

荣成天鹅湖沉积物中重金属的分布特征研究

高 丽¹, 宋鹏鹏¹, 史衍玺², 侯金枝¹

(1. 烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005; 2. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘 要:通过对表层沉积物中重金属及粒度的分析,研究了荣成天鹅湖重金属的含量水平及分布特征,并对沉积物的环境质量进行了初步评价。结果表明,天鹅湖重金属的总体水平较低,Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 的平均含量均低于国家海洋沉积物 I 类质量标准,其中 Cr 和 Pb 存在轻度污染。Cd、Cr、Ni、Pb、Cu、Zn 的含量范围分别为 0~0.84、1.75~116.11、1.50~29.06、17.36~27.25、2.00~34.98 mg·kg⁻¹ 和 11.48~92.61 mg·kg⁻¹,平均含量排序为 Zn>Cr>Pb>Cu、Ni>Cd。天鹅湖重金属的富集状况与沉积物的粒度以及人类活动密切相关,大部分元素的高值区出现在颗粒较细的湖中央以及污染严重的西北部,东南部含量较低。相关分析表明,各重金属之间的相关性较好,其中 Cd、Cu、Mn、Zn、Fe 间呈高度的正相关,空间分布规律相似;重金属与有机质、粘粒含量呈极显著正相关,而与砂粒呈极显著负相关。根据加拿大制定的沉积物评价标准,天鹅湖沉积物中 Cr 具有较大的生态危害性。

关键词:荣成天鹅湖;沉积物;重金属;分布特征

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2192-06

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments of Rongcheng Swan Lake, China

GAO Li¹, SONG Peng-peng¹, SHI Yan-xi², HOU Jin-zhi¹

(1.Ocean School, Yantai University, Yantai 264005, China; 2.College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Rongcheng Swan Lake, a natural shallow lagoons, is located at the eastern end of Shandong Province, and is connected to the Rongcheng Bay through a narrow channel in southeast lake. The ecological environment in Swan Lake wetland has been destroyed due to the over-exploitation and wastewater discharge during the past few decades. Lake sediments play an important role in the assessment of heavy metal contamination in most lakes. In the present study, surface sediment samples were collected from 20 sites in the whole lake in 2009. Heavy metals, organic matter concentrations and grain sizes in sediments were measured to study the distribution of heavy metals and its affecting factors, and environmental quality of sediments was evaluated also in Swan Lake. The results showed that heavy metal concentrations of sediments were low, and levels of Cd, Cr, Pb, Cu and Zn were superior to the national primary standard of marine sediment quality. Slight contamination was observed in Cr and Pb in Swan Lake. The concentrations of Cd, Cr, Ni, Pb, Cu and Zn changed at the range of 0~0.84, 1.75~116.11, 1.50~29.06, 17.36~27.25, 2.00~34.98 mg·kg⁻¹ and 11.48~92.61 mg·kg⁻¹ respectively, and the mean concentrations followed a order of Fe>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu、Ni>Cd. The accumulation of heavy metal had a close relationship with sediment sizes and anthropogenic load in this area. For the most elements, high levels were found in the sediments of central and northwest part of the study area, where grain sizes of sediments were fine and external pollution was serious respectively; while low concentrations were found in those of the southeast area. The correlation among heavy metals was very good, and a highly significant correlation was observed among Cd, Cu, Mn, Zn and Fe, whose spatial distributions were similar. Heavy metals had a significant positive correlation with organic matter and clay concentrations, and a significant negative correlation with sand concentrations. According to the evaluation standard of sediments made in Canada, the potential ecological risk of Cr in sediments was high in Rongcheng Swan Lake.

Keywords: Rongcheng Swan Lake; sediment; heavy metal; distribution characteristic

收稿日期:2010-03-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(40801084);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2007BS08017);烟台大学博士启动基金项目(HX05B6)

作者简介:高 丽(1976—),女,山东聊城人,博士,副教授,主要研究方向为湿地营养物质的循环。E-mail:ligao117@126.com

湖泊沉积物具有汇和源的双重功能,在大多数情况下,沉积物充当污染物质的“汇”,水体中的重金属通过化学吸附、物理沉淀等作用最终进入沉积物中。但沉积物的吸附和接纳能力有一个限度,累积的重金属在一定条件下又可释放进入上覆水,从而造成对水体的二次污染^[1-2]。沉积物中重金属的污染程度不仅能很好地反映水体重金属的污染状况^[3],也有助于估测沉积物的释放潜力及生物毒性。沉积物的重金属负荷已成为当前水环境研究的热点问题之一。

近 20 年来,国内外对沉积物重金属污染的研究多集中在污染现状、赋存形态及风险评价等方面^[4-5];目前越来越侧重于环境行为的研究^[6],国内此方面的研究则起步较晚。沉积物中重金属的水平及分布特征是了解其环境化学行为的基础资料,大量研究表明,沉积物粒度、沉积环境、有机质,矿物组成等是影响沉积物重金属分布的主要因素^[7-8]。此外,重金属的污染程度和当地沉积物中重金属含量的背景值有密切关系。沉积物的环境质量评价比较复杂,目前大多采用地积累指数法、潜在生态风险指数法及加拿大的沉积物评价标准等对重金属污染进行评价^[9]。

荣成天鹅湖,又名月湖,位于山东省最东端荣成市境内。天鹅湖湿地是中国北方最大的天鹅越冬栖息地,作为黄渤海交界处重要的湿地资源之一,已被列为国家级大天鹅自然保护区。但近 20 年来,随着人类对湿地的高度开发及外源污染的加剧,湿地的生态环境遭到了破坏,水质有逐渐恶化的趋势。有关天鹅湖的水动力条件、沉积环境等方面已有报道^[10-12],但关于沉积物重金属污染的研究很少^[13],目前尚未见全湖重金属的分布及污染评价的详细报道。本文在全湖均匀布设采样点,对表层沉积物中重金属的含量及分布状况进行了调查分析,并对其潜在的生态危害进行了评估,以期了解天鹅湖沉积物中重金属的污染现状和污染来源,从而为天鹅湖沉积物内源污染的控制和环境治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天鹅湖是一个小型泻湖-潮汐汉道体系,水深在 2 m 以内,由一条狭窄的水道与外海相通。虽然湖区面积仅 5 km²,但资源的利用却是高强度的。近年来,湖泊水质有逐渐恶化的趋势,COD 含量较高,湖的西部生长有大量的浒苔。湖水为弱碱性,盐度和海水接近,全年水温变化在 5~23 ℃之间。表层沉积物以砂、粉砂为主,粘土矿物以水云母为主,高岭石和绿泥石次之。西北部沉积物 pH 较低(4.0),其余区域变化在 6~8 之间。表 1 列出了湖水和沉积物的基本理化性质。

1.2 样品采集与处理

2009 年 5 月运用 GPS 系统定位的方法,在天鹅湖内选取 20 个采样点(图 1),用抓斗式采泥器采集

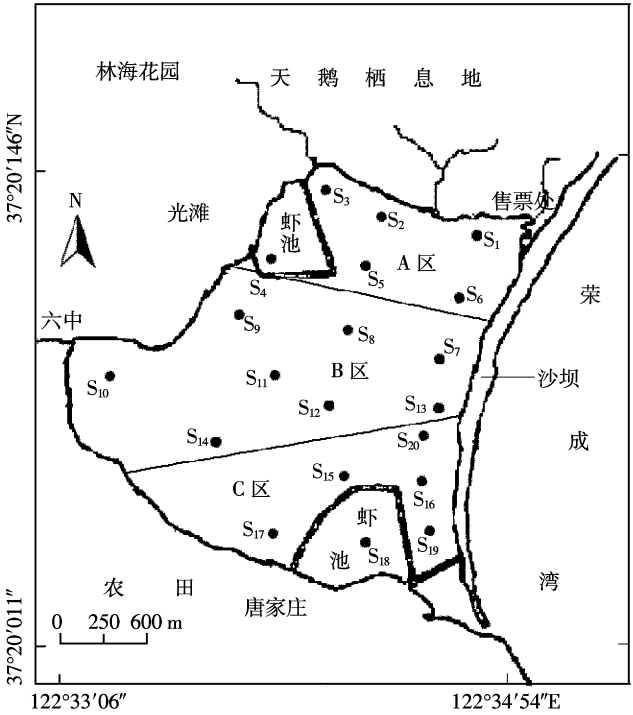


图 1 天鹅湖沉积物采样点的分布图

Figure 1 Locations of sampling sites of sediments in Swan Lake

表 1 天鹅湖湖水和表层沉积物的理化性质

Table 1 General characteristics of lake water and surface sediments in Swan Lake

项目	湖水			沉积物				
	pH	电导率/mS·cm ⁻¹	盐度	粘粒/%	砂粒/%	有机质/g·kg ⁻¹	总氮/g·kg ⁻¹	总磷/g·kg ⁻¹
最小值	7.9	64.25	29.6	0	17.40	1.38	0.07	0.08
最大值	8.5	67.50	34.1	37.57	100	57.19	1.70	0.57
平均值(n=6)	8.2	66.00	32.2	12.97	64.64	19.89	0.85	0.35

表层沉积物(0~10 cm),样品现场混匀后运回实验室自然风干,去除石块、贝壳、植物根系等杂质后研磨过筛,进行重金属、有机质及粒度的分析。整个湖区分为北部(A区)、中部(B区)和南部(C区)三个部分,其采样点分别为点 1~点 6($n=6$)、点 7~点 14($n=7$)和点 8~点 20($n=6$)。点 4、点 16、点 17、点 18、点 19 和点 20 的沉积物中有很多贝壳;点 11、点 12 和点 13 中分布有大量植物根系。

1.3 分析测定^[14]

湖水:pH 采用 FE20K 酸度计测定;电导率采用 DDS-307 型电导率仪测定;盐度采用比重计测定。

沉积物:重金属 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni 样品经 HF-HClO₄-HNO₃ 消解后,等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定;有机质用重铬酸钾氧化法;总氮用硒粉、硫酸铜、硫酸消化-蒸馏法;总磷用氢氟酸、高氯酸溶法;粒度分析根据司笃克斯定律,用自由沉降法测定。实验中加入国家标准土壤物质 GSS-3 和空白样品进行精度检验,标样中各元素的测定结果在标准值的允许范围内(表 2)。

1.4 数据分析

利用 SPSS13.0 对数据进行统计分析。用单因素方差分析及 Duncan's 多重比较,对不同区域重金属含量的均值进行差异显著性检验。采用 Bivariate

Correlations 对变量间的相关性进行检验。

2 结果与分析

2.1 天鹅湖表层沉积物的重金属含量

表 3 可见,天鹅湖表层沉积物中重金属的含量存在很大差异。Cd、Cr、Ni、Pb 元素的含量范围为 0~0.84、1.75~116.11、1.50~29.06、17.36~27.25 mg·kg⁻¹,分别平均为 0.37、50.09、16.02、22.17 mg·kg⁻¹;Mn、Cu、Zn、Fe 的含量范围为 28.96~335.47、2.00~34.98、11.48~92.61 mg·kg⁻¹ 和 2.15~28.60 g·kg⁻¹,平均含量分别为 201.11、16.48、53.02 mg·kg⁻¹ 和 14.72 g·kg⁻¹。各元素平均含量的排序为 Fe>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu、Ni>Cd。同一种重金属在不同采样点的差异也很大,其中 Cd、Cr、Cu 在全湖的变异程度较大,Pb 最小,变异系数仅 12.81%。

不同区域相比,大多数元素的平均含量表现为 A 区(北部)和 B 区(中部)相近,两者显著高于 C 区(南部)。在湖的北部和中部,Cd、Cr、Cu 的变异程度较高,Pb 最小,各元素的平均含量为 Fe>Mn>Zn、Cr>Pb>Cu>Ni>Cd(表 3)。在北部区域,各元素的变异系数为 13.71%~50.84%,西北部为大多数元素的高值区。而在湖的中部,采样点间的差异较小,湖中央和最西端含量相对较高。在湖的南部,各元素采样点间的差异最大(Pb 除外),变异系数为 6.36%~120.00%。与前两

表 2 重金属标准物质的标准和实测含量

Table 2 Standard values and measured concentrations of heavy metals in certified reference materials

项目	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
标准值	0.059±0.022	32±6	11.4±1.6	12±2	26±4	31±4
测定值	0.09±0.02	38.27±0.18	12.84±1.34	10.37±0.06	28.60±2.93	36.72±0.88

表 3 天鹅湖沉积物重金属含量的描述性分析

Table 3 Descriptive analysis on heavy metals concentrations in surface sediments in Swan Lake

区域	参数	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Fe/g·kg ⁻¹
A 区($n=6$)	极差	0.64	74.16	26.00	242.71	21.08	7.80	60.19	20.34
	平均值	0.48a	53.38a	20.21a	217.84a	17.82a	23.78a	60.31a	17.77a
	CV/%	50.84	49.14	49.83	42.86	45.06	13.71	40.23	42.94
B 区($n=7$)	极差	0.44	63.38	20.78	159.87	16.81	6.90	49.90	13.48
	平均值	0.46a	59.38a	21.08a	249.80a	19.84a	22.83a	63.42a	17.85a
	CV/%	32.39	31.36	32.92	20.82	26.86	10.02	26.90	23.83
C 区($n=6$)	极差	0.35	114.36	8.90	211.78	24.47	3.61	44.49	13.63
	平均值	0.16b	34.42b	6.62b	119.45b	9.12b	19.70b	31.85b	7.51b
	CV/%	75.00	120.00	47.34	61.32	94.88	6.36	46.64	63.09
全湖($n=20$)	极差	0.84	114.36	32.98	302.51	27.56	9.89	81.13	26.45
	平均值	0.37	50.09	16.48	201.11	16.02	22.17	53.02	14.72
	CV/%	58.93	59.05	57.89	44.17	52.00	12.81	43.17	48.64

注:同列中不同字母表示区域间平均含量差异达显著水平($P<0.05$)。

个区域不同,南部 Ni 的含量高于 Cu。

就空间分布而言,Cd、Cu、Mn、Zn、Fe 的分布规律类似,西北部(点 2、点 3)含量较高,湖中心(点 11、点 12)和最西端(点 10)次之,东南部含量较低;Cr 和 Ni 类似,高值出现在湖西北、中心和西南部,在东近岸区含量较低;Pb 除西岸和中心略高外,其他区域相差不大。西北部和最西端含量较高与此处有入湖河流分布、且人为干扰频繁有关,点 10 附近经常有污水处理厂的废水排入;湖中心的高含量是沉积物颗粒较细、对元素的吸附能力强所致。在湖的南部,大多数元素的含量较低,但马山参厂附近(点 17)的 Cr、Ni 含量较高,可能是养殖污染所致;湖海交接处(点 19)的 Fe、Mn、Zn 含量相对较高,这与此处涨落潮时污染物质的长期沉降及频繁的船只来往污染有关。

2.2 沉积物重金属与有机质、粒度的相关性分析

由表 4 可见,沉积物中重金属间的相关性较好,除 Cr 与 Pb 呈显著相关外,其余元素间均存在极显著的正相关关系。其中:①Cd、Cu、Mn、Zn、Fe 间呈高度的正相关,相关系数大于 0.9,显示这些元素在沉积物中的浓度具有共同变化的趋势;②Cr 除与 Ni 的相关性较好外,与其他元素的相关性偏低, r 变化在 0.49~0.69 之间;③Pb 与 Cr 的相关系数最低,与 Cu、Zn、

Cd、Fe 的 r 值变幅为 0.77~0.79;④Ni 与 Pb 的相关性最差,与 Cr 较高,与其他元素的 r 值在 0.8 左右波动。总的来说,Cd、Cu、Mn、Zn、Fe 间的相关性较好,而 Cr、Pb 与其他元素的相关性较差。

重金属含量与有机质有着密切的关系,一般有机质含量较高的沉积物对重金属的累积量亦相应较大^[8]。天鹅湖沉积物中重金属与有机质呈极显著的正相关关系,其中 Cu、Cd、Fe、Zn 与有机质的相关性较好,Cr、Pb 较低(表 5),说明 Cu、Cd、Fe、Zn 元素与有机质的络合性能较好。重金属与粘粒呈极显著的正相关关系,与砂粒呈极显著的负相关。可见沉积物颗粒物质越细,重金属含量就相对越高。不同元素相比,Cu、Cd、Fe、Zn 与粒度的相关性较好,Cr、Pb 则较差。本研究中,Cr 除与 Ni 的相关性较好外,与其他重金属、有机质以及粒度的相关系数偏低,说明 Cr 在沉积物中的累积还受到其他因素的影响。由上可见,天鹅湖沉积物重金属的水平与粒度组成及人类活动密切相关,重金属主要分布在细颗粒的沉积物中,而有机质是重金属污染物的重要载体。

表 5 沉积物中有机质、粒度与重金属的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between heavy metals and organic matter, grain sizes in sediments

项目	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe
有机质	0.95**	0.66**	0.97**	0.87**	0.83**	0.74**	0.92**	0.93**
粘粒	0.94**	0.63**	0.96**	0.86**	0.80**	0.69**	0.91**	0.91**
粉粒	0.91**	0.68**	0.92**	0.88**	0.84**	0.79**	0.88**	0.91**
砂粒	-0.96**	-0.69**	-0.97**	-0.91**	-0.85**	-0.78**	-0.93**	-0.95**

表 4 沉积物重金属间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis among heavy metals concentrations in surface sediments

	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe
Cd	1.00							
Cr	0.69**	1.00						
Cu	0.99**	0.68**	1.00					
Mn	0.96**	0.67**	0.94**	1.00				
Ni	0.86**	0.95**	0.86**	0.83**	1.00			
Pb	0.79**	0.49*	0.78**	0.73**	0.67**	1.00		
Zn	0.99**	0.69**	0.97**	0.97**	0.86**	0.77**	1.00	
Fe	0.99**	0.69**	0.97**	0.98**	0.85**	0.78**	0.99**	1.00

注: $r_{0.05}=0.44$, $r_{0.01}=0.56$, $n=20$;*,** 分别表示显著和极显著相关,下同。

2.3 天鹅湖沉积物中重金属的环境质量评价

表 6 表明,天鹅湖沉积物中 Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 的平均含量低于全国土壤一级环境质量标准(GB 15618—1995);Cr、Cu、Pb、Zn、Cd 低于国家海洋沉积物 I 类质量标准(GB 18668—2002)。Pb、Zn、Cu 在全湖的含量均低于沉积物 I 类质量标准,而 Cr、Cd 分别

表 6 沉积物中重金属含量的参比值

Table 6 Reference concentrations of heavy metals in sediments

项目	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Fe/g·kg ⁻¹
样品平均值($n=20$)	0.37	50.09	16.48	201.11	16.02	22.17	53.02	14.72
海洋沉积物 I 类标准	0.5	80	35	—	—	60	150	—
全国土壤一级标准	0.20	90	35	—	40	35	100	—
山东省棕壤背景值	0.041	50.8	12.5	—	16.6	11.5	38.1	—
胶东半岛棕壤背景值	0.039	52.8	13.7	—	19.0	13.98	39.9	—

注:—表示未有数据。

有 15%和25%的采样点高于 I 类标准。与其他湖泊相比,该区域重金属的总体水平相对较低,其中 Cu、Zn、Cd 含量较低,Cr 高于江苏的梅梁湖,Pb 高于山东的南四湖和相邻的荣成桑沟湾^[15-16]。结合胶东半岛棕壤重金属的背景值^[17],可以看出天鹅湖沉积物中 Pb、Cr 有所污染,其他元素的水平较低。

沉积物中不同重金属元素的含量存在很大差异,平均含量最高的是 Fe,其次为 Mn>Zn>Cr>Pb>Cu、Ni>Cd,其中 Zn 为 Cd 的 170 多倍(表 6)。各种重金属在生物体内的需求量和毒性不同,因此衡量其在沉积物中是否超标的标准值也有很大差别。我国对沉积物环境质量基准的研究也不成熟,迄今为止,还没有真正得到多方认可,也未被广泛应用。加拿大环境和能源部制定的沉积物评价标准目前被国内外不少学者采用^[18],根据该标准,天鹅湖沉积物中 Pb、Zn、Mn 的含量尚属安全级别;Cd、Cr、Cu、Ni、Fe 存在一定污染,其安全样品的比例分别为 80%、30%、50%、45%、75%,能引起最低级别生态毒性效应的比例分别为 20%、65%、50%、55%、25%,其中 Cr 在点 17 污染达严重级别。由此可见,天鹅湖沉积物中 Cr 的生态毒性较大,Cu、Ni 次之(表 7)。

3 讨论

沉积物中重金属的含量受母岩类型、污染排放、粒度分布等多因素控制,另外其赋存形态还受到水体的温度、盐度、pH 值等影响^[7-8]。天鹅湖沉积物母岩为重金属元素含量较低的花岗岩^[11],沉积物类型以砂质、粉砂质为主,砂质沉积物主要分布在东部和南部,粉砂质粘土或粘土主要分布在湖中央和西北部。湖泊在东南部可与外海(荣成湾)进行水体交换,水质污染不是很严重;受涨落潮的影响,湖水的 pH 和盐度接近于海水,整个湖区水的理化性质没有太大差异(表 1)。周围无大的工业区分布,主要污染源为湖内的养殖污染、水土流失造成的面源污染、河流携带及涨潮时由外海带入。以上因素导致天鹅湖重金属的水平较

低,但与 1999 年的报道相比,本研究中各元素的平均含量均有所增加,其中 Pb、Zn 增加较多,其平均含量为原来的 3 倍多,Cd 为 2.5 倍^[13]。沉积物重金属的污染呈增加趋势,这与近年来天鹅湖湿地开发力度加大、流域水土流失加剧以及污水排放量增加有关。目前天鹅湖沉积物的重金属水平虽不会产生大的生态毒性效应,但已存在一定富集,在一定条件下可对湿地水体环境构成威胁。

天鹅湖沉积物中重金属的含量表现出较大的空间差异性,同一元素的最高和最低含量存在几倍甚至数十倍的差异。大部分重金属元素的高值区出现在西北部、湖中央和最西端,低值区位于与砂坝相邻的东近岸。在整个湖区,平均含量表现为中部和北部相近,南部较低;西近岸区含量明显高于东岸。这和不同方位污染物质的来源、水生动植物的分布以及沉积物粒度等差异有关。天鹅湖湿地北部为大天鹅等禽鸟的栖息地和旅游度假区,南部主要为农田(滩涂)和村庄,东部为一狭长沙坝。入湖河流主要分布在北部和西部,其携带工业废水、生活污水、养殖废水、污水处理厂废水中的污染物进入湖中,且北部和西部人为活动频繁,故沉积物中重金属含量相对较高。另一方面,沉积物中元素含量一般遵从粒度控制规律^[7],这个现象在本研究中也得到了反映。在湖中央,分布着大量水生植物,且颗粒较细,对元素的吸附能力强,重金属含量较高。东近岸区沉积物颗粒较粗,人为干扰相对较少,故含量较低。

4 结论

荣成天鹅湖沉积物的重金属处在相对较低的水平,Cr、Pb 元素有所污染。沉积物中 Cd、Cr、Ni、Pb、Cu、Zn 的平均含量分别为 0.37、50.09、16.02、22.17、16.48 mg·kg⁻¹ 和 53.02 mg·kg⁻¹,其中 Cr、Cu、Pb、Zn 的平均含量均低于海洋沉积物 I 类质量标准和土壤一级质量标准。沉积物中重金属的分布很不均衡,含量水平与粒度组成及人类活动密切相关。大多数元素的

表 7 基于生态毒性效应的重金属质量标准^[18]和研究区域特征

Table 7 Quality guidelines of heavy metals for sediment based on the toxic effect and characteristics of the research area

项目	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Fe/g·kg ⁻¹
最低级别界限	0.6	26	16	460	16	31	120	20
严重级别界限	10	110	110	1 100	75	250	820	40
样品安全级别比例/%	80	30	50	100	45	100	100	75
样品轻度污染比例/%	20	65	50	0	55	0	0	25
样品严重污染比例/%	0	5	0	0	0	0	0	0

高值区出现在湖的西北部和湖中央,南部含量较低;东西方向相比,西近岸区含量明显高于东岸。根据加拿大制定的沉积物评价指南,目前天鹅湖沉积物的重金属水平不会产生大的生态毒性效应,其中Cr的生态毒性较大,Cu、Ni次之。

参考文献:

- [1] S ndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509:135-145.
- [2] Vaca Mier M, L pez Callejas R, Gehr R, et al. Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: Multi-component ionic exchange[J]. *Water Research*, 2001, 35(2):373-378.
- [3] Tylmann W, Golebiewski R, Wozniak P P, et al. Heavy metals in sediments as evidence for recent pollution and quasi-estuarine processes: An example from Lake Druzno, Poland [J]. *Environ Geol*, 2007, 53: 35-46.
- [4] Vallius H. Heavy metal distribution in the modern soft surface sediments off the Finnish coast of the Gulf of Finland[J]. *Baltica*, 2009, 22(2):65-76.
- [5] Karageorgis A P, Katsanevakis S, Kaberi H, et al. Use of enrichment factors for the assessment of heavy metal contamination in the sediments of Koumoundourou Lake, Greece[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 204:243-258.
- [6] Fan Q Y, He J, Xue H X, et al. Competitive adsorption, release and speciation of heavy metals in the Yellow River sediments, China[J]. *Environ Geol*, 2007(53):239-251.
- [7] Ip C C M, Li X D, Zhang G, et al. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147:311-323.
- [8] Segarral M J B, Szefer P, Wilson M J, et al. Chemical forms and distribution of heavy metals in core sediments from the Gda nsk Basin, Baltic Sea[J]. *Polish J of Environ Stud*, 2007, 16(4):505-515.
- [9] Liu J L, Li Y L, Zhang B, et al. Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan Rive source water[J]. *Ecotoxicology*, 2009(18):748-758.
- [10] 孙全辉. 焦渴的天鹅湖[EB/OL]. 北京: 国际在线, 2004[2009-04]. <http://gb.chinabroadcast.cn/3321/2004/12/29/782@406865.htm>.
- [11] 吴锦秀, 刘仲衡, 陈洪亮, 等. 山东半岛荣成湾海岸泻湖沉积环境的初步分析[J]. 海洋湖沼通报, 1986(2):19-24.
- [12] WU Jin-xiu, LIU Zhong-heng, CHEN Hong-liang, et al. Preliminary analysis of the coastal lagoonal sedimentary environment of Rongcheng bay of Shandong peninsula[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1986(2):19-24.
- [13] 贾建军, 高抒, 薛允传. 山东荣成月湖潮汐道的时-流速不对称特征[J]. 海洋学报, 2003, 25(3):68-76.
- [14] JIA Jian-jun, GAO Shu, XUE Yun-chuan. Patterns of time-velocity asymmetry at the Yuehu Inlet, Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(3):68-76.
- [15] 殷效彩, 杨永亮, 乌大年, 等. 山东荣成湾月湖沉积底泥重金属研究[J]. 青岛大学学报, 1999, 12(4):75-79.
- [16] YIN Xiao-cai, YANG Yong-liang, WU Da-nian, et al. Geochemical study of sediments from Yuehu Inlet[J]. *Journal of Qingdao University*, 1999, 12(4):75-79.
- [17] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] Society of Soil Science of China. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [19] 滑丽萍, 华璐, 高娟, 等. 中国湖泊底泥的重金属污染评价研究[J]. 土壤, 2006, 38(4):366-373.
- [20] HUA Li-ping, HUA Luo, GAO Juan, et al. Heavy metal pollution of sediments of lakes in China[J]. *Soils*, 2006, 38(4):366-373.
- [21] 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.
- [22] 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 Sungan Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):301-305.
- [23] 萧月芳, 宋承鉴, 黄华城, 等. 胶东半岛棕壤区域主要农业土壤中元素环境背景值[J]. 山东农业大学学报, 1986, 17(3):49-55.
- [24] XIAO Yue-fang, SONG Cheng-jian, HUANG Hua-cheng, et al. Elemental background values of principal agricultural soils in the brown earth area of Jiaodong peninsula[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1986, 17(3):49-55.
- [25] Leivuori M, Niemisto L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. *Chemosphere*, 1995, 31(8):3839-3856.

致谢: 山东省荣成马山集团有限公司在野外采样期间给予了大量帮助, 在此表示感谢。