

红枫水库和普定水库碳、磷、硅生源要素时空分布特征

石琳^{1,2}, 卢耀庭^{1,2}, 杨永琼³, 于佳^{1,2}, 陈敬安¹, 曾艳^{1,*}

(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 550081;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州师范大学, 贵阳 550000)

摘要: 选取了营养盐浓度和水体滞留时间存在明显差异的普定水库和红枫水库作为研究对象, 通过对两个水库碳、磷、硅生源要素时空变化的分析, 揭示了河流筑坝水库营养盐时空分布的主要影响因素。分析结果显示: 普定水库表层水体溶解性无机碳(DIC)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和溶解性硅(DSi)大体上均表现出冬季较高、夏季较低的变化趋势; 而在垂向分布上, 除冬季外, 其他三个季节均表现出表层水体较低、底层水体较高的趋势。红枫水库 DIC 变化趋势与普定水库类似。而红枫水库 TP 和 DTP 大致表现为冬夏季偏低、春秋季节偏高; 由于浓度较低, 各个季节垂向变化趋势均不明显。夏季红枫水库底部水体 DSi 显著高于表层水体, 而其他三个季节 DSi 在垂向剖面上波动较小。两水库表层水体 DIC 与叶绿素 a(Chla) 呈负相关, 且夏季普定水库和红枫水库表层水体 DIC 稳定碳同位素($\delta^{13}C_{DIC}$)显著高于底层, 而 DIC 则表层水体显著低于底层水体。综合分析结果表明, 浮游植物光合作用是影响普定水库和红枫水库碳、磷、硅生源要素时空分布的最主要因素。营养盐水平较高、水体滞留时间较短的普定水库, 其 Chla 低于营养盐水平较低、水体滞留时间较长的红枫水库。这反映出对于河流筑坝水库而言, 水体滞留时间(水动力条件)比营养盐对浮游植物生物量的影响更显著。因此, 在制定水库污染防治措施时, 需结合水体滞留时间, 差异化、经济合理地制定水质控制/修复目标。

关键词: 红枫水库; 普定水库; 生源要素; 浮游植物; 水体滞留时间

中图分类号: X506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2022)01-0094-09 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.080

水资源是人类赖以生存的基本条件, 也是社会经济发展的重要基础。我国 75% 以上的水资源富集在西部地区如贵州、云南、四川等地^[1]。随着社会需求的增加和筑坝技术的进步, 我国筑坝水库的数量不断增加。以贵州为例, 据统计, 截止到 2018 年末, 已修建的大中型水库就多达 111 座^[2]。不同水库调节性能差异较大, 从日调节到年调节。这些水库在防洪、除涝、灌溉、供水、发电、航运等经济社会效益方面发挥了重要作用; 但与此同时, 水质问题, 尤其是富营养化日益凸显^[3], 严重危及了居民用水安全。碳、磷、硅等生源要素参与生物圈物质和能量循环的过程, 其浓度、形态等可通过物理或者化学过程, 随着时间和空间的变化而变化^[4]。研究这些营养元素的时空分布特征, 有利于揭示水污染机理, 为河流筑坝水库的保护和治理提供理论依据。但前人多针对单一水库进行研究^[5-6], 缺乏不同营养程度以及不同水动力条件湖库的对比。因

此, 本文选取营养盐浓度和水体滞留时间差异显著的普定水库和红枫水库为研究对象, 对水质参数、营养盐及 Chla 的时空变化进行了系统分析, 以揭示河流筑坝水库碳、磷、硅的时空分布特征及其影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区普定水库和红枫水库均为乌江流域内的筑坝人工湖库。普定水库位于贵州省普定县境内, 属乌江干流三岔河水系, 于 1995 年建成, 流域面积为 5 841 km², 水库表面积约为 21.6 km², 总库容量 4.2×10⁸ m³, 正常蓄水位时库容 2.48×10⁸ m³^[7], 具有饮用、发电、农灌、旅游、养殖、工业等多种功能。红枫水库, 位于贵州省贵阳市清镇市, 是贵阳市重要的水源地之一, 设计正常水位高程 1 240 m, 控制集流水域面积 1 551 km²; 死水位海拔 1 227.5 m,

收稿日期: 2021-01-11; 改回日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金委员会—贵州喀斯特科学研究中心联合基金重大项目(U1612441); 国家重点研发计划项目(2016YFA0601000)。

第一作者简介: 石琳(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境地球化学。E-mail: shilin2658415645@163.com.

* 通讯作者: 曾艳(1983-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为湖泊沉积物元素地球化学。E-mail: zengyan@vip.skleg.cn.

库容 $1.59 \times 10^8 \text{ m}^3$; 正常库容 $6.01 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相应水面面积 57.2 km^2 , 具有饮用、旅游、水上运动、防洪等功能^[5]。普定水库和红枫水库流域均具有季风气候明显、雨量充沛、雨热同季等特点。

1.2 样品采集

于2017年7月(夏季)、10月(秋季)以及2018年1月(冬季)和4月(春季),对红枫水库和普定水库四个季节的水样进行了系统收集,采样点见图1。利用便携式 YSI(6600V2型)多参数水质参数仪现场高分辨率测定水体表层到底层的温度($^{\circ}\text{C}$)、pH、溶解氧(DO, mg/L)、和 Chla($\mu\text{g/L}$)浓度。采用 Niskin 分层采水器分别在已选取的代表性研究点位按照表层(2 m)、中层(水体中部)、底层(沉积物-水界面上部 2 m)进行水体采集,采集的水体装入水袋中。根据分析测试的需要,一部分水样现场过滤、一部分密封好带回实验室进行处理和后续分析。

1.3 分析方法

对收集的水样开展了 DIC、TP、DTP 和 DSi 分析,并对夏季收集的水样增加了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分析。未过滤的湖水经过硫酸钾高温消解后,采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89)测定 TP;经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜过滤后的湖水采用相同的方法测定 DTP。DSi

浓度的获取也采用 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜过滤湖水,并采用 ICP-OES 测定。红枫水库和普定水库 pH 分别为 $7.2 \sim 9.2$ 、 $7.6 \sim 9.4$ 。DIC 主要以 HCO_3^- 的形式存在。因此,在野外现场采用酸碱滴定盒(型号 HC605827)通过酸碱滴定经 $0.7 \mu\text{m}$ 玻纤滤膜过滤后的湖水获取 DIC 浓度。并收集过滤后水样于棕色瓶内,立即滴入两滴饱和 HgCl_2 溶液,密封保存,于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 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的测定,并采取相对于国际标准 PDB 的千分差表示,分析误差 $\pm 0.02\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} = (R_s/R_v - 1) \times 1000 \quad (1)$$

式中, R_v 为国际标准碳同位素丰度比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$); R_s 为样品碳同位素丰度比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)。

2 结果

2.1 红枫水库和普定水库温度、DO 和 Chla 时空分布特征

水体理化性质是影响湖泊物理、化学及生物过程的决定性因素。如图2所示,红枫水库和普定水库在春夏两个季节,水体均出现了热分层现象,其中夏季分层更稳定。普定水库水体较深,夏季热分

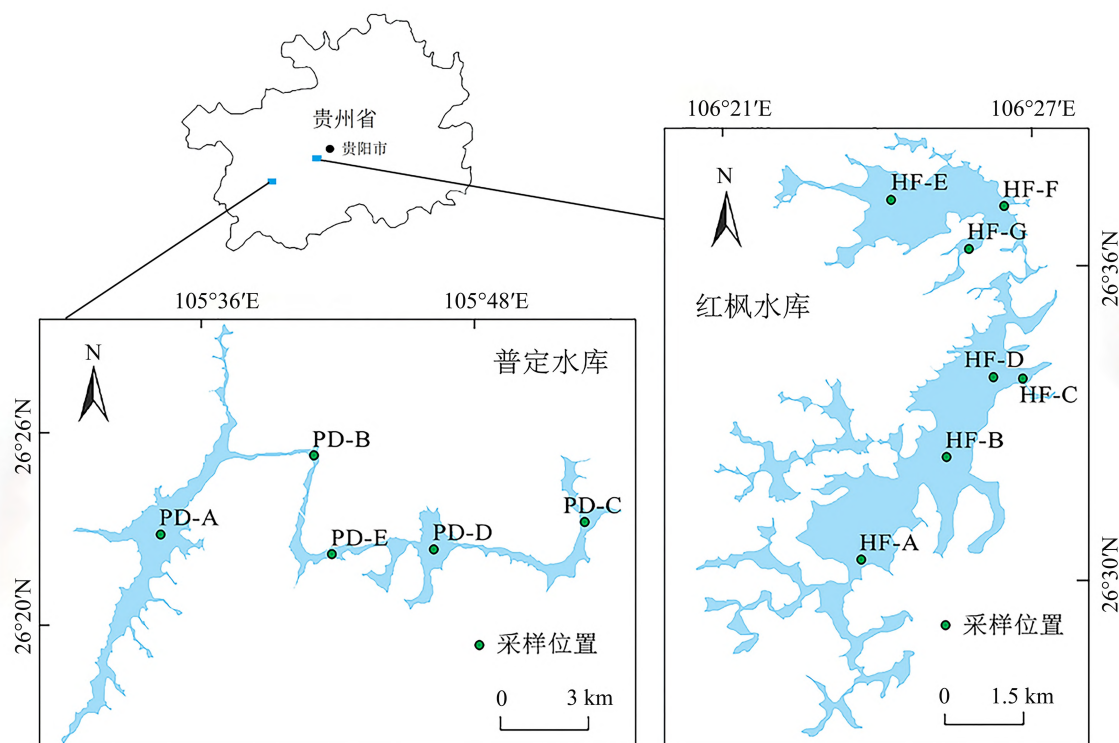


图1 普定水库、红枫水库地理位置及采样点分布

Fig. 1 Geographical location and sampling sites of Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir

层现象更显著。秋季气温降低后,水体发生垂直混合,水温在垂向上变化不大。尤其在冬季,垂向上水温几乎稳定。

如图 2b 所示,春季,红枫水库和普定水库水体

DO 垂向剖面变化与水温剖面变化趋势基本一致。且两个水库底部水体均出现缺氧现象,但缺氧程度不严重,DO 几乎均维持在 2 mg/L 以上。夏季,两个水库水体 DO 垂向剖面变化差异显著。红枫水库

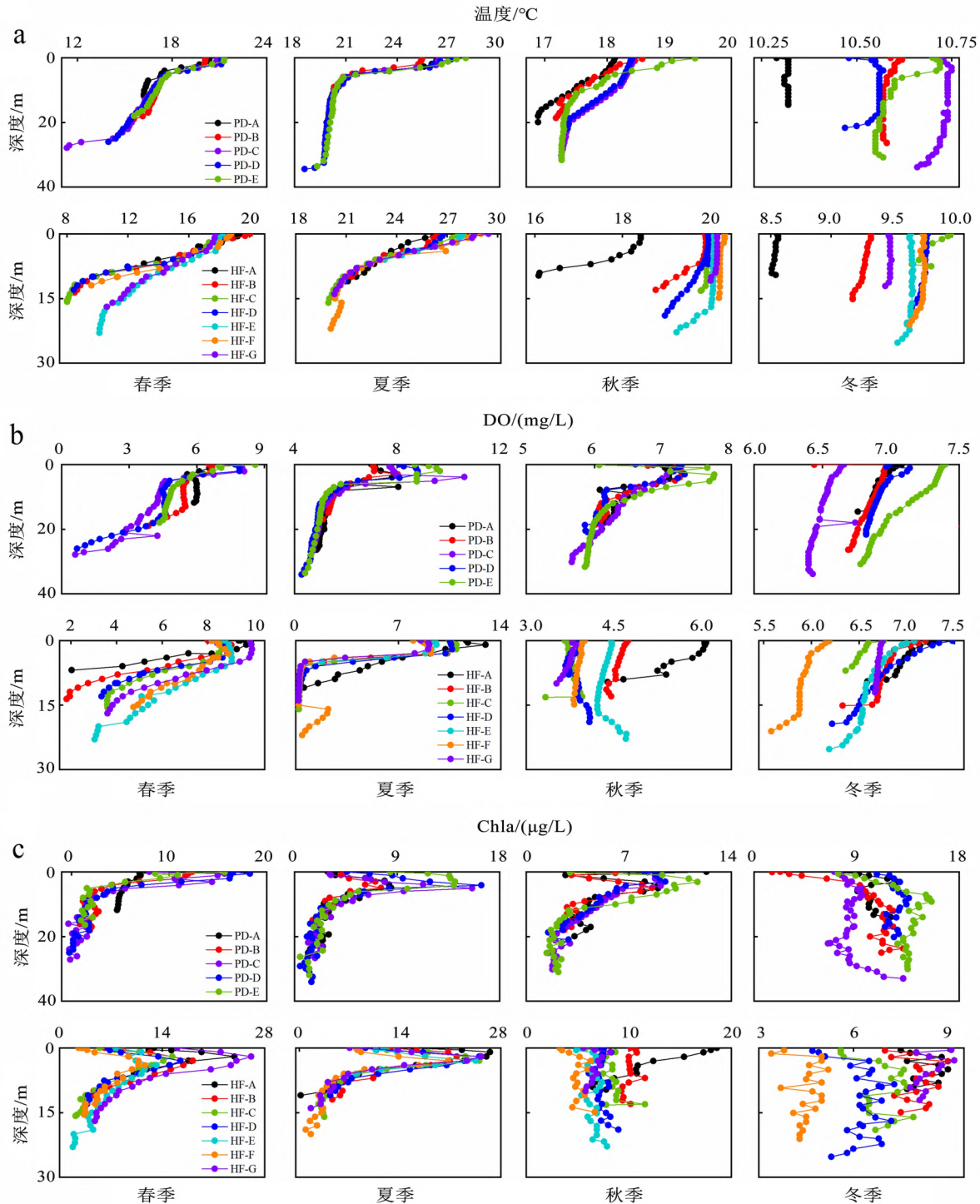


图 2 普定水库及红枫水库水体温度(a)、DO(b)和 Chla(c)的时空变化趋势

Fig. 2 Temporal and spatial variation trends of water temperature (a), DO (b), and chlorophyll a (c) in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir

夏季底部水体 DO 大都低于 0.5 mg/L(仅羊昌河入湖口附近 A 点除外)。而夏季普定水库水体剖面 DO 均维持在 4 mg/L 以上,显著高于红枫水库。秋季,两个水库水体剖面 DO 变化较小。但是两个水库 DO 浓度在秋季存在显著差异。红枫水库夏季较低的 DO 浓度导致在秋季发生垂直混合后 DO 水平显著低于普定水库。冬季,两个水库水体 DO 均为 7 mg/L 左右,且垂向上几乎无变化。

Chla 与浮游植物现存量密切相关^[6, 8]。如图 2c 所示,红枫水库春季和夏季 Chla 均呈现从表层水体到中下层水体先增加后降低的趋势。且 Chla 夏季峰值(平均值 24.13 $\mu\text{g/L}$)大于春季峰值(平均值 17.87 $\mu\text{g/L}$)。秋冬季节 Chla 浓度相近,且垂向上波动较小。普定水库春季 Chla 从表层 9~12 $\mu\text{g/L}$ 迅速降低,至水深 5 m 左右 Chla 含量 < 2 $\mu\text{g/L}$,随后随深度增加缓慢降低。普定水库夏季和秋季 Chla 垂向剖面变化与红枫水库夏季 Chla 变化趋势一致,但是其夏季 Chla 含量显著低于红枫水库夏季

Chla 含量,秋季 Chla 含量峰值低于夏季含量峰值。有意思的是,普定水库冬季 Chla 含量较高,其峰值与夏季 Chla 夏季含量峰值相当,且在整体垂向剖面上均处于较高水平。这种夏季和冬季均出现 Chla 峰值的现象在安第斯山脉中南部的 El Carrizal 水库^[9]也被观测到。

2.2 各水库水体 DIC、TP、DTP、DSi 及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 时空变化趋势

从图 3 中 DIC 的时空分布可看出,普定水库和红枫水库表层 DIC 含量均表现为冬季最高,夏季最低。且普定水库和红枫水库冬季表层水体 DIC 浓度相近,分别为 32.2 mg/L 和 33.0 mg/L;夏季表层水体普定水库略高于红枫水库,其平均浓度分别为 26.4 mg/L 和 24.9 mg/L。两个水库冬季 DIC 浓度垂向变化不显著,不同点位 DIC 的垂向分布存在差异,但是大体都表现出表层水体 DIC 浓度低于底层水体。两个水库夏季水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 垂向剖面变化显著,表层水体偏正、底部水体偏负(见图 4)。

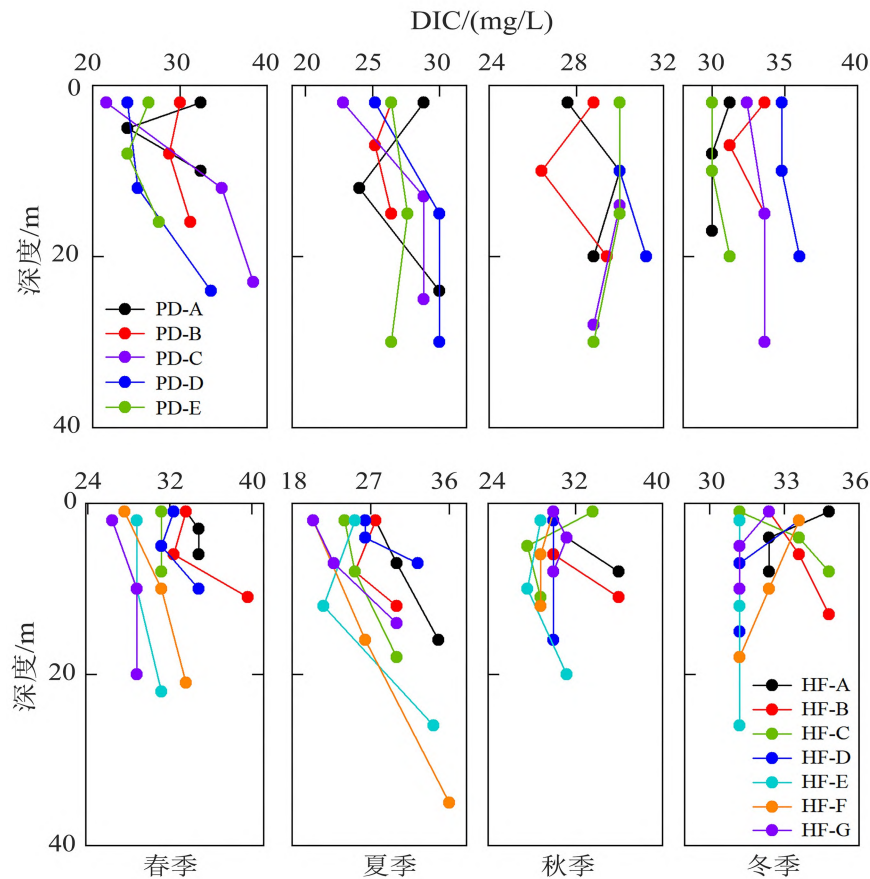


图3 普定水库和红枫水库 DIC 时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of DIC in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir

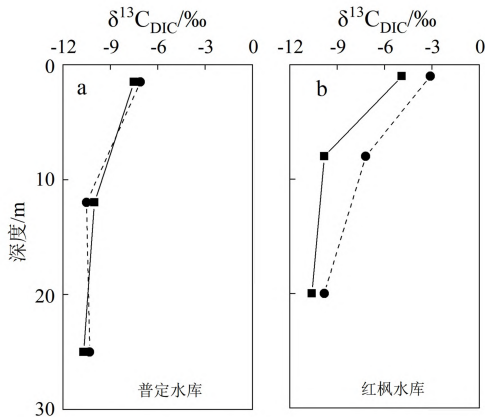


图4 普定水库和红枫水库夏季水体 $\delta^{13}C_{DIC}$ 剖面变化
Fig. 4 Profile changes of $\delta^{13}C_{DIC}$ in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir in summer

如图5所示,普定水库冬季TP和DTP浓度均最高,均值分别为0.09 mg/L和0.06 mg/L;秋季TP和DTP浓度最低,均值分别为0.05 mg/L和0.01 mg/L;春季和夏季TP和DTP浓度相近,均值分别为0.06 mg/L和0.03 mg/L以及0.05 mg/L和0.04 mg/L。在水体垂向剖面上,TP和DTP均大致表现出底部水体浓度高于表层水体。红枫水库各个季节的TP和DTP均显著低于普定水库。红枫水库表层水体春季、夏季、秋季和冬季TP浓度分别为0.04 mg/L、0.02 mg/L、0.02 mg/L和0.01 mg/L,冬季最低。红枫水库表层水体四个季节DTP浓度均较低,春季和秋季DTP浓度在0.01 mg/L附近波动,而夏季和冬季低于检出限。由于红枫水库TP和DTP浓度均较低,在剖面上波动较小、无明显变化规律。

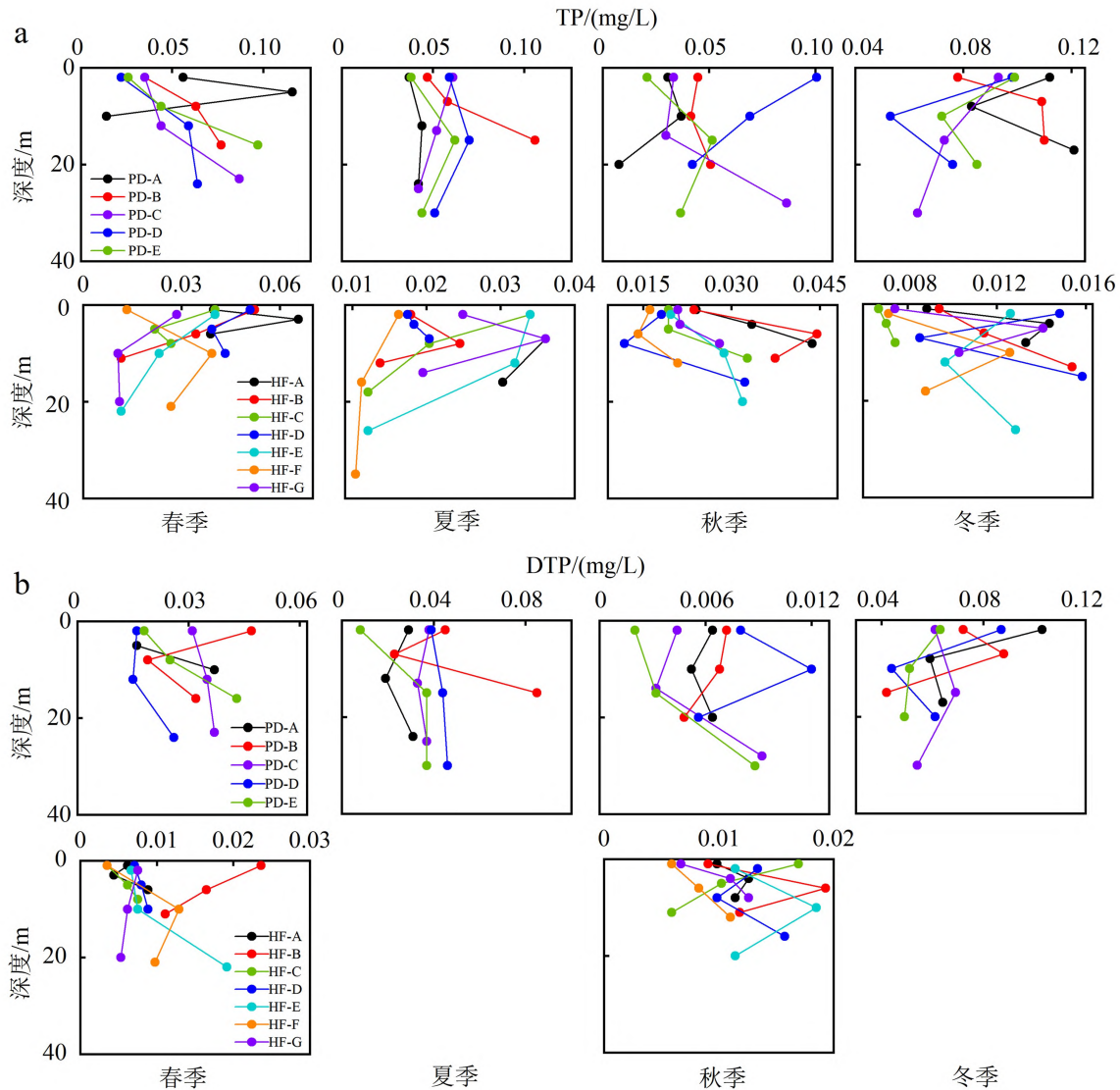


图5 普定水库和红枫水库TP(a)和DTP(b)时空分布
Fig. 5 Temporal and spatial distribution of TP (a) and DTP (b) in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir

普定水库表层水体春季、夏季、秋季和冬季 DSi 浓度均值分别为 2.32 mg/L、2.20 mg/L、2.42 mg/L 和 2.68 mg/L。如图 6 所示,在垂向剖面上,大致表现出底部水体 DSi 浓度略高于表层水体浓度。红枫水库表层水体春季、夏季、秋季和冬季 DSi 浓度均值分别为 0.26 mg/L、0.39 mg/L、0.77 mg/L 和 0.24 mg/L,均显著低于普定水库。夏季红枫水库底部水体 DSi 浓度显著高于表层水体,而其他三个季节 DSi 在垂向剖面上波动较小。

3 讨论

3.1 红枫水库和普定水库营养盐时空变化的影响因素

水库水体中 DIC 的损失包括 CO₂ 排放、碳酸盐沉淀,以及通过光合作用转换成有机质等^[10-11]。普定水库和红枫水库表层水体 DIC 与 Chla 之间的皮尔森相关系数分别为-0.457 和-0.572,均显著相关(如表 1 和表 2 所示)。这反映出普定水库和红枫水库 DIC 的季节变化主要受浮游植物光合作用的影响。浮游植物光合作用越强,初级生产力越高,

吸收水体 DIC 的量越大,对应的水体中 DIC 的浓度则越低。

表 1 红枫水库 DIC、TP、DSi、Chla 相关性分析

Table 1 Correlation analysis of DIC, TP, DSi and Chla in Hongfeng Reservoir

红枫水库	DIC	TP	DSi	Chla
DIC	1			
TP	0.390	1		
DSi	0.298	-0.071	1	
Chla	-0.572**	0.175	0.010	1

注:** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

表 2 普定水库 DIC、TP、DSi、Chla 相关性分析

Table 2 Correlation analysis of DIC, TP, DSi and Chla in Puding Reservoir

普定水库	DIC	TP	DSi	Chla
DIC	1			
TP	0.536*	1		
DSi	0.464*	0.045	1	
Chla	-0.457*	-0.044	-0.547*	1

注:* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

夏季普定水库和红枫水库表层水体 δ¹³C_{DIC} 值

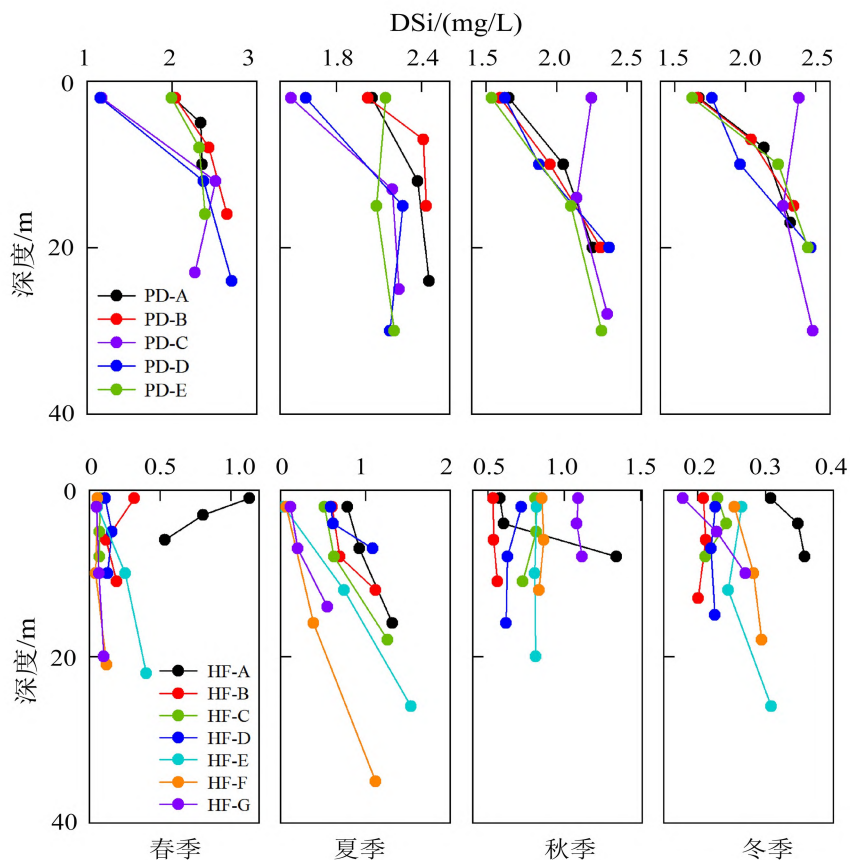


图 6 普定水库和红枫水库 DSi 时空分布特征

Fig. 6 Temporal and spatial distribution characteristics of DSi in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir

显著高于底层,而 DIC 浓度则表层水体显著低于底层水体。这也表明 DIC 的变化主要受浮游植物光合作用的影响。浮游植物利用水体 CO_2 合成有机质的过程中,优先吸收 ^{12}C ,其分馏系数为 20‰~23‰^[12-13]。浮游植物光合作用主要发生在透光层,因此导致在热分层期表层水体中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏正。

普定水库表层水体 Chla 与 DSi 也表现出显著负相关,反映出普定水库 DSi 的季节变化也主要受浮游植物光合作用的影响。红枫水库 DSi 浓度较低,其表层水体 Chla 与 DSi 没有表现出显著相关性。有研究显示,当 DSi 浓度低于一定浓度时,硅藻生长受到抑制^[14-15]。浮游植物群落分析结果也显示普定水库浮游植物以硅藻为主^[16],而红枫水库浮游植物以蓝绿藻为主^[17]。

除径流输入外,浮游植物光合作用和水体氧化还原条件是影响水体磷的两个重要因素。冬季,由于水体处于好氧条件,水体中可溶性磷易于被 Fe-Mn 氧化物吸附而去除^[18];而夏季光合作用较强^[19],水体中可溶性磷被浮游植物光合作用利用,导致水体中可溶性磷降低,浮游植物残体沉降导致水体 TP 也相应降低^[12]。尽管夏季湖库底部水体缺氧会导致沉积物中磷的释放,使得水体中磷浓度增加。但是在红枫水库并没有观测到夏季水体磷浓度增加,尤其是可溶性活性磷(SRP)浓度极低。这在一定程度上反映出夏季较强的光合作用导致浮游植物对水体磷的利用效率较高,夏季水体中较低的磷浓度由夏季较强的光合作用所致。

普定水库表层水体 DIC、TP、DTP 和 DSi 大体上都表现出冬季较高、夏季较低的变化趋势,且 DIC 与 TP 和 DSi 呈显著正相关关系(表 2)。而在垂向分布上,除冬季外,其他三个季节均表现出表层水体较低、底层水体较高的趋势。红枫水库 DIC 变化趋势与普定水库类似。而红枫水库 TP 和 DTP 大致表现出冬夏季偏低、春秋季节偏高;由于浓度较低,各个季节垂向变化趋势均不明显;其中 DTP 在夏季和冬季均低于检出限。因此,浮游植物光合作用是影响普定水库和红枫水库碳、磷、硅生源要素时空分布的最主要因素。

3.2 水体滞留时间对浮游植物生物量的影响

浮游植物生物量是判断湖库营养状态的一个关键指标^[20]。水体中浮游植物的群落演替和生物量变化,不仅受到湖库温度、光照和营养盐的影响,还受到水体水动力作用的影响。有研究显示,在大

型浅水湖泊中,水动力对浮游植物生物量和分布的影响非常显著^[21]。水体滞留时间是反映水动力过程的重要参数,不仅可以反映水体交换的快慢,同时也可以反映浮游生物的平均流失率^[22]。在水力发电、灌溉、饮用等水库中,通常通过调节停留时间来平衡枯水期的储水需求和水的更新。水力停留时间是给定流量通过水生系统所需的理论时间。根据 Straskraba^[23]的研究,水体滞留时间是分层过程和养分可利用性的决定因素,会影响浮游植物的发育。水体滞留时间变长、流速变缓,在适宜的营养盐条件下浮游植物生物量往往会显著增长^[21]。Londe 等^[24]对巴西 Ibitinga 水库的研究结果显示水体滞留时间与藻华覆盖的水体面积显著成正比。

实验结果显示,除 DIC 外(两个水库浓度差异不显著),普定水库浮游植物生长的营养元素 P 和 DSi 均显著高于红枫水库。但是,除冬季外,普定水库的 Chla 浓度却显著低于红枫水库。两座水库正常蓄水位高程相差不大(普定水库 1 145 m,红枫湖水库 1 240 m),因此两座水库库区光照和温度不存在显著差异。普定水库的水体滞留时间为 40 天,红枫水库水体滞留时间为 119 天。这些对比结果反映出对于河流筑坝水库而言,水体滞留时间对浮游植物生物量的影响比营养盐更显著。此外,普定水库具有明显的丰水期(夏季)和枯水期(冬季),枯水期水动力条件较弱。普定水库冬季较高 Chla 除了较高的营养盐浓度外,较弱的水动力条件也是一个重要的因素。较高的营养盐和较弱的水动力条件在一定程度上甚至克服了光照和温度限制机制^[9]。

4 结论

通过对红枫水库和普定水库春、夏、秋、冬四个季节水体中生源要素碳、磷、硅剖面变化的分析,并结合 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和 Chla 的变化,揭示了浮游植物光合作用是影响水体碳、磷、硅等生源要素时空变化的最主要因素。而且通过红枫水库和普定水库营养盐浓度和 Chla 含量的对比分析发现,对于河流筑坝水库而言,水体滞留时间(水动力条件)比营养盐对浮游植物生物量的影响更显著。红枫水库水体滞留时间较长,更有利于浮游植物生长。因此,在制定河流筑坝水库污染防治措施时,需结合水体滞留时间,差异化、经济合理地制定水质控制/修复目标。

参 考 文 献

- [1] 陈敬安,王敬富,于佳,等. 西南地区水库生态环境特征与研究展望[J]. 地球与环境, 2017, 45(2): 115-125.
- [2] 贵州省水利厅. 2018 贵州省年水资源公报[Z]. 贵州:贵州省水利厅, 2018.
- [3] 苟婷,马千里,王振兴,等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4141-4150.
- [4] 张立娟. 长江口及其邻近水域碳、氮、磷的时空分布[D]. 青岛:中国海洋大学, 2009.
- [5] 张润宇,王立英. 红枫湖后午沉积物磷形态与生物有效磷的垂向分布及疏浚深度推算[J]. 地球与环境, 2012, 40(4): 554-560.
- [6] 朱俊,刘从强,王雨春,等. 乌江渡水库中溶解性硅的时空分布特征[J]. 水科学进展, 2006(3): 330-333.
- [7] 唐黎,李秋华,陈椽,等. 贵州普定水库沉积物重金属分布及污染特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4710-4721.
- [8] 张磊,蔚建军,付莉,等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2061-2069.
- [9] Leon J G, Beamud S G, Temporetti P F, et al. Stratification and residence time as factors controlling the seasonal variation and the vertical distribution of chlorophyll-a in a subtropical irrigation reservoir[J]. International Review of Hydrobiology, 2016, 101(1-2):36-47.
- [10] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(1): 23-41.
- [11] 刘文,蒲俊兵,于爽,等. 广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2959-2966.
- [12] Cui G Y, Li X D, Li Q K, et al. Damming effects on dissolved inorganic carbon in different kinds of reservoirs in Jialing River, Southwest China [J]. Acta Geochimica, 2017, 36(4): 581-597.
- [13] Yu Y, Liu C, Wang F, et al. Dissolved inorganic carbon and its isotopic differentiation in cascade reservoirs in the Wujiang drainage basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(21): 3371-3378.
- [14] 李雅娟,王起华. 氮、磷、铁、硅营养盐对底栖硅藻生长速率的影响[J]. 大连水产学院学报, 1998(4): 3-5.
- [15] 张乾柱,陶贞,高全洲,等. 河流溶解硅的生物地球化学循环研究综述[J]. 地球科学进展, 2015, 30(1): 50-59.
- [16] 肖晶,王宝利,张海涛,等. 乌江河流-水库体系浮游植物功能群演替及其环境影响因子辨识[J]. 地球与环境, 2019, 47(6): 829-838.
- [17] 金祖雪,王敬富,李秋华. 贵州红枫湖水体理化特征及其对浮游植物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 517-526.
- [18] Giles C D, Isles P D F, Manley T, et al. The mobility of phosphorus, iron, and manganese through the sediment-water continuum of a shallow eutrophic freshwater lake under stratified and mixed water-column conditions[J]. Biogeochemistry, 2016, 127(1): 15-34.
- [19] 杨东方,陈生涛,胡均,等. 光照、水温和营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. 海洋环境科学, 2007(3): 201-207.
- [20] 赵思琪,范焱城,代嫣然,等. 水体富营养化改善过程中浮游植物群落对非生物环境因子的响应:以武汉东湖为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1310-1319.
- [21] 陈伟民,陈宇炜,秦伯强. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验[J]. 湖泊科学, 2000(4): 343-352.
- [22] Strakraba M, Tundisi J G, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management[J]. Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management, 1993: 213-288.
- [23] Straskraba M. Retention time as a key variable of reservoir limnology[M]. Sao Carlos: International Institute Ecology, 1999: 385-410.
- [24] Londe L R, Novo E, Barbosa C, et al. Water residence time affecting phytoplankton blooms: Study case in Ibitinga Reservoir (Sao Paulo, Brazil) using Landsat/TM images[J]. Brazilian Journal of Biology, 2016, 76(3): 664-672.

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Carbon, Phosphorus and Silicon in the Water Column of Hongfeng Reservoir and Puding Reservoir

SHI Lin^{1,2}, LU Yaoting^{1,2}, YANG Yongqiong³, YU Jia^{1,2}, CHEN Jingan¹, ZENG Yan¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guizhou Normal University, Guiyang 550000, China)

Abstract: Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir, which are significantly different in nutrient concentration and hydraulic retention time, were investigated for the temporal and spatial variations of the biogenic elements of carbon, phosphorus, and silicon in the water volume, and the main factors affecting the temporal and spatial distribution of nutrients in the river-dammed reservoirs were revealed. The results showed that dissolved inorganic carbon (DIC), total phosphorus (TP), dissolved total phosphorus (DTP) and dissolved silicone (DSi) concentrations of the surface water of Puding Reservoir generally were higher in winter and lower in summer. In the vertical distribution, all of them were lower in the surface water than in the bottom water, except in winter. The DIC variation trend of Hongfeng Reservoir was similar to that of Puding Reservoir. The TP and DTP concentrations of Hongfeng Reservoir were generally lower in winter and summer, and higher in spring and autumn. As TP and DTP concentrations were very low, the vertical variation in each season was not obvious. The DSi concentration of Hongfeng Reservoir was significantly higher in the bottom water than in the surface water in summer, while it fluctuated slightly in the vertical profile in the other three seasons. The DIC concentration in the surface water of the two reservoirs was negatively correlated with Chla. The stable carbon isotope of DIC ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) value was significantly higher in the surface water than in the bottom water, while the DIC concentration was significantly lower in the surface water than in the bottom water in both reservoirs in summer. These results showed that phytoplankton photosynthesis was the most important factor affecting the temporal and spatial distribution of carbon, phosphorus and silicon in Puding Reservoir and Hongfeng Reservoir. The Chla concentration in Puding Reservoir, with a relatively higher nutrient level and shorter hydraulic retention time, was significantly lower than that in Hongfeng Reservoir, which has a relatively lower nutrient level and longer hydraulic retention time. This reflected that hydraulic retention time (hydrodynamic conditions) played a more significant role on phytoplankton biomass than nutrients for river-dammed reservoirs. Therefore, when formulating reservoir pollution prevention and control measures, it is necessary to establish water quality control/remediation goals in a differentiated, economical and reasonable way in accordance with the hydraulic retention time.

Key words: Hongfeng Reservoir; Puding Reservoir; biogenic elements; phytoplankton; hydraulic retention time