

# 上海市崇明岛城镇河流沉积物重金属累积与环境风险\*

王 军 陈振楼\*\* 王 初 叶明武 沈 静 聂智凌

(华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘 要** 小城镇河流沉积物重金属累积状况间接指示了河流水环境质量现状, 研究河流沉积物重金属累积水平与环境风险具有重要的现实意义. 对上海市崇明岛崇南分区 3 个典型城镇(城桥镇、堡镇、陈家镇)河流沉积物重金属累积特征进行了研究. 结果表明 3 个城镇河流沉积物中 Zn、Cr、Cu、Pb 和 Cd 平均含量分别为: 城桥镇 103.1、79.2、39.0、29.7 和 0.300 mg · kg<sup>-1</sup>; 堡镇 99.0、104.0、50.5、32.7 和 0.308 mg · kg<sup>-1</sup>; 陈家镇 86.7、79.5、32.2、30.5 和 0.274 mg · kg<sup>-1</sup>; 崇南分区 94.72、81.35、38.52、30.78 和 0.297 mg · kg<sup>-1</sup>. 用地累积指数法( $I_{geo}$ )对沉积物重金属进行的环境风险评估结果为: 崇明 3 个城镇河流沉积物重金属均为低-中等环境风险, 其中 3 个城镇达到中等环境风险的概率为城桥镇 > 堡镇 > 陈家镇.

**关键词** 沉积物 重金属 环境风险 崇明岛

文章编号 1001-9332(2007)07-1518-05 中图分类号 X826 文献标识码 A

**Heavy metals accumulation in river sediments of Chongming Island, Shanghai City, and its environmental risk.** WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, YE Ming-wu, SHEN Jing, NIE Zhi-ling (Key Laboratory of Geographic Information Science of Education Ministry, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2007, 18(7): 1518-1522.

**Abstract:** Heavy metals accumulation in river sediments can reflect the environmental quality of river waters. It's of practical significance to study the accumulation level of heavy metals in river sediments and its environmental risk. In this paper, the heavy metals accumulation in river sediments of three typical towns of Chongming Island was studied, and the results showed that the average accumulation of Zn, Cr, Cu, Pb and Cd in Chengqiao Town, Baozhen Town and Chenjia Town was 103.1, 79.2, 39.0, 29.7 and 0.300 mg · kg<sup>-1</sup>, 99.0, 104.0, 50.5, 32.7 and 0.308 mg · kg<sup>-1</sup>, and 86.7, 79.5, 32.2, 30.5 and 0.274 mg · kg<sup>-1</sup>, respectively. In South Chongming, the average accumulation of Zn, Cr, Cu, Pb and Cd was 94.72, 81.35, 38.52, 30.78 and 0.297 mg · kg<sup>-1</sup>, respectively. The environmental risk assessment by using geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) indicated that these three towns had a low-medium rank environmental risk of heavy metals accumulation in river sediments, and the probability of achieving medium rank risk was in the order of Chengqiao > Baozhen > Chenjia.

**Key words:** sediment; heavy metal; environmental risk; Chongming Island.

## 1 引 言

河流沉积物是水环境安全的指示剂, 能准确反映水体受污染的程度<sup>[2, 6, 19]</sup>. 水体中重金属易与有机高分子生成配合物或螯合物, 吸附在黏土矿物等表

面, 进入沉积物并积累, 使沉积物中重金属含量升高<sup>[14]</sup>. 吸附了重金属的沉积物在一定条件下(如气候、水动力、pH、盐度、氧化还原电位、水温、污染物排放等)会重新释放重金属, 造成水体二次污染<sup>[13, 15, 22-23, 29]</sup>, 使生态环境恶化, 甚至通过食物链对人体造成威胁<sup>[3, 8]</sup>. 因此, 研究河流沉积物重金属累积水平与环境风险具有重要的现实意义.

目前国内外对河流沉积物重金属的研究不断增

\* 国家自然科学基金项目(40571006, 40131020)、上海市科委项目(05DZ12007, 05JC14059)和上海市环保局资助项目.

\*\* 通讯作者. E-mail: zlchen@geo.ecnu.edu.cn

2006-04-24 收稿, 2007-03-20 接受.

多,研究重点多为沉积物重金属含量水平、空间分异、来源解析、生物毒性、生态修复等,研究尺度多为省、市、区县一级<sup>[7,9,11-12,18,25,27]</sup>。在沉积物重金属污染评价方面多采用地累积指数法、潜在生态危害指数法、脸谱图法、综合指数法、尼梅罗综合指数法、污染负荷指数法、沉积物富集系数法和次生相富集系数法<sup>[1,10,17,24]</sup>。这些方法各有特点和适用条件,也存在局限性<sup>[4,16,29]</sup>。长期以来,有关城镇一级河流沉积物环境安全的研究很少。为此,本文以城镇河流沉积物为研究对象,在对同一级别河流沉积物重金属含量水平研究的基础上,对沉积物重金属环境风险进行了评估,为合理规划城镇河流资源、提高城镇生态安全水平、保障城镇人群健康提供科学依据。

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

上海是我国经济发展最迅速、聚居人口最集中、城镇化程度最高的地区。近年来,由于产业扩散和都市效应,上海小城镇经济和城镇建设发展迅速<sup>[20]</sup>。崇明县作为上海的重要郊县,是上海最具潜在战略意义的发展空间之一。依照《崇明岛域总体规划》,崇明岛分为开发类型各异的崇南、崇东、崇西、崇中、崇北 5 个分区(图 1)。崇南分区包括城桥镇、堡镇、陈家镇等,是全岛田园式城市化中心区和产业集中区。城桥镇位于崇明岛南岸偏西,紧邻长江主航道,是崇明县政治、经济和文化中心,是实现上海国际生态化大都市新发展格局的重要地区之一;堡镇是崇明岛第二大镇,工业发展起步较早,工业和城镇

建设基础条件较好,也是全岛粮食、经济、渔业的主产区。陈家镇地处上海崇明岛东端,建设中的“沪崇苏高速公路”两端出口位于该镇,是东滩鸟类自然保护区的外围控制发展区域。到 2020 年崇明县将建设成为以优美的生态环境为品牌,以闻名的游乐度假为主导,以发达的清洁生产为支撑的生态型岛屿。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 样品采集** 2005 年 11 月在崇明岛的城桥镇、堡镇、陈家镇采集河道表层沉积物样品。在城桥镇采集了 7 个沉积物样(CQ<sub>1</sub>—CQ<sub>7</sub>);在堡镇采集了 5 个沉积物样(BZ<sub>1</sub>—BZ<sub>5</sub>);在陈家镇采集了 10 个沉积物样(CJ<sub>1</sub>—CJ<sub>10</sub>),共计 22 个样品(图 1)。采样时根据采样区的具体情况,在每个采样点用自制底泥采集器取 5~10 个沉积物表层样(厚度 5~10 cm),混合均匀后用四分法获取足量样品,装入聚乙烯塑料袋中,于实验室内自然风干,剔除动植物残体和石块,研磨,过 100 目尼龙筛,装瓶待测。

**2.2.2 地累积指数计算** 地累积指数法(geoaccumulation index,  $I_{geo}$ )是德国学者 Muller 于 1969 年提出<sup>[21]</sup>,广泛用于研究沉积物中重金属环境风险的定量指标,尤其用于研究现代沉积物中重金属的风险评估,在我国已得到广泛的应用<sup>[5,16,28,30]</sup>。地累积指数的计算式为:

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

式中,  $C_n$  是元素  $n$  在沉积物中的浓度,  $B_n$  是沉积物中该元素的地球化学背景值,  $k$  是考虑各地沉积物差异可能会引起背景值变动而取的系数(一般取值为 1.5)。

**2.2.3 分析测定** 样品重金属分析项目为 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd。沉积物样品经酸溶法(HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>)加热消解。用 Perkin Elmer 公司生产的 AANA-LYST800 型原子吸收光谱仪测定,其中 Cu、Zn、Pb 和 Cr 测定采用火焰法, Cd 测定采用石墨炉法。每种元素测定的相对标准偏差均小于 10%。

## 3 结果与分析

### 3.1 沉积物重金属的区域分布特征

城桥镇河流沉积物重金属含量总体表现为 Zn > Cr > Cu > Pb > Cd。城桥镇河流沉积物中 Zn 含量为 86.0~136.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均为 103.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -20.0%~+32.8%, 区域内 Zn 含量差异较大; Cr 含量为 74.7~87.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 平均为 79.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -5.7%~+10.0%, 区域内 Cr 含量差异小; Cu

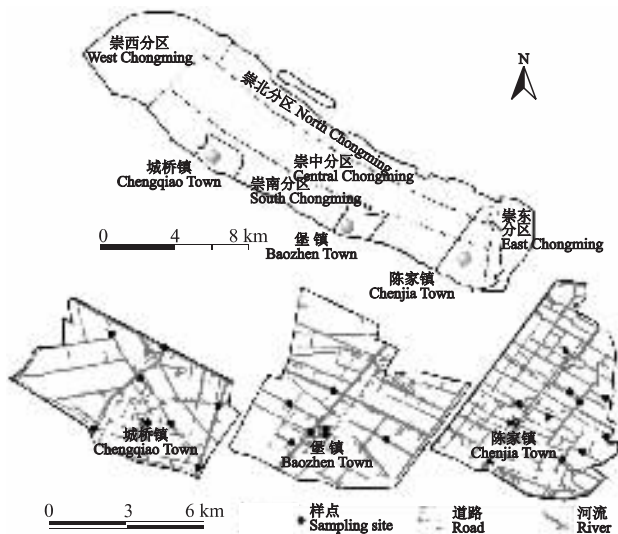


图 1 崇明 3 镇样点分布图  
Fig. 1 Locations of sampling sites.

含量为 28.0 ~ 65.3 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 39.0 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -28.1% ~ +67.6%, 区域内 Cu 含量差异较明显; Pb 含量为 23.7 ~ 34.0 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 29.7 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -20.3% ~ +10.0%, 区域内 Pb 含量差异不太明显; Cd 含量为 0.196 ~ 0.305 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 0.300 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -38.9% ~ +29.1%, 区域内 Cu 含量差异较明显(表 1)。因此, 城桥镇河流沉积物中重金属 Cu 和 Cd 空间差异较明显, 而 Cr、Pb 空间差异较小。

堡镇河流沉积物重金属含量特征总体也表现为 Zn > Cr > Cu > Pb > Cd, 仅采样点 BZ<sub>4</sub> 略有例外, 出现 Cr > Zn。在堡镇河流沉积物中, Zn 含量为 81.6 ~ 123.3 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 99.0 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -17.6% ~ +24.5%, 区域内 Zn 含量差异较大; Cr 含量为 69.1 ~ 218.7 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 104.0 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -33.6% ~ +110.2%, 区域内 Cr 含量差异很大; Cu 含量为 26.7 ~ 107.4 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 50.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -47.1% ~ +112.8%, 区域内 Cu 含量差异很大; Pb 含量为 26.7 ~ 46.7 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 32.7 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -18.6% ~ +42.6%, 区域内 Pb 含量差异很大; Cd 含量为 0.216 ~ 0.408 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 0.308 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -29.9% ~ +32.5%, 区域内 Cu 含量差异较明显(表 1)。综合分析可知, 城桥镇河流沉积物中重金属 Cu 和 Cr 空间差异很大, 而 Pb、Cd 空间差异较大, Zn 空间差异最小。

陈家镇河流沉积物重金属含量特征总体也表现为 Zn > Cr > Cu > Pb > Cd, 仅采样点 CJ<sub>5</sub> 和 CJ<sub>10</sub> 出现例外。在 CJ<sub>5</sub> 样点, Pb > Cu; 在 CJ<sub>10</sub> 样点, Cr > Cu > Cr > Pb > Cd。在陈家镇河流沉积物中, Zn 含量为 37.2 ~ 106.4 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 86.7 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -57.1% ~ +22.7%, 区域内 Zn 含量差异较大; Cr 含量为 68.8 ~ 102.6 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 79.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -13.5% ~ +29.1%, 区域内 Cr 含量差异较大; Cu 含量为 23.0 ~ 43.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 32.2 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -28.6% ~ +35.0%, 区域内 Cu 含量差异较大; Pb 含量为 14.3 ~ 63.4 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为 30.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -53.3% ~ +107.9%, 区域内 Pb 含量差异很大; Cd 含量为 0.170 ~ 0.378 mg · kg<sup>-1</sup>, 平均为

表 1 崇明 3 个城镇河流沉积物重金属累积量

Tab. 1 Heavy metal accumulation in town river sediment

样点 Sampling sites	重金属指标 Indexes of heavy metal (mg · kg <sup>-1</sup> )					
	Cu	Pb	Cr	Zn	Cd	
城桥镇 Chengqiao	CQ <sub>1</sub>	30.1	23.7	83.8	86.5	0.196
	CQ <sub>2</sub>	41.1	26.8	75.9	99.7	0.416
Town	CQ <sub>3</sub>	37.0	30.8	77.8	95.4	0.365
	CQ <sub>4</sub>	28.0	28.2	74.7	86.0	0.268
	CQ <sub>5</sub>	65.3	33.6	87.1	136.9	0.375
	CQ <sub>6</sub>	33.5	31.1	77.3	94.5	0.325
	CQ <sub>7</sub>	37.7	34.0	77.6	122.8	0.305
堡镇 Baozhen	BZ <sub>1</sub>	37.1	26.7	77.3	94.4	0.308
	BZ <sub>2</sub>	38.5	29.0	79.4	99.8	0.248
Town	BZ <sub>3</sub>	26.7	28.1	69.1	81.6	0.216
	BZ <sub>4</sub>	107.4	46.7	139.0	123.3	0.408
	BZ <sub>5</sub>	42.7	33.3	75.8	95.9	0.361
陈家镇 Chenjia	CJ <sub>1</sub>	29.6	28.0	68.8	93.9	0.283
	CJ <sub>2</sub>	36.4	31.2	78.5	98.0	0.322
Town	CJ <sub>3</sub>	37.9	37.5	77.3	106.4	0.311
	CJ <sub>4</sub>	30.1	24.9	79.1	89.3	0.233
	CJ <sub>5</sub>	35.6	63.4	78.3	95.8	0.378
	CJ <sub>7</sub>	31.5	27.6	72.1	92.1	0.246
	CJ <sub>7</sub>	24.5	22.0	84.8	84.4	0.267
	CJ <sub>8</sub>	30.2	22.9	82.4	96.9	0.318
	CJ <sub>9</sub>	23.0	14.3	71.0	73.1	0.210
	CJ <sub>10</sub>	43.5	33.3	102.6	37.2	0.170

0.274 mg · kg<sup>-1</sup>, 区域样点均值偏离度为 -38.0% ~ +38.1%, 区域内 Cu 含量差异较大(表 1)。综合分析可知, 陈家镇河流沉积物中重金属 Pb 空间差异很大, Cr、Cu 和 Cd 空间差异较大, 而 Zn 空间差异相对较小。

### 3.2 河流沉积物重金属的环境风险

**3.2.1 环境风险评估标准与等级** 由于崇明岛属于河口冲积岛, 河流沉积物中重金属地球化学背景值和上海市土壤背景值不尽相同, 而河流沉积物性质与长江口滩涂沉积物性质相似, 因此, 我们采用长江口滩涂沉积物重金属背景值作为崇明河流沉积物重金属的背景值。长江口滩涂沉积物重金属 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 的背景值分别为 17.43、48.79、20.14、28.27 和 0.09 mg · kg<sup>-1</sup>[26]。

地累积指数共分为 0 ~ 6 级, 表示重金属环境风险由无至极强。最高一级(6 级)的元素含量可能是背景值的几百倍。 $I_{geo}$  值与重金属污染水平的关系见表 2。

**3.2.2 环境风险评估** 利用地累积指数法( $I_{geo}$ )对崇明城桥镇、堡镇和陈家镇河流沉积物重金属环境风险的评估结果见表 3。从表 3 可以看出, 崇明 3 个城镇河流沉积物重金属生态风险为低-中等(1、2

表 2 风险指数与环境风险分级

Tab. 2 Rank of risk index and environmental risk

指数 Index	分级 Grade	环境风险程度 Degree of ecological risk
<0	0	无环境风险 No risk
(0, 1]	1	低环境风险 Low risk
(1, 2]	2	中等环境风险 Medium risk
(2, 3]	3	中-高环境风险 Medium-High risk
(3, 4]	4	高环境风险 High risk
(4, 5]	5	高-极高环境风险 High-Very high risk
>5	6	极高环境风险 Very high risk

表 3 基于  $I_{geo}$  不同城镇河流沉积物环境风险指数及风险等级

Tab. 3 Potential environmental risk index and risk rank in different towns

城镇 Towns	风险等级 Rank of risk	单指标风险等级样点数 Number of sampling sites					综合风 险等级 Rank of general risk	风险概率 Probability of risk (%)
		Cu	Pb	Cr	Zn	Cd		
城桥镇	0	0	3	0	0	0	0	
Chengqiao Town	1	6	4	6	7	2	29	
	2	1	0	1	0	5	71	
	3~6	0	0	0	0	0	0	
堡镇	0	0	2	0	0	0	0	
Baozhen Town	1	4	3	4	5	2	40	
	2	1	0	1	0	3	60	
	3~6	0	0	0	0	0	0	
陈家镇	0	2	6	0	2	0	0	
Chenjia Town	1	8	3	9	8	5	50	
	2	0	1	1	0	5	50	
	3~6	0	0	0	0	0	0	

级)其中环境风险达到中等(2级)的样点占总样点数的百分比为 城桥镇(71%)>堡镇(60%)>陈家镇(50%)。综合分析表明,城桥镇环境风险最大,堡镇次之,陈家镇相对较低。

#### 4 结 语

小城镇河流沉积物重金属累积状况间接指示了河流水质环境质量现状,研究河流沉积物重金属累积水平与环境风险具有重要的现实意义。崇明城镇河流沉积物重金属累积研究表明,崇南分区河流沉积物中 Zn、Cr、Cu、Pb 和 Cd 的积累量平均为 94.72、81.35、38.52、30.78 和 0.297 mg·kg<sup>-1</sup>,其中 Zn 的积累为城桥镇>堡镇>陈家镇,Cr 的积累为堡镇>陈家镇>城桥镇,Cu 的积累为堡镇>城桥镇>陈家镇,Pb 的积累为堡镇>陈家镇>城桥镇,Cd 的积累为堡镇>城桥镇>陈家镇。利用  $I_{geo}$  法对沉积物重金属环境风险进行的评估表明,崇明 3 个城镇河流沉积物重金属均为低-中等环境风险,其中 3 个城镇达到中等环境风险的概率为城桥镇>堡镇>陈家镇。

#### 参考文献

- [1] Audry S, Schafer J, Blanc G, et al. 2004. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). *Environmental Pollution*, **132**: 413-426
- [2] Chen J-S (陈静生). 1987. Water Environmental Chemistry. Beijing: Higher Education Press: 176-178 (in Chinese)
- [3] Cui Y (崔毅), Xin F-Y (幸福言), Ma S-S (马绍赛), et al. 2005. Pollution of heavy metals in sediments and its evaluation of potential ecological harm in Rushan Bay, Shandong Peninsula. *Journal of Fishery Science of China* (中国水产科学), **12**(1): 83-90 (in Chinese)
- [4] Ding X-G (丁喜桂), Ye S-Y (叶思源), Gao Z-J (高宗军). 2005. Methods of heavy metal pollution evaluation for offshore sediments. *Marine Geology Letters* (海洋地质动态), **21**(8): 31-36 (in Chinese)
- [5] Dong D-M (董德明), Lu Y-Z (路永正), Li Y (李鱼), et al. 2005. The distribution of heavy metals in the surface sediments in parts of rivers and lakes in Jilin Province. *Journal of Jilin University* (Earth Science) (吉林大学学报·地球科学版), **35**(1): 91-96 (in Chinese)
- [6] Fan C-X (范成新), Zhu Y-X (朱育新), Ji Z-J (吉志军), et al. 2002. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), **14**(3): 235-241 (in Chinese)
- [7] Fan W-H (范文宏), Chen J-S (陈静生), Hong S (洪松), et al. 2002. Recent development in biotoxicological assessment of heavy metal in aquatic sediments. *Environmental Science and Technology* (环境科学与技术), **25**(1): 36-39 (in Chinese)
- [8] Forstner U, Wittman GTW. 1984. Metal Pollution in Aquatic Environment. Berlin: Springer Verlag.
- [9] Gan J-L (甘居利), Jia X-P (贾晓平), Lin Q (林钦), et al. 2000. A primary study on ecological risk caused by the heavy metals in coastal sediments. *Journal of Fisheries of China* (水产学报), **24**(6): 533-538 (in Chinese)
- [10] He J (何江), Wang X-W (王新伟), Li C-S (李朝生), et al. 2003. Pollution character of heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), **23**(1): 53-57 (in Chinese)
- [11] He M-C (何孟常), Wang Z-J (王子健). 2002. Assessing heavy metals pollution in the Le'an River by multi-index and an integrative model. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **22**(1): 80-86 (in Chinese)
- [12] Huang KM, Lin S. 2003. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan. *Chemosphere*, **53**(9): 1113-1121
- [13] Huang S-L (黄岁梁). 1995. A study on heavy metals pollutant desorption by sediment with different grain si-

- zes. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), **50**(6): 497-505 (in Chinese)
- [ 14 ] Huang X-P (黄小平), Li X-D (李向东), Yue W-Z (岳维忠), et al. 2003. Accumulation of heavy metals in the sediments of Shenzhen Bay, south China. *Environmental Science* (环境科学), **24**(4): 144-149 (in Chinese)
- [ 15 ] Huang Y-L (黄廷林). 1995. Kinetics of heavy metal release from aquatic sediments. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), **15**(4): 440-446 (in Chinese)
- [ 16 ] Huo W-Y (霍文毅), Huang F-R (黄风茹), Chen J-S (陈静生), et al. 1997. Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), **17**(1): 81-86 (in Chinese)
- [ 17 ] Jia Z-B (贾振邦), Zhou H (周华), Zhao Z-J (赵智杰), et al. 2000. The application of the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in sediments in the Benxi section of the Taizi River. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (Natural Science) (北京大学学报·自然科学版), **36**(4): 525-530 (in Chinese)
- [ 18 ] Li C-S (李朝生), Wang X-W (王新伟), He J (何江), et al. 2005. Potential ecological risk and its spatial variance of heavy metals in river sediments: A case study on the Baotou section of the Yellow River. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), **24**(2): 308-311 (in Chinese)
- [ 19 ] Liu WX, Li XD, Shen ZG, et al. 2003. Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River estuary. *Environmental Pollution*, **121**: 377-388
- [ 20 ] Liu W (刘伟), Chen Z-L (陈振楼), Xu S-Y (许世远), et al. 2006. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns, Shanghai. *Chinese Journal of Environmental Science* (环境科学), **27**(3): 538-543 (in Chinese)
- [ 21 ] Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, **2**: 108-118
- [ 22 ] Qiao S-Y (乔胜英), Jiang J-Y (蒋敬业), Xiang W (向武), et al. 2005. Distribution of heavy metals in sediments in Lakes in Wuhan with assessment on their potential ecological risk. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), **14**(3): 353-357 (in Chinese)
- [ 23 ] Shu T-F (舒廷飞), Luo L (罗琳), Wen M (温茂). 2002. Effects of mariculture on coastal ecological environment. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), **21**(2): 74-79 (in Chinese)
- [ 24 ] Vreca P, Dolenc T. 2005. Geochemical estimation of copper contamination in the healing mud from Makirina Bay, central Adriatic. *Environment International*, **31**(1): 53-61
- [ 25 ] Wang S-Q (王胜强), Sun J-S (孙津生), Ding H (丁辉). 2005. Evaluation on potential ecological risk of heavy metal pollution of sediments in Haihe River. *Environmental Engineering* (环境工程), **23**(2): 62-64 (in Chinese)
- [ 26 ] Xu S-Y (许世远), Tao J (陶静), Chen Z-L (陈振楼), et al. 1997. Dynamic accumulation of heavy metals in tidal flat sediments of Shanghai. *Oceanology et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **28**(5): 509-515 (in Chinese)
- [ 27 ] Yu Y-J (郁亚娟), Huang H (黄宏), Wang X-D (王晓栋), et al. 2003. Sedimentary heavy metal pollution in the Huaihe River. *Research of Environmental Science* (环境科学研究), **16**(6): 26-28 (in Chinese)
- [ 28 ] Zhang J (张菊), Chen Z-L (陈振楼), Xu S-Y (许世远), et al. 2006. Lead pollution and its assessment in urban street dust of Shanghai. *Chinese Journal of Environmental Science* (环境科学), **27**(3): 520-523 (in Chinese)
- [ 29 ] Zhang X (张鑫), Zhou T-F (周涛发), Yang X-F (杨西飞), et al. 2005. Study on assessment methods of heavy metal pollution in river sediments. *Journal of Hefei University of Technology* (Natural Science) (合肥工业大学学报·自然科学版), **28**(11): 1419-1423 (in Chinese)
- [ 30 ] Zhou X-Y (周秀艳), Wang E-D (王恩德). 2004. Method on how to apply index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution to evaluate heavy metal pollution as result of inter-tidal sediments in Liaodong Bay. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), **4**(2): 22-24 (in Chinese)

---

作者简介 王军,男,1975年生,博士,讲师。主要从事资源环境信息系统、灾害风险评估研究,发表论文20篇。E-mail: jwang@geo.ecnu.edu.cn

责任编辑 梁仁禄

---