

## 喀斯特地区供水水库营养演化历史重建

盛恩国<sup>1,2,3</sup>, 刘斌<sup>1\*</sup>, 张忠义<sup>4</sup>, 彭海军<sup>2</sup>, 赵晶晶<sup>2</sup>, 蓝江湖<sup>3</sup> (1. 遵义师范学院资源与环境学院, 贵州 遵义 563002; 2. 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, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 4. 东华理工大学, 江西省大气污染成因与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 利用<sup>210</sup>Pb-<sup>137</sup>Cs年代学方法,结合洪水事件沉积层,综合建立了红枫湖沉积岩芯准确的年代学模型.在此基础上,通过测定沉积物多种地球化学指标(LOI、TOC、TN、C/N比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、BSi),结合历史文献记录和已有的水质监测数据,重建了1960~2016年红枫湖营养状态变化历史.结果表明,建库以来红枫湖水体经历了多次营养状态的显著转换.其中,1991年开始水体逐渐从中营养转向富营养化状态,主要是人类活动引起的内、外源营养物质输入显著增加所致,特别是网箱养鱼活动可能起到重要作用;2000年开始,水体逐渐转向中营养化,主要是一系列保护和治理措施的实施;2004年开始,水体再次逐渐恶化,转向富营养化状态,主要是外源污染物输入增加,加上内源底泥营养物质的重新释放;2009年以来,水质逐渐改善,处于中营养化状态,主要是外源污染得到有效控制,但表层营养物质含量较高,现阶段在减少外源污染物输入的同时,应重点加强底泥污染物的治理工作.

**关键词:** 富营养化; 水库沉积物; 古湖泊学; 人为活动

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)12-5403-10

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0597

**Reconstruction of trophic state changes in a karst water-supply reservoir.** SHENG En-guo<sup>1,2,3</sup>, LIU Bin<sup>1\*</sup>, ZHANG Zhong-yi<sup>4</sup>, PENG Hai-jun<sup>2</sup>, ZHAO Jing-jing<sup>2</sup>, LAN Jiang-hu<sup>3</sup> (1.Resource and Environmental College, Zunyi Normal University, Zunyi 563002, China; 2.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 4.Province Key Laboratory of the Causes and Control of Atmospheric Pollution, East China University of Technology, Nanchang 330013, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5403~5412

**Abstract:** Based on <sup>210</sup>Pb-<sup>137</sup>Cs dating and historical flood event records, we established an accurate chronology of a lake sediment core taken from the center of South Lake, the south part of Lake Hongfeng. On the basis of this chronology, the variations in the trophic status of Lake Hongfeng from 1960 to 2016AD were reconstructed by a comprehensive analysis of geochemical measurements (e.g. loss on ignition (LOI), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), C/N ratio, stable carbon isotope of organic material ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ), and biological silicon (BSi)), water quality parameters, and reference data. During the analyzed period, several significant changes in primary productivity and trophic status were identified. From 1991 to 1999, the trophic status had gradually evolved to eutrophication and primary productivity had been increasing consistently, this was caused by enhanced anthropogenic nutrients inputs, especially cage fish culture, which might have played an important role in this eutrophication. From 2000 to 2003, due to the implementation of a series of protection and regulation policies, the trophic status had gradually changed to mesotrophic and primary productivity was decreasing gradually. From 2004 to 2008, the trophic status reversed to eutrophication, which corresponds to the increasing of exogenous nutrients input and re-emission of deposited nutrients. Since 2009, Lake Hongfeng had been mesotropher after much stricter water quality control policies had been implemented. Though water quality had been improved significantly, the nutrients content was still on a relatively high level due to the consistent re-emission, which demonstrated that future treatment should not only focus on the reduction of exogenous pollutants, but also the containment of the endogenous sediments.

**Key words:** eutrophication; reservoir sediment; paleolimnology; human activity

水库作为居民重要的饮用水源地,其富营养化问题较为严重<sup>[1]</sup>.重建水库长期营养状态变化历史及其驱动因素,对于受人类活动影响显著的富营养化水库来说至关重要,能够为控制富营养化和生态恢复治理提供重要的参考.

目前,水库缺乏长期的水质监测数据,无法建立

长期营养状态变化历史.古湖泊学方法,作为一种有效的工具,已经广泛地应用在湖泊沉积物研究中,用

收稿日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41702190);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2019]113);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1517)

\* 责任作者, 副教授, wenbing1215@163.com

来重建水体初级生产力和营养状态变化历史<sup>[2-3]</sup>,但较少地应用于水库沉积物研究中<sup>[4-8]</sup>。相较于自然湖泊,1)水库水动力条件和湖盆构造特征复杂,加之受人类活动影响较大,其沉积物可能受到扰动;2)水库形成时间较短,传统的自然湖泊定年方法(如<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs)无法较好地应用在水库沉积物中,沉积物年代具有较大不确定性<sup>[9-10]</sup>;3)水库系统相对复杂以及人类活动影响显著,水库沉积物营养指标(如有机质碳、氮同位素等)明显地表现出不同于自然湖泊的变化特征,其原因非常复杂<sup>[4,11]</sup>。这些因素限制了古湖泊学方法在水库沉积物研究中的应用。

本论文选择红枫湖沉积岩芯为研究对象,利用古湖泊学方法,通过<sup>210</sup>Pb-<sup>137</sup>Cs年代学测定方法,结合洪水事件沉积层,综合建立沉积岩芯准确的年代学序列;在良好的年代学模型基础上,通过测定沉积岩芯多种地球化学指标,包括烧失量(LOI)、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、TOC/TN比值、有机质碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )、生物硅(BSi)含量,结合历史文献记录和已有的水质监测数据,重建红枫湖建库以来初级生产力和营养状态演化历史,探讨自然因素和人为活动对湖泊营养变化的驱动机制,为红枫湖富营养化控制提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

红枫湖水库位于贵州高原中部清镇市、安顺市平坝区境内,处于乌江支流猫跳河上游,是猫跳河梯级水电站的第一级水库,具有供水、灌溉、发电、养殖、旅游等多种功能。红枫湖水库于1960年竣工蓄水发电,蓄水水位高程最高达到1240m,正常水位高程为1230m,最大水深约45m,平均水深约20m,正常水位时水域面积57.2km<sup>2</sup>,流域面积1570km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。红枫湖水库总库容为7.53亿m<sup>3</sup>,年均蓄水量为3.86亿m<sup>3</sup>,红枫湖补给系数大,为27.9,年平均水体滞留时间为271d(贵州省2017年水资源公报)。

红枫湖水库为狭长的河流形态,主要由3部分组成:北湖、南湖和后湖。湖水补给主要靠河流入流和水域降水。如图1所示,入湖河流主要包括麦包河、桃花源河、羊昌河、麻线河、后六河,其中,羊昌河为入库河流中径流量最大的河流,是水库水体最主要的补给来源。水库经大坝下泄进入猫跳河,最终汇

入乌江。红枫湖流域为典型的喀斯特岩溶地貌,流域内碳酸盐岩主要为三叠系白云岩和石灰岩,湖水水化学基本组成表现为典型的碳酸盐侵蚀特征<sup>[13]</sup>。红枫湖水库为典型的高原深水型单循环水库,每年5~9月湖水出现分层现象,9月下旬分层现象消失,9月到第二年4月,水体混合呈完全循环状态<sup>[14]</sup>。

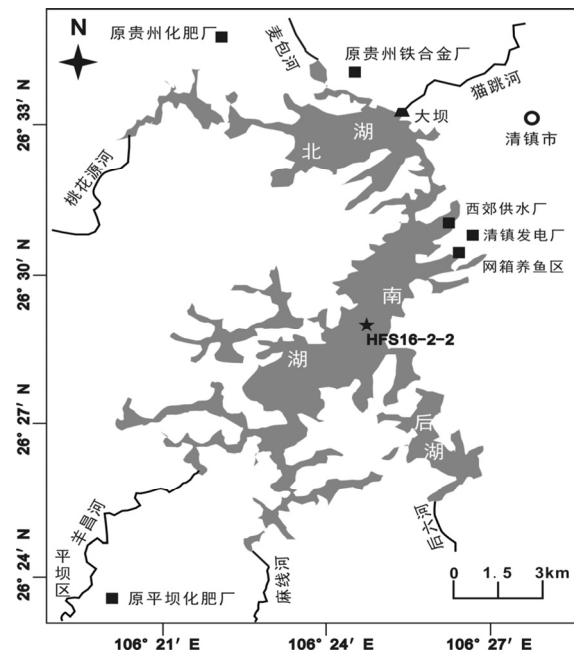


图1 红枫湖流域概况和采样点位

Fig.1 Schematic map showing the sampling sites and watershed of Lake Hongfeng

红枫湖流域属于亚热带季风性气候。夏季主要受印度夏季风和东亚夏季风共同影响,冬季主要受西风南支急流影响。据1960~2017年清镇气象站气象资料数据(来源于中国气象数据网)表明,研究区年平均气温14.3℃,7月平均气温为22.7℃,1月平均气温为4.1℃,年平均降水1171.3mm,降水季节性明显,主要集中在5~10月,降水量通常占全年降水量的近80%,并多以阵雨、暴雨形式出现,极易造成土壤流失。

### 1.2 样品采集

2016年10月~11月,利用奥地利UWITEC公司生产的重力采样器,在红枫湖水库南湖湖心点位(水深18m;26.4828°N,106.4116°E;点位编号为HFS16-2;图1)采集了2根保持完好的平行沉积柱状岩芯(岩芯柱编号分别为HFS16-2-1和HFS16-2-2)。岩芯水-沉积物界面清晰无扰动,平行沉积岩芯表现(肉眼

观察)岩性对应良好.红枫湖南湖湖心水动力条件相对稳定,湖底地形相对平整,因此本文主要选取南湖湖心沉积岩芯 HFS16-2-2(长度为 74cm)进行研究.岩芯现场按 1cm 间隔连续分样,样品放入聚乙烯样品袋中,迅速带回实验室冷冻保存,经冷冻干燥机处理后备用.

### 1.3 测定方法

**1.3.1 沉积岩芯  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  测定** 沉积物  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  比活度测量在中国科学院地球环境研究所进行,测量仪器为美国 ORTEC 公司生产的高纯锗井型探测器(GWL-250-15),样品测量时间为 12h.测量样品前处理方法:将冷冻干燥后的样品去除植物残体和砾石,研磨装入 5mL 离心管中上机测试,分析 HFS16-2-2 沉积岩芯 74cm 样品.

**1.3.2 地球化学指标测定** 粒度测定:沉积物(1cm 间隔)用 30%的  $\text{H}_2\text{O}_2$  去除有机质,用 10%的盐酸去除碳酸盐,然后用 Malvern Mastersizer-2000 激光粒度仪测定粒度,测量粒径范围为 0.02~2000 $\mu\text{m}$ ,重复测量误差<3%,主要包括以下参数:平均粒径、中值粒径、粘土含量(<4 $\mu\text{m}$ )、粉砂含量(4~64 $\mu\text{m}$ )、砂含量(64~2000 $\mu\text{m}$ ).测试工作在中国科学院地球环境研究所测定.

沉积物 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  测定步骤如下:称取适量已研磨的干样品,加入过量 1mol/L 盐酸以去除碳酸盐,4000r/min 离心并用蒸馏水洗至中性,置于烘箱中烘干并研磨;称取适量研磨过的样品于锡舟中,利用元素分析仪(vario EL III)测试总有机碳含量(TOC)、总氮含量(TN),通过计算获得 TOC/TN 物质的量比值(以 C/N 比表示),利用 EA-IRMS 测定  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,测量误差<0.2%,测试工作在东华理工大学江西省大气污染成因与控制重点实验室测定.

烧失量测定具体步骤如下:称取适量干样,放入马弗炉中于 550 $^{\circ}\text{C}$  燃烧 4h,冷却后称重,通过燃烧前后重量差获得 550 $^{\circ}\text{C}$  的烧失量(LOI),用来表征有机质含量.生物硅(BSi)含量测定参照 Liu 等<sup>[15]</sup>的方法,利用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  碱溶-硅钼蓝比色法测定吸光度,计算获得生物硅含量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积岩芯地球化学指标

红枫湖南湖湖心沉积岩芯 HFS16-2-2 肉眼可

见分成 3 层:建坝前棕黄色土壤层(74~70cm)、建坝蓄水后灰色湖泊沉积层(70~39cm)、上部黑色富含有机质湖相沉积层(39~0cm).

如图 2 所示,HFS16-2-2 沉积岩芯 TOC、TN、LOI 含量随着岩芯深度减小总体上呈现逐渐增加的趋势.沉积岩芯 TOC 含量范围为 1.96%~5.21%,平均值为 3.34%;TN 含量范围为 0.23%~0.78%,平均值为 0.39%;LOI 含量范围为 9.36%~15.23%,平均值为 12.29%.TOC 和 TN 含量相关性较好( $r=0.88$ ,  $P<0.05$ ),指示了红枫湖沉积岩芯 TN 主要以有机氮为主.TOC/TN 比值随着岩芯深度减小,总体上呈现先增加后减小的趋势.C/N 比值平均值为 10.22,范围为 7.45~12.75.沉积岩芯  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值随着沉积深度减小总体上呈现出逐渐减小的趋势.沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值范围为 -30.32‰~-25.41‰,平均值为 -26.62‰.BSi 含量随着沉积岩芯深度减小,总体上呈现逐渐增加的趋势.BSi 含量平均值为 1.31%,变化范围为 0.47%~2.37%.

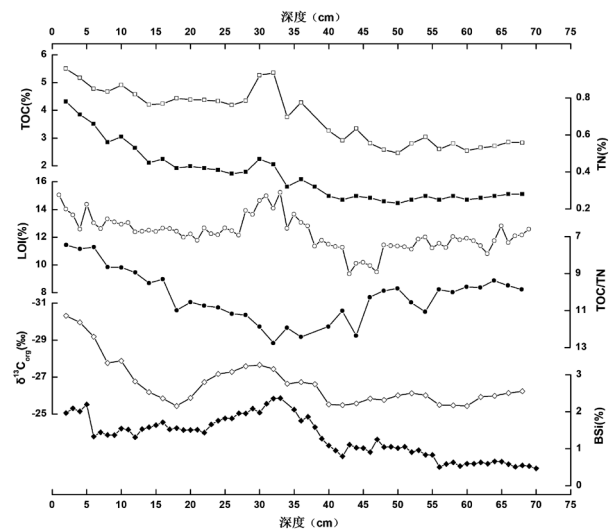


图 2 红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 有机代用指标-深度序列  
Fig.2 The sequence of the organic proxies-depth for the HFS16-2-2core

### 2.2 基于降水侵蚀力、粒度和 $^{137}\text{Cs}$ 的沉积岩芯综合年代学模型

从 HFS16-2-2 沉积岩芯岩性观察来看,70cm 处大致为建坝事件层(棕黄色河漫滩/土壤沉积物向灰黄色湖泊沉积物过渡的沉积层).由此推测 70cm 沉积层的沉积年代为建坝蓄水年代(1960 年).如图 3 所示,红枫湖沉积岩芯  $^{137}\text{Cs}$  比活度序列呈现出经典的

大气  $^{137}\text{Cs}$  沉降特征,质量深度  $20.005\text{g}/\text{cm}^2$ (几何深度  $68\text{cm}$ )处出现  $^{137}\text{Cs}$  的峰值,对应1963年.沉积岩芯  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度呈现出一定的指数衰减模式( $R^2=0.67$ ,  $P<0.05$ )(图3).基于此,给出基于  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度变化的3种模式(CFCS、CIC和CRS)沉积岩芯年代(图4).这3种模式给出的年代具有一定差异,与  $^{137}\text{Cs}$  年代(1963年)和建坝事件层(1960年)差异较大.如图5所示,红枫湖沉积岩芯  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度序列呈现出与有机指标(LOI、TOC、TN、BSi)一致的变化特征,其中20~40cm段  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度出现明显的富集,这可能受到浮游藻类生产力急剧增加,吸附作用加强的影响,因而,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  年代学方法无法较好地直接应用,这在其他富营养化湖泊/水库中也得到了印证<sup>[16-18]</sup>.

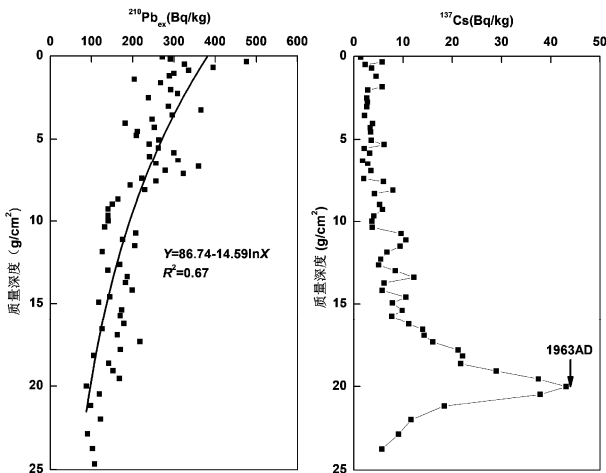


图3 红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  和  $^{137}\text{Cs}$  比活度序列

Fig.3 The sequence of the radioactivities of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the HFS16-2-2 core

由于南湖湖心距离大坝和河口较远,水动力条件较为稳定,一定程度上可以避免大坝下泄和河流冲刷产生的影响,因此,假定建坝以来红枫湖南湖湖

心沉积物质量堆积速率相对稳定.利用1963年  $^{137}\text{Cs}$  峰值沉积层和采样沉积层(2016年),采用线性内插方法,给出了红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 的年代学序列,由此推出1963~2016年沉积物质量堆积速率为  $0.37\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$ ,平均几何沉积速率为  $1.26\text{cm}/\text{a}$ .利用此年代序列外推70cm沉积层年代为1960年,与建坝蓄水事件沉积层(1960年)一致,一定程度上支持了  $^{137}\text{Cs}$  年代学模型.

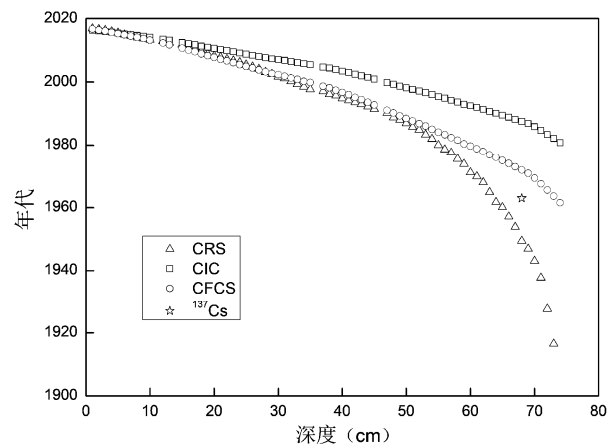
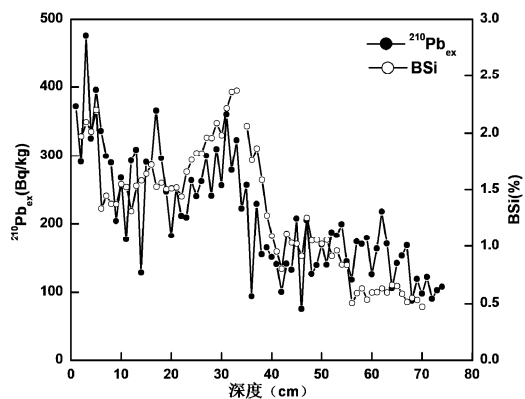
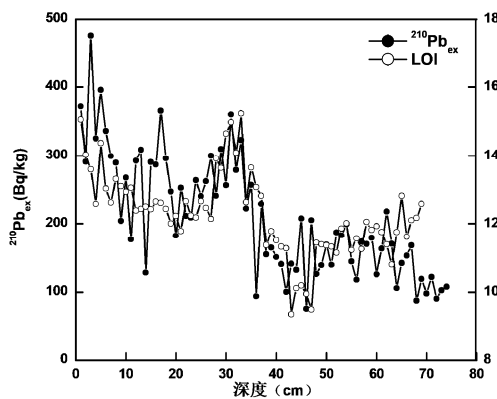


图4 红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 基于4种定年模式的年代学序列

Fig.4 Age model for the HFS16-2-2 core based on  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radioactivities

许多研究<sup>[19-22]</sup>表明,降水是控制流域土壤侵蚀、泥沙传输和水库淤积的重要气候因素,侵蚀力高的强降水通常具有相对高的土壤侵蚀速率和泥沙传输能力.强降水引起的洪水事件,通常造成湖泊、水库、洪泛平原沉积剖面中出现粗颗粒沉积层<sup>[22-23]</sup>.因而,沉积剖面中粗颗粒地层的出现,通常与洪水事件相关,可作为年代标志层,用来补充传统的铅钍定年方法.



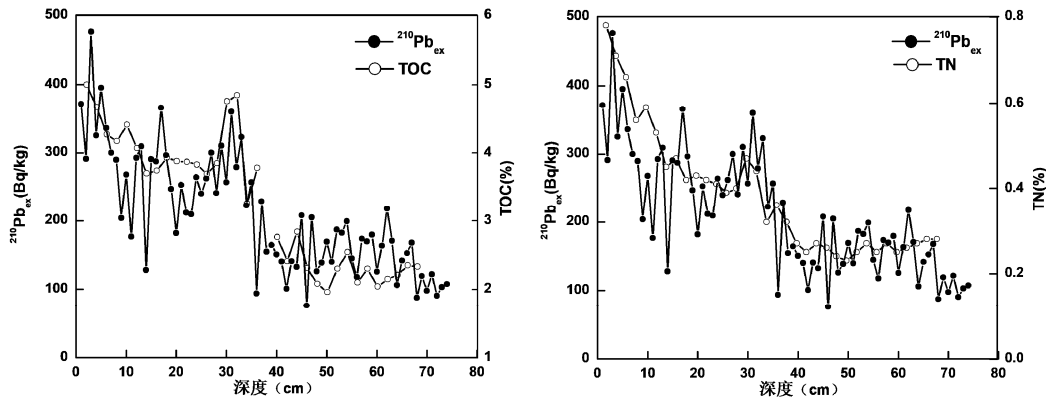


图5 红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  序列与有机指标对比

Fig.5 The comparison between  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  radioactivity and organic proxies from HFS16-2 core

为了更好地验证并校正年代模型,引入了降水侵蚀力参数.相对于传统的降水量参数,降水侵蚀力指标能够更好地表征降水对土壤侵蚀的潜在作用能力和泥沙传输能力<sup>[23-24]</sup>.采用章文波等<sup>[25]</sup>建立的降水侵蚀力模型,这一模型主要基于日降雨量数据.如图 6d 所示,基于 1960~2016 年清镇日降水量数据计算出红枫湖流域降水侵蚀力序列.同时,根据红枫湖流域平坝区和清镇市历史文献资料,发现 1960~2016 年红枫湖流域出现过 6 次强降水引起的洪水事件,分别对应 1963 年、1977 年、1991 年、1996 年、2008 年、2014 年.通过对比发现,这 6 次洪水事件在降水侵蚀力序列中得到了很好地验证,即洪水事件对应降水侵蚀力高值,其中 2014 年特大洪水事件在降水侵蚀力序列中得到了显著体现.

降水侵蚀力能够表征降水对土壤的侵蚀和泥沙传输能力,反映在水库沉积剖面中,沉积层粒度会变粗,粒径变大.红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 粒度测定结果表明,沉积物主要由粘土和粉砂组成.如图 6 所示,将基于  $^{137}\text{Cs}$  年表的沉积物粒度序列和经计算获得的降水侵蚀力序列对比发现,沉积物粉砂含量、中值粒径、粘土含量序列与降水侵蚀力在年际尺度上呈现非常好的一致性.从图 6 中可以看到,降水侵蚀力的峰值正好对应于沉积物粉砂含量、中值粒径的峰值,以及粘土含量的谷值;反之,降水侵蚀力的谷值对应于粉砂含量、中值粒径的谷值,以及粘土含量的峰值.历史文献资料记录的 1960~2016 年 6 次洪水事件在沉积岩芯粒度指标中得到了良好记录(图 6),这进一步表明,强降水时段,降雨对土壤的侵蚀能力加强,泥沙传输能力加强,造成沉积物粒径变大,颗粒变粗.

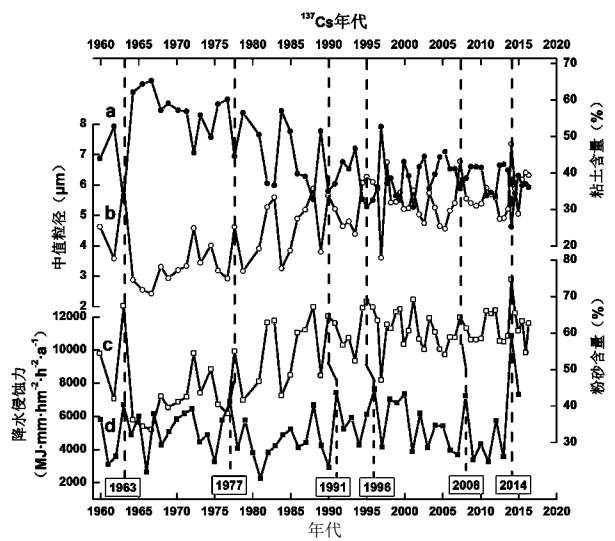


图6 基于  $^{137}\text{Cs}$  年表的沉积岩芯粒度指标与流域降水侵蚀力序列对比

Fig.6 The comparison between grain size index from HFS16-2 core and rainfall erosivity in the watershed  
a-c 分别为基于  $^{137}\text{Cs}$  年代的 HFS16-2 沉积岩芯粘土含量、中值粒径和粉砂含量序列;d 为 1960~2016 年红枫湖流域降水侵蚀力序列

综合以上分析,利用建坝事件沉积层(1960 年)、 $^{137}\text{Cs}$  峰值层(1963 年)、6 次洪水事件沉积层(1963 年、1977 年、1991 年、1996 年、2008 年、2014 年)、以及采样沉积层(2016 年),综合构建了红枫湖南湖心沉积岩芯 HFS16-2-2 的年代学模型.

### 2.3 红枫湖沉积岩芯记录的营养状态变化历史及其驱动因素

湖泊沉积物 TOC、TN 含量常用来反演湖泊初级生产力变化,进而推断湖泊营养状态变化,而沉积物 TOC/TN 比值常用来辨别沉积物有机质来源<sup>[26-27]</sup>.通常陆生维管束植物富含纤维素,贫乏蛋白质,即富集碳,贫乏氮,其 TOC/TN 比值通常 >20;而湖泊内生

浮游藻类富含蛋白质,缺乏纤维素,其 C/N 比值通常位于 4~10.因此,常用沉积物 C/N 比值辨别沉积物有机质来源.

沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  能够用来指示有机质来源和湖泊初级生产力<sup>[28-29]</sup>.陆地  $\text{C}_3$  植物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值为  $-22\sim-33\text{‰}$ ,平均值为  $-27\text{‰}$ ;陆源  $\text{C}_4$  植物因其光合作用碳同化途径方式不同,其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  明显高于陆地  $\text{C}_3$  植物,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值为  $-19\text{‰}\sim-9\text{‰}$ ,平均值为  $-14\text{‰}$ ;浮游植物通常利用与大气  $\text{CO}_2$  相平衡的水体溶解  $\text{CO}_2$  作为碳源,其  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值类似于陆地  $\text{C}_3$  植物.通常来说,湖泊初级生产力和沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  之间存在着正相关关系,这种关系的机理是浮游藻类通过光合作用优先吸收  $^{12}\text{C}$ ,造成上层水体剩余溶解无机碳(DIC)储库相对富集  $^{13}\text{C}$ ,随着生产力的增加,新产生的藻类  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  增加,最终造成沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  增加<sup>[29]</sup>.

沉积物生物硅含量常用来推断湖泊初级生产力变化<sup>[15,30]</sup>.沉积物生物硅主要来源于硅藻等硅质生物,而湖泊硅质生物主要由硅藻组成,因此,通过测定沉积物生物硅含量,可用来重建湖泊硅藻生产力变化及其相关的营养盐输入多寡.

通过对红枫湖沉积岩芯 HFS16-2-2 地球化学指标(图 7a~f)进行综合分析,结合历史文献记录和已有的水质监测数据(图 7g~i),重建了红枫湖建坝(1960 年)以来初级生产力和营养状态变化历史.同时结合流域社会经济参数和降水侵蚀力参数,进行了驱动因素探讨(图 8),主要分为以下几个阶段:

I 阶段(1960~1975 年):湖泊初级生产力较低,处于贫-中营养状态.此阶段沉积物 TOC、TN、BSi 含量均处于最低值,指示了水库初级生产力较低,营养水平较低,可能为贫-中营养水体.TOC/TN 比值平均值为 9.7,小于 10.此阶段  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  处于最高值阶段,平均值为  $-25.8\text{‰}$ ,范围为  $-26.2\text{‰}\sim-25.4\text{‰}$ .Wang 等<sup>[38-40]</sup>通过对红枫湖流域入湖河流、水库出水、湖水和泉水各种形态碳(溶解有机碳(DOC)、溶解无机碳(DIC)、颗粒态有机碳(POC))进行研究表明,河流水体 POC 主要来源为陆源有机质,其  $\delta^{13}\text{C}$  值  $>-26\text{‰}$ ,湖泊水体 POC 主要来源为内源有机质,陆源有机质仅占湖泊 POC 来源的 3%,湖泊 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值范围为  $-26\sim-33\text{‰}$ .结合已有的陆源和内源端元  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  数据和水库演化特征,推断水库早期阶段,沉积物有机质来源为内源浮游藻类和陆源有机质的混合.综合

这些指标共同表明,此阶段水库初级生产力较低,水体为贫-中营养状态,主要受自然因素影响,人类活动对水质变化的影响相对较小.

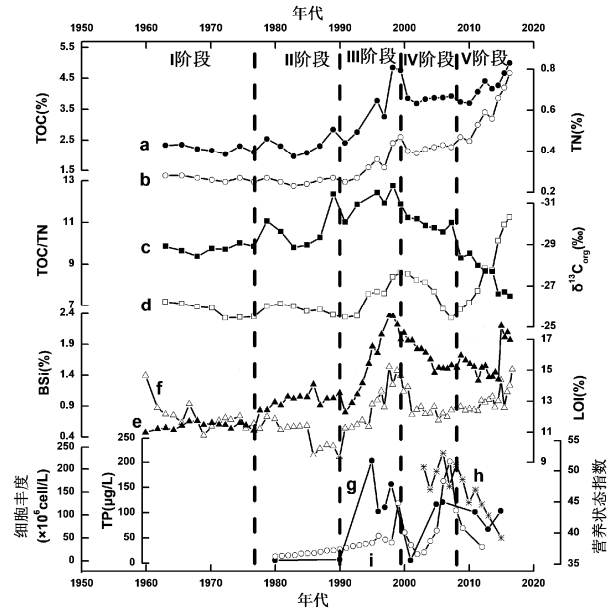


图7 HFS16-2-2 沉积岩芯指标和红枫湖水质参数对比  
Fig. 7 The comparison between organic proxies and water quality index at Lake Hongfeng

a 为 HFS16-2-2 岩芯 TOC 含量序列;b 为 HFS16-2-2 岩芯 TN 含量序列;c 为 HFS16-2-2 岩芯 TOC/TN 比值序列;d 为 HFS16-2-2 岩芯有机质  $\delta^{13}\text{C}$  序列;e 为 HFS16-2-2 岩芯 BSi 含量序列;f 为 HFS16-2-2 岩芯有机质含量序列;g 为 1980~2015 年红枫湖夏季浮游藻类细胞丰度<sup>[31-33]</sup>;h 为红枫湖综合营养状态指数<sup>[34-36]</sup>;i 为 1980~2015 年红枫湖水体总磷含量<sup>[34,36-37]</sup>

II 阶段(1976~1990 年):湖泊初级生产力略有增加,营养水平仍然较低,为中营养状态.此阶段沉积物 TOC、BSi、C/N 比值较前一阶段增加,指示了水库初级生产力逐渐增加.C/N 比值平均值为 10.7,变化范围为  $9.8\sim12.4$ . $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值较前一阶段变化不大,指示了此时期有机质来源仍然主要为浮游藻类和陆源有机质的混合.水体浮游藻类观测数据表明,此时期夏季浮游藻类处于稀少平稳期,藻类数量较少,相对稳定,且水体中存在如黄丝藻等不耐污指示藻类<sup>[31]</sup>(图 7g).此时期降水侵蚀力整体较前一阶段偏低(图 8h),因而水库初级生产力的增加,主要是由于人类活动产生的营养物质输入增加所致.20 世纪 70 年代以来,红枫湖流域很多化工、机械、煤矿等企业建成投产,包括贵州化肥厂、清镇纺织厂、贵州铁合金厂、贵州有机化工厂、清镇发电厂等,随着这些工厂的投

入使用,含 N、P 的废水直接排放进入红枫湖水体,加上流域土地利用方式的改变,农田面积增加,农业生产活动增加(图 8e~g),导致营养物质输入增加,这些人为因素造成了水库初级生产力增加。

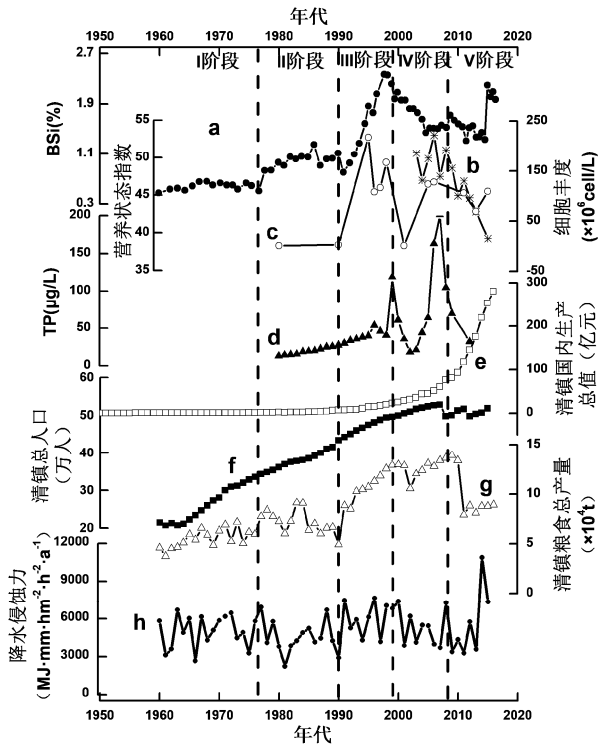


图 8 HFS16-2-2 沉积岩芯有机指标和水质参数、社会经济参数、降水参数对比

Fig.8 Comparisons among organic proxies, water quality index, economic index and rainfall erosivity

a 为 HFS16-2-2 岩芯 BSi 含量序列;b 为红枫湖综合营养状态指数<sup>[34-36]</sup>; c 为 1980~2015 年红枫湖夏季浮游藻类细胞丰度<sup>[31-33]</sup>;d 为 1980~2015 年红枫湖水体总磷含量<sup>[34,36-37]</sup>;e~g 分别为清镇市国内生产总值、总人口数量、粮食总产量(来源于清镇市统计年鉴);h 为红枫湖流域降水侵蚀力序列

III 阶段(1991~1999 年):湖泊初级生产力显著增加,水体由中营养状态逐渐转向富营养化状态.1991 年开始,TOC、TN、BSi、C/N 比值显著增加,指示了湖泊生产力显著增加,营养水平明显提高.此阶段 C/N 比值平均值为 12.2,范围为 11.9~12.8. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值逐渐减小,从 $-25.49\%$ 逐渐减小到 $-27.66\%$ ,这和预期的结果不一致,传统理论认为浮游藻类光合作用优先吸收  $^{12}\text{C}$ ,导致剩余的 DIC 库富集  $^{13}\text{C}$ ,随着初级生产力的增加,浮游藻类  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值逐渐增加,进而造成沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值增加<sup>[29]</sup>.此阶段沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  逐渐减小的原因可能有 2 种解释.第 1 种解释是,随着

浮游藻类初级生产力的增加,湖泊出现藻华现象,表层水体  $\text{CO}_2$  分压减少,当低于大气  $\text{CO}_2$  分压时,水体溶解  $\text{CO}_2$  不足,同时表层水 pH 值增加,导致大气  $\text{CO}_2$  通过化学扩散进入水体,即  $\text{CO}_2$  和  $\text{OH}^-$  发生化学反应,产生显著的碳同位素分馏,进而造成水体溶解  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值显著偏负<sup>[41]</sup>.有研究表明,湖泊发生蓝-绿藻水华时,水体溶解  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值显著偏负达到 $-20\%$ <sup>[41]</sup>.红枫湖水体浮游植物监测数据(图 7g)表明此阶段,湖泊藻华事件频发<sup>[37]</sup>.Wang 等<sup>[39-40]</sup>研究表明,红枫湖夏季表层水体 pH 值相对较高,达到 8.5.推测红枫湖藻华发生时,表层水体 pH 值可能更高, $>8.5$ .因而,此阶段沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值逐渐偏负的原因可能是藻华发生时,表层水体溶解  $\text{CO}_2$  不足,pH 值显著增加,造成大气  $\text{CO}_2$  通过化学扩散进入水体,水体溶解  $\text{CO}_2$  显著偏负,导致藻类有机质碳同位素偏负.第二种解释是,富营养化初级阶段,浮游藻类部分吸收水体溶解  $\text{CO}_2$  作为碳源合成有机体,随着初级生产力的显著增加,水体溶解  $\text{CO}_2$  不足,浮游藻类转而利用藻类有机质降解产生的  $\text{CO}_2$  来合成有机体,导致新产生的藻类有机质  $\delta^{13}\text{C}$  偏负,沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  偏负<sup>[42-43]</sup>.Wang 等<sup>[39]</sup>研究认为,当红枫湖藻类呼吸作用大于光合作用时,即出现净呼吸作用时,水体溶解  $\text{CO}_2$  主要通过有机质矿化作用释放出来,造成新产生的溶解  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值显著偏负(达到 $-19.81\%$ ),进而导致藻类有机质碳同位素偏负.以上两种机制都能够解释此阶段沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  逐渐减小,至于具体何种原因还需要进一步分析.总之,在富营养化的红枫湖水体中,随着初级生产力的增加,藻类有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值显著偏负,进而造成沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值偏负。

水体浮游藻类观测数据表明,此阶段浮游藻类处于增值高峰期,浮游藻类大量繁殖,黄丝藻等不耐污指示生物消失,出现耐污指示生物铜绿微囊藻水华<sup>[31]</sup>(图 7g).水质监测数据<sup>[37]</sup>也表明,此时期水体逐渐变为富营养化,水质污染严重,1994~1999 年藻华事件、黑水事件等水质恶化事件频发.此时期农业生产活动和工业生产活动显著加强,流域人口数量明显增加(图 8),因而红枫湖水体显著富营养化的主要原因是人类活动导致的大量营养物质输入到水体造成初级生产力显著增加.值得注意的是此时期网箱养殖业大规模发展,网箱养鱼向红枫湖输入大量的氮、磷等营养物质<sup>[44]</sup>,可能对此阶段的初级生产力

显著增加起到重要作用。

IV阶段(2000~2008年):红枫湖初级生产力较前一阶段降低,但仍处于较高水平,水体处于中-富营养化状态,具体又可分为2个阶段.IV-A阶段(2000~2003年):此阶段BSi、TOC、TN含量显著下降,指示了湖泊初级生产力下降,水质逐渐得到改善.C/N比值逐渐下降,C/N比值仍 $>10$ . $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 呈现逐渐增加趋势,主要是由于随着初级生产力的减少,水体溶解 $\text{CO}_2$ 相对充足,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对偏正,造成藻类有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值逐渐上升.水体浮游藻类监测数据表明,2001年浮游藻类数量较前一阶段显著减少(图7g).水质观测数据也表明2000~2003年红枫湖水体TP含量逐渐下降<sup>[37]</sup>(图7i).水体营养状态的改变和水质的明显改善是由于政府出台了“两湖条例”,同时实施了以消减氮、磷输入的三期综合治理工程,特别是撤销网箱养鱼活动,使得外源和内源营养物质输入显著减少所致.IV-B阶段(2004~2008年):此阶段BSi、TOC、TN相对稳定,略微增加,表明水库初级生产力增加.水体浮游藻类监测数据表明,此阶段浮游藻类又处于增值高峰期,浮游藻类大量繁殖<sup>[30]</sup>(图7g).水质监测数据表明,2004~2008年红枫湖水体富营养指数高,水体TP含量急剧上升,处于富营养化状态,水华事件频发,水质处于V类甚至劣V类,水体污染严重<sup>[35-37]</sup>(图7h~i).此阶段水体呈现富营养化状态,主要是水体受到外源污染物持续排放输入,以及内源底泥营养物质的二次释放,造成水质污染严重.

V阶段(2009~2016年):红枫湖初级生产力整体偏低,营养状态为中营养水体.2008年开始,沉积物BSi含量呈现逐渐下降趋势,表明此时期硅藻生产力逐渐下降.此阶段C/N比值 $<10$ .水质观测数据表明,2008年以来红枫湖水质得到明显改善,水体TP含量和综合营养状态指数逐渐下降,从V类水质逐渐转变为III类水质,水华未见,水体处于中营养状态<sup>[35-37]</sup>(图7h~i).2008年以来红枫湖水体营养状态逐渐转向中营养化,水质得到明显改善,主要是因为随着两湖一库管理局的成立,从2008年开始政府对红枫湖进行大规模综合治理,对红枫湖及其流域的保护和治理措施逐渐加大且严格,使得红枫湖外源污染输入显著减少.

此阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值呈现单调递减趋势,从 $-27.66\%$

逐渐下降到 $-30.32\%$ ,沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 显著偏负.按照之前的推论,如此负的沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值可能是由于藻类初级生产力显著增加所致,指示水体富营养化加重,这与水质监测数据的指示结果不一致(图7).此阶段沉积物处于不稳定的松散堆积阶段,有机质重新矿化作用可能对TOC和TN含量变化产生显著影响.先前研究<sup>[38,45]</sup>表明,红枫湖表层沉积物TN和TOC呈现随岩芯向下而逐渐减小的趋势,呈指数衰减模式,并认为成岩作用可能是TOC和TN变化的主要原因.研究<sup>[46-47]</sup>表明,湖泊/水库有机质在沉积后,70%的TOC在约11~12年内发生重新矿化作用,仅小部分以难分解有机碳形式埋藏在沉积物中.因而,红枫湖表层沉积物TOC和TN含量变化可能受到重新矿化作用影响,此阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏负可能并不是由于藻类初级生产力显著增加所致.此外,TOC、TN含量呈现上升趋势,指示表层沉积物营养物质含量高,表明现阶段在加强外源性污染治理的同时,重点加强内源性污染治理工作,防范底泥营养物质二次释放造成水体富营养化.

### 3 结论

3.1 建库(1960年)以来,红枫湖水体经历了多次营养状态的显著转换.其中1991年之前,红枫湖水体初级生产力较低,营养状态为贫-中营养水体;1991~1999年,红枫湖初级生产力显著增加,水体由中营养逐渐转为富营养化;2000~2003年,红枫湖初级生产力逐渐减小,水体逐渐转为中营养状态,水质得到改善;2004~2008年,水体污染逐渐加重,处于富营养状态;2009~2016年红枫湖水质得到明显改善,逐渐转为中营养状态.

3.2 1991年之前,红枫湖水质变化的主要驱动因素是自然因素,人为活动影响相对较小;1991年开始,水体富营养化的主要驱动因素是人为活动向水体输入大量营养物质所致,值得注意的是网箱养鱼可能对红枫湖水体的富营养化起到重要作用;2000年开始,红枫湖水质得到改善,主要原因是政府出台一系列保护和治理措施;2004年开始,水体污染逐渐加重的主要原因是外源污染物持续输入,加上底泥营养物质的重新释放;2009年以来红枫湖水质明显改善,主要是由于大规模的治理措施和严格的法律制度实施,有效地抑制了外源污染物的输入,但表层底泥



营养物质含量较高。

#### 参考文献:

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制理论方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2013:1-12.  
Jin X C. Theoretical method and practice of lake eutrophication control [M]. Beijing: Science Press, 2013:1-12.
- [2] Smol J P. Paleolimnology: An important tool for effective ecosystem management [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 1992,1(1):49-58.
- [3] Battarbee R W. The importance of palaeolimnology to lake restoration [A]/*The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management* [C]. Dordrecht: Springer, 1999:149-159.
- [4] Filstrup C T, Thad Scott J, White J D, et al. Use of sediment elemental and isotopic compositions to record the eutrophication of a polymictic reservoir in central Texas, USA [J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2010,15(1):25-39.
- [5] Costa-Bóddeker S, Bennion H, Tatiane Araújo de Jesus, et al. Paleolimnologically inferred eutrophication of a shallow, tropical, urban reservoir in southeast Brazil [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2012,48(4):751-766.
- [6] Liu J, Lin Z, Zhang H, et al. Hydrodynamic change recorded by diatoms in sediments of Liuxihe Reservoir, southern China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2012,47(1):17-27.
- [7] 贾滨洋, 付文丽, 于静, 等. 三岔湖沉积物揭示的湖泊营养化进程与人类活动的关系 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(9):1638-1644.  
Jia B Y, Fu W L, Yu J, et al. Relationship among sediment characteristics, eutrophication process and human activities in the Sancha Lake, Sichuan, Southwestern China [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(9):1638-1644.
- [8] 曾红平, 高磊, 陈建耀, 等. 渝江长湖水库沉积物营养元素沉积历史重构及源解析 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(10):3910-3918.  
Zeng H P, Gao L, Chen J Y, et al. Historical reconstruction and source identification of sediment nutrient elements in the Changhu Reservoir, Wengjiang River [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(10):3910-3918.
- [9] Shotbolt L A, Thomas A D, Hutchinson S M. The use of reservoir sediments as environmental archives of catchment inputs and atmospheric pollution [J]. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(3):337-361.
- [10] Shotbolt L, Hutchinson S M, Thomas A D. Sediment stratigraphy and heavy metal Fluxes to reservoirs in the Southern Pennine Uplands, UK [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2006,35(2):305-322.
- [11] Filstrup C T, Thad Scott J, Lind O T. Allochthonous organic matter supplements and sediment transport in a polymictic reservoir determined using elemental and isotopic ratios [J]. *Biogeochemistry*, 2009,96(1-3):87-100.
- [12] Xiao M, Wu F C, Wang L, et al. Investigation of low-molecular weight organic acids and their spatiotemporal variation characteristics in Hongfeng Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(2):237-245.
- [13] 白占国, 万国江. 喀斯特区域的水化学不稳定性——以黔中地区为例 [J]. *水科学进展*, 1998,9(4):325-332.  
Bai Z G, Wan G J. Instability of water chemistry in the karst region [J]. *Advances in Water Science*, 1998,9(4):325-332.
- [14] 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.
- [15] Liu B, Xu H, Lan J H, et al. Biogenic silica contents of Lake Qinghai sediments and its environmental significance. *Frontiers of Earth Science*, 2014,8(4):573-581.
- [16] Anjum R, Gao J, Tang Q, et al. Linking sedimentary total organic carbon to  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  chronology from Changshou Lake in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Chemosphere*, 2017,174:243-252.
- [17] Xu L, Wu F, Wan G, et al. Relationship between  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  activity and sedimentary organic carbon in sediments of 3 Chinese lakes [J]. *Environmental pollution*, 2011,159(12):3462-3467.
- [18] Wan G J, Chen J A, Wu F C, et al. Coupling between  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and organic matter in sediments of a nutrient-enriched lake: an example from Lake Chenghai, China [J]. *Chemical Geology*, 2005,224(4):223-236.
- [19] Xu J X. Some rainfall-related thresholds for erosion and sediment yield in the upper Yangtze River basin [J]. *Environmental Geology*, 2009,56(6):1183-1192.
- [20] Zhang X B, Bai X Y, Liu X M. Application of a  $^{137}\text{Cs}$  fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China [J]. *Science China*, 2011,(3):121-127.
- [21] Huang J, Zhang J, Zhang Z, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960-2005 in the Yangtze River basin [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(2):337-351.
- [22] Gao J, Long Y, Zhang X, et al. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016,13(5):857-869.
- [23] Wei J, He X, Bao Y. Anthropogenic impacts on suspended sediment load in the Upper Yangtze river [J]. *Regional Environmental Change*, 2011,11(4):857-868.
- [24] Zhang Y G, Nearing M A, Zhang X C, et al. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multisenario projections in Northeast China [J]. *Journal of Hydrology*, 2010,384 (1/2):97-106.
- [25] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. *地理科学*, 2002,22(6):705-711.  
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,(6):53-56.
- [26] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997,27(5):213-250.
- [27] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes [J]. *Organic Geochemistry*, 2003,34(2):261-289.

- [28] Meyers P A, Lallier-Vergès E. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999,21(3):345-372.
- [29] Leng M J, Marshall J D. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004,23(7):811-831.
- [30] Li J, Liu C Q, Zhu Z Z. Historical eutrophication in Lake Taihu: evidence from biogenic silica and total phosphorus accumulation in sediments from northern part of Lake Taihu [J]. *Environmental Geology*, 2008,55(7):1493-1500.
- [31] 陈作州,陈 椽,晏 妮,等.红枫湖水库浮游植物演变(1980~2006)和富营养化趋势研究 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(3):5-10.  
Chen Z Z, Chen C, Yan N, et al. Ecological changes of phytoplankton (1980~2006) in Hongfeng Lake and the study of eutrophication trend [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2007, 25(3):5-10.
- [32] 龙胜兴,陈 椽,郭 云,等.红枫湖水库水体富营养化及浮游植物群落结构特征 [J]. *中国环境监测*, 2013,29(1):23-29.  
Long S X, Chen C, Guo Y, et al. Phytoplankton's characteristics of community structure and eutrophication in Hongfeng Lake Reservoir of Guizhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013,29(1): 23-29.
- [33] 郭 云,谢太岭,赵宇中.红枫湖浮游植物群落结构季节性变化特征及水质生物学评价 [J]. *贵州科学*, 2018,36(2):25-32.  
Guo Y, Xie T L, Zhao Y Z. Seasonal variation of phytoplankton community structure and biological evaluation of water quality of Hongfeng Lake [J]. *Guizhou Science*, 2018,36(2):25-32.
- [34] 詹 苏,杨大鹏.红枫湖水体的富营养化特征评价 [J]. *贵州农业科学*, 2012,40(10):200-203.  
Zhan S, Yang D P. Characteristics evaluation of eutrophication about Hongfeng Lake [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012,40(10):200-203.
- [35] 郭 云,赵宇中,龙胜兴,等.湖泊富营养化治理成效阶段水环境特征研究——以贵阳市饮用水源地红枫湖为例 [J]. *环境污染与防治*, 2015,37(6):55-62.  
Guo Y, Zhao Y Z, Long S X, et al. Study on water environment characteristics in the stage of governance effect of lake eutrophication: taking drinking water sources of Hongfeng Lake in Guiyang as an example [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015,37(6):55-62.
- [36] 荆 敏,林 丹,闫海鱼,等.环境治理对红枫湖水生食物链中汞积累的影响 [J]. *生态毒理学报*, 2017,12:204-211.  
Jing M, Lin D, Yan H Y, et al. Effect of environmental improvement on the accumulation of mercury in the aquatic food chain of Hongfeng Reservoir [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017,12(5):204-211.
- [37] 李江苏,张 雷,武 红,等.猫跳河流域水质演化机理研究 [J]. *资源科学*, 2011,33(8):67-74.  
Li J S, Zhang L, Wu H, et al. Analysis of water quality evolution mechanism in the Maotiaohe watershed [J]. *Resources Science*, 2011,33(8):67-74.
- [38] Wang S L, Yeager K M, Wan G J, et al. Carbon export and fate in carbonate catchments: A case study in the karst plateau of southwestern China [J]. *Applied Geochemistry*, 2012,27(1):0-72.
- [39] Wang S L, Yeager K M, Wan G J, et al. Dynamics of CO<sub>2</sub> in a karst catchment in the southwestern plateau, China [J]. *Environ Earth Science*, 2015,73:2415-2427.
- [40] Wang S L, Yeager K M, Lu W Q. Carbon isotope fractionation in phytoplankton as a potential proxy for pH rather than for [CO<sub>2</sub>(aq)]: Observations from a carbonate lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016,61:1259-1270.
- [41] Herczeg A L, Fairbanks R G. Anomalous carbon isotope fractionation between atmospheric CO<sub>2</sub> and dissolved inorganic carbon induced by intense photosynthesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987,51(4):895-899.
- [42] 周志华,刘从强,李 军,等.巢湖沉积物 δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub> 和 δ<sup>15</sup>N 记录的生态环境演化过程 [J]. *环境科学*, 2007,28(6):1338-1343.  
Zhou Z H, Liu C Q, Li J, et al. Record of ecosystem evolution processes provided by δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub> and δ<sup>15</sup>N values in Chaohu Lake sediments [J]. *Environmental Science*, 2007,28(6):1338-1343.
- [43] 朱正杰,肖 军,龚业超,等.湖泊沉积物多指标记录的长寿湖近 60 年来营养化过程 [J]. *地球环境学报*, 2016,7(3):292-300.  
Zhu Z J, Xiao J, Gong Y C, et al. Trophication evolution recorded by multi-proxy evidences in Lake Changshou, Chongqing during the recent 60years [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016,7(3):292-300.
- [44] 钟 晓,廖国华,孙 伟.红枫湖、百花湖网箱养鱼对湖库水质的影响分析及水资源保护 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2014,22(4):34-38.  
Zhong X, Liao G H, Sun W. Effect of cage-culture fishing on the water quality of lakes and reservoirs and protection for water resource [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2014, 22(4):34-38.
- [45] 肖化云,刘从强.贵州红枫湖现代沉积物氮同位素组成反映的废水输入状况 [J]. *科学通报*, 2006,51(9):1091-1096.  
Xiao H Y, Liu C Q. Composition of nitrogen isotope in recent sediment of Hongfeng Lake indicating waste water condition, Guizhou [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006,51(9):1091-1096.
- [46] 刘从强.生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京:科学出版社, 2007.  
Liu C Q. Biogeochemical processes and cycling of nutrients in the Earth's surface. Chemical erosion and nutrient cycling in Karstic Catchments, Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [47] Kortelainen P, Pajunen H, Rantakari M, et al. A large carbon pool and small sink in boreal Holocene lake sediments [J]. *Global Change Biology*. 2004,10:1648-1653.

**致谢:** 感谢中国科学院地球化学研究所龙超君硕士研究生在红枫湖野外采样过程中的帮助;感谢东华理工大学肖红伟教授在有机质碳同位素测定中给予的帮助。

**作者简介:** 盛恩国(1985-),男,安徽合肥人,副教授,博士,主要从事湖库沉积过程与环境变化研究.发表论文 10 余篇。