黄浦江表层沉积物重金属生态风险评价

杨涛[1,2],张昊飞[1,2],胡险峰[3],许鹏[1,2],龚婉卿[1,2],蒋真毅[3],莫磊[3]

(1.国家海洋局东海环境监测中心 上海 201206;2.海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室 上海 201206;3.上海市海洋业务受理中心 上海 200050)

摘要:选取2013—2015年黄浦江表层沉积物数据,利用地质积累指数法、内梅罗综合指数法、潜在生态危害指数法对Cu、Pb、Zn、Cd数据进行评价。结果表明,2013—2015年黄浦江沉积物Cu、Pb、Zn和Cd的数据低于黄浦江背景值,表明重金属污染有降低的趋势;就单个重金属元素而言,3种评价方法中,地质积累指数法和内梅罗综合指数法的评价结果均为无污染或轻微污染,而潜在生态危害指数法结果为Cu、Pb、Zn元素属于中度污染,3种评价方法得出4种元素的污染程度也不相同;内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法评价结果表明,黄浦江沉积物重金属综合污染指数或综合生态风险均处于较低风险。

关键词:重金属污染;海洋环境;生态风险;海洋倾废

中图分类号:P7 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-9857(2016)12-0054-07

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Huangpu River(in Shanghai)

YANG Tao[1,2],ZHANG Haofei[1,2],HU Xianfeng[3],XU Peng[1,2],GONG Wanqing[1,2],JIANG Zhenyi[3],MO Lei[3]

(1. East China Sea Environmental Monitoring Center of SOA,Shanghai 201206,China;2. Key Laboratory of Integrated Marine Monitoring and Applied Technologies for Harmful Algal Blooms,S. O. A.,MATHAB,Shanghai 201206,China;3. Shanghai Ocean Business Reception Center,Shanghai 200050,China)

Abstract: Cumulative index method,Nemerow index method and Hakanson's ecological risk index method were used to evaluate the heavy metals including Cu,Pb,Zn,Cd in sediment from Huangpu River since 2013 to 2015. The results indicated that the concentrations of Cu,Pb,Zn,Cd since 2013 to 2015 were lower than the background values,which indicated the heavy metal pollution had a tendency of reduce. The evaluation results showed that Cu,Pb,Zn belonged to the low degree pollution with cumulative index method and Nemerow index method,while which belonged

收稿日期:2016-07-22;**修订日期**:2016-11-25

基金项目:海洋倾废对上海海域生态环境影响及对策措施研究(沪海科2015-03-03).

作者简介:杨涛,工程师,硕士研究生,研究方向为海洋环境科学,电子信箱:yangtao@eastsea.gov.cn

通信作者:张昊飞,高级工程师,博士,研究方向为海洋环境科学,电子信箱:zhanghf@eastsea.gov.cn

to Moderate pollution with Hakanson's ecological risk index method. In addition, the degree of pollution between the single kind of heavy metals was different with above-mentioned methods. The comprehensive pollution index or integrated ecological risk of heavy metals in sediments of Huangpu River were at low risk with Nemerow index method and Hakanson's ecological risk index method.

Key words: Heavy metal pollution, Marine environment, Ecological risk, Ocean dumping

沉积物作为水环境的重要组成部分，同时也是污染物的“源”和“汇”。重金属具有致畸、致癌、致突变等特性，多年来持续受到广泛的关注。重金属可通过废水排放、大气沉降、淋溶作用等进入地表水体，进入水体的重金属大部分转移至沉积物中，而沉积物中的重金属在一定条件下又释放进入水体中；此外，通过生物放大和富集作用，重金属会对生态系统构成直接和间接的威胁[1-2]。黄浦江两岸有大小码头 100 余座，为维护码头的正常运行，需每年对黄浦江进行疏浚，而疏浚物的处置方式主要是海洋倾倒，因此开展黄浦江沉积物中重金属的环境风险评价尤为重要。

针对重金属污染环境风险评价，国内外学者提出多种方法，大致分为两类，即指数法和综合模型法[3-4]。受不同评价区指标和权重难以统一的限制，综合模型法的通用性较差，指数法使用更为普遍。指数法较常用的有内梅罗综合指数法、地质积累指数法以及潜在生态危害指数法 3 种，本文在对黄浦江表层沉积物重金属进行取样测定的基础上，运用法进行风险评价，以便对黄浦江沉积物进行较为客观全面的生态风险评价，为黄浦江流域水环境质量的综合评价提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　样品的采集

2013—2015 年在黄浦江沿岸码头设置采样点，其中：吴泾电厂码头（A）采样点位于 E121°28′07.5″、N31°05′00.8″；董家渡轮渡码头（B）采样点位于 E121°30′14.4″、N31°13′0.10″；上海船厂码头（C）采样点位于 E121°31′04.2″、N31°15′04.4″海事局码头（D）采样点位于 E121°33′40.9″、N31°16′39.5″；朱家门码头（E）采样点 位于 E121°34′02.8″、N31°17′08.0″高化实业公司码头（F）采样点位于 E121°33′37″、N31°18′43″海杨浦粮库码头（G）采样点位于 E121°33′18.2″、N31°19′17.4″闸北电厂码头（H）采样点位于 E 121°31′33.4″、N31°20′38.3″上海国际邮轮公司码头（I）采样点位于 E 121°30′07.6″、N31°24′45.4″。分别从 9 个采样点采集表层沉积物 0～2 cm 的样品各 1 份，采样时用 GPS 定位。样品的采集、固定、储存、运输及处理均按照 GB 17378.3《海洋监测规范》第 3 部分中的相关规定执行。

1.2　样品分析

称取 1.0 g 样品，经 HNO_3-HClO_4 消化处理后，用火焰原子吸收法测定 Zn，用石墨炉原子吸收法测定 Cu、Pb、Cd。测定步骤均按照 GB 17378.3《海洋监测规范》第 5 部分中相关规定执行。

2　结果分析

2.1　黄浦江沉积物重金属含量变化趋势

2013—2015 年黄浦江沉积物重金属要素含量和黄浦江沉积物重金属的历史数据及背景值如表 1、表 2 所示。其中，2013—2015 年 Cu、Pb、Zn 的含量要略高于中国大陆、中国土壤、上海土壤和工业化前沉积物全球背景值，Cd 的含量要高于中国大陆、中国土壤、上海土壤背景值而小于工业化前沉积物全球背景值；与历史数据相比，2013—2015 年 Cu 和 Pb 的数据要略低于 2004 年的数据，而 Zn 和 Cd 的数据要明显低于 2004 年的数据，表明重金属污染有降低的趋势。

表 1　2013—2015 年黄浦江沉积物重金属要素含量

$mg \cdot kg^{-1}$

年度指标		Cu	Pb	Zn	Cd
2013 年	最大值	46.4	51.3	139	0.269
	最小值	29.1	32.7	118	0.182
	平均值	37.0	41.6	126	0.221

续表

年度	指标	Cu	Pb	Zn	Cd
2014 年	最大值	43.5	31.6	168	0.310
	最小值	17.6	22.6	68	0.202
	平均值	35.7	28.4	118	0.249
2015 年	最大值	41.3	40.1	145	0.477
	最小值	27.9	23.5	89.3	0.221
	平均值	36.6	30.9	124	0.282

表 2 黄浦江沉积物中重金属的历史资料及有关背景值 mg·kg^{-1}

背景值	Cu	Pb	Zn	Cd
2004 年黄浦江均值[5]	52.8	38.8	478.0	0.867
中国大陆沉积物背景值[6]	20.0	25.0	66.0	0.100
中国土壤背景值[7]	22.6	26.0	74.2	0.097
上海土壤背景值[8]	23.5	21.3	76.8	0.134
工业化前全球背景值[9]	30.0	25.0	80.0	0.500

2.2 黄浦江沉积物重金属年际变化特征

2013—2015 年黄浦江沉积物重金属的年际变化特征如图 1 所示。其中，Pb 的含量有所降低，且差异显著；Cd 的含量呈小幅度上升的趋势，但没有显著差异；Cu 和 Zn 的含量表现稳定。

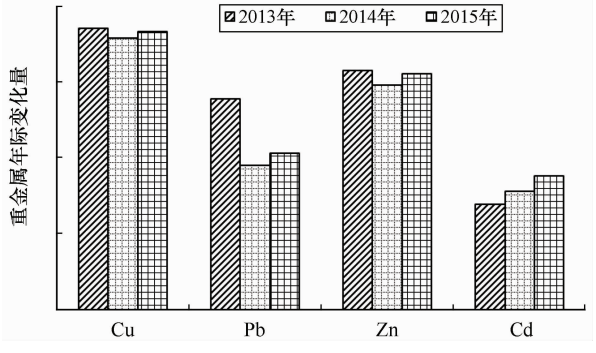

图 1 2013—2015 年黄浦江沉积物重金属年际变化

2.3 黄浦江沉积物重金属污染的生态风险

2.3.1 地质积累指数法

地质积累指数法是广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的定量分析方法，将背景值作为标准对重金属进行归一化处理，兼顾人类活动对环境的影响和重金属分布的自然变化特征，为污染过程评价提供而有效的评价方法[10]。计算公式为：

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n)$$

式中：I_{geo}为地质积累指数；C_n 为样品中元素 n 的浓度；B_n 为背景浓度，即工业化前全球沉积物重金属背景浓度；k 为修正系数，一般 $k=1.5$，用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响。

按 I_{geo}值的大小，可以将沉积物中重金属污染程度分为 7 个等级(0～6 级)(表 3)。

表 3 地质积累指数与污染程度分级

I_{geo}	0	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重度	严重

地质积累指数评价后 2013—2015 年黄浦江沉积物重金属污染等级如表 4 所示。从不同元素的评价数据来看，污染级别总体在 0～1 级；对 Cu 来说，2013－2015 年上海国际邮轮公司码头属于无污染，其余码头属于轻度污染；对 Zn 来说，2014 年、2015 年上海国际邮轮公司码头属于无污染，其余码头属于轻度污染；对 Pb 来说，有 18.5%的码头监测属于轻度污染，其余属于无污染；对 Cd 来说，所有码头均属于无污染。4 种元素污染程度从大到小依次为 Zn、Cu、Pb、Cd，不同监测点之间没有明显差别。

2.3.2 内梅罗综合指数法

单因子指数法计算公式为：

$$P_{ij} = C_{ij}/S_j$$

式中：P_{ij}代表第 i 种土壤类型 j 污染物的污染指数；C_{ij}代表第 i 种土壤类型 j 污染物的实际测量值(mg/kg)，S_j 代表第 j 个污染物的背景值。由于黄浦江主要承载输运功能，采用土壤环境质量标准(GB15618—1995)二级标准进行评价，其评价标准为 Cu、Pb、Zn、Cd 含量分别为 100、300、250、0.30 mg/kg[11]。

内梅罗指数法公式为：

$$P = \sqrt{(P_{max}^2 + P_{avg}^2)/2}$$

式中：P 代表土壤质量综合指数，P_{max}代表最大单项污染指数值，P_{avg}代表所有污染物单项污染平均值。其分级标准如表 4 所示。

表 4　2013—2015 年黄浦江沉积物地质积累指数、污染等级和污染指数

采样点	采样时间	I_{geo}				污染等级				单项污染指数				综合污染指数
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	P
A	2013 年	0.19	0.49	−0.22	−2.01	1	1	0	0	0.34	0.11	0.56	0.62	0.52
	2014 年	0.31	0.38	−0.41	−1.72	1	1	0	0	0.37	0.09	0.52	0.76	0.62
	2015 年	0.46	0.54	−0.62	−1.68	1	1	0	0	0.41	0.08	0.58	0.78	0.64
B	2013 年	0.42	0.49	0.44	−1.50	1	1	1	0	0.40	0.17	0.56	0.89	0.72
	2014 年	0.54	0.76	−0.39	−1.50	1	1	0	0	0.44	0.10	0.67	0.88	0.73
	2015 年	0.28	0.34	−0.44	−1.56	1	1	0	0	0.36	0.09	0.50	0.85	0.68
C	2013 年	0.16	0.35	−0.02	−1.82	1	1	0	0	0.34	0.12	0.50	0.71	0.58
	2014 年	0.50	0.31	−0.34	−1.47	1	1	0	0	0.42	0.10	0.49	0.90	0.72
	2015 年	0.21	0.37	−0.46	−1.76	1	1	0	0	0.35	0.09	0.51	0.74	0.60
D	2013 年	0.35	0.38	−0.01	−2.04	1	1	0	0	0.38	0.12	0.52	0.61	0.52
	2014 年	0.17	0.28	−0.53	−1.89	1	1	0	0	0.34	0.09	0.48	0.67	0.55
	2015 年	0.39	0.55	−0.15	−1.52	1	1	0	0	0.39	0.11	0.58	0.87	0.71
E	2013 年	0.29	0.25	0.26	−1.79	1	1	0	0	0.37	0.15	0.47	0.72	0.59
	2014 年	0.29	0.24	−0.38	−1.66	1	1	0	0	0.37	0.10	0.47	0.79	0.64
	2015 年	0.34	0.43	−0.10	−1.61	1	1	0	0	0.38	0.12	0.53	0.82	0.66
F	2013 年	0.63	0.38	0.36	−1.67	1	1	1	0	0.46	0.16	0.52	0.78	0.65
	2014 年	0.33	0.28	−0.25	−1.69	1	1	0	0	0.38	0.11	0.48	0.77	0.63
	2015 年	0.27	0.17	0.10	−1.39	1	1	1	0	0.36	0.13	0.44	0.96	0.75
G	2013 年	0.44	0.25	−0.20	−1.85	1	1	0	0	0.41	0.11	0.47	0.69	0.57
	2014 年	0.34	0.17	−0.73	−1.52	1	1	0	0	0.38	0.08	0.44	0.87	0.69
	2015 年	0.39	0.19	0.00	−0.65	1	1	0	0	0.39	0.13	0.45	1.59	1.21
H	2013 年	0.17	0.25	0.11	−1.82	1	1	1	0	0.34	0.13	0.47	0.71	0.58
	2014 年	0.19	0.04	−0.33	−1.27	1	1	0	0	0.34	0.10	0.41	1.03	0.80
	2015 年	0.30	0.38	−0.38	−1.33	1	1	0	0	0.37	0.10	0.52	0.99	0.78
I	2013 年	−0.03	0.29	0.45	−1.48	0	1	1	0	0.29	0.17	0.48	0.90	0.71
	2014 年	−0.77	−0.54	−0.30	−1.68	0	0	0	0	0.18	0.10	0.27	0.78	0.60
	2015 年	−0.10	−0.15	−0.67	−1.54	0	0	0	0	0.28	0.08	0.36	0.86	0.67

表 5　土壤质量分级标准

级别	综合污染指数	污染水平	风险程度
1	$P \leqslant 0.7$	清洁	安全
2	$0.7 < P \leqslant 1.0$	尚清洁	警戒级
3	$1.0 < P \leqslant 2.0$	轻微污染	轻度
4	$2.0 < P \leqslant 3.0$	中度污染	中度
5	$3.0 < P$	严重污染	重度

用内梅罗综合指数对黄浦江进行重金属污染评价(表 4)。结果表明,除 Cd 在 2014 年闸北电厂码头和 2015 年上海杨浦粮库码头污染指数超过 1、超过土壤背景值外,其余各元素在 2013—2015 年各码头污染指数都小于 1 即没有超标;从各元素之间的污染指数来看,污染情况从大到小依次为 Cd、Pb、Cu、Zn;从综合污染指数来看,各码头在 2013—2015 年绝大多数属于清洁或尚清洁水平,风险程度为安全或警戒级,只有 2015 年上海杨浦粮油码头污染物超过背景值水平、有轻微污染风险。

2.3.3　*潜在生态危害指数法*

瑞典学者 Hakanson 提出沉积物风险评价的方

法，计算公式为：

$$ERI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times C_i / C_n^i$$

式中：ERI 代表潜在生态危害指数；E_r^i 某单个重金属的潜在生态危害系数；T_r^i 表沉积物中某种重金属的毒性水平和生物对该重金属的敏感程度，即毒性系数，Cu、Pb、Zn、Cd 的毒性系数分别为 5、5、1、30；C_f^i 某一重金属的污染指数，可表征沉积物中单个重金属的污染程度；C_i 为沉积物中重金属含量的实测值；C_n^i 评价参考值，即背景值，为增强评价结果的可比性，本文选择以工业化前全球背景值为参比值[12]。重金属元素潜在生态危害标准如表 6 所示。

黄浦江沉积物各重金属的污染指数、潜在生态危害系数和生态危害指数如表 7 所示。

表 6 重金属元素潜在生态污染危害标准

C_f^i	污染程度	E_r^i	ERI	潜在风险等级
C_f^i	低污染	$E_r^i<40$	ERI<150	低风险
$1 \leqslant C_f^i < 3$	中污染	$40 \leqslant E_r^i < 80$	$150 \leqslant$ ERI $<$ 300	中等风险
$3 \leqslant C_f^i < 6$	较高污染	$80 \leqslant E_r^i < 160$	300≤ERI<600	较高风险
$C_f^i \geqslant 6$	很高污染	160≤E_r^i<320	600≤ERI<1 200	很高风险
		$E_r^i \geqslant 320$	ERI≥1 200	高风险

表 7 2013—2015 年黄浦江沉积物重金属污染指数和潜在生态危害指数

采样点	采样时间	C_f^i				E_r^i				ERI
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	
A	2013 年	1.71	2.11	1.29	0.37	8.56	2.11	6.45	11.14	26.15
	2014 年	1.86	1.95	1.13	0.45	9.28	1.95	5.66	13.61	38.51
	2015 年	2.07	2.19	0.98	0.47	10.34	2.19	4.89	14.07	29.29
B	2013 年	2.01	2.11	2.03	0.53	10.03	2.11	10.16	15.96	36.15
	2014 年	2.18	2.55	1.14	0.53	10.88	2.55	5.72	15.90	43.35
	2015 年	1.82	1.89	1.10	0.51	9.08	1.89	5.52	15.30	29.90
C	2013 年	1.68	1.91	1.48	0.42	8.40	1.91	7.38	12.72	28.50
	2014 年	2.12	1.86	1.19	0.54	10.60	1.86	5.94	16.20	42.85
	2015 年	1.73	1.94	1.09	0.44	8.65	1.94	5.44	13.26	27.35
D	2013 年	1.92	1.95	1.49	0.36	9.58	1.95	7.44	10.92	27.94
	2014 年	1.69	1.82	1.04	0.40	8.43	1.82	5.18	12.12	36.27
	2015 年	1.96	2.20	1.35	0.52	9.80	2.20	6.76	15.66	32.22
E	2013 年	1.84	1.79	1.80	0.43	9.18	1.79	9.00	13.02	31.20
	2014 年	1.84	1.77	1.15	0.48	9.18	1.77	5.76	14.28	39.37
	2015 年	1.90	2.02	1.40	0.49	9.50	2.02	7.00	14.70	31.20
F	2013 年	2.32	1.95	1.92	0.47	11.60	1.95	9.60	14.10	35.30
	2014 年	1.88	1.82	1.26	0.46	9.40	1.82	6.32	13.92	42.23
	2015 年	1.81	1.68	1.60	0.57	9.05	1.68	8.02	17.22	34.29
G	2013 年	2.03	1.79	1.31	0.42	10.15	1.79	6.54	12.48	29.17
	2014 年	1.91	1.68	0.90	0.52	9.53	1.68	4.52	15.72	39.42
	2015 年	1.97	1.71	1.50	0.95	9.83	1.71	7.52	28.62	45.97

续表

采样点	采样时间	C_f^i				E_r^i				ERI
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	
H	2013 年	1.69	1.79	1.62	0.43	8.43	1.79	8.08	12.78	29.29
	2014 年	1.71	1.55	1.19	0.62	8.55	1.55	5.96	18.60	44.22
	2015 年	1.85	1.95	1.16	0.60	9.23	1.95	5.78	17.88	32.89
I	2013 年	1.47	1.83	2.05	0.54	7.35	1.83	10.26	16.14	33.75
	2014 年	0.88	1.03	1.22	0.47	4.40	1.03	6.10	14.04	33.75
	2015 年	1.40	1.35	0.94	0.52	6.98	1.35	4.70	15.48	27.16

黄浦江沉积物中 Cu 的污染指数绝大部分介于 1～3，仅有 2014 年上海国际邮轮公司码头 Cu 污染指数小于 1，说明 Cu 基本属于中度污染；Zn 的污染指数全部介于 1～3，说明 Zn 属于中度污染；Pb 的污染指数绝大部分介于 1～3，仅在 2014 年上海杨浦粮库码头、2015 年吴泾电厂码头和上海国际邮轮公司码头的指数小于 1，说明 Pb 基本属于中度污染；Cd 的污染指数全部小于 1，说明 Cd 属于低污染。4 种元素污染程度从大到小依次为 Zn、Cu、Pb、Cd。

从不同采样点来看，2013—2015 年各采样点 Cu、Pb、Zn、Cd 的潜在生态危害系数均小于 40，属于低风险危害；从黄浦江沉积物整体重金属的潜在生态危害来看，4 种重金属的潜在生态风险系数从大到小依次为 Cd、Cu、Pb、Zn，平均值分别为 15.0、9.11、6.73、1.86。

从潜在生态危害指数的评价结果来看，黄浦江沉积物中重金属潜在生态危害指数均小于 150，属于低生态风险。从采样时间和采样点来看，潜在生态危害指数并没有出现一定的时空分布规律。

3　不同评价方法的比较

运用地质积累指数法、内梅罗综合指数法、潜在生态危害指数法对黄浦江沉积物重金属进行风险评价，其产生的评价结果相近但也存在一定的差异。就单个重金属元素的污染指数来看，地质积累指数法和内梅罗综合指数法的评价结果均为无污染或轻微污染；潜在生态危害指数法中，Cu、Pb、Zn 元素属于中度污染，Cd 属于低污染。3 种评价方法得出 4 种元素的污染程度也不尽相同，其中地质积累指数法和潜在生态危害指数法污染程度由大到小依次为 Zn、Cu、Pb、Cd，内梅罗综合指数法污染程度由大到小依次为 Cd、Pb、Cu、Zn；从综合污染指数来看，内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法评价结果表明，2013—2015 年各码头重金属污染或生态风险均处于较低风险。

地质积累指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法都是由商除法发展而来，即依据大的时间空间尺度的调查数据设定背景值，再将污染物的实测值与之进行商值处理，根据风险等级划分区间得出污染物的风险大小。三者的区别在于引入的变量不同，地质积累指数法引入修正指数 k、内梅罗综合指数法引入单项污染指数最大值、而潜在生态危害指数法则引入毒性系数 T_r^i，因此 3 种方法所得黄浦江沉积物各重金属元素风险评级不尽相同。对于风险高低顺序，由于地质积累指数法和潜在生态危害指数法选取的背景值相同，均为工业化前地球沉积物重金属背景值，4 种重金属元素间风险高低顺序一致；而内梅罗指数法背景值选取土壤环境质量二级标准，其中 Cd 的标准相对较低，导致 Cd 的风险较高。

参考文献

[1] GRAEME K A, POLLACK JrC V. Heavy metal toxicity, part I: arsenic and mercur y[J]. Emergency Med, 1998, 16: 45－56.

[2] GRAEME K A, POLLACK JrC V. Heavy metal toxicity, part II: lead and metal fume fever[J]. J Emergency Med, 1998, 16: 171－177.

[3] 林晓峰，蔡兆亮，胡恭任. 土壤重金属污染生态风险评价方法研究进展[J]. 环境与健康杂志，2010，27(8)：749－751.

[4] PERRODIN Y, BOILLOT C, ANGERVILLE R, et al. Ecologi-

cal risk assessment of urban and industrial systems: a review [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(24): 5162－5176.

[5] 程祥圣，刘汉奇，张昊飞，等. 黄浦江沉积物污染及潜在生态风险评价初步研究[J]. 生态环境，2006，15(4)：682－686.

[6] 赵一阳，鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京：科学出版社，1994.

[7] 王云，魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京：中国环境科学出版社，1995.

[8] 王金辉，沈庆红，雒伟民. 关于黄浦江水系表层沉积物的现状研究[J]. 上海环境科学，2001，20(1)：11－15.

[9] 陈静生，陶澍，邓宝山，等. 水环境化学[M]. 重庆：高等教育出版社，1987.

[10] YADAV A K，ABBASSI R，KUUMAR N，et al. The removal of heavy metals in wetland microcosms: effects of bed depth, plant species, and metal mobility[J]. Chemical Engineering Journal，2012，211－212(15)：501－507.

[11] 夏家淇，蔡道基，夏增禄，等. GB15618－1995 土壤环境质量标准[S]. 北京：中国标准出版社，1995：2－4.

[12] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Res，1980，14(8)：975－1001.