

北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价

许振成, 杨晓云*, 温勇, 陈桂华, 方建德

(环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 为全面了解北江中上游底泥沉积物中重金属含量及其潜在生态危害程度, 在北江干流及支流共采集了 25 个底泥样品, 测试了 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr、As、Hg 共 8 种重金属元素, 采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对北江中上游底泥重金属污染进行分析和评价。结果表明, 北江中上游无论是干流还是支流其底泥受多种重金属污染而且污染程度相当严重, 各种重金属的污染程度由强至弱依次为: $Cd > Hg > Zn > As > Pb \approx Cu > Ni > Cr$; 金属污染物对北江中上游构成的潜在生态危害由强至弱依次为: $Cd > Hg > Pb \approx As > Cu > Zn > Cr$, 其中 Cd 的影响占绝对主导地位。总体而言, 北江干流由于纳污量最大, 长期的积累使得北江干流段的重金属污染程度较支流严重; 支流中马坝河的污染程度最高, 其次是浈江和江。

关键词: 底泥; 重金属污染; 北江; 地积累指数; 潜在生态危害指数

中图分类号: X502; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3262-07

Evaluation of the Heavy Metals Contamination and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Beijiang River's Upper and Middle Reaches

XU Zhen-cheng, YANG Xiao-yun, WEN Yong, CHEN Gui-hua, FANG Jian-de

(South China Institute for Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: In order to find out the heavy metals concentrations and their potential ecological risks of the sediments in Beijiang river's upper and middle reaches, 25 sediments specimens were sampled from both the trunk stream and tributaries for analyzing Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, As and Hg. The Index of Geoaccumulation and the Potential Ecological Risk Index were then employed to evaluate the pollution degree of heavy metals in the sediments. The results indicate that the sediments in Beijiang River have been severely contaminated by many heavy metals. The descending order of pollution degree of various metals is: $Cd > Hg > Zn > As > Pb \approx Cu > Ni > Cr$; and similarly the potential ecological risk intensity caused by different metals is: $Cd > Hg > Pb \approx As > Cu > Zn > Cr$, and Cd is the predominant element among them. In general, because the trunk stream receives huge waste discharge, the pollution degree of heavy metals is stronger in the trunk stream than that in the tributaries due to long time accumulation. The Maba River is the worst polluted among the tributaries, and the Zhengshui River and Wongjiang River are next to it.

Key words: sediments; heavy metals contamination; Beijiang River; Index of Geoaccumulation; Potential Ecological Risk Index

东江、西江、北江是珠江的三大支流, 其中北江是粤北地区的主要供水水源, 也是污染物主要受纳水体。北江中上游主要支流有武江、浈江、南水河、江、连江、江等, 流域面积 38 363 km², 涉及的行政区域主要是韶关市和清远市。

粤北地区拥有丰富的矿产资源, 有色冶金企业较多, 其中既有国有大型特大型企业, 也有私营甚至非法的小采矿和小冶炼。凡口铅锌矿和韶关冶炼厂是我国第一大乃至亚洲最大的铅锌矿生产基地, 其矿石还富含银、汞、镉、锗、镓等伴生稀贵金属; 韶钢松山集团则是目前广东省最大的钢铁生产基地。大型企业都会处理其产生的废水, 但都存在处理不彻底的问题; 而多数中小型或私营企业产生的废水往往只经简单的沉淀甚至不经任何处理就直接排入河流^[1]。北江支流江和浈江均曾发生较严重的水污染事故, 造成大量鱼虾死亡; 2005 年 12 月因韶关冶炼厂的废水事故排放造成北江清远段饮用水源 Cd

污染, 一度迫使水厂停止供水, 造成严重的社会影响。

国内外的大量研究表明, 在受重金属污染的水体中, 水相中重金属的含量往往甚微, 而且随机性很大, 常随排放状况与条件不同而变化, 其分布往往毫无规律。通过各种途径排入水体的重金属污染物由于不易降解, 逐步转移沉积至底泥中, 因此底泥中重金属含量比水相高得多, 具有极强的累积作用, 并表现出一定的规律性, 是水环境重金属的指示剂^[2,3]。随着上覆水体环境条件的变化, 吸附在底泥沉积物上的重金属可能被释放再次进入水体^[4~7]。因此, 底泥的污染状况是全面衡量水环境质量状况的重要

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-02-23

基金项目: 广东省科技计划项目(2006B36801004); 广东省环保资金项目(20070202043)

作者简介: 许振成(1953~), 男, 研究员, 主要研究方向为区域、流域污染控制与环境规划, E-mail: xzc@scies.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: xy.yang@scies.com.cn

表1 北江底泥重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Concentrations of heavy metals in the sediments of Beijiang River/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

编号	采样点位置	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	As	Hg
101	韶关南郊	104.0	239.0	932.6	46.7	33.8	73.1	119.1	1.93
102	韶冶排放口	187.5	1 759.5	4 306.7	185.4	35.7	61.8	341.9	7.63
103	曲江孟洲坝	14.8	60.0	279.4	3.50	6.4	29.1	11.9	0.30
104	曲江白沙	101.3	267.1	587.6	7.19	29.8	66.5	93.8	1.20
105	曲江大坑口	43.5	148.3	559.6	18.8	14.4	51.6	61.8	0.83
106	英德沙口	158.8	621.7	1 741.2	53.6	28.7	126.1	188.9	2.09
107	英德冬瓜铺	102.4	275.2	1 260.5	59.8	33.3	96.3	121.4	1.15
108	英德英红茶场	57.4	236.5	977.3	8.81	20.6	44.6	122.6	0.59
109	英德洋塘	58.4	131.9	740.6	27.5	13.4	46.5	90.1	0.64
110	英德冷水坑	20.4	62.9	126.0	1.63	9.9	37.6	18.3	0.39
111	英德连江口	48.7	142.2	1 111.1	24.8	19.3	55.7	60.2	0.63
112	英德黎溪	22.5	75.5	418.0	3.96	14.7	31.9	22.5	0.26
113	英德上坑	23.0	73.8	398.7	6.25	10.8	35.8	19.4	0.31
114	清新白鹤汛	17.4	62.1	231.7	3.72	5.6	30.6	12.5	0.24
115	清远洲心	7.7	40.0	61.0	1.65	6.6	19.0	7.21	0.28
116	清远石角镇	2 976.4	342.5	1 794.8	13.7	249.8	1 637.6	24.2	0.23
201	武江	76.6	168.1	364.4	2.62	23.6	141.9	40.9	0.33
202	浈江	418.4	206.2	437.6	4.02	19.0	59.4	67.5	0.78
203	南水河	24.0	148.8	346.1	2.95	20.3	302.5	37.5	0.25
204	马坝河	380.6	1 152.5	3 484.3	99.1	20.0	107.2	897.4	1.08
205	江	89.4	103.2	935.2	5.95	42.2	61.6	26.4	0.63
206	连江	59.8	174.1	299.7	1.26	23.0	53.9	21.3	0.41
207	江	90.4	97.7	668.3	3.44	32.8	46.5	16.0	0.35
208	滨江	18.4	43.4	85.5	0.99	12.6	30.0	46.0	0.17
209	龙塘河	20.7	37.3	65.7	0.67	7.9	30.9	5.37	0.20
	广东省土壤背景值 ^[9]	12.1	32.0	42.7	0.026	11.2	40.9	7.3	0.041

与其地球化学背景值的关系来确定重金属的污染程度的定量指标. 该法比较直观地反映了外源重金属在沉积物中的富集程度, 数据具有较高的可比性. 其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)] \quad (1)$$

式中, C_i 为沉积物中某一重金属的实测含量; B_i 为

参比值即当地母质母岩中该元素的地球化学背景值; 常数 1.5 时考虑到造岩运动可能引起的背景值变动而取的系数.

根据 I_{geo} 值的计算结果, 重金属的污染程度共分为 7 级(0~ 6 级)^[18], I_{geo} 值与污染程度的对应关系见表 2.

表2 地积累指数与污染程度分级
Table 2 Index of geoaccumulation and classification of pollution 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~ 中度	中度	中~ 强度	强度	强~ 极强	极强

参比值的选择是计算 I_{geo} 值的关键, 不同的参比体系会对计算结果造成较大的差异. 本研究采用全国土壤环境背景值调查成果中, 广东省土壤背景值的几何均值作为参比值^[9]. 北江中上游底泥中 8 种重金属的地积累指数及分级如表 3. 为了比较每个采样点的重金属综合污染程度, 本研究采用了均方根综合指数进行分析.

样点的 Cu、Pb 的 I_{geo} 值在 3~ 6 级, 均已达到强至极强污染程度. 对于 Cd, 无论是北江干流还是支流, 其 I_{geo} 值都在 5~ 6 级, 达到极强污染程度, 是污染最严重的元素. Ni 和 Cr 则除个别采样点外, 其污染水平基本上在无~ 中等程度之间, 即 I_{geo} 值在 0~ 2 级, 是污染程度较轻的元素. 对于 As, 约一半采样点的污染程度在中等以下. 所有采样点均受到了中等程度以上的 Hg 污染, 而且绝大多数采样点达到强~ 极

强程度的污染.

综合分析上述重金属的地积累指数分级, 可以看出, 北江中上游底泥中各种重金属的污染程度由强至弱依次为: $Cd \gg Hg > Zn > As > Pb \approx Cu > Ni > Cr$.

从地域分布来看, 北江干流从上游到下游, 污染物的分布差异较大而且没有明显规律. 韶关冶炼厂产生的铅锌矿冶炼废水主要污染物是 Cd 、 Hg , 其排放口所在河段(102)的底泥综合污染均方根指数最高, 毋庸置疑是重金属污染程度最严重的; 其次是曲江沙口(106)和石角镇(116). 其中清远石角镇采样

点底泥中 Cu 、 Ni 、 Cr 的污染程度显著高于其它河段, 究其原因可能是所在河段有电路板厂、电镀厂的废水超标排放所致.

9 条主要支流中, 马坝河的综合污染指数最高, 仅仅略低于韶冶排放口, 原因是马坝河是韶冶马坝分厂和韶钢集团的污水直接接纳水体. 浈江和江的综合污染程度次之, 位于调查流域下游的滨江和龙塘河的污染水平最轻. 由于本次调查仅在各支流汇入北江干流前采集了 1 个样品, 对于各支流全河段的重金属污染程度还需进行更加全面的调查.

表 3 底泥重金属污染地积累指数 I_{geo} 及分级
Table 3 Index of geoaccumulation and classification of heavy metals pollution of the sediments

编号	采样点位置	Cu		Pb		Zn		Cd		Ni		Cr		As		Hg		均方根 指数
		I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	I_{geo}	级数	
101	韶关南郊	2.5	3	2.3	3	3.9	4	10.2	6	1.0	1	0.3	1	3.4	4	5.0	5	4.59
102	韶冶排放口	3.4	4	5.2	6	6.1	6	12.2	6	1.1	2	0.0	0	5.0	5	7.0	6	6.11
103	曲江孟洲坝	-0.3	0	0.3	1	2.1	3	6.5	6	-1.4	0	-1.1	0	0.1	1	2.3	3	2.55
104	曲江白沙	2.5	3	2.5	3	3.2	4	7.5	6	0.8	1	0.1	1	3.1	4	4.3	4	3.67
105	曲江大坑口	1.3	2	1.6	2	3.1	4	8.9	6	-0.2	0	-0.2	0	2.5	3	3.8	4	3.77
106	英德沙口	3.1	4	3.7	4	4.8	5	10.4	6	0.8	1	1.0	1	4.1	5	5.1	6	4.99
107	英德冬瓜铺	2.5	3	2.5	3	4.3	5	10.6	6	1.0	1	0.7	1	3.5	4	4.2	5	4.67
108	英德英红茶场	1.7	2	2.3	3	3.9	4	7.8	6	0.3	1	-0.5	0	3.5	4	3.3	4	3.67
109	英德洋塘	1.7	2	1.5	2	3.5	4	9.5	6	-0.3	0	-0.4	0	3.0	3	3.4	4	4.00
110	英德冷水坑	0.2	1	0.4	1	1.0	1	5.4	6	-0.8	0	-0.7	0	0.7	1	2.7	3	2.18
111	英德连江口	1.4	2	1.6	2	4.1	5	9.3	6	0.2	1	-0.1	0	2.5	3	3.4	4	3.96
112	英德黎溪	0.3	1	0.7	1	2.7	3	6.7	6	-0.2	0	-0.9	0	1.0	1	2.1	3	2.69
113	英德上坑	0.3	1	0.6	1	2.6	3	7.3	6	-0.6	0	-0.8	0	0.8	1	2.3	3	2.90
114	清新白鹤汛	-0.1	0	0.4	1	1.9	2	6.6	6	-1.6	0	-1.0	0	0.2	1	2.0	2	2.52
115	清远洲心	-1.2	0	-0.3	0	-0.1	0	5.4	6	-1.3	0	-1.7	0	-0.6	0	2.2	3	2.06
116	清远石角镇	7.4	6	2.8	3	4.8	5	8.5	6	3.9	4	4.7	5	1.1	2	1.9	2	4.99
	均值	1.7		1.8		3.2		8.3		0.2		0.0		2.1		3.4		
201	武江	2.1	3	1.8	2	2.5	3	6.1	6	0.5	1	1.2	2	1.9	2	2.4	3	2.78
202	浈江	4.5	5	2.1	3	2.8	3	6.7	6	0.2	1	0.0	0	2.6	3	3.7	4	3.49
203	南水河	0.4	1	1.6	2	2.4	3	6.2	6	0.3	1	2.3	3	1.8	2	2.0	2	2.75
204	马坝河	4.4	5	4.6	5	5.8	6	11.3	6	0.3	1	0.8	1	6.4	6	4.1	5	5.70
205	江	2.3	3	1.1	2	3.9	4	7.3	6	1.3	2	0.0	0	1.3	2	3.4	4	3.33
206	连江	1.7	2	1.9	2	2.2	3	5.0	5	0.5	1	-0.2	0	1.0	1	2.7	3	2.37
207	江	2.3	3	1.0	1	3.4	4	6.5	6	1.0	1	-0.4	0	0.5	1	2.5	3	2.90
208	滨江	0.0	0	-0.1	0	0.4	1	4.7	5	-0.4	0	-1.0	0	2.1	3	1.5	2	1.88
209	龙塘河	0.2	1	-0.4	0	0.0	0	4.1	5	-1.1	0	-1.0	0	-1.0	0	1.7	2	1.57
	均值	2.0		1.5		2.6		6.4		0.3		0.2		1.8		2.7		

2.3 底泥重金属污染的潜在生态危害评价

对于沉积物重金属的生态危害评价, 瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态危害指数法 (risk index, RI)^[19], 是目前较多学者采用的方法^[17, 20-23]. 该方法利用沉积物中重金属相对于工业

化以前沉积物的最高背景值的比值及重金属的生物毒性系数进行加权求和得到生态危害指数. 指数反映了 4 个方面的情况: ①沉积物重金属的浓度效应, 即 RI 值随重金属污染程度的加重而增加; ②多种重金属污染物的协同效应, 即沉积物中重金属的生态

危害具有加和性,多种重金属的污染具有更高的潜在生态风险;③不同重金属的毒性效应和④水体对不同重金属污染物的敏感性,即生物毒性强和敏感性大的金属具有较高的权重值.潜在生态危害指数RI的计算方法如下:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i (C_s^i / C_n^i) \tag{2}$$

式中, C_s^i 为表层沉积物中重金属 i 的实测含量; C_n^i 为重金属 i 的参比值,采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值; T_i 为重金属 i 的毒性系数,此值反映了该种重金属的毒性水平及水体对其污染的敏感性; E_i 为重金属 i 的潜在生态危害系数.

Hakanson 认为 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As、Hg 的生态风险最大,将这 7 种金属作为优先考虑对象,并根据大量数据分析,提出了重金属的生物毒性系数、参比值和评价标准(见表 4,表 5)^[19, 24].

表 4 重金属的参比值 C_n 和生物毒性系数 T_i

Table 4 References C_n and toxic coefficient T_i of different heavy metals

元素	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg
C_n	30	25	80	0.5	60	15	0.25
T_i	5	5	1	30	2	10	40

表 5 生态危害系数、指数与危害程度分级

Table 5 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

E_i	RI	生态危害程度
< 40	< 150	轻微
40~ 80	150~ 300	中等
80~ 160	300~ 600	强
160~ 320	≥600	很强
≥320		极强

经计算,北江中上游底泥中 7 种金属的潜在生态危害系数(E_i)和潜在生态危害综合指数(RI)如表 6 所示.

表 6 北江底泥重金属生态危害评价指数

Table 6 Risk index of heavy metals in the sediments of Beijiang River

编号	采样点位置	E_i							RI
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg	
101	韶关南郊	17.3	47.8	11.7	2 802.0	2.4	79.4	308.3	3 268.8
102	韶冶排放口	31.2	351.9	53.8	11 124.2	2.1	227.9	1 220.0	13 020.
103	曲江孟洲坝	2.5	12.0	3.5	210.1	1.0	7.9	48.4	285.4
104	曲江白沙	16.9	53.4	7.3	431.4	2.2	62.5	191.2	765.0
105	曲江大坑口	7.3	29.7	7.0	1 127.8	1.7	41.2	132.7	1 347.3
106	英德沙口	26.5	124.3	21.8	3 214.5	4.2	125.9	334.1	3 851.3
107	英德冬瓜铺	17.1	55.0	15.8	3 589.5	3.2	80.9	183.7	3 945.3
108	英德英红茶场	9.6	47.3	12.2	528.5	1.5	81.7	94.2	775.0
109	英德洋塘	9.7	26.4	9.3	1 652.7	1.5	60.0	103.1	1 862.7
110	英德冷水坑	3.4	12.6	1.6	98.0	1.3	12.2	62.9	191.9
111	英德连江口	8.1	28.4	13.9	1 489.9	1.9	40.1	101.4	1 683.7
112	英德黎溪	3.7	15.1	5.2	237.4	1.1	15.0	42.0	319.5
113	英德上坑	3.8	14.8	5.0	375.0	1.2	12.9	49.7	462.4
114	清新白鹤汛	2.9	12.4	2.9	223.1	1.0	8.3	38.6	289.3
115	清远洲心	1.3	8.0	0.8	98.8	0.6	4.8	44.2	158.5
116	清远石角镇	496.1	68.5	22.4	820.6	54.6	16.1	36.8	1 515.1
	均值	41.1	56.7	12.1	1 751.5	5.1	54.8	186.9	
201	武江	12.8	33.6	4.6	157.4	4.7	27.2	53.2	293.5
202	浈江	69.7	41.2	5.5	241.0	2.0	45.0	125.3	529.8
203	南水河	4.0	29.8	4.3	176.8	10.1	25.0	40.0	290.0
204	马坝河	63.4	230.5	43.6	5 945.9	3.6	598.3	173.2	7 058.4
205	江	14.9	20.6	11.7	357.2	2.1	17.6	100.5	5245
206	连江	10.0	34.8	3.7	75.4	1.8	14.2	65.0	204.9
207	江	15.1	19.5	8.4	206.4	1.6	10.7	56.0	317.6
208	滨江	3.1	8.7	1.1	59.3	1.0	30.7	27.4	131.2
209	龙塘河	3.5	7.5	0.8	40.1	1.0	3.6	32.7	89.2
	均值	21.4	46.5	9.2	802.2	3.0	85.4	71.2	

对照表 5 中的评价标准可以看出, 除个别采样点外 Cd 的生态危害系数都超过了 160, 平均值为 1 715.5, 达到极强危害. 干流上游段(101~111), Hg 的生态危害系数大多在 80 以上, 达到强度危害, 而黎溪(112)以下河段 Hg 的生态危害在轻微到中等之间; 支流中马坝河、浈江、江 Hg 的生态危害属强度, 其余在轻微到中等危害. 对于 Pb 和 As, 除韶冶(102)、沙口(105)以及马坝河的生态危害达到强度, 其余河段和支流的 Pb、As 生态危害基本在中度以下. 石角镇(116)可能受特殊污染源的影响, Cu 的生态危害竟达到极强程度, 显著高于其它河段. 除此外 Cu 的生态危害系数大多小于 40, 属轻微危害. 对于 Zn 和 Cr, 除个别采样点外其生态危害系数基本上都低于 40, 属轻微危害, 虽然 Zn 的地积累指数 I_{geo} 值很高, 但其生物毒性系数低, 因此 Zn 的污染造成的生态危害并不大.

根据 Hakanson 生态危害系数, 北江底泥中 7 种重金属的潜在生态危害由强至弱的顺序为: Cd $\gg$ Hg $>$ Pb $\approx$ As $>$ Cu $>$ Zn $>$ Cr, 其中 Cd 对 RI 值的贡献最突出, 其次是 Hg.

从表 6 中的综合指数 RI 值来看, 在地域分布上, 干流清远洲心段(115)以及支流中滨江和龙塘河属于轻微生态危害; 干流的孟洲坝段(103)、英德冷水坑段(110)、清新白鹤汛段(114)以及支流中武江、南水河、连江属于中等生态危害; 其余河段及支流的生态危害都达到了强甚至极强程度. 总体而言, 由于北江干流纳污量最大, 长期的积累使得北江中上游干流段的重金属潜在生态危害明显高于除马坝河外的各支流.

3 评价结果比较与分析

根据地积累指数计算结果, 北江底泥的重金属污染程度依次为: Cd $\gg$ Hg $>$ Zn $>$ As $>$ Pb $\approx$ Cu $>$ Ni $>$ Cr, 而根据 Hakanson 生态危害系数, 其次序则为: Cd $\gg$ Hg $>$ Pb $\approx$ As $>$ Cu $>$ Zn $>$ Cr. 可见, Cd 和 Hg 都是污染情况最严重的, 但二者评价结果也有差异, 主要区别在 Pb、As 和 Zn. 这种现象并不偶然^[17, 25], 造成这种结果的原因主要有二: ①参比值体系的不同; ②重金属毒性系数的影响. 地积累指数的参比值(B_i)采用的是广东省土壤背景值, 而 Hakanson 生态风险指数的参比值(C_n^i)是通过数理统计和计算得出的最高背景值. Hakanson 提出的工业化以前最高背景值都高于广东省土壤背景值, 只有 Pb 除外, 广东省土壤 Pb 的背景值(32.0 mg/kg)要高于 Hakanson 的最高

背景值(25 mg/kg), 参比数值的不同会使得计算结果有所不同. 但造成评价结果有差异的主要因素是 Pb、As 和 Zn 的毒性系数有较大差别, Pb 具有一定的生物毒性效应($T_i = 5$)再加上参比数值的降低, 使其 RI 计算结果变大, 生态风险水平上升; As 则由于毒性较大具有较高的权重值($T_i = 10$), 因此其生态风险也随之上升; 反之, Zn 的生物毒性系数最低($T_i = 1$), 故其生态风险亦随之下降.

地积累指数法侧重于重金属含量与背景值的对比评价, 主要反映外源重金属的富集程度, 而 Hakanson 生态风险指数法除了考虑重金属的含量之外, 更考虑到了不同金属的生物毒性影响, 但其所用工业化以前最高背景值可能与不同地区的实际情况存在差异. 相比较而言, 后者的评价结果更准确.

4 结论

(1) 北江中上游干流及主要支流底泥受多种重金属污染而且污染程度相当严重, 各种重金属的污染程度由强至弱的次序为: Cd $\gg$ Hg $>$ Zn $>$ As $>$ Pb $\approx$ Cu $>$ Ni $>$ Cr.

(2) 各种重金属污染对北江中上游流域构成的潜在生态危害由强至弱依次为: Cd $\gg$ Hg $>$ Pb $\approx$ As $>$ Cu $>$ Zn $>$ Cr, 其中 Cd 的影响占绝对主导地位.

(3) 从综合污染程度分析, 北江中上游干流段的污染程度较支流(除马坝河外)严重; 支流中马坝河的污染程度最高, 其次是浈江和江.

(4) 北江中上游干流段及支流马坝河的底泥重金属污染严重, 河道疏浚淤泥不宜农用. 此外, 北江作为粤北地区的主要水源, 在饮用水源保护区应建立水质自动监测系统, 对可能发生的水质风险进行预警预报, 以保证饮用水源安全.

参考文献:

- [1] 尹善豪. 北江中上游水质污染现状、原因及对策探讨[J]. 广东水利水电, 2005, (2): 84-86.
- [2] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [3] 陈静生, 刘玉机. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [4] 范英宏, 林春野, 何孟常, 等. 大辽河水系表层沉积物中重金属的迁移特征及生物有效性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3469-3476.
- [5] 余光伟, 雷恒毅, 刘广立, 等. 重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(9): 1476-1484.
- [6] 方涛, 肖邦定, 张晓华, 等. 曝气对两种不同类型沉积物中重金属释放的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 355-359.

[7] 魏俊峰, 吴大清, 彭金莲, 等. 污染沉积物中重金属的释放及其动力学[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 127-130.

[8] 中国环境监测总站. 土壤元素近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[9] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[10] 符志友, 杨元根, 吴丰昌, 等. 铅锌矿区地表环境中重金属元素的时空动态变化及生物有效性探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(1): 89-97.

[11] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327-2330.

[12] 李航, 肖唐付, 双燕, 等. 云南金顶超大型铅锌矿区镉的水地球化学研究[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 633-637.

[13] M ller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geochemical Journal, 1969, 2: 108-118.

[14] 万金保, 王建永, 吴丹. 乐安河沉积物重金属污染现状评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(11): 130-133.

[15] 王天阳, 王国祥. 昆承湖沉积物中重金属及营养元素的污染特征[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 51-58.

[16] 张跃军, 孙彬, 赵晓蕾. 乡村内河沉积物中的重金属污染评价及资源化利用[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1398-1402.

[17] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732-736.

[18] Hrstner U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives and criteria development in Germany [J]. Water Science and Technology, 1993, 28(8): 307-314.

[19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[20] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1153-1162.

[21] 王立明, 林超, 刘德文. 南水北调东线一期工程黄河以北段底泥重金属污染及其生态危害评价[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(3): 5-8.

[22] 乔胜英, 蒋敬业, 向武, 等. 武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 353-357.

[23] 汤莉莉, 牛生杰, 徐建强, 等. 外秦淮河疏浚后底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 424-430.

[24] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.

[25] 丁振华, 贾洪武, 刘彩娥, 等. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 64-66.