

呼伦湖沉积物重金属分布特征及生态风险评价

张晓晶, 李畅游, 张 生, 史小红, 李卫平

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 采样分析了呼伦湖表层沉积物重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Hg)的含量、分布特征及富集状况, 分别以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值和我国《土壤环境质量标准》的一级自然背景值为参比值, 采用瑞典学者 Lars Hakanson 的潜在生态危害指数法对呼伦湖沉积物中重金属的富集系数和生态危害系数以及各采样点的生态危害指数进行了评价。结果表明, 呼伦湖沉积物中 7 种重金属的空间变异性较小, 其中 Zn、Cr、Cu 的含量变化具有相同趋势, 其他元素的含量分布无明显区域变化; 以两种背景值为参比得出的重金属污染水平顺序相近, Cd 和 As 为对呼伦湖生态环境具有潜在影响的主要重金属元素。

关键词: 呼伦湖; 沉积物; 重金属; 生态风险评价

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)01-0157-06

Distribution Features and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Superficial Sediments of Hulun Lake

ZHANG Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, SHI Xiao-hong, LI Wei-ping

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: The sediments of Hulun Lake were sampled and analyzed in order to get better understanding on the concentration and distribution of heavy metals with respect to their eco-environment risk. The method of potential ecological risk (PER) index presented by Lars Hakanson was applied to analyze the accumulation coefficients, PER coefficients and the PER indexes based on the highest values of heavy metal concentrations in sediment grain and Grade I values from the "National Standard of Soil Environmental Quality". The results showed that there was no significant difference in the space concentration distribution for the seven analyzed heavy metals. The concentrations of Zn, Cr and Cu had a similar space changing tendency. The similar sequence of the contamination level was obtained by analyzing the two background values. Cd and As had the most potential impact on the ecological environment.

Keywords: Hulun Lake; sediment; heavy metals; ecological risk assessment

湖泊沉积物是湖泊水体污染物的主要蓄积场所, 也是湖泊的潜在污染源^[1-2]。重金属被水体中的悬浮物吸附并最终沉积到湖泊水体表层的沉积物中^[3]; 在水-沉积物界面一系列生物地球化学过程的作用下, 污染物又可重新进入上覆水体^[4]。水体沉积物中的重金属被认为是水体污染的敏感指示剂, 具有反映水系统状

况的意义; 并通过生物富集和放大作用, 对生态系统构成直接和间接的威胁^[5]。因此, 研究沉积物中重金属的含量及分布, 确定主要污染物, 对沉积物中重金属的环境风险性进行评价, 对了解重金属对生态环境的影响具有重要的现实意义, 同时可为水污染控制和水环境保护与修复提供科学依据。

呼伦湖(也称达赉湖), 位于我国东北地区内蒙古自治区的呼伦贝尔市新巴尔虎右旗、新巴尔虎左旗及满洲里之间, 毗邻俄罗斯和蒙古国。湖面呈不规则斜长方形, 轴线方向为东北至西南, 其长度为 93 km, 最大宽度为 41 km, 湖周长 447 km, 湖水面积 2 339 km², 平均水深 5.7 m, 最大水深 10 m, 总储水量 138.5 亿 m³。于 1992 年被批准为国家级湿地自然保护区, 在呼伦贝尔草原的生态保护和经济发展中, 其水域与

收稿日期: 2009-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50669004, 50969005, 40901262); 内蒙古自然科学基金重点项目(200711020604); 内蒙古自治区水利厅重点支持项目(20080105); 内蒙古自治区“十一五”科技攻关项目

作者简介: 张晓晶(1983—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制与水环境保护方面研究。

E-mail: xiaojingzhang1983@yahoo.com.cn

通讯作者: 李畅游 E-mail: nndlichangyou@163.com

湿地发挥着不可替代的重要作用^[6]。但近 40 多年来,湖水水位逐年下降、水域面积减小、湿地萎缩,湖水水质严重恶化,已属中度富营养化水平^[7]。湖水总含盐量和 pH 值逐年升高,致使周边湿地生态环境急剧恶化,突出表现在周边大面积芦苇消失、渔业资源濒临枯竭和大量珍稀鸟类迁移,已严重威胁着这一区域乃至更大范围的生态安全。

迄今为止大多数对呼伦湖的研究报道主要集中在对湖水水质、水量、水位和气候变化对区域湿地生态状况影响及环境治理方面^[8-10]。本文以呼伦湖沉积物为研究对象,对其中的重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Hg 的分布状况及富集特征进行了分析,揭示呼伦湖沉积物污染状况及污染物分布特征,并用潜在生态危害指数法对重金属环境风险性进行了评价,旨在为呼伦湖流域水环境质量综合评价及水污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据湖泊面积大小、形状特征和水体流向及入湖河流等情况,在呼伦湖设置 11 个沉积物采样点,具体布点见图 1,于 2008 年 12 月采用全球定位系统定位,用柱状采泥器,共采集表层 15 cm 的沉积物样品 21 个。样品是在冬季于冰冻湖面各采样点位破冰钻孔进行采集,然后放入聚乙烯塑料袋中密封,运回实验室冷冻保存。

1.2 分析方法

将样品自然风干后用玻璃棒压散,剔除大小砾石、贝壳及动植物残体等杂质,用研钵研磨后过 100 目筛,进行重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 及 Hg 的分析测定。沉积物样品首先采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 进行消化,然后用 Z-8000 型原子吸收分光光度计,分别采用火焰原子吸收分光光度法对 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As 和冷原子吸收光度法对 Hg 含量进行了分析测定。

1.3 重金属潜在生态危害评价

本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的生态危害指数法进行沉积物重金属污染的评价。该方法利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高浓度背景值的污染程度及相应重金属的生态毒性系数进行加权求和,得到生态危害指数,特点在于从重金属的生物毒性角度出发,不仅反映了某一特定环境中的每种污染物的影响,而且也反映了多种污染物的综合影响,并且用定量的方法划分出潜在生态危害的程度^[11-12]。

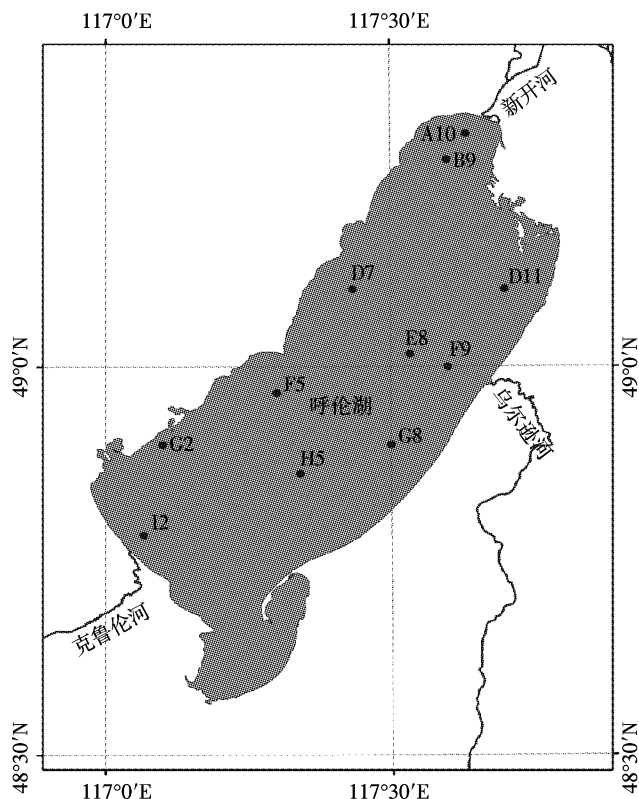


图 1 呼伦湖沉积物采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling sites for the sediment of Hulun Lake

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量及分布特征

2.1.1 重金属含量的空间变异性

表 1 列出了呼伦湖沉积物中 7 种重金属含量统计结果,图 2 为呼伦湖沉积物采样点重金属含量分布曲线。整体上看,呼伦湖表层沉积物中 6 种重金属的含量依次为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$,其中 Cr、Zn 和 Cd 在 B9 点含量最高,Pb 在 F5 点含量最高,As 在 E8 点含量最高,Cu 在 G2 点含量最高。从这 7 种重金属的变异系数来看,Cd 的空间变异系数最大,为 68.30%,由于沉积物 Cd 在东北部新开河入口附近 B9 点的含量高($0.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)而其他采样点较低导致的。同时,As 和 Hg 的变异系数也比较大,分别为 57.84%、56.39%,主要原因是 As 的含量在 E8 点($24.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)远高于其他点,而 Hg 含量在克鲁伦河入湖口处的 I2 点($0.002 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)远低于其他点。其次是 Pb、Zn、Cu 和 Cr,变异系数在 30%~44%。

总之,呼伦湖沉积物中的 7 种重金属的空间分异性相对较小,且除 Cd 外,其他 6 种重金属含量均低于

表 1 呼伦湖沉积物重金属含量统计结果($n=21$)

Table 1 Statistic values of heavy metals for the sediment of Hulun Lake($n=21$)

金属元素	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/ %
Cu	3.39	31.92	23.44	7.42	31.67
Pb	4.45	55.29	22.34	9.78	43.77
Cr	9.33	50.76	36.37	10.92	30.02
Zn	10.20	105.60	68.80	24.56	35.69
Cd	<0.01	0.78	0.41	0.28	68.30
As	4.26	31.55	10.36	5.99	57.84
Hg	0.002	0.039	0.019	0.01	56.39

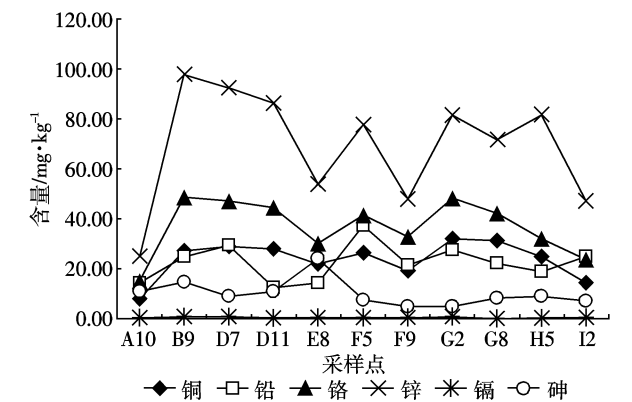


图 2 呼伦湖沉积物采样点重金属含量分布

Figure 2 Concentration of the heavy metals at each sampling point for the sediment of Hulun Lake

我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级自然背景值。

2.1.2 重金属含量的区域分布特征

由表 2 呼伦湖表层底泥中 7 种不同重金属含量之间的相关性分析结果表明,Cu、Zn、Cr 两两之间具有极显著的相关关系。因此,呼伦湖各采样点中 Zn、Cr、Cu 含量的变化趋势是一致的,即湖东北端(B9、D7、D11)和西南端(F5、G2、G8、H5)的含量偏高,而新

表 2 呼伦湖沉积物中重金属元素之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the heavy metals for the sediment of Hulun Lake

元素	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As
Zn	0.823**					
Pb	0.297	0.337				
Cr	0.934**	0.854**	0.352			
Cd	0.282	0.262	0.128	0.424		
As	-0.008	0.052	-0.373	-0.044	-0.016	
Hg	0.119	0.182	0.03	0.191	0.086	0.492*

注:*($P<0.05$)显著相关,**($P<0.01$)极显著相关。(双尾检验)

开河(A10)、乌尔逊河(F9)及克鲁伦河(I2)的入口处的含量较低。此外,As 和 Hg 也具有较显著的相关关系,但 As 的含量远高于 Hg。

2.2 沉积物中重金属的富集状况

通常采用富集系数来衡量单种重金属的富集程度,富集系数 C_f^i 可表示为:

$$C_f^i = C_m^i / C_n^i \quad (1)$$

式中: C_m^i 为沉积物中重金属 i 含量的实测值; C_n^i 为计算所需的参比值(环境背景值)。

本文采用 Lars Hakanson 提出的现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值 $w(\text{Hg})$ 、 $w(\text{As})$ 、 $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Cd})$ 、 $w(\text{Cr})$ 分别为 0.25、15.00、30.00、80.00、25.00、0.50 和 60.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [13],来反映湖泊的实际污染程度。由于缺乏呼伦湖周边环境土壤这 7 种重金属的背景值,而呼伦湖属于国家级湿地自然保护区,所以选用我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的一级自然背景值为参比值, $w(\text{Hg})$ 、 $w(\text{As})$ 、 $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Cd})$ 、 $w(\text{Cr})$ 分别为 0.15、15.00、35.00、100.00、35.00、0.20 和 90.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 来反映呼伦湖的相对污染程度。二者相结合能较好地反应湖泊潜在的生态危害程度。根据式(1)计算出各采样点重金属的富集系数,结果见表 3、表 4。

以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值为参照,Pb 的富集程度最高,平均富集系数达 0.90,其次是 Zn、Cd、Cu、As、Cr、Hg 的富集程

表 3 呼伦湖沉积物重金属的富集系数

Table 3 Enrichment coefficients of heavy metals in sediment of Hulun Lake

采样点	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg
A10	0.26	0.31	0.58	0.25	0.77	0.74	0.08
B9	0.91	1.22	1.00	0.81	1.53	0.98	0.08
D7	0.97	1.16	1.17	0.78	1.26	0.59	0.10
D11	0.94	1.08	0.50	0.74	0.70	0.73	0.09
E8	0.73	0.68	0.58	0.50	0.71	1.61	0.13
F5	0.88	0.97	1.50	0.69	0.74	0.49	0.13
F9	0.65	0.60	0.86	0.55	0.68	0.32	0.08
G2	1.06	1.02	1.10	0.80	1.48	0.32	0.04
G8	1.04	0.90	0.90	0.70	0.18	0.55	0.04
H5	0.83	1.02	0.76	0.54	0.75	0.60	0.03
I2	0.48	0.59	0.99	0.40	0.57	0.48	0.02
均值	0.79	0.87	0.90	0.62	0.85	0.67	0.07

注:以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值为参照。

表 4 呼伦湖沉积物中重金属的富集系数
Table 4 Enrichment coefficients of heavy metals in
sediment of Hulun Lake

采样点	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg
A10	0.23	0.25	0.41	0.17	1.93	0.74	0.13
B9	0.78	0.98	0.71	0.54	3.83	0.98	0.14
D7	0.83	0.93	0.84	0.52	3.15	0.59	0.16
D11	0.80	0.86	0.35	0.49	1.75	0.73	0.15
E8	0.62	0.54	0.41	0.33	1.78	1.61	0.22
F5	0.75	0.78	1.07	0.46	1.85	0.49	0.22
F9	0.55	0.48	0.61	0.36	1.70	0.32	0.13
G2	0.91	0.82	0.79	0.53	3.70	0.32	0.07
G8	0.89	0.72	0.64	0.47	0.45	0.55	0.06
H5	0.71	0.82	0.54	0.36	1.88	0.60	0.05
I2	0.41	0.47	0.71	0.26	1.43	0.48	0.03
均值	0.68	0.69	0.64	0.41	2.13	0.67	0.12

注:以我国《土壤环境质量标准》一级自然背景值为参照。

度最低,平均富集系数仅为 0.073。以我国《土壤环境质量标准》一级自然背景值为参照,Cd 的富集程度最高,平均富集系数高达 2.13,其次是 Zn、Cu、As 和 Pb, Cr 的较低,Hg 的最低。就各采样点而言,湖东北端 B9 点 Zn、Cr、Cd 的富集程度均为最高;湖西北边缘处 F5 点 Pb 和 Hg 的富集程度最高,靠近湖中部 E8 点 As 的富集程度最高,湖西南边缘处 G2 点 Cu 的富集程度最高。总体上,3 条河流入湖口处,即 A10、F9 和 I2 点的富集程度普遍较低。

2.3 重金属的潜在生态危害评价

瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态风险指数法进行重金属生态危害评价^[14-16]。潜在生态风险评价基于元素丰度和释放能力的原则,评价假设了如下的前提条件:①元素丰度响应,即潜在生态风险指数(risk index, RI)随沉积物中金属污染程度的加重而增加;②多污染物协同效应,即沉积物的金属生态危害具有加和性,多种金属污染的潜在生态风险更大,Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Hg 是优先考虑对象;③各重金属元素的毒性响应具有差异,生物毒性强的金属对潜在生态危害指数值(RI)具有较高的权重。

RI 可以反映 4 方面的情况:(1)表层沉积物金属的浓度,(2)金属污染物的种类数,(3)金属的毒性水平,(4)水体对金属污染的敏感性^[17]。根据这一方法,某一区域沉积物中第 i 种重金属的单项潜在生态危害系数 E_i^i 及沉积物中多种重金属的综合指数 RI 可分别表示为:

$$E_i^i = T_i^i C_f^i = T_i^i C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_f^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

式中: C_f^i 为第 i 种重金属的富集系数, C_s^i 为第 i 种重金属实测浓度, C_n^i 为第 i 种重金属的参照值,采用工业化以前沉积物中重金属的背景值。 T_i^i 为重金属 i 的毒性系数,它主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度。

根据有关资料^[18-19]及重金属的污染特征,设定了 7 种重金属生物毒性响应因子 (T_i^i) 的数值顺序 Hg(40)>Cd(30)>As(10)>Cu(5)=Pb(5)>Cr(2)>Zn(1)。表 5 为沉积物中重金属潜在生态风险评价指标与其污染生态风险分级^[20];表 6 是根据式(3)以现代工业化以前沉积物中重金属最高背景值为参照的计算结果;表 7 是以我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—

表 5 潜在生态风险评价指标与分级关系
Table 5 The correlation between index of potentially
ecological risk and grade

潜在生态风险因子		潜在生态风险指数	
单一金属的 阈值区间	风险因子 程度分级	6 种金属的 阈值区间	风险指数 程度分级
$E_i^i < 40$	I 生态轻微危害	$RI < 150$	A 低
$40 \leq E_i^i < 80$	II 生态危害中等	$150 \leq RI < 300$	B 中等
$80 \leq E_i^i < 160$	III 生态危害较强		
$160 \leq E_i^i < 320$	IV 生态危害强	$300 \leq RI < 600$	C 高
$E_i^i \geq 320$	V 生态危害很强	$RI \geq 600$	D 极高

表 6 呼伦湖沉积物中重金属的潜在生态危害系数和危害指数
Table 6 Potential ecological risk coefficients and indices of
heavy metals in the sediment of Hulun Lake

采样点	E_i^i							RI
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	
A10	1.31	0.31	2.88	0.50	23.10	7.40	3.00	38.51
B9	4.55	1.22	5.00	1.62	45.90	9.79	3.34	71.42
D7	4.83	1.16	5.87	1.57	37.80	5.92	3.84	60.98
D11	4.68	1.08	2.48	1.48	21.00	7.26	3.62	41.60
E8	3.63	0.68	2.90	1.00	21.30	16.12	5.21	50.84
F5	4.38	0.97	7.51	1.39	22.20	4.94	5.39	46.77
F9	3.23	0.60	4.29	1.09	20.40	3.17	3.06	35.83
G2	5.32	1.02	5.51	1.60	44.40	3.23	1.57	62.66
G8	5.21	0.90	4.48	1.40	5.40	5.47	1.44	24.30
H5	4.14	1.02	3.80	1.07	22.50	5.97	1.14	39.65
I2	2.40	0.59	4.95	0.79	17.10	4.84	0.66	31.33
均值	3.97	0.87	4.51	1.23	25.55	6.74	2.93	45.81

注:以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值为参照。

表 7 呼伦湖沉积物中重金属的潜在生态危害系数和危害指数
Table 7 Potential ecological risk coefficients and indices of heavy metals in the sediment of Hulun Lake

采样点	E_i^p							R_i
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	As	Hg	
A10	1.13	0.25	2.06	0.33	57.75	7.40	5.00	73.92
B9	3.90	0.98	3.57	1.08	114.75	9.79	5.56	139.63
D7	4.14	0.93	4.19	1.04	94.50	5.92	6.40	117.13
D11	4.01	0.86	1.77	0.99	52.50	7.26	6.04	73.43
E8	3.12	0.54	2.07	0.67	53.25	16.12	8.69	84.45
F5	3.76	0.78	5.36	0.92	55.50	4.94	8.98	80.24
F9	2.77	0.48	3.06	0.73	51.00	3.17	5.09	66.30
G2	4.56	0.82	3.94	1.07	111.00	3.23	2.62	127.24
G8	4.47	0.72	3.20	0.94	13.50	5.47	2.40	30.69
H5	3.55	0.82	2.72	0.72	56.25	5.97	1.90	71.92
I2	2.06	0.47	3.54	0.53	42.75	4.84	1.10	55.29
均值	3.40	0.69	3.22	0.82	63.89	6.74	4.89	83.66

注:以我国《土壤环境质量标准》一级自然背景值为参照。

1995)一级自然背景值为参照的计算结果。

由表 6 可见,以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值为参照,单种重金属的 E_i^p 的平均值皆小于 40,属于轻微污染水平,潜在生态危害尤其以 Cd 的污染程度较为严重,其 E_i^p 的平均值 25.55,而 B9 和 G2 点 Cd 的 E_i^p 值分别为 45.90 和 44.40,属于中等污染水平。以 7 种重金属的潜在生态风险指数来评价,其指数值变化范围为 24.30~71.42,皆处于低生态风险状态。

由表 7 可见,以我国《土壤环境质量标准》一级自然背景值为参照,富集顺序为 $Cd > Zn > Cu > As > Pb > Cr > Hg$; 单种重金属的潜在生态危害同样是 Cd 污染程度最为严重,其 E_i^p 平均值为 63.89,达到中等污染水平,尤其是 B9、D7 和 G2 点 Cd 的 E_i^p 值均超过 80 处于较强的生态危害水平,而其他重金属的 E_i^p 值均远远小于 40。从生态危害指数方面看,呼伦湖沉积物各采样点的 R_i 值均小于 150,处于低风险程度;各采样点危害程度顺序为 $B9 > G2 > D7 > E8 > F5 > A10 > D11 > H5 > F9 > I2 > G8$ 。

3 结论

(1)呼伦湖表层沉积物中重金属的污染程度大小顺序依次为 $Zn > Cr > Cu > Pb > As > Cd > Hg$, 含量均低于现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属含量的最高背景值,除 Cd 外,其他重金属的含量均低于我国《土壤环境质量标准》的一级自然背景值。

(2)呼伦湖表层沉积物重金属 Zn、Cr、Cu 的含量变化具有一致性且其分布呈现出一定的规律,即湖东北端(B9、D7、D11)和西南端(F5、G2、G8、H5)含量偏高,而新开河(A10)、乌尔逊河(F9)及克鲁伦河(I2)的入口处含量较低。

(3)单项潜在生态危害系数和综合指数的评价结果表明,呼伦湖表层沉积物中重金属的潜在生态危害程度为轻微—中等水平,具有潜在影响的重金属元素主要是 Cd,尤其以湖东北端的 B9 点和湖边的 G2 点最为严重。

参考文献:

- [1] Milendovic N, Damijanovic M, Ristic M. Study of heavy metal pollution in sediments from iron gate (Danube River), serbia and montenegro[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2005, 14(6): 781-787.
- [2] 刘 俐, 宋存义, 熊代群, 等. 渤海湾表层沉积物重金属在不同粒级有机-矿质复合体中的分布[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1): 75-79.
LIU Li, SONG Cun-yi, XIONG Dai-qun, et al. Distribution of heavy metals in different fractions of organo-mineral aggregates in surficial sediment of Bohai Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(1): 75-79.
- [3] 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.
FAN Cheng-xin, ZHU Yu-xin, JI Zhi-jun, et al. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3): 235-241.
- [4] 周建民, 党 志, 蔡美芳, 等. 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 5-10.
ZHOU Jian-min, DANG Zhi, CAI Mei-fang, et al. Speciation distribution and transfer of heavy metals in contaminated stream waters around Dabaoshan Mine[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(3): 5-10.
- [5] 杨 卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 945-951.
YANG Zhuo, LI Gui-bao, WANG Dian-wu, et al. Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5): 945-951.
- [6] 岳彩英, 赵卫东, 李明娜, 等. 达赉湖水质状况及影响因素分析[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(2): 7-9.
YUE Cai-ying, ZHAO Wei-dong, LI Ming-na, et al. The situation of Da Lai Lake water quality and influencing factors analysis[J]. *Inner Mongolia Environmental Sciences*, 2008, 20(2): 7-9.
- [7] 韩向红, 杨 持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(6): 684-69.
HAN Xiang-hong, YANG Chi. Analysis of the self-purification function of Hulun Lake and its effect on regional environmental conservation[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 684-69.
- [8] 李 翀, 马 巍, 叶柏生, 等. 呼伦湖水面蒸发及水量平衡估计[J]. 水

- 文, 2006, 26(5):41-44.
- LI Chong, MA Wei, YE Bai-sheng, et al. Estimation of water evaporation and water balance in ungauged Hulun Lake [J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(5):41-44.
- [9] 王文华. 浅析呼伦湖水位变化对水质的影响[J]. 内蒙古水利, 2005(3):3-5.
- WANG Wen-hua. Preliminary analysis on influences of water level change to water quality in Hulun Lake[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2005(3):3-5.
- [10] 赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3):1064-1071.
- ZHAO Hui-ying, WU Li-ji, HAO Wen-jun. Influences of climate change to ecological and environmental evolution in the Hulun Lake wetland and its surrounding areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3):1064-1071.
- [11] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):301-305.
- JIANG Zeng-jie, FANG Jian-guang, ZHANG Ji-hong, et al. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Sungo Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):301-305.
- [12] 向 勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5):700-705.
- XIANG Yong, MIAO Qi-long, FENG Jiang-fan. Pollution of heavy metals in the bottom mud of Taihu Lake and its assessment of potential ecological risk[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(5):700-705.
- [13] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1988, 14:975-1000.
- [14] Caeiro S, Costa M H, Ramos T B, et al. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach[J]. *Ecological Indicators*, 2005, 5(2):151-169.
- [15] Horst Monken Fernandes. Heavy metal distribution in sediments and ecological risk assessment: The role of diagenetic processes in reducing metal toxicity in bottom sediments[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 97(3):317-325.
- [16] Sadiq R, Husain T, Bose N, et al. Distribution of heavy metals in sediment pore water due to offshore discharges: An ecological risk assessment[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, 18:451-461.
- [17] 黄先飞, 秦樊鑫, 胡继伟, 等. 红枫湖沉积物中重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2):18-23.
- HUANG Xian-fei, QIN Fan-xin, HU Ji-wei, et al. Pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hongfeng Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2):18-23.
- [18] 弓晓锋, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4):732-736.
- GONG Xiao-feng, Chen Chun-li, ZHOU Wen-bin, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantia*, 2006, 27(4):732-736.
- [19] H Pekey, D Karakas, S Ayberk, et al. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48:946-953.
- [20] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992:168-170.
- CHEN Jing-sheng, ZHOU Jia-yi. Heavy metal pollution to Chinese water environment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992:168-170.