

长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险

单丽丽¹ 袁旭音^{1*} 茅昌平² 季峻峰²

(1. 江海大学环境科学与工程学院, 南京 210024; 2. 南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要 不同来源沉积物中重金属的污染特性差异明显, 影响了它们的危害程度. 采集长江下游市政、矿山、工业及港口来源的沉积物, 并用 ICP-AES 测定常量元素, 原子吸收光谱测定 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 5 种重金属. 结果表明, 重金属在市政来源中含量中等且分布相对均匀, 矿山来源的以 Cu、Pb 为主, 工业来源的金属含量均较高, 港口来源 Cd 的含量最高. 重金属均有一定的富集, 尤其是 Cd 的富集系数, 最高达到 7.3. 通过重金属与常量元素的主成分分析研究了沉积物中重金属的来源, 发现市政来源的重金属主要来自雨水冲刷城市下垫面及管道内壁, 矿山来源重金属的特点由矿山开采及尾矿淋滤决定, 工业来源重金属大多由机械碎屑和金属溶解产生, 港口来源重金属主要是密集的运输船与车辆气体排放引起. 采用 Hakanson 的生态风险指数法对不同来源沉积物中重金属进行风险评价, 其单因子生态危害程度为 Cd > Cu > Pb > Cr > Zn, 综合潜在生态风险指数表明, 不同来源重金属的危害程度依次为港口源 > 工业源 > 矿山源 > 市政源.

关键词 沉积物; 重金属来源; 生态风险; 长江下游

中图分类号: X142; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2399-06

Characteristics of Heavy Metals in Sediments from Different Sources and Their Ecological Risks in the Lower Reaches of the Yangtze River

SHAN Li-li¹, YUAN Xu-yin¹, MAO Chang-ping², JI Jun-feng²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Characteristics of heavy metals in sediments from different sources are significant varied, which impact on the degree of damage for aquatic system. Samples from municipal, mining, industrial and port sources in the lower reaches of the Yangtze River were analyzed for major elements and Cu, Zn, Pb, Cd, Cr by ICP-AES and AAS. The results showed that the concentrations were moderately and relatively uniform for heavy metals in the municipal source, Cu, Pb were dominated for the mine source. Five metals had higher concentrations in industrial source, and Cd was the highest in sediments from port source. The enrichment factors of heavy metals in sediments were high, especially Cd, up to 7.3. Through principal component analysis of major elements and heavy metals, it is concluded that heavy metals of municipal source stem from the erosion of road surface and inner pipeline in cities, heavy metals of mine source come from the mining and the leaching of tailings, heavy metals of industrial source are mostly generated by mechanical debris and metal dissolution, heavy metals of port sources are mainly from the transport ships and the intensive gas emissions from vehicles. The ecological risks of these sediments were evaluated with the Hakanson ecological risk index. It is concluded that the single factors of the ecological hazards for metals are Cd > Cu > Pb > Cr > Zn, the comprehensive index of potential ecological risks for metals from different sources decrease with port source > industrial source > mine source > municipal source.

Key words sediment; source of heavy metal; ecological risk; the lower reaches of the Yangtze River

重金属通过各种途径进入水环境, 其中绝大部分由悬浮物与沉积物携带, 而悬浮物运移过程中, 当环境条件变化时, 也会沉淀变为沉积物. 沉积物中重金属能明显地反映水系重金属污染的程度, 其物质组成和重金属特征能反映重金属的来源^[1].

长江下游沿岸城市众多, 是我国最具活力的经济带. 近 10 年沿江城市的经济发展迅速, 矿业开发、工业生产、城市生活产生的废水排入水体, 使水质逐渐恶化, 其中重金属是主要的污染物. 国外对河流沉积物中重金属来源的研究, 大多在特定的区域, 如河口、城市段^[2-4], 或者分辨人类活动和自然成因的物质, 以此来讨论其环境风险^[5-7]; 目前长江沉积物重

金属的研究主要针对重金属的含量、分布、形态等综合污染状况^[8-12], 很少从不同污染源方面进行研究, 而不同的污染源能影响重金属的危害程度. 为了解不同来源重金属的污染特性, 本研究就长江下游段 4 种不同来源的沉积物样, 分析其重金属的组成特点及污染状况, 将主元素与重金属进行主成分分析, 探讨不同来源重金属的携带特点, 最后对各种来源的重金属进行生态风险评价. 这对长江下游沉积物

收稿日期: 2007-09-25; 修订日期: 2007-12-18

基金项目: 国土资源调查项目(20060201); 水文水资源与水利工程国家重点实验室开放基金项目(2005406711)

作者简介: 单丽丽(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: lily905@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yxy_hjy@hhu.edu.cn

中重金属污染特征的分析及生态风险研究有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

2006年下半年,在长江下游沿岸城市铜陵、南京、镇江、江阴、南通等地选取不同污染源附近的水域,采用GPS定位采集近岸表层沉积物.根据长江下游特点,选择市政、矿山、工业和港口污染源4种不同来源的沉积物,每种来源样品为8个,其中矿山来源选取铜陵的新桥矿下游河流及入江口作为采样区域,工业来源主要是沿江企业排污口,市政来源为城市污水排口,港口来源则选取较大且较繁忙的港口水域.采样点布置见图1.

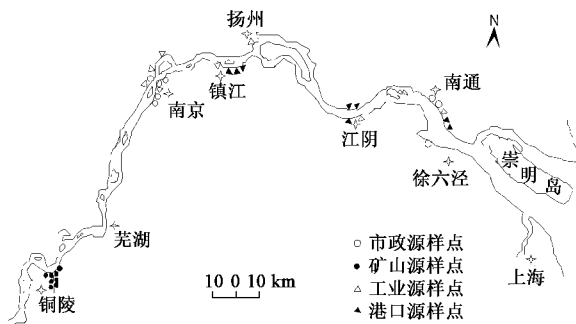


图1 长江下游采样点布置

Fig.1 Sampling sites in the lower reaches of the Yangtze River

样品在35℃恒温烘箱中烘干后,去除植物根系、底栖生物及石块等杂质后,采用研钵研磨,过100目尼龙筛后装袋保存备用.

1.2 样品分析

样品的常量元素采用ICP-AES进行分析测定,有机质(OM)的测定采用水合热重铬酸钾氧化-比色法^[13].重金属元素则采用三酸消解法,即称取一定质量的沉积物样品用HNO₃-HF-HClO₄进行消解,采用TAS-986原子吸收分光光度计测定其含量.测定方法参见国家环保总局环境监测技术导则,标准引用(GB/T 17138-1997)见文献[14],其中Cd采用KMIBK萃取火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)测量.

为得到准确可靠的分析结果,本研究对每份样品平行测定,同批次样品设定空白和标准物质(GBW07309)对照,标准物质分析结果与实际值相吻合,样品平行误差均小于10%.

2 结果与讨论

2.1 不同来源常量元素的组成特征

常量元素反映了沉积物的组成特点,不同来源沉积物的常量元素分析结果如表1所示.

从表1中可以看出,有机质在市政来源中的含量最高,这是因为生活污水成分中包含较多有机质;Fe₂O₃和Al₂O₃则在矿山来源中含量最高,这与铜陵

表1 不同来源沉积物中常量元素的含量/%

Table 1 Concentration of major elements for sediments from different sources/%

种类	市政	矿山	工业	港口	背景值 ^[10]
Fe ₂ O ₃	5.80 ± 0.65	7.98 ± 3.07	6.53 ± 0.63	6.10 ± 0.93	5.49
Al ₂ O ₃	12.23 ± 1.27	14.70 ± 1.49	13.80 ± 1.26	12.9 ± 1.82	11.64
K ₂ O	2.30 ± 0.20	2.57 ± 0.50	2.53 ± 0.24	2.34 ± 0.38	2.20
Na ₂ O	1.22 ± 0.18	0.85 ± 0.34	0.95 ± 0.18	0.94 ± 0.34	1.47
CaO	4.89 ± 0.47	2.61 ± 1.55	4.29 ± 0.77	3.99 ± 1.68	3.06
MgO	2.39 ± 0.24	2.19 ± 0.60	2.30 ± 0.22	2.14 ± 0.75	2.91
SiO ₂	61.76 ± 4.73	59.23 ± 6.68	62.50 ± 5.11	62.95 ± 5.89	61.12
OM	2.34 ± 0.26	1.73 ± 0.40	1.29 ± 0.67	1.40 ± 0.27	—

矿区的特性密切相关^[15];SiO₂在港口沉积物中较高,Al₂O₃在矿山来源沉积物中较高,表明前者砂质成分多,而后者泥质成分多.其他元素与长江下游沉积物背景含量相比差别不大,显示长江下游沉积物总体地质背景的相似性.

2.2 不同来源重金属的含量分布特征

长江下游不同来源沉积物中重金属的分布特征见表2.从中可以看出,不同来源的沉积物中5种重金属的差异明显,这是岩石风化、淋滤和外源物质输

入共同作用的结果^[16].金属元素组成的差异反映了不同来源的特点.

市政来源中金属的平均含量不是最高,而且变化较小,只有Pb、Cd超过了背景值.原因可能是城市道路上车辆尾气排放及轮胎磨擦产生的污染物随雨水冲刷进入管道,随市政污水排入水体,导致沉积物中Pb、Cd的含量相对较高^[17];金属的变异系数差异较小,表明市政污水的成分组成相对稳定.矿山来源金属的含量差异很大,近矿区样点的Cu、Zn、Pb很

高,而且 5 种金属的变异系数相差很大,其中 Cu、Pb、Cd 的变异系数均超过 1,这主要是由于铜陵矿区水系沉积物组成的变化造成;工业污染源主要是机械、化工企业废水的排入,使得金属的含量在所有样点中均较高,其中 Zn、Pb 的平均含量最高,表明工业

废水携带了较多的重金属成分;港口来源沉积物主要受货物运输的影响,人为扰动频繁,造成了 Pb、Cd、Cr 的平均含量普遍较高,这是由于船舶航行、车辆轮胎摩擦、尾气排出的金属污染物聚积到沉积物中引起。

表 2 不同来源沉积物中重金属的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Concentrations of heavy metals in sediments from different sources/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

来源	项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
市政	范围	17.71 ~ 58.74	85.13 ~ 162.36	22.45 ~ 51.04	1.41 ~ 3.95	60.08 ~ 105.77
	平均值	41.08	121.47	36.06	2.30	83.75
	标准差	13.43	31.19	9.68	0.88	15.83
	变异系数	0.33	0.26	0.27	0.38	0.19
矿山	范围	30.53 ~ 507.18	87.09 ~ 333.39	16.06 ~ 195.76	0.71 ~ 10.80	39.08 ~ 92.08
	平均值	180.63	173.74	56.6	2.80	60.50
	标准差	199.11	89.95	59.90	3.34	19.90
	变异系数	1.10	0.52	1.06	1.19	0.33
工业	范围	61.29 ~ 196.08	101.94 ~ 295.63	30.88 ~ 127.83	1.76 ~ 5.06	77.14 ~ 145.81
	平均值	96.43	202.02	65.56	2.66	98.11
	标准差	43.86	80.31	34.50	1.22	25.08
	变异系数	0.45	0.40	0.53	0.46	0.26
港口	范围	25.20 ~ 126.71	71.34 ~ 347.34	19.05 ~ 59.13	2.60 ~ 4.54	72.48 ~ 232.33
	平均值	75.90	124.89	43.01	3.26	133.12
	标准差	39.23	90.86	12.49	0.63	49.22
	变异系数	0.52	0.73	0.29	0.19	0.37
背景值 ^[18]		57.04	143.7	26.9	0.45	84.71

富集系数表示元素超出背景值的程度,表 2 中各来源重金属的平均值与背景值的比值即为重金属的富集系数.图 2 显示了重金属在不同来源中的富集情况,其中 Cd 的富集系数明显高于其他元素.综合比较而言,工业来源与矿山来源的重金属均有不同程度的富集,其中矿山来源沉积物中 Cu 的富集比较显著;市政来源除 Pb、Cd 外,其他金属没有明显的富集,与沉积物的背景值相似;港口来源中 Cd 的富集最为突出,除 Zn 外,其余金属也有一定的富集。

2.3 常量元素与重金属的主成分分析

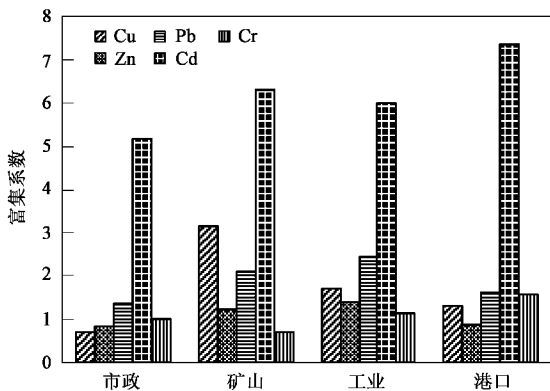
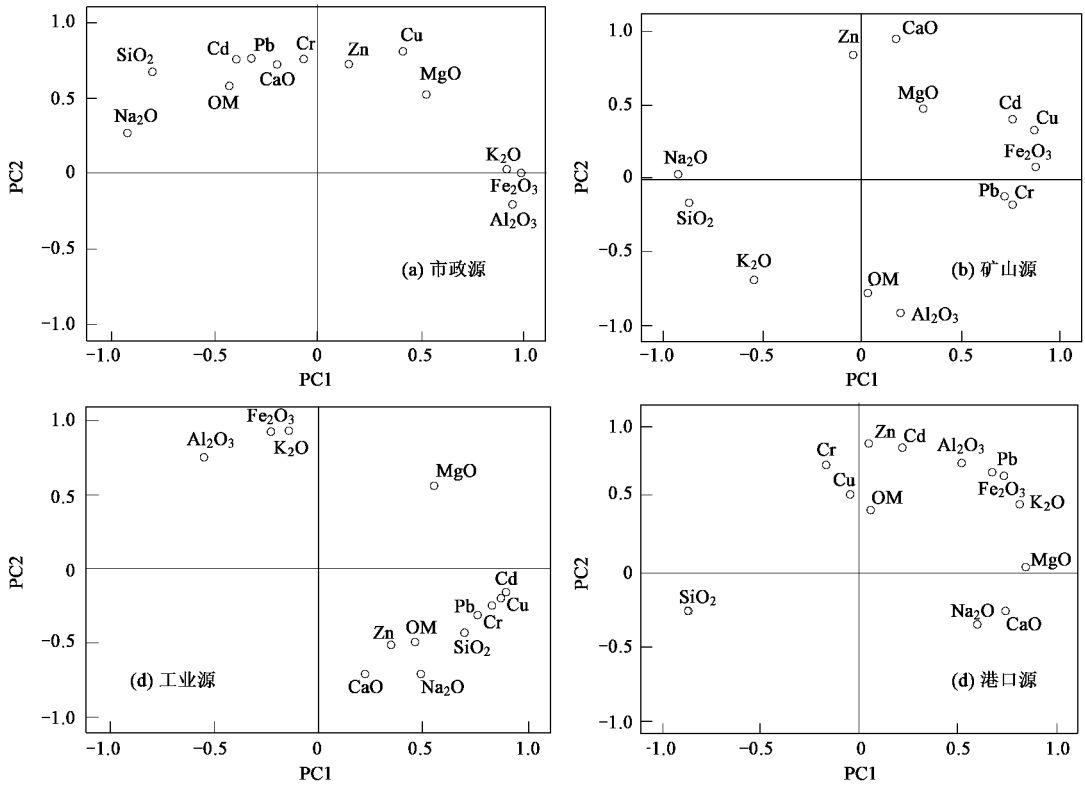


图 2 不同来源重金属的富集系数

Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals of different sources

常量元素的含量反映了沉积物中物质的组成特征,重金属主要由矿物颗粒携带或以矿物的形式进行迁移和沉淀,常量元素的组成对重金属的含量有着明显的影响^[19].通过对常量元素与重金属的主成分分析,可以分析重金属的来源与成因.主成分分析采用 SPSS13 统计软件,将常量元素与重金属元素作为因子,得出各元素之间的相关性,抽取 2 个主成分,载入绘图,具体分析结果见图 3。

由图 3 中可以看出,在市政来源中 CaO、MgO、OM 与 5 种金属的相关性较好,尤其 CaO、OM 与 Pb、Cd 集中在一起,而市政污水中的 Pb、Cd 主要来自冲刷城市下垫面的雨水,在降雨过程中,污染物随城市中的混凝土物质(主要成分为 CaO)及有机质进入市政管道中,经污水排口进入水体,这与城市道路雨水径流的水质特征是一致的^[20];矿山来源中 Fe_2O_3 与 Cu、Cr、Pb、Cd 集中在一起,因为铜陵矿石中有很多铁帽,Pb、Cd 作为矿山开采的伴生金属,随矿石的淋滤进入水体^[21];工业来源的 SiO_2 、OM 与 5 种重金属为一组合,表明机械、电子、化工工业(长江下游的主要工业类型)生产过程中产生的重金属废水含较多的有机质,在流动过程中又混入了较多泥沙^[22];港口来源中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 与 Zn、Pb、Cd 有较好的



PC1 为第一主成分, PC2 为第二主成分

图 3 元素主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of elements in sediment of different sources

关联性, OM 与 Cu、Cr 有较好的关联性, 表明港口的物质来源相对较杂(主要含有粉尘、油类及未处理的生活污水等)^[23], 重金属并非由粗粒物质(沙子)携带, 而是由细粒物质(泥)携带。

3 重金属潜在生态危害评价

3.1 评价方法

目前从沉积学的角度提出了多种重金属污染评价方法, 主要有地质累积指数法^[24]、污染负荷指数法^[25]、回归过量分析法^[26]、潜在生态危害指数法^[27]等。本研究采用 Hakanson 的生态风险指数法对不同来源沉积物中的重金属进行评价, 该方法的优势在于从重金属的生物毒性角度出发, 反映了多种污染物的综合影响, 并定量地区分出潜在生态危害的程度。

首先采用单因子指数法对沉积物样品中重金属的污染要素进行系数计算, 其次对多种金属的生态风险指数进行计算。潜在生态风险指数值(R_1)的计算公式如下:

$$C_i^i = C_i^s / C_n^i; E_i^i = T_i^i \times C_i^i; R_1 = \sum E_i^i$$

式中, C_i^s 为单一金属污染系数(以下同), T_i^i 为不同

金属生物毒性响应因子, E_i^i 为单一金属潜在生态风险因子, R_1 为多金属潜在生态风险指数。 C_i^s 为样品的实测浓度, C_n^i 为沉积物的背景参考值, 金属参照值(C_n^i)以长江沉积物背景值为参考值^[18](见表 2)。重金属的毒性系数(T_i^i)用于反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度^[27], Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 5 种重金属对应的毒性系数分别为 5、1、5、30、2。重金属潜在生态危害系数 E_i^i , 潜在生态危害指数 R_1 与污染程度的关系见表 3。

表 3 重金属潜在生态危害因子 E_i^i 和潜在生态风险指数 R_1 与污染程度的关系

Table 3 Potential ecological risk factor (E_i^i) and potential ecological risk index (R_1) about the pollution level of heavy metals

指数类型	所处范围	污染程度
潜在生态风险因子 E_i^i	$E_i^i < 40$	轻微生态危害
	$40 \leq E_i^i < 80$	中等生态危害
	$80 \leq E_i^i < 160$	强生态危害
	$160 \leq E_i^i < 320$	很强生态危害
	$E_i^i \geq 320$	极强生态危害
潜在生态风险指数 R_1	$R_1 < 150$	轻微生态危害
	$150 \leq R_1 < 300$	中等生态危害
	$300 \leq R_1 < 600$	强生态危害
	$R_1 \geq 600$	很强生态危害

3.2 重金属潜在生态风险评价

不同来源沉积物中重金属潜在生态危害指数 E_r^i 及各样点潜在生态风险指数 R_i 列于表4。总体上

表4 不同来源沉积物各重金属的潜在生态危害因子 E_r^i 及各采样点潜在生态危害因子 R_i

Table 4 Potential ecological risk factor (E_r^i) and potential ecological risk index (R_i) of heavy metals in surface sediments from different sources

来源	编号	E_r^i					R_i
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	
市政	1	3.04	0.82	4.90	95.06	1.42	105.23
	2	1.55	0.61	4.17	98.43	1.54	106.30
	3	4.23	1.08	7.35	152.36	1.87	166.90
	4	4.56	1.13	5.68	157.75	2.41	171.52
	5	5.15	0.76	6.53	115.28	2.01	129.73
	6	3.78	0.71	9.49	215.73	2.07	231.78
	7	4.03	1.06	8.64	266.29	2.50	282.52
	8	2.47	0.59	6.86	138.88	2.00	150.79
矿山	1	9.17	2.32	3.62	145.62	1.02	161.74
	2	2.68	0.61	5.83	47.87	0.92	57.90
	3	3.28	0.70	6.31	57.30	1.39	68.98
	4	3.11	0.66	6.06	48.54	1.67	60.04
	5	8.08	0.92	7.45	124.04	1.21	141.71
	6	44.46	1.26	15.53	728.09	1.99	791.32
	7	42.48	1.30	36.39	156.40	2.17	238.75
	8	15.83	1.21	10.52	188.93	1.43	217.92
工业	1	8.26	1.88	11.20	137.53	2.54	161.40
	2	6.63	1.82	11.02	129.44	1.92	150.84
	3	5.86	1.88	13.77	145.62	1.87	169.00
	4	5.37	0.84	6.92	149.66	1.91	164.70
	5	8.26	0.86	6.23	137.53	1.82	154.71
	6	6.13	0.71	5.74	118.65	2.13	133.36
	7	17.19	2.06	23.76	341.12	3.44	387.57
	8	9.93	1.20	18.84	276.40	2.90	309.26
港口	1	2.21	0.66	6.38	211.01	1.82	222.08
	2	3.90	0.69	8.76	242.70	3.24	259.29
	3	6.50	0.77	9.71	204.27	3.22	224.47
	4	3.01	0.71	7.43	195.51	2.95	209.61
	5	9.48	2.42	10.99	306.07	5.49	334.44
	6	11.11	0.53	7.60	175.28	3.46	197.98
	7	10.44	0.68	9.53	239.33	1.71	261.68
	8	6.65	0.87	7.99	219.78	3.14	238.43

看来,Cu、Zn、Pb、Cr 重金属潜在的生态危害指数大多属于轻微生态危害范畴,只有矿山来源的2个样点的Cu属于中等生态危害;Cd的潜在生态危害指数明显大于其它金属,大多为强生态危害,市政来源中有6个点属于强生态危害,其余样点为很强生态危害,矿山来源中有多数样点为强生态危害,个别点为极强生态危害;工业来源中6个点为强生态危害,1个点为很强生态危害;港口来源中全部样点均为很强生态危害范畴。

以单个重金属的潜在生态危害系数来评价,长

江下游4种来源沉积物中以Cd危害最为严重;Cu、Pb、Cr次之;Zn最弱。综合潜在生态危害指数 R_i 表明,大多样点为中等生态危害,个别矿山来源样点属于强生态危害范畴。

4 结论

(1)长江下游工业来源沉积物中重金属含量均较高,港口附近沉积物中Cd的含量最高,矿山来源沉积物以Cu、Pb为主,而市政来源沉积物中重金属的含量中等且变化相对均匀;从富集系数来看,Cd在所有来源沉积物中富集程度最高,其次为Pb与Cu。

(2)主成分分析表明,市政来源的重金属主要由冲刷城市下垫面及管道内壁的雨水携带,矿山来源重金属的组成特点是由矿山开采及尾矿淋滤决定的,工业来源中的重金属大多是由机械切割、金属溶解等产生的,港口来源重金属主要是运输船航行与车辆行驶引起的。

(3)重金属潜在生态危害因子分析显示,除Cd主要为强或很强生态危害外,其余金属多属于轻微生态危害范畴。重金属潜在的生态危害程度顺序为Cd > Cu > Pb > Cr > Zn。

(4)综合重金属的潜在生态风险指数结果,长江下游沉积物重金属多数属于中等生态风险,个别矿山样点属于强生态风险,不同来源沉积物重金属的风险程度依次为港口 > 工业 > 矿山 > 市政。

参考文献:

- [1] Marengo E, Gennaro M C, Robottie E, et al. Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida River sediments[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, **560**: 172-183.
- [2] Masson M, Blanc G, Schäfer J. Geochemical signals and source contributions to heavy metal (Cd, Zn, Pb, Cu) fluxes into the Gironde Estuary via its major tributaries[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**(1): 133-146.
- [3] Osher L J, Leclerc L, Wiersma G B, et al. Heavy metal contamination from historic mining in upland soil and estuarine sediments of Egypt Bay, Maine, USA[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **70**(1): 169-179.
- [4] Mil-Homens M, Stevens R L, Abrantes F, et al. Heavy metal assessment for surface sediments from three areas of the Portuguese continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, **26**(10): 1184-1205.
- [5] Banata K, Howarib F. Pollution load of Pb, Zn, and Cd and mineralogy of the recent sediments of Jordan River[J]. *Environment International*, 2003, **28**: 581-586.
- [6] Woitke P, Wellmita J, Helm D, et al. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river

- Danube[J]. *Chemosphere* ,2003 **51** : 633-642.
- [7] Swennen R, Vandersluys J. Anthropogenic impact on sediment composition and geochemistry in vertical over bank Profiles of river alluvium from Belgium and Luxembourg[J]. *Journal of Geochemical Exploration* ,2002 **75** 93-105.
- [8] 沈敏,于红霞,邓西海.长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J].*环境监测管理和技术* 2006 **18**(5):15-18.
- [9] 朱圣清,臧小平.长江主要城市江段重金属污染状况及特征[J].*人民长江* ,2001 **32**(7) 23-25.
- [10] 杨守业,李从先.长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J].*海洋地质与第四纪地质* ,1999 **19**(2):19-25.
- [11] 张朝生,王立军,章申.长江中下游河流沉积物和悬浮物中金属元素的形态特征[J].*中国环境科学* ,1995 **15**(5) 342-347.
- [12] 戴维明.长江口悬浮固体中重金属元素的形态研究[J].*上海环境科学* ,1994 **13**(11) 7-9.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析[M].北京:科学出版社,2000. 106-109.
- [14] 张维平.环境监测分析方法标准制订技术导则[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [15] 张鑫,周涛发,袁峰,等.铜陵矿区水系沉积物中重金属存在形态特征研究[J].*地球科学进展* ,2004 **19** :461-466.
- [16] Lux O, Werner I, Young T M. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay[J]. *Environment International* ,2005 **31** 593-602.
- [17] Samrnia A G E, Lartiges B S, Ghanbaja J, *et al.* Trace element carriers in combined sewer during dry and wet weather: an electron microscope investigation[J]. *Water Research* ,2004 **38** :2063-2076.
- [18] 张立诚,余中盛,章申.长江水系水环境化学元素系列专著(2)水环境化学元素研究[M].北京:中国环境科学出版社,1996. 57-59 67-69.
- [19] 陈静生,王飞越,宋吉杰,等.中国东部河流沉积物中重金属含量与沉积物主要性质的关系[J].*环境化学* ,1996 **15**(1) 8-14.
- [20] Perdikaki K, Mason C F. Impact of road run-off on receiving streams in eastern England[J]. *Water Research* ,1999 **33**(7):1627-1633.
- [21] 吴攀,刘丛强,杨元根,等.矿山环境中(重)金属的释放迁移地球化学及其环境效应[J].*矿物学报* ,2001 **21**(2) 213-217.
- [22] 禹雪中,钟德钰,李锦秀,等.水环境中泥沙作用研究进展及分析[J].*泥沙研究* 2006 **6** :75-80.
- [23] Muniz P, Danulat E, Yamicelli B, *et al.* Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo Harbour (Uruguay)[J]. *Environment International* 2004 **29** :1019-1028.
- [24] Forstner U. *Lecture Notes in Earth Sciences (Contaminated Sediments)* [M]. Berlin : Springer Verlag ,1989. 107-109.
- [25] 贾振邦,周华.应用污染负荷指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J].*环境科技* ,1992 **16**(6): 39-42.
- [26] Hilton J, Davison W, Ochsenein U. A mathematical model for analysis of sediment coke data: implications for enrichment factor calculation and trace transport mechanisms[J]. *Chemical Geology* ,1985 **48** 281-291.
- [27] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment ecological approach[J]. *Water Research* ,1980 **14** :975-1000.