

洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价

余辉¹, 张文斌^{1,2}, 余建平³

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 2. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021; 3. 湖南省永州职业技术学院, 永州 425000)

摘要:为了揭示洪泽湖表层沉积物重金属的空间分布特征, 用电感耦合等离子发射光谱法和原子荧光法测定了 10 个点位的重金属元素含量, 分析了其空间分布特性, 并评价了其潜在生态风险. 洪泽湖表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 平均含量分别为 34.99、72.44、18.82、3.24、57.59、0.07 和 23.67 mg/kg, Fe、Al 和 Mn 平均含量分别为 29.63、37.19 和 0.69 mg/g, 各重金属元素空间分布特性极为相似, 空间差异较大. 受河流冲刷等水动力学条件及湖盆地形的影响, 重金属元素入湖口附近含量远低于出湖口; 而在敞水区及水流滞留的湖湾区及汴河、安河入湖河口及其附近区域含量较高, 形成 3 个明显的重金属含量相对较高区域. 沉积物中重金属的富集属典型的 Turbidity Flood Model 方式. 重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al、Mn、As、Cr 含量呈显著正相关, 表明这些元素污染具有同源性. 采用地积累指数 (I_{geo}) 和 Hakanson 潜在生态风险指数对沉积物重金属的污染现状和潜在生态风险程度的评价表明, 重金属污染程度顺序依次为 $Cd > As > Cu > Cr > Zn > Hg > Pb$; 单个重金属潜在生态风险顺序为: $Cd > As > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$; Cd 污染程度达到中污染程度, 生态风险程度达到较重风险程度, 其余重金属污染状况相对较轻; Cd 单项潜在生态风险区域及全湖综合潜在生态风险区域完全一致. 重金属污染可能存在的主要风险区域为: 敞水区 (S9) 及出湖河口附近 (S1、S8) 风险区、北部湖湾 (S6) 风险区及西部湖湾 (S5) 风险区.

关键词:洪泽湖; 表层沉积物; 重金属; 空间分布; 潜在生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 02-0437-08

Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Hongze Lake

YU Hui¹, ZHANG Wen-bin^{1,2}, YU Jian-ping³

(1. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China; 3. Yongzhou Vocational Technical College, Yongzhou 425000, China)

Abstract: In order to investigate horizontal distribution patterns of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake, heavy metal contents in every samples were measured by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) and Atomic Fluorescence spectrometry (AFS) and the potential ecological risks of each heavy metals were analyzed. The average contents of heavy metals Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg, As, Fe, Al and Mn are 34.99 mg/kg, 72.44 mg/kg, 18.82 mg/kg, 3.24 mg/kg, 57.59 mg/kg, 0.07 mg/kg, 23.67 mg/kg, 29.63 mg/g, 37.19 mg/g and 0.69 mg/g, respectively. Horizontal distribution patterns of every heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe, Al, Cr, Hg, Mn and As) in surface sediments were very similar. By impact of hydrodynamical and topographical condition, the contents of heavy metals were significantly lower in the inflow river mouth areas than that of open water area in the eastern part of the lake, and that of bays and outflow river mouth areas. This distribution pattern belongs to Turbidity Flood Model. These heavy metals are highly related with each other positively, indicating that they are from the same pollution source. The geo-accumulation index (I_{geo}) and the Hakanson potential ecological risk index were applied for assessing the status of sediment heavy metal enrichment and the extent of potential ecological risk. The pollution extent of heavy metals followed the order: $Cd > As > Cu > Cr > Zn > Hg > Pb$, while the single potential ecological risk of heavy metals followed the order: $Cd > As > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn$. The pollution extent and potential ecological risk of Cd were the most serious among all heavy metals. The distribution pattern of Cd individual potential ecological risk indices is exactly the same as that of general potential ecological risk indices for all heavy metals, indicating the important contribution of Cd in the general indices. Analysis showed that heavy metal pollution and the potential ecological risk existed in three risk regions: the central open water area and outflow river mouth region (S9, S1 and S8), the northern bay region (S6) and the western bay region (S5).

Key words: Hongze Lake; surface sediments; heavy metals; distribution; potential ecological risk

收稿日期: 2010-02-23; 修订日期: 2010-04-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-001); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2007KYYW29)

作者简介: 余辉 (1963 ~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为湖泊生态环境, E-mail: yuhui@craes.org.cn

洪泽湖位于江苏省西北部($33^{\circ}06' \sim 33^{\circ}40'N$, $118^{\circ}10' \sim 118^{\circ}52'E$),是中国第四大淡水湖.湖面水域面积 $1\,597\text{ km}^2$,最大水深 4.37 m ,平均水深 1.77 m ,蓄水量 $27.9 \times 10^8\text{ m}^3$.洪泽湖具有蓄洪、灌溉、航运、水产养殖、饮用、生态保护等多种功能^[1,2].湖泊沉积物是流域物质汇聚的归宿,同时也是湖泊生态环境的重要组成部分,在湖泊水体环境中具有特殊的重要性.沉积物可以通过对水中污染物的吸附,使水质污染程度降低,同时沉积物污染物在环境改变的条件下重新释放,成为上覆水的二次污染源^[3-6].

已有研究表明,重金属是具有潜在风险的重要污染物,在受重金属污染的水体中,沉积物中重金属含量可达水体的数百倍至数十万倍,并表现出较明显的含量分布规律性,对沉积物中的污染物进行分析和评价比单纯的水质分析更具代表性,分析测试也更为简单、可靠^[7,8].洪泽湖属于过水性湖泊,每年换水多达11次.洪泽湖已成为著名的“悬湖”,表明陆域污染物在湖内的沉积影响极其显著.

湖泊水体沉积物的堆积方式与其湖盆地形、水流等特性相关.日本学者 Inouchi^[9]认为湖体沉积物的堆积有4种模式:Cloud Model 模式主要适用于深水湖,堆积速率与水深成正比;Blanket Model 模式主要适用于水流缓慢的湖泊,堆积速率与水深无关,呈均匀分布;Wave Redistributed Model 模式,堆积速率与入出湖河流无关,由波浪作用决定;Turbidity Flood Model 模式主要适用于浅水湖泊,堆积速率与入出湖河流河口及湖湾位置有关.余辉等^[10]用以上堆积模式对洪泽湖进行了分析,根据洪泽湖底质营养盐的形态分布特征,证明洪泽湖的沉积物堆积是属于 Turbidity Flood Model 模式.

各国学者采用各种指数对表层沉积物中重金属潜在生态危害进行评价.德国海德堡大学 Muller 提出了地积累指数法(Geoaccumulation Index)^[11],以研究沉积物受到重金属的污染程度.瑞典 Håkanson^[12]提出了潜在生态风险指数法,以其具有简洁、实用、可比性以及综合性的特点而得到广泛应用.本研究将采用这2种评价方法对洪泽湖表层沉积物重金属污染状况及潜在生态危害进行评价.洪泽湖是淮河流域最大的湖泊,也是淮河水、中游工业废水和生活污水的主要纳污水体,把握洪泽湖表层沉积物重金属的空间分布规律和遵从的堆积模式,是开展其综合治理的重要基础.本研究在解析洪泽湖沉积物中重金属的空间分布规律和遵从的堆积模式

的基础上,评价沉积物中重金属的污染现状和潜在生态风险程度,以期洪泽湖重金属的污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点布设与采集

洪泽湖入湖河流集中在西部,其中淮河为其最大入湖河流,入湖水量占总入湖径流量的70%以上.3条主要出湖河流分布在东部,其中入江水道的出水量占总出湖水量的60%~70%^[13],洪泽湖流域水系见图1.湖盆地形为浅碟形,湖底平坦,高程约在 $10.0 \sim 11.0\text{ m}$,湖盆高出东部里下河地区 $5 \sim 9\text{ m}$,故有“悬湖”之称,湖底地势为西高东低,北高南低,湖盆由西北向东南倾斜^[13].

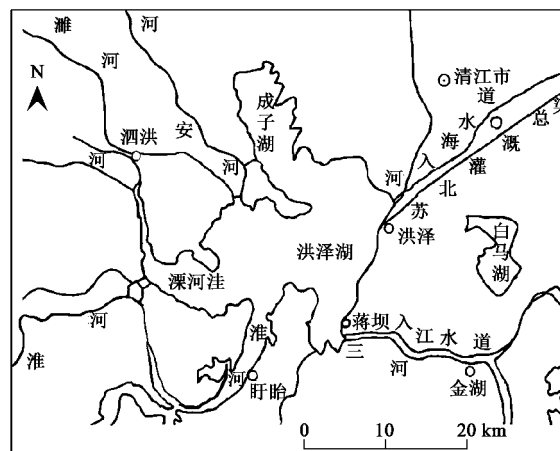


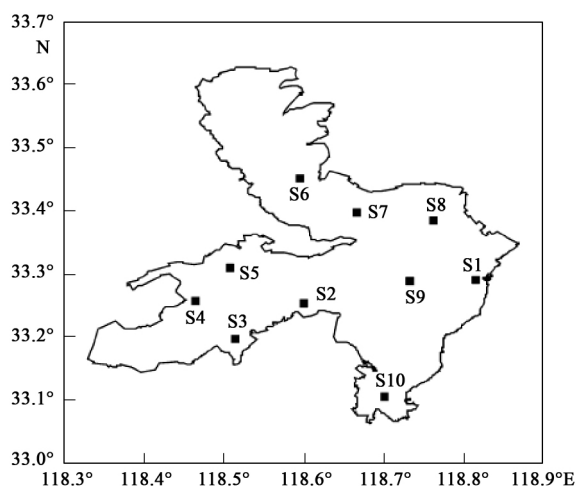
图1 洪泽湖河流域

Fig. 1 Watershed of Hongze Lake

2008年6月,在洪泽湖进行了全湖调查采样,为使调查数据具有可比性,采样点的布设参考了江苏省监测部门在洪泽湖的监测断面,分别在高良涧镇(S1)、老山乡(S2)、淮河口(S3)、临淮乡(S4)、成河乡西(S5)、龙集乡北(S6)、成河乡北(S7)、成河乡东(S8)、成河乡中(S9)、蒋坝镇(S10)10个监测点采集了表层沉积物样品,采样点位见图2.由于洪泽湖湖底平坦,这样的采样分布点基本能反映全湖的沉积物分布情况.

使用彼得森采样器采样,将采集的表层沉积物样品均匀混合后装入聚乙烯自封袋中密封,低温保存送回实验室进行预处理及分析.同时使用美国热电便携式320P-01/-83 pH仪及320D-01DO仪测定了采样点水体中的pH、溶解氧及水温等理化指标.

1.2 样品处理及分析



S1 高良涧镇, S2 老山乡, S3 淮河口, S4 临淮乡,
S5 成河乡西, S6 龙集乡北, S7 成河乡北, S8 成河乡东,
S9 成河乡中, S10 蒋坝镇

图2 洪泽湖采样点位示意

Fig. 2 Sediment sampling sites in Hongze Lake

沉积物样品使用冷冻干燥机干燥,待干燥后去杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙筛,贮存于塑料自封袋密封待用. 重金属分析项目有: Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al、Cr、Hg、Mn 和 As, 其中 Cu、Zn、Pb、Fe、Al、Cd、Mn 和 Cr 用等离子发射光谱 ICP-OES (VARIAN VISTA-MPX) 测定, Hg 和 As 用 AFS-230a 型双道原子荧光光度计进行测定. 沉积物重金属分析根据文献[14]进行.

1.3 质量控制

所测样品均设置 2 个平行样,分析时采用国标液控制工作曲线,测量分析的相对标准偏差控制在 10% 以内. 实验所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属空间分布特征及其沉积模式

洪泽湖表层沉积物各重金属的含量及其空间分布见图 3. 由于洪泽湖是一个大型浅水湖泊,湖底平坦,观测点之间采用 2 维线性插值进行了等值线计算.

可以看出,洪泽湖表层沉积物中重金属的分布特征十分明显,10 种重金属 Cu、Zn、Fe、Cd、Pb、Al、As、Mn、Cr 及 Hg,除 Hg 外其空间分布十分相似,其主要特征表现为:① 主要入湖河流淮河入湖口附近 (S2、S3) 受水流的冲刷作用沉积物不易沉淀,从而沉积物中重金属含量低,是洪泽湖表层沉积物中重金属污染程度较轻的清洁区域;② 湖盆地势最低处

的敞水区 (S9) 及出湖口附近 (S1、S8) 重金属含量高,形成明显重金属污染圈;③ 北部湖湾区 (S6) 由于水流相对停滞、水交换弱,局部富营养化程度高,重金属的含量相对较高,形成重金属第二污染圈;④ 西部湖湾区 (S5) 由于有劣 V 类水质的汴河及安河的流入,河流水量虽小,但外部污染负荷大,形成重金属第三污染圈. 这一分布特征与表层沉积物中有机质及 TN、TP 的分布规律极为相似^[10].

洪泽湖重金属含量的这一分布特性与洪泽湖的输沙淤积、湖盆形态及表层底泥类型即洪泽湖沉积模式直接相关联. 洪泽湖入湖输沙量远大于出湖输沙量,淤积严重. 入湖输砂量在 20 世纪 70 年代极严重,高达 $881 \times 10^4 \text{ t/a}$, 20 世纪 80 年代后入湖输沙量逐年减少,在 1975 ~ 2000 年的 25 a 间,洪泽湖泥沙入湖量与出湖量相对平衡,泥沙沉积率约 40%. 但自 2001 年后,由于出湖河流河道人工水闸的设置,泥沙出湖量显著减少,沉积率高达 72%^[15]. 洪泽湖湖底地势为西高东低,北高南低,湖盆地形由西北向东南倾斜. 湖西以淮河为主的诸条入湖河流挟带泥沙进入湖区,由于断面扩大,流速骤减,水流挟沙能力降低,粒径较大颗粒先行沉积在入湖河口附近,距河口愈远,底泥粒径愈细,全湖表层底泥的粒径分布特征为由西向东变细. 因此,在河流水动力条件下,淮河口及其附近湖区 (S2、S3) 的底泥属粉砂质类型,在汴河、安河河口及其附近湖区 (S5) 属砂质泥类型,而远离河口敞水区 (S9)、东部湖区 (S1、S8) 及其成子湖区 (S6) 均属黏土质泥类型^[15]. 黏土质泥粒径小,表面积大,吸附能力强. 洪泽湖重金属含量分布特性与黏土质泥类型的分布非常相似,表明重金属的沉积受黏土质泥的吸附沉降的影响极大,且与泥沙沉积同样属于外源性输入. 从表层沉积物中重金属的分布规律与入出湖河流河口及湖湾位置有关来看,重金属的这一分布也与有机质及 TN、TP 一样属于典型的洪水冲刷型堆积模式 (Turbidity Flood Model)^[9]. 对这一堆积模式而造成的 3 个污染区域分布特征的把握,将为洪泽湖的沉积物污染治理及防治重点提供理论依据.

洪泽湖表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 平均含量分别为 34.99、72.44、18.82、3.24、57.59、0.07 和 23.67 mg/kg, Fe、Al 和 Mn 平均含量分别为 29.63、37.19 和 0.69 mg/g. 其中 Cd 的富集程度最高,超过土壤环境质量三级标准,其次是 As 和 Cu,达到土壤环境质量二级标准, Zn、Pb、Cr 和 Hg 元素均达到土壤质量一级标准.

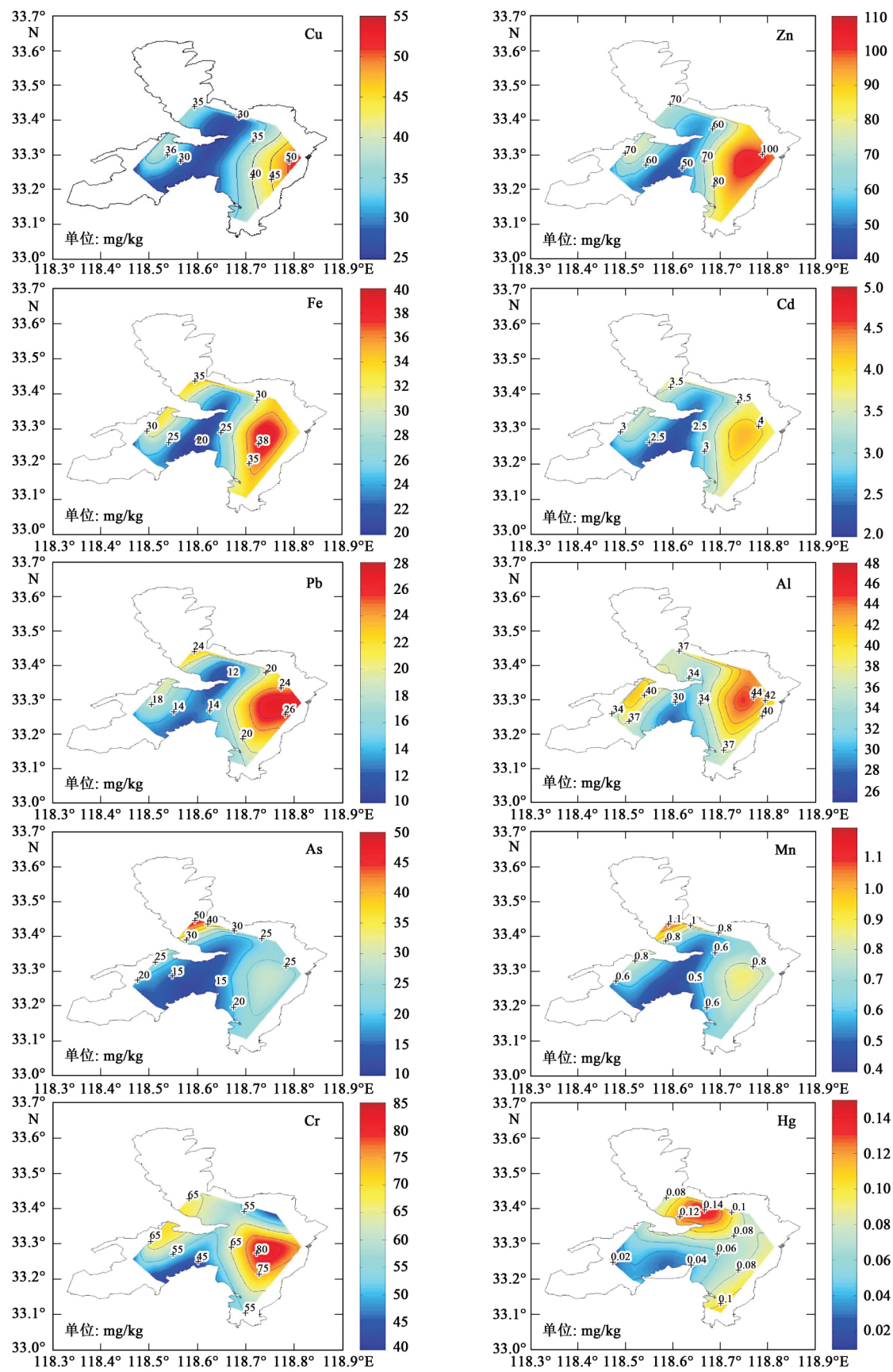


图 3 洪泽湖表层沉积物各重金属含量的水平分布

Fig. 3 Horizontal distribution of heavy metal contents in surface sediments of Hongze Lake

值得注意的是 Cd 含量超过土壤环境质量三级标准,由于国内还没有湖泊沉积物标准,而沿用的是土壤环境质量标准,Cd 的超标可能与土壤环境质量中 Cd 标准值偏低有关。

与刘振坤等^[21]1996~2004 年对洪泽湖重金属表层沉积物的研究结果相比较,2008 年的 Pb 和 Zn 的含量有所降低,Cd、Cr、Hg 和 As 含量有所升高,Cu 的含量较 1996~1999 年偏低,较 2000~2004 年含量略高。

2.2 重金属元素间的相关性分析

湖泊沉积物中各重金属元素间的相关性与元素的性质、吸附特征以及沉积环境有关。洪泽湖表层沉积物 10 种重金属各元素间相关关系见表 1。

从表 1 可看出,除 Hg 外,各金属元素间存在很好的相关性,其中 Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al 相关性强,

相关系数均在 0.7 以上。尤其是 Cu-Fe、Cd-Zn、Cd-Pb、Cd-Fe、Mn-As 5 组元素间相关性极为显著,相关系数 r 分别达到 0.92、0.93、0.93、0.98 及 0.96($p < 0.01$)。说明这些重金属元素的污染源相同,是通过共沉淀或吸附积累在沉积物中,其地球化学特性相近^[16~18]。重金属堆积模式属典型的洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model)^[9],表明洪泽湖重金属污染主要受流域范围内人类生产与生活的影响。

10 种重金属中只有 Hg 的空间分布特性有所不同,Hg 污染区域主要分布在水交换弱的湖湾区(S7)内,且与其他金属元素间的相关关系相对较弱(r 为 2.0~4.0)。Hg 不同于其他重金属元素的分布特征及不显著的相关性,可能与 Hg 在生物(微生物、藻类、水草等)的作用下富集有关^[19,20],有待进一步探讨。

表 1 沉积物中重金属元素之间的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient between heavy metals in the surface sediments of Hongze Lake										
	Cu	Zn	Pb	Cd	Fe	Al	Mn	Cr	As	Hg
Cu	1	0.92**	0.88**	0.82**	0.72*	0.71*	0.53	0.72*	0.38	0.32
Zn		1	0.88**	0.93**	0.87**	0.85**	0.56	0.69*	0.40	0.40
Pb			1	0.93**	0.88**	0.73*	0.82**	0.73*	0.70*	0.21
Cd				1	0.98**	0.81**	0.81**	0.69*	0.70*	0.40
Fe					1	0.80**	0.83**	0.65*	0.71*	0.34
Al						1	0.49	0.58	0.30	0.28
Mn							1	0.61*	0.96**	0.23
Cr								1	0.44	0.36
As									1	0.20
Hg										1

1) * 和 ** 分别表示相关系数达到 0.05 和 0.01 的显著水平

2.3 沉积物重金属地累积指数评价

地累积指数法是德国海德堡大学 Muller^[11]提出的。此评价方法考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值,还特别考虑到由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素,给出很直观的重金属污染级别,是一种研究水体沉积物中重金属污染的定量指标,广泛用于研究现代沉积物中重金属污染的评价^[22]。

2.3.1 评价标准

选用工业化以前的沉积物中重金属最高背景值^[23],见表 2。

表 2 沉积物中重金属的环境背景值/mg·kg⁻¹

Table 2 Sediment background contents of heavy metals/mg·kg ⁻¹							
重金属	As	Hg	Cr	Pb	Cd	Cu	Zn
含量	15	0.25	90	70	1	50	175

2.3.2 评价方法

地累积指数法计算方法如下:

$$I^n_{geo} = \log_2(c_n/kB_n) \tag{1}$$

式中, 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, B_n 为沉积岩(即普通页岩)中所测该重金属的地球化学背景值; k 为考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数,一般 $k = 1.5$ 。

根据 I^n_{geo} 数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级,即 0~6 级,如表 3 所示。

表 3 重金属污染程度与 I^n_{geo} 的关系

Table 3 I^n_{geo} and contamination grades of heavy metals							
I^n_{geo}	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

2.3.3 评价结果

洪泽湖表层沉积物各重金属地累积指数评价结果见表 4。可以看见,洪泽湖表层沉积物重金属污染

表 4 洪泽湖表层沉积物地积累指数及重金属污染程度评价结果

Table 4 I_{geo} and contamination grades of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake

点位	Cu		Zn		Pb		Cd		Cr		Hg		As	
	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
S1	-0.48	0	-1.42	0	-1.98	0	1.33	2	-0.86	0	-2.07	0	0.11	1
S2	-1.52	0	-2.51	0	-3.07	0	0.5	1	-1.58	0	-3.81	0	-0.95	0
S3	-1.49	0	-2.36	0	-3.06	0	0.7	1	-1.69	0	-3.21	0	-0.63	0
S4	-1.55	0	-2.39	0	-2.99	0	0.66	1	-1.61	0	-5.35	0	-0.29	0
S5	-0.98	0	-1.76	0	-2.44	0	1.2	2	-0.97	0	-2.9	0	-0.05	0
S6	-1.07	0	-1.89	0	-2.05	0	1.39	2	-1.09	0	-2.48	0	1.19	2
S7	-1.51	0	-2.27	0	-3.11	0	0.81	1	-1.22	0	-1.44	0	-0.27	0
S8	-0.98	0	-1.56	0	-2.26	0	1.34	2	-1.65	0	-2.38	0	0.11	1
S9	-0.83	0	-1.38	0	-1.99	0	1.48	2	-0.72	0	-2.44	0	0.32	1
S10	-1	0	-1.61	0	-2.54	0	1.28	2	-1.29	0	-1.75	0	0.08	1
平均	-1.1	0	-1.86	0	-2.48	0	1.11	2	-1.23	0	-2.48	0	0.07	1

程度顺序依次为 $Cd > As > Cu > Cr > Zn > Hg > Pb$, 与 1996 ~ 2004 年洪泽湖沉积物中各重金属污染程度排序差异较小^[21].

Cd 是洪泽湖沉积物中主要的污染物, 全湖地积累指数为 2, 达到中污染程度, 淮河入湖口附近 (S2、S3、S4) 和敞水区西北处 (S7) 的地积累指数为 1, 达到无-中污染程度, Cd 的污染主要来自地表径流和工业废水, 铅锌矿、硫铁矿废水和有关工业 (电镀、碱性电池等) 排出的废水含镉很高, 洪泽湖 Cd 污染与近些年洪泽湖沿岸乡镇工业发展迅速, 产生了大量的工业废水有关^[24].

As 是洪泽湖表层沉积物重金属中其次的污染物. 地表环境中 As 主要来源于人为活动, 尤其是金属冶炼和煤炭燃烧, 同农业生产使用污水灌溉及含 As 肥料、农药等也能引起 As 元素含量的增加^[25]. 全湖平均地积累指数为 1, 达到无-中污染状态, 湖湾区 (S6) 的地累积指数为 2, 为中污染状态, 出湖口附近 (S1、S8、S10) 和敞水区东南部 (S9) 的地积累指数为 1, 即无-中污染程度, 其它点位的地累积指数均为 0, 属于无污染状态.

Cu、Zn、Cr、Hg 和 Pb 的地积累指数为 0, 即无污染. 总体来说, 洪泽湖表层沉积物重金属污染状况较好, 淮河入湖口附近老的重金属污染程度较低, 与沉积物中重金属分布特征一致.

2.4 重金属潜在生态风险评价

2.4.1 评价方法

笔者采用 Håkanson^[12] 潜在生态风险指数法评价洪泽湖表层沉积物. 潜在生态风险指数法综合考虑了重金属的毒性、在沉积物中的普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性, 以及重金属区域背景值的差异, 可以综合反映沉积物中重金

属的潜在生态影响^[26]. 计算公式如下.

(1) 单项重金属污染指数

$$C_i^i = C_i / C_n^i \tag{2}$$

式中, C_i^i 为重金属 i 的污染指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值 (见表 2).

(2) 单项重金属 i 的潜在生态风险指数

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_i^i \tag{3}$$

式中, E_r^i 为单项金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为重金属毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度. Håkanson^[12] 提出的重金属毒性水平顺序为: $Hg > Cd > Cu = Pb > Cr > Zn$, 毒性响应系数 (T_r^i) 分别为: $Hg = 40, Cd = 30, As = 10, Cu = Pb = 5, Cr = 2, Zn = 1$.

(3) 多项金属的综合潜在生态风险指数 RI 为单项金属潜在生态风险指数之和

$$RI = \sum E_r^i \tag{4}$$

重金属单项潜在生态风险指数 E_r^i 、综合潜在生态风险指数 RI 和潜在生态风险等级^[27] 如表 5 所示.

表 5 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 5 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
$E_r^i < 40$	低	$RI < 135$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$135 \leq RI < 265$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$265 \leq RI < 525$	重
$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 525$	严重
$320 \leq E_r^i$	严重		

2.4.2 评价结果

洪泽湖表层沉积物的重金属单项及综合潜在生

态风险指数及分级如表 6 所示. Cd 单项潜在生态风险指数(E_r -Cd)及综合潜在生态风险指数(RI)的空间分布状况如图 4 所示.

从表 6 可以看出,重金属单项潜在生态风险程度除 Cd 外为低风险程度. Cd 的全湖平均为较重风险程度,与地累积指数评价结果一致,其中有 40% 点位为中等风险,其余点位为较重风险. 洪泽湖表层

沉积物中主要重金属的潜在生态风险程度的大小顺序为: Cd > As > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn, Cd 是最主要的生态风险贡献因子.

洪泽湖全湖表层沉积物平均为低潜在生态风险程度,其中 50% 点位为中等潜在生态风险,50% 点位为低潜在生态风险. 淮入湖口附近(S2、S3、S4)的潜在生态风险程度较低.

表 6 各采样点的沉积物单项潜在生态风险指数、综合潜在生态风险指数及风险分级

Table 6 Individual and general indices of potential ecological risk, and risk grades assessment at each sampling sites in surface sediments of Hongze Lake

点位	E_r^i							RI	风险等级
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As		
S1	5.36	0.56	1.90	113.49	1.65	14.28	16.18	153.41	中等
S2	2.62	0.26	0.90	63.76	1.00	4.28	7.76	80.58	低
S3	2.66	0.29	0.90	73.27	0.93	6.49	9.71	94.25	低
S4	2.56	0.29	0.94	71.01	0.98	1.47	12.30	89.55	低
S5	3.79	0.44	1.38	103.42	1.53	8.05	14.49	133.10	低
S6	3.57	0.40	1.81	117.73	1.41	10.77	34.14	169.83	中等
S7	2.63	0.31	0.87	79.01	1.29	22.07	12.43	118.61	低
S8	3.81	0.51	1.57	114.11	0.96	11.50	16.24	148.69	中等
S9	4.23	0.58	1.89	125.64	1.82	11.06	18.75	163.96	中等
S10	3.75	0.49	1.29	109.14	1.23	17.86	15.83	149.59	中等
平均	3.50	0.41	1.34	97.06	1.28	10.78	15.78	130.16	低

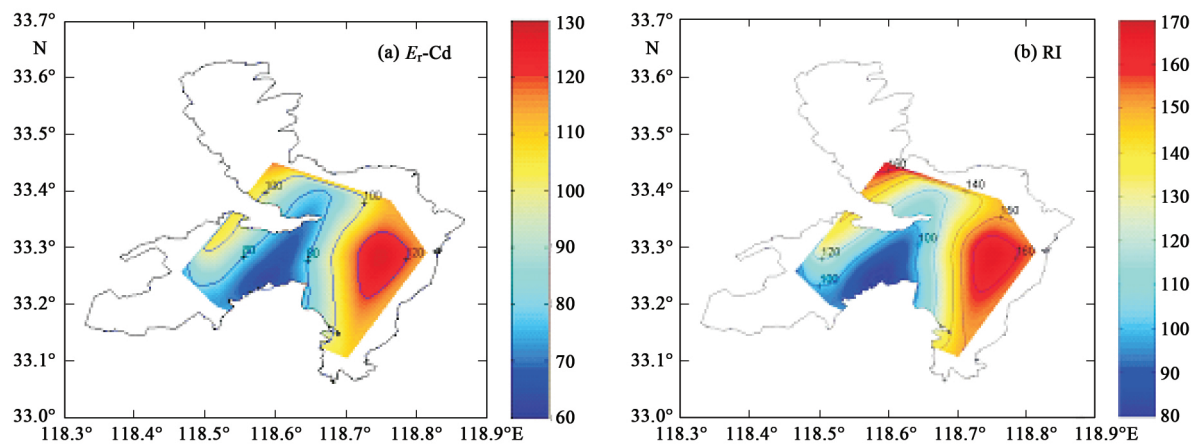


图 4 洪泽湖表层沉积物中 Cd 的潜在生态风险指数(E_r -Cd)及重金属综合潜在生态风险指数(RI)的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of Cd single potential ecological risk indices(E_r -Cd) and heavy metal general potential ecological risk indices (RI) in surface sediments of Hongze Lake

由于 Cd 是最主要的生态风险贡献因子,重金属单项潜在生态风险指数以 Cd 为重点进行分析. 图 4 为 Cd 单项潜在生态风险指数(E_r -Cd)及综合潜在生态风险指数(RI)的空间分布. 从图 4 可看出, Cd 单项潜在生态风险区域及全湖综合潜在生态风险区域具有极其明显的空间特征,且两者完全一

致. E_r -Cd 及 RI 潜在生态风险区域主要存在于以下 3 大区域: 敞水区(S9)及出湖河口附近(S1、S8)风险区、北部湖湾(S6)风险区及西部湖湾(S5)风险区. 这三大风险区与表层沉积物中重金属含量的空间分布特征完全一致(图 3),这三大潜在生态风险区应作为今后洪泽湖重金属污染防治的重点区域.

3 结论

(1) 洪泽湖表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Hg 和 As 平均含量分别为 34.99、72.44、18.82、3.24、57.59、0.07 和 23.67 mg/kg, Fe、Al 和 Mn 平均含量分别为 29.63、37.19 和 0.69 mg/g. 10 种重金属元素除 Hg 外其空间分布特性极为相似, 空间差异较大, 受河流冲刷等水动力学条件及湖盆地形的影响, 入湖口附近含量远低于出湖口; 而在敞水区及水流滞留的湖湾区及汴河、安河入湖河口及其附近区域含量较高, 形成 3 个明显的重金属含量相对较高区域. 沉积物中重金属的富集属典型的 Turbidity Flood Model 模式^[9].

(2) 重金属各元素之间的相关性表明: Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Al 之间有很好的相关性, Mn、As、Cr 与大部分重金属元素间呈显著相关性, 表明这些元素污染具有同源性; Hg 和其它重金属元素的相关性不显著, 可能与 Hg 在生物(微生物、藻类、水草等)的作用下富集有关, 有待进一步研究.

(3) 地积累指数评价结果显示, 表层沉积物重金属污染程度顺序依次为 Cd > As > Cu > Cr > Zn > Hg > Pb. Cd 达到重污染程度, As 达到无-中污染程度.

(4) 通过 Hakanson 潜在生态风险指数法评价得知, 全湖沉积物均值为低潜在生态风险程度, 50% 点位达到中等潜在生态风险程度. 单项重金属潜在生态风险程度的大小顺序为: Cd > As > Hg > Cu > Pb > Cr > Zn, Cd 达到较重风险程度, 同时也是最主要的综合重金属生态风险贡献因子. Cd 单项潜在生态风险区域与全湖综合潜在生态风险区域完全一致, 重金属污染可能存在的主要风险区域为: 敞水区(S9)及出湖河口附近(S1、S8)风险区、北部湖湾(S6)风险区及西部湖湾(S5)风险区.

参考文献:

- [1] 朱松泉, 窦鸿身. 洪泽湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993. 1-95.
- [2] 洪国喜, 韩国民. 洪泽湖入湖、出湖水流泥沙特性分析[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(4): 240-241.
- [3] 戴秀丽. 太湖沉积物中重金属污染状况及分布特征探讨[J]. 上海环境科学, 2001, 20(2): 71-74.
- [4] 刘芳文, 颜文, 黄小平, 等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(5): 16-24.
- [5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844.
- [6] Feng H, Kirk Cochran J, Lwiza H, et al. Distribution of heavy metal and PCB contaminants in the sediments of an urban estuary: the Hudson River[J]. Marine Environmental Research, 1998, 45(1): 69-88.
- [7] 程永前, 蒋大和, 马红梅, 等. 常州市河流重金属污染评价[J]. 环境保护科学, 2007, 33(2): 76-78.
- [8] 马德毅. 海洋沉积物的污染指示作用和监测方法[J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 89-96.
- [9] Inouchi Y. Sedimentation mechanism of fine materials in Lake Biwa[J]. Internationale Vereinigung fuer and Angewandte Limnologie Verhandlungen Ivltap, 1988, 23(1): 567-572.
- [10] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968.
- [11] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [13] 楚恩国. 洪泽湖水文特性初探[J]. 水文, 2001, 21(5): 56-59.
- [14] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 446-457.
- [15] 陈雷, 张文斌, 余辉, 等. 洪泽湖输沙淤积、底泥理化特性及重金属污染变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 219-226.
- [16] 陈守莉, 王平祖, 秦明周, 等. 太湖流域典型湖泊沉积物中重金属污染的分布特征[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(2): 128-129.
- [17] 简敏菲, 游海, 倪才英. 鄱阳湖饶河入湖段底泥中重金属的污染特征[J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 363-366.
- [18] 王瑞贤, 徐清辉, 陈维芬. 东山湾表层沉积物中 8 项化学要素的地球化学特征[J]. 台湾海峡, 1992, 11(3): 197-202.
- [19] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 25-32.
- [20] 范成新, 朱育新, 吉志军, 等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 235-241.
- [21] 刘振坤, 张书海. 洪泽湖底质重金属污染变化趋势分析[J]. 江苏环境科技, 2005, 18(4): 41-43.
- [22] 金艳, 何德文. 重金属污染评价研究进展[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 101.
- [23] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 32.
- [24] 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): 767-768.
- [25] 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 苏北浅滩表层沉积物中重金属元素 Cd、As、Hg、Se 分布及污染评价[J]. 海洋地质动态, 2007, 23(2): 9-13.
- [26] 冯慕华, 龙江平, 喻龙, 等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价[J]. 海洋科学, 2003, 27(3): 52-56.
- [27] 黄向青, 梁开, 刘雄. 珠江口表层沉积物有害重金属分布及评价[J]. 海洋湖沼通报, 2006, (3): 27-36.