

文章编号: 1674-5566(2020)05-0709-11

DOI:10.12024/jsou.20200403007

## 上海东风西沙水库表层沉积物重金属含量及生态风险评价

毕宝帅<sup>1</sup>, 余宏昌<sup>1</sup>, 张 亚<sup>1,2</sup>, 唐文乔<sup>1,3</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋动物系统分类与进化上海高校重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 位于崇明岛西侧的东风西沙水库是上海第二大饮用水水源地, 为了解其表层沉积物中重金属的污染状况, 于 2019 年对该水库 10 个断面的表层沉积物样本作了粒径分析, 对 9 种重金属元素含量及其潜在生态风险作了测定和评估。分析显示, 该水库表层沉积物中砂粒、粉砂和黏土平均含量分别为 46.29%、42.63% 和 11.08%, 整体属于细砂质。Hg、Cd、As、Ni、Pb、Cu、Cr、Zn 和 Mn 9 种元素的平均含量分别为 0.02、0.68、11.30、13.07、18.51、27.73、62.18、82.29 和 488.66 mg/kg。仅有 Cd 和 As 的平均含量为上海市土壤背景值的 5.23 倍和 1.24 倍, 其余 7 种则低于该背景值。地积累指数法评价显示, Cd 为主要污染元素, 总体处于偏中度污染水平, 其他 8 种元素则为清洁水平。潜在生态风险指数法评价显示 Cd 为主要生态风险贡献因子, 风险等级为强生态危害水平, 其他 8 种元素则为轻微生态危害水平, 水库总体处于中等生态风险水平。

**关键词:** 东风西沙水库; 表层沉积物; 重金属; 污染评价; 生态危害

**中图分类号:** X 524      **文献标志码:** A

沉积物是水体重金属的重要储蓄场所<sup>[1-2]</sup>。重金属元素通过大气沉降、地质风化和废水排放等途径进入水体后<sup>[3]</sup>, 大部分会被水中悬浮物吸附和转移到沉积物中, 造成沉积物污染。沉积的重金属又会通过物理、化学和生物等过程, 重新释放到上覆水中, 造成水体的“二次污染”<sup>[4]</sup>。重金属污染具有危害时间长、生物毒性强和不可逆性等特点, 进入食物链后富集作用明显<sup>[5-6]</sup>, 也能通过食物链进入人体, 危害健康。因此, 沉积物重金属污染评价是水体生态风险危害评价的一项重要参考项。

长江三角洲地区是我国经济发展最活跃、开放程度最高的区域之一, 承受着越来越大的环境压力, 重金属污染是其中深受人们关注的环境问题之一<sup>[7-11]</sup>。方明等<sup>[7]</sup>发现长江口沉积物中重金属元素主要来源于工农业废水、船舶运输及农药化肥的使用, Cd 具有较高的潜在生态风险; 李亭

亭等<sup>[8]</sup>发现长江口较高的 Cd 生态风险, 可能是由于其具有较高的离子交换态和盐酸盐结合态所导致; 何中发等<sup>[9]</sup>发现 1 500 年来, 长江口区域 Cd 和 As 的含量一直处于逐步升高的趋势, 其表层沉积物重金属元素已给生态环境造成潜在威胁。位于长江口崇明岛西南部的东风西沙水库建于 2014 年, 是上海市的第二大水源地, 水库面积约 3.74 km<sup>2</sup>, 总长约 5 000 m, 平均水深 2.3 m, 有效库容 890.2 万 m<sup>3</sup>, 日供水能力 21.5 万 m<sup>3</sup>, 服务于崇明区 70 万人口<sup>[10]</sup>。该水库是上海崇明区的主要水源, 其水质安全直接关系到当地居民的健康, 良好的水生态系统能为水质安全提供保障<sup>[11]</sup>。本文对东风西沙水库沉积物中 9 种重金属含量、分布及其污染程度作了分析, 对其所致的潜在生态风险作了评价, 以为东风西沙水库重金属污染防治及生态风险管理提供数据支持。

收稿日期: 2020-04-19      修回日期: 2020-06-10

基金项目: 农业农村部项目(20.125C0505); 湖北省长江生态保护基金会项目(D-8006-19-0036); 国家重点研发计划重点专项(2018YFD0900802)

作者简介: 毕宝帅(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态环境保护。E-mail: 15732158373@163.com

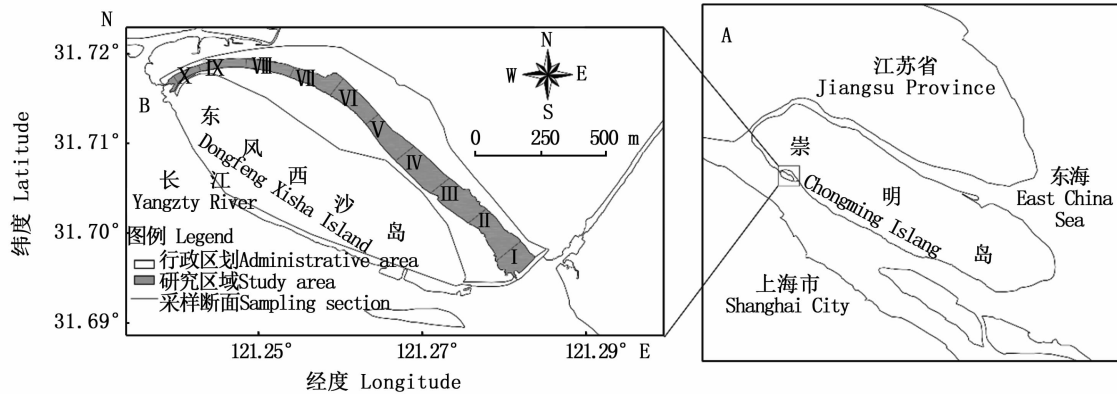
通信作者: 唐文乔, E-mail: wqtang@shou.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置

在东风西沙水库设置 10 个采样断面,自东

(库尾)向西(库首)分别为 I 至 X(图 1)。除了 IX 与 X 间隔 300 m,其他断面间隔为 500 m。每个断面设沿岸和敞水 2 个采样点,共 20 个采样点。采样时间均为 2019 年 4 月 18 日。



A. 东风西沙水库位置; B. 采样断面图

A. Location of Dongfeng Xisha Reservoir; B. Sampling section

图 1 东风西沙水库表层沉积物采样断面示意图

Fig. 1 Sampling profile of surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

### 1.2 样品采集与处理

在 5 m × 5 m 的样框内,采用五点梅花取样法,用彼得逊采泥器采集表层 0 ~ 15 cm 沉积物,样品混合后装入塑料密封袋,置于冷冻保温箱中带回实验室,在 -18 °C 冰柜中保存。

#### 1.2.1 样本处理

将沉积物样品放在真空冷冻干燥机(ETPS, Minifast04)中干燥至恒重,挑出动、植物残留和砾石后,经玛瑙钵体研磨,过 100 目标标准筛,置于密封袋中保存以备测定。

#### 1.2.2 粒度分析

随机取出少量研磨后的样品放入激光粒度分析仪(Malvern, MS2000)中进行粒度分析,各断面沉积物粒度取该断面沿岸、敞水 2 个采样点的沉积物粒度平均值。

#### 1.2.3 重金属测定

将每个断面处理后的沿岸、敞水样本均匀混合,用分析天平称取 0.250 0 g(精确到 0.000 1 g),放入经酸洗的微波消解罐。采用 HNO<sub>3</sub>-HF-HCl(6 mL HNO<sub>3</sub>, 2 mL HF, 2 mL HCl)微波消解,电热板赶酸(160 °C, 50 min),超纯水(> 18.25 MΩ · cm)定容至 50 mL。As、Cd、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn 和 Mn 用电感耦合等离子质谱仪(Thermo, ICP7400)测定,Hg 用原子荧光分光光度计(博晖创新, RGF-6300 型)测定。同步分析泛滥平原沉

积物标准物质 GSS-29(GBW07385, 中国地质科学院物化探所),元素 Hg、As、Cd、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn 和 Mn 的回收率为 88% ~ 115%,符合 US EPA 要求(80% ~ 120%)。对所测样品按 40% 的比例设置平行双样,各重金属元素的相对偏差均小于 5%。

实验器皿均在 25% 硝酸溶液中浸泡 24 h 以上,冲洗后烘干(105 °C, 24 h)。实验试剂均为优纯级,用水为超纯水(> 18.25 MΩ · cm)。每批样品均做全程空白比对,以消除样品处理及测定过程中可能带入的污染。

### 1.3 重金属污染评价

#### 1.3.1 地积累指数法

地积累指数法(geo-accumulation index)是 1970 年由 MULLE<sup>[12]</sup>提出,是沉积物重金属污染评价最广泛使用的方法。该法利用某一重金属含量与其地球环境背景值的比值来确定污染程度,考虑了人为污染、地球化学背景值及自然成岩作用引起的背景值变动,可综合反映外源重金属在沉积物的富集程度<sup>[13]</sup>。计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

式中: $I_{geo}$ 为地积累指数; $C_i$ 为元素  $i$  的实测值, mg/kg; $B_i$ 为元素  $i$  的参比值,参比值对地积累指数的评价结果影响极大,本文以上海市土壤重金属元素背景值作为参比值<sup>[7,14]</sup>;  $k$ 为考虑各地岩

石差异可能导致背景值变动而取的系数(一般取值 1.5)。地积累指数分级标准见表 1。

### 1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由 HAKANSON<sup>[15]</sup> 于 1980 年提出,综合考虑了重金属的种类、含量、毒性系数及所在区域的背景值,可反映单一或多种重金属的复合潜在生态影响,应用也较多<sup>[16]</sup>。计算公式:

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_f^i = \sum_{i=1}^n T_f^i \times C_i / C_n^i \quad (2)$$

式中: $R_1$  为综合潜在生态风险指数; $E_f^i$  为元素  $i$  的潜在风险指数; $T_f^i$  为元素  $i$  的毒性系数,本文分别取 Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、Mn 和 Zn 的毒性系数为 40、30、10、5、5、2、2、1、1<sup>[15,17]</sup>;  $C_i$  为元素  $i$  的

实测值,mg/kg; $C_n^i$  为元素  $i$  的参比值,选择上海市土壤背景值作为参比值<sup>[7,14]</sup>。潜在生态风险等级划分标准见表 2。

表 1 地积累指数分级标准

Tab.1 Classification standard of geo-accumulation index

污染等级 Pollution level	地积累指数 $I_{geo}$ Geo-accumulation index $I_{geo}$	污染程度 Pollution degree
0	$I_{geo} \leq 0$	清洁 clean
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻微 slight
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度 less moderate
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度 moderate
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重 less heavy
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	重 heavy
6	$I_{geo} > 5$	严重 severe

表 2 潜在生态危害划分标准

Tab.2 Classification criteria of potential ecological risk

$E_f^i$	风险等级 Risk level	$R_1$	风险等级 Risk level
$E_f^i < 40$	轻微 slight	$R_1 < 50$	轻微 slight
$40 \leq E_f^i < 80$	中等 moderate	$50 \leq R_1 < 300$	中等 moderate
$80 \leq E_f^i < 160$	强 strong	$300 \leq R_1 < 600$	强 strong
$160 \leq E_f^i < 320$	很强 very strong	$R_1 \geq 600$	很强 very strong
$E_f^i \geq 320$	极强 extremely strong		

## 1.4 数据分析

采用 SPSS 25.0 进行相关性分析和主成分分析,利用 ArcGIS 10.0 软件中的反距离加权插值法(inverse distance weighted, IDW)对重金属含量进行空间分布分析,其余分析在 Microsoft Excel 2016 中进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物的粒度分布

根据沉积物粒度分级标准(砂粒  $> 0.05$  mm; 粉砂  $0.005 \sim 0.05$  mm; 黏土  $< 0.005$  mm),对东风西沙水库表层沉积物作了粒度分析。总体来看,各断面的砂粒和粉砂的含量较高,黏土含量较低,整个水库砂粒、粉砂和黏土的平均含量分别为 46.29%、42.63% 和 11.08% (图 2)。

中值粒径和平均粒径是判断沉积物整体粗细的常用指标<sup>[18]</sup>。东风西沙水库各断面沉积物的中值粒径为  $0.021 \sim 1.087$  mm,平均  $0.156$  mm;平均粒径为  $0.030 \sim 0.911$  mm,平均  $0.153$  mm;各断面中值粒径和平均粒径的升降趋势基本一致(图 2)。

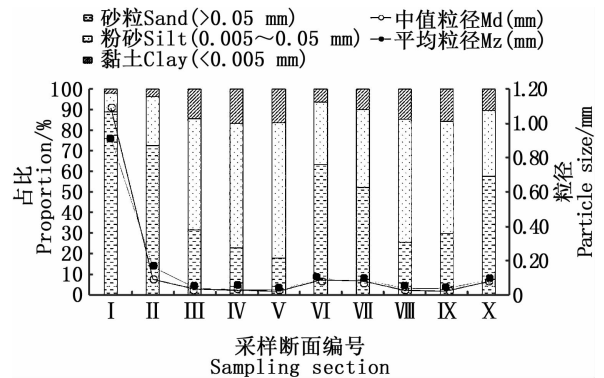


图 2 东风西沙水库表层沉积物的粒度组成

Fig.2 Grain size composition of surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

水库库尾(断面 I、II)受到长江南支来水的影响,表层沉积物较粗,中值粒径为  $0.091 \sim 1.087$  mm,平均  $0.635$  mm;平均粒径为  $0.163 \sim 0.911$  mm,总体平均为  $0.619$  mm,属于粗砂粒质。库首(断面 X)和库中弯道处(断面 VI、VII)受到上游来水及地形的影响,水流湍急,细粒物质不易沉降,沉积物粒度较粗,中值粒径为  $0.081 \sim 0.087$  mm,平均  $0.084$  mm;平均粒径为  $0.086 \sim$

0.095 mm, 总体平均为 0.091 mm, 属于极细砂粒质。断面Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅷ、Ⅸ水流较缓, 沉积物粒度变细; 中值粒径为 0.021 ~ 0.034 mm, 平均 0.026 mm; 平均粒径为 0.030 ~ 0.042 mm, 总体平均为 0.037 mm, 属于粗粉砂质。

## 2.2 表层沉积物的重金属含量及空间分布

### 2.2.1 重金属含量特征

表 3 列出了表层沉积物 9 种重金属元素的含量测定结果。变异系数能反映各断面重金属含量的离散程度, 大于 36% 为高度变异, 16% ~ 36% 之间为中等变异, 小于 15% 为小变异<sup>[19]</sup>。分析显示, Hg、Ni、Mn、As 和 Cd 的变异系数分别为 75.00%、61.27%、52.08%、47.15% 和 39.12%, 均大于 36%, 属于高度变异; Pb、Cu、Zn 和 Cr 的变异系数分别为 27.62%、27.27%、

22.37% 和 16.94%, 属于中等变异, 预示着该水库表层重金属在空间分布上存在较大的差异性<sup>[20]</sup>。

与上海市土壤背景值相比, 东风西沙水库各断面的 Hg 和 Ni 均未超标, 但 Cd 的超标率达 100%, As、Cu、Zn、Mn、Pb 和 Cr 的超标率分别为 50%、40%、40%、40%、10% 和 10%。从平均含量看, 仅有 Cd 和 As 为上海市土壤背景值的 5.23 倍、1.24 倍, 而其余 7 种则低于该背景值。与全国土壤背景值相比, 该水库 Cd、Cu、As、Zn 和 Cr 的平均含量为该背景值的 9.71 倍、1.39 倍、1.23 倍、1.22 倍和 1.15 倍, 而 Cd 高达 9.71 倍, 富集情况特别严重, 这可能与水库上游的长江流域存在着大量的采矿、造船、电子废物和加工业等污水排放有关<sup>[7-9, 21-22]</sup>。

表 3 东风西沙水库表层沉积物重金属元素的平均含量及变异系数

Tab.3 Average content and Coefficient of Variation of heavy metals in surface sediment of Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

重金属元素 Heavy metal elements	Hg	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn	Mn
平均值 Average value/(mg/kg)	0.02	11.30	0.68	18.51	27.73	13.07	62.18	82.29	488.66
标准差 Standard deviation/(mg/kg)	0.02	5.33	0.27	5.11	7.56	8.19	10.53	18.41	254.49
变异系数 Coefficient of variation/%	75.00	47.15	39.12	27.62	27.27	61.27	16.94	22.37	52.08
上海市土壤背景值 Shanghai soil background values <sup>[14]</sup> /(mg/kg)	0.10	9.11	0.13	25.48	28.60	40.00	75.00	86.11	560.20
全国土壤背景值 National soil background values <sup>[23]</sup> /(mg/kg)	0.04	9.20	0.07	23.60	20.00	23.40	53.90	67.70	482.00

### 2.2.2 重金属的空间分布

采用反距离加权插值法绘制的重金属元素在 10 个断面的含量分布见图 3, 可清晰地看出, 表层沉积物中各重金属元素具有基本一致的空间分布特征。9 种重金属元素的含量都是以库尾(断面 I)最高, 其他断面则相对较低。但 Cd、Cu 和 Mn 在库首(断面 X), Cd、Pb、Cu、Cr、Zn 在接近库尾(断面 II), Cd、Pb、Cu、Ni、Zn 和 Mn 在库中弯道处(断面 VI)也有较高的含量。

除断面 X 和 VI 外, 其余断面从进水口(库首)到出水口(库尾), 重金属含量随水流方向是逐步上升的, 余晖等<sup>[24]</sup>认为该种重金属含量分布模式属于洪水冲刷型堆积模式, 主要原因是受水流冲刷作用的影响, 入水口处细颗粒沉积物的沉降较

为困难, 导致重金属含量较低, 而在出水口处情况相反。同时, 部分学者认为湖库型水库有加重坝前沉积物淤积的特点, 吸附于沉积物颗粒表面的重金属随着泥沙沉降在库区<sup>[25]</sup>。因此导致库首区域表层沉积物中重金属含量偏低, 库尾区域重金属含量偏高的特点。断面 X 和 VI 处重金属含量较高则可能是地形所导致的, 断面 X 处水深较深, 最深处可达 9.9 m, 平均水深为 6.0 m, 形成深水弱动力的环境, 有利于沉积物沉降, 重金属含量偏高, 到断面 IX 时, 水深变浅, 平均水深为 2.9 m, 形成浅水强动力环境, 沉积物不易沉降, 因此重金属含量偏低<sup>[26]</sup>; 断面 VI 处于弯道处, 水域面积变宽, 水流变缓, 水流冲刷作用减弱, 沉积物沉降明显, 重金属含量上升。

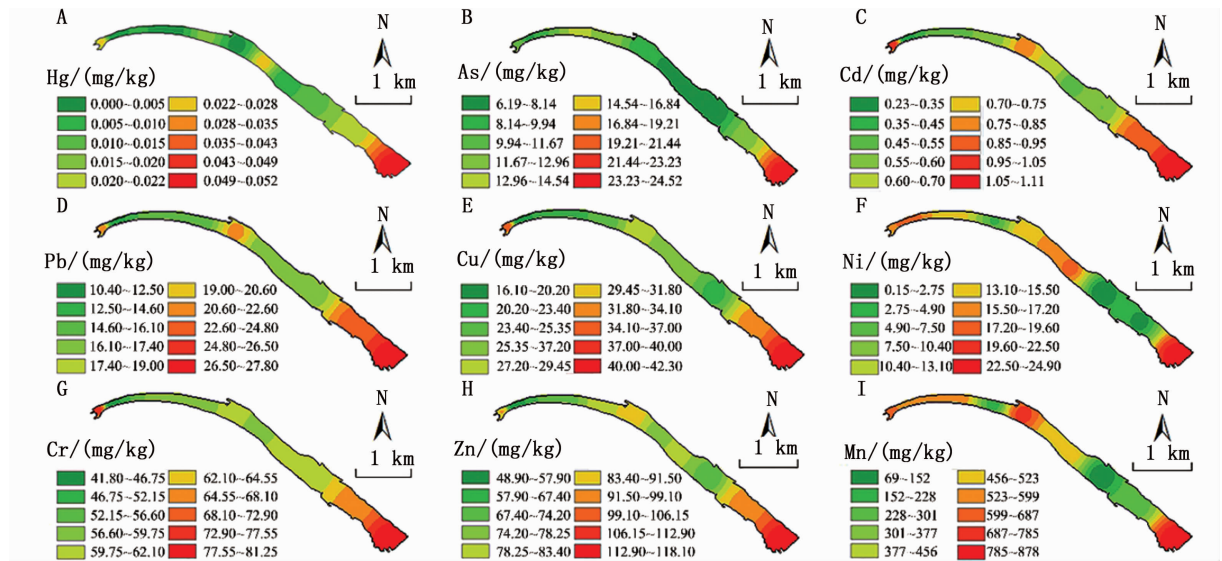


图3 东风西沙水库表层沉积物重金属含量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metals in surface sediment of Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

2.2.3 与邻近水体沉积物重金属含量的比较

长江口附近水体环境均长期受到人类活动的影响,频繁的人类活动对该区域水体环境造成不同程度的污染,为了解东风西沙水库在长江口区域水体中的重金属污染水平,本文选择长江口不同类型水体与其比较。与邻近的长江口大型江心水库——青草沙水库相比,本水库的重金属含量均相对较低。与长江口的自然水域相比,本

水库的As和Cd元素含量较高,其余6种元素的含量则相对较低。与太湖相比,本水库的Hg、Pb、Ni和Cr相对较低,As、Cu和Zn略高,Cd则为太湖的2.27倍。与洪泽湖相比,本水库的Cr和Zn略高,其余6种元素则相对较低。因此,东风西沙水库表层沉积物的重金属含量总体上低于邻近水体,处于偏低的水平(见表4)。

表4 东风西沙水库表层沉积物重金属平均含量与邻近水体的比较

Tab.4 Comparison of average heavy metal contents of surface sediment in Dongfeng Xisha

研究区域 Research area	Reservoir with adjacent water bodies									文献来源 Literature sources
	Hg	Cd	As	Ni	Pb	Cu	Cr	Zn	Mn	
东风西沙水库 (n = 10) Dongfeng Xisha Reservoir (n = 10)	0.02	0.68	11.3	13.07	18.51	27.73	62.18	82.29	488.66	本研究
青草沙水库 Qingcaosha Reservoir	-	1.16	-	32.63	23.74	34.28	-	97.66	-	吴雪飞等 <sup>[27]</sup>
长江口 Changjiang Estuary	0.11	0.31	9.42	34.68	30.33	34.46	89.27	111.36	-	李亭亭等 <sup>[8]</sup>
太湖 Taihu Lake	0.09	0.30	11.15	27.69	25.10	22.10	65.86	76.33	-	毛志刚等 <sup>[28]</sup>
洪泽湖 Hongze Lake	0.07	3.24	23.67	-	18.82	34.99	57.59	72.44	690.00	余辉等 <sup>[24]</sup>

注:“n”表示采样断面数;“-”表示无对应值

Notes: “n” means the number of sampled sections; “-” means no corresponding value

## 2.3 重金属元素之间的来源分析

### 2.3.1 相关性分析

利用 Pearson 相关性, 研究中值粒径与各重金属元素间的关联性, 结果显示, 中值粒径与 Hg、As、Cu、Zn、Cr 和 Pb 之间存在显著相关, 说明粒

度对这 6 种元素的分布起着重要作用。

Mn-Ni 和 As-Hg-Cr-Cd-Cu-Zn-Pb 两组之间各自存在着显著的正相关关系, 且相关系数均大于 0.6 (表 5), 表明这些重金属的来源相似, 具有相似的地球化学特性<sup>[16,24]</sup>。

表 5 东风西沙水库表层沉积物重金属含量的相关性 ( $n=10$ )

Tab. 5 Pearson correlation of heavy metal contents in surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China ( $n=10$ )

	Hg	As	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	Mn	Pb	D50
Hg	1									
As	0.851 **	1								
Cd	0.670	0.650 *	1							
Cu	0.737 *	0.714 *	0.968 **	1						
Zn	0.707 *	0.763 *	0.942 **	0.966 **	1					
Cr	0.753 *	0.680 *	0.917 **	0.941 **	0.927 **	1				
Ni	0.390	0.350	0.140	0.290	0.170	0.180	1			
Mn	0.340	0.480	0.410	0.490	0.400	0.370	0.904 **	1		
Pb	0.610	0.686 *	0.964 **	0.953 **	0.962 **	0.888 **	0.120	0.400	1	
D50	0.804 **	0.892 **	0.617	0.721 *	0.732 *	0.674 *	0.473	0.532	0.686 *	1

注: \*\* 表示 0.01 水平 (双侧) 上显著相关; \* 表示 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; D50 为中值粒径

Notes: \*\* represents a significant correlation at the 0.01 level (bilateral); \* indicates a significant correlation at the 0.05 level (bilateral); D50 is the median particle size

### 2.3.2 主成分分析

主成分分析可进一步解析这些重金属元素的污染贡献及其关联性。表 6 列出了 9 种重金属元素的主成分载荷, 可见前 2 个主成分已解释了总方差的 61.73% 和 27.22%。从图 4 可以发现, As-Hg-Cr-Cd-Cu-Zn-Pb 在第 1 主成分上有较高的正载荷, 根据方明等<sup>[7]</sup>、李亭亭等<sup>[8]</sup>、何中发等<sup>[9]</sup>的研究发现, Cu、Zn、As 和 Cd 等元素主要来源于采矿、造船、电子废物等工业污水和上游地表径流, 预示着工业污水对沉积物重金属的影响。Mn-Ni 在第 2 主成分上有较高的正载荷, Ni 和 Mn 为参与地球化学循环的主要元素, 且 Ni-Mn 的贡献率较低, 代表了地球化学成分对沉积物重金属的影响<sup>[29-32]</sup>。

## 2.4 重金属污染综合评价

### 2.4.1 地积累指数法

由表 7 可知, Hg、Pb、Cu、Ni、Cr 和 Zn 等 6 种元素在各断面的  $I_{geo}$  值均为负值, 污染等级为 0, 处于清洁水平。Cd 的  $I_{geo}$  值在 0.25 ~ 2.50 之间, 平均污染等级为 2, 处于偏中度污染水平, 其中轻微、偏中度和中度污染的断面比例为 10%、40% 和 50%。但 As 和 Mn 在断面 I 处于轻微污染, 其

他断面则处于清洁水平。从水平分布看, 断面 I 的污染相对严重, 有 Cd、As 和 Mn 3 个元素达到中度或轻度污染程度, 其他断面只有 Cd 达到中度或轻度污染程度。

表 6 东风西沙水库表层重金属含量的主成分分析

Tab. 6 Principal component analysis of heavy metals in surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

项目 Item	主成分 1 PCA1	主成分 2 PCA2
特征值 Characteristic value	5.56	2.45
方差贡献率 Variance contribution /%	61.73	27.22
方差累计贡献率 Cumulative variance contribution /%	61.73	88.95
Cu	0.99	-0.02
Zn	0.96	-0.13
Cd	0.93	-0.13
Cr	0.93	-0.08
Pb	0.91	-0.18
As	0.89	-0.24
Hg	0.78	-0.30
Mn	0.75	0.65
Ni	0.63	0.74

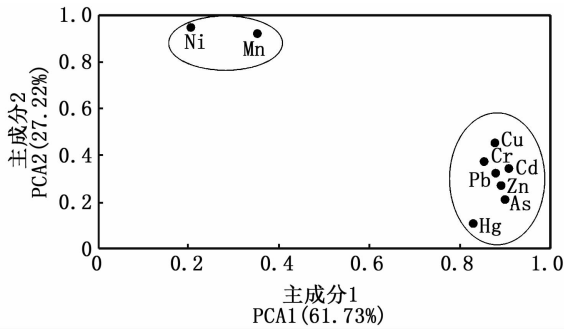


图 4 东风西沙水库表层沉积物重金属的主成分载荷  
**Fig. 4 Principal component loads of heavy metals insurface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China**

2.4.2 潜在生态风险指数法

由表 8 可知,Cd 的潜在风险等级总体上达到了强生态风险水平,其中达到很强生态危害水平的断面比例高达 40%。其他 8 种元素在 10 个断面的  $E_f^i$  值均小于 40,潜在风险轻微。9 种重金属的  $E_f^i$  指数均值依次为 Cd > As > Hg > Cu > Pb > Mn > Cr > Zn > Ni。

由  $R_1$  指数可以看出,该水库表层沉积物的潜在生态风险总体处于中等生态危害水平,其中断面 I 达到强生态危害水平,其  $R_1$  值高达 322.13。各断面  $R_1$  值中 Cd 的贡献率最高,潜在生态风险等级依次为断面 I > X > II > VI > V > VII > III > VIII > IV > IX。

表 7 东风西沙水库表层沉积物重金属地积累指数  $I_{geo}$  及污染级别

**Tab. 7 Heavy metals geo-accumulation index  $I_{geo}$  and pollution levels in surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China**

断面编号 Section number	$I_{geo}$ /污染级别 $I_{geo}$ /Pollution level								
	Hg	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn	Mn
I	-1.53/0	0.84/1	2.50/3	-0.46/0	-0.02/0	-1.27/0	-0.47/0	-0.13/0	0.06/1
II	-6.16/0	-0.12/0	2.22/3	-0.66/0	-0.38/0	-5.10/0	-0.78/0	-0.41/0	-1.72/0
III	-3.32/0	-1.14/0	1.47/2	-1.22/0	-0.96/0	-8.65/0	-0.89/0	-0.89/0	-3.60/0
IV	-4.74/0	-0.93/0	1.35/2	-1.24/0	-0.71/0	-1.71/0	-0.87/0	-0.70/0	-0.70/0
V	-2.56/0	-0.78/0	1.74/2	-1.24/0	-0.69/0	-1.85/0	-0.96/0	-0.78/0	-0.80/0
VI	-6.03/0	-0.59/0	2.03/3	-0.83/0	-0.57/0	-2.00/0	-0.89/0	-0.55/0	-0.16/0
VII	-3.03/0	-0.10/0	1.56/2	-1.30/0	-0.81/0	-3.80/0	-0.93/0	-0.67/0	-2.23/0
VIII	-	-0.01/0	1.39/2	-1.31/0	-0.96/0	-2.11/0	-0.95/0	-0.83/0	-0.56/0
IX	-	-0.82/0	0.25/1	-1.87/0	-1.41/0	-1.67/0	-1.43/0	-1.40/0	-0.66/0
X	-2.63/0	-0.27/0	2.34/3	-0.82/0	-0.27/0	-1.82/0	-0.59/0	-0.49/0	-0.36/0
均值 Average value	-3.75/0	-0.39/0	1.69/2	-1.10/0	-0.68/0	-3.00/0	-0.88/0	-0.69/0	-1.07/0
污染程度 Pollution degree	清洁	清洁	偏中度	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁

注:“-”表示无对应值

Notes: “-” means no corresponding value

通过对比重金属污染指数  $I_{geo}$  值和  $E_f^i$  指数均值排序结果,可以发现,Cd 污染最为严重,但在 Zn、Pb 和 Hg 排列上存在差异,这可能是由于重金属的毒性系数差异所造成的。Hg 的毒性系数高达 40,而 Pb 和 Zn 的毒性系数仅为 5 和 1。这

样,地积累指数法评估为最低污染程度的 Hg,经毒性系数折算后达到了较高的生态风险排位,而 Zn 的生态风险排位则下降,表明潜在生态风险指数法更偏向于重金属毒害效应的特点。

表 8 东风西沙水库表层沉积物重金属潜在生态危害指数

Tab. 8  $E_p^i$  and  $R_1$  of heavy metals in surface sediment from Dongfeng Xisha Reservoir in Shanghai, China

断面编号 Section number	单重金属潜在风险指数( $E_p^i$ )									综合潜在生态风险指数( $R_1$ ) Integrated potential ecological risk index ( $R_1$ )	风险等级 Risk level
	Single heavy metal potential risk index ( $E_p^i$ )										
	Hg	As	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	Zn	Mn		
I	20.84	26.92	255.18	5.45	7.39	1.24	2.17	1.37	1.57	322.13	强
II	8.40	13.80	209.79	4.75	5.77	0.09	1.74	1.13	0.45	245.92	中等
III	6.00	6.80	124.43	3.22	3.86	0.01	1.62	0.81	0.12	146.87	中等
IV	2.24	7.90	114.42	3.17	4.60	0.92	1.65	0.92	0.92	136.74	中等
V	10.16	8.73	150.76	3.18	4.64	0.83	1.54	0.87	0.86	181.57	中等
VI	0.92	9.99	184.06	4.21	5.05	0.75	1.62	1.02	1.34	208.96	中等
VII	7.36	14.01	132.44	3.05	4.28	0.22	1.58	0.94	0.32	164.20	中等
VIII	-	14.95	118.22	3.02	3.86	0.69	1.56	0.84	1.01	144.15	中等
IX	-	8.50	53.35	2.05	2.82	0.94	1.11	0.57	0.95	70.29	中等
X	9.68	12.45	227.42	4.24	6.21	0.85	2.00	1.07	1.17	265.09	中等
平均值 Average value	8.2	12.41	157.01	3.63	4.85	0.65	1.66	0.95	0.87	188.59	中等
风险等级 Risk level	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	-	-

注：“-”表示无对应值

Notes: “-” means no corresponding value

### 3 结论

东风西沙水库表层沉积物中砂粒和粉砂含量较高,黏土含量较低,三者的平均含量分别为46.29%、42.6%和11.08%。断面I、II、VI、VII、X的沉积物属于砂粒质沉积物;断面III、IV、V、VI、IX则为粉砂粒质沉积物。

除Cd富集现象明显,远超背景值外,其余8种重金属均略高于或低于背景值;空间分布上,9种元素的含量基本都以接近库尾(断面I)、库首(断面X)和库中弯道处(断面VI)最高或较高。

相关性分析与主成分分析结果表明,粒度对6种元素的分布起着重要作用,Mn-Ni和As-Hg-Cr-Cd-Cu-Zn-Pb两组重金属相关性显著;重金属以输入性来源为主。

地积累指数评价显示Cd为最高污染元素,总体污染程度为偏中度,其他8种元素污染程度均为清洁,污染程度依次为Cd > As > Cu > Zn > Cr > Mn > Pb > Ni > Hg。

潜在生态风险评价显示Cd为主要生态风险贡献因子,单重金属潜在风险指数依次为Cd > As > Hg > Cu > Pb > Mn > Cr > Zn > Ni。水库处于中等生态危害水平。

本工作得到赵振官工程师和上海市东风西沙水库管理处的大力支持,在此谨致谢忱!

### 参考文献:

- [1] ZHANG P J, HU R, ZHU L, et al. Distributions and contamination assessment of heavy metals in the surface sediments of western Laizhou Bay: Implications for the sources and influencing factors [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 119(1): 429-438.
- [2] 于佳佳,尹洪斌,高永年,等.太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J].中国环境科学,2017,37(6): 2287-2294.  
YU J J, YIN H B, GAO Y N, et al. Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2287-2294.
- [3] OCHIENG E Z, LALAH J O, WANDIGA S O. Analysis of heavy metals in water and surface sediment in five rift valley lakes in kenya for assessment of recent increase in anthropogenic activities [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(5): 570-576.
- [4] 林承奇,胡恭任,于瑞莲,等.九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J].中国环境科学,2016,36(4): 1218-1225.  
LIN C Q, HU G R, YU R L, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in offshore surface sediments from Jiulong River [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1218-1225.
- [5] KAMALA-KANNAN S, BATVARI P D, LEE K J, et al. Assessment of heavy metals (Cd, Cr and Pb) in water, sediment and seaweed (*Ulva lactuca*) in the Pulicat Lake, South East India [J]. Chemosphere, 2008, 71(7): 1233-1240.
- [6] 肖尚斌,刘德富,王雨春,等.三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征[J].长江流域资源与环境,2011,20(8):



- 983-989.
- XIAO S B, LIU D F, WANG Y C, et al. Characteristic of heavy metal pollution in sediment at the Xiangxi Bar of Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8): 983-989.
- [7] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 563-569.
- FANG M, WU Y J, LIU H, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 563-569.
- [8] 李亭亭, 王京刚, 王颖, 等. 长江口滨岸重金属含量、形态及其分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6): 1189-1196.
- LI T T, WANG J G, WANG Y, et al. Contents, forms and distributions of heavy metals in surface water and sediments from Yangtze Estuary [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1189-1196.
- [9] 何中发, 杨守业, 赵宝成, 等. 长江口地区近 1500 年以来沉积物重金属含量变化及其对流域环境响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 21-30.
- HE Z F, YANG S Y, ZHAO B C, et al. Changes in heavy metal elements in the sediment from Changjiang Estuary and their environment responses in recent 1500 years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 21-30.
- [10] 唐斌, 仝云云, 唐文乔, 等. 长江口东风西沙水域江豚种群调查[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(1): 126-132.
- TANG B, TONG Y Y, TANG W Q, et al. Population size survey of Yangtze finless porpoise in the Dongfengxisha waters of Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(1): 126-132.
- [11] 乔雪, 刘其根, 陈丽平, 等. 长江口明珠湖大型底栖动物群落结构特征与水质评价[J]. *上海海洋大学学报*, DOI: 10.12024/jsou.20190502655.
- QIAO X, LIU Q G, CHEN L P, et al. Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Mingzhu Lake near the Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, DOI: 10.12024/jsou.20190502655.
- [12] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine [J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108-118.
- [13] 李芬芳, 符哲, 李利强, 等. 洞庭湖表层沉积物重金属污染状况评估[J]. *环境化学*, 2017, 36(11): 2462-2471.
- LI F F, FU Z, LI L Q, et al. Assessment on heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake [J], 2017, 36(11): 2462-2471.
- [14] 王云, 汪雅谷, 罗海林, 等. 上海市土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- WANG Y, WANG Y G, LUO H L, et al. Shanghai soil background values [M]. Beijing: China Environmental Press, 1992.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment ecological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 施沁璇, 盛鹏程, 房伟平, 等. 钱塘江杭州段表层沉积物中重金属的生态风险及其生物累积[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(5): 710-717.
- SHI Q X, SHENG P C, FANG W P, et al. Ecological risk and bioaccumulation of heavy metals in the surface sediments in Qiantang Rive [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(5): 710-717.
- [17] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 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*, 2008(2): 112-115.
- XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008(2): 112-115.
- [18] 李晓刚, 白巧慧, 庞奖励, 等. 丹江流域河流表层沉积物粒度分析与重金属污染评价[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(4): 93-98.
- LI X G, BAI Q H, PANG J L, et al. Grain size analysis and heavy metal pollution assessment of river surface sediments in Danjiang River Basin [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(4): 93-98.
- [19] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1834-1844.
- MA Q, ZHAO G X. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1834-1844.
- [20] 何博, 赵慧, 孟晶, 等. 快速城市化区域河网沉积物重金属污染风险评价与管控对策[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(8): 2771-2779.
- HE B, ZHAO H, MENG J, et al. Risk assessment and management of heavy metals in river sediments from the rapid urbanization region of China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(8): 2771-2779.
- [21] 何七勇, 吕卫光, 郑宪清, 等. 环东风西沙水库二级保护区水质和土壤的环境评价研究[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(4): 6-10.
- HE Q Y, LYU W G, ZHENG X Q, et al. Environmental evaluation on water quality and soil of secondary reserves around Dongfeng Xisha reservoir [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(4): 6-10.
- [22] ELIAS M S. Multivariate analysis for source identification of pollution in sediment of Linggi River, Malaysia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(4): 257-272.
- [23] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- China National Environmental Monitoring Centre. China soil background values [M]. Beijing: China Environmental Press, 1990.

- [24] 余辉,张文斌,余建平. 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,2011,32(2):437-444.  
YU H, ZHANG W B, YU J P. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake[J]. Environmental Science,2011, 32(2):437-444.
- [25] 王蒙蒙,宋刚福,翟付杰,等. 陆浑水库沉积物重金属空间分布特征及风险评价[J]. 环境科学学报,2020,40(4):1331-1339.  
WANG M M, SONG G F, ZHAI F J, et al. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of Luhun Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2020,40(4):1331-1339.
- [26] 赵利,彭学超,钟和贤,等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,2016,36(6):111-122.  
ZHAO L, PENG X C, ZHONG H X, et al. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the northern shelf region of the south China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016,36(6):111-122.
- [27] 吴雪飞,倪奔. 青草沙水库底泥重金属含量分析与评价[J]. 净水技术,2018,37(s2):5-8,20.  
WU X F, NI B. Analysis and evaluation of heavy metals in sediment from Qingcaosha Reservoir[J]. Water Purification Technology,2018,37(s2):5-8,20.
- [28] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2014,35(1):186-193.  
MAO Z G, GU X H, LU X M, et al. Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu[J]. Environmental Science,2014,35(1):186-193.
- [29] 王军,陈振楼,王初,等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学,2007,28(3):647-653.  
WANG J, CHEN Z L, WANG C, et al. Heavy Metal Content and Ecological Risk Warning Assessment of Vegetable Soils in Chongming Island, Shanghai City [J]. Environmental Science,2007,28(3):647-653.
- [30] 孙超,陈振楼,毕春娟,等. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 地理学报,2009,64(5):619-628.  
SUN C, CHEN Z L, BI C J, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agriculture soils of Chongming Island, Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 2009,64(5):619-628.
- [31] 单宇,陈俊,吴克,等. 巢湖小流域表层沉积物重金属污染分析与评价[J]. 巢湖学院学报,2019,21(3):1-6.  
SHAN Y, CHEN J, WU K, et al. Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Chaohu Small Basin[J]. Journal of Chaohu University,2019,21(3):1-6.
- [32] 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源[J]. 环境科学,2006,27(1):137-141.  
LI Y, YU Z M, SONG X X. Application of Principal Component Analysis (PCA) for the Estimation of Source of Heavy Metal Contamination in Marine Sediments [J]. Environmental Science,2006,27(1):137-141.

## Content characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment of Dongfeng Xisha Reservoir, Shanghai, China

BI Baoshuai<sup>1</sup>, YU Hongchang<sup>1</sup>, ZHANG Ya<sup>1,2</sup>, TANG Wenqiao<sup>1,3</sup>

(1. Shanghai Universities Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai 201306, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Dongfeng Xisha Reservoir, located in the west side of Chongming Island, is the second largest source of drinking water in Shanghai. In order to understand the pollution of heavy metals in surface sediments, the particle size of surface sediment samples collected from 10 sections of the reservoir in 2019 was analyzed, the contents and potential ecological risk of nine heavy metal elements were analyzed and evaluated. The results showed that the average content of sand, silt and clay were 46.29%, 42.63% and 11.08%, and on the whole, the surface sediment of the reservoir is fine sand sediment. The average contents of Hg, Cd, As, Ni, Pb, Cu, Cr, Zn, Mn were 0.02, 0.68, 11.30, 13.07, 18.51, 27.73, 62.18, 82.29, 488.66 mg/kg. Only the average contents of Cd and As were 5.23 and 1.24 times the Shanghai soil background value, and the others were below this background value. Pearson correlation coefficient showed that the sources of heavy metals in surface sediments were similar and the particle sizes played an important role in the distribution of Hg, As, Cu, Zn, Cr and Pb; industrial wastewater, agricultural wastewater and domestic sewage were the probable sources by the method of principal component analysis (PCA). The result of Geo-accumulation index showed that Cd was the main pollution element, which was generally at a moderate pollution level, while the other 8 elements were at a clean pollution level. Potential ecological risk assessment showed Cd was the main ecological risk contribution factor, which is at a strong ecological hazard level, and the other 8 elements were at a slight ecological hazard level. The reservoir is generally at a moderate ecological risk level.

**Key words:** Dongfeng Xisha Reservoir; surface sediment; heavy metals; pollution evaluation; ecological risk