

鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价

弓晓峰^{1,2}, 陈春丽², 周文斌¹, 简敏菲³, 张振辉⁴

(1. 南昌大学教育部鄱阳湖湖泊生态与生物资源利用实验室, 南昌 330047; 2. 南昌大学环境科学与工程学院, 南昌 330029; 3. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330027; 4. 南昌大学老科协, 南昌 330047)

摘要: 为了解丰、枯水期鄱阳湖沉积物中重金属含量以及各污染物的潜在生态危害程度, 在对鄱阳湖污染现状详细调查与分析的基础上, 利用地积累指数法和潜在生态风险指数法对鄱阳湖底泥中的重金属污染进行综合性的评价分析, 并与单因子指数评价结果相比较。结果表明, 鄱阳湖底泥已经受到了不同程度的重金属污染。从总体的污染程度分析, 各污染物的污染程度大小排列次序为: Cu> Pb> Zn> Cd, 这与单因子指数法评价结果一致; 各污染物对鄱阳湖生态风险构成危害的影响程度排列次序为: Cd> Pb> Zn> Cu; 污染的地区和时间差异大, 各采样点污染程度排序为: 鄱阳饶河> 鄱阳湖龙口> 鄱阳湖南矶山> 星子冬枯山> 星子渔民村, 且枯水期普遍大于丰水期。

关键词: 鄱阳湖; 重金属污染; 地积累指数; 潜在生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)04-0732-05

Assessment on Heavy Metal Pollution in the Sediment of Poyang Lake

GONG Xiao-feng^{1,2}, CHEN Chun-li², ZHOU Wen-bin¹, JIAN Min-fei³, ZHANG Zhen-hui⁴

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Ecology and Bioresource Utilization of MOE, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2. School of Environmental Science and Engineering of Nanchang University, Nanchang 330029, China; 3. School of Geography and Environment, Normal University of Jiangxi Province, Nanchang 330027, China; 4. The OSA of Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: In order to know the heavy metals content and the degree of the potential ecological risk in the sediment of Poyang Lake in high-water period and low-water period, based on the detailed survey and analysis of the current state of pollution in Poyang Lake, using the Index of Geoaccumulation and the Potential Ecological Risk Index evaluate the heavy metals pollution of Poyang Lake. The results indicate that Poyang Lake has been polluted by heavy metals in various degrees. According to the Index of Geoaccumulation, the order of the analyzed heavy metals, arranged from highest to lowest pollution degree, is as follows: Cu> Pb> Zn> Cd; The ecological risk to Poyang Lake is: Cd> Pb> Zn> Cu; And the pollution is different from space and time, the pollution degree of each sampling site is arranged in the following order: Rao River> Longkou> Nanji shan> Dongku shan> Yumin village, and the degrees in low-water season are bigger than the degrees that in the high water period commonly.

Key words: Poyang Lake; heavy metals pollution; Index of Geoaccumulation; potential ecological risk

水体沉积物作为水环境中重金属的主要蓄积库, 可以反映河流受重金属污染的状况^[1]。评价沉积物中重金属污染的方法有很多, 如化学、生态学和毒理学等多学科综合评价方法^[2,3]、模糊集理论^[4]、脸谱图法^[5]、地积累指数法^[6]以及回归过量分析等^[7]。鄱阳湖由于受到乐安河重金属污染的影响, 对其重金属的研究成了人们关注的热点之一^[8~13], 但迄今为止多见于对乐安河沉积物中重金属污染的评价报道^[14~17], 对湖区重金属污染的评价却不多见。

本文认为采用德国学者 Muller 提出的地积累指数法^[18] (Index of Geoaccumulation) 和瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法^[19] (The Potential Ecological Risk Index) 能定量地评价水体受重金属污染的程度, 用来对鄱阳湖湿地底泥中重金属的污染程度以及潜在生态危害进行评价, 得到

了与单因子指数和综合污染指数评价相一致的结果。

1 鄱阳湖概况及重金属来源

鄱阳湖位于江西省北部、长江中下游交接处南岸, 是我国最大的淡水湖泊^[20]。目前, 鄱阳湖的整体水质尚好, 但有的湖区重金属污染不容忽视。污染源大致可以分为 4 类^[11,12]:

第 1 类: 矿山开采产生的含重金属酸性废水, 德兴铜矿开采→乐安江→饶河→鄱阳湖;

第 2 类: 冶炼厂的排污废水, 以贵溪冶炼厂为主;

收稿日期: 2005-05-18; 修订日期: 2005-08-08

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(204076); 江西省教育厅科学技术资助项目

作者简介: 弓晓峰(1962~), 女, 教授, 主要研究方向为环境监测与评价。

第 3 类: 城市工业排污, 以南昌市的城市工业污染为主;

第 4 类: 水土流失过程造成的重金属污染.

位于乐安河中下游的德兴铜矿及位于信江中游的永平铜矿是我国著名的大型铜业基地, 其开采过程中产生的重金属酸性废水的排放, 是这 2 个河口及湖区部分区域重金属污染的主要来源. 为对鄱阳湖进行保护, 对其水体及沉积物中的重金属污染研究很有必要.

2 采样布点与分析

2.1 布点

根据鄱阳湖湿地保护的特点以及重金属污染主要来源, 采样点主要集中在湖体东部, 乐安河下游的饶河入湖段. 采样点的布设采用选择性布设和对照点布设, 选择性布设采样点重点选在鄱阳县及昌江与乐安河交汇后的饶河入湖河口一带、鄱阳湖龙口一带及乐安河中下游; 对照点选择远离重金属污染源的区域, 它们是星子县湖区渔民村以及冬枯山和南昌市郊南矶山湖区, 采样点的布设见图 1 所示.

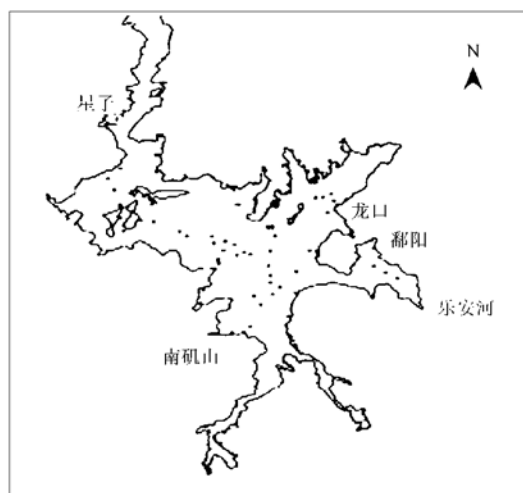


图 1 鄱阳湖流域采样点布设图 (比例尺 1:1 500 000)

Fig. 1 Sampling sites at Poyang Lake (Scale 1:1 500 000)

2.2 采样时间

实地采样分别于 2003 年丰水期(7~8 月)及枯水期(10~11 月)2 个时期进行. 2 个时期均适逢连续干旱, 因此所采样品的重金属含量具有较好的代表性^[13].

2.3 样品的处理及测定

将采集的底泥样品转移到干净搪瓷盘中, 自然风干后, 除去沙石、动植物碎片等明显异物, 混合均

匀, 用玛瑙碾钵将样品研细过 100 目尼龙筛, 用四分法进行缩分得到样品, 装入聚乙烯塑料袋或广口聚乙烯塑料瓶中并放入干燥器中保存备用. 所用器皿均用 HNO₃ 处理过、亚沸水洗净后烘干.

采用微波密封溶样消解法消解样品, 准确称取上述制备后的样品 0.3000 g, 放入聚四氟乙烯消解罐中, 依次加入浓 HNO₃ 8 mL、HF 2 mL、HClO₄ 1 mL, 摇匀后将消解罐密封置于微波炉中消解 12 min, 取出, 冷至室温后将消解罐中的溶样全部转于聚四氟乙烯烧杯中, 置于电热板上中温加热赶酸, 待蒸至近干时, 取下冷却, 加入 2% 的盐酸溶液 5 mL, 用亚沸水润洗聚四氟乙烯罐及烧杯后, 将溶液移入 100 mL 容量瓶中, 亚沸水定容, 过滤后备用.

采用原子吸收分光光度计法(AAS)测定样品中 Cu、Zn 的总量; 石墨炉系统测定样品中 Pb、Cd 的总量; 底泥的测定参照国家环境保护局 1997-12-01 实施的标准方法(GB/T 17138-1997 和 GB/T 17141-1997).

3 鄱阳湖沉积物中的重金属测定结果及污染评价

3.1 鄱阳湖丰水期水体与底泥中重金属含量

对丰水期鄱阳湖水体与底泥中的重金属含量进行测定, 结果如表 1 所示.

从表 1 可以明显看出, 水相中的重金属含量甚微, 这与文献[11, 12]报道的研究结果一致. 水相中的重金属由于物理、化学乃至生物的作用, 从水相转入到固相, 赋存于沉积物中, 故沉积物中重金属得到明显富集.

3.2 地积累指数评价法 (Index of Geoaccumulation, I_{geo})

3.2.1 地积累指数评价法及背景参照标准

地积累指数是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller^[18]于 1979 年提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标. 计算公式如(1)式:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_n}{1.5 \times B_n} \quad (1)$$

式中, c_n 是元素 n 在小于 2 μ m 沉积物中的含量; B_n 为粘质沉积岩(即普通岩)中该元素的地球化学背景值; 1.5 是考虑了各地岩石差异可能会引起的变动而取的系数. I_{geo} 值与重金属污染水平关系如表 2.

在 Muller 的地积累指数法中, 采用作为沉积物世界性标准的页岩(相当于 < 2 μ m 的粘土沉积物)的平均组成参比值. 但目前在我国, 在研究河流颗粒物时, 大部分筛选粒径 < 63 μ m 或 < 50 μ m 的样品

表 1 丰水期鄱阳湖水体与底泥中重金属含量

Table 1 Content of heavy metals in the water and sediment in Poyang Lake in high water period

重金属	鄱阳饶河口		鄱阳湖龙口		星子渔民村		星子冬枯山		鄱阳湖南矶山	
	水体	底泥	水体	底泥	水体	底泥	水体	底泥	水体	底泥
	/mg·L ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·kg ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·kg ⁻¹
Cu	< 0.005	51.93	< 0.005	37.17	< 0.005	33.58	< 0.005	21.92	< 0.005	45.59
Zn	< 0.005	246.1	< 0.005	225.6	< 0.005	108.3	< 0.005	130.9	< 0.005	105.6
Pb	< 0.005	33.90	< 0.005	32.33	< 0.005	96.4	< 0.005	83.54	< 0.005	103.4
Cd	< 0.001	3.067	< 0.001	2.522	< 0.001	0.234	< 0.001	0.525	< 0.001	0.413

表 2 地累积指数 I_{geo} 与污染程度分级

Table 2 Index of Geoaccumulation and series of degree

I_{geo}	< 0	0~ 1	> 1~ 2	> 2~ 3	> 3~ 4	> 4~ 5	> 5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无~ 中	中	中~ 强	强	强~ 极强	极强

进行研究,这样,以粒径< 2 μm 的页岩组成作为参比值将使得计算出的重金属污染水平等级降低^[21].一般来说,采用所研究的河流的实际颗粒物的平均元素组成作为地累积指数评价法的背景值是最合适的^[22].所以本文采用鄱阳湖实际地球化学背景值^[20]作为参照标准,见表 3.

3.2.2 底泥中重金属的测定值、地累积指数及其

分级

各采样点底泥中重金属的测定值、地累积指数以及指数分级见表 4.

表 3 鄱阳湖重金属元素背景值/mg·kg⁻¹

Table 3 The background level of heavy metals in Poyang Lake/mg·kg⁻¹

元素	Cu	Zn	Pb	Cd
背景值	4.75	45.75	12.50	0.75

表 4 各样点丰水、枯水期底泥中重金属元素含量、地累积指数及指数分级/mg·kg⁻¹

Table 4 Content of heavy metals I_{geo} and Series of I_{geo} in high water and low water periods in each sampling site /mg·kg⁻¹

采样点	采样时间/ 年-月-日	Cu			Zn			Pb			Cd		
		含量	I_{geo}	分级	含量	I_{geo}	分级	含量	I_{geo}	分级	含量	I_{geo}	分级
鄱阳饶河口	2003-07-08	51.93	2.87	3	246.1	1.84	2	33.90	0.85	1	3.067	1.45	2
鄱阳饶河口	2003-10-15	67.98	3.25	4	270.4	1.98	2	86.11	2.20	3	4.312	1.94	2
鄱阳湖龙口	2003-07-23	37.17	2.38	3	225.6	1.72	2	32.33	0.79	1	2.522	1.16	2
鄱阳湖龙口	2003-10-23	68.62	3.27	4	261.9	1.93	2	95.63	2.35	3	3.142	1.48	2
星子渔民村	2003-07-10	33.58	2.24	3	108.3	0.66	1	96.4	2.36	3	0.234 - 2.26		0
星子渔民村	2003-10-12	30.53	2.10	3	121.9	0.83	1	112.1	2.58	3	0.289 - 1.96		0
星子冬枯山	2003-07-10	21.92	1.62	2	130.9	0.93	1	83.54	2.16	3	0.525 - 1.10		0
星子冬枯山	2003-10-12	34.51	2.28	3	190.6	1.47	2	89.6	2.26	3	0.586 - 0.94		0
南矶山	2003-07-12	45.59	2.68	3	105.6	0.62	1	103.4	2.46	3	0.413 - 1.45		0
南矶山	2003-10-13	42.89	2.59	3	108.5	0.66	1	106.5	2.51	3	0.450 - 1.32		0

3.2.3 地累积指数方法评价结果

底泥中重金属在地区分布上差异较大,鄱阳饶河河床底泥和鄱阳湖龙口湖床底泥中重金属的地累积指数相比较其他几个采样点来说要相对高一些.

底泥中重金属在时间分布上也有很大差异,枯水期各样点各元素的地累积指数要普遍高于丰水期.这可能与丰水期河流冲积过快,造成底泥中泥沙含量过高,使得底泥中测出的重金属含量偏低,而枯水期各河水水流平稳,各采样点底泥中含沙量小,底泥中测出的重金属含量普遍偏高.

总的来说,Cu、Pb 的地累积指数在 4 个元素中较突出,在丰水期,除了星子冬枯山湖床底泥中 Cu 的地累积指数为 2,属中度污染之外,其余均达到 3,为中度到强度污染;在枯水期,鄱阳饶河河床底泥和鄱阳湖龙口河床底泥中 Cu 的地累积指数均为 4,已经达到了强污染等级;Pb 的地累积指数除了鄱阳饶河河床底泥和鄱阳湖龙口湖床底泥为 1,基本没有 Pb 污染外,其余各采样点的 Pb 污染地累积指数均为 3,属于中度接近强度污染.

从总体的污染程度分析,各污染物的污染程度

大小排列次序为: Cu> Pb> Zn> Cd. 这与文献[8] 中用单因子及综合污染指数评价得到的结果是一致的.

3.3 重金属的潜在生态危害评价

3.3.1 潜在生态风险评价方法

瑞典学者 Hakanson 1980 年提出了沉积物潜在生态危害评价方法^[19], 计算公式如(2) 式:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{c^i}{c_n^i} \quad (2)$$

式中, RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; $c_f^i = \frac{c^i}{c_n^i}$ 为单因子污染物污染参数; c^i 为实测值 ($\times 10^{-6}$), c_n^i 为参比值, 参比值采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数, 反映其毒性水平和生物对其污染的敏感

程度; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数. 各种重金属的参比值 c_n^i 和毒性系数 T_r^i 的值见表 5.

表 5 重金属的参比值(c_n^i)和毒性系数(T_r^i)

Table 5 c_n^i and T_r^i of the heavy metal

元素	Cu	Zn	Pb	Cd
c_n^i	30	80	25	0.50
T_r^i	5	1	5	30

3.3.2 参数计算

将表 5 数据代入(2) 式中, 可得各采样点潜在风险参数和风险指数以及各单因子污染参数 c_f^i . 结果见表 6; 多因子污染物污染程度 C_d 、单因子污染物污染参数 c_f^i 、潜在生态风险参数 E_r^i 和潜在生态风险指数 RI 值相对应的污染程度以及总潜在生态风险程度如表 7 所示.

表 6 各采样点位潜在风险指数及单因子污染参数

Table 6 Index of potential risk and single factor pollution parameter in each sampling site

采样点	采样时间/ 年-月-日	Cu		Zn		Pb		Cd		RI	C_d
		E_r^i (Cu)	c_f^i	E_r^i (Zn)	c_f^i	E_r^i (Pb)	c_f^i	E_r^i (Cd)	c_f^i		
鄱阳饶河口	2003-07-08	8.655	1.73	3.076	3.08	6.78	1.36	184.02	6.13	202.531	12.297
鄱阳饶河口	2003-10-15	11.33	2.27	3.38	3.38	17.222	3.44	258.72	8.62	290.652	17.714
鄱阳湖龙口	2003-07-23	6.195	1.24	2.82	2.82	6.466	1.29	151.32	5.04	166.801	10.396
鄱阳湖龙口	2003-10-23	11.437	2.29	3.274	3.27	19.126	3.83	188.52	6.28	222.356	15.670
星子渔民村	2003-07-10	5.597	1.12	1.354	1.35	19.28	3.86	14.04	0.47	40.270	6.797
星子渔民村	2003-10-12	5.088	1.02	1.524	1.52	22.42	4.48	17.34	0.58	46.372	7.603
星子冬枯山	2003-07-10	3.653	0.73	1.636	1.64	16.708	3.34	31.5	1.05	53.498	6.759
星子冬枯山	2003-10-12	5.752	1.15	2.383	2.38	17.92	3.58	35.16	1.17	61.214	8.289
南矶山	2003-07-12	7.598	1.52	1.32	1.32	20.68	4.14	24.78	0.83	54.378	7.802
南矶山	2003-10-13	7.148	1.43	1.356	1.36	21.3	4.3	27	0.9	56.805	7.946

表 7 C_d 、 c_f^i 、 E_r^i 、 RI 值相对应的污染程度以及潜在生态风险程度

Table 7 C_d , c_f^i , E_r^i , RI , the corresponding pollution degree and potential ecological risk degree

污染参数 c_f^i 范围	单因子污染 物污染程度	多因子污染物污 染程度(C_d 范围)	总体污 染程度	潜在生态风险 参数 E_r^i	单因子污染物 生态风险程度	潜在生态风险 指数 RI 范围	总潜在生态 风险程度
$c_f^i < 1$	低度	$C_d < 8$	低度	$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低度
$1 \leq c_f^i < 3$	中度	$8 \leq C_d < 16$	中度	$40 \leq E_r^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中度
$3 \leq c_f^i < 6$	重度	$16 \leq C_d < 32$	重度	$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重度
$c_f^i \geq 6$	严重	$C_d \geq 32$	严重	$160 \leq E_r^i < 320$ $E_r^i \geq 320$	重 严重	$RI \geq 600$	严重

3.3.3 潜在生态风险评价结果

从各采样点总的污染程度 C_d 值来看, 只有枯水期鄱阳饶河河床底泥的污染程度 > 16 , 说明它的污染程度为重度污染, 鄱阳湖龙口湖床底泥的污染程度非常接近于 16, 说明它的污染程度也属于重度污染, 这与地积累指数法评价结果一致. 而且污染程度 C_d 值始终是枯水期大于丰水期, 这也与地积累指数评价结果相符.

具体分析单因子 c_f^i , 不论是在枯水期还是丰水期, 鄱阳饶河河床底泥和鄱阳湖龙口湖床底泥的 Cd 污染都达到了重度和严重程度. Pb 污染在鄱阳饶河和鄱阳湖龙口两个采样点的丰水期为中度污染, 在枯水期为重度污染, 其余各采样点不论丰水期还是枯水期均达到了重度污染. Zn 除了在鄱阳饶河和鄱阳湖龙口之处为重度污染外, 其余各样点均为中度污染. Cu 大部分属于中度污染, 个别属于低度污染.

分析总的潜在生态风险 RI , 只有鄱阳饶河和鄱阳湖龙口的 $RI > 150$, 达到中度污染, 其余均为低度生态风险。

鄱阳湖各采样点总体污染程度分析, 各污染物对鄱阳湖生态风险构成危害的影响程度排列次序为: $Cd > Pb > Zn > Cu$ 。

4 结论

(1) 从总体污染程度分析, 各污染物的污染程度大小排列次序为: $Cu > Pb > Zn > Cd$ 。

(2) 从各采样点潜在生态污染程度分析, 各污染物对鄱阳湖生态风险构成危害的影响程度排列次序为: $Cd > Pb > Zn > Cu$ 。

(3) 各采样点污染程度排序为: 鄱阳饶河 > 鄱阳湖龙口 > 鄱阳湖南矶山 > 星子冬枯山 > 星子渔民村。

(4) 污染程度始终是枯水期大于丰水期。

(5) 对达到或接近强度污染湖区应引起重视, 加强检测; 对确定的污染源应采取治理措施, 以免污染进一步扩大危及其它湖区。

参考文献:

- [1] Forstner U, Wittmann G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979, 110~ 192.
- [2] Barlas N, Akbulut N, Avdoqan M. Assessment of heavy metal residues in the sediment and water samples of Uluabat Lake[J]. Bull. Environ. Toxicol., 2005, **74**: 286~ 293.
- [3] Doyle C J, pablo F, Lim R P, et al. Assessment of metal toxicity in sediment pore water from lake Macquarie[J]. Areg. Environ. Contam. Toxicol., 2003, **44**: 343~ 350.
- [4] 贾振邦. 柴河沉积物中重金属的聚类分析研究[J]. 环境科技, 1993, **17**(4): 41~ 44.
- [5] 贾振邦, 汪安, 吴平. 用脸谱图对太子河本溪市段河流沉积物中重金属污染进行评价的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1993, **29**(6): 736~ 744.
- [6] 贾振邦, 周华, 张宝权, 等. 应用地累积指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, **36**(4): 525~ 530.
- [7] 贾振邦, 于澎涛. 应用回归过量分析法评价太子河沉积物中重金属污染的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1995, **31**(4): 451~ 459.
- [8] 简敏菲, 弓晓峰, 游海, 等. 鄱阳湖水环境及其水生维管束植物重金属污染的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(6): 589~ 593.
- [9] 简敏菲, 弓晓峰, 游海, 等. 水生植物对铜、铅、锌等重金属元素富集作用的评价研究[J]. 南昌大学学报, 2004, **26**(1): 85~ 88.
- [10] 简敏菲, 弓晓峰, 游海. 鄱阳湖流域重金属污染对湖区湿地生态功能的影响及防治对策[J]. 江西科学, 2003, **21**(3): 230~ 234.
- [11] 吕兰军. 鄱阳湖重金属污染现状调查与分析[J]. 人民长江, 1994, **25**(4): 32~ 38.
- [12] 吕兰军. 鄱阳湖水及其沉积物中的重金属调查[J]. 上海环境科学, 1994, **13**(5): 17~ 26.
- [13] 简敏菲. 鄱阳湖湿地水生植物重金属污染的监测与评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2004.
- [14] 何孟常, 王子健, 汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 7~ 10.
- [15] 何孟常, 王子健. 利用综合评价方法和模型评价乐安江水体重金属污染[J]. 生态学报, 2002, **22**(1): 36~ 39.
- [16] 刘文新, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 I. C-B-T 质量三合一方法 (Triad) [J]. 环境科学学报, 1999, **19**(2): 120~ 126.
- [17] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 II. 相平衡分配方法 (Eqp) [J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 230~ 235.
- [18] Forstner U. Lecture Notes in Earth Sciences (Contaminated Sediments) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989, 107~ 109.
- [19] Lars Hakanson. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control A Sediment logical Approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975~ 986.
- [20] 鄱阳湖研究编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [21] 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, **17**(1): 81~ 87.
- [22] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响 [J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(2): 7~ 9.