

# 贵州高原红枫湖水体理化特征 与碳氮硅的时空分布研究

王立英, 张润宇, 陈敬安

(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)

**摘要:** 通过分析贵州红枫湖不同水文期水体理化特征与碳氮硅含量的时空分布, 以期揭示西南山区深水性湖库水环境质量的周期性变化规律。结果表明, 在平水期和枯水期, 红枫湖水温、pH值、溶解氧、叶绿素a含量等水体上下层变幅较小, 丰水期水深6m左右有明显的分层现象, 以溶解氧最为典型, 分层期底层水中溶解氧降至1.0 mg/L以下。受外源有机物大量输入和湖内藻类生长的双重影响, 丰水期湖泊中DOC含量较平水期和枯水期高。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和DON分别占TDN的23.3%~89.4%、7.4%~26.7%。夏季湖水底层滞水带缺氧条件有利于NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的生成, 并导致溶解态硅的含量增高。相关性分析表明, 贵州高原深水性湖库的季节性水质恶化事件与夏秋季节水体分层结构失稳密切相关。

**关键词:** 红枫湖; 理化特征; 碳氮硅; 水体分层; 高原深水湖库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)04-0383-07 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.04.001

水资源是人类赖以生存和社会经济发展的基础。西南地区是我国水资源的主要富集区, 约占全国水能资源总量的70%以上。自上世纪中叶以来, 由于水电大开发的需要, 我国先后在乌江、金沙江、怒江、澜沧江、雅砻江、长江等流域修建了大量人工水库。以贵州为例, 目前在建和已建的各类水库多达2300多座, 其中大中型水库144座, 深水水库是该省水资源利用的主要形式<sup>[1]</sup>。这些水库多为峡谷河道性梯级开发水库, 不仅提供了该地区主要的城市生活用水和工农业用水, 而且对区域的自然生态环境起着重要作用。近20年来, 随着贵州社会经济和城镇化的发展, 人口膨胀加快, 大量的工业废水、生活污水、养殖污染等排入湖库, 致使水体不断恶化, 突发性水质污染事故及水华灾害现象时有发生, 严重威胁到当地居民的用水安全<sup>[2]</sup>。

鉴于筑坝水利工程的拦截调蓄功能, 水库中原有的水文状况随之改变, 水环境性质与作用过程也逐渐表现为自然湖泊的特征, 如发生水体分层等所谓的“湖沼学反应”<sup>[3]</sup>。传统的湖沼学理论认为, 季节性的水体热分层是深水湖库中诸多化学、生物过

程的最直接控制因素。水体在垂向剖面上呈现出一系列物理化学特性的差异, 进而影响水库中水化学过程的作用方式和强度, 并控制着浮游藻类等水生生物的分布和演化。与东部平原地区浅水性湖泊相比, 西南山区深水性湖库具有显著不同的地质地理背景和物质循环特征, 其水体污染过程、机制与表现形式也独具特点<sup>[4-5]</sup>。迄今为止, 已有不少有关这些湖库水体营养盐分布、蓝藻水华演变和沉积物氮磷蓄积特征的研究报道, 但对深水性湖库水环境质量周期性变化的内在规律仍然了解不深<sup>[6-9]</sup>。本研究以黔中地区面积最大的红枫湖水库为例, 通过分析该水库水环境理化特征与营养盐的周期性变化, 以期揭示水污染过程及其内在驱动机制, 为西南山区湖库生态环境的保护与治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

红枫湖位于贵州高原中部乌江水系上游, 于1960年竣工开始蓄水, 总库容为6.01×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 水面

收稿日期: 2017-02-28; 改回日期: 2017-06-05

基金项目: 贵州省社会发展科技支撑计划项目(黔科合SY字[2015]3014号); 国家自然科学基金委员会-贵州喀斯特科学研究中心联合资助项目(U1612442); 国家自然科学基金项目(41273148, 41573133); 贵州省留学人员科技创新项目(黔人项目资助合同[2015]13号)。

第一作者简介: 王立英(1976-), 女, 博士, 副研究员, 从事环境地球化学研究。E-mail: wangliyong@vip.gyig.ac.cn.

积57.2 km<sup>2</sup>,平均水深10.5 m,水体滞留时间约为0.325 a,主要由北湖和南湖组成,水源供给为入湖河水。经过建库50余年的运行发展,红枫湖已从建库时单一的调蓄功能扩展为现今兼具发电、防洪、旅游、水上运动、调节生态环境等多种功能<sup>[2]</sup>。

### 1.2 样品采集

根据高原湖库的气候水文特征,一般1~4月为枯水期、5~9月为丰水期,10~12月为平水期。为此,我们于2015年3月、7月和11月分别进行了3次采样,采样点为红枫湖南湖和北湖的湖心(见图1,简称HF-S和HF-N)。分层水样使用Niskin采水器收集,采样间距在不同的季节稍有不同,一般为2 m或3 m。利用便携式YSI水质仪现场测定温度(*t*,℃)、pH值和溶解氧(DO,mg/L),其它水样保存于冷藏箱,带回实验室用0.45 μm纤维滤膜过滤水样,并进行叶绿素含量和溶解性营养物质的后续分析。

### 1.3 分析方法

参照《水和废水监测分析方法》(第四版)<sup>[10-11]</sup>,浮游植物叶绿素a含量(chl a,μg/L)

运用丙酮萃取方法测定。溶解性有机碳(dissolved organic carbon,DOC)含量的测定采用高温催化氧化法(总有机碳分析仪,型号ELEMENTAR high TOC II),邻苯二甲酸氢钾作为有机碳标准,检测限为0.2 mg/L。溶解性总氮(total dissolved nitrogen,TDN)的测定采用过硫酸钾消解紫外分光光度法,检测限为0.05 mg/L;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量的测定方法为色谱法(离子色谱仪,型号HP1100),检测限为0.08 mg/L;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量的测定方法为靛酚兰法,检测限为0.007 mg/L;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N含量的测定方法为重氮偶合分光光度法,检测限为0.003 mg/L;溶解性有机氮(dissolved organic nitrogen,DON)的含量以TDN与无机态氮的差减计算获得;溶解性硅酸盐含量的测定采用硅钼黄分光光度法,结果以SiO<sub>2</sub>的含量表示,检测限为0.4 mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红枫湖水环境理化特征

研究表明,湖泊水环境性质是影响湖泊物理、化学、生物作用过程的决定性因素,主要受流域地

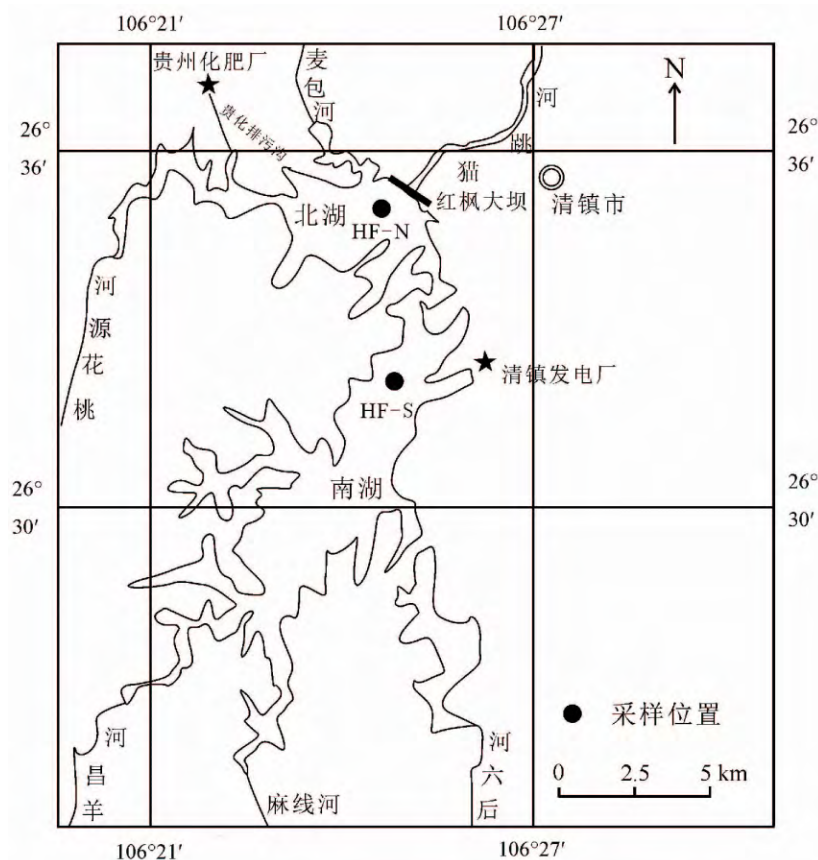


图1 红枫湖地理位置及其采样点分布

Fig.1 Geographical position and sampling sites of Lake Hongfeng

质条件、区域气候、水生态功能组成和人类活动的联合控制,通常表现不同的区域分布特征和时空变异性<sup>[12]</sup>。从图 2 可见,红枫湖 7 月份水温最高,南湖表层水温高达 31.4 °C,北湖水温为 30 °C。3 月和 7 月水体均出现了分层现象,水温跃变点出现在水面以下 6 m 左右,上、下层水体的温度相差高达 10 °C。11 月水温相对较低,且水体垂向温差不大,表层和底层相差 0.3~0.6 °C。这主要是受气温和太阳辐射季节性变化的影响,导致湖泊不同层位水体的热含量出现了显著的季节性差异。在春、夏季,随着太阳辐射和气温的增高,较强的太阳辐射使湖泊水面持续加热,上层较为温暖的湖水产生足够的浮力,阻碍了湖水在垂直方向上的混合,在湖水表层增温和风的共同作用下,湖水垂直温度梯度和静力稳定度大力增加,形成一稳定层,即“温跃层”<sup>[5,7,13]</sup>。而在冬季,太阳辐射和气温都比较低,湖水的温度也低,就不能形成“温跃层”。

红枫湖水体 pH 为 7.22~8.67,呈弱碱性。表层水体 7 月份 pH 较高,而 11 月份相对较低。水体较高的 pH 与湖泊外源性物质的输入和真光层浮游植物的光合作用密切相关。红枫湖流域地处碳酸盐岩覆盖的喀斯特流域,属中度侵蚀区,夏季雨水的冲刷使流域的碳酸盐汇入湖泊中,对湖泊水体的

pH 值有重要的影响。从湖水垂向变化来看,南北湖心 7 月上下层水体的 pH 差值分别为 1.38 和 1.23,同样在水体 6 m 左右出现明显的分层现象。冬季湖水 pH 的垂向变化很小,为 0.05~0.34。pH 的这种变化特征主要受湖水混合作用及浮游植物种群演变特征的双重控制<sup>[7-9]</sup>。表层浮游植物的光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 使得 pH 升高,而水体底层多发生有机质尤其是颗粒物的降解,有机质的降解释放有机酸和 CO<sub>2</sub>,导致 pH 偏低。

红枫湖水体溶解氧的含量变化也表现出与以往研究相似的规律<sup>[11-12]</sup>,11 月水体上下层溶解氧的含量基本恒定,介于 7.78~8.23 mg/L;而在 3、7 月,水体上层的溶解氧含量较高,底层却较低。7 月更为明显,表层水体 DO 含量高达 7.40~8.12 mg/L,但到 5 m 以下,DO 突然降低,底层水的 DO 值低至 0.1 mg/L。研究表明,红枫湖通常在夏季和初秋出现分层现象,以温度、DO 明显的垂向分异为典型特征<sup>[11-13]</sup>。湖泊中溶解氧的分布动力学受到大气和光合作用引起的氧输入和由于化学和生物氧化作用造成的氧消耗之间的平衡所控制<sup>[12]</sup>。红枫湖南湖水体 DO 的最大值出现在温度最低的 3 月份。湖泊水中的生物活动也对溶解氧有一定的影响。水生植物的光合作用可以增加水体中溶解

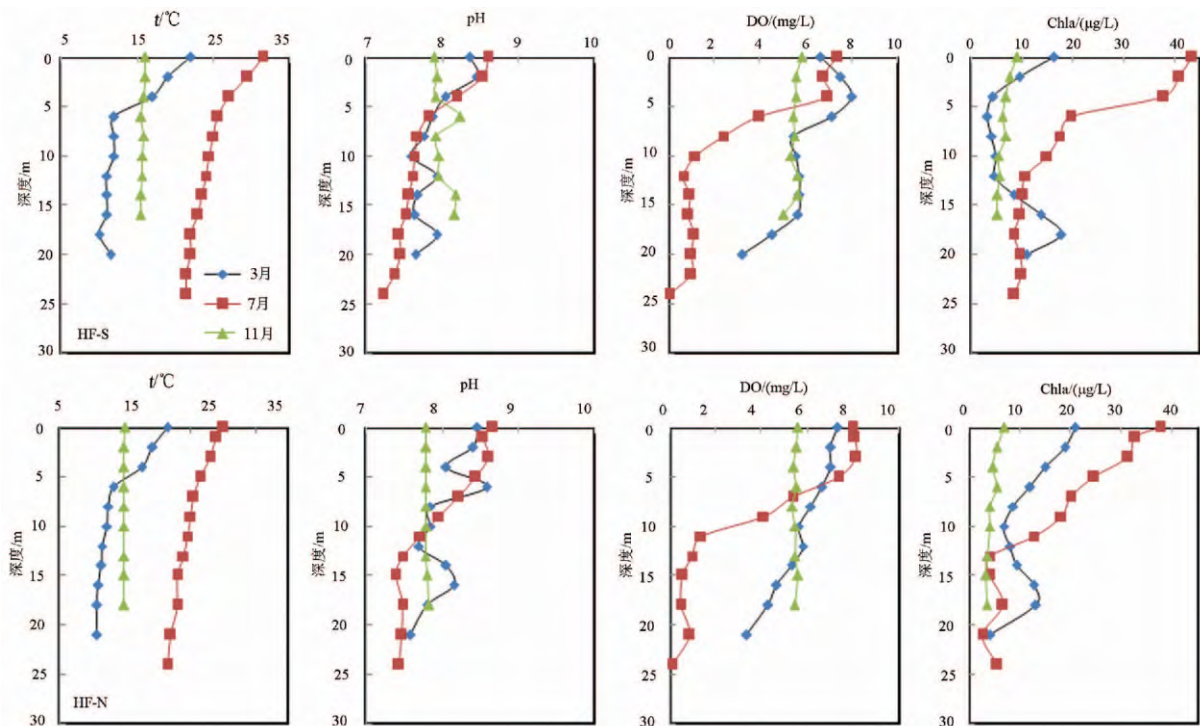


图 2 红枫湖南湖(HF-S)和北湖(HF-N)水体理化性质的时空变化

Fig.2 Temporal-spatial variation of water body physico-chemical properties in Lake Hongfeng



氧含量;而其它一些底栖生物活动(如呼吸作用、细菌分解有机质的呼吸作用)则要消耗水体中的溶解氧<sup>[7-9]</sup>。夏季北湖表层5 m内水体DO值最高,往下DO呈显著降低,就是很好的例证。

叶绿素a(chl a)与藻类现存量密切相关,是水体初级生产力的主要指标之一。通过对chl a的分析,可进一步了解藻类变化的规律<sup>[9]</sup>。夏季Chl a含量表现出与温度和溶解氧相似的分层现象,表层5 m内水体为19.6~43.4 μg/L,明显比底层水中的高。此外,在3月和7月的水体剖面中,底层Chl a含量有所增加,这主要是沉降下来的颗粒植物碎片,在搅动或再悬浮作用下重新进入水体所致<sup>[14]</sup>。11月,水体Chl a含量为4.7~9.2 μg/L,且剖面变化不大。

## 2.2 红枫湖水体中溶解态有机碳、氮和硅含量的分布变化

图3显示红枫湖水体中溶解性有机碳(DOC)的时空分布变化,水体DOC含量为1.60~3.16 mg/L,并随不同季节而改变。丰水期,上层水体DOC浓度较高,为2.14~3.16 mg/L,底层水体DOC含量在1.79~2.68 mg/L之间。平水期和枯水期,水体DOC含量略低,为1.60~2.67 mg/L,且垂向变化较小。已有研究表明,受流域外源输入和水体中生物活动的双重影响,分层期湖泊水体表层DOC的浓度通常比底层高<sup>[11-15]</sup>。湖泊DOC的外源输入主要通过降雨对土壤有机物的淋滤作用和少量的人为有机污染物从入湖河流中输入。内源输入包括

颗粒有机物的溶解作用、浮游植物的降解释放和细菌分解作用等所产生的DOC<sup>[12]</sup>。红枫湖所处流域为雨热同期的气候,每年的降雨集中在4~10月期间<sup>[11]</sup>。例如2008年的8~11月和2009年4~7月降雨量占全年的89.1%,月均降雨量最大值为8月,最低值出现在1月。因此,丰水期强降雨使得大量的土壤有机物通过淋滤作用进入水体。研究报道表明,红枫湖流域内土地垦殖率高,耕地面积高达40%,耕作土壤有机碳含量高达2.23%~3.01%,水土流失的环境风险不容忽视<sup>[16]</sup>。外源颗粒有机物在水中向下迁移时,也发生了分解作用,并向上层水体释放DOC,导致上层水体DOC含量显著高于下层。尽管降水对湖泊中的DOC具有一定的稀释作用,但是淋滤作用仍然占主导地位<sup>[12]</sup>。已有结果显示,化肥厂河作为北湖的入湖河流之一,其夏季河水DOC含量为11.4 mg/L,远高于北湖湖心表层水的DOC含量(3.0 mg/L),也高于湖泊下泄水-东门桥河DOC含量(9.0 mg/L),可见外源河流输入对水体DOC的潜在贡献<sup>[17]</sup>。此外,丰水期也是藻类生长最为旺盛的季节,红枫湖浮游植物功能群(22个),高于平水期(19个)和枯水期(16),且在枯水期和平水期以绿藻门丰度最高,丰水期则以蓝藻门为主<sup>[9]</sup>。由于红枫湖透明度较小,藻类的生长局限于上层水体,导致表层水体DOC含量增高。上述两种贡献究竟以哪种为主还有待进一步研究。对于平水期和枯水期,外源DOC的输入相对较少,水体上下混合也比较均匀,同时DOC的分解能力较

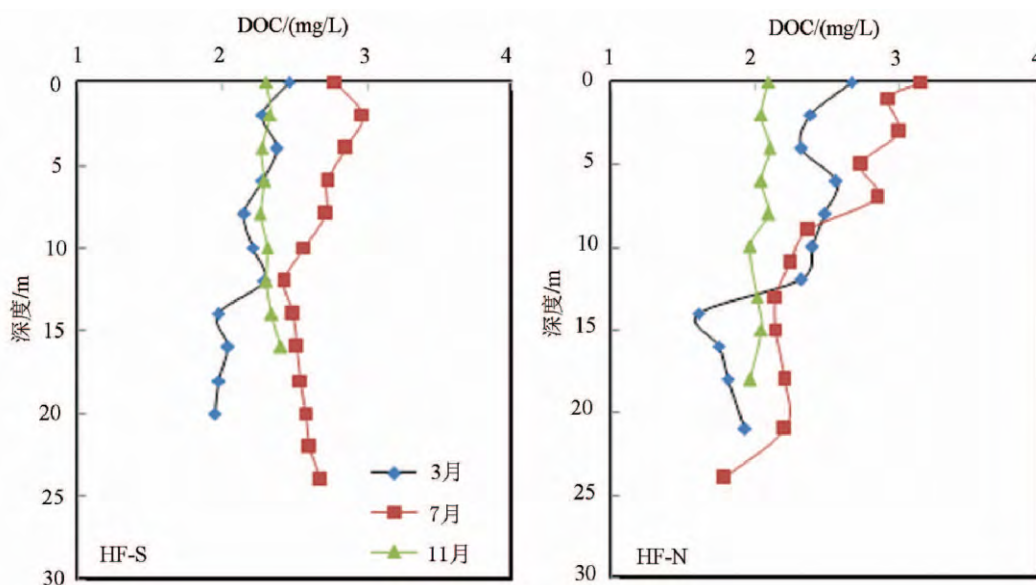


图3 红枫湖水体中溶解有机碳的变化特征

Fig.3 Distribution characteristics of DOC concentration in Lake Hongfeng

弱,DOC的含量随深度变化不大。

红枫湖水体的不同形态氮中, $\text{NO}_3^-$ -N占主要地位,约占TDN的23.3%~89.4%。在7月水体中的含量最高,在中上层水体达最大值(图4)。 $\text{NO}_2^-$ -N的最大浓度出现在7月底的湖水底层。南北湖心 $\text{NH}_4^+$ -N均呈现从上层向下层增大的趋势。由此看来,夏季湖水底层界面缺氧条件有利于 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的生成<sup>[18]</sup>。红枫湖DON占TDN的比例为7.0%~26.7%,3月和11月水体DON的相对比例更高一些,分别为8.7%~26.7%和10.7%~22.5%,这是由于天然水体中的DON主要由水体内部生物过程导致的有机质衰亡降解产物与沉积物的内源释放所产生<sup>[11]</sup>。

丰水期,由于水体底部的缺氧环境,使颗粒物发生分解而向水体中释放出溶解态硅,其含量明显增高。因此,夏季水体中溶解态硅的含量表现出随深度的增大而增加的趋势,而冬春季的含量较低且垂向变化不大(图5)。

### 2.3 红枫湖水环境质量周期性变化的耦合关系

已有研究表明,红枫湖呈单循环混合模式,水柱在5~9月呈现出显著的物理和化学分层<sup>[7,11,13]</sup>。由图2可见,随着气温的升高,7月水体上层和下层水温出现明显差异,温差可达 $10^\circ\text{C}$ 左右。丰水期水体DO的分层尤为显著,表层水体DO含量在7.4

mg/L以上,底层水的DO值甚至降至0.1 mg/L。湖泊中溶解氧含量的高低,不仅决定了水体中氧化还原电位等物理化学条件,而且极大地影响着营养盐的循环转化过程<sup>[5,7]</sup>。

表1为红枫湖南湖丰水期水体理化特征与碳氮硅含量的相关分析。除 $\text{NO}_3^-$ -N和DON外,水温、pH值和DO与Chl a、DOC、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N和溶解态Si呈显著正相关。如前所述,水温、pH值和DO等水体理化参数对浮游植物种群的演替变化具有重要作用,与Chl a和DOC的时空分布特征的相关性不言而喻。特别是对于红枫湖这样的深水性水库,由于水深较大,水生植物分布较少,浮游藻类光合作用是水体溶氧的主要来源,其组成与丰度对溶解氧分布影响最为显著。有研究表明,初级生产总量的5%~46%会以DOC的形式释放到水体中,在一些富营养化湖泊中已发现DOC与水体理化特征、Chl a含量等呈显著相关<sup>[15]</sup>。黎文等<sup>[11]</sup>在2003年夏季7、8月份,就观察到红枫湖Chl a含量与DOC浓度的季节变化有一定的同步性,表明藻类对表层水体DOC具有一定的贡献。此外,丰水期由于底层水处于缺氧条件,有机质降解的同时释放出无机营养盐,例如氮、磷和硅,使得这些营养盐的浓度随之升高。在湖泊生态系统中,氮循环受物理、化学因素以及生物过程所控制。其中, $\text{NH}_4^+$ -N是藻类以及

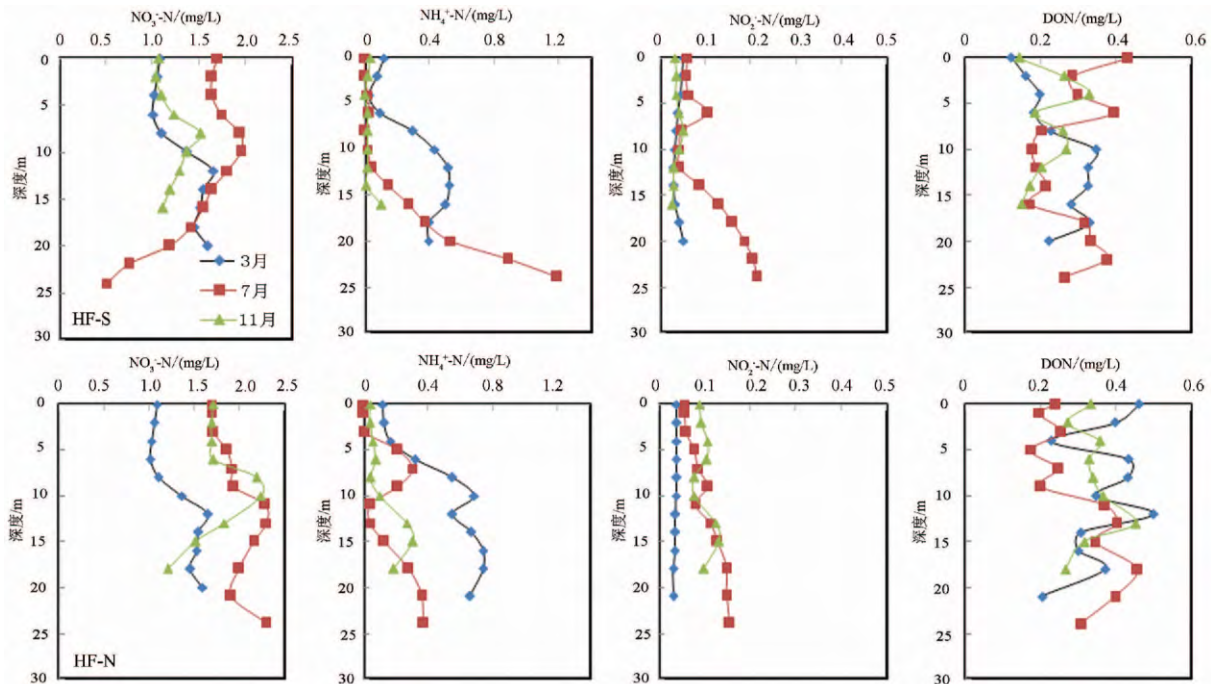


图4 红枫湖水体中不同形态氮的含量变化

Fig.4 Contents variation of different nitrogen forms in Lake Hongfeng

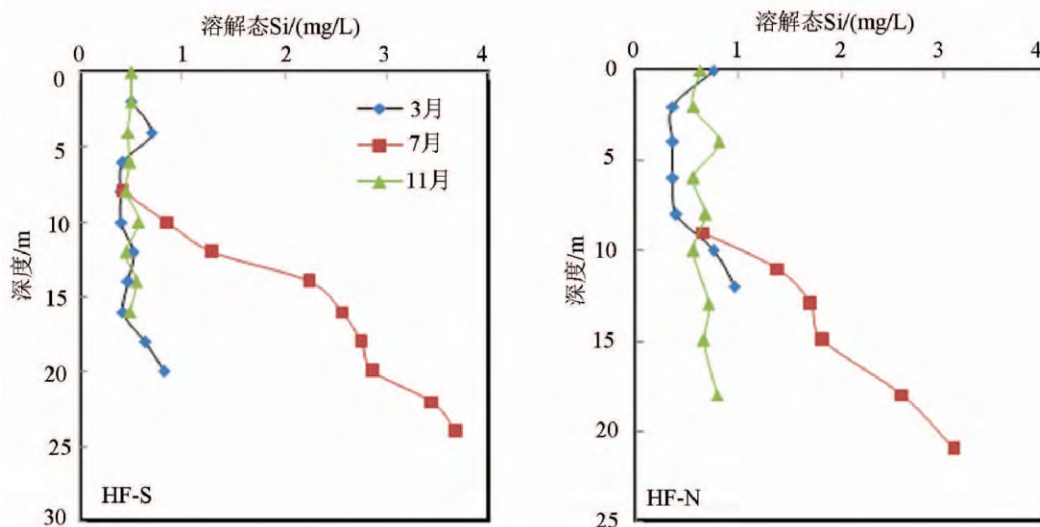


图5 红枫湖水体中溶解态硅的变化特征

Fig.5 Distribution characteristics of dissolved silicon concentration in Lake Hongfeng

表1 红枫湖南湖丰水期(2015年7月)  
水体理化特征与碳氮硅的相关性分析Table 1 Correlation between physicochemical characteristics  
of the overlying water and carbon, nitrogen and silicon  
in HF-S during flood season (July 2015)

项目	Chl a	DOC	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	DON	溶解态 Si
<i>t</i>	0.901**	0.506**	0.291	0.479**	0.442*	0.095	0.95**
pH	0.947**	0.563**	0.241	0.406*	0.414*	0.124	0.862**
DO	0.964**	0.72**	0.134	0.252	0.287	0.236	0.463*

注: 相关系数以  $R^2$  表示, \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ 。

水生植物等优先利用的氮形态,好氧的上覆水环境中硝化作用为主导,厌氧条件有利于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的生成<sup>[19]</sup>。黄国佳等<sup>[9]</sup>研究也表明,红枫湖浮游植物功能群结构的时空分布与总氮、总磷并不存在明显的相关性,但与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量显著相关。尽管湖泊水体中的 DON 与 DOC 来源类似,但能引起 DON 变化的生物化学过程比 DOC 更为复杂<sup>[11]</sup>,从图 4 中 DON 的垂向剖面变化趋势就可反映这一点。因此, DON 与水体理化特征没有显著的相关关系。总之,红枫湖水环境特征的周期性变化不仅造成了营养盐活性的季节性变化,而且调节着水生生物的繁殖与死亡。

对于像红枫湖这样存在季节性分层的西南山区深水性湖库,由于分层期底层滞水带处于缺氧或厌氧状态,加大了沉积物-水界面物质释放的风险危害,进而影响水环境质量<sup>[5-13]</sup>。近 20 年来,红枫湖

水库一直处于中富营养-富营养状态,突发性的水质恶化事件频发。研究表明,红枫湖的淤泥平均厚度约 31 cm,底泥总淤积量约为  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。全湖底泥样品有机碳、总磷和总氮的平均含量分别为 3.2%、0.31% 和 0.12%,蓄积总量约为 19 万吨、16 900 吨和 7 200 吨<sup>[20]</sup>。表层底泥中总磷含量均值大于 1500 mg/kg,且以活性态 Fe-P 和有机磷为主,生物有效磷比例为 11.2%~52.5%,其生物有效磷比例与太湖相近,远高于滇池<sup>[8-21]</sup>。每年夏末秋初,由于气温的骤降打破了水体原有的分层结构,水体发生垂直对流,下层富集的还原性物质及营养盐向上迁移,加剧了水体的缺氧程度,导致鱼虾等水生生物的死亡<sup>[5,7,13]</sup>。因此,在红枫湖这样的深水性人工湖库的污染控制中,要特别考虑水环境质量周期性变化的特殊规律,应该采取深水曝气、原位钝化与生态修复等综合措施。

### 3 结论

红枫湖水温、pH 值、溶解氧和 Chl a 在枯水期和平水期上下层变幅较小,而在夏季丰水期水深 6 m 左右出现明显的分层现象,以溶解氧最为典型。丰水期湖泊中 DOC 含量都比平水期和枯水期的要高,底层界面缺氧条件有利于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的生成,也导致溶解态硅的含量增高。水环境的这种周期性变化,不仅造成了营养盐活性的季节性变化,而且调节着水生生物的演替过程。

## 参 考 文 献

- [1] 贵州省水利厅. 2013 贵州省年水资源公报 [R]. 贵阳: 贵州省水资源公报编辑部 2013: 28.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Wu F C, Qing H R, Wan G J, *et al.* Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from Southwestern China Plateau [J]. Water Research, 2001, 35(5): 1334-1337.
- [5] 万国江, 万恩源, 陈敬安, 等. 深水人工湖环境生物地球化学过程研究: 以贵州红枫湖-百花湖为例 [J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 262-270.
- [6] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2008, 152(2): 366-372.
- [7] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1477-1485.
- [8] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 789-796.
- [9] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5573-5584.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 255-274.
- [11] 黎文, 吴丰昌, 傅平青, 等. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化 [J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1979-1985.
- [12] 岳兰秀. 红枫湖、百花湖水中溶解有机物分子量分布特征及环境地球化学意义 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- [13] Wang J F, Chen J A, Ding S M, *et al.* Effects of seasonal hypoxia on the release of phosphorus from sediments in deep-water ecosystem: A case study in Hongfeng Reservoir, Southwest China [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 858-865.
- [14] 商立海, 李秋华, 邱华北, 等. 贵州红枫湖水体叶绿素 a 的分布与磷循环 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 1023-1030.
- [15] Sugiyama Y, Anegawa A, Kumagai T, *et al.* Distribution of dissolved organic carbon in lakes of different trophic types [J]. Limnology, 2004, 5(3): 165-176.
- [16] 张润宇, 王立英, 陈敬安. 红枫湖流域枯水期土壤理化特征与磷素分异研究 [J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 719-725.
- [17] 黎文, 吴丰昌, 王静, 等. 河流-湖泊系统中溶解有机质的示踪及迁移 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(2): 133-139.
- [18] 肖化云, 刘丛强. 湖泊外源氮输入与内源氮释放辨析 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(6): 576-582.
- [19] 张亚平, 万宇, 聂青, 等. 湖泊水体中氮的生物地球化学过程及其生态学意义 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, 52(1): 5-15.
- [20] 陈敬安, 张维, 张润宇, 等. 红枫湖底泥污染物空间分布特征 [C]. 第十三届世界湖泊大会论文集 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 1070-1076.
- [21] 刘超, 朱淮武, 王立英, 等. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(4): 1073-1079.

## Physicochemical Characteristics of the Overlying Water and Spatial-temporal Distribution of Carbon, Nitrogen and Silicon in Lake Hongfeng, Guizhou Province, China

WANG Liying, ZHANG Runyu, CHEN Jingan

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Lake Hongfeng in Guizhou Province was selected as the research object. Physicochemical characteristics of the overlying water and the spatial-temporal distribution of carbon, nitrogen and silicon during different hydro-periods were investigated, in order to reveal the periodic change of water environmental quality in southwestern mountainous deep-water lake and reservoir. Results show that water temperature, pH value, dissolved oxygen and Chl-a exhibit seasonal variations in Lake Hongfeng, with lower vertical amplitude during level and dry periods than flood seasons. Stratification obviously exists at about 6 m depth in flood season. Dissolved oxygen in the bottom water layer was lower than 1 mg/L. Concentration of DOC in the lake water was elevated during flood season, owing to the large amount of exogenous organic matter input and algal growth.  $\text{NO}_3^-$ -N and DON account for 23.3%~89.4%, 7.4%~26.7%, respectively. The anoxic condition in hypolimnion is favorable to the formation of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_2^-$ -N in summer, while leads to the increase of dissolved silicon. The correlation analysis shows that the seasonal deterioration events of water quality in the deep-water lakes and reservoirs, Guizhou plateau are closely related to the instable structure of water stratification layer in summer and autumn.

**Key words:** Lake Hongfeng; physicochemical characteristics; carbon nitrogen silicon; water stratification; plateau deep-water lake and reservoir