

南四湖表层沉积物重金属的空间分布、来源及污染评价

刘 良, 张祖陆

(山东师范大学, 人口·资源与环境学院, 济南 250014)

摘要:为研究南四湖表层沉积物中重金属的含量、分布与污染特征,采集了29个表层沉积物站点并测定了8种重金属含量。采用主成分、相关性、聚类法分析了重金属的来源,同时运用地累积指数法和潜在生态风险指数法综合评价了南四湖沉积物中重金属的污染现状和潜在生态风险。结果表明:(1)南四湖表层沉积物中,As、Hg、Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、Ni的平均含量分别为14.41、0.048、25.69、71.10、0.22、30.14、87.55、35.33 mg/kg,其中As、Hg、Pb、Cd均超过环境背景值,在空间上表现出上级湖高、下级湖低的分布特征;(2)相关性、主成分以及聚类分析显示,Pb、Cr、Cu、Zn、Ni具有同源性,为自然源元素;As和Cr具有同源性,为人为源元素;Hg的主要来源与其他几种重金属不同,受自然地质背景与人类活动的双重影响;(3)地累积指数法评价结果表明,南四湖沉积物重金属元素的污染程度为:Hg > Cd > As > Pb > Cr > Zn > Ni > Cu, Hg、Cd、As、Pb已处于无污染—中度污染程度,而其它元素无污染;(4)潜在生态指数法研究结果表明,南四湖表层沉积物单项重金属生态风险程度顺序为:Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Cr, Hg和Cd具有较高的生态风险等级,为主要的生态风险贡献因子,其它7种重金属元素均为低生态风险等级。综合分析可见,Hg、Cd、As、Pb为南四湖表层沉积物主要重金属污染元素,各湖区沉积物污染程度由高至低依次为:南阳湖 > 独山湖 > 微山湖 > 昭阳湖。

关键词:沉积物;重金属;空间分布;污染评价;南四湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2013)06-0007-09

南四湖位于山东省西南部(34°27′~35°20′N; 116°34′~117°21′E),是南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖相互连贯的湖泊总称,是南水北调东线工程的重要调蓄枢纽。南四湖总面积1 266 km²,流域面积30 453 km²,平均水深1.46 m,属于浅水大型淡水草型湖泊。自1960年二级坝建成后,南四湖被分为上级湖与下级湖两大部分。坝北为上级湖,注入河流29条,集流面积26 934 km²,占总集流面积的88.4%;坝南为下级湖,注入河流24条,集流面积为3 519 km²,占总集流面积的11.6%。

湖泊是陆源沉积物迁移转化的归宿地与积蓄库(王莹等,2013),而重金属是湖泊沉积物中重要污染物之一,湖泊中的重金属以沉积物为储存介质。当重金属储存环境的理化性质发生变化时,则通过沉积物—水界面向湖泊水体释放,造成沉积物上覆水体的二次污染(赵大勇等,2012);另一方面,沉积

物释放出的重金属可能被水生生物利用转化而富集于生物体内,并通过食物链影响周边生态环境与人体健康(宋静宜等,2013)。南四湖是华北地区最大的淡水湖泊,近几年来随着入湖河流周边工农业废物与生活污水的排放,其污染负荷增加、水质变差、生态环境恶化(杨丽原等,2003;孟祥华等,2010)。水体沉积物污染已经成为当前环境研究的热点(罗先香等,2010;Selvam et al, 2012;冀永般等,2012;杨辉等,2013)。

目前已有的研究多集中在南四湖入湖河流、上级湖重金属元素的空间分布及组成形态方面,而对于全湖区重金属的污染分布及生态风险的定量评价研究较少。本文通过对南四湖表层沉积物中的重金属元素进行分析,在研究表层沉积物空间分布特征的基础上,探讨了重金属的来源及与其它指标的关系,并且综合运用地累积指数法和Haksanson潜在生态风险指数法对南四湖表层沉积物污染现状及其潜在风险进行了评估,定量分析其表层沉积物中的主要污染元素、主要潜在生态风险因子以及污染程度区域分异,旨在为南四湖重金属污染综合防治与南水北调工程东线南四湖段水污染、生态环境的整治与改善提供一定的理论依据。

收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家重大水专项项目“南水北调东线南四湖水质综合改善方案及集成技术规范”(2009ZX07210-007-01)。

通讯作者:张祖陆,1949年生,男,教授,博士生导师。E-mail: zuzhang@126.com

作者简介:刘良,1988年生,男,硕士研究生,研究方向为水环境与水生态。E-mail: chinaliuliang@126.com

1 材料与方法

1.1 采样点布设

2010年9月,在南四湖进行了全湖调查采样。采用重力采样器对29个站点进行了表层底泥(0~2 cm)采集,每个站点至少采集2个平行样,各站点

使用GPS进行定位,站点分布位置见图1。其中1~9号站点位于南阳湖,10~15号站点位于独山湖,16~18号站点位于坝北昭阳湖,19~22号站点位于坝南昭阳湖,23~29号站点位于微山湖。由于南四湖水深较浅,湖底较为平坦,站点的布设基本能反映湖区沉积物的分布状况。

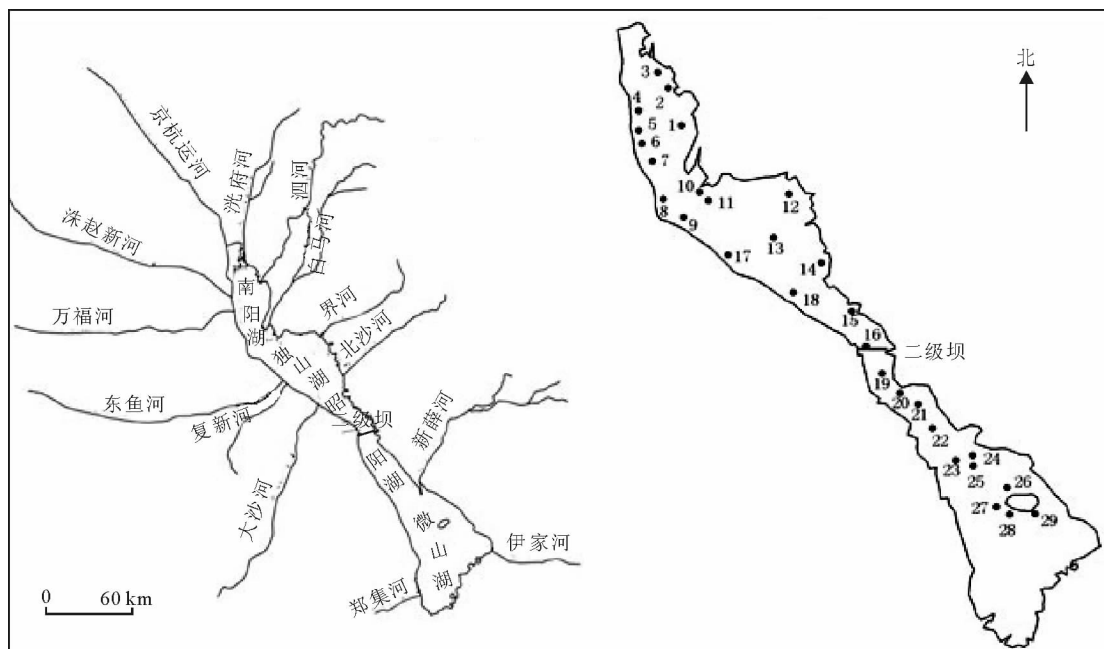


图1 南四湖河流水系与采样站点分布

Fig.1 River systems and sampling sites distribution in Nansihu Lake

1.2 样品处理

采集样品后密封于聚乙烯塑料袋中,低温保存运回实验室进行预处理及分析。样品经过低温冷冻干燥后去除杂质进行研磨并过200目筛,充分混合均匀后密封冷藏保存于玻璃瓶中备用。样品的测定分析由济南矿产资源监督检测中心协助完成,重金属分析项目主要有As、Hg、Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、Ni;其中As和Hg采用双道原子荧光分光光度计进行测定;Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni采用全谱直读等离子体发射光谱仪进行测定。检测分析严格按照GB/T5009-2003、DZG20.3-1987国家标准执行。所测样品分析均设置2个平行样,相对标准偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内。

2 结果与分析

2.1 重金属含量与空间分布特征

根据29个站点的调查数据,分析得出南四湖表层底泥中重金属的分布状况(表1)。

由表1可以看出,南四湖表层沉积物中,生物毒性显著元素As、Hg、Pb的平均含量为14.41、0.048、

25.69 mg/kg;生物毒性较弱元素Cr、Cd、Cu、Zn、Ni的平均含量为71.10、0.22、30.14、87.55、35.33 mg/kg,与王晓军等(2005)分析结果相比,As、Pb、Cr、Ni的平均含量均有不同程度的增长;其中As、Hg、Pb、Cd的平均含量均明显高于环境背景值(杨丽原等,2003),Cr、Cu、Zn、Ni的平均含量与环境背景值相近。由此可见南四湖表层沉积物中,As、Hg、Pb、Cr、Ni均有相当程度的富集,特别是As、Hg、Pb生物毒性较强元素的富集系数很大,表明南四湖表层沉积物的该类重金属污染较为严重,生态环境受到破坏。

从空间变异特征来看,Pb、Cr、Cu、Zn、Ni的变异系数较小,分别为13.93%、14.36%、17.60%、14.13%、15.88%,说明这5种元素在湖区表层沉积物中分布较为均匀。As、Hg、Cd的变异系数较大,分别为29.68%、51.77%、40.18%,表明这3种重金属在湖区含量变化大,分异显著,尤其是Hg元素。As分别在南四湖与微山湖出现2个高值中心点,分别为8号和29号站点,含量为23.79 mg/kg和24.93 mg/kg,分别是环境背景值的3.17倍和3.32

表 1 不同湖区表层沉积物重金属范围、平均值、富集系数及变异系数
Tab.1 Statistics for range, mean value, enrichment coefficient and variable
coefficient of hevey metals in surface sediments

湖区	参数	As	Hg	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni
南阳湖	范围/mg · kg ⁻¹	7.49 ┆	0.025 ┆	18.85 ┆	69.38 ┆	0.17 ┆	27.30 ┆	86.70 ┆	31.60 ┆
		23.79	0.119	33.45	85.77	0.33	35.60	125.70	41.65
	平均值/mg · kg ⁻¹	15.03	0.055	25.64	75.95	0.22	30.78	96.98	37.02
独山湖	范围/mg · kg ⁻¹	7.90 ┆	0.040 ┆	23.78 ┆	37.88 ┆	0.11 ┆	27.90 ┆	84.50 ┆	34.58 ┆
		16.20	0.108	28.27	68.90	0.23	40.20	104.40	48.10
	平均值/mg · kg ⁻¹	11.65	0.055	25.62	79.14	0.16	36.30	95.87	40.69
坝北 昭阳湖	范围/mg · kg ⁻¹	13.36 ┆	0.038 ┆	22.70 ┆	63.74 ┆	0.21 ┆	28.20 ┆	82.90 ┆	31.30 ┆
		19.61	0.077	33.84	75.27	0.26	33.40	95.80	36.76
	平均值/mg · kg ⁻¹	15.55	0.057	28.91	70.27	0.24	31.27	90.83	34.29
坝南 昭阳湖	范围/mg · kg ⁻¹	8.91 ┆	0.014 ┆	21.21 ┆	54.20 ┆	0.14 ┆	22.20 ┆	67.00 ┆	27.33 ┆
		15.67	0.047	30.20	82.68	0.25	37.50	104.90	42.88
	平均值/mg · kg ⁻¹	11.79	0.033	24.74	65.53	0.20	27.65	81.25	32.60
微山湖	范围/mg · kg ⁻¹	11.39 ┆	0.006 ┆	19.49 ┆	47.70 ┆	0.11 ┆	20.60 ┆	68.60 ┆	27.15 ┆
		24.93	0.061	30.20	69.24	0.45	27.40	94.60	35.53
	平均值/mg · kg ⁻¹	16.97	0.037	24.99	61.52	0.26	24.99	81.43	30.56
总平均值/mg · kg ⁻¹		14.41	0.048	25.69	71.10	0.22	30.14	87.55	35.33
环境背景值/mg · kg ⁻¹		7.50	0.015	15.00	60.00	0.007	33.90	90.00	31.60
富集系数		1.92	3.20	1.71	1.19	3.14	0.89	0.92	1.11
变异系数/%		29.68	51.77	13.93	14.36	40.18	17.60	14.13	15.88

倍;Hg在南阳湖与独山湖出现2个高值中心点,为4号和10号站点,含量分别为0.119 mg/kg和0.108 mg/kg,分别高出环境背景值7.9倍和7.2倍;Cd分别在南阳湖与微山湖出现4个高值中心点,为4、27、28、29号站点,含量分别为0.33、0.45、0.33、0.45 mg/kg,分别高出环境背景值4.29、5.84、4.29、5.84倍。

从以上分布特征可知,南四湖各湖区表层沉积物的重金属含量分布特征是:①由于京杭运河、泗河、洙赵新河、洸府河重金属人为污染较重河流的注入(刘恩峰等,2007),大量工业废水和生活污水未经处理排入湖中,外部污染负荷大,导致南阳湖与独山湖沉积物中重金属含量相对较高,是南四湖表层沉积物中重金属污染程度最重的区域;②由于微山湖近几年大力发展旅游业,人口分布较为集中,生活污水和旅游业产生的大量垃圾排放到湖中,造成湖泊水体污染;同时微山湖面积较大,水的流速变缓,挟沙能力降低,沉积物粒径由上游到下游逐渐变细,粒径越细对重金属的吸附能力越强,局部富营养化严重,形成表层沉积物重金属含量较高区域;③昭阳湖位于湖泊上、下级湖中间河段的运河船闸处,水流

循环能力强;该湖周围少有污染严重的河流注入,同时排入上级湖泊的污水经过南阳湖与独山湖的沉积净化作用,到达昭阳湖的水质相对较好,因此昭阳湖表层沉积物的重金属含量相对较低,是较为清洁的区域。

2.2 表层沉积物重金属来源

2.2.1 重金属元素间的相关性分析 利用SPSS19.0软件分析南四湖表层沉积物各重金属元素间的相关系数,结果如表2所示。

由表2可以看出,重金属元素Pb-Zn、Cr-Ni、Cu-Ni、Zn-Cr、Zn-Cu、Zn-Ni之间的Person相关系数较大,分别为0.626、0.959、0.814、0.738、0.775、0.771,说明Pb、Cr、Cu、Zn、Ni之间具有很好的相关性,可能具有相同的来源。As-Cd的Person相关系数为0.607,表明这2种元素也可能具有同源性。Hg与其它元素的相关系数均比较小,相关性较弱。为了辨别这几种元素之间的联系和来源,采用主成分和聚类分析法进一步判定。

2.2.2 重金属元素的主成分分析 主成分分析与聚类分析法是判别重金属来源的有效方法(吕建树等,2012)。通过主成分分析法,从8种重金属中提

表 2 南四湖表层沉积物重金属元素间的相关系数

Tab.2 Correlations coefficient for the heavy metals in surface sediments from Nansihu Lake

元素	As	Hg	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni
As	1							
Hg	-0.081	1						
Pb	0.310	0.331	1					
Cr	-0.068	0.295	0.456 **	1				
Cd	0.607 **	0.325	0.319	-0.333	1			
Cu	-0.004	0.387 *	0.474 **	0.800 **	-0.117	1		
Zn	0.298	0.575 **	0.626 **	0.738 **	0.256	0.775 **	1	
Ni	-0.076	0.230	0.426 *	0.959 **	-0.319	0.814 **	0.771 **	1

注: ** 相关系数在 0.01 水平上显著相关; * 相关系数在 0.05 水平上显著相关。

Note: ** The correlation coefficient is significant associated at the 0.01 level; * The correlation coefficient is significant associated at the 0.05 level.

取出 2 个主成分 (PC), 这 2 个主成分累计解释了总方差的 75.47% (表 3)。PC1 的方差贡献率为 49.80%, 元素 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 在 PC1 上有较大的载荷, 分别为 0.668、0.904、0.897、0.919、0.888。PC2 的方差贡献率为 25.67%, As、Cd 在第二主成分上有较大载荷, 分别为 0.776、0.945。当一种重金属元素在不同的主成分上均有一定的载荷时, 可以认为其具备不同的主成分来源 (唐阵武等, 2009)。由图 2 可知, Hg 和 Pb 在 PC1、PC2 上均有相当程度的载荷, 说明这 2 种元素的来源可能受到自然地质背景与人类活动的双重影响。

表 3 南四湖表层沉积物重金属主成分载荷

Tab.3 Principal component load of heavy metals in sediments from Nansihu Lake

元素	PC1	PC2
As	0.102	0.766
Hg	0.552	0.284
Pb	0.668	0.409
Cr	0.904	-0.333
Cd	-0.003	0.945
Cu	0.897	-0.146
Zn	0.919	0.268
Ni	0.888	-0.349
方差贡献率/%	49.80	25.67
累计方差贡献率/%	49.80	75.47

2.2.3 重金属元素的聚类分析 聚类分析能够直观的看出各重金属元素之间的远疏距离, 最先连接且距离最短的元素之间来源近似, 距离的长短代表元素间来源的差异程度 (张清海等, 2013)。由图 3 可以看出, Cu、Ni、Zn、Cr、Pb 的距离最近, 说明这几种元素可能具有同源性, 而与其它元素来源差异最大的则是 Hg。在聚类分析树状图上, 当距离小于 10 时, 8 种重金属可以分为 3 大类: 第一类是 Cu、Ni、Zn、Cr、Pb; 第二类是 As、Cd; 第三类是 Hg。由此可以推测 Cu、Ni、Zn、Cr、Pb 元素具有相同或相似的污染源, As、Cd 具有同源性, Hg 元素与其它元素

的同源性联系较小。聚类分析法将 8 种重金属进行分类, 验证了主成分分析的结果。

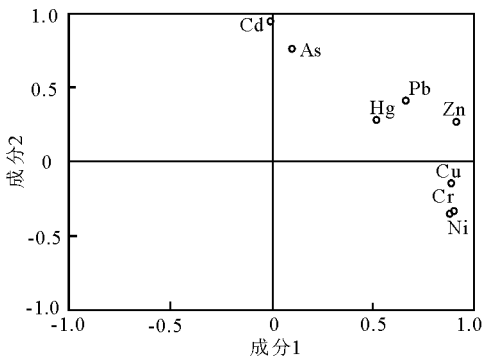


图 2 不同重金属元素的主成分载荷

Fig.2 Principal component load of different heavy metal elements

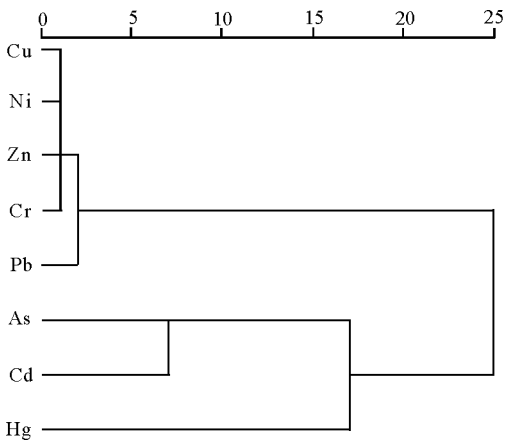


图 3 南四湖表层沉积物重金属元素聚类分析结果

Fig.3 Clustering analysis result of heavy metals in surface sediments from Nansihu Lake

2.2.4 重金属来源分析 由南四湖表层沉积物中重金属含量及空间分布特征 (表 1) 可知, Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 元素在沉积物中含量的平均值均接近于背景值, 相关性较强, 变异系数较低, 说明这些元素在沉积物中分布比较均匀, 以自然沉积为主, 较少受到人为干扰, 属于“自然源元素”, 这些元素主要与

东部山区岩石风化释放与周围土壤侵蚀有关。As、Cd 元素在沉积物中含量的平均值均高于背景值,元素间的相关性较强,变异系数较大,说明这 2 种元素在湖底沉积物中分布不均匀,受人为因素的影响较大,属于“人为源元素”。南四湖周边医院、化肥、纺织和印刷等行业产生的含砷废水排放及济宁市燃煤企业向大气中排放的砷是底泥 As 的重要来源;而 Cd 主要来源于湖区周边农药与化肥的大量使用以及冶金、电镀等工业产生的大量废水(章明奎等,2008;赵彦锋等,2008;谢小进等,2010);Hg 和 Pb 的人为干扰因素主要是来自湖区周边城市生活污水和工业废水的大量排放,同时南四湖东部地区是我国重要的煤田能源基地,煤炭消耗量较大,其燃烧过程中产生的 Hg、Pb 经过一系列的迁移转化工程进入水体,成为湖泊底泥 Hg、Pb 的重要来源。

2.3 重金属污染评价

2.3.1 沉积物重金属地累积指数评价 重金属地累积指数法由 Muller(1969)提出,是一种被专家学者广泛应用于水体重金属污染评价的定量指标(余辉等,2011;张华俊等,2012;于万辉等,2012;张雷等,2013)。地累积指数法计算公式如下:

表 5 南四湖表层沉积物重金属地累积污染指数的分布

Tab.5 Distribution of cumulative pollution index for heavy metals in surface sediment of the Nansihu Lake

湖区	参数	污染值与分级							
		As	Hg	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni
南阳湖	范围	-0.59 ~ 1.08	0.15 ~ 2.40	-0.26 ~ 0.57	-0.36 ~ -0.07	0.56 ~ 1.51	-0.90 ~ -0.51	-0.47 ~ 0.07	-0.58 ~ -0.19
	平均值	0.35	1.11	0.17	-0.25	0.88	-0.73	-0.32	-0.36
	级别	1	2	1	0	1	0	0	0
独山湖	范围	-0.51 ~ 0.53	0.83 ~ 2.26	0.08 ~ 0.33	-0.38 ~ -0.03	-0.07 ~ 0.99	-0.87 ~ -0.34	-0.51 ~ -0.20	-0.45 ~ 0.02
	平均值	0.01	1.18	0.18	-0.19	0.39	-0.50	-0.23	-0.23
	级别	1	2	1	0	1	0	0	0
坝北昭阳湖	范围	-0.34 ~ 0.48	0.15 ~ 1.06	-0.04 ~ 0.42	-0.73 ~ -0.12	0.64 ~ 1.11	-1.20 ~ -0.44	-0.81 ~ -0.19	-0.79 ~ -0.58
	平均值	0.11	0.11	0.19	-0.44	0.93	-0.83	-0.50	-0.51
	级别	1	1	1	0	1	0	0	0
坝南昭阳湖	范围	-0.22 ~ 1.00	-0.68 ~ 1.78	-0.09 ~ 0.59	-0.58 ~ -0.26	0.27 ~ 1.17	-1.17 ~ -0.61	-0.84 ~ -0.32	-0.74 ~ -0.37
	平均值	0.46	0.78	0.24	-0.42	0.86	-0.82	-0.51	-0.53
	级别	1	1	1	0	1	0	0	0
微山湖	范围	0.02 ~ 1.15	-1.91 ~ 1.44	-0.21 ~ 0.42	-0.92 ~ -0.38	-0.07 ~ 1.96	-1.30 ~ -0.89	-0.34 ~ -0.81	-0.94 ~ -0.42
	平均值	0.56	0.46	0.14	-0.56	0.96	-1.03	-0.57	-0.64
	级别	1	1	1	0	1	0	0	0
总均值		0.32	0.89	0.19	-0.36	0.80	-0.78	-0.43	-0.44
总级别		1	1	1	0	1	0	0	0

由表 5 可以看出,南四湖表层沉积物重金属污染程度顺序依次为: Hg > Cd > As > Pb > Cr > Zn > Ni > Cu;其中,Hg、Cd、As、Pb 元素均达到 1 级污染水平,属于无-中度污染,是南四湖最主要的重金属污染元素;Cr、Zn、Ni、Cu 元素 I_{geo} 值均为 0,属于无污染。

$$I^n_{geo} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)]$$

(1)

式(1)中: I^n_{geo} 为重金属 n 的地累积指数; C_n 为重金属 n 在沉积物中的含量(质量比的实测值); B_n 为沉积岩中所测该重金属的地球化学背景值,本文采用南四湖区重金属含量背景值做参考。 K 是因固体岩石作用可能引起的背景值变动而测定的常数(取值 1.5)。

依据 I^n_{geo} 值的大小,将沉积物重金属污染程度分为 7 个等级(Haksanson,1980),见表 4。

表 4 Muller 污染指数分级

Tab.4 Classification of pollution indexes

I_{geo}	分级	污染程度
$5 < I_{geo}$	6	极强
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极强
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度-强
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中度
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	无-中度
$I_{geo} \leq 0$	0	无

利用本研究测定的南四湖表层沉积物中 8 种重金属的含量,计算得到沉积物重金属的地累积指数及其分级见表 5。

5个湖区均有达到2级污染程度的站点(4、6、7、16、17、20、22、27、29号),说明南四湖沉积物受Cd元素污染较为严重。As在南四湖区总体为1级污染,其中在8、9号站为2级污染,属中度污染。Pb在南四湖区总体为1级污染,为无-中度污染。Cr、Cu、Zn、Ni的 I_{geo} 等级为0,即无污染。上述4种元素在各站点中,除Cu位于洙赵新河口附近的4号站点与Ni位于界河口附近的12号站点 I_{geo} 大于0外,其余站点的 I_{geo} 值均为负数,表明南四湖表层沉积物基本上不受Cr、Cu、Zn、Ni元素的污染。总体来看,南四湖表层沉积物受到一定程度的重金属污染,区域分布表现为:南阳湖>独山湖>微山湖>昭阳湖,与沉积物重金属的空间分布特征一致。

2.3.2 沉积物重金属潜在生态风险评价 采用瑞典学者Haksanson提出的沉积物潜在生态风险指数法对南四湖沉积物中重金属污染状况进行评价。潜在生态风险指数法是利用沉积学原理评价重金属污染以及对生物的影响(贾振邦等,1997;赵沁娜等,2005;尚英男等,2005);其中沉积物中重金属生态风险指数(RI)为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i = T_r^i \times C_s^i / C_n^i \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{3}$$

式(2)中: E_r^i 为单一重金属潜在生态风险指数;

T_r^i 为重金属的生物性响应因子,反映重金属的毒性水平及生物对重金属的敏感程度,毒性系数如下:As=10,Hg=40,Pb=5,Cr=2,Cd=30,Cu=5,Zn=1,Ni=5; C_f^i 为单一重金属污染指数; C_s^i 为沉积物中重金属实测值; C_n^i 为重金属*i*的评价参考值(徐争启等,2008)。本文采用南四湖沉积物重金属环境背景值作为参考。重金属单项潜在生态风险指数(E_r^i)、综合潜在风险指数(RI)值对应的潜在生态风险程度见表6。

表6 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准
Tab.6 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

E_r^i	单项污染物 生态风险等级	RI	综合潜在生 态风险等级
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 135$	轻度
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$135 \leq RI < 265$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$265 \leq RI < 525$	重度
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 525$	严重
$320 \leq E_r^i$	极强		

从表7中可以看出,南四湖表层沉积物中8种重金属元素的潜在生态风险指数顺序为:Hg>Cd>As>Pb>Ni>Cu>Zn>Cr;其中Hg的潜在生态风险指数在8种污染物中最大,变化范围为16.00~317.33,平均值为127.45,属于较重生态风险等级,是南四湖最主要的生态风险贡献因子。

表7 南四湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Tab.7 Potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments of Nansihu lake

湖区	参数	E_r^I								RI
		As	Hg	Pb	Cr	Cd	Cu	Zn	Ni	
南 阳 湖	范围	9.99 ∩	66.67 ∩	6.28 ∩	0.63 ∩	66.23 ∩	4.03 ∩	0.96 ∩	5.00 ∩	190.50 ∩
		31.72	317.33	11.15	1.12	128.57	5.25	1.40	6.59	495.38
	均值	20.05	146.07	8.55	0.85	84.85	4.54	1.08	5.86	271.84
独 山 湖	范围	10.53 ∩	106.67 ∩	7.93 ∩	0.79 ∩	42.86 ∩	4.12 ∩	0.94 ∩	5.47 ∩	197.08 ∩
		21.60	288.00	9.42	0.94	89.61	5.93	1.16	7.61	378.76
	均值	15.53	110.67	8.54	0.85	61.04	5.35	1.07	6.44	245.04
坝北 昭阳湖	范围	11.88 ∩	66.67 ∩	7.28 ∩	0.73 ∩	70.13 ∩	3.27 ∩	0.76 ∩	4.32 ∩	165.05 ∩
		20.89	125.33	10.07	1.01	97.40	5.33	1.17	6.78	264.29
	均值	16.65	105.78	8.64	0.86	87.01	4.33	0.96	5.38	229.61
坝南 昭阳湖	范围	12.89 ∩	37.33 ∩	7.07 ∩	0.71 ∩	54.55 ∩	3.33 ∩	0.74 ∩	4.50 ∩	121.13 ∩
		26.15	205.33	11.28	1.13	101.30	4.93	1.06	5.82	346.82
	均值	18.77	124.00	9.00	0.90	83.77	4.29	0.94	5.19	246.86
微 山 湖	范围	15.19 ∩	16.00 ∩	6.50 ∩	0.65 ∩	42.86 ∩	3.04 ∩	0.76 ∩	3.91 ∩	93.19 ∩
		33.24	162.67	10.07	1.01	175.32	4.04	1.05	5.62	377.75
	均值	22.63	98.67	8.33	0.83	101.86	3.69	0.90	4.84	241.74
总 均 值		19.21	127.45	8.56	0.86	84.10	4.46	1.00	5.59	247.02

从南四湖沉积物重金属单项 E_r^i 看,Hg、Cd 潜在生态风险指数平均值分别为 127.45、84.10,均为较高风险等级,这 2 种元素为南四湖生态风险主要贡献者,影响湖泊的生态环境。As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 元素 E_r^i 值分别为 19.21、8.56、0.86、4.46、1.00、5.59,均为轻微污染,对湖泊生态环境基本无影响。从重金属潜在风险指数总体水平看,南四湖生态风险指数 RI 值位于 93.19~495.38,均值为 247.02,为中等生态风险等级,表明一旦环境改变,沉积物中生物有效态可能会被释放出来,从而对周边环境和生物造成威胁;其中,位于南阳湖、独山湖、坝南昭阳湖、微山湖的 1、4、10、22、29 号站点 RI 分别为 344.86、495.33、378.76、346.82、377.75,均为重度生态风险等级;位于坝南昭阳湖、微山湖的 19、23 号站点 RI 值分别为 121.13、93.19,均为轻度生态风险等级;其余南四湖各采样站点的生态风险等级均为中度。从区域分异上看,南四湖各区均为中度风险,表现为:南阳湖>独山湖>微山湖>昭阳湖。

2.3.3 不同评价方法的结果差异 综合地累积指数法与潜在生态风险法的分析结果可以看出:①从区域来看,湖区污染程度顺序均为:南阳湖>独山湖>微山湖>昭阳湖,其中南阳湖、独山湖的潜在生态风险指数均属于中等,这两大潜在生态风险区应作为今后南四湖重金属污染防治的重点区域;②从单项重金属污染结果看,尽管 2 种评价方法中重金属污染元素排列顺序不同,但 Hg、Cd、As、Pb 元素的污染程度始终排在前列(图 4-5),是沉积物中主要的污染元素,对南四湖生态环境影响较大,应作为南四湖区重点污染控制对象。产生结果差异的原因是侧重点不同,地累积指数法是从总体上评价重金属污染程度,主要考虑人为污染因子、环境地球化学背景值以及由于自然成岩作用可能引起背景值变动的因子,但未考虑重金属毒性对生物的影响;而潜在生态风险指数法考虑了生态环境中重金属对环境的毒性因子,可综合反映沉积物中多种重金属对生态环境的影响潜力,相对于地累积指数法更符合实际状况(李雅娟等,2012)。

3 结论

(1)南四湖表层沉积物中 As、Hg、Pb、Cd 的平均含量均明显超过环境背景值;Cr、Cu、Zn、Ni 平均含量与环境背景值相差不大。As、Hg、Cd 在湖区含量变化大、分异显著。受北部污染河流入湖、河流水动力条件以及沉积动力作用影响,处于上游的下级

湖区相对于下游的下级湖区重金属含量偏高,污染较重。

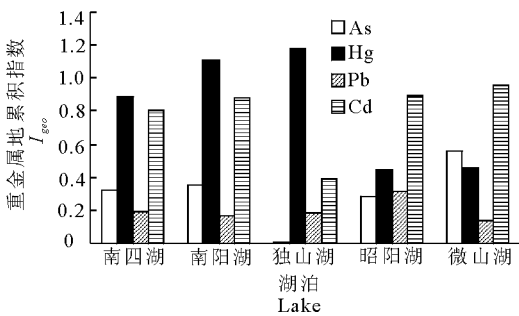


图4 南四湖各湖区重金属地累积指数比较
Fig. 4 Comparison of I_{geo} of heavy metals in each lake

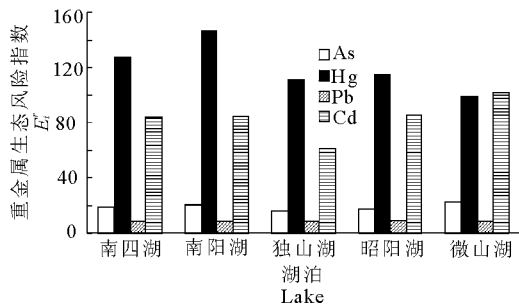


图5 南四湖各湖区重属生态风险指数比较
Fig. 5 Comparison of E_r^i of heavy metals in each lake

(2)重金属元素之间的相关性表明,Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 之间有很好的相关性,具有相同的来源;As、Cd 之间相关性较强,具有同源性。Hg 与其它 7 种元素的相关性不显著,Hg 和 Pb 受到地质背景与人类活动的共同控制。

(3)地累积指数评价结果显示,南四湖表层沉积物重金属污染程度顺序依次为: $Hg > Cd > As > Pb > Cr > Ni > Zn > Cu$ 。Hg、As、Pb、Cd 在南四湖区均达到无污染-中污染程度,其中 Hg 元素在南阳湖和独山湖均达到中度污染程度。重金属污染区域分布表现为:南阳湖>独山湖>微山湖>昭阳湖。

(4)南四湖沉积物重金属风险指数均值为中度,各湖区沉积物风险程度表现为:南阳湖>独山湖>微山湖>昭阳湖,与重金属地累积指数评价结果一致。单项重金属潜在生态风险程度大小顺序为: $Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Cr$,其中 Hg 在南四湖区达到较重生态风险等级,是最主要的生态风险贡献因子。2 种分析方法中,Hg、Cd、As、Pb 污染均位于前列,为南四湖区主要重金属污染元素。

志谢:吕建树、于泉州、程刚、李爽、孙京姐等在野外调查和样品采集分析过程中做了大量工作,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- 冀永殷,王雪,曾巾,等. 2012. 南京市湖泊沉积物中重金属垂直分布及污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 35(12): 230-233.
- 贾振邦,梁涛,林健枝,等. 1997. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 33(4): 485-492.
- 李雅娟,杨世伦,侯立军,等. 2012. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 33(7): 2368-2375.
- 刘恩峰,沈吉,杨丽原,等. 2007. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. 环境科学, 28(6): 1377-1383.
- 吕建树,张祖陆,刘洋,等. 2012. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 67(7): 971-984.
- 罗先香,张蕊,杨建强,等. 2010. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 19(2): 262-269.
- 孟祥华,刘恩峰,杨丽原,等. 2010. 南四湖及主要入湖河流沉积物金属空间分布特征与污染评价[J]. 环境科学研究, 23(1): 1-6.
- 尚英男,倪师军,张成江,等. 2005. 成都市河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 生态环境, 14(6): 827-829.
- 宋静宜,傅开道,苏斌,等. 2013. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. 地理学报, 68(3): 389-397.
- 唐阵武,岳勇,程家丽. 2009. 武汉市中小河流沉积物重金属污染特征及其生态风险[J]. 水土保持学报, 23(1): 132-136.
- 王萃,孙野青,贾宏亮,等. 2013. 辽宁省大凌河口沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 32(1): 28-32.
- 王晓军,潘恒健,杨丽原,等. 2005. 南四湖表层沉积物重金属元素的污染分析[J]. 海洋湖沼通报, (2): 22-28.
- 谢小进,康建成,李卫江,等. 2010. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. 环境科学, 31(3): 768-774.
- 徐争启,倪师军,庾先国,等. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 31(2): 112-115.
- 杨辉,陈国光,刘红樱,等. 2013. 长江下游主要湖泊沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 地球与环境, 41(2): 160-165.
- 杨丽原,沈吉,张祖陆,等. 2003. 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, 23(2): 206-209.
- 于万辉,王俊杰,臧淑英. 2012. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价[J]. 地理科学, 32(8): 1000-1005.
- 余辉,张文斌,余建平. 2011. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 32(2): 437-444.
- 张华俊,顾继光,胡韧,等. 2012. 粤东沿海典型供水水库沉积物重金属污染特征[J]. 生态学杂志, 31(7): 1807-1816.
- 张雷,秦延文,郑丙辉,等. 2013. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 34(1): 108-115.
- 张清海,林昌虎,谭红,等. 2013. 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价[J]. 环境科学, 34(3): 1055-1061.
- 章明奎,王浩,张慧敏. 2008. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 28(10): 1946-1954.
- 赵大勇,黄睿,马婷,等. 2012. 玄武湖沉积物中重金属垂向分布及污染评价[J]. 环境科学与技术, 35(9): 150-154.
- 赵沁娜,徐启新,杨凯. 2005. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, (1): 111-116.
- 赵彦锋,郭恒亮,孙志英,等. 2008. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学, 28(1): 45-50.
- Haksanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 14(8): 975-1001.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 2: 108-118.
- Selvam A P, Priya S L, Banerjee K, et al. 2012. Heavy metal assessment using geochemical and statistical tools in the surface sediments of Vembanad Lake, Southwest Coast of India[J]. Environment Monitoring and Assessment, 184(10): 5899-5915.

(责任编辑 万月华)

Spatial Distribution, Sources and Pollution Assesment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Nansihu Lake

LIU Liang, ZHANG Zu-lu

(School of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the concentrations, the distribution and the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments of different areas in Nansihu Lake, 29 sampling sites of surface sediments were collected and the concentration of 8 heavy metals were analyzed. The sources of heavy metals were discussed combining with the methods of principal component analysis, correlation analysis, and cluster analysis. Meanwhile the pollution status and the potential component risk of these eight heavy metals were evaluated by the geoaccumulation index (I_{geo}) and Hakanson potential ecological risk index (RI). The results are shown as follows: (1) The average contents of As, Hg, Pb, Cr, Cd, Cu, Zn and Ni were 14.41, 0.048, 25.69, 71.10, 0.22, 30.14, 87.55 and 35.33 mg/kg, respectively. And the contents of As, Hg, Pb and Cd were significantly higher than those in environmental background values. The heavy metals distribution of surface sediment indicated a higher degree of pollution in the higher lakes than in the lower lakes. (2) The results of principal component analysis, correlations analysis and cluster analysis showed that Pb, Cr, Cu, Zn and Ni were natural source elements with homology while As and Cr were human source elements with homology. However, affected by natural geological background and the dual impact of human activities, the main source of Hg was different from the other seven heavy metals. (3) Based on the assessment result of geoaccumulation index, the pollution degree of heavy metals decreased in the order of $Hg > Cd > As > Pb > Cr > Zn > Ni > Cu$, And the pollution levels of Hg, Cd, As and Pb were from non-pollution to middle-level pollution, but other elements were non-pollution. (4) The result of potential ecological risk index showed that the ecological risk degree of eight heavy metals were as follow: $Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Cr$. Hg and Cd, which were the main contributed factors of ecological risks, had higher level ecological risk, while other 7 heavy metals had low level ecological risk. From the comprehensive analysis, it was clear that Hg, Cd, As, and Pb were the main metal causing pollution in surface sediments of Nansihu Lake, and the pollution levels rank (from high to low) of different water area was Nanyanghu Lake > Dushanhu Lake > Weishanhu Lake > Zhaoyanghu Lake.

Key words: sediments; heavy metals; spatial distribution; pollution assessment; Nansihu Lake