

# 东江沉积物重金属分布特征及污染评价<sup>\*</sup>

刘金铃<sup>1,2</sup> 冯新斌<sup>1,\*</sup> 朱伟<sup>1,2</sup> 李仲根<sup>1</sup> 尹润生<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; <sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 采用 ICP-MS对东江河流沉积物中的重金属进行分析,发现东江沉积物中 Cu、Zn、Cd、Hg等重金属呈现相同的变化特点,高值区和低值区基本一致。东江流域沉积物的重金属污染物主要是 Cu、Zn、Cd、Hg、Pb,其平均含量分别为 157.29、213.21、0.98、0.42、50.77 mg·kg<sup>-1</sup>,均高于中国大陆沉积物背景值。地累积指数法和 Hakanson潜在生态危害指数法对东江流域沉积物污染程度和生态危害程度的评价结果显示,东江沉积物中地累积指数从大到小的顺序为 Cd、Cu、Zn、Hg、Pb;从总的污染程度来看,东江沉积物中各重金属对生态风险影响程度从大到小的顺序为 Hg、Cd、Cu、Pb、Zn;从总的生态风险指数上看,整个东江流域除处于上游的河源市段生态风险低外,处于中游的惠州段生态风险为“较高”;处于下游的东莞段生态风险为“极高”。

**关键词** 东江; 沉积物; 地累积指数; Hakanson潜在生态危害指数

**中图分类号** X82 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)5-0981-06

Distribution characteristics and pollution assessments of heavy metals in Dongjiang river sediments. LU Jinling<sup>2</sup>, FENG Xinbin<sup>1,\*</sup>, ZHU Wei<sup>2</sup>, LI Zhonggen<sup>1</sup>, YIN Runsheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). Chinese Journal of Ecology 2011, 30(5): 981-986

**Abstract** Heavy metals in sediments from Dongjiang River were detected by ICP-MS. The results showed that the distribution characteristics of these heavy metals including Cu, Zn, Cd, Hg were similar and the sites with higher and lower value were approximately in accordance. Cu, Zn, Cd, Hg, Pb were the main heavy metal pollutants. The average contents of these heavy metals in the sediments were 157.29, 213.21, 0.98, 0.42, 50.77 mg·kg<sup>-1</sup> respectively, which exceeded the sediment background value in China. The degree of pollution was evaluated by the index of geoaccumulation and the index of the Hakanson ecological risk. The results showed that the geoaccumulation of the pollutants in Dongjiang River was in the order Cd, Cu, Zn, Hg, Pb, while the ecological risk degree of the pollutants was in the order Hg, Cd, Cu, Pb, Zn. On the whole, in Dongjiang River, the potential ecological risk of sediments from upstream (Heyuan) was at low level, middle stream (Huizhou) at relatively high level, and downstream (Dongguan) at very high level.

**Key words** Dongjiang River; sediment; geoaccumulation index; the index of Hakanson ecological risk

沉积物中的重金属由于累积作用往往比相应水体中的含量高,且表现出较明显的分布规律(周秀艳等, 2004; 贾振邦等, 2006)。同时,沉积物中的重金属污染,具有潜在的、长期的危害性,极有可能对

环境造成二次污染。沉积物可以反映水系状况,能明显地反映水体被重金属污染的程度,是水环境重金属的指示剂(Chapman, 1995; Ferreira et al., 1996; Marengo et al., 2006)。通过分析沉积物中重金属的含量和分布特征可以判断研究区受污染的程度和污染范围。

\*中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-01)资助。

\*\*通讯作者 E-mail: fengxinbin@vip.sj.cn

收稿日期: 2010-11-01; 接受日期: 2011-02-25

近 10 年来,随着珠江三角洲经济的迅速发展,

大量工厂(冶炼厂、电子零部件制造、纸厂、玩具厂等等)沿江建立,未经处理的工业废水和生活污水的直接排放,加上大气沉降、河流交通污染和矿产开采等,导致珠江流域重金属(如 Zn、Cu、Cr 和 Pb)污染状况加剧 (Ip et al., 2005; 2007)。作为我国南方大河珠江的一大支流,东江连接赣粤港三地,是香港特别行政区及广东省东部城市的主要饮水资源和后备供水水源地。东江全长 523 km,流域面积 25325 km<sup>2</sup>。在广东省境内涉及的行政区主要为河源、惠州、东莞和广州,隶属于珠江三角洲地区,仅在 2009 和 2010 年 2 年内,东莞市中堂镇一生产线路版的工厂平均每天大约 6 t 的含有重金属的废水排放到东江(东莞时报电子版, 2010)。然而,东江重金属污染状况尚缺乏全面详细的数据资料。本文研究了东江沉积物重金属的污染现状,并应用地累积指数法与 Hakanson 潜在生态危害指数法对其进行污染评价,旨在全面系统地了解整个东江流域的重金属污染状况,为东江流域乃至珠江流域的污染治理提供基础资料。

## 1 样品采集和分析

### 1.1 样品采集

于 2009 年 7 月在珠江水系东江流域分别采集从东江东莞至河源段的 53 个沉积物(0~10 cm)样品,采样点如图 1 所示。其中东江干流河源段(ZII 区)1 个沉积物样;惠州段(Z 区)7 个沉积物样;东莞段由于其流域为河网状,划分为 6 个区,包括 A 区(7 个)、B 区(5 个)、C 区(8 个)、D 区(8 个)、E I 区(8 个)和 EII 区(10 个)。沉积物样品冷冻干燥,

研磨,过 100 目尼龙筛,分析。

### 1.2 样品分析

沉积物样品的消解主要是参考中国科学院南京土壤研究所(1983)和 USEPA(1996)的方法。沉积物样品的预处理及测定如下:称取 0.2 g(精确到 0.0002)的沉积物样品于 100 mL 三角瓶中,加入 10 mL 王水,在电热板上加热煮沸至有机物剧烈反应,冷却后,再加 2 mL 超纯水和 30% 双氧水 3 mL 加热至冒白烟,沉积物呈灰白色或淡黄色。冷却,继续加入 30% 双氧水 1 mL, 195 °C ± 5 °C 加热约 2 h 直到样品无变化,冷却后加入超纯水定容至 100 mL 离心,取上清液。稀释后,加入内标 Rh 采用等离子体电感耦合质谱仪(ICP-MS 德国)测定样品中 Cu、Zn 和 Cd 的含量。直接用 Lumex RA915+ 汞分析仪(俄罗斯)测定沉积物样品汞含量。

质量控制:在分析东江沉积物的同时,我们采用相同的步骤同步分析了水系沉积物标准物质 GSD5(1980 中国地矿部物探所、测试所)的含量,用以检验和控制分析数据的质量。同时,每份样品取 3 个平行样,同时进行分。

### 1.3 数据处理

地质累积指数法(Geoaccumulation index)最早是由德国海德堡大学沉积物研究所的 Muller(1969)提出,是一种研究水体沉积物中重金属污染的定量指标,被广泛用于研究现代沉积物中重金属污染的评价,其计算公式为:

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

式中:  $I_{geo}$  为地质累积指数;  $C_n$  为元素  $n$  在沉积物中的实测含量;  $B_n$  为沉积物中该元素的地球化学背景



图 1 东江流域沉积物采样点分布示意图

Fig. 1. Distribution of sampling sites from Dongjiang River

值;  $k$ 为考虑成岩作用可能会引起背景值的变动而设定的系数(一般取值为 1.5)。根据  $I_{geo}$  数值的大小, 可以将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级(表 1)。

潜在生态风险指数评价法由瑞典学者 Hakanson(1980) 提出, 其计算公式如下:

$$C_i^i = C_i^j / C_n^i \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_i^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot C_i^i \quad (3)$$

式中:  $C_i^i$  为某一污染物的污染系数;  $C_i^j$  为表层沉积物污染物质量分数实测值;  $C_n^i$  为计算所需的参比值;  $T_r^i$  为沉积物中各污染物毒性响应系数;  $E_r^i$  为某单个污染物的潜在生态风险系数;  $R$  为潜在生态风险指数。  $E_r^i$  和  $R$  值相对应的污染程度及潜在生态风险程度见表 2。

## 2 结果与分析

### 2.1 东江流域沉积物中重金属含量分布

由表 3 可见, 从沿程变化幅度来看, Hg 的变异系数最大, Hg 含量的平均值为  $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 中值为  $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 远远超过中国大陆沉积物背景值和中国土壤环境背景值, 与中国《海洋沉积物质量标准》(GB 18668—2002) 相比, 53.8% 的样点中 Hg 含量超过沉积物环境质量一级标准, 22.6% 的样点中 Hg 含量超过沉积物环境质量二级标准。而从 Cu Zn Cd Pb 沿程分布的变化幅度来看, Cu 的变异系数较大, Zn Cd 次之, Pb 的变异系数较小。Cu 含量的平均值为  $157.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超过中国大陆沉积物背景值和中国土壤环境背景值和中国海洋沉积物

质量二级标准。Zn 的平均含量为  $213.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Cd 的平均含量为  $0.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均超过中国大陆沉积物背景值、中国土壤环境背景值以及中国海洋沉积物质量一级标准, 而 Pb 的平均含量为  $50.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 超过中国大陆沉积物背景值和土壤环境背景值, 低于中国海洋沉积物质量一级标准。其中, 采样点 E11 的 Zn 和 Cu 的含量均超过海洋沉积物质量一级标准。与李翠田等(2009) 在珠江口海域的研究资料相比, Cu Zn Cd Pb Hg 的平均含量分别是其对应值的 2.2、1.5、1.8、7.3、2.6 倍(表 3)。

Zn 和 Cu 最高值和最低值的比值分别是 57.1 和 15.7。Hg 的最高值与最低值之比是 100 Cd 的最高值与最低值之比为 12.8。而从各河段重金属含量的均值分布来看(图 2), Cu 的高值区集中在东

表 1 地积累指数分级与污染程度

Table 1 Value of  $I_{geo}$  and contamination degree of heavy metal

污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重	严重
级别	0	1	2	3	4	5	6
$I_{geo}$	$\leq 0$	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6

表 2  $E_r^i$  和  $R$  值相对应的污染程度及潜在生态风险程度

Table 2 The corresponding pollution degree and Potential ecological risk degree of  $E_r^i$  RI

$E_r^i$	单因子污染物生态危害程度	RI	总的潜在生态风险程度
<40	低	<150	低
40~80	中	150~300	中
80~160	较高	300~600	较高
160~320	高	$\geq 600$	极高
$\geq 320$	极高		

表 3 东江流域沉积物中重金属的含量

Table 3 Heavy metal concentrations in sediments from Dongjiang River

污染要素	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	来源
最大值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	705.70	633.55	2.28	88.98	2.00	本研究
最小值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	12.36	40.26	0.18	20.90	0.02	
中值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	113.17	190.26	0.89	48.06	0.22	
均值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	157.29	213.21	0.98	50.77	0.42	
标准差 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	133.41	115.84	0.47	17.91	0.49	
变异系数 (%)	84.82	54.33	48.41	35.28	117.21	
珠江口海域表层沉积物重金属含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	71	140	0.54	7	0.158	(李翠田等, 2009)
中国大陆沉积物背景值	20	66	0.1	25	0.03	(赵一阳和鄢明才, 1994)
中国土壤环境背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	22.60	74.20	0.10	26.00	0.07	(李健和郑春, 1989)
广东省土壤背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	13	36	0.04	29	0.06	(李健和郑春, 1989)
海洋沉积物标准 I 类	35.0	150.0	0.5	60.0	0.2	
海洋沉积物标准 II 类	100.0	350.0	1.5	130.0	0.5	
海洋沉积物标准 III 类	200.0	600.0	5.0	250.0	1.00	

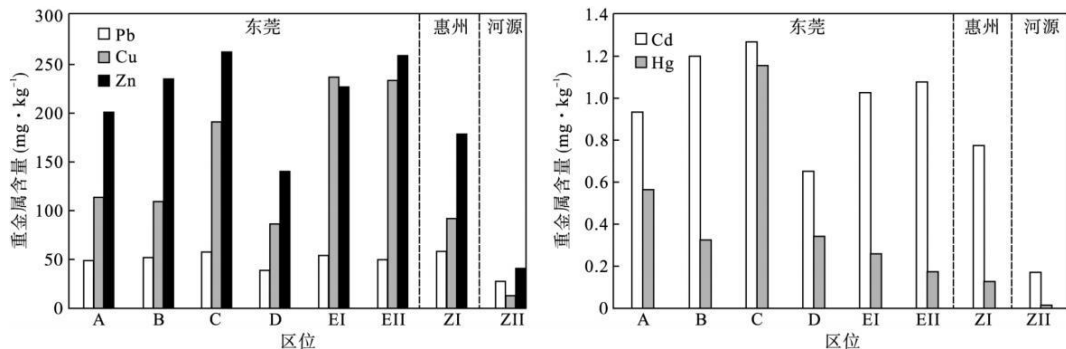


图 2 东江流域沉积物重金属含量分布  
Fig 2 Distribution of heavy metals in the sediments from Dongjiang River

莞段的 E I EI和 C区; Zn的高值区集中在东莞段 E I和 C区; Cd的高值区集中在东莞段的 C B A E I和 E区; 而 Hg的高值区集中在东莞段的 C区和 A区。Cu Zn Cd的高值区和低值区基本吻合。而在其他重金属含量都呈现高值的 E I和 E区, Hg的含量较低。

从沿程分布来看,上述 5 种重金属的分布基本呈现两种特征。Cu Zn Cd Hg等重金属呈现相同的变化特点,即均有几个高值区;而 Pb的含量分布无明显规律。总体特征是东莞段重金属含量高,河源段含量低,自上游河源段到下游东莞段,重金属污染呈现增加趋势。

2.2 表层沉积物中重金属含量之间的相关性

由表 4 可以看出,除了 Pb和 Hg之外,其他各元素之间均呈显著的正相关关系,这说明东江沉积物污染具有一定的同源性。特别是 Zn和 Cd Zn和 Cu Cd和 Cu的相关系数分别为 0.951、0.897、0.842 属于高度正相关,说明它们的来源和平面分布具有相似性,与牛红义等(2006)在珠江广州河段所得出的结论一致。

2.3 表层沉积物中重金属污染评价

2.3.1 地累积指数法评价 为了评估人类活动对东江表层沉积物重金属的影响,本文选取广东省土

表 5 东江各河段表层沉积物中重金属的地累积指数  
Table 5 Index of geoaccumulation in surface sediments from Dongjiang River

河段	区位 (采样点)	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
东莞	A(A1~A9)	2.5	1.9	4.0	2.7	0.2
	B(B1~B5)	2.5	2.1	4.3	1.9	0.3
	C(C1~C8)	3.3	2.3	4.4	3.7	0.4
	D(D1~D8)	2.1	1.4	3.5	1.9	-0.1
	E I(E1~E8)	3.6	2.1	4.1	1.6	0.3
	E II(E9~E19)	3.6	2.3	4.2	0.9	0.2
惠州	Z I(Z1~Z7)	2.2	1.7	3.7	0.5	0.4
河源	Z II(Z14)	-0.7	-0.4	1.6	-2.6	-0.7
平均值		2.4	1.7	3.7	1.3	0.1

壤背景值作为地球化学背景值,计算各重金属的地质累积指数。对计算出的各采样点的地累积指数进行分级后,可以看出,在东江流域表层沉积物中,东莞段 C区 Cd的地累积指数为 4.4 达到重污染程度, Cu和 Hg的地累积指数分别为 3.3和 3.7,达到偏重污染程度, ZI的地累积指数为 2.3 达到中度污染程度(表 5)。其主要污染源可能是左岸污水灌溉农田的地表径流,以及右岸工厂尤其是化工厂,排放的含重金属的废水。

东莞段 B区 Cd的地累积指数为 4.3 达到重污染程度, Cu和 Zn的地累积指数分别为 2.5和 2.1,达到中度污染程度, Hg的地累积指数为 1.9 处于偏中度污染水平。造成 B区污染的主要原因是电镀,冶炼,燃料,电池和化学工业等排放的含有重金属的污水未经处理或者处理不完全,就直接排放到东江流域。而在 A区, Cd的地累积指数为 4.0 处于偏重污染水平, Cu和 Hg的地累积指数分别为 2.5和 2.7 处于中度污染水平, ZI的地累积指数为 1.9 处于偏中度污染水平。A区处于东莞市西北部,主要产业有化工厂、制衣、漂染、塑胶等。这些工

表 4 东江沉积物重金属含量相关系数矩阵  
Table 4 Correlation coefficient matrix of the mass fraction of heavy metals in sediment from Dongjiang River

污染物	Cu	Zn	Cd	Hg	Pb
Cu	1				
Zn	0.897**	1			
Cd	0.842**	0.951**	1		
Hg	0.318*	0.413**	0.495**	1	
Pb	0.593**	0.757**	0.702**	0.244	1

\* P<0.05(双尾); \*\* P<0.01(双尾)

厂排放的废水可能是 A 区污染的主要来源之一。D 区各重金属元素的污染水平与 A 区类似。E 区和 EII 区 Cd 均达到重污染程度, Cu 达到偏中度污染程度, Zn 达到中毒污染程度。这两段主要分布在东莞市的东南部, 主要产业为电子信息、电气机械、纺织服装、玩具制造业。在惠州段, Cd 的地累积指数为 3.7 达到偏重污染程度, Cu 的地累积指数为 2.2 达到中度污染程度, Zn 的地累积指数为 1.7 达到偏中度污染程度。而河源段, 只有 Cd 的地累积指数为 1.6 达到偏中度污染程度, 其余重金属的地累积指数均 < 0 未达到污染。具体评价结果是: 东莞段 C 区, E 区 > B 区, EII 区 > A 区, B 区 > D 区 > 惠州段 > 河源段。同时还可以看出, 主要污染物是 Cd > Cu > Zn > Hg 从整个流域各重金属在沉积物中的地累积指数的均值来看, 污染程度从大到小为 Cd > Cu > Zn > Hg

**2.3.2 潜在生态风险指数评价** 目前各研究对参比值的选择各不相同, 为了更好的反映东江目前重金属的污染情况, 本文以中国大陆沉积物背景值为参比值 (表 3), 5 种重金属 Cu Zn Cd Pb Hg 的毒性响应系数  $T_i$  分别为 5, 1, 30, 5, 40

从单个污染要素来看, 东江流域, 东莞段 A B C D E 等区的 Hg 的潜在生态风险指数均高于 320 生态风险达到“极高”程度, 东莞段 EI 区和惠州段的 Hg 的潜在生态风险指数介于 160 和 320 之间, 达到“高”程度。而 Cd 在东莞段 B C EI 等区的潜在生态风险指数均高于 320 已达到生态风险“极高”程度, Cd 在东莞段 A D E 等区和惠州段的潜在生态风险指数介于 160 和 320 之间, 达到生态风险“高”程度。其他污染物的生态风险程度均 < 40 程度为“低”。从整个东江流域的污染程度上看, 各污染物对生态风险影响程度从大到小的顺序为 Hg > Cd > Cu > Pb > Zn (表 6)。

从整个东江流域总的生态风险指数上看, 东江沉积物的 R 的平均值为 807.5 潜在生态风险程度为“极高”。从各河段的总的生态风险指数上看, 东莞段 A B C D EI EI 区的 R 值均高于 600 潜在生态风险程度为“极高”, 惠州段的 R 值为 436.3 潜在生态风险程度为“较高”。其中, 东莞段 C 区和 A 区的 R 值高达 1983.7 和 1075.6 是所有河段中污染最严重的。

整个东江流域除处于上游的河源市段生态风险低外, 处于下游的惠州段生态风险为“较高”, 处于

表 6 东江流域沉积物中各重金属的潜在生态危害系数和总的潜在生态风险指数

Table 6 Ecological harm coefficient and ecological risk index of heavy metal in the sediment of Dongjiang River

河段	区位	$E_i$					RI
		Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	
东莞	A	28.0	3.1	281.1	9.7	753.8	1075.6
	B	27.3	3.6	361.6	10.5	434.1	837.1
	C	47.7	4.0	381.4	11.6	1539.0	1983.7
	D	21.5	2.1	196.2	8.0	458.0	685.7
	EI	59.0	3.4	309.2	10.7	352.3	734.8
	EII	58.5	3.9	324.1	10.0	228.1	624.6
惠州	ZI	23.0	2.7	233.2	11.7	165.8	436.3
	ZII	3.1	0.6	53.2	5.4	20.0	82.4
平均值		33.5	2.9	267.5	9.7	493.9	807.5

下游的东莞段生态风险为“极高”。总之, 东江流域下游沉积物中的重金属的生态风险高于中上游沉积物。

通过东江流域沉积物污染物的浓度、地累积指数、生态风险指数分析来看, 同一区段的各重金属的高低值区非常吻合。但是由两种评价结果得到的各种金属污染的程度差别较大。从地累积指数的均值来看, 东江流域重金属累积指数从大到小为 Cd > Cu > Zn > Hg > Pb 而从生态风险指数结果来看, 东江流域重金属生态风险影响程度从大到小的顺序为 Hg > Cd > Cu > Pb > Zn 主要原因是 5 种重金属 Cu Zn Cd Pb Hg 的毒性响应系数不同, 其中 Hg 最高为 40 C 次之为 30 而 Zn 的毒性响应系数最低为 1。考虑到重金属对生态环境的影响程度, 潜在生态风险指数评价结果比地累积指数评价更有价值。

### 3 结 论

本文利用地累积指数和 Hakanson 潜在生态风险指数对东江沉积物中 Cu Zn Cd Pb 和 Hg 的含量进行了分析, 得出东江的重金属污染程度和潜在生态风险, 结论如下:

1) 东江流域沉积物的重金属污染物主要是 Cu Zn Cd Hg 均高于中国大陆沉积物背景值, 其中 Cd 和 Hg 最为严重。除了 Pb 和 Hg 之外, 其他各元素之间均呈现显著的正相关关系, 这说明东江沉积物污染具有一定的同源性。

2) 从沿程分布来看, 上述 5 种重金属的分布基本呈现两种特征。Cu Zn Cd Hg 等重金属呈现相同的变化特点, 即均有几个高值区; 而 Pb 的含量分布无明显规律。总体特征是东莞地区重金属含量高, 其余地区含量低。

3) 从地累积指数的均值来看, 东江流域重金属累积指数从大到小为 Cd Cu Zn Hg Pb

4) 东江沉积物的 R 的平均值为 807.5 潜在生态风险程度为“极高”。对生态风险影响程度从大到小的顺序为 Hg Cd Cu Pb Zn

5) 东江流域下游沉积物中的重金属的生态风险指数高于中上游沉积物。自上游河源段到下游东莞段, 重金属污染呈现增加趋势。

**致 谢** 非常感谢中国科学院广州地球化学研究所的张干研究员为本次研究的采样工作提供帮助! 感谢中国地质大学(武汉)的孙广义同学在采样图绘制技术上给予的帮助!

## 参考文献

- 东莞时报电子版. 2010 中堂一工厂非法排污每天 6 吨重金属废水直排东江 [EB/OL]. [http://dgtimes.tmedg.com/html/2010-06/11/content\\_481416.htm](http://dgtimes.tmedg.com/html/2010-06/11/content_481416.htm)
- 贾振邦, 霍文毅, 赵智杰, 等. 2000 应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染. 北京大学学报(自然科学版), 36(6): 806—812
- 李翠田, 王淑红, 于红兵, 等. 2009 珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价. 海洋环境科学, 28(5): 536—538
- 李 健, 郑 春. 1989 环境背景值数据手册. 北京: 中国环境科学出版社.
- 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 2006 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的分布特征及相关性研究. 生态环境, 15(5): 954—959
- 赵一阳, 鄢明才. 1994 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版社.
- 周秀艳, 王恩德, 朱恩静. 2004 辽东湾河口底泥中重金属的污染评价. 环境化学, 23(3): 321—325

- 中国科学院南京土壤研究所. 1983 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.
- Chapman PM. 1995 Sediment quality assessment: Status and outlook. *Journal of Aquatic Ecosystem Health* 4: 183—194
- Ferreira MF, Chi W S, Cheok HK. 1996 Accumulation of nutrient and heavy metals in surface sediments near Macao. *Marine Pollution Bulletin* 32: 420—425
- Håkanson L. 1980 An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research* 14: 975—1001.
- IPCCM, Li XD, Zhang G, et al. 2005 Heavy metal and Pb isotopic compositions of aquatic organisms in the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution* 138: 494—504
- IPCCM, Li XD, Zhang G, et al. 2007 Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China. *Environmental Pollution* 147: 311—323
- Maengo E, Gemaro MC, Robotti E, et al. 2006 Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida river sediments. *Analytica Chimica Acta* 560: 172—183
- Muller G. 1969 Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2: 108—118
- USEPA. 1996 Method 3050B Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils [EB/OL]. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/Pdf/3050b.pdf>

**作者简介** 刘金铃, 女, 1983年生, 博士研究生, 研究方向为汞的环境地球化学. E-mail: kimgxu05@yahoo.com.cn  
责任编辑 魏中青