

# 巢湖市河流表层沉积物重金属污染和风险评估

李飞鹏<sup>1,2</sup>, 陈玲<sup>1,2</sup>, 张海平<sup>1</sup>, 王嘉莹<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采集巢湖市不同河道9个点位的表层沉积物样品, 检测了7种重金属元素的含量水平, 分析空间分布特征, 并评价了其潜在的生态风险。结果表明, 巢湖市河道表层沉积物中重金属含量水平相对较高, Hg和As的平均含量已经超过沉积物质量基准上限; 根据地累积指数计算结果, 重金属污染程度大小依次为Ni, Hg, Cu, As, Cr, Zn, Pb, 单项重金属潜在生态风险大小依次为Hg, As, Cu, Pb, Cr, Ni, Zn, 其中Ni污染程度达到极强污染水平, Hg为中污染水平, 但却是最主要的潜在生态风险因子, As表现为较重风险, 其他重金属的潜在生态风险相对较低; Hg单项潜在生态风险区域与综合潜在生态风险区域特征相对一致, 重金属污染可能存在的主要风险区域为西环城河, 相关部门应当足够重视。

**关键词:** 城市河道; 沉积物; 重金属; 风险评估

**中图分类号:** X834

**文献标识码:** A

## Heavy Metal Pollution in Surface Sediment of Urban River in Chaohu City and Its Risk Assessment

LI Feipeng<sup>1,2</sup>, CHEN Ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Haiping<sup>1</sup>, WANG Jiaying<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Nine surface sediments were collected from urban rivers of Chaohu City, China, for an analysis of 7 heavy metals (Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni and As). A comprehensive way was conducted to investigate distribution patterns and assess the potential ecological risks of heavy metals. The results indicate that the sediments are severely contaminated by heavy metals and mean concentrations of Hg and As are above PEL values. The contamination order of the 7 metals is Ni, Hg, Cu, As, Cr, Zn, Pb according to the mean  $I_{geo}$

values, while the single potential ecological risk of heavy metals follows the order Hg, As, Cu, Pb, Cr, Ni, Zn. The element Ni was the main pollutant and Hg was the second most abundant element with the most serious ecological risks. More attention was demanded to the metalloid As in ecological risk assessments. The pollution of the remaining 4 metals was slight with little ecological risk. The distribution pattern of Hg individual potential ecological risk indices was similar to that of the general potential ecological risk indices for all metals. More concern should be focused to West Huancheng River suffering serious ecological risk.

**Key words:** urban river; sediment; heavy metal; risk assessment

水体沉积物是污染物的源和汇, 是影响水环境质量的主要因素之一。进入到水体的重金属有相当一部分通过吸附、络合或沉淀等作用蓄存于沉积物中, 一旦水体环境发生变化, 沉积在底泥中的重金属会重新释放出来进入水体, 形成二次污染。沉积物中重金属污染具有隐蔽性、累积性、不可逆性和治理难而周期长等特点, 可通过食物供给动物和人类而造成健康危害。大量研究表明, 在受重金属污染的水体环境中沉积物中重金属的含量比相应水相中的重金属含量高很多倍, 并表现出较明显的空间分布规律性<sup>[1]</sup>。沉积物中的重金属被认为是水体污染的敏感指示剂, 具有反映水生态系统状况的意义<sup>[2]</sup>。因此, 对沉积物中重金属污染的研究及评价很有必要, 也很有价值。

我国城市河道通常是污水及雨水径流的汇集地和排泄通道, 接纳了大量点、面源污染物, 河道污染对居民生活和城市景观造成了严重的影响, 因此城市河道的水力调度、底泥疏浚等污染整治工程备受关注。然而, 这些工程措施往往忽略了沉积物中污

染物释放带来的影响, 对生态系统和人体健康的潜在生态风险缺乏有效评估. 目前, 尽管国内外对水体沉积物中重金属的污染进行了大量的研究, 但是, 这些研究多以大江大河、湖泊、水库、河口及海湾沉积物作为研究对象<sup>[3]</sup>, 关于城区河道沉积物的研究相对较少<sup>[4]</sup>, 尤其对城市中小河道沉积物的研究和评价尚鲜见报道. 为此, 笔者选择巢湖市典型城区河道为研究对象, 采集代表河道不同区域的沉积物样品, 分析重金属含量水平及污染特性, 应用地累积指数(index of geoaccumulation)<sup>[5]</sup>  $I_{geo}$  对污染程度进行评价, 并采用潜在生态风险指数(potential ecological risk index)  $R_i$  法<sup>[6]</sup> 定量计算出沉积物中重金属的潜在生态风险值, 以期为巢湖城市河道沉积物及水体重金属污染防治和决策管理提供科学依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域

巢湖市位于安徽省中部, 属合肥市下辖县级市, 濒临长江, 环抱巢湖, 是巢湖流域的重点城市(如图 1 所示). 巢湖市城市河道主要有西环城河、丁岗河、东环城河、陆家河、天河和 1 个人工水体洗耳池, 其中, 天河较宽, 与裕溪河相连, 是巢湖水排入长江的主要通道, 其他河道多为狭长形, 平均宽度

仅为 23.8~42.2 m, 由于毗邻生活区、商业区, 这些中小型河道长期接纳生活污水、地表径流和生活垃圾, 水质恶化严重. 为此, 该市开展了活水工程, 并配合大规模的底泥疏浚工程, 期望通过工程实施, 增强水体流动, 提高河道释污、调蓄能力. 然而, 水体流动会引起底泥扰动, 从而使底泥中的金属进入水体, 最终引起的生态风险不容忽视.

### 1.2 样品采集与分析

根据代表性原则在巢湖市各个河道布设了 9 个断面, 采样点分布如图 1 所示, 其中, 巢湖口(CH1)和裕溪河(CH3)各布设 1 个采样点, 西环城河由于较长, 布设 2 个采样点, 分别为 CH7 和 CH8, 其他河道和洗耳池由于污染分布比较单一, 分别布设 1 个采样点, 分别为天河(CH2)、洗耳池(CH4)、陆家河(CH5)、丁岗河(CH6)和东环城河(CH9). 于 2010 年 7 月在各个采样点采集表层(0~5 cm)沉积物样品 3 次, 然后用孔径 0.2 mm 的尼龙筛现场挤压过筛, 去除杂物和粗颗粒, 静置, 倒掉上覆水, 并将该点位 3 个沉积物样品充分混合均匀, 封存于干净的聚乙烯袋中, 带回实验室冷冻保存. 样品风干后, 碾碎, 通过 200 目(0.076 mm)尼龙筛, 充分混合均匀. 称取约 0.25 g 样品, 采用微波消解法进行预处理(参考 EPA Method 3052 中土壤消解方法). 重金属元素(Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, As)的含量使用美国 Perkin Elmer (Optima 2100 DV)

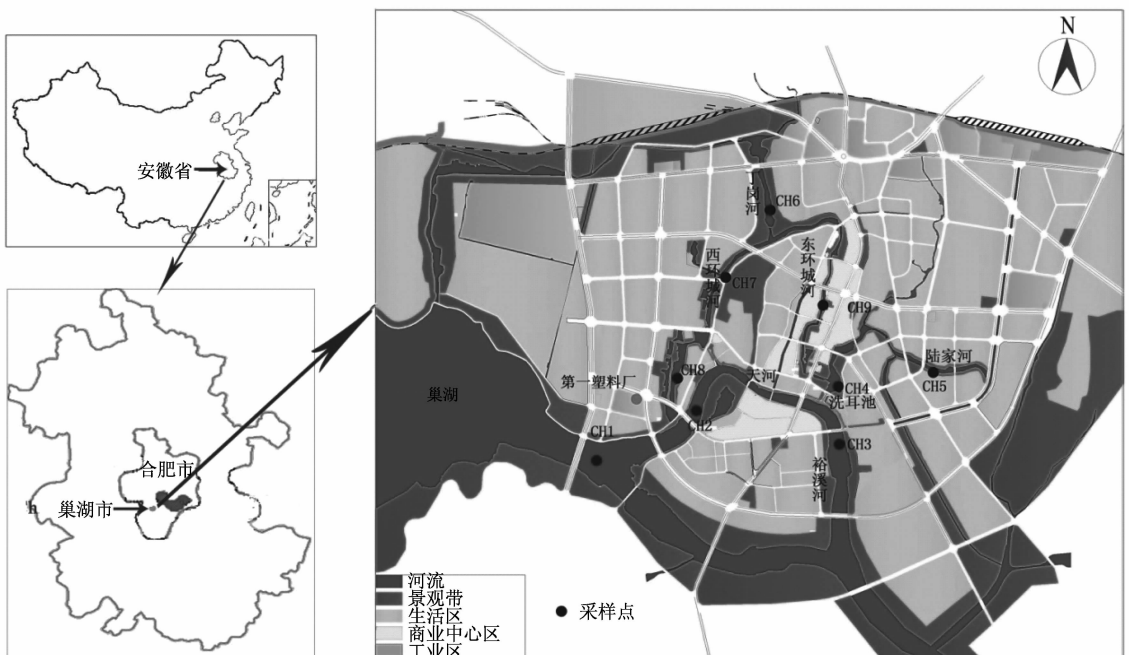


图 1 采样点分布示意  
Fig.1 Map of sampling sites

电感耦合等离子体发射光谱仪进行检测, Hg 采用意大利 Mile Stone 公司 DMA 80 型直接汞分析仪测定。

### 1.3 沉积物污染状况及生态风险评价方法

沉积物中重金属的评价方法很多, 各有优缺点和特定适用范围。由于沉积环境的复杂性, 采用单一方法很难准确地反映沉积物的污染状况及程度<sup>[2]</sup>。  $I_{\text{geo}}$  是沉积物中重金属污染程度评价的常用指标, 其优点是给出很直观的重金属污染级别, 缺点是侧重于单一金属, 未引入生物有效性和相对贡献比例以及地理空间差异; 而  $R_1$  则体现了生物有效性和相对贡献比例及其地理空间差异等特点, 是综合反映底泥中重金属对生态环境影响潜力的指标, 但其毒性加权系数往往带有主观性, 因此需要 2 种方法的互相补充和借鉴。

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数是德国海德堡大学沉积物研究所 Müller 教授提出的用于评价沉积物中重金属污染程度的定量指标, 其计算方法如式(1)所示:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k B_n)] \quad (1)$$

式中:  $C_n$  为样品中元素  $n$  的含量;  $k$  为修正系数, 通常用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响, 一般取 1.5;  $B_n$  为元素基线浓度。在本研究中元素基线浓度取王永华等<sup>[7]</sup>对巢湖底泥的研究背景值, 其中, As 取长江流域沉积物背景值<sup>[8]</sup>。

在  $I_{\text{geo}}$  的级别参考上, 由于 Förstner 等<sup>[5]</sup>的 7 级划分法较为详细, 考虑了过渡级别, 所以本研究中也以 7 级划分法作为参考。  $I_{\text{geo}} < 0$ ,  $I_{\text{geo}}$  为 0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5,  $I_{\text{geo}} > 5$  对应的污染等级分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 级, 对应的污染程度分别为无污染、无污染到中污染、中污染、中污染到强污染、强污染、强污染到极强污染、极强污染。

#### 1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出<sup>[6]</sup>, 主要用于对重金属进行潜在生态风险评价, 根据此法, 某一区域沉积物中第  $i$  种重金属的潜在生态危害系数  $E_{r,i}$  及沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数  $R_1$  可分别用式(2)和式(3)表示:

$$E_{r,i} = T_{r,i} C_{r,i} \quad (2)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_{r,i} = \sum_{i=1}^n T_{r,i} C_{f,i} = \sum_{i=1}^n T_{r,i} C_{s,i} / C_{n,i} \quad (3)$$

式中:  $C_{f,i}$  为重金属富集系数,  $C_{f,i} = C_{s,i} / C_{n,i}$ ,  $C_{s,i}$  为

重金属  $i$  质量分数实测值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $C_{n,i}$  为第  $n$  种金属所需参比值,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T_{r,i}$  为重金属  $i$  的毒性系数, 主要反应重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度, 毒性系数取 Hg 为 40, Pb 为 5, Cu 为 5, Ni 为 5, Cr 为 2, Zn 为 1, As 为 10<sup>[9]</sup>。 单项潜在风险和综合潜在风险等级参照 Hakanson<sup>[6]</sup>的划分标准:  $E_{r,i} < 40$ ,  $R_1 < 150$  为轻微污染,  $40 \leq E_{r,i} < 80$ ,  $150 \leq R_1 < 300$  为中等污染,  $80 \leq E_{r,i} < 160$ ,  $300 \leq R_1 < 600$  为强污染,  $160 \leq E_{r,i} < 320$ ,  $R_1 \geq 600$  为很强污染,  $E_{r,i} \geq 320$  为极强污染。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染水平和分布特征

表 1 列举了巢湖市城市河道沉积物中重金属的平均值、沉积物基准限值和中国其他水体的研究结果。沉积物基准是评价沉积物污染及其生态效应的基础, 由于区域沉积物污染浓度和背景浓度的不同会导致沉积物基准限值的差异, 且巢湖流域尚未发现沉积物中重金属基准值的报道, 因此本文采取 Wang 等<sup>[9]</sup>推荐的长江流域的沉积物基准值下限 (threshold effect level, TEL) 和基准值上限 (probable effect level, PEL), 当重金属元素浓度低于 TEL 时, 不利生物毒性效应很少发生, 而重金属元素浓度高于 PEL 时, 不利生物毒性效应将频繁发生。从表 1 可以看出, 巢湖河流沉积物中 Hg 和 As 的平均含量超出了 PEL, Cu, Zn, Cr, Pb, Ni 均已超出 TEL, 这说明巢湖市城市河道表层沉积物中重金属含量已经处于一个相当高的水平, 部分重金属可能会产生严重的生态风险。与国内较大的河流 (长江<sup>[9]</sup>、珠江<sup>[10]</sup>和黄浦江<sup>[11]</sup>) 和湖泊 (洪泽湖<sup>[12]</sup>) 比较发现, 城市河道沉积物中重金属含量总体高于较大水体, 与邻近的巢湖<sup>[13]</sup>相比, 除 Ni 相当外, 其他重金属含量均显著高于巢湖, 这可能是由于城市河道受人为干扰较大, 生活污水、生活垃圾及地表径流冲刷给河道带来了大量的重金属污染物, 再加上城市河道的断面狭窄、淤积严重、闸门和路涵较多等特点, 导致水流速度放缓, 加速了重金属等污染物在河道中积累。

### 2.2 重金属污染程度分析

采用地累积指数法计算了各点重金属的  $I_{\text{geo}}$ , 如表 2 所示。巢湖市河道表层沉积物中重金属污染程度大小依次为 Ni, Hg, Cu, As, Cr, Zn, Pb, 其中, Ni 为主要污染物, 达到极强污染; Hg 的污染

表 1 巢湖市城市河道沉积物中重金属的干重平均值及与中国其他水体的比较

Tab.1 Comparison of mean heavy metal concentrations in river sediments from various urban areas in China

来源	Hg	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	As
巢湖市城市河道	0.49	79.44	206.07	102.03	49.46	33.36	44.35
TEL <sup>[9]</sup>	0.17	36.00	123.00	42.00	35.00	16.00	7.20
PEL <sup>[9]</sup>	0.49	197.00	315.00	160.00	91.00	43.00	42.00
长江武汉段 <sup>[9]</sup>	0.26	60.03	230.39	108.00	49.19	41.86	15.44
珠江广州段 <sup>[10]</sup>		348.00	383.40	93.10	102.60		
上海市黄浦江 <sup>[11]</sup>	0.13	55.90	114.00	55.60	22.60	31.20	
天津城市排污河道 <sup>[4]</sup>	2.39		891.90	250.90	121.80	83.67	23.07
洪泽湖 <sup>[12]</sup>	0.07	34.99	72.44	57.59	18.82		23.67
巢湖 <sup>[13]</sup>	0.08	34.30	125.80	94.80	42.20	33.90	41.30
背景值 <sup>[9]</sup>	0.20	20.20	56.30	67.00	26.00	31.60	15.00

程度平均为中污染状态; Zn 和 Pb 的  $I_{geo}$  级别在多数采样点均为零, 说明该区域几乎不存在 Pb 和 Zn 污染的风险; 9 个采样点的 6 种重金属 (Hg, Cu, Zn, Cr, Pb, Ni) 的  $I_{geo}$  的空间差异不太明显, As 在 CH1 附近达到强污染水平, 而在 CH2 为无污染, 其他点位为无污染到中污染水平, 说明 CH1 附近 As 的强污染与巢湖市自身的污染无关, 可能与巢湖沉积物中较大 As 含量密切相关<sup>[13]</sup>; Hg, Cu 和 Cr 在 CH1 和 CH2 略有污染, 在其他采样点基本达到中级污染水平; CH8 附近 Hg, Cu, Zn, Cr 均达到中级污染水平, 可能受到第一塑料厂的影响。

表 2 巢湖城市河道沉积物重金属的地累积指数级别

Tab.2 The pollution grades of sediment heavy metals in urban rivers of Chaohu City

采样点	Hg	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	As
CH1	1	1	0	1	0	6	4
CH2	1	1	0	1	0	6	0
CH3	2	2	0	0	0	6	1
CH4	2	2	0	1	0	6	1
CH5	2	2	0	1	0	6	1
CH6	2	2	0	1	0	6	1
CH7	2	2	0	1	0	6	1
CH8	2	2	2	2	0	6	1
CH9	2	1	0	1	0	6	1

2.3 潜在生态危害评价

采用  $R_i$  评价巢湖市城市河道表层沉积物中重金属的潜在生态影响。表 3 反映了沉积物中单项重金属的生态风险指数, 重金属单项生态风险程度除 Hg 外多数为低风险程度, 比  $I_{geo}$  更为清晰地反映了单项重金属的污染程度及分布特征。Hg 的全水域平均生态风险指数为 98, 为较重风险, 其中 CH8 达到重风险水平, CH6 和 CH7 表现为较重风险; Cu 在 CH8 点显示为中等风险, 这几个点位于巢湖市西面水体 CH7 和 CH8 和 CH6, 都属于淤积较为严重、受人类活动影响较大的水体; As 在 CH1 为较重

风险, 而在其他采样点均为低风险, 其他几种金属在所有采样点都为较低风险。根据单项金属的平均生态风险指数, 巢湖市河道表层沉积物中主要重金属的潜在生态风险程度的大小顺序为: Hg, As, Cu, Pb, Cr, Ni, Zn。Hg 的单项潜在生态风险指数远远大于其他重金属, 是最主要的潜在生态风险因子。

表 3 各采样点的沉积物单项潜在生态风险指数

Tab.3 Individual indices of potential ecological risk at each sampling site in surface sediments

测点	Hg	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	As
CH1	40.0	13.1	2.2	2.1	10.5	5.1	127.6
CH2	36.0	12.4	2.1	3.2	7.9	3.0	8.6
CH3	54.0	17.5	3.3	5.1	7.1	5.8	17.9
CH4	44.0	15.3	3.5	6.0	7.5	7.1	20.8
CH5	70.0	15.3	3.7	5.3	7.8	6.0	20.1
CH6	148.0	19.3	4.7	4.8	9.8	5.3	15.7
CH7	136.0	19.6	5.6	4.5	9.4	5.1	16.1
CH8	306.0	49.6	5.2	19.7	17.8	4.7	15.3
CH9	52.0	15.0	2.8	5.1	7.7	5.5	16.5

巢湖市河道多项金属的综合潜在生态风险指数如图 2 所示, 除 CH8 为重生态风险外, 其他 8 个点

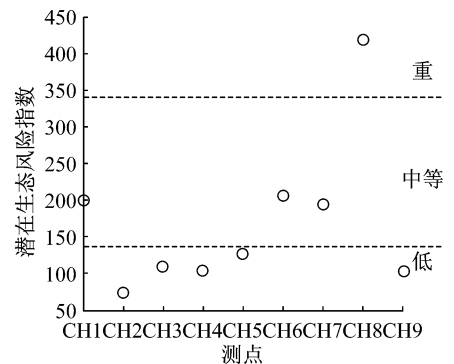


图 2 多项金属的综合潜在生态风险指数及潜在风险等级  
Fig.2 General indices and grades of potential ecological risk assessment at each sampling site in surface sediments

位中3个为中等风险、5个为低风险,整体表现为中等风险,综合潜在生态风险指数的空间分布特征与Hg的单项生态风险空间分布类似。CH8位于西环城河靠近巢湖闸附近水域,重金属生态风险等级表现为重风险,该区域周围分布大量畜禽养殖户,靠河岸布设的大量猪舍对附近水域造成严重污染,CH8西面有巢湖市第一塑料厂,可能是造成水体沉积物中重金属积累较多的重要原因;此外,该区域位于CH1和CH2之间,多数时间为滞水区,淤积严重,加速了重金属的沉淀和积累。

### 3 结论

(1) 巢湖市河道表层沉积物中重金属含量处于相当高的水平,Hg和As的平均含量已经超过沉积物质量基准上限。7种重金属(除As外)的含量水平与国内其他城市河道的研究数据相当,但是比大水体沉积物中的重金属含量高。这与城市河道断面狭窄、淤积严重、闸门和路涵较多、受人为污染干扰相对较大等特点具有重要关系。

(2) 巢湖市河道表层沉积物中重金属污染程度大小依次为Ni,Hg,Cu,As,Cr,Zn,Pb,巢湖市河道多数为低生态风险程度,个别区域达到中等和重生态风险程度。单项重金属潜在生态风险程度的大小顺序为Hg,As,Cu,Pb,Cr,Ni,Zn,重金属污染可能存在的主要风险区域为西环城河,应当引起相关部门足够重视,加大力度改善该区域存在的河道淤积等问题,规范畜禽养殖和生活污水排放,提高附近居民的环保意识。

### 参考文献:

- [1] 贾振邦,赵智杰,杨小毛,等. 洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价[J]. 环境化学, 2001, 20(3): 212. JIA Zhenbang, ZHAO Zhijie, YANG Xiaomao, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Yangyong River, Maozhou River and Dongbao River sediments, Shenzhen [J]. Environmental Chemistry, 2001, 20(3): 212.
- [2] Birch G F, Taylor S E, Mathel C. Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediments; a review and some new concepts [J]. Environmental Pollution, 2001, 113(3): 357.
- [3] 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(2): 311.
- [4] 吴光红,朱兆洲,刘二保,等. 天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 413. WU Guanghong, ZHU Zhaozhou, LIU Erbao, et al. Concentrations and distribution of heavy metals in urban sewage discharge channel of Tianjin [J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 413.
- [5] Förstner U, Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development: contributions from environmental geochemistry to water quality management[C]//Sediments and Environmental Geochemistry: Selected Aspects and Case Histories. Berlin: Springer-Verlag: 1990: 311-338.
- [6] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach [J]. Water Research, 1980, (14): 975.
- [7] 王永华,钱少猛,徐南妮,等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22. WANG Yonghua, QIAN Shaomeng, XU Nanni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(6): 22.
- [8] 焦伟,卢少勇,李光德,等. 环太湖主要进出河流重金属污染及其生态风险评价[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4): 577. JIAO Wei, LU Shaoyong, LI Guangde, et al. Heavy metal pollution of main inflow and outflow rivers around the taihu lake and assessment of its potential ecological risk[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, 16(4): 577.
- [9] Wang Y, Yang Z F, Shen Z Y, et al. Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 172(1-4), 407.
- [10] Niu H Y, Deng W J, Wu Q H, et al. Potential toxic of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. Journal of Environmental Sciences. 2009, 21(8): 1053.
- [11] 何瑶. 上海市表层土壤/沉积物中重金属元素分布特征及现状评价[D]. 上海: 同济大学, 2009. HE Yao. The distribution characteristics and assessment of heavy metals in surface soil and sediment in Shanghai [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [12] 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. YU Hui, ZHANG Wenbin, YU Jianping. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake [J]. Environmental Science, 2011, 32(2): 437.
- [13] 张蕾. 巢湖沉积物重金属污染特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. ZHANG Lei. Characteristics on heavy metal pollution in the sediments from Lake Chaohu [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.