

喀斯特城市湖库 $p\text{CO}_2$ 及 CO_2 通量空间格局研究

李元媛¹, 王志康¹, Irumva Olivier¹, 马永梅², 倪茂飞^{1,2*}, 吴云杰^{1,3} (1.贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2.中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3.贵州民族大学贵州省工程地质灾害防治工程研究中心, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为探索典型喀斯特城市湖库二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)及其交换通量(F)空间格局,以我国贵阳市阿哈水库(AHa)、松柏山水库(SBS)、百花湖(BHH)和枫枫湖(HFH)为对象,探索了区域气象水文基础数据、碳酸盐平衡参数及环境因子,进而评估表层水体 $p\text{CO}_2$ 及其 F 空间变化.结果表明,受原位新陈代谢和水文调节,AHa 的 $p\text{CO}_2$ 为 $(861.6 \pm 462.8) \mu\text{atm}$,显著高于 SBS $(223.6 \pm 213.1) \mu\text{atm}$ 、BHH $(139.3 \pm 63.6) \mu\text{atm}$ 和 HFH $(126.2 \pm 50.9) \mu\text{atm}$ ($P < 0.05$),且各湖库水-气界面二氧化碳(CO_2)交换速率(k 值)在 $(2.05 \sim 3.82) \text{cm/h}$ 范围内.AHa 的 F 值为 $(6.23 \pm 9.59) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,具有向大气排放 CO_2 的潜力;SBS、BHH 和 HFH 的 F 值分别为 $(-5.86 \pm 5.25) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(-8.63 \pm 1.03) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(-7.58 \pm 1.10) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,表现为大气 CO_2 汇.湖库表层水体 $p\text{CO}_2$ 与环境因子叶绿素 $a(\text{Chla})$ 和氨氮(NH_4^+-N)具有显著相关性($P < 0.05$),说明喀斯特湖库碳酸盐耦合光合作用和人为输入极大影响了水体 CO_2 量级.

关键词: 喀斯特湖库; 二氧化碳; 交换通量; 环境因子; 空间格局

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)12-5918-10

Spatial patterns of partial pressure of carbon dioxide and its exchange flux in karst lakes and reservoirs in a metropolis. LI Yuan-yuan¹, WANG Zhi-kang¹, Irumva Olivier¹, MA Yong-mei², NI Mao-fei^{1,2*}, WU Yun-jie^{1,3} (1.College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 2.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3.Guizhou Provincial Engineering Geological Disaster Prevention and Control Engineering Research Center, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China). *China Environmental Science*, 2022,42(12): 5918~5927

Abstract: The typical karst lakes and reservoirs including AHa Reservoir (AHa), Songbaishan Reservoir (SBS), Baihua Lake (BHH) and Hongfeng Lake were investigated regarding spatial patterns of partial pressure of CO_2 ($p\text{CO}_2$) and CO_2 exchange flux (F) in this study. We examined *in-situ* hydrometeorologic parameters, carbonate equilibria and environmental factors, as well as their potential constraints on water-air CO_2 exchange. The higher $p\text{CO}_2$ levels were observed in the AHa (861.6 ± 462.8) μatm in comparison to the SBS (223.6 ± 213.1) μatm , BHH (139.3 ± 63.6) μatm and HFH (126.2 ± 50.9) μatm ($P < 0.05$). Gas transfer velocity of CO_2 (k values) varied between $2.05 \sim 3.82 \text{cm/h}$. The F values were respectively $(6.23 \pm 9.59) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(-5.86 \pm 5.25) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(-8.63 \pm 1.03) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $(-7.58 \pm 1.10) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ in the AHa, SBS, BHH and HFH, indicating that karst lakes and reservoirs served as both CO_2 sink and source with respect to the overlying atmosphere. Aquatic $p\text{CO}_2$ was tightly linked to chlorophyll a (Chla) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N), suggesting that surface water CO_2 levels responded to coupled carbonate dissolution with photosynthesis and regional human inputs in the karst waters.

Key words: karst lakes and reservoirs; carbon dioxide; exchange flux; environmental factors; spatial pattern

全球内陆水域在碳循环中扮演着至关重要的角色^[1].其中,内陆湖库是众多环境过程的中介者,具有碳储存、转化及排放等功能^[2].特别是内陆湖库作为全球水域的重要组成部分,虽然其表面积仅占大陆的 3%,但贡献了 38%的水生二氧化碳(CO_2)排放量^[3-4].因此,全球湖库 CO_2 常处于过饱和状态,易造成水-气界面 CO_2 排放^[5].普遍认为,水体 CO_2 主要源于水生有机碳的原位呼吸、周边陆生碳的直接输入,同时也受光合作用和区域化学风化过程所约束^[6-8].

水体 CO_2 分压($p\text{CO}_2$)是估算水-气界面 CO_2 交换通量的重要参数,它表征了 CO_2 交换方向和程度

大小,反映了水域的大气 CO_2 汇/源关系^[9-11].目前,国外学者对澳大利亚地区湖库的研究结果显示,该区域气象因子是调节水-气界面 CO_2 交换方向重要参数,经过长期干旱该湖泊最终 CO_2 排放通量在 $(6.7 \pm 6.1) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 范围内^[12].国内学者对太湖、鄱阳湖及洞庭湖等湖库进行了集中性研究,结果表明洞庭湖的 $p\text{CO}_2$ 较低而鄱阳湖较高,说明湖库

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42107091,41867048,41803022); 贵州省科技计划项目(黔科合 ZK[2021]219,ZK[2021]099); 贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2021]109)

* 责任作者, 副教授, nimaofei000@163.com

CO_2 排放潜力具有空间差异^[13-15].因此,当前国内外学者对湖库水-气界面 CO_2 交换特征进行了大量研究^[16-17],并针对碳收支核算不明确的现状进行改善.然而,关于特殊区域湖库,特别是广泛分布的喀斯特湖库研究却十分缺失.

喀斯特即岩溶,是可溶性岩石(碳酸盐岩、硫酸盐岩及卤化岩盐等)经过化学溶化、水的冲刷、侵蚀或者崩塌的作用所形成的特殊地质环境.湖库中碳循环与区域岩性密切相关,其相互作用极大地贡献了水-气界面 CO_2 动态变化^[18].区域碳酸盐岩经过化学风化作用固定大气 CO_2 ,随后被固定的 CO_2 又经过溶解反应返回水体^[19].先前研究显示,喀斯特水体碳酸盐动态显著影响水-气界面 CO_2 交换量级,最终导致其可同时作为 CO_2 的源和汇^[20].因此,碳循环过程受碳酸盐岩的沉淀与溶解驱动是喀斯特湖库的主要特征,同时也是水体 CO_2 源/汇功能的重要调控机制.另一方面,喀斯特区域“生物碳泵”作用驱动体系内碳酸盐溶解耦合光合作用过程,会极大改变水体 CO_2 的吸收与释放过程^[21].城市湖库则具有极强的人为扰动特征,它同样影响了水-气界面 CO_2 交换通量,例如,土地利用、水土流失及植被修复等^[22-24].典型喀斯特城市湖库受碳酸盐岩和人为过程双重影响,水-气界面 CO_2 交换具有强烈的空间特征,在全球及区域碳收支估算中具有重要地位.然而,当前有关城市状态下喀斯特湖库水-气界面 CO_2 交换量级及空间格局的研究鲜有报道,急需对该部分内容进行补充,以求促进特殊区域碳排放评估.

本文以我国典型喀斯特城市湖库作为研究对象,评估了表层水体 $p\text{CO}_2$ 及其 CO_2 交换通量空间格局,探索了 $p\text{CO}_2$ 与环境因子的相互作用关系,同时分析了城市湖库人为扰动对水-气界面 CO_2 交换特征的影响,突出了喀斯特城市湖库在区域碳循环中的作用,有望在我国碳中和背景下,为广泛分布的喀斯特水环境监测和碳收支核算提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

该研究以我国喀斯特城市区域湖库:阿哈湖水库(AHa)、松柏山水库(SBS)、百花湖(BHH)及红枫湖(HFH)为野外调查及样品采集对象(图 1).湖库位

于贵州省贵阳市区,水域具有典型的喀斯特城市地形地貌特征,属于亚热带季风气候.

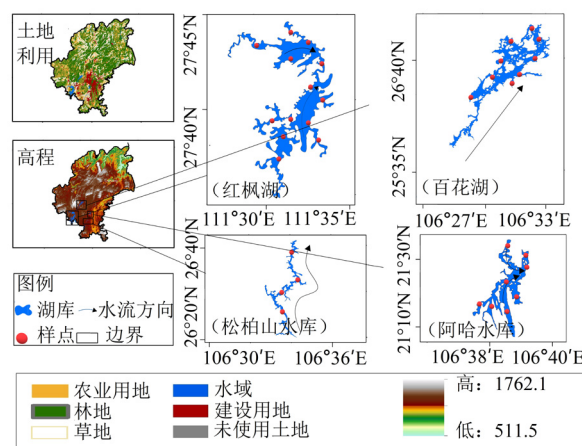


图 1 喀斯特湖库研究区域信息(高程及土地利用)及采样点分布

Fig.1 Location information (DEM and land use of the lake catchments) and distribution of sampling sites in the karst lakes and reservoirs

其中 AHa(26°21'~26°24'N,106°33'~106°34'E)位于贵阳市西南郊,湖库集水面积 190km²,体积容量 5.42×10⁸m³,平均深度 13m(其中最大深度 24m).SBS (26°31'~26°33'N,106°37'~106°59'E)大坝主要河道 27km,水库集水面积 139km²,区域平均气温 14.4℃,每年的平均降雨量 1072mm,多年平均蓄水量为 7.0×10⁷m³.BHH(26°35'~26°42'N,106°27'~106°34'E)流域总面积为 1895km²(其中集水面积为 14.5km²). HFH(25°57'~26°37'N,105°58'~106°28'E)相邻于长江水系和珠江水系分水处,是贵州最大的人工湖,其集水面积为 57.2km²,蓄水量为 6×10⁹m³.研究区域主要土地利用类型包括农用地、建筑用地和林地等(图 1).本文研究湖库空间位置接近,环境地质特征相似,流域岩性以白云石和石灰石等碳酸盐岩为主.

1.2 野外工作及样品分析

野外工作与样品预处理:根据湖库空间尺度,于 2021 年 5 月在 AHa(8 个样点)、SBS(4 个样点)、BHH(9 个样点)和 HFH(13 个样点)开展样品采集工作.为最大缩小日变化及气象条件对样品采集的影响,野外工作于每日上午(09:00~12:00)及下午(14:00~18:00)开展,同时集中于气候条件稳定(无降雨、大风和气温骤变等)的时间周期内完成.水样在

湖库表面以下约 10cm 处采集,随后当天通过醋酸纤维素膜(GF/F47mm,0.45 μ m,Whatman)过滤,保存于酸洗后的 1000mL 高密度聚乙烯(HDPE)容器中.总碱度(Alk)利用 MColortestTM(Merck,德国)碱度测试盒采用固定终点滴定法测定.现场利用便携式溶解氧分析仪(JPB-607A,上海)测定水温(T)及溶解氧(DO),使用便携式酸度计(PHB-4,上海)测定 pH 值.利用 Testo410-1 测定(Testo,德国)测定原位风速(U_z)和气温(T_{air}).为了防止变质,样品保存在 4℃冰柜中冷藏,并在一周内进行实验室分析.

实验室分析:实验室里利用带总氮(TN)分析模块的 varioTOC cube/select(德国 Elementar)测定溶解性有机碳(DOC)和 TN 浓度.总磷(TP)、氨氮(NH_4^+-N)和叶绿素 a(Chla)浓度采用紫外-可见分光光度法进行分析:通过钼酸铵比色法测定 TP^[24],水杨酸分光光度法测定 NH_4^+-N ^[25],乙醇用于提取 Chla^[26].

1.3 数据分析

水体 pCO_2 根据碳酸盐平衡参数(Alk、 T 和 pH 值),利用 CO₂SYS 程序计算得出.该方法当前被广泛使用,并具有显著的精确性和可靠性^[23].

水-气界面 CO_2 交换通量 F , (mmol/(m²·d))由薄边界层模型[式(1)]确定^[27]:

$$F = k \cdot K_h \cdot (pCO_{2\text{water}} - pCO_{2\text{air}}) \quad (1)$$

$$K_h = 10^{-(1.11+0.016T-0.00007T^2)} \quad (2)$$

式中: k 为水-气界面 CO_2 交换速率,m/d; $pCO_{2\text{water}}$ 为水域中 CO_2 分压, μ atm; $pCO_{2\text{air}}$ 是大气 CO_2 平衡浓度, μ atm,本文该值取 410 μ atm; K_h 为亨利常数,该值通过原位 T 进行校正得出,mmol/(m³· μ atm).

$$k_T = k_{600} \left(\frac{S_{CT}}{600} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$S_{CT} = 1911.1 - 118.11T + 3.4527T^2 - 0.04132T^3 \quad (4)$$

式中: k_T 是在不同 T 下的 k 值; S_{CT} 根据 T 计算得出的施密特常数,无量纲; k_{600} 为标准 $T(20^\circ\text{C})$ 的交换速率 k .

天然水体固定温度 T 下的 k 值(k_T)无法直接测定,先前学者基于大量实验,推导出一系列关于 k_T 的经验模型^[28-30],本文适用模型如式(5)所示.

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7} (U_{10} < 3\text{m/s}) \quad (5)$$

$$U_{10} = U_z \left[\frac{(C_{d10})^{\frac{1}{2}}}{K} \cdot \ln\left(\frac{10}{Z}\right) \right] \quad (6)$$

式中: U_{10} 是水体表面以上 10m 处的风速,m/s; z 是风

速高度; C_{d10} 是 10m 高度的阻力系数,0.0013m/s; K 是冯·卡门常数(0.41,无量纲).

1.4 质量控制

采样方法遵循《水质采集技术指导》(HJ494—2009)相关描述.pH 值与 DO 探头事先分别用标准溶液和原位饱和大气进行校准.Alk 采用固定终点滴定法基于标准碱度测试盒进行测量,其不确定性小于 3%.Chla、TP、TN 和 NH_4^+-N 浓度测定进行 1/5 样品随机重复,其变异系数小于 5%.DOC 浓度测定均进行 3 次重复,剔除离群值(若存在)并计算平均值作为最终输出值.水体 pCO_2 的不确定性主要来源于非碳酸盐碱度(NC-Alk),但当水体 pH>7.4 时能够被忽略^[10].本文研究水体 pH 值范围 7.6~9.2 内,因此 NC-Alk 不确定性可控.

1.5 统计方法

数据方差齐次性和正态分布性分别利用 Levene's test 和 Kolmogorov-Smirnov 进行验证,并将非正态分布数据进行自然对数转换.碳酸盐平衡参数(pH 值、 T 、Alk 和 pCO_2),环境因子(DO、TP、TN、 NH_4^+-N 、Chla 和 DOC),交换系数 k 和交换通量 F 利用具有 Turkey HSD test 的单因素方差分析(ANOVA)检验.湖库 pCO_2 与环境因子的相关关系利用线性回归进行分析.所有统计基于 SPSS19.0 分析,所有图形绘制利用 OriginLab OriginPro 2018 完成.

2 结果与分析

2.1 气象水文基础参数

对典型喀斯特城市湖库气象水文参数(U_z 、 T_{air} 、 k_{600} 、 K_h 和 S_{CT})进行测定,其总体概况如表 1 所示.

喀斯特城市湖库 U_z 变化区间较大,在 0.01~2.0m/s 范围内,其平均值为(0.50 $\pm$ 0.58)m/s,对应的 U_{10} 最小值为 0.14m/s,最大值为 3.28m/s. T_{air} 在 20.6~35.6℃之间变化,其平均值为(28.3 $\pm$ 4.45)℃,中位值为 29.6℃,可见城市湖库雨季初期(5 月)已呈现较高气温. k_{600} 在 2.08~3.70cm/h 范围内变化,其平均值为(2.30 $\pm$ 0.44)cm/h,且中位值为 2.10cm/h. S_{CT} 的变化为 452.5~614.5,其平均值为(546.5 $\pm$ 45.9),中位值为 547.8. K_h 的变化范围较小,在 0.033~0.040mmol/(m³· μ atm) 范围内,其平均值为(0.037 $\pm$ 0.0019)mmol/(m³· μ atm).

表 1 湖库气象水文基础参数数据

Table 1 Summary of hydro-meteorologic parameters in the karst lakes and reservoirs

项目	最小值	最大值	中位值	平均值	标准偏差
$U_z(\text{m/s})$	0.10	2.0	0.10	0.50	0.58
$T_{\text{air}}(^{\circ}\text{C})$	20.6	35.6	29.6	28.3	4.45
$k_{600}(\text{cm/h})$	2.08	3.70	2.10	2.30	0.44
S_{CT}	452.5	614.5	547.8	546.5	45.9
$K_{\text{h}}(\text{mmol}/(\text{m}^3 \cdot \mu\text{atm}))$	0.033	0.040	0.037	0.037	0.0019

2.2 湖库碳酸盐平衡参数

基于水体碳酸盐平衡参数(pH 值、 T 和 Alk)评

估喀斯特城市湖库 $p\text{CO}_2$ 量级,其结果如图 2 所示.

喀斯特城市湖库各碳酸盐平衡参数(pH 值、 T 和 Alk)和 $p\text{CO}_2$ 具有显著的空间差异($P<0.05$).其中,各湖库 T 在 $19.5\sim25.8^{\circ}\text{C}$ 范围内变化,其中 AHa 最低为 $(19.9\pm0.6)^{\circ}\text{C}$,而 SBS、BHH 和 HFH 分别为 $(22.3\pm1.1)^{\circ}\text{C}$ 、 $(22.1\pm0.7)^{\circ}\text{C}$ 和 $(23.1\pm1.72)^{\circ}\text{C}$ ($P<0.05$).湖库 pH 值在 $7.6\sim9.2$ 之间变化,湖库水体整体呈碱性且变化范围较小,其中 SBS、BHH 和 HFH 分别为 (8.77 ± 0.25) 、 (8.70 ± 0.14) 和 (8.80 ± 0.15) ,它们高于 AHa 的 pH 值 (7.99 ± 0.22) ($P<0.05$).

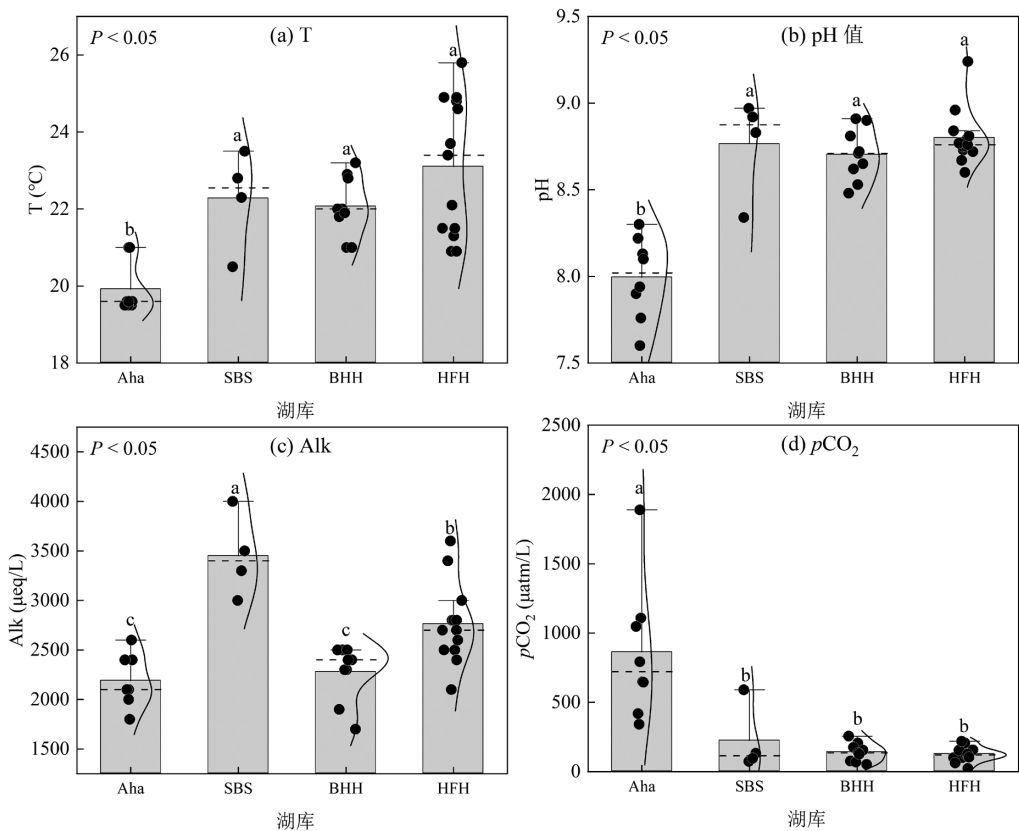


图 2 湖库水体碳酸盐平衡参数及 $p\text{CO}_2$ 量级

Fig.2 Carbonate equilibrium parameters and $p\text{CO}_2$ in the karst lake and reservoirs

虚线和波浪线分别表示中位值和高斯核平滑分布;不同字母(a、b 和 c)表示各组数据之间具有显著的统计性差异;散点表示各样点数据,误差棒外的散点为离群值

表层水体 Alk 在 $1700\sim4000\mu\text{eq/L}$ 范围内变化,其中 SBS 最高为 $(3450.0\pm346.005)\mu\text{eq/L}$,其次 HFH 为 $(2761.5\pm383.3)\mu\text{eq/L}$,AHa 和 BHH 最低分别为 $(2187.5\pm242.06)\mu\text{eq/L}$ 和 $(2277.8\pm269.9)\mu\text{eq/L}$ ($P<0.05$),这符合喀斯特水体高 Alk 的一般研究结果^[31].基于水体碳酸盐平衡参数,湖库 $p\text{CO}_2$ 在 $23.4\sim1888.75\mu\text{atm}$ 范围内变化,其中 AHa($861.6\pm$

462.8) μatm 最高,显著高于 HFH、SBS 和 BHH 分别为 $(126.2\pm50.9)\mu\text{atm}$ 、 $(223.6\pm213.1)\mu\text{atm}$ 和 $(139.3\pm63.6)\mu\text{atm}$ ($P<0.05$),可以看出,仅 AHa 高于一般大气 CO_2 平衡值($400\mu\text{atm}$ 左右),表现出向大气排放 CO_2 的趋势.然而 HFH、BHH 和 SBS 的 $p\text{CO}_2$ 均低于大气 CO_2 平衡,表现为向大气中吸收 CO_2 ,不同喀斯特湖库水-气界面 CO_2 交换方向具有差异.

2.3 湖库水-气界面 CO_2 交换速率及通量

由气象水文和碳酸盐平衡参数评估喀斯特城市湖库水-气界面 CO_2 交换速率 k 与交换通量 F , 其结果如图 3 所示。

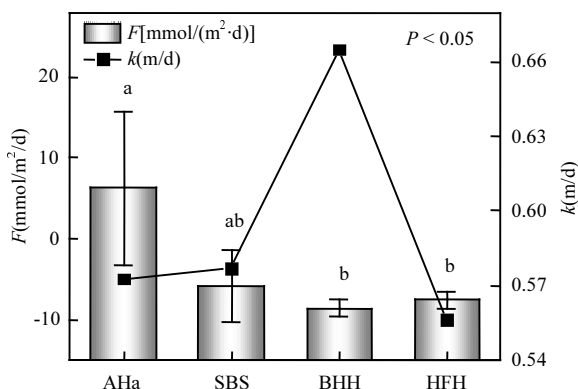


图 3 湖库水-气界面 CO_2 交换速率及通量

Fig.3 Water-air CO_2 transfer velocity and exchange flux in the karst lakes and reservoirs

不同字母(a 和 b)表示该数据具有显著的 Turkey HSD test 统计性差异;误差棒为标准方差范围

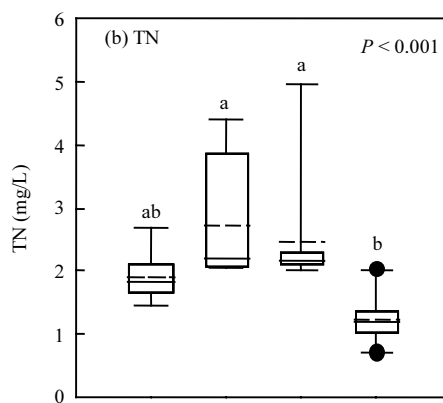
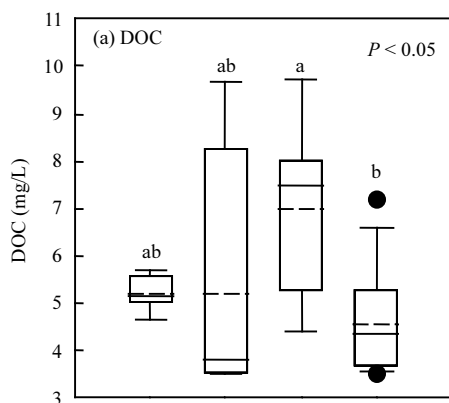
湖库 k 值决定了水-气界面 CO_2 交换速率大小, 其中 BHH 的 k 值为 $(0.67 \pm 0.15) \text{m/d}$, 这高于 AHa $(0.57 \pm 0.11) \text{m/d}$ 、SBS $(0.58 \pm 0.09) \text{m/d}$ 和 HFH $(0.56 \pm 0.03) \text{m/d}$ ($P < 0.05$). 与其它内陆河流相比^[32], 喀斯特湖库 k 值可低于 1~2 个数量级. 这是由于气体交换主要受界面扰动程度所调控, 河流水体湍流相较于湖库面风力扩散更为强烈. 因此, 河流和湖库通常分别以流速和风速作为 k 值的贡献因子^[33]. 基于喀斯特城市湖库 $p\text{CO}_2$ 和 k 值, 水-气界面 CO_2 排放通量 F 总体在 $-10.69 \sim 27.1 \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 范围内变化. 其中, AHa 最高为 $(6.23 \pm 9.59) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ($P < 0.05$), 表

现为由表层水体向大气中排放 CO_2 , 即碳源. 然而, SBS、BHH 和 HFH 的 F 值分别为 $(-5.86 \pm 5.25) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(-8.63 \pm 1.03) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(-7.58 \pm 1.10) \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 表现为表层水体向大气中吸收 CO_2 , 即碳汇.

2.4 环境因子

典型喀斯特城市湖库环境因子如图 4 所示, 其中 DOC、Chla、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 具有显著的空间变化 ($P < 0.05$), 而 DO 和 TP 统计性差异不显著 ($P > 0.05$).

城市湖库 DOC 浓度较高, 整体在 $3.5 \sim 9.7 \text{mg/L}$ 范围内. 其中 BHH 的平均浓度为 $(6.99 \pm 1.63) \text{mg/L}$, 这显著高于 HFH $(4.53 \pm 1.04) \text{mg/L}$ ($P < 0.05$), AHa 和 SBS 的平均 DOC 浓度分别为 $(5.2 \pm 0.33) \text{mg/L}$ 和 $(5.18 \pm 2.61) \text{mg/L}$. 与其它喀斯特水体相似^[34], 湖库具有较高 DO ($7.9 \sim 13.3 \text{mg/L}$), 其中 AHa、SBS、BHH 和 HFH 的平均值分别为 $(9.5 \pm 0.7) \text{mg/L}$ 、 $(10.9 \pm 1.39) \text{mg/L}$ 、 $(10.7 \pm 1.19) \text{mg/L}$ 及 $(9.9 \pm 0.99) \text{mg/L}$. 湖库 Chla 具有近 60 倍的变化 ($0.32 \sim 19.7 \mu\text{g/L}$), 其中 AHa 的平均浓度为 $(12.0 \pm 4.55) \mu\text{g/L}$, 这显著高于 SBS $(0.92 \pm 0.32) \mu\text{g/L}$ 、BHH $(3.00 \pm 1.40) \text{mg/L}$ 和 HFH $(2.49 \pm 3.54) \text{mg/L}$ ($P < 0.001$). 水体 TN 浓度在 $0.7 \sim 5.0 \text{mg/L}$ 范围内变化, 其中 HFH 最低为 $(1.24 \pm 0.39) \text{mg/L}$, SBS 和 BHH 较低分别为 $(2.7 \pm 0.98) \text{mg/L}$ 和 $(2.47 \pm 0.89) \text{mg/L}$ ($P < 0.05$). 与 TN 空间格局不同, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 AHa 最大 $(0.41 \pm 0.17) \text{mg/L}$, 而 BHH 最低 $(0.21 \pm 0.032) \text{mg/L}$, SBS 和 HFH 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度分别为 $(0.30 \pm 0.17) \text{mg/L}$ 和 $(0.28 \pm 0.15) \text{mg/L}$. 湖库 TP 浓度较低且在 $0.004 \sim 0.62 \mu\text{g/L}$ 范围内, AHa、SBS、BHH 和 HFH 的平均值分别为 $(0.12 \pm 0.20) \mu\text{g/L}$ 、 $(0.010 \pm 0.005) \mu\text{g/L}$ 、 $(0.056 \pm 0.109) \mu\text{g/L}$ 和 $(0.022 \pm 0.013) \mu\text{g/L}$ ($P < 0.05$).



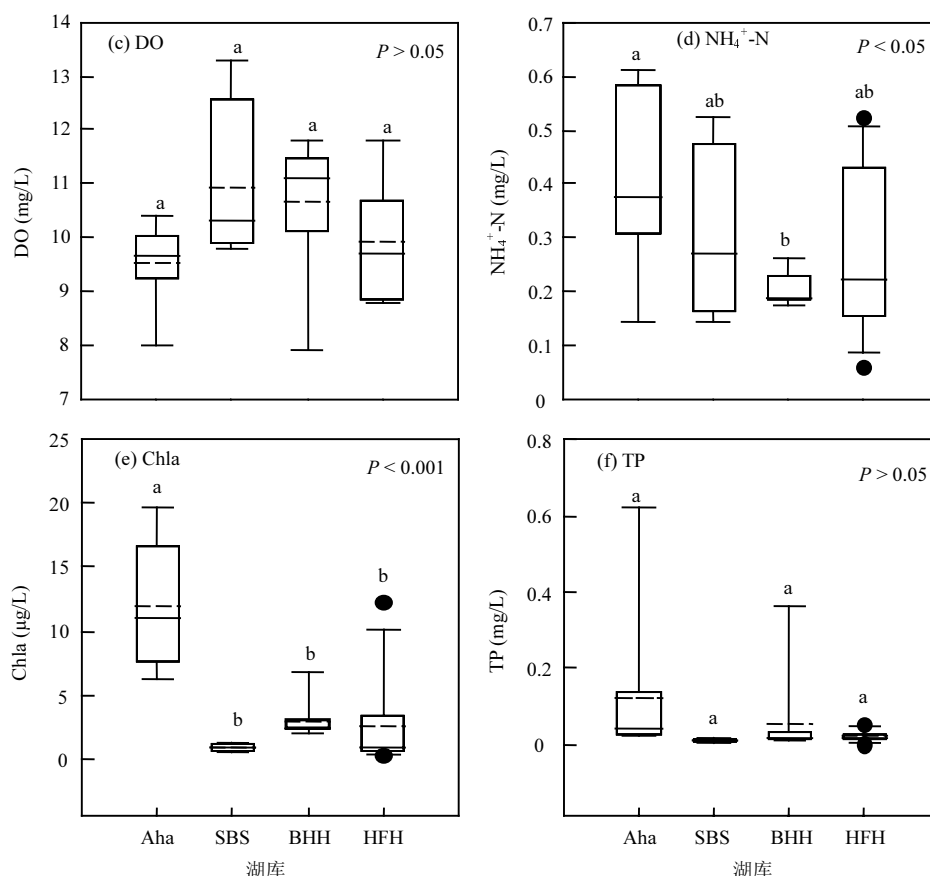


图4 喀斯特城市湖库环境因子的空间格局

Fig.4 Spatial patterns of environmental factors in the karst lakes and reservoirs

虚线、实线、箱体下沿、箱体上沿、上误差棒、下误差棒和散点分别表示平均值、中位值、25%分位、75%分位、5%分位、95%分位和离群值;不同字母(a 和 b)该数据具有显著的 Turkey HSD test 统计性差异

3 讨论

3.1 喀斯特城市湖库 $p\text{CO}_2$ 影响因素

表层水体 $p\text{CO}_2$ 的主要来源为原位呼吸作用和陆生源输入,而通过光合作用和 CO_2 脱气消耗^[35].湖库 T 升高能够促进原位新陈代谢:喀斯特表层水体光合作用强烈,导致 AHa 具有低 T 而高 $p\text{CO}_2$ 量级(图 2).同时,水体 pH 值一定程度反映微生物新陈代谢强度^[36],Aha 生物过程(产有机酸)相对显著导致其 pH 值较低^[37],该过程伴随 CO_2 释放并促使 Aha 水体 $p\text{CO}_2$ ($861.6 \pm 462.8 \mu\text{atm}$) 显著高于其它湖库,进而向大气排放 CO_2 ($F > 0$).水体周围农业活动(如:灌溉和耕作)增强水体连接性^[38],从而影响表层水体 Alk 的空间格局,这解释了农业用地主导的 SBS 具有较高 Alk(图 1 和 2).特别地,喀斯特湖库碳酸盐岩溶解和沉淀也极大控制了水体 CO_2 的变化^[39].先前观点认为,虽然碳酸盐岩风化消耗 CO_2 ,但它的沉淀过程又

将 CO_2 返回,最终造成无净 CO_2 的盈亏^[19].然而,碳酸盐风化效率极高(约为硅酸盐的 100 倍),快速的碳酸盐动力学过程调控喀斯特水体使之成为 CO_2 汇^[40].同时,喀斯特区域光合作用强烈,造成了湖库高 DO 浓度(图 4),同时也以消耗水体 $p\text{CO}_2$ 为代价^[41].研究表明,喀斯特水体碳酸盐岩风化耦合光合作用驱动了 CO_2 变化^[42],这解释了喀湖库(SBS、BHH 和 HFH)的低 $p\text{CO}_2$ 量级,进而表现为大气 CO_2 汇($F < 0$).

人为活动能够直接或间接影响湖库水体 $p\text{CO}_2$ 空间格局^[43-44].天然水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 源于生活排泄或市政废水输入^[45],其中伴随的有机质载荷促进了水生呼吸矿化产生 CO_2 ^[46],导致 Aha 的 $p\text{CO}_2$ 较高.BHH 区域人口密集,具有较大的 TN($1.99 \sim 4.97 \text{mg/L}$)和 TP($0.008 \sim 0.363 \text{mg/L}$)空间变化(图 4),进一步说明人为输入的爆发性和不确定性.然而,BBH 的 $p\text{CO}_2$ 值较低且稳定,说明(1)人为活动不是该湖泊 $p\text{CO}_2$ 的主要驱动因子,或(2)其它环境过程掩盖了人为输入的

影响.湖泊长期的水力停留增强了生物地球化学缓冲,进而能够在一定程度抑制扰动,因此具有更高的人为扰动耐受性.先前研究显示^[47],农业用地和建筑用地密集区域 $p\text{CO}_2$ 能够显著高于其它自然状态水体,然而类似结果并未在本文湖库中观察到,这说明

存在其它重要环境因子限制了土地利用的影响.

3.2 环境因子对湖库 $p\text{CO}_2$ 的影响

为进一步探究湖库 $p\text{CO}_2$ 的主导因素,对 $p\text{CO}_2$ 与环境因子(DOC、DO、Chla、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP)相关关系进行研究,结果如图 5 所示.

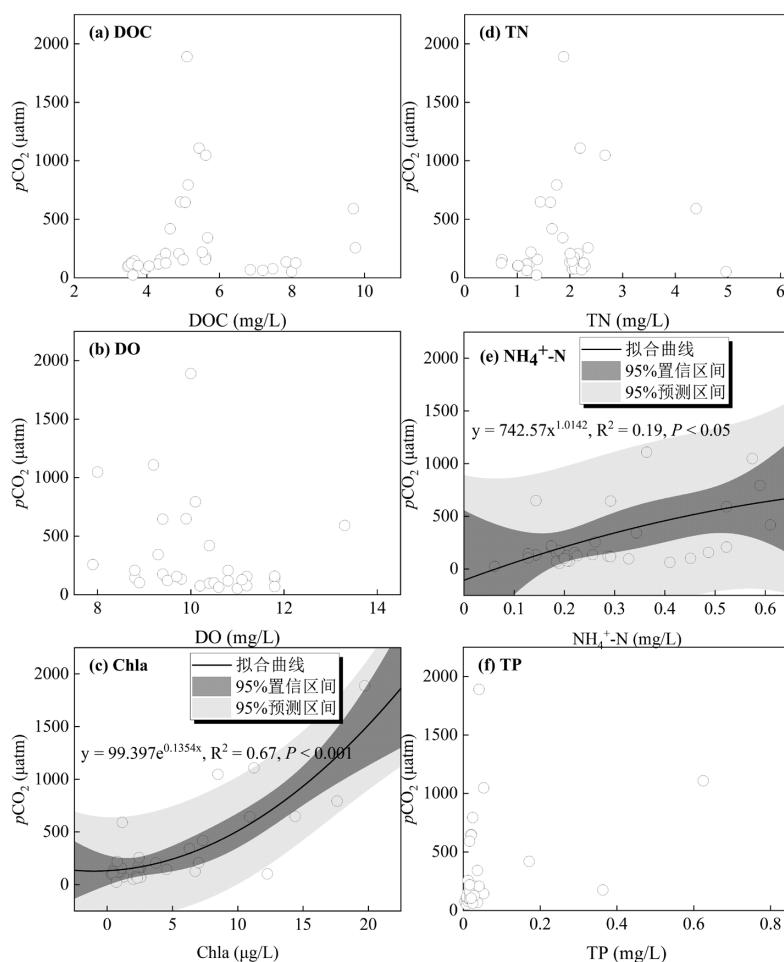


图 5 湖库 $p\text{CO}_2$ 与环境因子的线性拟合关系

Fig.5 Relationship between $p\text{CO}_2$ and environmental factors (DOC, DO, Chla, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP)

自然水体 DOC 是微生物异养呼吸的主要来源,因此可能贡献水生 $p\text{CO}_2$ 量级,先前大量研究也证实了 $p\text{CO}_2$ -DOC 的强相关关系^[48-49].然而,本研究湖库并未观察到可识别的 $p\text{CO}_2$ -DOC 联系 ($P > 0.05$),说明其呼吸矿化被其它环境过程所掩盖.表层水体 DO 为微生物新陈代谢提供好氧条件,呼吸作用消耗 DO 而产生 $p\text{CO}_2$ ^[50],该研究无显著 $p\text{CO}_2$ -DO 共变关系 ($P > 0.05$) 同样说明好氧呼吸过程较弱.自然水体 Chla 极大地表征了光合作用潜力,它与 $p\text{CO}_2$ 呈正相关关系 ($p\text{CO}_2 = 99.379e^{0.1354\text{Chla}}$, $R^2 = 0.67$, $P < 0.001$),这是由于此时 CO_2 浓度成为藻类

光合作用的限制性因素^[51].水体 $p\text{CO}_2$ 表征了高活性碳酸盐(溶解性 CO_2) 的浓度,它与 Chla 的正相关关系也进一步支撑了喀斯特区域碳酸盐溶解耦合光合作用调控水体碳动态,即“生物碳泵”的研究观点^[52].但当 $p\text{CO}_2$ 升高时,由于呼吸作用的竞争可能导致 $p\text{CO}_2$ -Chla 转换为负相关关系.由于 TN 和 TP 来源复杂^[53],它们与 $p\text{CO}_2$ 无显著相关性 ($P > 0.05$).同时,自然水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是人为源输入的重要信号^[45],它与 $p\text{CO}_2$ 的共变 ($p\text{CO}_2 = 742.57\text{NH}_4^+\text{-N}^{1.0142}$, $R^2 = 0.19$, $P < 0.05$) 表征了人为扰动的影响.总体来说,根据环境因子与 $p\text{CO}_2$ 的相关性分析可知,

喀斯特城市湖库具有特殊的“生物碳泵”作用和人为扰动影响等双重属性,它们是水体 CO_2 的重要调控因子,这与其它湖库陆源及原位呼吸驱动 $p\text{CO}_2$ 的影响机制形成差别.

3.3 水体 CO_2 交换通量与之相关研究对比分析

喀斯特湖库 k 值在 2.05~3.82cm/h(即 0.49~0.92m/d)范围内变化(表 2),它与重庆西部山区湖泊(k 值:2.81~4.20cm/h)相似,同时在新丰江水库(k 值:1.82~7.41cm/h)范围内,但低于 Ulansuhai 湖(k 值:(15±2.9)cm/h),并在全球平均 k 值评估(2.08~6.67)中

处于中下水平.

喀斯特城市湖库 F 值为(-10.69~27.1mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)),低于 Ulansuhai 湖(35.7±12.1)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)和 Ainsworth 湖(10.6~152.3mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)). F 值在全球平均评估(-0.082~92.1mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$))中也处于 CO_2 排放速率较低水平.这一方面由于喀斯特水体碳酸盐缓冲体系将 CO_2 扣留并限制其排放,另一方面受控于快速的碳酸盐动力学耦合生物过程,促使 CO_2 在原位不断消耗,进而导致特殊的喀斯特湖库 CO_2 交换状态.

表 2 湖库水-气界面 CO_2 交换通量比较
Table 2 Comparison of CO_2 exchange fluxes at water-air interface between lakes and reservoirs

湖库	$p\text{CO}_2$ (μatm)	k (cm/h)	F (mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$))	文献
喀斯特城市湖库	23.4~1888.75	2.05~3.82	-10.69~27.1	本研究
长春城市湖泊夏季	70.6~10551.4		-5.1~173.0	[41]
重庆西部山区湖泊	2.1~45.0	2.81~4.20	-11.4~-1.27	[54]
新丰江水库	16~3545	1.82~7.41	-16.8~172.4	[55]
Taihu lake	778±169		18.2±8.4	[15]
Ulansuhai lake	654±34	15±2.9	35.7±12.1	[56]
Lower lake	6~4200	2.25~7.92	-16.4~7.0	[1]
Ainsworth lake	727~2832		10.6~152.3	[12]
Global estimates	340~1906	2.08~6.67	-0.082~92.1	[57]

喀斯特地区分布广泛,覆盖了我国 $3.44\times 10^6\text{km}^2$ 的土地.喀斯特城市湖库受碳酸盐溶解耦合光合作用和人为输入双重调节,显示了突出的区域特色.具体来说,(1)碳酸盐溶解耦合光合作用消耗原位水体 CO_2 ,导致湖库呈现大气碳汇.即快速的碳酸盐动力学过程结合光合作用表现出极强的碳扣留潜力.(2)城市化引起的人为扰动直接或间接增加 $p\text{CO}_2$ 量级,是水体呈现大气 CO_2 源的主要诱因.该过程作为喀斯特城市湖库水-气界面 CO_2 交换的独特机制,极大地贡献了区域碳循环过程.该研究结果突出喀斯特城市湖库水-气界面 CO_2 交换的生物地球化学和人为调控因素,响应碳中和背景下的内陆水体碳收支规律,可为其它喀斯特城市水体(河流、湿地、池塘和地下水)的碳循环研究提供借鉴意义,并且有望通过人为干预改变其碳源、汇的状态,促进城市碳达峰、碳中和调控潜力.

4 结论

4.1 典型喀斯特城市湖库 $p\text{CO}_2$ 在 23.4~1888.75 μatm 范围内,且 AHa 的 $p\text{CO}_2$ (861.6±462.8)

μatm 高于大气平衡值,SBS(223.6±213.1) μatm 、BHH(139.3±63.6) μatm 和 HF(126.2±50.9) μatm 的 $p\text{CO}_2$ 较低.

4.2 表层水体 $p\text{CO}_2$ 与环境因子 Chla 和 NH_4^+-N 具有显著正相关关系,表明碳酸盐溶解耦合光合作用及人为输入是湖库 $p\text{CO}_2$ 的重要调控因素.

4.3 表层水体 F 值在(-10.69~27.1)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)范围变化,其中 AHa 的 F 值为正(6.23±9.59)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$),而 SBS(-5.86±5.25)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)、BHH(-8.63±1.03)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)和 HFH(-7.58±1.10)mmol/($\text{m}^2\cdot\text{d}$)为负,喀斯特城市湖库可同时作为大气 CO_2 的源和汇.

参考文献:

[1] Li S, Bush R T, Ward N J, et al. Air-water CO_2 outgassing in the lower lakes (Alexandrina and Albert, Australia) following a millennium drought [J]. Science of The Total Environment, 2016,542: 453-468.
[2] 马海良,丁元卿,庞庆华.武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响[J]. 长江流域资源与环境, 2020,29(2):369-375.
Ma H L, Ding Y Q, Pang Q H. Utilization change of lake and its carbon emission in Wuhan City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(2):369-375.
[3] Ni M, Ge Q, Li S, et al. Trophic state index linked to partial pressure of

- aquatic carbon dioxide in a typical karst plateau lake [J]. *Ecological Indicators*, 2021,120:106912.
- [4] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. *Limnology & Oceanography*, 2009,54(6):2298–2314.
- [5] Sobek S, Tranvik L J, Cole J J. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005,19(2):GB2003.
- [6] Søndergaard M. Light and dark respiration and the effect of the lacunal system on refixation of CO₂ in submerged aquatic plants [J]. *Aquatic Botany*, 1979,6:269–283.
- [7] Keppler H. Water solubility in carbonatite melts [J]. *American Mineralogist*, 2003,88(11):1822–1824.
- [8] 钱娟婷,吴起鑫,安艳玲,等.三岔河 pCO₂ 特征及水-气界面通量分析 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(6):2263–2269.
- Qian J T, Wu Q X, An Y L et al. Partial pressure of CO₂ and CO₂ outgassing fluxes of Sancha River [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(6):2263–2269.
- [9] Raymond P A, Caraco N F, Cole J J. Carbon dioxide concentration and atmospheric flux in the Hudson River [J]. *Estuaries*, 1997,20(2):381–390.
- [10] Li S, Lu X X, Bush R T. CO₂ partial pressure and CO₂ emission in the Lower Mekong River [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,504:40–56.
- [11] Wang X, He Y, Yuan X, et al. pCO₂ and CO₂ flux of the metropolitan river network in relation to the urbanization of Chongqing, China: High CO₂ emissions from urban rivers [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017,122(3):470–486.
- [12] Perkins A K, Santos I R, Sadat-Noori M, et al. Groundwater seepage as a driver of CO₂ evasion in a coastal lake (Lake Ainsworth, NSW, Australia) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,74(1):779–792.
- [13] 陈永根,李香华,胡志新,等.中国八大湖泊冬季水-气界面 CO₂ 通量 [J]. *生态环境*, 2006,15(4):665–669.
- Cheng Y G, Li X H, Hu Z X et al. Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lakes in China in winter [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006,15(4):665–669.
- [14] 翟大兴,杨忠芳,柳青青,等.鄱阳湖流域岩石化学风化特征及 CO₂ 消耗量估算 [J]. *地学前缘*, 2011,18(6):169–181.
- Zhai D X, Yang Z F, Liu Q Q et al. Chemical weathering and CO₂ consumptions in Poyang Lake Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011,18(6):169–181.
- [15] Xiao Q, Xu X, Duan H, et al. Eutrophic Lake Taihu as a significant CO₂ source during 2000–2015 [J]. *Water Research*, 2020,170:115331.
- [16] 龚琬晴,文帅龙,王洪伟,等.大黑汀水库夏秋季节温室气体赋存及排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(11):4611–4619.
- Gong W Q, Wen S L, Wang H W, et al. Characteristics of greenhouse gas occurrence and emission in summer and autumn of Daheiting Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(11):4611–4619.
- [17] Xiao Q, Duan H, Qi T, et al. Environmental investments decreased partial pressure of CO₂ in a small eutrophic urban lake: Evidence from long-term measurements [J]. *Environmental Pollution*, 2020,263:114433.
- [18] Song W, Cheng X U, Liu Q, et al. Experimental petrological study of carbonatite and its significance on the Earth deep carbon cycle [J]. *Geological Review*, 2012,58(4):726–744.
- [19] Khadka M B, Martin J B, Jin J. Transport of dissolved carbon and CO₂ degassing from a river system in a mixed silicate and carbonate catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,513:391–402.
- [20] Zhang T, Li J, Pu J, et al. River sequesters atmospheric carbon and limits the CO₂ degassing in karst area, southwest China [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,609:92–101.
- [21] Liu Z, Macpherson G L, Groves C, et al. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182:42–49.
- [22] Liu Hui C S K, Zhang Lei. The international latest research of the impacts of human activities on carbon emissions [J]. *Progress in Geography*, 2002,21(5):420–429.
- [23] 刘 睿,张 静,陈祖胜,等.典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 [J]. *环境科学*, 2021,42(2):740–748.
- Liu R, Zhang J, Cheng Z S et al. Water-air carbon dioxide exchange and nutritional controls in a typical karst river [J]. *Environmental Science*, 2021,42(2):740–748.
- [24] Lu X X, Li S, He M, et al. Seasonal changes of nutrient fluxes in the Upper Changjiang basin: An example of the Longchuanjiang River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2011,405(3):344–351.
- [25] 黄清辉.关于科技论文中规范使用“氮氮”等相关术语的探讨与建议 [J]. *湖泊科学*, 2020,32(2):596.
- Huang Q H. Discussion and suggestion for correct expression on the item "ammonia nitrogen" in academic articles [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020,32(2):596.
- [26] Párista É, Ács É, Böddi B. Chlorophyll-a determination with ethanol – a critical test [J]. *Hydrobiologia*, 2002,485(1):191–198.
- [27] Ni M, Luo J, Li S. Dynamic controls on riverine pCO₂ and CO₂ outgassing in the Dry-hot Valley Region of Southwest China [J]. *Aquatic Sciences*, 2019,82(8):157–166.
- [28] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998,43(4):647–656.
- [29] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3):1010–1017.
- [30] 姚 骁,李 哲,郭劲松,等.水-气界面 CO₂ 通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较 [J]. *湖泊科学*, 2015,27(2):289–296.
- Yao X, Li Z, Guo X S et al. Comparison between closed static chamber method and thin boundary layer method on monitoring air-water CO₂ diffusion flux [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015,27(2): 289–296.
- [31] Raymond P A, Cole J J. Increase in the export of alkalinity from North America's largest river [J]. *Science*, 2003,301(5629):88–91.
- [32] Li S, Ni M, Mao R, et al. Riverine CO₂ supersaturation and outgassing in a subtropical monsoonal mountainous area (Three Gorges Reservoir Region) of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,558:460–469.
- [33] Ni M, Li S, Luo J, et al. CO₂ partial pressure and CO₂ degassing in the Daning River of the upper Yangtze River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,569:483–494.
- [34] Li J, Pu J, Zhang T, et al. Seasonal variations and intricate diel differences in the physio-chemical parameters and CO₂ emissions

- from a typical karst groundwater-fed reservoir in southern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(15):484.
- [35] Guo J, Jiang T, Zhe L I, 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 Sciences, 2012, 24(2):190–196.
- [36] Reid R J, Mosley L M. Comparative contributions of solution geochemistry, microbial metabolism and aquatic photosynthesis to the development of high pH in ephemeral wetlands in South East Australia [J]. Science of The Total Environment, 2016,542:334–343.
- [37] 倪茂飞,刘睿,王志康,等.典型喀斯特河流汛期溶解性有机质空间变化及其光学参数的耦合关系 [J]. 生态学报, 2022,42(7):2822–2833.
- Ni M F, Liu R, Wang Z K, et al. Spatial pattern and interconnections of optical properties of dissolved organic matter during rainy season in a typical karst river [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2822–2833.
- [38] Lyu X, Tao Z, Gao Q, et al. Chemical weathering and riverine carbonate system driven by human activities in a subtropical karst basin, South China [J]. Water, 2018,10(11):1524.
- [39] Ni M, Li S, Santos I, et al. Linking riverine partial pressure of carbon dioxide to dissolved organic matter optical properties in a dry-hot valley region [J]. Science of The Total Environment, 2020,704: 135353.
- [40] 刘再华, W. Dreybrodt, 刘涇. 大气 CO_2 汇: 硅酸盐风化还是碳酸盐风化的贡献? [J]. 第四纪研究, 2011,31(3):426–430.
- Liu Z H, W. Dreybrodt, Liu H. Atmospheric CO_2 sink: Silicate weathering or carbonate weathering? [J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(3):426–430.
- [41] 温志丹, 宋开山, 赵莹, 等. 长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 [J]. 环境科学, 2016,37(1):102–111.
- Wen Z D, Song K S, Zhao Y et al. Seasonal variability of greenhouse gas emissions in the urban lakes in Changchun, China [J]. Environmental Science, 2016,37(1):102–111.
- [42] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO_2 budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. Earth-Science Reviews, 2010,99(3):162–172.
- [43] Sun J, Cao X, Huang Y. Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2012,24(3):347–354.
- [44] Li C, Feng W, Song F, et al. Three decades of changes in water environment of a large freshwater Lake and its relationship with socio-economic indicators [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019,77:156–166.
- [45] Zhang E, Wang B, Wang Q, et al. Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment [J]. Bioresource Technology, 2008,99(9):3787–3793.
- [46] 田媛, 杨昕, 花伟军, 等. 城市周边生活污水排放对绿地土壤环境质量的影响 [J]. 生态学报, 2008,28(2):742–748.
- Tian Y, Yang X, Hua W J, et al. Fuzzy analysis of the effect of city sewage water on environmental quality of greenspace soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):742–748.
- [47] Zhang Y, Lyu M, Yang P, et al. Spatial variations in CO_2 fluxes in a subtropical coastal reservoir of Southeast China were related to urbanization and land-use types [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021,109(11):206–218.
- [48] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特水库红枫湖、百花湖 $p(\text{CO}_2)$ 季节变化研究 [J]. 环境科学, 2007,28(12):2674–2681.
- Lv Y C, Liu C Q, Wang S L et al. Seasonal variability of $p(\text{CO}_2)$ in the two karst reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou Province, China [J]. Environmental Science, 2007,28(12):2674–2681.
- [49] 李宇阳, 朱俊羽, 俞晓琴, 等. 巢湖二氧化碳排放特征及其潜在影响因素 [J]. 中国环境科学, 2022,42(1):425–433.
- Li Y Y, Zhu J Y, Yu X Q et al. Emission of carbon dioxide from Lake Chaohu and the potential influencing factors [J]. China Environmental Science, 2022,42(1):425–433.
- [50] Miller W M, Wilke C R, Blanch H W. Effects of dissolved oxygen concentration on hybridoma growth and metabolism in continuous culture [J]. Journal of Cellular Physiology, 1987,132(3):524–530.
- [51] Kaplan A, Badger M R, Berry J A. Photosynthesis and the intracellular inorganic carbon pool in the bluegreen alga *Anabaena variabilis*: Response to external CO_2 concentration [J]. Planta, 1980,149(3): 219–226.
- [52] Sun P a, He S, Yu S, et al. Dynamics in riverine inorganic and organic carbon based on carbonate weathering coupled with aquatic photosynthesis in a karst catchment, Southwest China [J]. Water Research, 2021,189:116658.
- [53] Bergström A-K. The use of TN: TP and DIN: TP ratios as indicators for phytoplankton nutrient limitation in oligotrophic lakes affected by N deposition [J]. Aquatic Sciences, 2010,72(3):277–281.
- [54] 罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦. 重庆西部山区典型湖泊水-气界面 CO_2 交换通量及其影响因素 [J]. 环境科学, 2019,40(1):194–201.
- Luo J C, Ni M F, Li S Y. Water-air interface CO_2 exchange flux of typical lakes in a mountainous area of the western Chongqing [J]. Environmental Science, 2019,40(1):194–201.
- [55] 周梅, 叶丽菲, 张超, 等. 广东新丰江水库表层水体 CO_2 分压及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2018,30(3):770–781.
- Zhou M, Ye L F, Zhang C et al. Partial pressure of carbon dioxide in the Xinfengjiang Reservoir of Guangdong Province and its influencing factors [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(3):770–781.
- [56] Sun H, Lu X, Yu R, et al. Eutrophication decreased CO_2 but increased CH_4 emissions from lake: A case study of a shallow Lake Ulansuhai [J]. Water Research, 2021,201:117363.
- [57] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. Nature, 2013,503(7476):355–359.

作者简介: 李元媛(1999-), 女, 贵州锦屏人, 贵州民族大学生态环境工程学院本科生, 研究方向为内陆水体碳循环. 发表论文 1 篇.