

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.03143

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

李书恒¹, 郭伟², 殷勇³

(1. 西北大学 城市与环境学院环境科学系, 西安 710127; 2. 西安交通大学 环境科学与技术系, 西安 710049;
3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要:通过对高邮湖钻孔沉积物粒度、沉积速率和地球化学元素等指标的分析,结合高邮湖地区的历史文献记录,探讨了高邮湖近现代时期环境变迁及其对区域重大事件和人类活动的响应。研究表明:高邮湖沉积物重金属元素近300年来呈现随深度减小逐渐富集的趋势,区域大事件如黄河改道等是导致元素含量变化的主要原因。而影响元素含量异常波动的人为因素包括为保运河修建高家堰大堤以及清朝修改赋役制度导致人口增长等。近百年来高邮湖沉积物中重金属元素含量的变化主要与人口数量、人类活动方式及强度的改变相关。

关键词:地球化学记录;人类活动;重金属元素;湖泊沉积;高邮湖

中图分类号:P595

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2013)03-0143-08

人类活动与环境演变的互动效应是当代地球表层系统科学研究的重要内容之一^[1-2]。湖泊沉积物连续性好、分辨率高、包含信息丰富,是研究环境演变的理想载体^[3-4]。历史时期湖泊沉积记录了人与自然相互作用的演变过程,通过对湖泊沉积物环境指标的研究,可以揭示流域环境重要事件和人类活动的信息^[5-7]。高邮湖位于江苏中部,京杭大运河西侧,地处淮河中下游,是江苏省第三大湖。对于高邮湖清末以前的演变和发展,前人曾有较多的研究和论述。高邮湖地区古为潟湖洼地平原^[8]。全新世8 000 aBP前后,高邮附近曾是被长江三角洲和淮河三角洲所夹的一个浅海湾^[9-10]。6 000 aBP左右,高邮与宝应之间互相连接成为陆地。春秋以后,局部浅洼地段有湖泊形成,即樊良湖和津湖。到了宋元时期一度发展为“五荡十二湖”;公元1600年时,高邮湖统汇为一大型湖泊^[9]。但对于清末以后高邮湖近现代湖泊环境变迁研究较少。本文通过对高邮湖钻孔沉积物的粒度、²¹⁰Pb测年及地球化学元素等环境指标的分析,并与区域文献记载比对校验,从而探讨近现代时期湖泊沉积记录的环境变化及人类活动对湖泊环境演变的影响。

1 研究区概况

高邮湖(32°42'~33°04'N、119°06'~119°25'E),水域面积674.7 km²,多年平均水位5.70 m,最大水深2.40 m,平均水深1.44 m,蓄水量9.716×10⁸ m³。湖区属北亚热带季风气候,年均气温14.7℃^[11]。高邮湖为平原浅水型湖泊,淮河入江水道未建之前,淮河水通过三河注入白马湖、高邮湖和邵伯湖后泄入长江。1953年开挖三河入江水道,淮河水改由入江水道直接注入高邮湖,来水量占总入湖水量的95%以上。然后经新民滩、邵伯湖注入长江。此外,入湖河流还有安徽境内的白塔、铜龙、秦楠、杨村和王桥等5条小河(图1)。高邮湖湖底高程3.3~4.4 m,湖盆高出东部里下河平原1.0~2.5 m,又称“悬湖”^[12]。因此,历史上高邮湖水经常冲决里运河堤防,给里下河地区带来灾难。其中最严重的是明末清初时期(1658—1682年),里下河地区有25年连续发生洪灾,里运河先后在高邮清水潭决口9次。

2 样品及方法

在高邮湖119°15'4"N、32°45'59"E处钻取了GLC2沉积孔(图1)。沉积孔选取在高邮湖中部,受入湖河流直接影响较少处。采用无磁性PVC塑管在机械重力作用下取柱状沉积样,采样时水深1.87 m,样品实长100 cm。现场从中间将其纵切剖开,根

基金项目:国家自然科学基金项目(40901101,40271004)

作者简介:李书恒(1980—),女,副教授,自然地理学专业,

E-mail: lish@nwu.edu.cn

通讯作者:郭伟, E-mail: williamguo@xjtu.edu.cn

收稿日期:2012-04-11;改回日期:2012-07-08. 文凤英编辑

据沉积物的颜色和粒度等特征,划分 4 个层次:0~18 cm 为浅橄榄灰色淤泥;18~52 cm 为橄榄灰色淤泥,22 cm 处含螺壳,与上层界面明显;52~90 cm 为橄榄灰色淤泥;90~100 cm 为橄榄青色淤泥。野外以 2 cm 间隔采样,共得样品 50 个。装入聚乙烯样品袋中,运回实验室进行多项环境指标的测定。其中粒度与 ^{210}Pb 沉积速率实验在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成,地球化学元素测定委托南京大学分析中心进行。

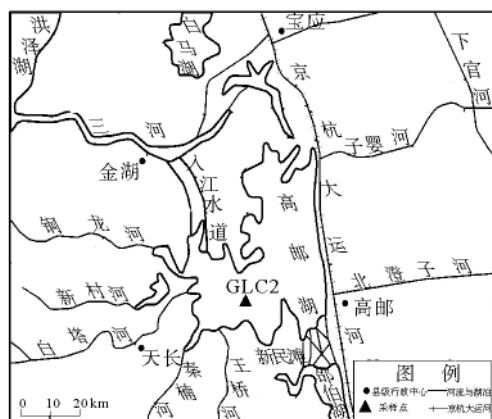


图 1 高邮湖采样位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

2.1 粒度

每个样品取约 0.5 g 进行前期处理,首先加入蒸馏水和 10% 的过氧化氢去除样品中的有机质,10% 的盐酸去除无机碳(主要是钙质胶结物),静置 24 h,加入分散剂超声震荡 20 min,使颗粒得以充分分散。然后采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测量样品粒度。此仪器的粒径测量范围为 0.02~2 000 μm ,粒径间距为 0.25 Φ ,粒径分辨率为 0.1 Φ ,重复测量的相对误差小于 3%。沉积物粒度参数的计算根据 Folk 和 Ward 的算法公式得出^[13]。粒级分类采用国家海洋局(1975 年)的分类标准^[14]。

2.2 ^{210}Pb 沉积速率测定

取 1.5~2 g 研细的沉积样品,加入示踪剂 ^{209}Po ,再用 6 mL HNO_3 和 6 mL HF 加热硝化,加入 20 mL 浓 HCl 加热处理,再加入 100 mL 6 mol/L 的 HCl 溶解,加热熔析后分离出上层清液,加入抗坏血酸隐蔽 Fe 离子,使溶液中的 Po 自镀在镍片上。沉积速率测量仪器为美国 EG&G 公司的低本

底 α 能谱仪,测量方法是根据 ^{210}Pb 与二代子体 ^{210}Po 之间的放射平衡关系,以 ^{209}Po 作示踪剂,通过测定 ^{210}Po 的 α 能谱,求出 ^{210}Pb 的比活度。

2.3 地球化学元素

元素测量是用瑞士 ARL 公司制造的 X 射线荧光光谱仪(X-Ray Fluorescence Spectrometer,简称 XRF)进行分析与获得成果。为降低测量时因粒度不均匀而产生的误差,用玛瑙研钵将阴干后的样品进行粉碎至粒度小于 200 目以下。常量元素的分析为避免矿物效应的影响采用玻璃熔片法,微量元素的分析采用压片法。

3 结果分析

3.1 年代序列的确立

对 GLC2 柱状样进行 ^{210}Pb 测年实验,样品在 69、79 cm 深度的 ^{210}Pb 的比活度基本不变,取其平均值 2.28 dpm/g 为本底值,可以看出, ^{210}Pb 比活度随深度大致呈指数衰减。其回归方程为 $C = 148.9e^{-0.093Z}$ (C 为 ^{210}Pb 放射性比活度, Z 为深度。 $R^2 = 0.923$)。考虑到自 20 世纪以来高邮湖周边环境受人类活动影响较大(包括 30—40 年代的淮河泛滥,50—60 年代的兴修水利等人为因素),故选取 CIC(常量初始浓度)计算模式。计算公式为 $R = \lambda/b$,其中 R 为沉积速率(cm), λ 为 ^{210}Pb 衰变常数(0.03114 a^{-1}), b 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率。根据图 2 中的实验结果代入公式后得出 GLC2 柱状样平均沉积速率为 0.33 cm/a。

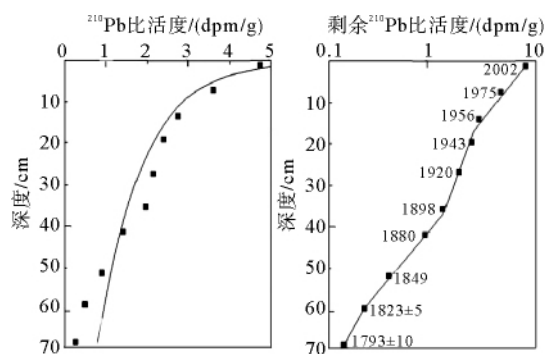


图 2 高邮湖 GLC2 沉积物 ^{210}Pb 及剩余 ^{210}Pb 比活度与深度及年龄关系

Fig. 2 Relation between water depth and ^{210}Pb and surplus ^{210}Pb activity of the Gaoyou Lake GLC2 sediments

由此,GLC2孔33 cm处沉积物对应的年代为1903年,33 cm以下年代由沉积速率推测得出,底部100 cm对应的年代约为1703 AD,GLC2沉积柱记录着300年来高邮湖的沉积信息,并据此计算出各深度对应的年代(图2)。

3.2 粒度

根据粒度分析结果(图3),GLC2孔沉积物主要为黏土质粉砂,表层和底层含粉砂较多。其中黏土组分为8%~46%,粉砂组分为52%~90%,砂组分为0%~18%之间。平均粒径为3~15 μm ,分选系数为1~3,说明沉积物分选较差,与高邮湖水位波动引起的水动力条件差异较大相关。其中,在70~100 cm(1703—1793年)处波动剧烈,出现平均粒径的最大值和最小值。研究表明,18世纪高邮湖在偏干的大环境下,干湿变化频繁^[15-16],且史料记载18世纪淮河流域灾害频繁,发生洪灾的年份有30年,发生旱灾的年份多达41年^[17]。此外,30~50 cm(1853—1913年)波动也很明显,该段的谷值和峰值接近整个钻孔的最小值和最大值。研究认为该阶段沉积物粒径的剧烈变化与黄河从1855年开始在江

苏境内北徙改道且频繁摆动关系密切。

3.3 元素

测定的常量元素包括Al、Ca、Fe、K、Mg、Mn、Na、P、Si和Ti。高邮湖GLC2沉积物大部分常量元素的含量自下而上呈逐渐增大的趋势,多数元素低值出现在钻孔底部。Al、Fe、K、Mg、Mn、P与Ti元素稳定增长,变化不大。而Ca、Na与Si的含量波动相对较大。除Mn外,多数元素在约32~50 cm出现剧烈波动(图4)。其中Ca元素波动最为明显,呈现先增加后减小的变化趋势,指示沉积物物源发生变化。黄河沉积物中Ca元素明显富集^[18],高邮湖沉积物中Ca元素含量的异常波动可能与黄河北徙改道事件有关。

测定的微量元素包括As、Pb、Sr、Ba、Zn和Cu。除Zn和Cu元素最低值出现在48 cm处外,GLC2孔微量元素含量最小值在沉积层的底部,除Sr元素外,高值均在沉积层的表层。与常量元素相似,多数微量元素在约32~50 cm波动剧烈。总体来说,各元素含量随钻孔深度的减小而呈增大的趋势明显(图5)。

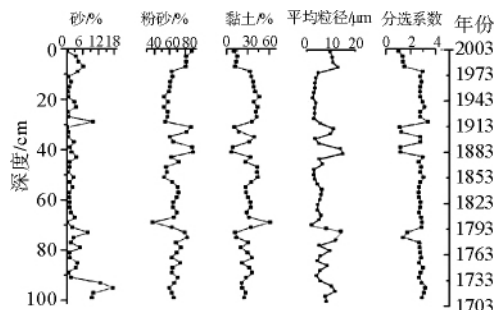


图3 高邮湖GLC2孔沉积物粒度参数垂向分布
Fig. 3 Vertical distribution of granularity in GLC2 sediments of the Gaoyou Lake

4 讨论

4.1 相关性分析

元素的相关性是沉积物地球化学的主要特征之一。对元素之间的相关性进行研究,可以了解元素平面分布、性质及来源的相似性^[19]。本文用SPSS统计软件对研究区钻孔沉积物的元素含量进行相关分析,相关系数采用Pearson相关系数,结果见表1。

根据计算结果,GLC2孔沉积物元素含量与4~8 μm 的黏土及细粉砂有很好的正相关关系,与8~

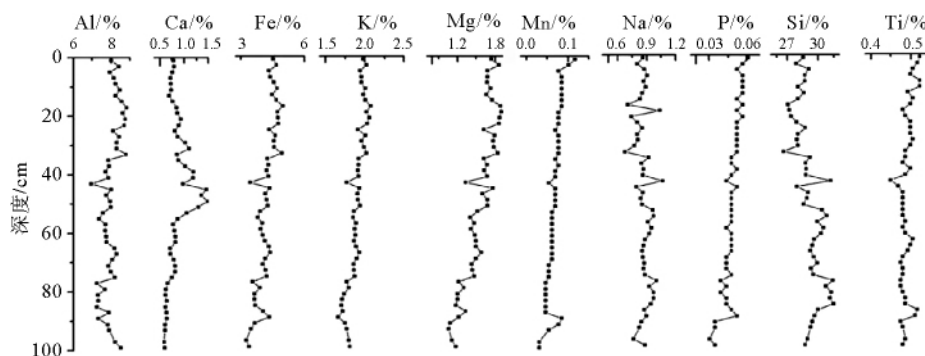


图4 高邮湖GLC2常量元素含量垂向分布
Fig. 4 Vertical distribution of contents of major elements in GLC2 sediments

16 μm 的粉砂相关性不及黏土明显,与 16~128 μm 的粉砂与砂存在一定的相关性,而与 $<4 \mu\text{m}$ 及 $>128 \mu\text{m}$ 的极细与极粗颗粒几乎不相关。这除与黏土颗粒本身富含黏土矿物组成元素外,还因为带负电的黏土颗粒易于吸附金属离子,且比表面积大,从而使黏土中吸附的金属元素比其他颗粒高^[20]。

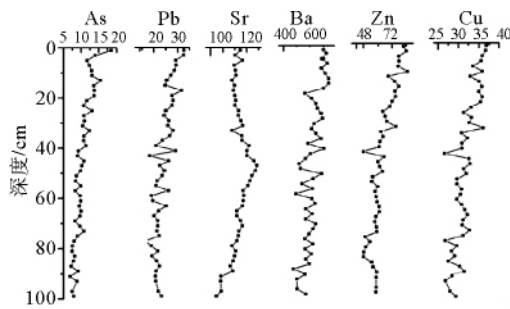


图 5 高邮湖 GLC2 微量元素含量(mg/kg)垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of contents of trace elements (mg/kg) in GLC2 sediments

各元素含量之间具有较好的相关性,说明各元素的来源可能相同或类似。Si 与多数元素呈显著反相关关系,相关系数为 $-0.62 \sim -0.82$ 。Si 元素含量越高,其他元素含量就越低,因此 Si 被认为是许多元素的稀释剂^[21]。Al 与除 Si 以外的元素均呈显著正相关关系,相关系数为 $0.42 \sim 0.71$ 。这是因为,自然界中广泛分布的各种铝硅酸盐矿物(如长石、云母、角闪石、辉石等),在风化作用下易转变为含铝的黏土矿物(如伊利石、高岭石、蒙脱石、绿泥石等),吸附其他物质。因此,Al 在地质文献中常用作归一化元素,用 Al 归一化有利于文献之间的互比与对照^[22-23]。因此,本文选择 Al 作为粒度校正的归一化元素,以最大限度地减少粒度的影响,定量地描述人类活动的影响。

4.2 重金属元素指示的环境意义及其人类活动响应

用元素 X 的原始数据分别除以同样品的 Al 元素的含量,所得的归一化后的元素含量用 X' 表示。选择受人类影响较大的重金属元素 As、Pb、Zn、Cu 和 Mn,探求人类活动及区域重大事件对高邮湖环境变迁的影响。

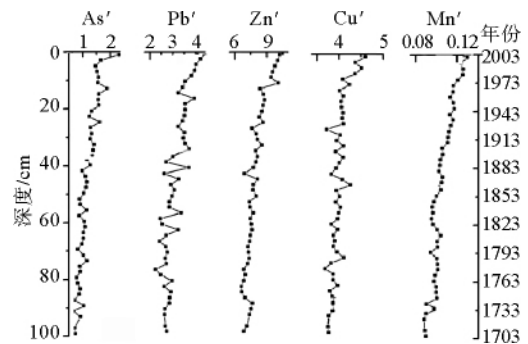


图 6 高邮湖 GLC2 孔重金属元素(归一化后)含量(mg/kg)垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of normalized contents of heavy metal elements (mg/kg) in GLC2 sediments

由图 6 可知,GLC2 钻孔重金属元素在总体上随深度的减少呈现富集的过程。除 Pb' 外的多数元素含量在 40 cm 以下沉积层变化比较缓慢,元素累积速率较低。除 Pb' 外,底部 100~88 cm 元素含量为整段钻孔的最低值。在约 88 cm 处,除 Zn' 元素外,其他元素含量出现低值。查阅研究区相关文献认为,可能与“高家堰”(现洪泽湖大堤)的修建有关。为确保大运河航道顺畅,维持漕运,在“蓄清刷黄”的主张下,高家堰石堤于明万历年间开始加高加宽,直至清乾隆十六年(1751 年)完工。建设初期,确实起到保证运河畅通的“蓄清刷黄”的功效。一方面,高

表 1 高邮湖 GLC2 钻孔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 GLC2 sediments

	$<4\mu\text{m}$	$4\sim 8\mu\text{m}$	$8\sim 16\mu\text{m}$	$16\sim 64\mu\text{m}$	$64\sim 128\mu\text{m}$	$>128\mu\text{m}$	Al	Fe	Si	As	Pb	Zn	Cu
Al	0.11	0.41*	0.03	-0.39^*	0.06	0.08							
Fe	0.11	0.64*	0.23	-0.47^*	-0.52^*	-0.19	0.71*						
Si	-0.05	0.51*	0.14	0.39*	0.04	-0.02	-0.89^*	-0.79^*					
As	-0.06	0.76*	0.41*	-0.41^*	-0.26	-0.14	0.52*	0.72*	-0.63^*				
Pb	-0.14	0.68*	0.40*	-0.31^*	-0.12	-0.06	0.65*	0.72*	-0.75^*	0.72*			
Zn	-0.07	0.75*	0.37*	-0.43^*	-0.13	-0.04	0.76*	0.80*	-0.82^*	0.83*	0.86*		
Cu	-0.11	0.50*	0.25	-0.30	0.26	0.18	0.80*	0.49*	-0.80^*	0.55*	0.32*	0.81*	
Mn	-0.01	0.72*	0.44*	-0.44^*	-0.46^*	-0.22	0.42*	0.78*	-0.62^*	0.82*	0.72*	0.80*	0.52*

注: * 表示通过双尾 t 检验, Sig. <0.01 。

家堰的修建抬高了洪泽湖的水位,与高邮湖之间形成巨大的落差,使得洪水期从三河(闸)进入高邮湖的洪水流速加快,故 GLC2 沉积岩心下部粗颗粒物丰富(图 3),蓄积大量淮水清水以冲刷黄河浑水,对沉积物的元素含量起到稀释作用;另一方面,高家堰堤坝的建成,促使洪泽湖淤积加强,减少了河流径流带来的陆源物质的汇量,有效地阻止了周边地区各类污染源流入高邮湖,从而使得各元素含量在此阶段有所下降。但是因为“黄强淮弱”,黄河逐渐集中注入淮河,淮河的水位被抬高以后,中游的淮水更加不容易下泄,淮河的上中游地区更加泛滥成灾^[9],洪泽湖及高邮湖等湖泊本身也被溢出的黄河浑水淤高,使得沉积物中各元素含量又呈上升趋势。高家堰大堤的修建堵闭了洪泽湖东北部的决口,遇水位暴涨时期,大量洪水宣泄入高邮湖,逐渐使高邮湖湖面扩大,湖水水位也不断抬高。

在约 32~50 cm(1913—1855 年),出现异常的波动,多数元素含量在此处波动较大,平均值呈现总体减小的趋势。通过查阅文献,推测应与黄河 1855 年改道北流有关。1855 年前黄河携带大量泥沙经由淮河道由江苏入黄海,1855 年后,黄河北徙,由山东入渤海^[24]。1855 年后到 19 世纪初期,山东与江苏地区为了“束黄”,耗费大量人力物资,兴修堤坝。对高邮湖而言,一方面黄河北徙,泥沙含量下降,导致沉积物中元素含量下降,另一方面,修建的堤坝阻挡了周边物源的进入也是引起元素含量下降的一个原因。

约在 47 cm(1870 年左右),Cu'、Zn'和 Mn'等元素含量较高。苏北平原总人口在 19 世纪中后期,揭开了中国人口大发展的帷幕(图 7)。18 世纪,清朝统治者对封建赋役制度作出重大修改,施行“嗣后滋生户口,勿庸更出丁钞”,“摊丁入亩”等政策,取消了沿用数千年的人头税,对于新生人口不加赋税,刺激了清代人口猛增。当时苏北平原平均人口密度为 304 人/km²,约为清前期的 4 倍^[25]。此外,人口的增长也可能与 1855 年以后黄河北徙,苏北地区河患减少,外流人口回归故土有关。人口快速增加,高邮湖流域开发利用活动增强,农业活动产生的污染物质增多,人口与环境的矛盾开始显现。

由于 GLC2 沉积柱 33 cm 深度以下为 100 年以前的沉积物,沉积速率的测定超出²¹⁰Pb 分析的年限,33 cm 深度以上可以获得更为精确的年代序列,因此进一步对 33 cm 深度(1903 年)以上元素变化趋势及原因进行分析。

根据各元素垂向变化特点(图 8),自 1903 年以

来,高邮湖沉积物重金属元素含量变化大致可以分为 3 个时段。

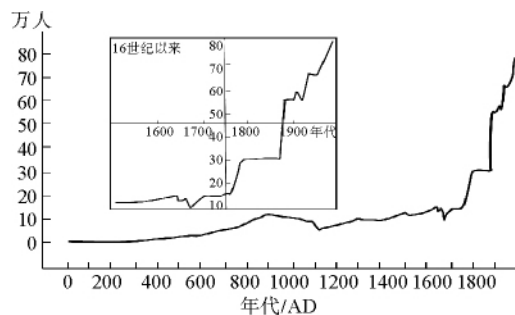


图 7 高邮人口变化过程(据文献[25]改绘)

Fig. 7 Changes in population of Gaoyou County
(after Wu Bihu, 1996)

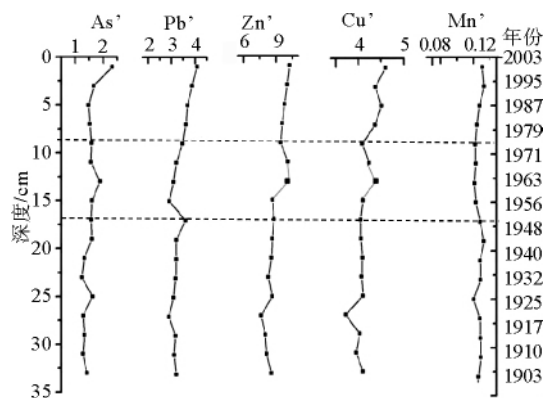


图 8 高邮湖 GLC2 重金属元素(归一化后)含量
(mg/kg)垂直变化

Fig. 8 Vertical distribution of normalized contents of heavy metal elements (mg/kg) in GLC2 sediments

(1)1903—1950 年(33~17 cm),此阶段各元素含量在近 100 年来处于低值阶段,除 As'与 Mn'无明显变化外,Pb'、Cu'和 Zn'的含量较少。据《高邮县志》,自清光绪二十年(1904 年)至民国初期(20 世纪 20 年代),淮河和运河地区旱涝灾害频繁,加之此段时期内战争频繁,造成各地人民颠沛流离,人口下降,生产活动停滞^[26],因而沉积物中重金属元素含量也随之减少。

(2)1950—1975 年(17~9 cm),各元素含量稳定增长。一方面是因为 1953 年三河闸、淮河入江水道以及苏北灌溉总渠等水利工程的修建,对大运河航道及洪泽湖湖道进行疏浚工作,推测在航道疏浚过程中,由于环境条件的改变使部分重金属重新溶出吸附,从而导致沉积物中重金属含量发生波动。另一方面,淮河入江水道的修建,改变了淮水入江的

迂回曲折,缩短了防洪战线,也使得来自于淮河的污染物未经充分降解即进入高邮湖,使得元素含量增加。在 15~12 cm(1956~1960 年)处,除 Pb'元素外的其他元素均出现一个峰值,推测应与 1958 至 1960 年“大跃进”运动有关。为实现工农业生产高指标,全民伐木垦荒,大炼钢铁,水土流失加剧,环境恶化,导致入湖重金属元素含量增加。Pb 的污染较其他元素早,开始于约 1950 年,可能是因为 Pb 污染既来自于污水,又有相当一部分来自于大气沉降。煤中含有相当数量的 Pb,燃煤也会向大气中排放含 Pb 的成分^[27]。流域中大气沉降的 Pb 通过地表径流,部分进入高邮湖。建国后,燃煤需求量增加,燃烧废气、粉尘通过河道及降水进入高邮湖,导致沉积物中 Pb 含量的增加。

(3)1976—2003 年(9~0 cm),5 cm 以上表层对应 20 世纪 90 年代以来的沉积物,其重金属元素含量呈明显上升趋势。改革开放以来,湖区经济快速发展,煤、石油等燃料消耗量增加,工业污水、农药及生活废水排放量增加,导致沉积物中重金属污染加重。自 20 世纪 80 年代以来,城镇的发展带来消耗性产品大幅增长,这些产品如油漆、焊料、管道、陶瓷材料、染料和建筑材料等也含有大量的有害重金属^[28],其中部分重金属元素随着工业废水和城市生活污水的排放进入湖泊水体,导致湖泊沉积物中元素含量的提高。

5 结论

(1)高邮湖 GLC2 沉积物粒度组成以黏土质粉砂为主。GCL2 孔沉积物元素含量与 4~8 μm 的黏土及细粉砂显著正相关。各元素含量之间有较好的相关性,Si 元素与其他元素呈反相关关系,Al、Fe 和 Mn 等元素呈正相关关系。

(2)GLC2 孔重金属元素在总体上呈现随深度减少逐渐富集的过程。元素含量在约 1751 年含量低值应与当时为保运河畅通而实行“蓄清刷黄”政策,修建高家堰大堤有关。在 1855—1913 年间元素含量普遍存在异常波动并呈现减小的趋势,推测与黄河北徙改道导致泥沙含量降低有关。在 1870 年前后元素含量增加,当时清朝修改赋役制度为“滋生人口,永不加赋”导致人口迅速增长,人类活动增强,沉积物中元素含量表现出逐渐上升的趋势。

(3)对表层近百年时期沉积的重金属元素含量分析表明,人类活动对研究区的环境影响主要发生在近百年来,特别是改革开放以来,随着人口的增

加,乡镇工业的快速发展,污染物通过河道或降水进入湖泊,致使湖泊沉积物中重金属元素含量增大。总体来说,高邮湖沉积物重金属的变化特征反映了其污染程度,作为流域物质汇聚的归宿,湖泊沉积物保存了湖区重大历史事件、水利工程措施及人类活动方式与强度变化对环境影响的丰富信息。

参考文献 (References)

- [1] Crutzen P J. Geology of mankind-The Anthropocene[J]. Nature, 2002, 415(6867):23.
- [2] 刘东生. 开展“人类世”环境研究,做新时代地学的开拓者——纪念黄汲清先生的地学创新精神[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 369-378. [LIU Dongsheng. Demand of anthropocene study in the new stage of geosciences: In honor of late geologist Huang Jiqing for his innovative spirit[J]. Quaternary Science, 2004, 24(4):369-378.]
- [3] 王苏民,张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587. [WANG Sumin, ZHANG Zhenke. Advanced research of lakes sediments and environmental changes in China[J]. Chinese Sci. Bull., 1999, 44(6): 579-587.]
- [4] Xiong Y, Wu F, Fang J. et al. Organic geochemical record of environmental changes in Lake Dianchi, China[J]. Journal of Paleolimnology, 2010, 44: 217-231
- [5] 吴艳宏,刘恩峰,酆海键,等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列[J]. 中国科学 D 辑, 2010, 40(6): 751-757. [WU Yanhong, LIU Enfeng, BING Haijian, et al. Geochronology of recent lake sediments from Longgan Lake, middle reach of the Yangtze River, influenced by disturbance of human activities[J]. China Earth Science (Series D), 2010, 40(6):751-757.]
- [6] Nathalie F, Sebastien B, Nadine M, et al. Geochemical evidence(C,N and Pb isotopes)of recent anthropogenic impact in south-central Chile from two environmentally distinct lake sediment records[J]. Journal of Quaternary Science, 2010, 25(7):1100-1112.
- [7] 舒卫先,李世杰,姚书春. 太湖 ZS 孔沉积记录的近 50 年来营养盐沉积通量变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(3): 67-72. [SHU Weixian, LI Shijie, YAO Shuchun. Sedimentary record of nutrient accumulation rates in core ZS from Taihu Lake for recent 50 years[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(3):67-72.]
- [8] 王颖,张振克,朱大奎,等. 河海交互作用与苏北平原成因[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 301-320. [WANG Ying, ZHANG Zhenke, ZHU Dakui, et al. River-sea interaction and the north Jiangsu plain formation[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3):301-319.]
- [9] 廖高明. 高邮湖的形成和发展[J]. 地理学报, 1992, 47(2): 139-145. [LIAO Gaoming. Formation and evolution of the Gaoyou Lake, Jiangsu Province[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(2): 139-145.]

- [10] 潘凤英. 晚全新世以来江淮之间湖泊的变迁[J]. 地理科学, 1988, 3(4): 361-368. [PAN Fengying. A sketch of the transition of the lakes between the Yangtze River and the Huai River in the late period[J]. Scientia Geographica Sinica, 1988, (4): 361-367.]
- [11] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 261-297. [WANG Sumin, DOU Hongshen. Annals of Lakes in China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 261-297.]
- [12] 中科院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志[M]. 南京: 江苏省科技出版社, 1982: 116-123. [Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. Annals of Lakes in Jiangsu Province[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1982: 116-123.]
- [13] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the signification of grain size parameters[J]. Journal of Sedim. Petro., 1957, 27: 3-27.
- [14] 徐馨, 何才华, 沈志达. 第四纪环境研究方法[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1992: 51-110. [XU Xin, HE Caihua, SHEN Zhida. Methods of Quaternary Environment Research[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1992: 51-110.]
- [15] LI Shuheng, Fu Guanghe, Guo Wei, et al. Environmental changes during modern period from the record of Gaoyou Lake sediments, Jiangsu, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(1): 62-72.
- [16] 陈家其, 姜彤, 许朋柱. 江苏省近两千年气候变化研究[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 219-226. [CHEN Jiaqi, JIANG Tong, XU Pengzhu. Climatic changes during the last 2000 years in Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(3): 219-226.]
- [17] 徐近之. 黄淮平原气候历史记载的初步整理[J]. 地理学报, 1955, 21(2): 181-190. [XU Jinzhi. Study on climatic record during historic period of Huang-Huai River plain[J]. Acta Geographica Sinica, 1955, 21(2): 181-190.]
- [18] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19-26. [YANG Shouye, LI Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow River sediments and their geological background[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 19-26.]
- [19] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地质科学, 1983, 4: 307-314. [ZHAO Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the China seas[J]. Chinese Journal of Geology, 1983, 4: 307-314.]
- [20] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 近四十年来山东四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 453-460. [YANG Liyuan, SHEN Ji, ZHANG Zulu, et al. A 40-year element geochemical record and its environment implication in Lake Nansihu, Shandong Province[J]. Geochimica, 2003, 32(5): 453-460.]
- [21] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 23-108. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. Geochemical Records in the Sediments of Shallow China Seas[M]. Beijing: Science Press, 1994: 23-108.]
- [22] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西龙门岛潮间带近 150 年来环境演变的沉积记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 51-59. [XIA Peng, MENG Xianwei, YIN Ping, et al. Depositional records of environmental evolution during the recent 150 years in the intertidal zone of Longmen Island, Guangxi Province[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(1): 51-59.]
- [23] 赵广明, 叶思源, 李广雪, 等. 渤海湾沉积地球化学记录及其对环境变迁的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 51-57. [ZHAO Guangming, YE Siyuan, LI Guangxue, et al. Sedimentary geochemical records: indications of environmental changes in Bohai Bay[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(5): 51-57.]
- [24] 谭其骧. 黄河与运河的变迁[J]. 地理知识, 1955, 8(9): 243-278. [TAN Qixiang. Evolution of the Yellow River and the Canal[J]. Geographical Knowledge, 1955, 8(9): 243-278.]
- [25] 吴必虎. 历史时期苏北平原地理系统研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1996: 220-228. [WU Bihu. Research on the Geographical System of North Jiangsu Plain in the Historical Period[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1996: 220-228.]
- [26] 王鹤, 杨杰. 高邮县志[M]. 南京: 江苏人民出版社, 1990: 130-139. [WANG He, YANG Jie. Annals of Gaoyou County[M]. Nanjing: Jiangsu People's Press, 1990: 130-139.]
- [27] 郭瑞霞, 杨建丽, 刘东燕, 等. 煤热解过程中无机有害元素的变迁规律[J]. 环境科学, 2002, 23(5): 100-104. [GUO Ruixia, YANG Jianli, LIU Dongyan, et al. Transformation of harmful elements during pyrolysis of coal[J]. Environmental Science, 2002, 23(5): 100-104.]
- [28] 何华春, 许叶华, 杨競红, 等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 766-774. [HE Huachun, XU Yehua, YANG Jinghong, et al. Environmental implications of heavy metals from surface sediments in the lake Hongze basin[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 766-774.]

GEOCHEMICAL RECORDS OF ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE GAOYOU LAKE AND THEIR RESPONSE TO HUMAN ACTIVITIES

LI Shuheng¹, GUO Wei², YIN Yong³

(1. Department of Environmental Sciences, School of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Department of Environmental Sciences and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on the parameters of the core sediments taken from the Gaoyou Lake, such as grain-size, sedimentation rate and contents of geochemical elements, environmental changes during the modern period and their response to human activities and regional events were studied with reference to historical records. It is concluded that the contents of heavy metals increased with the decrease in water depth of the lake in the recent 300 years. The great regional events, such as the northward shift of the Yellow River contributed greatly to the changes in the contents of heavy metal elements. The human factors, which lead to the abnormal fluctuation of the contents of heavy metal elements, include the construction of Gaojia Levee along the Grand Canal for the purpose of shipping, and the significant increase in population owing to the changes of the tax system in the Qin Dynasty. However, the increase in the heavy metals in the recent century is mainly due to the increase in population and the intensification of human activities.

Key words: geochemical records; human activity; heavy metal; lake sediments; Gaoyou Lake