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[19]</sup>)相比,龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>扩散通量明显较高。这可能是因为洪家渡和新丰江水库的建库时间长,而龙滩水库建库时间较短,导致龙滩水库的碳排放通量高于前者。龙滩水库流域面积比其它水库大,故淹没面积大于其它水库,水库中的有机质含量更高。

### 4 结论

2016年7月16日(丰水期),龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>分压平均值为171.48 Pa;2017年1月7日(枯水期),表层水体CO<sub>2</sub>分压平均值为466.77 Pa,都表现为大气CO<sub>2</sub>的源。丰水期表层水体CO<sub>2</sub>分压主要受水体电导率和总溶解固体物含量的影响,在枯水期其主要受水体碱度影响。

丰水期龙滩水库表层水体CO<sub>2</sub>扩散通量为2.73~28.95 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均通量为14.94 mmol/(m<sup>2</sup>·d);枯水期其为34.16~61.61 mmol/(m<sup>2</sup>·d),平均通量为49.07 mmol/(m<sup>2</sup>·d)。

### 参考文献

- [1]Soumis N, Lucotte M, Canuel R, *et al.* Hydroelectric Reservoirs as Anthropogenic Sources of Greenhouse Gases[M]. State of New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2]喻元秀,刘丛强,汪福顺,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].生态学报,2008,27(7): 1193-1199.
- [3]汪朝辉,杜清运,赵登忠.水布垭水库CO<sub>2</sub>排放通量时空特征及其与环境因子的响应研究[J].水力发电学报,2012,31(2): 146-151.
- [4]彭希,刘丛强,王宝利,等.河流—水库体系水体表层pCO<sub>2</sub>时空变化特征及其扩散通量——以六冲河、洪家渡水库、红枫湖为例[J].地球与环境,2013,41(2): 97-103.
- [5]赵登忠,谭德宝,汪朝辉,等.水布垭水库水气界面二氧化碳交换规律研究[J].人民长江,2012,43(8): 65-70.
- [6]Yao G, Gao Q, Wang Z, *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(1-3): 255-266.
- [7]梅航远,汪福顺,姚臣湛,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.
- [8]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pCO<sub>2</sub>特征及扩散通量[J].环境科学,2015,36(1): 40-48.
- [9]张龙军,徐雪梅,温志超.秋季黄河pCO<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.
- [10]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].生态学报,2011,31(5): 1039-1044.
- [11]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.
- [12]聂麦茜,吴蔓莉.水分析化学[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [13]袁道先.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.
- [14]李建鸿,蒲俊兵,孙平安,等.不同地质背景水库区夏季水—气界面温室气体交换通量研究[J].环境科学,2015,36(11): 4032-4042.
- [15]Santos M A D, 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.
- [16] St. Louis V L, Kelly C A, Duchemin É, *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate[J]. *Bioscience*, 2000, **50**(9): 766-775.
- [17] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *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): 609-621.
- [18] Duchemin E, Lucotte M. Production of the greenhouse gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> buried hydroelectric reservoirs of the boreal region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 529-540.
- [19] 叶丽菲. 新丰江水库二氧化碳分压及其通量[D]. 广州: 中山大学, 2014.

## Partial Pressure of Carbon Dioxide and Hydrochemical Characteristics of Surface Water in the Longtan Reservoir

ZHAO Zongquan<sup>1,2</sup>, CAO Yuping<sup>1,2</sup>, JIAO Shulin<sup>1,2</sup>, YUAN Relin<sup>1,2</sup>,  
DENG Feiyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Qian<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** In order to explore water chemical characteristics and source and sink mechanism of CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) of Karst reservoir in the Karst area, collecting water samples on July 17, 2016 and January 7, 2017 in Longtan Reservoir, testing physico-chemical parameters of the river water, and calculating the  $p\text{CO}_2$  (partial pressure of carbon dioxide) and exchange fluxes of CO<sub>2</sub> in the surface water. The results showed that the  $p\text{CO}_2$  of surface water on July 17, 2016 (wet season) was 64.50-294.22 Pa and the mean value was 171.48 Pa. On January 7, 2017 (dry season), the  $p\text{CO}_2$  of surface water was 339.72-575.05 Pa and the mean value was 466.77 Pa. It was concluded that  $p\text{CO}_2$  was positively correlated with conductivity and total dissolved solids in wet season, and positively correlated with alkalinity in dry season, while  $p\text{CO}_2$  was negatively correlated with pH and oxidation-reduction potential in the wet and dry season. The  $p\text{CO}_2$  of the water was in the state of supersaturation in the wet and dry season, and the CO<sub>2</sub> of the water body migrated to the atmosphere, which was the source of the atmospheric CO<sub>2</sub>. In addition, in the wet season the exchange flux of CO<sub>2</sub> in the reservoir area was 2.73-28.95 mmol/(m<sup>2</sup>·d), and the average exchange flux was 14.94 mmol/(m<sup>2</sup>·d). In the dry season, the exchange flux of CO<sub>2</sub> was 34.16-61.61 mmol/(m<sup>2</sup>·d), and the average exchange flux was 49.07 mmol/(m<sup>2</sup>·d).

**Keywords:** partial pressure of CO<sub>2</sub> of water; exchange flux of CO<sub>2</sub> of water; hydrochemical characteristics; Longtan Reservoir