

江西洪湖沉积物营养盐变化与人类活动响应研究

张明礼^{1,2}, 孔冉冉¹, 杨浩¹, 谢标¹, 王小雷³, 李艺众¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(3. 南京晓庄学院环境科学学院, 江苏 南京 211171)

[摘要] 在对江西洪湖沉积柱的粒度、营养元素分析的基础上,揭示了沉积物营养元素的剖面变化特征;同时基于²¹⁰Pb CRS计年模式,结合富集系数(EF)分析,探讨了近150年来人类活动对湖区生态环境变化的影响. 研究结果表明沉积物平均沉积速率为0.407 g/(cm²·a),总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)呈现出明显的四阶段沉积特征:1862年~1949年,TN、TOC及TP处于相对稳定的状态,EF(TN)、EF(TP)、EF(TOC)值均小于1,表明此阶段人类活动对环境干扰较小,湖区整体生态环境较为稳定;1949~1978年,TN、TOC及TP处于迅速增加的阶段,垂向含量变化幅度增大,EF(TN)、EF(TP)值接近1.5,逐渐超出自然水平范围内,这说明受人为因素增加,湖泊营养元素含量增加,属人类活动影响的初期阶段;1978年~1997年,营养盐含量持续增加,C/N值继续降低,并在后期保持稳定. 湖泊初级生产力提高,富营养化现象开始显现,湖泊受到污染;1997年~2011年,营养盐含量高并具有明显波动性,EF(TN)、EF(TP)值高于1.5,突破了自然水平富集的阈限值,说明人类活动是影响湖泊环境的主要因素,湖泊富营养化问题加剧.

[关键词] 湖泊沉积物,环境演变,营养元素分析,富集系数

[中图分类号] P942; X524 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2015)03-0099-08

The Response to Sediment Nutrient Changes From Hong Lake and Human Activities in Jiangxi Province

Zhang Mingli^{1,2}, Kong Ranran¹, Yang Hao¹, Xie Biao¹, Wang Xiaolei³, Li Yizhong¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023)

(3. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

Abstract: The paper discusses the distribution of nutrient elements in the sediment core and the causes that people had influenced on eco-environment changes of lake during the modern period based on the parameters of sediment rate, sediment grain size, nutrient enrichment concentration (TN, TP and TOC) and enrichment factor (EF). The result showed that the concentrations of nutrient elements increased along the sediment cores from the bottom to the top. According to the ²¹⁰Pb_{CRS} model, we estimated the average sediment rate 0.407 g/(cm²·a). a and compared the different nutrient elements content, and analyzed eco-environment effect that the people activities might cause. From 1862 to 1949, the content of TOC, TN and TP is relative lower and it illustrated that there were less human activities that influenced the eco-environment change. From 1949 to 1978, TOC, TN and TP contents increased significantly, and the higher EF exhibited the nutrient elements vertical variation of amplitude became enlarged. In this period, the increase of human activities such as deforestation resulted in the higher nutrient element content. From 1978 to 1997, the increasing of sediment nutrient and the promotion of the primary productivity showed the lake eutrophication began to emerge, and it was human activities such as livestock pollution that had become the main factors influencing the lake eco-environment change. From 1997 to 2011, the contents of nutrient kept higher value and the EF>1.5 showed that lake eutrophication aggravated, and the human activities was the main factor that aggravated the eco-environment problem.

Key words: lake sediment, environment change, analysis of nutrient elements, enrichment factor

收稿日期: 2014-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金(41173094, 41273103, 41203087)、江苏省政府留学奖学金、江苏省高校优势学科建设工程资助项目.

通讯联系人: 杨浩, 教授, 博士生导师, 研究方向: 流域生态环境. E-mail: yanghao@njnu.edu.cn

湖泊沉积物是湖泊中碳、氮、磷等营养盐的重要蓄积库^[1],其对整个湖泊系统的碳、氮和磷循环以及湖泊生态系统其他物质循环具有重要意义^[2]. 湖泊中有机碳(TOC)作为沉积物中碳的重要组成部分,主要来源于湖泊水生生物及流域侵蚀带来的陆源植物碎屑,TOC的大量淤积是湖泊富营养化作用的直接结果,也是湖泊加速退化的标志^[3,4]. 总氮(TN)的富集主要来源于生活污水和农业化肥过量施用以及大量有害藻类对大气中氮的吸收^[5,6]. 一般而言,总磷(TP)在农用土壤中是作为有益组分来看待的,但在湖泊的环境质量标准中则被视为有害成分,水体中TP的升高会导致湖泊的富营养化,恶化湖泊水质^[7,8]. 因此,通过对湖泊沉积物底泥中营养元素的分析来探讨湖泊环境变化及发生原因具有重要意义.

江西洪湖属于长江流域鄱阳湖的一个支湖泊,位于信江中下游,是典型的中小型浅水湖泊,被列为国家级风景名胜龙虎山规划的洪五湖景区,具有旅游、养殖等多种功能. 近几十年以来,由于城市化进程与工农业快速发展,洪湖现已为人工调控的半封闭湖泊,大量未经处理的各种污水直接入湖,导致水质下降,大量营养盐沉积于湖底,其环境服务功能逐渐退化,并直接影响着鄱阳湖水质,间接影响长江流域水体质量. 有资料表明^[9],1999年~2007年鄱阳湖水系水质呈下降趋势. 从污染负荷比情况来看,入湖口以赣江南支口和信江污染相对较重,且主要污染指标为TN和TP. 因此,分析洪湖沉积物中的TOC、TN、TP含量水平,探讨其变化原因对于提高其水质及环境服务功能,改善流域环境具有重要意义. 本文以江西洪湖中沉积柱为研究对象,分析了沉积物营养元素垂向分布特征;在放射性核素²¹⁰Pb定年基础上,探讨了营养盐富集序列与人类活动的响应关系,研究结果对有效控制洪湖富营养化具有积极的指导意义.

1 研究区概况

洪湖水库位于江西省鹰潭市余江县,地处红壤低丘盆地,东、西、南三面环绕低丘山岭,位于东经116°40'~117°20',北纬27°40'~28°20'. 洪湖水库总库容1 326万 m³,最大水面267 hm²,是白塔渠水量的调节水库,有效库容1 186万 m³,集雨面积7.24 km²,引水集雨面积1 495 km²,平均水深5.7 m. 库水交换平均25 d/次,库区光照时间长,年均日照时数1 952 h,气候温和,年均气温17.6℃,无霜期年均269 d. 雨量充沛,多年平均降雨量为1 693.6 mm. 属于亚热带季风性湿润气候,夏季晴热多雨,秋冬季雨雪较少,寒冷期极短. 洪湖具有生活饮用、渔业养殖、工农业用水等功能. 近些年来湖泊流域的工农业有了迅速发展,且工业发展以磷化工、食品、铜冶炼、钢铁、机械、有色金属等生产为主. 大量工业废水、农业退水和生活污水流入湖中,湖泊水质受到污染,洪湖已面临富营养化的威胁.

2 样品采集与实验分析

2.1 样品采集

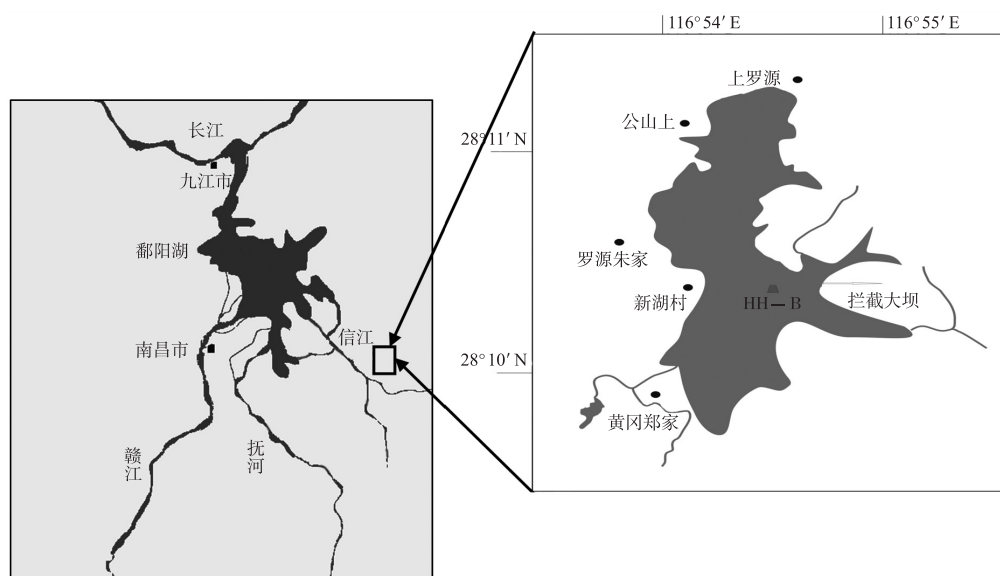


图1 洪湖地理位置及采样点位置

Fig.1 Map of Hong Lake and sampling sites

2012年7月,使用奥地利产的重力沉积物取样器(内径4.4 cm)在水深4.5 m处采集洪湖沉积物柱芯(图1),采得柱芯HHB长52 cm(其中上覆水约5 cm,沉积物底泥约47 cm),悬浮层未受扰动,界面水清澈,该柱芯上部呈现灰黑色,纹理较为清晰,靠近下部出现黑褐色泥炭淤泥。将柱芯带回实验室放入超低温冰箱里冷冻(温度设置为 -50° ,时间为48 h),沉积物柱芯按照1 cm间距平均分成47个样品,样品冷冻干燥,研磨,分装备用。

2.2 实验分析

2.2.1 沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测试

每个样品称取8.0 g放入同一规格的离心管密封1个月,进行 ^{210}Pb 比活度测试,测试仪器采用美国EG&GORTEC公司生产的高纯锗探测器、数字化谱仪及多通道分析系统完成。每个样品的测试时间为 $\geq 40\,000\text{ s}$ (实时)。样品中过剩 ^{210}Pb 比活度(用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 表示)为 ^{210}Pb 比活度与 ^{226}Ra 比活度的差值。 ^{210}Pb 的比活度由461.5 keV γ 射线谱峰面积求算, ^{226}Ra 比活度根据 ^{214}Pb 的谱峰面积(351.9 keV处 γ 射线谱峰)求算,半衰期极短的 ^{214}Pb 是 ^{226}Ra 的衰变产物^[10]。其中 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 标准源样品由中国原子能研究所提供。

2.2.2 营养元素分析

称取经过冷冻干燥后研磨至200目的沉积物样品,分别测定TN、TP及TOC含量。称取0.02 g的样品放入50 mL具塞比色管中,加入氧化剂溶液25 mL,加热至 120°C 保持30 min,取上清液25 mL及10 mL,分别测试TN、TP。其中TN采用在紫外分光光度计上用波长220 nm和275 nm测定 A_{220} 和 A_{275} ;TP则在加入钼锑抗混合显色剂后采用751型分光光度计进行测定;TOC含量测定采用TOC/TN分析仪(MultiN/C2100TOC/TN仪,德国耶拿公司)。

2.2.3 粒度测试

称取5 g样品放入100 mL烧杯中,加入10 mL浓度为10%的 H_2O_2 并煮沸使其充分反应,冷却后加入10 mL浓度为10%的HCl并煮沸使其充分反应,冷却后注满蒸馏水并静置一夜抽去蒸馏水,加入10 mL浓度为0.05 mol/L的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 分散剂,并用超声波清洗机振荡10 min后采用英国Mal-ven公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行测量,测量范围为 $0.02 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$,粒径分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$,重复测量的相对误差 $<1\%$ 。

2.2.4 参比元素Al测试

为更好评价湖泊受污染的程度,引入元素富集系数作为评价指标,此法中把沉积物中Al作为参比元素,其含量采用Palalytical AXIOS X荧光光谱仪测量完成。

所有样品的测试均在南京师范大学地理科学学院江苏省环境演变与生态建设重点实验室完成。

3 结果与讨论

3.1 年代分析

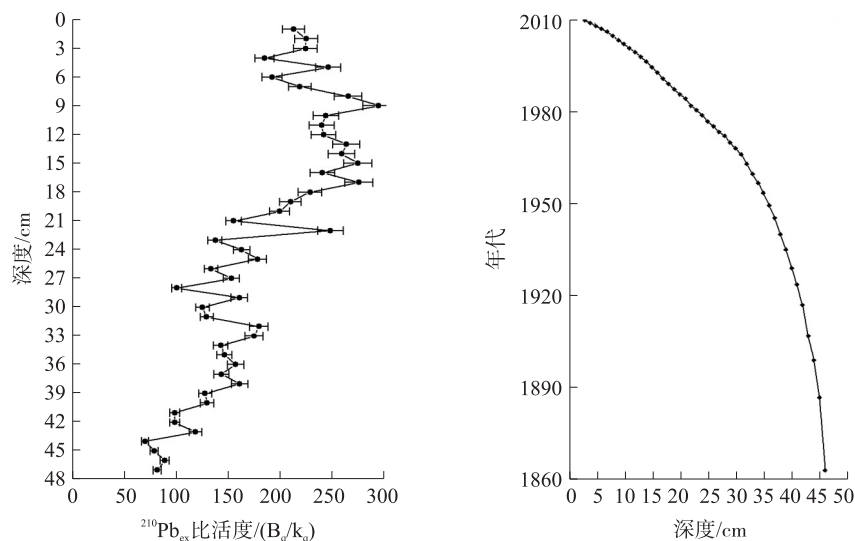


图2 洪湖沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂直剖面分布及定年

Fig.2 Profile distributions of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and sediments age along the depth

图2显示沉积物样品中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂直剖面深度与年代对应关系. 由图2可看出沉积物柱芯的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 最大比活度并没有出现在最表层, 而是在深度为9 cm处, 其比活度值为292.72 Bq/kg, 可能与近期的扰动有关. 自9 cm往下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度呈现锯齿状递减的趋势, 在47 cm以下比活度基本没有变化, 与 ^{226}Ra 基本达到平衡. 这种锯齿状分布适合用 ^{210}Pb CRS模式计年^[10,11], 得到0~47 cm沉积物样品的平均沉积速率为 $0.407 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$. ^{210}Pb CRS模式计算年龄深度仅在47 cm处, 该处年龄为1 862 A.D., 年代跨度为1862年~2011年, 且与有关文献中长江中下游其他浅水湖泊测年结果相近($0.44 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$), 说明洪湖沉积柱芯的放射性核素计年结果可靠^[12].

3.2 沉积物中营养元素与粒度的变化分析

3.2.1 TOC、TN、TP分析

图3列出了洪湖HH-B孔沉积物中营养物质的垂向变化. TOC含量在0.99%~2.50%之间, 平均值为1.71%; TN含量在0.12%~0.42%之间, 平均值为0.25%; TP含量在0.03%~0.13%之间, 平均值为0.07%. 沉积物中TOC、TN、TP总体上呈现出从底层到表层含量逐渐增加的变化趋势. 深度在5~47 cm, 沉积物中TOC、TN和TP的垂向变化趋势一致: 均在35 cm以下比较平稳; 16~35 cm具有迅速增大的趋势, 增幅分别为70.61%、48.83%、79.14%; 5~16 cm增长趋势有所减弱, 属于小幅度增加, 且在这一阶段, TN浓度在深度5 cm处达到最大值, 最大值为0.42%; TOC则在深度6 cm达到最大值, 最大值为2.50%.

沉积物有机质C/N可以判断有机质的来源是湖泊自生还是外源输入. 一般来说, 非维管植物和浮游植物的有机质的C/N在4~10之间, 而陆生的维管束植物的 $\text{C/N} \geq 20$. 沉积物中有机质的C/N大于8, 常常被认为是受到两种物源的影响, 沉积物中陆源有机质所占的比例越高, C/N就越大^[13,14]. 江西洪湖底泥C/N总体介于5~9之间, 主要集中在6~8变幅范围内, 表明洪湖湖泊内源有机质占有较高比例. C/N表现出从底层到表层逐渐降低的变化趋势, 其中, 在39~47 cm之间C/N比值均大于8, 且在44 cm处达到最大值9.4, 说明此时内、外源有机物在湖泊有机物中各占有一定比例, 应属于混源有机质. 39 cm以上至表层均小于8, 5 cm处为最小值5.4, 说明湖泊开始以内源有机质为主.

沉积物中N、P含量及比值通常为水中N、P聚积、沉积及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映^[15], 从某种程度上N/P反映了湖泊的富营养状态^[16]. 图3可以看出, 柱芯HH-B的N/P从底部向上呈不规则的变化趋势, 其比值范围在3.0~4.8之间, 均值为3.9, 类似于浅水湖泊的巢湖的N/P比值^[17], 究其原因可能是浅水湖泊沉积物-水界面生物化学作用剧烈, 经过降解等作用, N以气体的形式转化, P富集在沉积物中.

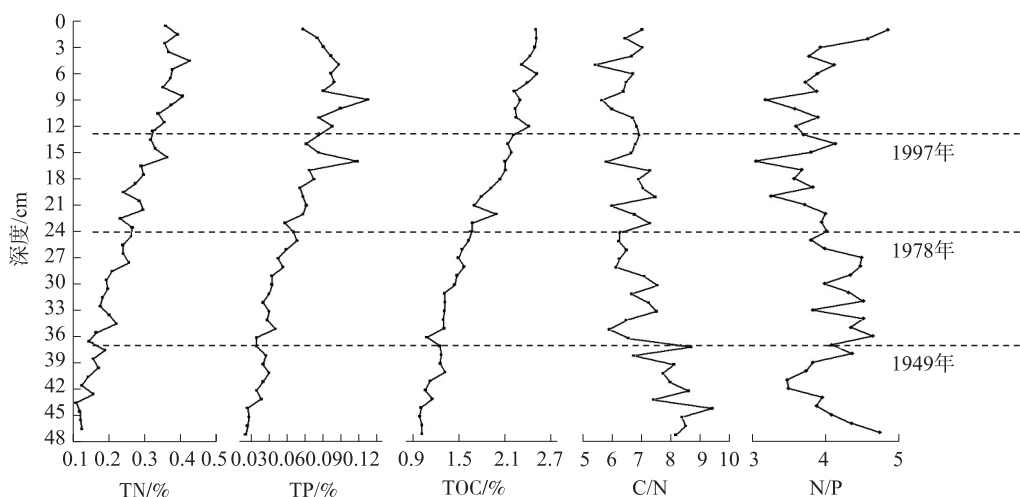


图3 洪湖沉积物中TN、TP、TOC及C/N、N/P的剖面变化

Fig.3 Variation of TN, TP, TOC percentage and the value of C/N, N/P along with the HH-B depth

3.2.2 沉积物粒度分析

本研究按照粒径大小将洪湖沉积物柱芯分为粘土($<4 \mu\text{m}$)、细粉砂($4 \sim 16 \mu\text{m}$)和粉砂($16 \sim 64 \mu\text{m}$)3个等级. 由图4可以看出, 江西洪湖沉积物组分以细粉砂为主, 其次是粘土和粉砂. 柱芯HH-B粘土的含量范围是18.85%~39.02%, 平均含量27.20%; 细粉砂的含量范围为36.96%~47.68%, 平均含量43.80%; 粉砂的含量范围在17.58%~33.74%, 平均含量25.20%; 中值粒径在5.69~13.25 μm 粒度区间. 尽管深度上粒

度参数呈现出波动变化的趋势,而且粉砂含量一直处于低值状态,但整个柱芯以粘土细粉砂为主且粒度变化较小,可知径流等自然因素对沉积过程的波动影响小,沉积环境稳定.

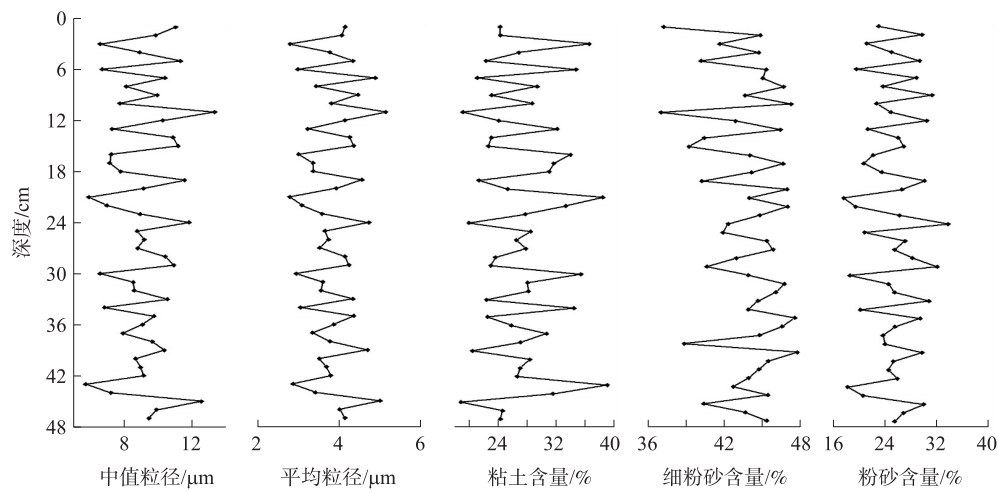


图4 洪湖HH-B孔沉积物粒度参数垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of granularity in HH-B sediments of the Hong Lake

3.2.3 营养元素与粒度之间的相关性关系

利用SPSS统计软件对柱芯沉积物进行营养盐含量与粒度的相关分析,结果见表1.可以看出,TN与粉砂呈正相关关系.本研究中TP、TOC含量与粘土呈正相关关系,说明TP、TOC元素主要吸附于粘土中,与前人的研究结果类似^[18].各元素之间均显示出较强的相关性,相关系数在0.9以上,说明它们的沉积物质行为相似且来源一致,具有同源性.

表 1 江西洪湖柱芯 HH-B 沉积物元素含量与粒度的相关系数

Table 1 Correlation efficient between contents and grain size of HH-B sediments

项目	<4 μm	4~16 μm	16~64 μm	TN	TP	TOC
TN	-0.01 ¹⁾	-0.19 ¹⁾	0.02 ¹⁾	1		
TP	0.03 ¹⁾	-0.11 ¹⁾	-0.01 ¹⁾	0.96 ¹⁾	1	
TOC	0.01 ¹⁾	-0.20 ¹⁾	-0.02 ¹⁾	0.97 ¹⁾	0.92 ¹⁾	1

1) $P<0.01$.

3.3 营养元素的富集系数

由于不同沉积物之间存在着粒度组成上的差异,因此在对沉积物元素含量进行分析时,需考虑粒度组成差异的影响,即进行粒度校正^[19],经过粒度校正后的元素富集系数值通常可以指示该元素的富集程度是否在天然水平范围内^[20,21].元素富集系数的计算公式^[19]为:

$$EF=(C_R/C_{Al})/(B_R/B_{Al}),$$

式中:EF为元素富集系数,表征元素富集的程度; C_R 为沉积物中元素含量; C_{Al} 为沉积物中参比元素Al的含量; B_R 为本地土壤中该元素的背景值; B_{Al} 为本地土壤中Al的背景值.当 $EF<1.5$ 时表明元素属天然水平富集, $EF>1.5$ 时说明元素已超出天然水平,样品受到人为的影响而造成污染.

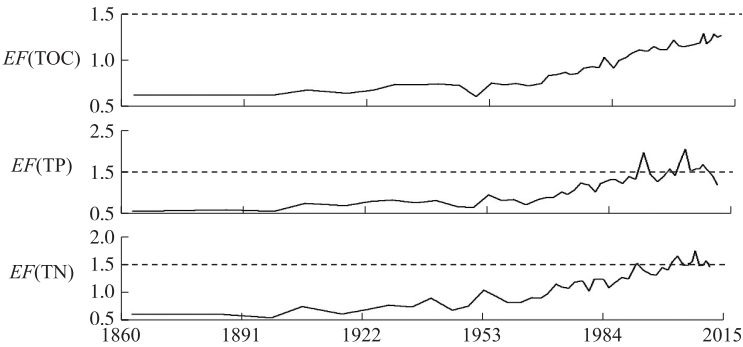


图5 HH-B孔沉积物TOC、TN、TP富集系数变化曲线

Fig.5 Curves of EF values of TOC, TN and TP in HH-B sediments

本文对洪湖沉积物中的3种营养盐进行了富集特征分析,文中Al元素的背景值为江西省土壤相应的背景值,营养盐背景值采用HH-B柱芯剖面底部10个连续样品的TOC、TN和TP的浓度的平均值,结果如图5所示.从图5可以看出,营养盐中 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 呈相同的变化规律,在深度44 cm处之前(1898年以前), $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值很低,平均值低于0.6,呈趋于直线的变化趋势;至深度35 cm处(1898年~1953年), $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 处于缓慢上升阶段,此时 EF 值接近1;深度在35~17 cm处(1953年~1990年), $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值接近1.5,属于迅速上升期;1990年以来, $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值达到并高于1.5,突破了自然水平富集的阈限值;表层处 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值略有下降低于1.5.与 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 不同的是, $EF(TOC)$ 值一直处于上升趋势,但 $EF(TOC)$ 值仍低于1.5,在自然水平的界限内.根据营养盐富集系数结果分析得知,大约自1953年以来,在人类活动影响作用不断增强情况下,江西洪湖N、P元素含量逐渐超出自然水平富集范围,显现富营养化的征兆.

3.4 沉积物营养元素变化与人类活动的响应

沉积物中营养盐元素含量的变化可指示出环境演变过程.通过对沉积物TOC、TN、TP、C/N及N/P的垂向分布变化分析,不仅揭示沉积物营养状态的剖面变化特征;同时基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 定年并结合富集系数(EF),探讨近150年来人类活动对湖区生态环境变化的影响.据沉积物营养盐变化特征及计年,可将湖泊沉积环境按以下4个沉积时段进行划分:

第一阶段(1862年~1949年)TN、TOC及TP含量低,人类活动影响小,生态环境相对稳定. C/N范围5.9~9.4,均值为7.3, N/P比值范围在3.5~4.7,均值4.0.湖泊有机质主要以自生有机质为主,陆源有机质输入比例小,说明此阶段湖区受人为干扰影响小.由图5营养元素富集系数分析得知,此阶段 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 、 $EF(TOC)$ 值均小于1,说明湖泊生态环境较为稳定.

第二阶段(1949年~1978年)TN、TOC及TP呈现出迅速增加的趋势,垂向含量变化幅度增大. C/N范围5.8~7.5,均值6.4; N/P比值范围3.0~4.6,平均值4.0.在此阶段的C/N偏小, N/P依然不变,表明由于人类活动造成湖泊含氮量增加的同时磷含量也随之增加,而此时期 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值接近1.5,逐渐超出自然水平范围内,受人为活动影响程度增加.湖泊氮磷元素快速增加的主要因素为人类活动的理由如下:1949年~1978年人类对湖区进行大面积的围垦,农耕地面积逐步增加,化肥大量施用;随后的大跃进、大炼钢铁等人类活动对当地环境产生巨大的破坏性,大量林地、草地被开垦,土壤侵蚀进一步加剧,湖泊氮磷等营养物质增加.

第三阶段(1978年~1997年)营养盐含量持续增加, C/N值继续降低,并在后期保持稳定.在这阶段 $EF(TN)$ 值达到1.5, $EF(TP)$ 值高于1.5. 1980~1992年随着改革开放发展,大量乡镇企业出现并不断壮大,许多企业将含有大量营养盐的污水直接排入湖泊以及湖区养殖业的快速发展,如湖泊网箱养鱼、岸边建养猪养鸡场等,使得湖泊氮磷等元素含量快速增加^[22,23].江西洪湖在1989年~1992年间为提高渔业产量采取一系列措施,其中最重要的是进行人工施肥补充饵料提高产量,这就为湖泊氮磷元素的增加提供了条件^[24].图3显示可知, TN、TP在1992年形成峰值,达到这一阶段的最大值;另外, $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值在1992年也达到这一阶段的最大值.氮磷元素的增加有利于水生藻类的生长,湖泊初级生产力提高,富营养化现象开始显现,湖泊受到污染.

第四阶段(1997年~2011年)营养盐含量高,具有波动性. TN、TP及TOC含量高,但相较于上阶段营养盐增长趋势有所减缓. $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值高于1.5,突破了自然水平富集的阈限值;此阶段TOC含量虽高,但 $EF(TOC)$ 值仍低于1.5. C/N范围为5.4~7.0,均值为6.5; N/P比值3.1~4.8,平均值3.8. C/N、N/P在此阶段虽仍处于低值范畴,但均已体现出湖泊富营养化加剧趋势.一方面农业活动使流入湖泊中的氮、磷元素增加;另一方面,20世纪90年代中后期工业如矿产加工、化肥制造的快速发展以及居民生活废水排放^[25,26],也在一定程度上增加了湖泊中氮磷等营养元素的含量.有数据表明信江上的朝阳磷矿年产10~15万t过磷酸钙,其生产废水的直接排放造成洪湖TP含量偏高^[27-29].近十几年来随着工业的进一步发展,排入湖泊的污染物质不减反增,直接导致湖泊富营养化问题加剧.

4 结语

通过对江西洪湖沉积物分析,可以得出以下结论:

(1)江西洪湖沉积物中营养盐具有同步变化趋势.随着洪湖沉积物深度变浅TOC、TN及TP浓度逐渐变大,并表现出均在35 cm以下比较平稳;16~35 cm具有迅速增大的趋势;5~16 cm增长趋势有所减弱,属于小幅度增加.由于柱芯以粘土细粉砂为主且粒度变化较小,可知沉积环境稳定;且TN、TP与粘土颗粒之间具有较强相关性,说明营养物质行为相似且来源趋向一致.

(2)据沉积物营养元素的TN、TP及TOC富集系数可判断湖泊富营养化程度.根据沉积物柱芯中 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 、 $EF(TOC)$ 系数,分析了不同时期湖泊富营养化的程度:1862年~1949年,TN、TOC及TP处于相对稳定的趋势, $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 、 $EF(TOC)$ 值均小于1,未受污染;1949年~1978年,TN、TOC及TP处于迅速增加的阶段,垂向含量变化幅度增大,且 $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值接近1.5,洪湖N、P元素含量逐渐超出自然水平富集范围,洪湖逐渐开始出现富营养化征兆;1978年~1997年,营养盐含量持续增加,富营养化现象开始显现,湖泊受到污染;1997年~2011年, $EF(TN)$ 、 $EF(TP)$ 值高于1.5,突破了自然水平富集的阈值,湖泊富营养化问题加剧.

(3)沉积物中营养元素受人类活动影响具有四阶段分布特征.1862年~1949年,TN、TOC及TP处于相对稳定的趋势,此阶段人类活动对环境干扰较小,自然因素起主要作用,湖区整体生态环境较为稳定;1949年~1978年,TN、TOC及TP处于迅速增加的阶段,垂向含量变化幅度增大,随着农业活动的发展,湖泊营养元素含量增加,属人类活动影响的初期阶段;1978年~1997年,营养盐含量持续增加,C/N值继续降低,并在后期保持稳定,湖泊初级生产力提高,富营养化现象开始显现,湖泊受到污染,人类活动对湖泊生态的影响持续增加;1997年~2011年营养盐含量高,具有波动性,人类活动成为影响湖泊环境的主要因素.

[参考文献]

- [1] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等.南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析[J].中国环境科学,2003,23(2):206-209.
- [2] Philip A M. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian and Great Lakes[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 261-289.
- [3] 万国江,白占国,王浩然,等.洱海近代沉积物中碳氮硫磷的地球化学记录[J].地球化学,2000,29(2):189-197.
- [4] 张远,张彦,于涛.太湖典型湖区沉积物外源有机质贡献率研究[J].环境科学研究,2011,24(3):251-258.
- [5] Wang X K, Yao Z Y, Wang J G, et al. Degradation of reactive brilliant red in aqueous solution by ultrasonic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15: 43-48.
- [6] 王圣瑞,何宗健,赵海超,等.洱海表层沉积物中总氮含量及氨氮的释放特征[J].环境科学研究,2013,26(3):256-261.
- [7] 张仕军,齐庆杰,王圣瑞,等.洱海沉积物有机质、铁、锰对磷的赋存特征和释放影响[J].环境科学研究,2011,24(4):372-377.
- [8] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治[M].北京:中国环境科学出版社,1988:45-62.
- [9] 高桂青,阮仁增,欧阳球林.鄱阳湖水质状况及变化趋势分析[J].南昌工程学院学报,2010,29(4):50-53.
- [10] 万国江.现代沉积的 ^{210}Pb 计年[J].第四纪研究,1997,17(3):230-239.
- [11] 王小雷,杨浩,赵其国,等.利用 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 和 ^{241}Am 计年法测算云南抚仙湖现代沉积速率[J].湖泊科学,2010,22(1):136-142.
- [12] 史小丽,秦伯强.湖北网湖 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 计年与沉积速率研究[J].宁波大学学报:理工版,2008,21(3):418-422.
- [13] Meyer P. A preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter chemical[J]. Geology, 1994, 114(3/4):289-302.
- [14] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等.太湖沉积物有机碳与氮的来源[J].生态学报,2011,31(16):4661-4670.
- [15] 杨丽原,王晓军,刘恩峰.南四湖表层沉积物营养元素分布特征[J].海洋湖沼通报,2007(2):40-44.
- [16] 王永华,钱少猛,徐南妮.巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J].环境科学研究,2004,17(6):22-26.
- [17] 胡胜华,叶艳婷,郭伟杰,等.武汉东湖近代沉积物中总氮、总磷与生物硅沉积与营养演化的动态过程[J].生态环境学报,2011,20(8/9):1278-1288.
- [18] 陆敏,张卫国,师育新.太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J].湖泊科学,2003,15(3):213-220.

- [19] 贾铁飞,张卫国,俞立中,等. 近800年来巢湖沉积物营养元素富集特点及其环境演变意义[J]. 地理科学,2009,28(15):1 217-1 226.
- [20] 史小丽,秦伯强. 长江中游网湖近代沉积环境演变及其对人类活动的响应[J]. 地理研究,2013,32(5):808-816.
- [21] 李书恒,郭伟,殷勇. 高邮湖沉积物地球化学记录的环境变化及其对人类活动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):143-150.
- [22] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J]. 湖泊科学,2007,19(4):390-396.
- [23] 吴艳宏,王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算[J]. 第四纪研究,2006,26(5):843-848.
- [24] 张仁生. 洪湖水库提高渔业产量的几点体会[J]. 水利渔业,1993,5(67):51-53.
- [25] 江西省统计局. 江西统计年鉴2006[M]. 北京:中国统计出版社,2006
- [26] 曾慧卿,何宗建,彭希珑. 鄱阳湖水质状况及保护对策[J]. 江西科学,2003,21(3):226-229.
- [27] 王毛兰,周文斌,胡春华. 鄱阳湖区水体氮、磷污染状况分析[J]. 湖泊科学,2008,20(3):334-338.
- [28] 欧杰,王延华,杨浩等. 湖泊沉积物中正构烷烃和碳同位素的分布特征及其环境意义[J]. 南京师大学报:自然科学版,2012,35(3):98-105.
- [29] 王小雷,杨浩,赵其国,等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录[J]. 地理研究,2011,30(1):161-171.

[责任编辑:丁 蓉]