

长江南京段近岸沉积物中重金属富集特征与形态分析

马宏瑞^{1,2}, 张茜¹, 季俊峰², 吴昀昭²

1. 陕西科技大学资源与环境学院, 陕西 西安 710021; 2. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093

摘要: 在对长江南京段八卦洲和杨中两个冲积洲近岸沉积物及其优势野生植物中 Al、Cu、Zn、Cr、Pb、Ni 和 Cd 元素含量分析的基础上, 分别考查了这些重金属的富集系数 (EF) 和生物富集因子 (BCF), 并采用 BCR 连续提取法对 Cd 的赋存形态进行了研究。结果表明, 本区域长江近岸沉积物和野生植物中重金属存在不同程度的富集现象, 两洲沉积物中 Cu、Cr、Pb、Ni、Cd 均有富集趋势, 各元素 EF > 1 的样品占总样品比例分别为 Cu 50%、Cr 40%、Pb 40%、Ni 40%、Cd 20%。而在野生桐蒿和芦蒿两种优势植物中 Cd 富集显著, 其中桐蒿的 BCF 平均值高达 2.57。采用 BCR 连续提取法对沉积物中 Cd 进行形态分析, 结果显示, 沉积物中 Cd 主要以酸溶/交换态 (B1) 和可还原态 (B2) 为主, 二者分别为 31.7% 和 45.5%, 占到总量的 70% 以上, B1 态远高于一般土壤和沉积物中重金属的分布, 表现出很强的迁移性和生物可利用性。新生成沉积物较老沉积物中的 B1 态有显著增加, 反映出沉积物越新, Cd 的迁移性越强的趋势。研究结果说明长江城市段近岸沉积物中 Cd 受近期人为因素影响明显, 具有一定的生态风险。

关键词: 沉积物; 重金属; 富集因子; BCR; 长江南京段

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2061-05

河流沉积物是水体中重金属的主要寄居地之一^[1-2], 而城市近岸沉积物对于表征当地水环境人为干扰程度及其环境归趋性具有典型代表性。近岸沉积物中重金属因受水、陆环境的多重、交替影响, 相比于土壤及河底沉积物更具有特殊性, 因此, 研究沉积物中重金属的生物可利用性对于评价其生态安全性具有重要价值。目前有关长江沉积物中重金属生态安全性的研究以化学连续提取法^[3]和粒度分布分析法为主^[4-5], 也有通过生物可利用性研究的, 但多以长江河口为背景^[6-8]。根据当地已有元素地球化学调查^[9], 发现本区域长江沿江近岸土壤中某些重金属含量异常, 因河流城市段近岸沉积物受城市干扰较大。因此, 本文选择受城市干扰较小的南京段八卦洲、杨中市冲积洲为调查对象, 对主要重金属元素在沉积物及野生植物体中的富集特征和赋存形态进行了详细的研究, 以探明该区域重金属的富集趋势及迁移特征, 为城市段沉积物中重金属的生态风险评价和基准值确定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 采样点概况及采样方法

八卦洲总面积 57 km², 洲体为第四纪沉积物, 上层为粉质粘土。岸边土壤类型为灰潮土, 主要生长芦苇 (*Phragmites communis*)、芦蒿 (*Artemisia selengensis*)、香蒿 (*Artemisia selengensis*)、桐蒿 (*Erigeron bonariensis*) 等植物; 杨中亦为长江的冲积沙洲, 面积 110 km², 其沉积物主要是长江冲积

相、全新统黄土状亚粘土及亚砂土。根据 Cd 元素的分布特征, 在洲体的分布特征, 分别选取八卦洲 6 个点, 杨中市 4 个点, 对近岸上述 4 种优势植物及对应点的沉积物进行采样。同时, 选择两处典型沉积物剖面 A 和 B, 每隔 5 cm 进行分层采样。

具体采样方法为: 同一点位的 100 m² × 100 m² 区域内, 对植物和沉积物进行多点随机采样, 同一植物类型在同一区域的采样点不少于 6 个。在采集植物样本的同时, 将相应点的沉积物一同采集, 混合后带回实验室做进一步处理。

1.2 样本处理方法

植物样本: 将植物样本先去除泥土, 然后用蒸馏水和去离子水反复清洗后将根及其以上部分分开, 放入烘箱在 80 °C 下杀青 2 h 后于 40 °C 下干燥。将干样粉碎并混匀后, 准确称取一定质量的样品, 以 2:1 比例加入浓 HNO₃ 和 HClO₄, 于 160 °C 下微波加热消解至消解液无色, 蒸干后加入少量浓 HNO₃ 后定容, 待测。

沉积物样本: 将野外混合的样品在室内风干后, 去除根系等植物残体后磨细, 过 100 目筛。然后将样品于 PTFE 坩埚中加入超纯 HNO₃、HClO₄ 及 HF 酸进行消解, 直至样品无色, 经 HNO₃ 酸化和定容, 待测。

1.3 形态分析

将表层及剖面沉积物样品在烘箱内 40 °C 下烘干, 经玛瑙研钵研磨后过 2 mm 尼龙筛网, 分别称取

基金项目: 江苏省国土资源厅生态地球化学调查项目 (EG004)

作者简介: 马宏瑞 (1963 年生), 男, 教授, 博士, 主要从事重金属环境风险与污染修复方面的研究。E-mail: mahr@sust.edu.com

收稿日期: 2009-08-12

过筛后样品1.0 g于PE杯中,采用欧盟三步法(BCR法)^[10-11]进行连续提取,具体方法参见文献[12]。

1.4 分析方法

对上述处理过的植物和沉积物样本分别用ICP-AES和ICP-MS测定其中的Al、Cu、Zn、Cr、Pb、Ni和Cd元素的含量。依同法测定BCR提取液中Cd元素的含量。

2 结果与讨论

2.1 沉积物及野生植物对重金属的富集特征

2.1.1 沉积物对重金属的富集特征

对八卦洲和杨中采集的10个沉积物样品应用富集系数法^[13-14]对重金属的富集情况进行评价,其计算式为:

$$EF = \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_s / \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_b$$

式中,EF为重金属在沉积物中的富集系数; C_x 为元素x的浓度; C_{Al} 为Al元素浓度; s 和 b 为样品和背景。若 $EF > 1$,说明该元素相对富集,受到人为活动的影响,若 $EF \approx 1$,则该元素来源于地壳风化。由此可评价元素的富集程度^[15],结果见表1。

表1所示为各采样点重金属的含量及富集系数,可以看出,虽然同种重金属在各点含量存在差异,但八卦洲和杨中沉积物中重金属含量的平均值非常接近。八卦洲和杨中的沉积物中Cu、Cr、Pb、Ni、Cd元素均存在相对富集,各元素 $EF > 1$ 的样品占总样品比例分别为Cu 50%、Cr 40%、Pb 40%、Ni 40%、Cd 20%。

2.1.2 野生植物对重金属的富集特征

表2列出了不同野生植物茎叶中重金属的含量,可以看出,芦苇体内Cu和Cd的含量略低于其它3种蒿类植物,而Pb在野生香蒿体内含量最低,

野生芦蒿中Zn、Ni、Cr的含量则高于其它几种植物,虽然野生桐蒿中Ni的含量明显低于其它几种植物,但Cu、Pb、Cd的含量则较高,即使同一种植物,不同采样点的含量也有较大差别,说明植物对重金属的吸收具有选择性。

以生物富集因子(Biological Enrichment Factor, BCF; $BCF = C_p/C_s$,其中, C_p 为植物地上部分重金属含量, C_s 为沉积物中重金属含量)为指标反映野生植物对沉积物中重金属的富集特征,结果如表2所示。各种植物对Zn、Ni、Cu、Cr、Pb的BCF值基本低于1,而在蒿类植物中Cd的BCF值均大于1,说明Cd易被野生植物富集,且单位质量的蒿类植物比芦苇更易富集沉积物中的Cd。不同植物之间,芦苇的富集以Ni为最主,而蒿类植物则以Cd为主。

将植物根系、茎叶中重金属的含量进行比较,分析植物不同部位对重金属的富集特征,结果如图1、2和3所示。

图1可以看出,B4采样点的香蒿和芦苇体内多数重金属在根系中的含量均大于地上部分,且含量顺序也基本一致,即 $Zn > Pb > Cu > Cr$ (Ni例外),这与它们在沉积物中的含量顺序并不完全一致,说明近岸野生植物对重金属的富集即有同一性,也有选择性。

图2可以看出,B1采样点的野生芦蒿体内重金属的含量与B4点的香蒿和芦苇相同,也是根系中的含量大于地上部分,但含量顺序不同,B1处Cu的含量明显提高。比较3种植物可以看出,不同植物根系中重金属含量的差异性远小于植物地上部分的差异,由此推断植物地上部分富集重金属的能力除与植物类型有关外,还与植株个体生物量有关。

图3可以看出,不种植物根系和地上部分的Cd含量表现出更为显著的差异。蒿类植物体内Cd远

表1 南京八卦洲和杨中沿江不同采样点沉积物中重金属的含量和富集系数

Table 1 Content of heavy metals and enrichment factor in Baguazhou Island and Yangzhong Island

采样点	编号	w(重金属)/(mg·kg ⁻¹)							富集因子 EF ²⁾					
		Al ¹⁾	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb	Ni	Cd
南京八卦洲	B1	5.23±0.09	56.7±0.6	106±1.6	103.1±1.8	24.2±0.5	47.5±0.7	0.37±0.004	1.25	0.93	1.53	1.13	1.38	1.05
	B2	7.30±0.09	120.4±1.4	104.1±1.8	120.0±2.2	19.4±0.3	44.6±0.6	0.35±0.008	1.90	0.65	1.28	0.65	0.93	0.71
	B4	6.62±0.15	28.8±0.3	90.9±1.9	74.4±1.6	36.9±0.8	41.6±0.8	0.48±0.011	0.50	0.62	0.87	1.36	0.96	1.07
	B5	7.94±0.17	53.2±0.8	116.2±2.9	91.7±1.7	21.3±0.4	45.5±0.5	0.37±0.006	0.77	0.67	0.90	0.66	0.87	0.69
	B8	5.77±0.10	54.5±0.9	117.0±2.2	113.3±2.6	22.5±0.4	52.3±1.1	0.31±0.006	1.09	0.92	1.52	0.95	1.38	0.80
	B9	7.33±0.01	46.6±0.6	81.7±1.9	85.9±2.1	15.8±0.2	26.0±0.7	0.28±0.003	0.73	0.51	0.91	0.53	0.54	0.56
	平均	6.70±0.08	60.0±1.2	102.7±1.1	98.1±2.6	23.4±0.3	42.9±0.5	0.36±0.009	0.83	0.70	1.14	0.85	0.97	0.79
杨中	Y4	5.34±0.12	38.8±1.0	80.9±2.2	94.4±1.7	46.7±0.7	47.6±0.7	0.28±0.007	0.84	0.69	1.37	2.14	1.36	0.76
	Y5	6.62±0.17	43.6±0.9	106±1.9	81.7±1.0	27.3±0.6	55.5±0.9	0.33±0.006	0.76	0.73	0.95	1.01	1.28	0.74
	Y6	7.99±0.15	110±2.8	94.1±1.7	100±1.1	29.4±0.8	43.6±0.6	0.32±0.009	1.59	0.54	0.97	0.90	0.83	0.59
	Y7	7.15±0.21	63.2±1.5	121.1±1.3	91.7±2.1	20.3±0.5	41.5±0.4	0.37±0.004	1.01	0.77	0.99	0.69	0.88	0.77
	平均	6.78±0.16	63.9±1.2	100.5±1.9	91.95±1.7	30.9±0.6	47.1±1.0	0.33±0.792	1.09	0.68	1.05	1.12	1.06	0.72

注: 1) w(Al)的单位为%; 2) 各元素背景值参考《水环境化学元素研究水环境化学元素研究》^[16]第216页。

表 2 南京八卦洲和杨中沿江野生植物茎/叶中重金属的含量及富集系数

Table 2 Content and BCFs of main heavy metals in different wild plants grown in Baguazhou Island and Yangzhong Island

植物种类	编号	植物茎/叶中 w(重金属)/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)						植物茎/叶中重金属的富集系数					
		Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
芦苇	B4	3.55±0.05	9.84±0.11	7.98±0.09	2.51±0.05	6.41±0.14	0.01±0.0002	0.12	0.11	0.11	0.07	0.15	0.02
Phragmites	B5	6.23±0.09	29.61±0.41	4.23±0.08	26.41±0.50	9.58±0.19	0.06±0.007	0.12	0.25	0.05	1.24	0.21	0.16
Communis	B9	3.61±0.08	23.11±0.44	5.09±0.11	15.08±0.33	11.21±0.21	< 0.01	0.08	0.28	0.06	0.95	0.43	0.04
	Y7	2.37±0.05	6.789±0.14	6.06±0.13	4.49±0.10	6.69±0.11	0.01±0.003	0.04	0.06	0.07	0.22	0.16	0.03
	Y5	14.16±0.16	5.134±0.12	10.37±0.23	8.20±0.17	7.28±0.17	< 0.01	0.32	0.05	0.13	0.30	0.13	0.03
平均		5.98±0.13	14.90±0.34	6.75±0.14	11.34±0.26	8.23±0.20	0.02±0.0004	0.14	0.15	0.08	0.56	0.22	0.06
野生香蒿	B1	13.02±0.26	27.37±0.77	2.54±0.06	4.87±0.12	7.25±0.08	0.017±0.0003	0.23	0.26	0.02	0.20	0.15	0.46
Artemisia	B4	6.32±0.12	22.99±0.44	3.68±0.06	9.42±0.18	5.46±0.14	0.065±0.0011	0.22	0.25	0.05	0.26	0.13	1.35
apiacea	平均	9.67±0.16	25.18±0.66	3.11±0.04	7.145±0.14	6.355±0.16	0.041±0.009	0.22	0.26	0.04	0.23	0.14	0.91
野生芦蒿	B1	18.82±0.34	40.16±0.44	2.26±0.03	14.62±0.26	5.25±0.14	0.013±0.0003	0.33	0.38	0.02	0.60	0.11	0.35
Artemisin	B2	17.07±0.44	16.87±0.19	2.21±0.02	6.52±0.10	6.52±0.10	0.058±0.0008	0.14	0.16	0.02	0.34	0.03	1.66
Selengensis	B8	16.25±0.36	19.67±0.37	19.89±0.52	34.97±0.39	29.48±0.32	0.041±0.0009	0.30	0.17	0.18	1.55	0.56	1.32
平均		9.67±0.12	25.57±0.67	8.12±0.13	18.70±0.19	12.07±0.16	0.037±0.0008	0.26	0.24	0.07	0.83	0.24	1.11
野生桐蒿	Y4	10.42±0.12	13.09±0.29	3.77±0.08	4.47±0.06	4.00±0.11	0.059±0.0006	0.27	0.16	0.04	0.10	0.08	2.11
Erigeron	Y6	23.44±0.52	7.56±0.22	12.69±0.34	8.84±0.23	7.95±0.17	0.097±0.0018	0.21	0.08	0.13	0.30	0.18	3.03
bonariensis	平均	16.93±0.17	10.33±0.26	8.23±0.24	6.66±0.14	5.98±0.13	0.078±0.0011	0.24	0.12	0.08	0.20	0.13	2.57

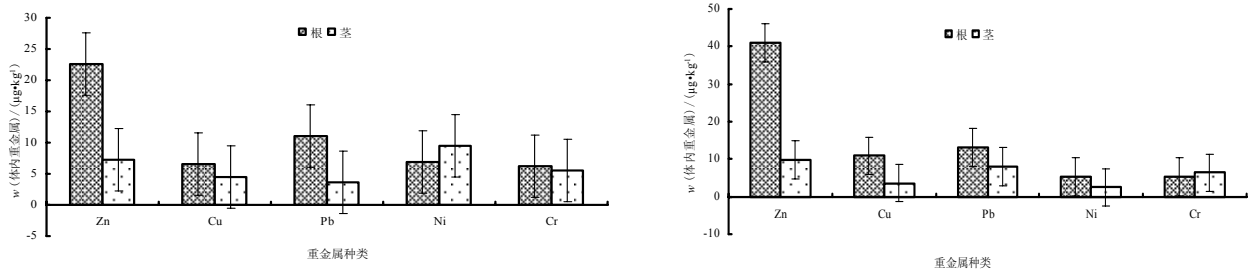


图 1 B4 采样点重金属在植物体内的含量 (A:香蒿, B:芦苇)

Fig.1 Heavy metals contents in the plants at site B4(A:Artemisia apiacea, B:Phragmites Communis)

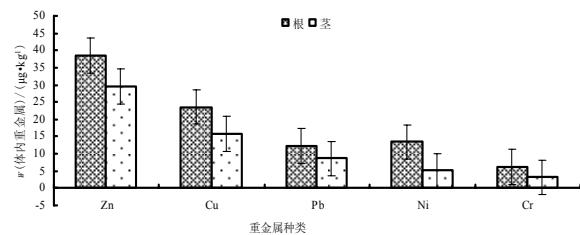


图 2 B1 采样点重金属在野生芦蒿体内的含量

Fig.2 Heavy metals contents in Artemisia

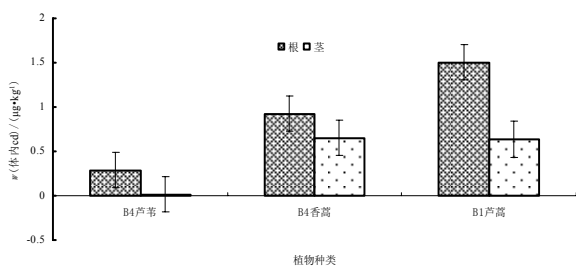


图 3 不同植物体内 Cd 的含量

Fig.3 Contents of Cd in different plants

大于芦苇中的含量，其根系中的 Cd 含量超过后者

3~5 倍，而地上部分的含量超出后者约 50 倍。尽管蒿类植物根系含量之间有一定差异，但地上部分的含量却基本相同。

2.2 沉积物中 Cd 的化学形态分析

重金属在土壤中的总量并不能真实评价其环境行为和生态效应，其在土壤中的形态含量及其比例才是决定其对环境及周围生态系统造成影响的关键因素^[17]。上述重金属的富集特征分析可以看出长江下游近岸沉积物和野生植物均存在相对的 Cd 富集，用 BCR 法对八卦洲近岸沉积物中的 Cd 进行化学形态分析，结果如图 4 和图 5 所示。其中，B1 为酸溶/交换态，B2 为可还原态，B3 为可氧化态，B4 为残渣态。

BCR 连续提取法划分土壤和沉积物中重金属形态的重金属生物可利用性顺序是：水溶结合态、交换态>碳酸盐结合态>铁锰氧化物结合态>有机结合态>残渣态^[18]。图 4 所示为 4 个近岸不同点沉积物样品测定结果的平均值，其中 B1 中 Cd 的含量为 31.7%，B2 中为 45.5%，B3 和 B4 中分别为 12.5%

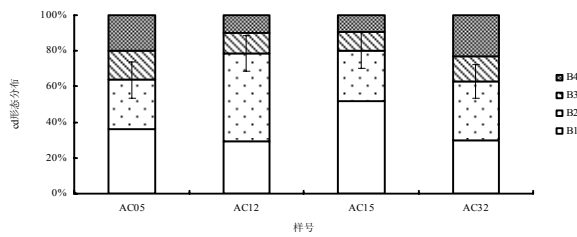


图4 八卦洲近岸不同点表层沉积物中Cd形态分布
Fig.4 Speciation distribution of Cd in the surface Profile sediment of Baguazhou Island

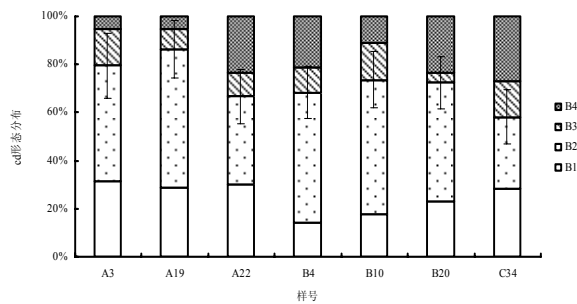


图5 八卦洲A、B沉积物剖面中Cd形态分布
Fig.5 Speciation distribution of Cd in sediment in A and Profile B of Baguazhou Island

和 17.7%，其形态分布顺序为 $B2 > B1 > B4 > B3$ ，说明本区域长江近岸沉积物中 Cd 的主要形态是与无定形的铁锰氧化物和水氧化物相结合的，而能被植物利用，迁移性较强的碳酸盐结合态^[19]次之，难被生物利用的与有机质和硫化物结合的形态则相对较少，就此推断沉积物中的 Cd 存在迁移风险，如果土壤 pH 改变，可还原态的 Cd 可能被植物间接利用^[20]。

图 5 中，A、B 两个剖面的表层与底层沉积物中 Cd 的形态分布有一定差异，但由于 A 剖面沉积年代较新，不同层次的 B1 含量基本相同，而 B 剖面沉积年代较久，随浸水深度的增加 B1 含量逐渐增加，可见沉积物越新，Cd 的迁移性越强。

3 小结

(1) 虽然不同采样点处同一种重金属的含量差异明显，但八卦洲和扬中的沉积物中各种重金属含量的平均值非常接近，且 Cu、Cr、Pb、Ni、Cd 元素均存在相对富集。

(2) 不同类型植物中重金属的含量有一定差异，可见植物对重金属的利用具有选择性。近岸野生植物对 Zn、Ni、Cu、Cr、Pb 这 5 种重金属不存在生物富集作用，但对于 Cd，多数植物体内含量要高于沉积物中的含量，且单位质量的蒿类植物比芦苇更能富集沉积物中的 Cd。多数重金属在根系中的含量要大于地上部分，可见近岸野生植物对重金属

的富集即有同一性，也有选择性。

(3) 本区域长江沉积物中 Cd 的主要形态是与无定形的铁锰氧化物和水氧化物结合的，说明 Cd 存在一定的生态风险，且沉积物越新，可迁移的酸溶/交换态的 Cd 含量越高。

参考文献:

- [1] Williams SC, Simpson HJ, Olsen CR, et al. Sources of heavy metals in sediments of the Hudson river estuary[J]. *Mar Chem*, 1978, 6(3): 195-213.
- [2] 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]. *环境监测管理与技术*, 2006, 18 (5): 15-18.
SHEN Min, YU Hongxia, DENG Xihai. Heavy metals in surface sediments from Lower reach of the Yangtze river[J]. *Management and Technology for Environmental Monitoring*, 2006, 18 (5): 15-18.
- [3] 闭向阳, 马振东, 任利民, 等. 长江(湖北段)沉积物中微量元素分布特征及镉的形态[J]. *环境化学*, 2005, 5(24)3: 260-264.
BI Xiangyang, MA Zhengdong, REN Liming, et al. Distribution characteristics of trace elements and cadmium forms in sediment from the middle reaches of Yangtze River, Hubei province [J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 5(24)3: 260-264.
- [4] 孟翔, 刘苍宇, 程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 37-43.
MENG Yi, LIU Cangzi, CHENG Jiang. Geochemistry characteristics of heavy metals in the surface sediment in the Yangtze River area and evaluations of the bed materials[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 37-43.
- [5] 方圣琼, 胡雪峰, 徐巍, 等. 长江口潮滩沉积物的性状对重金属累积的影响[J]. *环境化学*, 2005, 24(5): 586-589.
FANG Shengqiong, HU Xuefeng, XU Wei, et al. Influence of properties of sediments from tidal flat in the Yangtze river estuary to heavy metal accumulation[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(5): 586-589.
- [6] 毕春娟. 长江口滨岸潮滩重金属环境生物地球化学研究[D]. 华东师范大学博士学位论文, 上海: 华东师范大学, 2004: 1-9.
Bi Chunjuan. *Environmental Biogeochemistry of Heavy Metals in Intertidal Flat of the Yangtze Estuary*[D]. East China Normal University Doctoral Thesis, Shanghai: East China Normal University, 2004: 1-9.
- [7] 毕春娟, 陈振楼, 郑祥民, 等. 际环境重金属地球化学行为及其生物有效性研究进展[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 93-393.
BI Chunjuan, CHEN Zhenlou, ZHENG Xiangmin, et al. Research progress in geochemical activities and bioavailability of heavy metals in rhizosphere environment[J]. *Advance in earth Sciences*, 2001, 16(3): 93-393.
- [8] 陈沈良, 周菊珍, 谷国传. 长江河口主要重金属元素的分布和迁移[J]. *广州环境科学*, 2001, 16(1): 11-13.
CHENG Shenliang, ZHOU Juzhen, GU Guochuan. Distribution and transport of the main heavy metals in Changjiang River Estuary[J]. *Guangzhou Environmental Science*, 2001, 16(1): 11-13.
- [9] 孟翔, 刘苍宇. 长江口区沉积地球化学特征的定量研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1996, 1: 73-84.
MENG Yi, LIU Cangzi. A quantitative study on the sedimentary geochemical characteristics of the Changjiang estuarine region[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 1996, 1: 73-84.

- [10] A.M.Ure, P.H.Quevauviller, H.Muntau, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of European Communities[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1993 (51): 135-151.
- [11] Tolalioglu s, Elci L, Kartal S. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000(413): 33-40.
- [12] 王亚平, 黄毅, 王苏明, 等. 土壤和沉积物中元素的化学形态及其顺序提取法[J]. *地质通报*, 2005, 24(8): 728-732.
WANG Yaping, HUANG Yi, WANG Suming, et al. Chemical speciation of elements in sediments and soils and their sequential extraction process[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(8): 728-734.
- [13] 胡恭任, 于瑞莲. 应用地积累指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染[J]. *中国矿业*, 2008, 17(4): 48-51.
HU Gongren, YU Ruilian. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in assessment of heavy metal contamination in soil of tangtou section on No.324 main roads[J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(4): 48-51.
- [14] Blaser P, Zimmermann S, Luster J, et al. Critical Examination of Trace Element Enrichments and Depletions in Soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss Forest Soils[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 249: 257-280.
- [15] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 896-904.
CUI Longpeng, BAI Jianfeng, SHI Yonghong, et al. Heavy metals in soil contaminated by coal mining activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 896-904.
- [16] 张立城, 余中盛, 章中, 等. 水环境化学元素研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996, 2, 1: 216.
ZHANG Licheng, YU Zhongsheng, ZHANG Zhong, et al. Research of chemical elements for water environment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996, 2, 1: 216.
- [17] MA Lena Q, RAO Gade N. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(1): 259-264.
- [18] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1551-1556.
LEI Ming, LIAO Bohan, QIN Pufeng. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1551-1556.
- [19] 冯素萍, 高连存, 叶新强. 河流底泥沉积物分子形态综合分析[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(3): 27-30.
FENG Suping, GAO Liancun, YE Xinqiang. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(3): 27-30.
- [20] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1499-1502.
HAN Chunmei, WANG Linshan, GONG Zongqiang, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1499-1502.

Enrichment and speciation analysis of heavy metals in the sediments of Yangtze River (Nanjing section)

MA Hongrui^{1,2}, ZHANG Qian¹, JI Junfeng², WU Yongzhao²

1. College of Resources & Environment, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The contamination levels of Al, Cu, Zn, Cr, Pb, Ni and Cd were determined in some wild plants and sediments of Baguazhou and Yangzhong islands in Changjiang River (Yangtze River). An evaluation of the pollution status of the river sediment was carried out by enrichment factors (EFs) and biological enrichment factor (BCF) calculated using adapted background concentrations of heavy metals. The results indicated that heavy metal settling in recent sediments was serious around the both islands, especially for Cu, Cr, Pb, Ni, Cd. The sediment samples with $EF_{Cu} > 1.0$ account for about 50% of all of them, and about 40% of the all samples with $EFs > 1.0$ for Cr, Pb, Ni, while 21% of the samples with $EF_{Cd} > 1.0$. It was found that Cd enriched significantly in *Artemisia selengensis* and *Erigeron bonariensis* which abundant grown on the sediments. And average BCF of Cd reached to 2.57. In order to identify Cd bioavailability, Sequential extraction procedure (acid extractable, reducible, oxidizable, and residual) proposed by BCR was applied for the determination fractions of Cd in the sediments. Generally, 31.7% and 45.5% of Cd were found in the acid extractable and reducible fractions respectively, which were exceeded heavily the average level in the river sediments and soils. This trend performed more seriously in recent setting sediments. It suggested that the Cd was influenced significantly by human activities. All results demonstrated that Cd risk existed in the riverside sediments along the low reach of Changjiang River.

Key words: Yangtze River Nanjing section; sediments; heavy metals; enrichment factor; BCR