

贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化研究

吕迎春^{1,2}, 刘丛强¹, 王仕禄¹, 徐刚^{1,2}, 刘芳^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对贵州喀斯特地区富营养水库(红枫湖、百花湖)表层水中的 CO_2 分压 $p(\text{CO}_2)$ 进行为期 1 a 的监测, 分析了影响两湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化的因素并阐明了两湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化的机理. 不同于北部温带地区水库, 两湖出现明显的季节变化特征: 夏季表层水中 CO_2 欠饱和, 其他季节 CO_2 过饱和. 通过对物理、化学及生物因素与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的相关性分析. 结果表明, 两湖 $p(\text{CO}_2)$ 与 Chla 之间存在的显著负相关, 是由于浮游植物光合作用与细菌呼吸作用共同影响的结果, 也是两湖 $p(\text{CO}_2)$ 出现季节变化的主要原因. 水温与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著负相关, 主要是由于水温影响浮游植物生长引起的. 降雨量与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著负相关, 主要是由于降雨量影响水库中营养盐的输入和浮游植物生长引起的. NO_3^- 、 NO_2^- 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著正相关, 是藻类吸收与有机质降解、硝化反应等共同作用的结果. SiO_3^{2-} 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著负相关, 是 SiO_3^{2-} 受降雨输入及藻类吸收共同影响的结果. 而两湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 相关性的差异可能与两湖 DOC 来源不同有关.

关键词: 喀斯特; 富营养; 水库; CO_2 ; 季节变化

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2674-08

Seasonal Variability of $p(\text{CO}_2)$ in the Two Karst Reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou Province, China

LÜ Ying-chun^{1,2}, LIU Cong-qiang¹, WANG Shi-lu¹, XU Gang^{1,2}, LIU Fang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of the Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The partial pressure of carbon dioxide $p(\text{CO}_2)$ in the surface water of the two karst eutrophic reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes near Guiyang city, Guizhou Province, China has been studied for one year. The factors regulating the seasonal variability of $p(\text{CO}_2)$ in the two reservoirs have been analyzed. Unlike the reservoirs in boreal temperate regions, the $p(\text{CO}_2)$ in the two reservoirs has significant seasonal changes: CO_2 was unsaturated during summer, but supersaturated at other seasons. According to the correlation analysis, there is a negative relationship between $p(\text{CO}_2)$ and Chla in the two reservoirs, due to the production of the phytoplankton and the respiration of the organic matter by the bacteria, which are also the main factors regulating the $p(\text{CO}_2)$. The negative relationship between temperature and $p(\text{CO}_2)$ is considered to be due to the effect of temperature on the growth of the phytoplankton. Precipitation leads to the input of the nutrients into the reservoirs, and hence precipitation is negatively related to $p(\text{CO}_2)$. The relationships between NO_3^- , NO_2^- and $p(\text{CO}_2)$ are ascribed to the absorption of phytoplankton, and the degradation of the organic matter nitrification. The relationship between SiO_3^{2-} and $p(\text{CO}_2)$ is due to the absorption of phytoplankton and the precipitation. The differences of the relationship between $p(\text{CO}_2)$ and DOC in the studied two lakes possibly lie in the variations of their sources.

Key words: karst; eutrophic; reservoir; CO_2 ; seasonal variability

水库, 又称为“人工湖泊”, 水库的建立改变了周围环境的碳循环及温室气体的释放, 到目前为止, 所有被观测的水库都向大气释放 CO_2 , 据估计世界淡水水库中 CO_2 的释放通量占其他人为 CO_2 释放通量的 4%^[1]. 国内外对水库温室气体的研究相对较晚, Duchemin 等^[2]首次对水库的水-气界面的 CO_2 通量进行测定. 有关国外水库中 CO_2 浓度和通量的研究多针对于北部温带地区, 水库中被淹的土壤类型多为富含有机碳的森林土和泥炭地^[2~6], 而国内对 CO_2 的研究多集中于沿海及内陆湖泊^[7~10], 针对水库中 CO_2 产生与释放的研究极少^[11,12]. 本研究选取

的 2 个水库(红枫湖、百花湖)位于贵州省内典型的喀斯特地区, 流域内地层岩性以碳酸盐岩分布最广, 土层浅薄, 经土壤淋溶出的有机质相对较少^[13,14], 并且两湖建立已超过 40 a, 生活污水和工业废水的排入, 使水体容易出现富营养化现象, 因此两湖在大气 CO_2 “源-汇”关系中的地位还需加以研究.

对两湖表层水中 CO_2 分压 [$p(\text{CO}_2)$] 的变化进

收稿日期: 2006-12-30; 修订日期: 2007-04-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403200); 国家自然科学基金项目(90610037); 中国科学院海外合作伙伴计划项目

作者简介: 吕迎春(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水体富营养化与温室气体释放, E-mail: lyyingchun2000@hotmail.com

行为期 1 a 的定位观测, 目的是为了探索喀斯特地区富营养水库中 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化规律及其影响因素, 进而阐明 2 个水库中 CO_2 的产生与释放机理, 以期为我国水库中 CO_2 源汇估算提供基础研究.

1 材料与方法

1.1 采样点概况

红枫湖($26^\circ 24' \sim 26^\circ 34' \text{N}$, $106^\circ 20' \sim 106^\circ 26' \text{E}$)、百花湖($26^\circ 35' \sim 26^\circ 42' \text{N}$, $106^\circ 27' \sim 106^\circ 34' \text{E}$)地处贵州中部乌江主要支流猫跳河的上、中游, 是典型的深水分层人工水库. 红枫湖建于 1960-05, 主要由南、北两湖组成, 流域面积 $1\,596\text{ km}^2$, 最大库容 6.01 亿 m^3 , 水面面积 57.2 km^2 , 水体滞留时间为 119 d, 湖水平均深度为 10.25 m, 最大深度为 45 m, 为目前贵州省最大的喀斯特水库. 百花湖是红枫湖的下一级水库, 以红枫湖的下泄水为主要补给, 建于 1966-06, 流域面积 $1\,895\text{ km}^2$, 蓄水面积 14.5 km^2 , 最大库容 1.91 亿 m^3 , 水体滞留时间为 37 d, 湖水平均深度为 12.55 m, 最大深度为 45 m, 为黔中地区仅次于红枫湖、乌江水库的第 3 大喀斯特人工水库. 两湖相距 10 km. 流域内岩溶作用发育, 石灰土与黄壤分布. 属亚热带湿润季风气候, 四季温差不大, 雨量充沛, 多年平均气温 $14 \sim 15^\circ \text{C}$, 多年平均降雨量为 $1\,000 \sim 1\,300\text{ mm}$ ^[13].

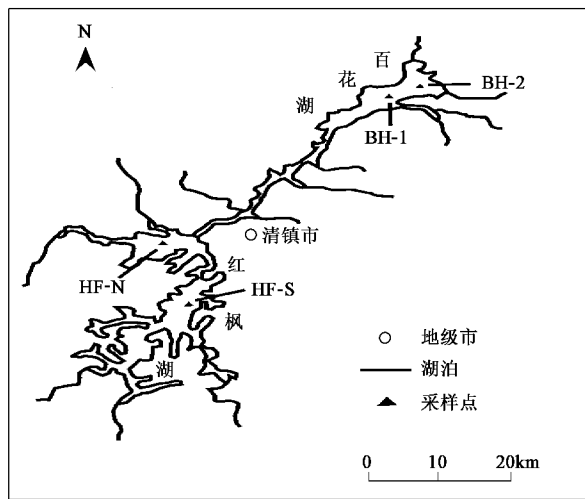


图 1 采样点示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites

1.2 样品采集与分析方法

分别于 2004-02、2004-04、2004-06、2004-08、2004-11 及 2005-01 中旬对红枫湖北湖湖心(HF-N)及南湖湖心(HF-S)、百花湖湖心(BH-1)及山凹(BH-2)的湖

水面以下 0.5 m 进行表层水样的采集, 具体的采样时间为 12:00 ~ 13:00. 水样采集后, 于暗处保存, 现场测定水温(t). 24 h 内在 Radiometer 公司 TIM850 型自动滴定仪上测定 pH, 并用浓度为 0.02 mol/L 的 HCl 对水样中的 HCO_3^- 浓度进行滴定, 水体中 $p(\text{CO}_2)$ 根据 pH、 HCO_3^- 及亨利常数(K_h)进行换算^[12, 15, 16]. 一部分水样用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤后, 用高效液相色谱测定水样中的硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)等, 铵盐(NH_4^+)、磷酸盐(PO_4^{3-})、可溶性硅酸盐(SiO_3^{2-})等营养盐的测定方法参照《水与废水监测方法(第四版)》^[17]. 水样中溶解有机碳(DOC)的测定采用高温催化氧化法^[18]. 叶绿素 a(Chla)的测定用丙酮萃取分光光度法^[19]. 以上所有样品的测定均在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成, 各实验误差均在 5% 以内.

2 结果与分析

2.1 两湖水体的物理、化学及生物特征

表 1 为各采样点的物理、化学和生物特征. 两湖表层水温的季节变化很大, 春夏季一般在 $22 \sim 28^\circ \text{C}$ 范围内, 适合浮游植物生长, 而秋冬季一般在 $8 \sim 12.8^\circ \text{C}$ 范围内. 两湖表层湖水 pH 一般在 $7.66 \sim 8.78$ 范围内, 说明两湖湖水均呈弱碱性. 百花湖的 Alk 比红枫湖略高. 两湖无机氮以 NO_3^- 为主, NO_3^- 浓度是 NO_2^- 和 NH_4^+ 浓度的 5 ~ 7 倍, 红枫湖 NH_4^+ 含量比 NO_2^- 还少, 百花湖两者相当. 两湖 SiO_3^{2-} 含量相差不大, 总体在 $0.15 \sim 1.61\text{ mg/L}$ 范围内. 两湖 PO_4^{3-} 含量很低, 夏季比春季明显降低, 而秋冬季节则低于检测线. 两湖 N/P 分别为 253.7 和 336.0, Si/P 分别为 424.6 和 209.6, 根据 Justics 等^[20] 提出的判断营养盐成为限制性元素的标准, PO_4^{3-} 是两湖浮游植物生长的限制因子. 另外, 百花湖的 DOC 比红枫湖略高, 红枫湖为 $2.36 \sim 2.92\text{ mg/L}$, 百花湖为 $2.23 \sim 3.96\text{ mg/L}$, 明显低于世界平均水平 6.5 mg/L ^[21]. 红枫湖 Chla 范围为 $7.23 \sim 27.6\text{ }\mu\text{g/L}$, 百花湖为 $2.84 \sim 19.9\text{ }\mu\text{g/L}$, 比红枫湖低. 参照 OECD 湖泊营养状态的 Chla 指标划分标准^[22], 红枫湖为富营养型, 百花湖为中营养型.

2.2 两湖表层水中 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化规律

不同于北部温带地区水库表层水中 CO_2 在无冰期内大多数过饱和的特点^[2, 4], 两湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 出现类似湖泊的明显季节变化规律(图 2),

表 1 各采样点的物理、化学和生物参数的变化范围(平均值 ± 标准偏差, $n = 6$)

Table 1 Variations of the physical, chemical and biological parameters (average ± standard deviation, $n = 6$)

参数	红枫湖		百花湖	
	HF-N	HF-S	BH-1	BH-2
$t/^\circ\text{C}$	18.6 ± 7.6	20.0 ± 8.2	17.8 ± 8.9	17.6 ± 7.8
pH	8.27 ± 0.40	8.33 ± 0.30	8.26 ± 0.36	8.32 ± 0.27
$\text{Alk}/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	2.05 ± 0.48	2.27 ± 0.35	2.38 ± 0.33	2.45 ± 0.31
$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.95 ± 2.29	8.09 ± 1.13	8.20 ± 1.55	8.24 ± 1.34
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.31 ± 0.21	0.10 ± 0.06	0.54 ± 0.51	0.56 ± 0.57
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.38 ± 4.36	2.57 ± 1.96	3.42 ± 2.66	3.34 ± 2.57
$\text{NO}_2^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.61 ± 0.84	0.55 ± 0.76	0.58 ± 0.78	0.63 ± 0.88
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.009 ± 0.007	0.006 ± 0.007	0.014 ± 0.016	0.010 ± 0.013
$\text{SiO}_3^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.60 ± 0.51	1.26 ± 1.61	0.77 ± 0.46	0.69 ± 0.56
$\text{Chla}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	12.6 ± 5.95	19.7 ± 6.72	10.6 ± 5.17	11.0 ± 6.42
$\text{DOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.73 ± 0.12	2.70 ± 0.22	3.07 ± 0.41	2.98 ± 0.56

即: 2005-01 > 2004-11 > 2004-02 > 2004-04 > 2004-06 > 2004-08. 夏季 6 ~ 8 月份 CO_2 分压低于大气 CO_2 分压 36.9Pa^[23], 其中 8 月份 $p(\text{CO}_2)$ 最低, 红枫湖为 $(17.4 \pm 0.68)\text{Pa}$, 百花湖为 $(28.9 \pm 1.66)\text{Pa}$, 分别是大气 CO_2 分压的 0.5 倍和 0.78 倍, 说明两湖均为大气 CO_2 的“汇”; 而其他月份两湖表层水 CO_2 分压明显高于大气 CO_2 分压, 其中 2005-01 的 $p(\text{CO}_2)$ 最高, 红枫湖为 $(239.0 \pm 60.3)\text{Pa}$, 百花湖为 $(353.7 \pm 33.6)\text{Pa}$, 分别是大气 CO_2 分压的 6.5 倍和 9.6 倍, 两湖成为大气 CO_2 的“源”. 从全年角度来说, 红枫湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 为 $(88.3 \pm 78.2)\text{Pa}$, 百花湖为 $(114.3 \pm 117.6)\text{Pa}$, 都是大气 CO_2 的“源”, 这也与 Maberly 等^[24] 的观点吻合, 即使在主要生长季节吸收大气 CO_2 的湖泊以年计算还是向大气释放出 CO_2 .

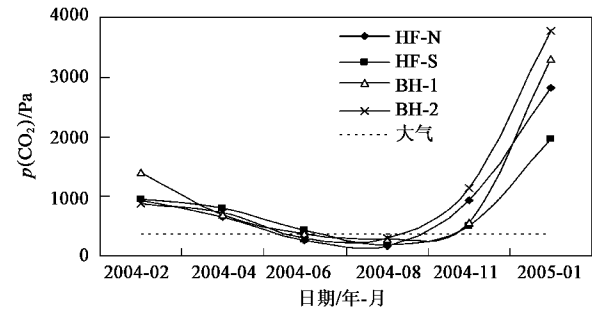


图 2 各采样点表层水 $p(\text{CO}_2)$ 的季节变化规律

Fig.2 Seasonal variability of $p(\text{CO}_2)$ of the surface water in different sampling sites

3 讨论

国外大量研究表明, 湖泊表层水中 CO_2 过饱和

与陆源 DOC 有良好的相关性, 认为被湖泊细菌利用的陆源 DOC 是湖泊 CO_2 的主要来源^[22~27]. 但这往往只适用于贫营养的异养型湖泊, 对于富营养的自养型湖泊, 浮游植物光合作用往往导致夏季湖泊 CO_2 欠饱和, 成为大气 CO_2 的“汇”, 有报道初级生产力丰富的湖泊由于光合作用吸收大气 CO_2 ^[28,29]. 范成新等^[9]与 Xing 等^[10] 分别对中国的太湖及东湖中 CO_2 季节变化进行了研究, 发现 $p(\text{CO}_2)$ 与 Chla 之间存在相关性, 说明浮游植物是调节富营养湖泊 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素. 但对水库中 CO_2 的影响因素研究多侧重于水库年龄、淹没土壤中有机物等^[1,30], 水库中水温、降雨量、营养盐及浮游植物对水-气界面的 CO_2 “源”、“汇”效应影响的研究较少.

表 2、3 分别列出了红枫湖、百花湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 与各因素之间的相关系数及显著水平. 可以发现, 红枫湖、百花湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 均与 t 、降雨量及 Chla 显著负相关(降雨量数据引自文献[31]), 与 NO_2^- 正相关, 百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 与 NO_2^- 的相关系数达到极显著水平. 不同的是, 红枫湖 $p(\text{CO}_2)$ 还与 SiO_3^{2-} 显著负相关, 与 NO_3^- 极显著正相关. 此外, 红枫湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 显著负相关, 而百花湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间不存在相关性. 为了更好的阐明红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化的原因, 分别从物理、化学、生物角度分析上述因素对两湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化的影响.

3.1 物理因素

3.1.1 温度

水温的变化直接影响水环境中的化学反应、气

表 2 红枫湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 与各个影响因素之间的相关性分析¹⁾

Table 2 Relative analysis between $p(\text{CO}_2)$ and the different factors for the surface water of Hongfeng Lake

	t	降雨量	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	SiO_3^{2-}	PO_4^{3-}	Chla	DOC	$p(\text{CO}_2)$
t	1									
降雨量	0.902 **	1								
NO_3^-	-0.676 *	-0.715 **	1							
NO_2^-	-0.581 *	-0.675 *	0.864 **	1						
NH_4^+	-0.300	-0.235	0.342	0.025	1					
SiO_3^{2-}	0.532	0.619 *	-0.401	-0.185	-0.243	1				
PO_4^{3-}	0.099	-0.218	0.114	-0.144	0.599	-0.410	1			
Chla	0.671 *	0.719 **	-0.662 *	-0.421	-0.364	0.809 **	-0.663	1		
DOC	0.776 *	0.419	-0.538	0.581	-0.090	0.237	0.513	-0.094	1	
$p(\text{CO}_2)$	-0.779 **	-0.734 **	0.840 **	0.607 *	0.450	-0.638 *	-0.222	-0.668 *	-0.719 *	1

1) * 表示 $p < 0.05$ 显著相关, ** 表示 $p < 0.01$ 极显著相关

表 3 百花湖表层水 $p(\text{CO}_2)$ 与各个影响因素之间的相关性分析¹⁾

Table 3 Relative analysis between $p(\text{CO}_2)$ of Lake Baihua and the different factors

	t	降雨量	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	SiO_3^{2-}	PO_4^{3-}	Chla	DOC	$p(\text{CO}_2)$
t	1									
降雨量	0.899 **	1								
NO_3^-	-0.552	-0.713 **	1							
NO_2^-	-0.640 *	-0.732 **	0.903 **	1						
NH_4^+	-0.566	-0.319	-0.248	-0.134	1					
SiO_3^{2-}	0.217	0.285	-0.076	-0.108	0.255	1				
PO_4^{3-}	-0.048	-0.013	0.489	0.480	0.333	-0.429	1			
Chla	0.632 *	0.834 **	-0.588	-0.645 *	-0.265	-0.088	0.102	1		
DOC	-0.186	-0.031	-0.643	-0.720 *	0.747 *	0.154	0.077	-0.217	1	
$p(\text{CO}_2)$	-0.775 **	-0.713 **	0.556	0.824 **	0.302	-0.047	0.282	-0.647 *	0.157	1

1) * 表示 $p < 0.05$ 显著相关, ** 表示 $p < 0.01$ 极显著相关

体的溶解和水生生物的生长等一系列过程. Rantakari 等^[32]认为水温的增加可以促进湖泊内的初级生产并加快有机质降解过程,一方面水温的增加可以通过对初级生产力的影响促进湖泊对大气 CO_2 的吸收,另一方面水温的增加可以通过对有机质降解的影响促进湖泊中 CO_2 的释放.此外, Sobek 等^[33]通过对全球范围内 4902 个湖泊的统计分析表明,水温虽然与 $p(\text{CO}_2)$ 具有一定的相关性,但不是影响湖泊 $p(\text{CO}_2)$ 的主要因素,水温可能一定程度上改变了 DOC 从陆地向湖泊的转化而影响湖泊 C 循环和湖水的 $p(\text{CO}_2)$. 在红枫湖和百花湖,水温与 Chla、 $p(\text{CO}_2)$ 之间分别存在显著正、负相关(表 2、3),即随着水温的升高,两湖 Chla 含量增加, $p(\text{CO}_2)$ 降低(图 3),这说明两湖的水温主要通过对浮游植物生长的方式间接影响 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化.

3.1.2 降雨量

与水温一样,降雨量与两湖 $p(\text{CO}_2)$ 之间均存在极显著负相关(表 2、3),但两者对湖泊中 CO_2 的影响方式略有不同.一方面,降雨量可以通过增加流域向湖泊中输送的营养盐的通量影响湖泊中 CO_2 变化,如林秋奇等^[34]发现入库河流中 PO_4^{3-} 和 DIN 与流域降雨量呈明显的正相关关系.两湖表层水降雨量与 Chla 之间存在显著的正相关(表 2、3),说明随着降雨量的增加,促进了营养盐的输入(如 SiO_3^{2-}),从而促进 Chla 增加使表层湖水 $p(\text{CO}_2)$ 降低(图 3).另一方面,降雨量的增加可以促进陆地生态系统中有机物向湖水系统的输送,有诸多报道降雨过程伴随着 DOC 的淋溶^[35,36]. Rantakari 等^[32]研究发现,降雨量最大的年份, CO_2 释放量最大.虽然降雨量对两湖 DOC 的影响都很小,但红枫湖 DOC 随降雨量增加有增加趋势,而百花湖恰好相反(图 3),这可能主

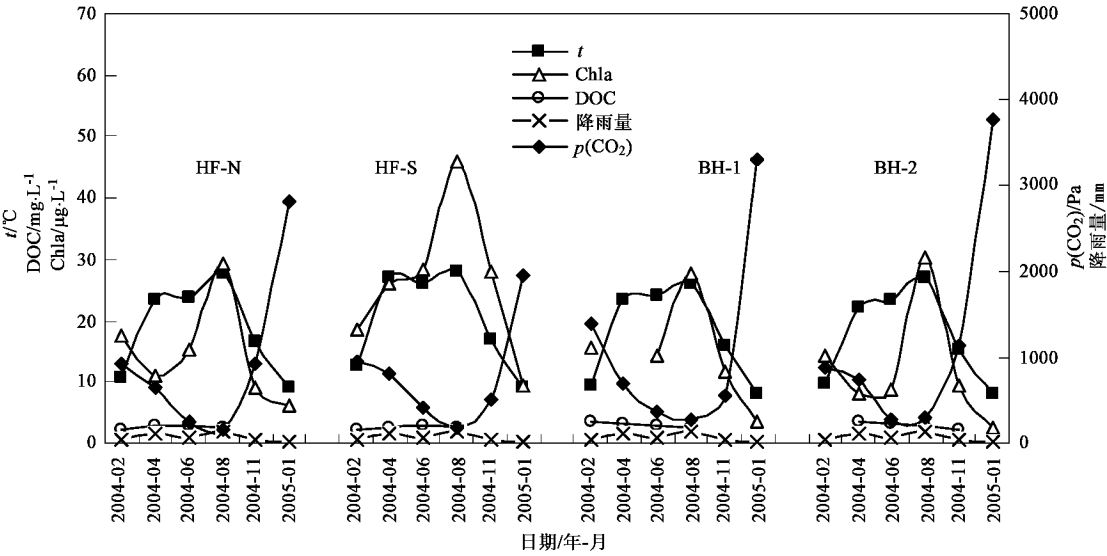


图3 红枫湖与百花湖的 t 、降雨量、DOC、Chla 及 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化特征

Fig.3 Seasonal variability of water temperature, precipitation, DOC, Chla and $p(\text{CO}_2)$ in Hongfeng and Baihua Lakes

要是由于夏季降雨量及红枫湖下泄水径流量对百花湖 DOC 产生的稀释作用造成的^[18]。

3.2 化学因素

3.2.1 营养盐

营养盐是水体中浮游植物生长必不可少的因素,水体中的浮游植物可以利用水中溶解的营养盐(NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 等)进行光合作用.营养盐的含量变化可以影响浮游植物的数量,如 Schindler 等^[28]通过向湖泊 227 中施加 N、P 后发现夏季浮游植物 Chla 由原来的 1 ~ 3 $\mu\text{g/L}$ 增加至 50 ~ 100 $\mu\text{g/L}$,所以水中营养盐含量可以通过影响浮游植物初级生产力而间接影响湖泊中 $p(\text{CO}_2)$ 的变化^[37~39].但不同的营养盐组分对浮游植物的影响也与各营养盐的含量和利用情况有关,如果营养盐不足,则营养盐由于被浮游植物生长所吸收而减少;相反,如果营养盐过剩,则随着浮游植物的生长,营养盐仍过剩^[40,41]。

正如 3.1.2 所讨论的,湖泊(水库)中的营养盐可以通过降雨引起的地表径流而从陆源输入.另外, NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 还与水体的有机质降解、硝化作用以及反硝化作用等 N 转化过程之间存在很密切的联系^[12,19].因此不同的营养元素应从来源、吸收、转化等多方面考虑湖泊(水库)中营养盐的季节变化及其与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的关系。

(1) 两湖 NO_2^- 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间均存在显著正相关 红枫湖 NO_3^- 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间存在显著正相关。

夏季, NO_3^- 、 NO_2^- 的浓度均在 Chla 增加、 $p(\text{CO}_2)$ 降低的情况下降低,说明此时 NO_3^- 、 NO_2^- 被藻类吸收同时引起 $p(\text{CO}_2)$ 的降低.而秋、冬季,降雨量引起的营养盐的陆源输入降低,并且浮游植物 Chla 也随着水温的降低而降低,其吸收的营养盐也应降低,但此时 NO_3^- 、 NO_2^- 的变化却各不相同,说明两湖中无机氮的变化可能与水体内部的有机质降解、硝化反应等有关,在水体混合作用下涌入湖水表面,使其浓度发生剧烈变化.如秋季,两湖 NH_4^+ 降低, NO_3^- 、 NO_2^- 增加(图 4),说明水体中发生硝化反应消耗 NH_4^+ 产生 NO_3^- 、 NO_2^- .而冬季,红枫湖 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 均增加,说明有机质降解产生 NH_4^+ 和 CO_2 ,同时发生硝化反应;而百花湖 NH_4^+ 、 NO_2^- 均增加, NO_3^- 降低,说明水体中发生有机质降解消耗 NO_3^- 产生 NH_4^+ 和 CO_2 .因此,两湖 NO_3^- 、 NO_2^- 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著正相关,及与 Chla 之间的显著负相关是由于藻类吸收及有机质降解、硝化反应共同作用的结果。

(2) 红枫湖 SiO_3^{2-} 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间存在显著负相关 百花湖不存在这种相关性.红枫湖 SiO_3^{2-} 浓度在 8 月份最高(图 5), SiO_3^{2-} 与降雨量显著正相关,说明夏季随着降雨量的增加,红枫湖陆源输入的 SiO_3^{2-} 增加.红枫湖湖水 SiO_3^{2-} 浓度与 Chla、 $p(\text{CO}_2)$ 显著正、负相关,这主要是由于 SiO_3^{2-} 足以适合浮游植物生长需要,因而 SiO_3^{2-} 浓度增加, Chla 增加, $p(\text{CO}_2)$ 降低.而百花湖 SiO_3^{2-} 在 4 月份浓度最高(图

5), 说明夏季降雨量及红枫湖下泄水产生的稀释作用使其浓度降低, 因此与 $p(\text{CO}_2)$ 不存在相关关系.

因此, 红枫湖 SiO_3^{2-} 的季节变化及其与 $p(\text{CO}_2)$ 的相关性是由降雨输入及藻类吸收共同作用的结果.

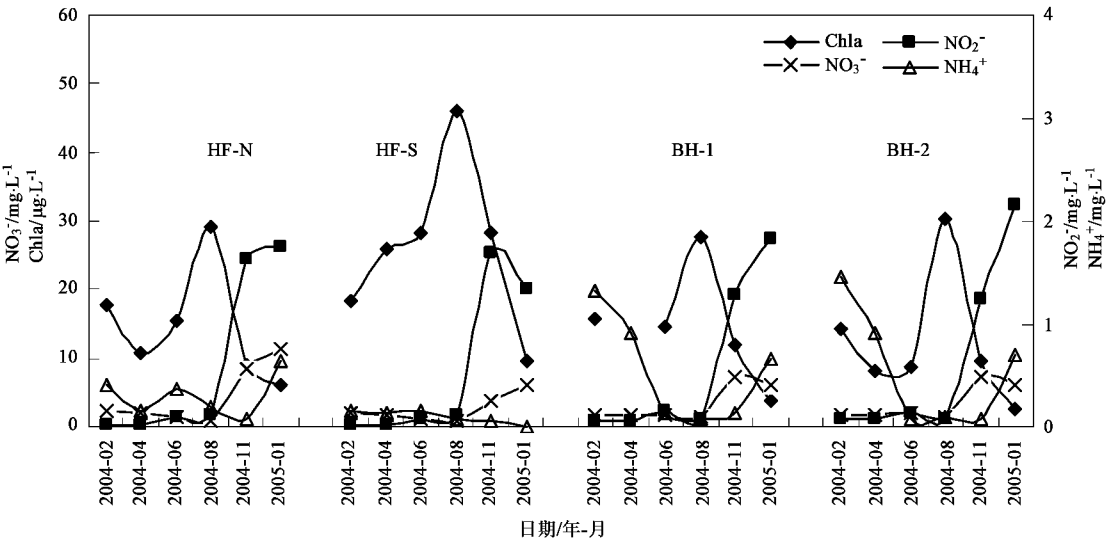


图 4 红枫湖与百花湖的 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 及 Chla 季节变化特征

Fig.4 Seasonal variability of nitrate, nitrite, ammonium and Chla in Hongfeng and Baihua Lakes

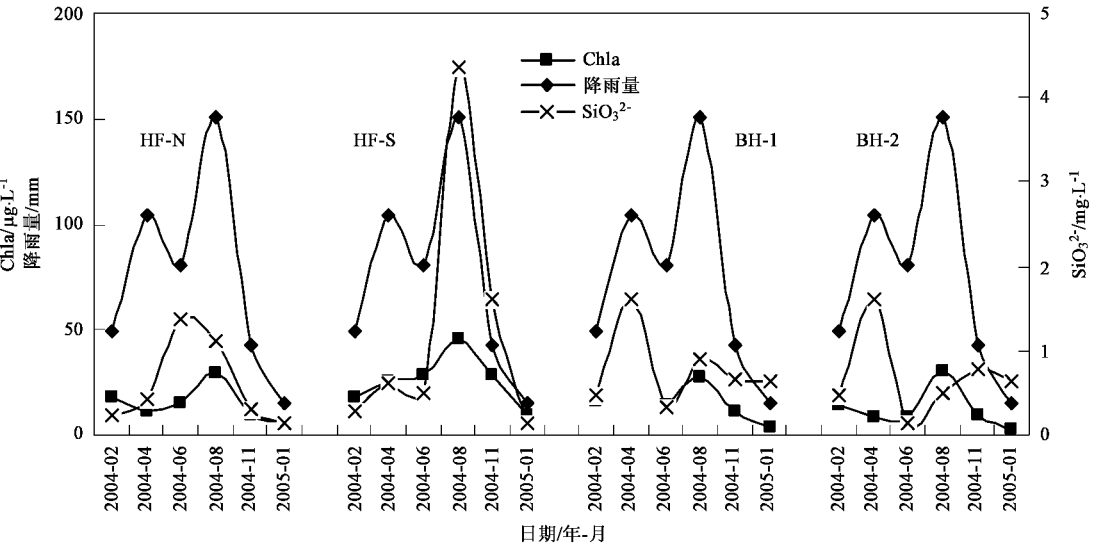


图 5 红枫湖与百花湖的降雨量、 Chla 及 SiO_3^{2-} 季节变化特征

Fig.5 Seasonal variability of precipitation, Chla and silicate in Hongfeng and Baihua Lakes

3.2.2 DOC

湖泊(水库)中 DOC 有 2 个来源: 内源和外源, 其中内源是指湖泊内部有机物转化生成的 DOC, 如光合作用期间藻类分泌的 DOC、有机质降解产生 DOC; 外源指从流域输入的 DOC, 这 2 个来源的贡献主要取决于湖泊滞留时间和湖泊的营养程度^[21]. 国外被研究的湖泊(水库)所处流域一般富含有机碳, 因此其 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间有很好的正相关

性, 说明细菌利用的外源 DOC 进行的呼吸作用是湖泊(水库) CO_2 过饱和的主要原因. 而红枫湖与百花湖位于贵州省典型喀斯特地区, 土层薄弱, 两湖外源输入的 DOC 较低^[18]. 红枫湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 存在显著负相关, 与国外的研究结果恰好相反, 并且红枫湖夏季 DOC 含量增加, 这说明随着降雨的增加从陆源向水库输入了一定量的 DOC, 但 DOC 与 t 之间的显著正相关, 说明红枫湖表层水中 DOC 主要源于浮游

植物生长分泌出的 DOC,从而使 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 出现显著负相关性.而百花湖夏季 DOC 含量降低,说明降雨和红枫湖下泻水的稀释作用影响百花湖表层水中 DOC 季节变化^[18],所以百花湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间不存在相关关系.另外,红枫湖水体的滞留时间及营养程度都比百花湖高,因此红枫湖中 DOC 可能主要以内源为主,百花湖以外源为主,所以红枫湖 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的存在显著负相关,百花湖 DOC 由于受降雨和红枫湖下泄水的影响而与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的不存在相关性.

3.3 生物因素

湖泊向大气吸收或者释放 CO_2 是其内部新陈代谢的结果,水体中浮游植物利用 CO_2 光合作用及细菌利用有机质进行的产生 CO_2 的呼吸作用对水-气界面 CO_2 交换起重要的影响.当浮游植物初级生产力能够满足细菌呼吸作用时,湖泊吸收 CO_2 ,成为大气 CO_2 的“汇”;反之,当浮游植物初级生产力不能满足细菌呼吸作用时,细菌会利用外来 DOC 进行呼吸作用,湖泊向大气释放出 CO_2 ,成为大气 CO_2 的“源”.不同于新建水库中被淹有机物降解产生的 CO_2 可以满足浮游植物光合作用需要,随着被淹有机物降解的减少, CO_2 须从大气中输入从而满足浮游植物光合作用需要^[3].

叶绿素 a(Chla)是植物进行光合作用的色素之一,也是水体中浮游植物现存量的重要指标,其含量的高低可以在一定程度上反映光合作用水平.两湖 $p(\text{CO}_2)$ 与 Chla 之间均存在显著的负相关关系(表 2、3),并与文献[9,10]的研究结果基本一致,也可能是富营养湖泊(水库) CO_2 季节变化的显著特征之一.夏季,随着水温升高,降雨量增加引起的陆源营养盐的输入使得浮游植物生长旺盛,Chla 含量最高,因此浮游植物通过光合作用吸收大气中 CO_2 ,从而使两湖 CO_2 欠饱和,成为大气 CO_2 的“汇”;而秋、冬季节,随着水温的降低,浮游植物 Chla 含量下降,光合作用吸收大气 CO_2 减少,湖泊内部细菌利用有机质呼吸产生的 CO_2 增加,因此湖泊 CO_2 过饱和,成为大气 CO_2 的“源”.由于百花湖 DOC 以外源输入为主,所以细菌呼吸产生的 CO_2 多,百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 高.

4 结论

(1) 不同于北部温带地区水库表层水中 CO_2 在无冰期内大多数过饱和的特点,两湖出现明显的季

节变化特征:夏季表层水中 CO_2 欠饱和,其他季节 CO_2 过饱和.

(2) 通过对物理、化学及生物因素与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的相关性分析,可以看出,两湖 $p(\text{CO}_2)$ 与 Chla 之间存在显著的负相关,则是由于浮游植物光合作用及细菌利用有机物进行呼吸作用的结果,也是两湖 $p(\text{CO}_2)$ 出现季节变化的主要原因.

(3) 水温、降雨量、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SiO_3^{2-} 、DOC 等与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著相关性,则是由于它们对浮游植物生长及有机质降解间接影响的结果.

(4) 与国外研究不同的是,两湖并未出现 DOC 与 $p(\text{CO}_2)$ 之间的显著正相关性,这可能与两湖所处的地理位置有关.

参考文献:

- [1] 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]. *BioScience*, 2000, **50**: 766 ~ 774.
- [2] Duchemin E, Lucotte M. Production of the greenhouse gases CH_4 and CO_2 by hydroelectric reservoirs of the boreal region [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, **9**: 529 ~ 540.
- [3] Galy-Lacaux C, Delmas R, Kouadio G, *et al.* Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(22): 503 ~ 517.
- [4] Huttunen J T, Vaisanen T S, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH_4 , CO_2 , and N_2O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**: 1 ~ 17.
- [5] Åberg J, Bergström A K, Algesten G, *et al.* A comparison of the carbon balances of a natural lake (L. Örträsket) and a hydroelectric reservoir (L. Skinnmuddselet) in northern Sweden [J]. *Water Research*, 2003, **38**: 531 ~ 538.
- [6] Sounis N, Duchemin E, Canuel R, *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the Western United States [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**: GB3022, doi: 10.1029/2003GB002197.
- [7] 张远辉,黄自强,马黎明,等.东海表层水二氧化碳及其海气通量[J]. *台湾海峡*, 1997, **16**(1): 37 ~ 42.
- [8] 郭水仪. 台湾海峡西部海域水体中的二氧化碳体系[J]. *台湾海峡*, 1994, **13**(3): 219 ~ 229.
- [9] Fan C X, Ford P W, Hu W P, *et al.* Divergence of carbon dioxide fluxes in different trophic areas of Taihu Lake, China [J]. *Journal of Environment Science*, 2003, **15**: 433 ~ 442.
- [10] 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**: 5532 ~ 5540.
- [11] 严国安,刘永定.水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(5): 827 ~ 833.

[12] 王仕禄,万国江,刘丛强,等.云贵高原湖泊 CO_2 的地球化学变化及其与大气 CO_2 的源汇效应[J].第四纪研究,2003,23(5):581.

[13] 张维.红枫湖、百花湖环境特征及富营养化[M].贵阳:贵州科技出版社,1999.5~16.

[14] 朱俊.水坝拦截对乌江生源要素生物地球化学循环的影响[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2005.22~23.

[15] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, *et al.* Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. Science, 1994, 265: 1568 ~ 1570.

[16] Kling G W, Kipphut G W, Miller M C. The flux of CO_2 and CH_4 from lakes and rivers in arctic Alaska [J]. Hydrobiologia, 1992, 240: 23 ~ 46.

[17] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.243~280.

[18] 黎文.贵州山区湖泊水体中溶解有机质的时空分布及其生物地球化学循环——以红枫湖、百花湖为例[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2005.31~75.

[19] 肖化云,刘丛强,李思亮,等.强水动力湖泊夏季分层期氮的生物地球化学循环初步研究:以贵州红枫湖南湖为例[J].地球化学,2002,31(6):571~576.

[20] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Change in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995,40: 339 ~ 356.

[21] Wetzel R G. Limnology: Lake and River Ecosystems[M]. New York: Harcourt Brace College Publishers,1983.767.

[22] 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛.中国湖泊富营养化[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[23] Bonan G. Ecological climatology-Concepts and applications[M]. Cambridge University Press, 2002.

[24] Maberly S C. Diel, episodic and seasonal changes in pH and concentrations of inorganic carbon in a productive lake [J]. Freshwater Biology, 1996,35: 579 ~ 598.

[25] Hope D, Kratz T K, Riera J L. Relationship between $p\text{CO}_2$ and dissolved organic carbon in northern Wisconsin lakes [J]. Journal of Environmental Quality, 1996,25: 1442 ~ 1445.

[26] Riera J L, Schindler J E, Kratz T K. Seasonal dynamics of carbon dioxide and methane in two clearwater lakes and two bog lakes in northern Wisconsin, USA [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999,56: 265 ~ 274.

[27] Sobek S. Carbon Dioxide Supersaturation in Lakes-Causes, Consequences and Sensitivity to Climate Change [D]. Sweden: Uppsala University,2005.17~19.

[28] Schindler D W, Brunskill G J, Emerson S, *et al.* Atmospheric carbon dioxide: its role in maintaining phytoplankton standing crops [J]. Science, 1972,177: 1192 ~ 1194.

[29] Cole J J, Pace M L, Carpenter S R, *et al.* Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations [J]. Limnology and Oceanography, 2000,45: 1718 ~ 1730.

[30] Duchemin E, Lucotte M, St Louis V, *et al.* Hydroelectric reservoirs as an anthropogenic source of greenhouse gases [J]. World Resource Review, 2003,14: 334 ~ 53.

[31] 阎海鱼.环境样品中不同形态汞的分析方法建立与贵州百花湖汞的生物地球化学循环特征的初步研究[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2005.38.

[32] Rantakari M, Kortelainen P. Interannual variation and climatic regulation of the CO_2 emission from large boreal lakes [J]. Global Change Biology, 2005,11: 1 ~ 13.

[33] Sobek S, Tranvik L J, Cole J J. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19: GB2003, doi: 10.1029/2004GB002264.

[34] 林秋奇,胡韧,韩博平.流溪河水库水动力对营养盐和浮游植物分布的影响[J].生态学报,2003,23(11):2278~2284.

[35] Dillon P J, Molot L A. Dissolved organic and inorganic carbon mass balances in central Ontario lakes [J]. Biogeochemistry, 1997,36: 29 ~ 42.

[36] Correll D L, Jordan T E, Weller D E. Effects of precipitation, air temperature, and land use on organic carbon discharges from Rhode river watersheds [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2001,128: 139 ~ 159.

[37] Giorgio P A, Peters R H. Patterns in planktonic P: R ratios in lakes: Influence of lake trophic and dissolved organic carbon [J]. Limnology and Oceanography,1994, 39: 772 ~ 787.

[38] Schindler D W, Curtis P J, Bayley S E, *et al.* Climate-induced changes in the dissolved organic carbon budgets of boreal lakes [J]. Biogeochemistry, 1997,36: 9 ~ 28.

[39] Cole J J, Pace M L, Carpenter S R, *et al.* Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations [J]. Limnology and Oceanography, 2000,45: 1718 ~ 1730.

[40] 暨卫东,黄尚高.福建海岸带海水营养盐消长与温、盐、浮游植物的关系[J].热带海洋,1989,8(2):55~64.

[41] 甘居利,林钦,李纯厚,等.考洲洋海水营养盐的分布及其与浮游植物的关系[J].湛江海洋大学学报,2002,22(6):32~37.