

洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价*

祝云龙^{1,2}, 姜加虎^{1**}, 孙占东¹, 黄 群¹, 王红娟^{1,2}, 周云凯^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 于2003–2004年在洞庭湖湖区采集沉积物样品700个, 测定了沉积物中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn的含量, 并用地积累指数方法和主成分分析法对沉积物中的重金属污染状况进行了评价和分析. 结果显示, 洞庭湖各子湖区沉积物中Cd、Cr、Cu、Pb、Zn的平均含量都属于国家土壤二级标准, As、Hg、Ni属于国家土壤一级至二级土壤标准; 在南洞庭湖与东洞庭湖入湖河流的三角洲的前缘是沉积物重金属积累最高的地点, 而在西洞庭湖入湖河流三角洲的后缘沉积物重金属含量比前缘高. 采用综合地积累指数法对洞庭湖各子湖区沉积物进行评价, 结果表明: 南洞庭湖(重污染)>东洞庭湖(偏重污染)>西洞庭湖(中度污染)>大通湖(中度污染)>城陵矶(轻度污染). 采用主成分分析法对洞庭湖各子湖区沉积物进行分析, 结果表明: 南洞庭湖与东洞庭湖第一主成分贡献率分别为55.22%、56.86%, 主要支配As、Cd、Hg、Pb、Zn的载荷, 而第二主成分贡献率分别为30.04%、33.11%, 主要支配Cu、Cr、Ni的载荷; 西洞庭湖、大通湖和城陵矶因沉积物重金属来源不同, 主成分分析结果相差较大.

关键词: 沉积物; 重金属; 污染评价; 主成分分析; 洞庭湖

Character and assessment of heavy metals in the sediments from Lake Dongting

ZHU Yunlong^{1,2}, JIANG Jiahu¹, SUN Zhandong, HUANG Qun¹, WANG Hongjuan^{1,2} & ZHOU Yunkai^{1,2}

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, P.R.China*)

(2: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

Abstract: 700 sediment samples were collected from Lake Dongting during 2003–2004, and concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn in the sediments were measured. The results showed that the average concentrations of Cd, Cr, Cu, Pb, Zn did not exceed the standards of Class II of environmental quality standard for soils in China; the average concentrations of As, Hg and Ni were between the standards of Class I and the standards of Class II of the standard. The heavy metals in east Lake Dongting and south Lake Dongting were mostly accumulated in the front of the delta where rivers ran into the lake, however the heavy metals in west Lake Dongting were mostly accumulated in the rear part of the delta. Results with integrative index of geoaccumulation showed that the decreasing order of the degree of heavy metal pollution in Lake Dongting was as follows: south Lake Dongting > east Lake Dongting > west Lake Dongting > Lake Datong > Chenglingji. Principal component analysis (PCA) was applied to study the heavy metals in the sediments from Lake Dongting. Results showed that the first principal component (PC1) in south Lake Dongting accounts for 55.22% of total data variance, and the second principal (PC2) accounts for 30.04%. As, Cd, Hg, Pb, and Zn have greater loadings in the PC1, and Cu, Cr and Ni have greater loadings in PC2, in south Lake Dongting and east Lake Dongting. For the west Lake Dongting, Lake Datong and Chenglingji, due to the fact that they have different sources of heavy metals, the principal component analyses have shown different results.

Keywords: Heavy metal; sediments; pollution assessment; principal component analysis; Lake Dongting

湖泊沉积物是各种污染物质的蓄积库, 污染物可以被水体颗粒物吸附、络合、絮凝、沉降在沉积物

* 国家自然科学基金(40571028)资助. 2007–07–05收稿; 2007–12–17收修改稿. 祝云龙, 男, 1978年生, 博士研究生; E-mail: zhulong78@sohu.com.

** 通讯作者; E-mail: jiangjh@niglas.ac.cn.

中, 湖泊沉积物记载着湖区环境变化的丰富信息, 可以反映流域工业生产对湖泊环境的影响^[1-2]. 重金属由于具有难降解、生物富集和放大作用而对生物体及生态系统有较大的生态危害性^[3-4].

洞庭湖(111°53′-113°05′E, 28°44′-29°35′N)^[5]位于湖南省东北部, 长江中游荆江段南岸, 南近湘阴、益阳, 北抵华容、安乡、南县, 东滨岳阳、汨罗, 西至澧县、沅江等县市. 湖体呈近似“U”字形, 水位33.50m时(岳阳站, 黄海基面), 湖泊面积2625km². 因泥沙淤积、筑堤建垸等自然和人类活动的共同影响, 洞庭湖现已分割为东、南、西三部分. 据调查和统计^[6], 洞庭湖区共有82个工业排污口, 其中东洞庭湖41个, 南洞庭湖33个, 西洞庭湖8个. 本文分析了洞庭湖不同湖区沉积物中的重金属和有机质的含量及沉积物pH值, 地积累指数法对重金属污染状况进行了评价, 为洞庭湖的持续健康发展提供参考.

1 材料与方法

2003-2004年, 用抓斗式采泥器在洞庭湖湖区采集了700个沉积物样品, 采样站点如图1. 采样过程中, 用塑料勺采取抓泥器中央未受干扰的表层0-2cm泥样于聚乙烯袋中, 扎紧袋口, 带回实验室待测. 将样品在通风的室内自然风干、除杂、混合均匀后, 用木棒和玛瑙研钵将样品磨碎后, 过100目尼龙筛后供测定用.

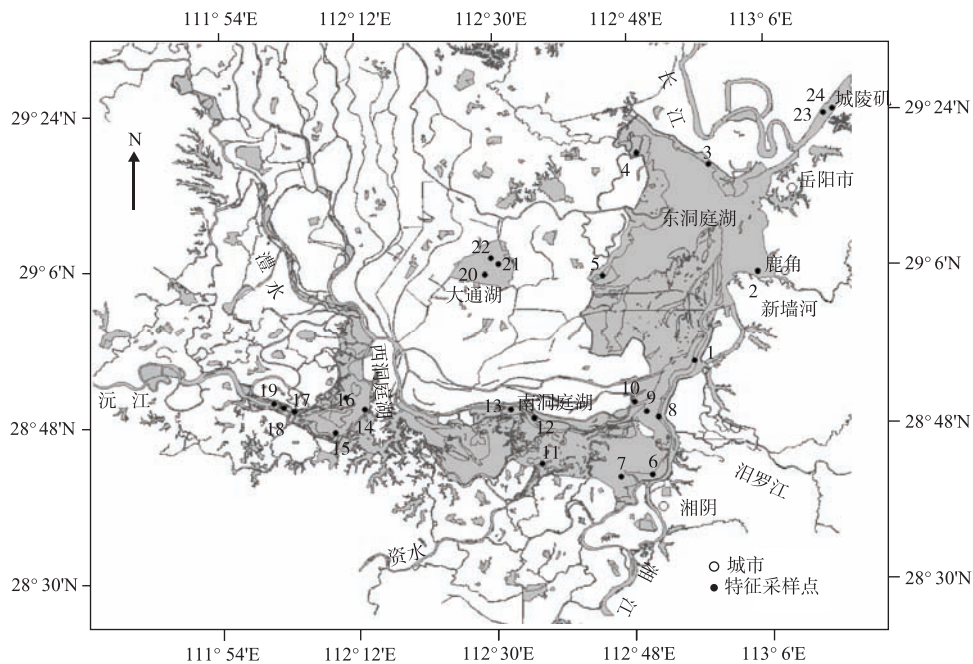


图1 洞庭湖沉积物采样点示意

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Dongting

沉积物样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消解后, Pb、Cd、Ni 用石墨炉原子吸收分光光度法测定, Cu、Cr、Zn 以火焰原子吸收分光光度法测定, As 用氢化物-非色散原子荧光法测定, Hg 用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 消解后, 用冷原子无色散原子荧光法测定, 测定 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 Ni 所用的仪器为 220FS 200Z 型原子吸收分光光度计; 测定 Hg、As 的仪器为 HG-AFS 原子荧光光谱仪, 沉积物中有机质的含量以灼烧法(550℃灼烧 2h)来测定. 沉积物 pH 以土:水=1:2.5 的比例电位法测定的. 分析过程以国家土壤一级标准物质 GSS1—GSS8 为质控标样, 测定相对误差小于 5%. 用统计软件 SPSS11.5 进行数据处理.

2 结果与分析

2.1 洞庭湖沉积物中重金属的含量

为详细分析各子湖区重金属变化特征及污染状况, 将洞庭湖分成5个子湖区(段), 各子湖区采集的沉积物样品数量为: 西洞庭湖102个, 南洞庭湖(包括万子湖和横岭湖)214个, 东洞庭湖348个, 大通湖24个, 城陵矶12个. 各子湖区重金属的平均含量、国家一级土壤标准^[7]及洞庭湖沉积物背景值^[8]如图2所示.

从图2中可看出, 洞庭湖各子湖区As的平均含量为: 南洞庭湖>城陵矶>东洞庭湖>大通湖>西洞庭湖, 西洞庭湖和大通湖沉积物中As属于国家一级土壤标准, 东洞庭湖、城陵矶和南洞庭湖沉积物中As属于国家二级土壤标准(15–30mg/kg), 且各子湖区沉积物中As的平均含量都高于洞庭湖沉积物As的背景值(12.9mg/kg). 东洞庭湖As的含量在4.72mg/kg(9号)与69.26mg/kg(1号)之间, 1号点As的含量最高, 是国家三级土壤标准(30mg/kg)的2.3倍. 南洞庭湖As含量在5.02mg/kg(13号)与93.43mg/kg(6号)之间, 6号点沉积物As的含量最高, 是国家三级土壤标准的3.1倍. 西洞庭湖As含量在6.03mg/kg(14号点)与34.78mg/kg(16号点)之间, 16号点As的含量最高, 是国家三级土壤标准的1.1倍. 大通湖As含量在10.91mg/kg(20号)与18.91mg/kg(22号)之间, 略高于国家一级土壤标准, 且各采样点之间As含量变化较小. 城陵矶As的含量在8.45mg/kg(24号)与48.56mg/kg(23号)之间, 各采样点之间变化较大.

洞庭湖各子湖区沉积物Cd的平均含量为: 南洞庭湖>东洞庭湖>西洞庭湖>大通湖>城陵矶, 且Cd的含量全部超过国家一级土壤标准(0.2mg/kg), 南洞庭湖和东洞庭湖、西洞庭湖均属于国家三级土壤标准(>0.6mg/kg). 东洞庭湖Cd的含量在0.07mg/kg(4号点)至14.94mg/kg(1号)之间, 且1号点Cd的含量最高, 是国家三级土壤标准的24.9倍. 南洞庭湖Cd的含量在0.04–23.34mg/kg之间, 6号点最高, 是国家三级土壤标准的38.9倍. 西洞庭湖Cd的含量在0.06–3.65mg/kg之间, 18号点最高, 是国家三级土壤标准的6.1倍. 大通湖Cd的含量在0.26–0.57mg/kg之间, 22号点最高, 但小于国家三级土壤标准. 城陵矶Cd的含量在0.14–0.46mg/kg之间, 也都远小于国家三级土壤标准.

洞庭湖各子湖区沉积物中Cr的平均含量大小顺序为: 大通湖>东洞庭湖>南洞庭湖>城陵矶>西洞庭湖, 且所有沉积物中Cr的含量都属于国家二级土壤标准(90–250mg/kg). 大通湖沉积物Cr的含量在102–133mg/kg之间, 东洞庭湖Cr的含量在18–152mg/kg之间, 3号点Cr的含量最高, 属于国家二级土壤标准. 南洞庭湖Cr的含量在38–159mg/kg之间, 11号点Cr的含量最高. 西洞庭湖Cr含量在54–329mg/kg之间, 14号点最高. 城陵矶Cr的含量在58–122mg/kg之间, 23号点Cr含量最高.

各子湖区沉积物中Cu的平均含量大小顺序为: 大通湖>东洞庭湖>南洞庭湖>城陵矶>西洞庭湖, 且Cu的平均含量均属于国家二级土壤标准(35–100mg/kg). 大通湖Cu的含量在47.8–63.2mg/kg之间, 东洞庭湖Cu的含量在10.3–85.8mg/kg之间, 南洞庭湖Cu的含量在15.7–84.5mg/kg之间, 西洞庭湖Cu的含量在12.9–83.1之间, 城陵矶Cu的含量在18.1–90.4mg/kg之间.

沉积物中Hg的含量只有西洞庭湖属于国家二级土壤标准(0.15–1.0mg/kg), 其它子湖区均属于国家一级土壤标准(<0.15mg/kg), 各子湖区沉积物中Hg平均含量的大小顺序为: 西洞庭湖>南洞庭湖>东洞庭湖>大通湖>城陵矶. 西洞庭湖Hg的含量在0.053–1.08mg/kg之间, 16号点最高, 略微超过国家三级土壤标准. 南洞庭湖Hg的含量在0.033–1.36mg/kg之间, 11号点最高, 为国家三级土壤标准的1.36倍. 东洞庭湖Hg的含量在0.016–0.71mg/kg之间, 1号点最高. 大通湖和城陵矶Hg的含量分别在0.052–0.106mg/kg和0.05–0.106之间.

沉积物中Ni的含量只有东洞庭湖和大通湖属于国家二级土壤标准(40–200mg/kg), 其它属于国家一级土壤标准, 且各子湖区Ni的平均含量大小顺序为: 大通湖>东洞庭湖>南洞庭湖>城陵矶>西洞庭湖. 大通湖Ni的含量在46.3–59.8mg/kg之间, 21号点最高. 东洞庭湖Ni的含量在9.2–65.2mg/kg之间, 2号点最高. 南洞庭湖Ni的含量在16.9–64.1mg/kg之间, 11号点最高. 西洞庭湖Ni的含量在18.8–60.5mg/kg之间, 14号点最高. 大通湖和城陵矶Ni的含量分别在46.3–59.8mg/kg、19.7–55.7mg/kg之间.

各子湖区沉积物中Pb平均含量的大小顺序为: 南洞庭湖>东洞庭湖>西洞庭湖>城陵矶>大通湖, 且沉积物中Pb的含量都属于国家二级土壤标准(35–350mg/kg). 南洞庭湖Pb的含量在21.3–199.1mg/kg之间, 7号点最高; 东洞庭湖Pb含量在15.1–145.8mg/kg, 1号点最高; 西洞庭湖Pb的含量在22.4–118.6mg/kg之间,

14号点最高; 大通湖和城陵矶Pb的含量分别在29-44.2mg/kg、22.5-46.3mg/kg之间。

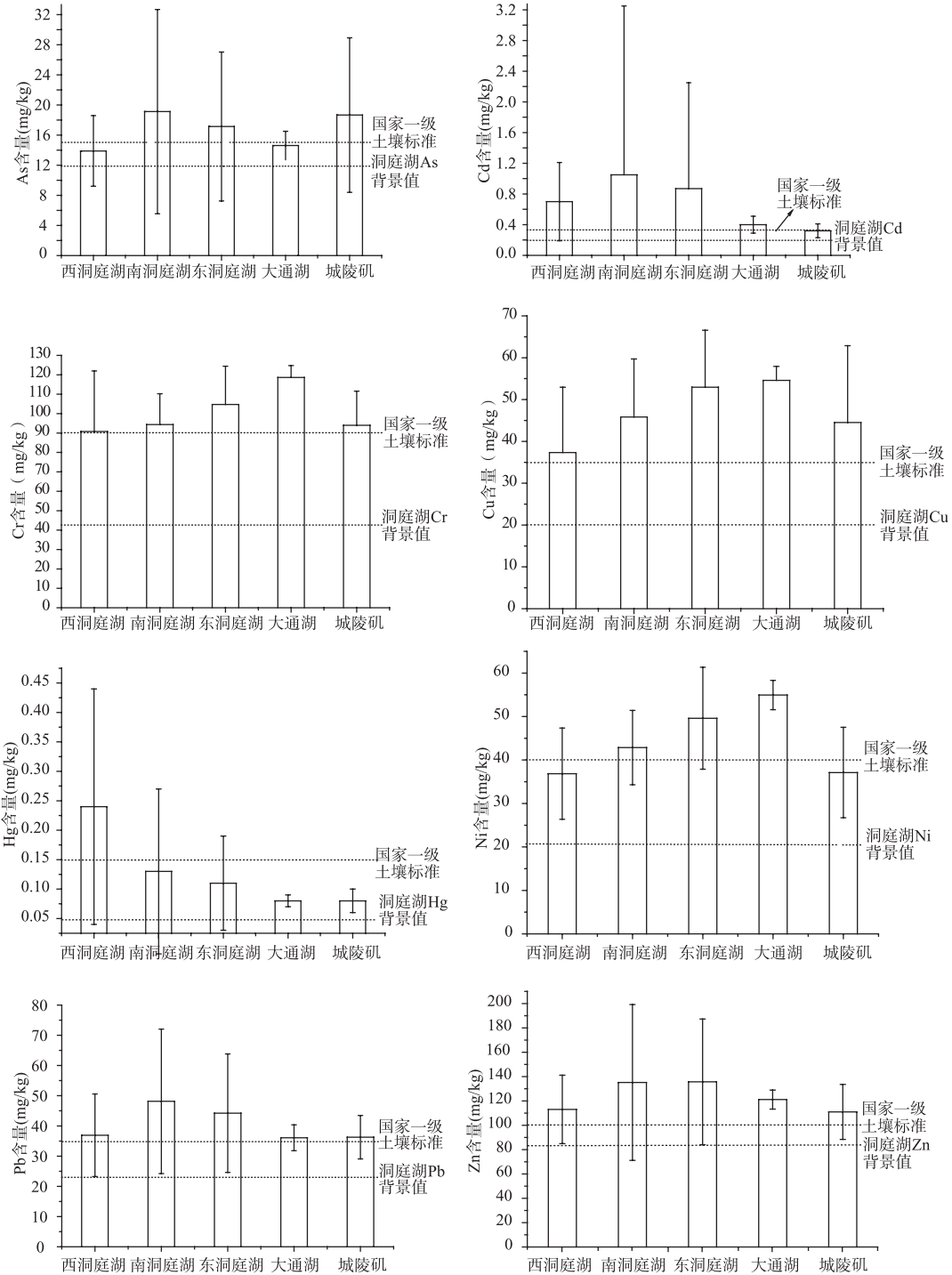


图2 洞庭湖各子湖区重金属的平均含量及参考标准

Fig.2 Content of heavy metal and standards in different lake of Lake Dongting

各子湖区沉积物中Zn的平均含量大小顺序为: 东洞庭湖>南洞庭湖>大通湖>西洞庭湖>城陵矶, 且沉积物中Zn的平均含量都属于国家二级土壤标准(100–300mg/kg). 东洞庭湖Zn的含量在29–474mg/kg之间, 1号点Zn含量最高, 是国家三级土壤标准的1.6倍. 南洞庭湖Zn的含量在51–614mg/kg之间, 6号点最高, 是国家三级土壤标准的2倍. 西洞庭湖Zn的含量在63–189mg/kg之间, 18号点Zn含量最高. 大通湖Zn的含量在102–133mg/kg之间, 21号点最高. 城陵矶Zn的含量在63–142mg/kg之间, 23号点最高.

总体来说, 大通湖是近乎封闭的水体, 8种重金属的含量较为均一. 西洞庭湖的沅江河口三角洲后部重金属的含量比前缘高, 这可能是因为三角洲后缘沉积物粒度较细, 且叠加了沅江和澧水沉积物的缘故. 东洞庭湖8种金属的含量变化都比较大, 且以汨罗江、新墙河入湖的河口三角洲及君山等处重金属含量较高, 这与姚志刚^[9]等得出东洞庭湖的鹿角至城陵矶段沉积物重金属污染相当严重的结论是相一致的, 同时也可能与汨罗江上游铅矿开采有关^[10]且重金属含量从东洞庭湖的东部向西北部逐渐变小, 在采桑湖和团洲附近重金属含量最小. 南洞庭湖以湘江和资水入湖的河口三角洲上沉积物重金属含量最高, 以东洞庭湖和南洞庭湖衔接处重金属含量最低. 城陵矶作为洞庭湖入江的唯一出口, 其沉积物重金属含量并不是洞庭湖沉积物中重金属含量最高的地方, 与姚志刚等得出的城陵矶沉积物重金属含量是洞庭湖沉积物中含量最高的结论是不一致的.

2.2 用地积累指数法评价洞庭湖沉积物的污染状况

地积累指数评价法(Geoaccumulation index, I_{geo})是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller^[11]于1979年提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标. 计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n}$$

式中: C_n 是实测元素 n 在沉积物中的含量; B_n 为该元素在普通页岩中的地球化学背景值; K 是考虑了各地岩石差异可能会引起的变动而取的系数(一般取1.5). 地积累指数可分为几个级别, 如Föstner等^[12]将其分为7级, 分级情况和污染程度分类见表1.

表1 重金属污染级别、地积累指数(I_{geo})和分级的比较

Tab.1 Comparison of polluted level of heavy metal, Geoaccumulation index (I_{geo}) and its classification

项目	污染程度分类						
	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染
I_{geo}	≤ 0	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6

考虑到不同的地球化学背景可能造成所获得的重金属的污染信息的差异, 本次研究选取洞庭湖水系水体沉积物背景值^[8]作为 B_n , 即: As为12.9mg/kg, Cd为0.33mg/kg, Cr为44mg/kg, Cu为20.2mg/kg, Hg为0.047mg/kg, Ni为21.2mg/kg, Pb为23.3mg/kg, Zn为83.3mg/kg, 同时考虑到区域地质差异 K 取1.5. 其计算结果如表2. 此外, 为了分析重金属的复合污染状况, 我们引入了综合地累积指数 I_{tot} , 并定义 I_{tot} 为一个地区所有重金属地累积指数 I_{geo} 的和值^[9].

从表3中可看出, 对西洞庭湖沉积物中的重金属的平均含量而言, As和Zn为清洁; Cd、Cr、Cu、Ni、Pb属于轻度污染; Hg属于偏中度污染. 对西洞庭湖沉积物中重金属的最高含量而言, As、Ni、Zn属于轻微污染, Cu、Pb属于偏中度污染, Cd、Cr属于中度污染, Hg则属于偏重污染. 就不同重金属而言, 西洞庭湖Hg污染最严重, Cd、Cr次之, As和Zn最轻.

对南洞庭湖沉积物中的重金属的平均含量而言, As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn属于轻度污染, Cd属于偏中度污染. 对南洞庭湖沉积物中重金属的最高含量而言, Cd属于严重污染, Hg属于重污染, As、Pb、Zn的属于中度污染, Cr、Cu、Ni属于偏中度污染. 就不同重金属而言, 南洞庭湖Cd污染最严重, Hg次之, Cr、Cu、Ni最轻.

对东洞庭湖沉积物重金属的平均含量而言, As属于轻度污染; Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn属于偏中度污染. 对于东洞庭湖沉积物中重金属的最高含量而言, Cd属于重污染, Hg属于偏重污染, Pb属于中度

污染, As、Cr、Cu、Ni属于偏中度污染. 就不同重金属而言, 东洞庭湖Cd污染最严重, Hg次之, Pb再次之, As最轻.

对大通湖沉积物重金属的平均含量而言, Cr、Cu、Hg、Ni、Pb属于轻度污染, As、Cd、Zn属于清洁. 对大通湖沉积物重金属的最高含量而言, Cr、Cu属于偏中度污染, Cd、Hg、Ni、Pb、Zn属于轻度污染, As属于清洁.

表2 洞庭湖重金属污染元素的地积累指数(I_{geo})及分级*

Tab.2 Geoaccumulation index and its classification of heavy metals from Lake Dongting sediments.

湖区		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	I_{tot}
西洞庭湖	$I_{geoA}^{1)}$	-0.37	0.50	0.46	0.30	1.77	0.21	0.08	-0.14	2.81
	分级	0	1	1	1	2	1	1	0	3
	$I_{geoM}^{2)}$	0.85	2.88	2.32	1.46	3.94	0.93	1.76	0.6	
南洞庭湖	分级	1	3	3	2	4	1	2	1	
	I_{geo}	0.09	1.08	0.52	0.60	0.88	0.43	0.46	0.11	4.17
	分级	1	2	1	1	1	1	1	1	5
东洞庭湖	I_{geoM}	2.27	5.56	1.27	1.48	4.27	1.01	2.51	2.30	
	分级	3	6	2	2	5	2	3	3	
	I_{geoA}	-0.07	0.81	0.67	0.81	0.64	0.64	0.34	0.12	3.96
大通湖	分级	0	1	1	1	1	1	1	1	4
	I_{geoM}	1.84	4.92	1.2	1.5	3.33	1.04	2.06	1.92	
	分级	2	5	2	2	4	2	3	2	
城陵矶	I_{geoA}	-0.30	-0.31	0.85	0.85	0.18	0.79	0.05	-0.04	2.07
	分级	0	0	1	1	1	1	1	0	3
	I_{geoM}	-0.07	0.2	1.01	1.06	0.59	0.91	0.34	0.09	
全湖	分级	0	1	2	2	1	1	1	1	
	I_{geoA}	0.05	-0.63	0.51	0.56	0.18	0.22	0.05	-0.17	0.77
	分级	1	0	1	1	1	1	1	0	2
城陵矶	I_{geoM}	1.33	-0.11	0.89	1.58	0.59	0.81	0.41	0.18	
	分级	2	0	1	2	1	1	1	1	
	I_{geoA}	-0.13	0.90	0.59	0.67	0.91	0.51	0.35	0.09	
全湖	分级	0	1	1	1	1	1	1	1	

* 1) I_{geoA} 由沉积物平均值计算的 I_{geo} ; 2) I_{geoM} 由沉积物最高值计算的 I_{geo} .

表3 洞庭湖各子湖区主成分因子的贡献率

Tab.3 Cumulative ratio of principal component factors in Lake Dongting

	PC1贡献率(%)	PC2贡献率(%)	PC3贡献率(%)	累计贡献率(%)
西洞庭湖	45.50	24.00	15.80	85.30
南洞庭湖	55.22	30.04		85.26
东洞庭湖	56.86	33.11		89.97
大通湖	59.96	16.27	11.93	88.16
城陵矶	60.23	17.50	13.74	91.47

对城陵矶沉积物重金属的平均含量而言, Cd、Zn属于清洁, As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn属于轻度污染. 对城陵矶沉积物重金属的最高含量而言, As、Cu属于偏中度污染, Cr、Hg、Ni、Pb、Zn属于轻度污染, Cd属于清洁.

对洞庭湖各子湖区沉积物中重金属的复合污染状况进行评价, 结果是: 南洞庭湖(重污染)>东洞庭湖(偏重污染)>西洞庭湖(中度污染)>大通湖(中度污染)>城陵矶(轻度污染). 同时可以看出, 洞庭湖沉积物中的主要重金属污染物是Cd和Hg, 且主要污染点集中在河流入湖的三角洲上, 西洞庭湖由于沅江和澧水共同注入, 主要污染点集中在三角洲的后缘而不是前缘, 与东洞庭湖和南洞庭湖不同.

2.3 洞庭湖沉积物重金属主成分分析

为了进一步揭示重金属元素之间的相互关系, 对洞庭湖各子湖区沉积物中各种污染物进行主成分分析求出因子载荷矩阵, 探讨该地区沉积物中重金属含量的相互关系. 通过主成分分析计算, 洞庭湖各子湖区的主成分因子的载荷和主成分因子的贡献率如图3和表3.

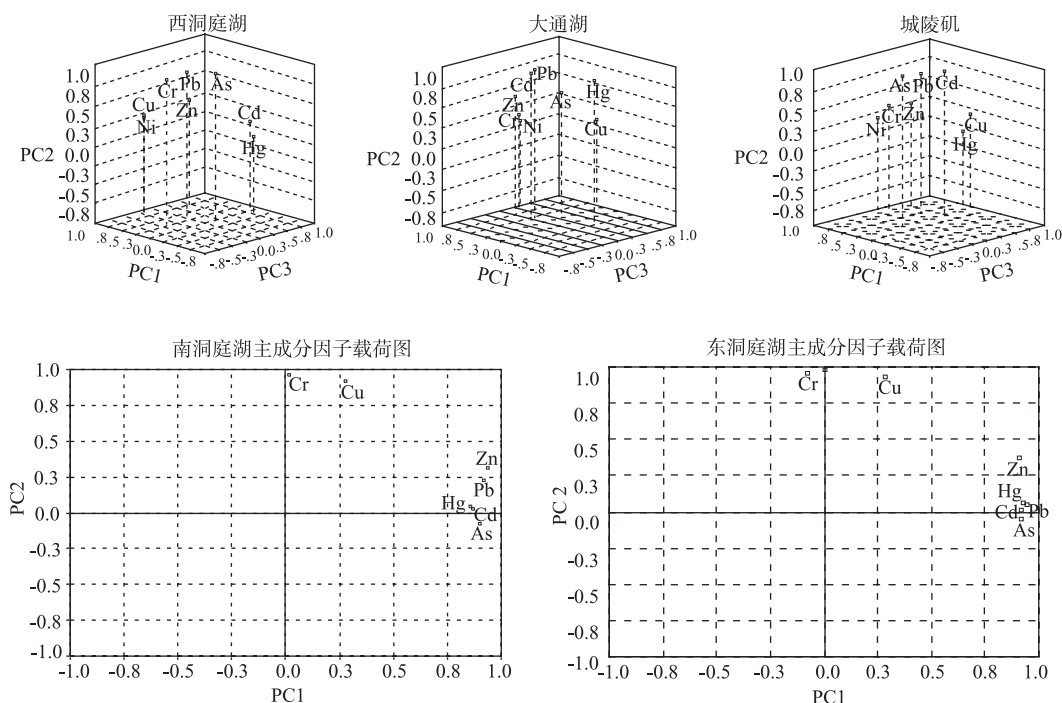


图3 洞庭湖各子湖区主成分因子载荷

Fig.3 Loading plots of principal component factors in Lake Dongting

西洞庭湖第一主成分(PC1)的贡献率为45.5%, 特点表现为因子变量在Cu、Ni、Zn的浓度上有较高的正载荷, 也就是第一主成分反映了Cu、Ni、Zn的富集程度; 第二主成分(PC2)的贡献率为24%, 特点表现为因子变量在As、Cr、Pb的浓度上有较高的正载荷, 也就是说第二主成分因子反映了As、Cr、Pb的富集程度; 第三主成分(PC3)的贡献率为15.8%, 特点表现为Cd、Hg的浓度上有较高的正载荷, 第三主成分因子反映了Cd、Hg的富集程度, 同时Zn受第一主成分因子与第三主成分因子的共同支配.

南洞庭湖第一主成分的贡献率为55.22%, 特点表现为因子变量在As、Cd、Hg、Pb、Zn的浓度上有较高的正载荷, 第一主成分反映了As、Cd、Hg、Pb、Zn的富集程度; 第二主成分的贡献率为30.04%, 特点表现为因子变量在Cr、Cu、Ni的浓度上有较高的正载荷, 第二主成分反映了Cr、Cu、Ni的富集程度.

东洞庭湖第一主成分的贡献率为56.86%，特点表现为因子变量在As、Cd、Hg、Pb、Zn的浓度上有较高的正载荷，第一主成分反映了As、Cd、Hg、Pb、Zn的富集程度；第二主成分的贡献率为33.11%，特点表现为因子变量在Cr、Cu、Ni的浓度上有较高的正载荷，第二主成分反映了Cr、Cu、Ni的富集程度。

大通湖第一主成分的贡献率为59.96%，特点表现为因子变量在As、Cd、Cr、Ni、Pb、Zn的浓度上有较高的正载荷，第一主成分反映了As、Cd、Cr、Ni、Pb、Zn的富集程度；第二主成分的贡献率为16.27%，特点表现为因子变量在Hg上有较高的正载荷，第二主成分反映了Hg的富集程度；第三主成分的贡献率为11.93%，特点表现为因子变量在Cu的浓度上有较高的正载荷，第三主成分反映了Cu的富集程度，同时，Cr和Zn在第一、第二和第三主成分都有较高的正载荷，说明Cr和Zn受第一、第二、第三主成分的共同支配。

城陵矶第一主成分的贡献率为60.23%，特点表现为因子变量在Cr、Ni、Pb、Zn的浓度上有较高的正载荷，第一主成分反映了Cr、Ni、Pb、Zn的富集程度；第二主成分的贡献率为17.50%，特点表现为因子变量在As、Cd、Pb的浓度上有较高的正载荷，第二主成分反映了As、Cd、Pb的富集程度；第三主成分的贡献率为13.74%，特点表现为因子变量在Cu、Hg的浓度上有较高的正载荷，第三主成分反映了Cu、Hg的富集程度，Cu、Pb、Zn同时也受第一、第二和第三主成分的共同支配。

综上所述，洞庭湖各子湖区8种污染物的全部信息可由三个主成分反映大于85%的信息，即对前三个主成分进行分析已经能反映全部数据的大部分信息^[13-14]。通过主成分分析可知，南洞庭湖与东洞庭湖的As、Cd、Hg、Pb、Zn主要受第一主成分的支配，可归为一类，且其相应的最高点分别集中在湘江和资水入南洞庭湖的河口三角洲与汨罗江和新墙河入东洞庭湖的河口三角洲上，说明As、Cd、Hg、Pb、Zn主要来源于洞庭湖入湖的河水，而Cr、Cu、Ni则主要受第二主成分的支配，可归为一类，且各采样点之间变幅不大，受洞庭湖河流来水的影响不大。西洞庭湖由于沅江和澧水的相互作用，且入湖河流三角洲的沉积物的重金属含量是后缘比前缘高，可能是沅江与澧水相互顶托，使悬浮颗粒的凝聚作用和重金属的沉淀或沉积作用增强，使As、Cd、Cu、Cr、Hg、Ni、Pb、Zn在主成分分析时，使其在主成分因子上的载荷受到影响。大通湖沉积物重金属各采样点之间变化不大，但Hg和Cu分别受第二和第三主成分的支配，可能是受大通湖渔业养殖用药影响较大的缘故。城陵矶作为洞庭湖的唯一出水口，受长江和洞庭湖的共同影响，因此在主成分分析时，因此重金属元素在主成分因子上的载荷与东洞庭湖、南洞庭湖不同。

3 结论

洞庭湖各子湖区沉积物中Zn、Pb、Cu、Cr、Cd的平均含量都属于国家土壤二级标准；As的平均含量是西洞庭湖和大通湖属于国家一级土壤标准，东洞庭湖、南洞庭湖、城陵矶属于国家二级土壤标准；Hg的平均含量是西洞庭湖属于国家二级土壤标准，东洞庭湖、南洞庭湖、大通湖和城陵矶属于国家一级土壤标准；Ni的平均含量是西洞庭湖河城陵矶属于国家一级土壤标准，东洞庭湖、南洞庭湖和大通湖属于国家二级土壤标准。南洞庭湖和东洞庭湖重金属含量的最高点大都集中在河流入湖的三角洲的前缘，而西洞庭湖沉积物重金属的最高含量则是河流入湖的三角洲的后缘。

利用地积累指数法对洞庭湖各子湖区沉积物中重金属的复合污染状况进行评价，结果表明：南洞庭湖(重污染)>东洞庭湖(偏重污染)>西洞庭湖(中度污染)>大通湖(中度污染)>城陵矶(轻度污染)。洞庭湖沉积物中的主要重金属污染物是Cd和Hg，且主要污染点集中在河流入湖的三角洲上，西洞庭湖由于沅江和澧水共同注入，主要污染点集中在三角洲的后缘而不是前缘，与东洞庭湖和南洞庭湖不同。

洞庭湖各子湖区8种污染物的全部信息可由三个主成分反映大于85%的信息，即对前三个主成分进行分析就已经能反映全部数据的大部分信息。南洞庭湖与东洞庭湖As、Cd、Hg、Pb、Zn主要受第一主成分支配，而Cu、Cr、Ni主要受第二主成分支配；而西洞庭湖、大通湖、城陵矶因沉积物重金属来源不同，主成分分析结果也相差较大。

致谢：感谢湖南省地质研究所提供的数据。

4 参考文献

- [1] Forstner U, Wittmann GTW. Metal pollution in the Aquatic Environment. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 110-192.
- [2] Rognerud S, Field E. Trace element contamination of Norwegian Lake sediments. *Ambio*, 2001, **30**(1): 11-19.
- [3] Tessier A, Tumer DR. Metal speciation and bioavailability in aquatic systems. Chichester: John Wiley & Sons, 1995: 670.
- [4] Bocher P, Caurant F, Miramand P *et al.* Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zooplankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean. *Polar Biol*, 2003, **26**: 759-767.
- [5] 窦鸿身, 姜加虎. 洞庭湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [6] 湖南省政协经济科技委员会编. 三峡工程与洞庭湖关系研究. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2002: 179-182.
- [7] GB15618-95. 土壤环境质量标准. 1995.
- [8] 李 健, 曾北危, 姚岳云等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究. *环境科学*, 1986, **7**(4): 62-68.
- [9] 姚志刚, 鲍征宇, 高 璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学. *地球化学*, 2006, **35**(6): 629-638.
- [10] 湘水政(2006)3号. 关于进一步加强湘江流域水资源管理的紧急通知. 2006.
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [12] Forstner U. Contaminated sediments: Lectures on environmental aspects of particle-associated chemicals in aquatic systems. Lecture Notes in Earth Sciences (Vol.21). Berlin: Springer-Verlag, 1989: 107-109.
- [13] 高吉喜, 段飞舟, 香 宝. 主成分分析在农田土壤环境评价中的应用. *地理研究*, 2006, **25**(5): 836-842.
- [14] 李 玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源. *环境科学*, 2006, **27**(1): 137-141.