

# 惠州市3座供水水库沉积物重金属污染特征<sup>\*</sup>

陈修康<sup>1</sup> 张华俊<sup>1</sup> 顾继光<sup>1\*</sup> 胡 韧<sup>1</sup> 杨浩文<sup>2</sup> 陈敬安<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学水生生物研究所, 广州 510632; <sup>2</sup>广东省水文局, 广州 510150; <sup>3</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)

**摘要** 为了解惠州市供水水库沉积物重金属(Cr、Cu、Zn、Cd、Pb和Hg)污染状况和垂直分布特征,于2008年5月在惠州市3座具代表性的水库湖泊区采集柱状沉积物样品,运用ICP-MS法检测沉积物中重金属含量,并采用地积累指数法( $I_{geo}$ )和潜在生态风险指数法( $RI$ )进行污染评价,同时运用主成分分析(PCA)对沉积物中重金属的可能来源进行分析。结果表明:3座水库沉积物重金属含量随沉积深度的变化差异明显,一些重金属含量的垂直变化不明显,而另一些垂直变化明显(降低或升高),但各种重金属在不同水库沉积物中呈现特有的垂直分布特征。根据地积累指数可知,3座水库中沉积物主要以Zn和Pb污染最为严重,达到轻度至强度污染(含量分别为Zn: 49.98~640.29 mg·kg<sup>-1</sup>; Pb: 21.94~300.66 mg·kg<sup>-1</sup>),同时沉积物中部或底部受到轻度的Cu污染(含量为16.85~45.46 mg·kg<sup>-1</sup>),基本未受Cr、Cd和Hg污染。据6种重金属潜在生态风险系数[ $E_r(i)$ ]及潜在生态风险指数( $RI$ )可知,3座水库沉积物的重金属潜在风险均处于较低水平。据PCA分析和相关资料可知,矿山开采与冶炼、城市化和农林业快速发展等人类活动影响了3座水库沉积物重金属的分布特征和污染。其中Zn主要来源于矿产开采与冶炼;除矿产开采与冶炼导致沙田水库Pb污染外,机动车尾气排放和生活垃圾等是3座水库沉积物Pb污染的主要途径;Cu污染主要来源于农业和林业污染。

**关键词** 重金属 地积累指数 潜在生态风险指数 沉积物 水库

文章编号 1001-9332(2012)05-1254-09 中图分类号 P641.69 文献标识码 A

**Characteristics of sediment heavy metal pollution in three water supply reservoirs in Huizhou, Guangdong Province of South China.** CHEN Xiu-kang<sup>1</sup>, ZHANG Hua-jun<sup>1</sup>, GU Ji-guang<sup>1</sup>, Hu Ren<sup>1</sup>, YANG Hao-wen<sup>2</sup>, CHEN Jing-an<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; <sup>2</sup>Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China; <sup>3</sup>The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2012 23(5): 1254-1262.

**Abstract:** To understand the present status of the heavy metal (Cr, Cu, Zn, Cd, Pb and Hg) pollution of the sediments in water supply reservoirs in Huizhou, sediment cores were sampled from three representative reservoirs. The heavy metal concentrations were analyzed by ICP-MS, and the pollution status was assessed by geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ) and potential ecological risk index ( $RI$ ). In the meantime, the possible sources of the heavy metals were analyzed by the principal component analysis (PCA). In the sediments of the three reservoirs, the test heavy metals had different vertical distribution, some had less change, the others decreased or increased with depth, and the distribution patterns differed with the reservoirs. According to the  $I_{geo}$ , the sediments in the reservoirs were seriously polluted by Zn and Pb (Zn: 49.98-640.29 mg·kg<sup>-1</sup>; Pb: 21.94-300.66 mg·kg<sup>-1</sup>), reaching slight to high pollution, and the middle or bottom part of the sediments was slightly polluted by Cu (16.85-45.46 mg·kg<sup>-1</sup>). On the whole, the sediments were not polluted by Cr, Cd and Hg. According to the  $RI$  and the potential ecological risk coefficient [ $E_r(i)$ ], the sediments in the three reservoirs were under low potential ecological risk. Based on the PCA and relevant information, the human activities such as mining and smelting, urbanization,

\* 广东省水利科技创新基金项目和国家自然科学基金重点项目(U0733007)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: gujiguang@163.com

2011-11-10 收稿, 2012-01-30 接受。

and agriculture and forestry had great contribution to the heavy metal pollution. The Zn and Pb pollution mainly originated from mining and smelting, Pb pollution also came from motor vehicle exhaust emission and domestic wastes, and Cu pollution mainly derived from agriculture and forestry.

**Key words:** heavy metal; geo-accumulation index; potential ecological risk index; sediment; reservoir.

重金属广泛存在于水生生态系统的不同组分中,不同水体中各种重金属的含量不尽相同,它们通过物理、化学和生物等作用最终沉积在水库等水体沉积物中<sup>[1-2]</sup>。在适宜的地球化学、水力等条件下,沉积物中的重金属可以通过泥水交界面重新进入水体<sup>[1,3]</sup>,形成二次污染,影响供水安全与管理。因此,沉积物重金属含量是水环境质量的一个重要评价指标<sup>[4-5]</sup>。

沉积物重金属的来源复杂,不仅来源于岩石的风化、侵蚀和淋溶等自然过程,矿产开采、工业排放、交通运输、生活污水和废弃物排放等人类活动产生的重金属也可通过地表径流和大气沉降(干、湿沉降)等途径进入水体<sup>[5-7]</sup>,从而导致沉积物中的某种或几种重金属含量增加,改变沉积物中重金属的分布格局<sup>[1,3,5]</sup>。随着工业化和城市化进程的加快,机动车尾气排放的增加,矿山和工业废水的排放加剧,往往导致重金属污染<sup>[8]</sup>。然而,不同地区产业结构、生产方式以及人类活动强度的差异较大,因此在不同水体中沉积物重金属污染的种类、水平和来源具有一定的差异性,从而导致重金属的地区性差异较大<sup>[2,4-7]</sup>。国内外不少学者利用 PCA 分析判断沉积物各种重金属污染物的可能途径<sup>[9-10]</sup>,该方法通过对原变量进行线性变换后,由产生的少数几个新变量最大限度地反映原来众多变量的变化关系和相互作用关系,并揭示蕴含的内在信息<sup>[10]</sup>。另外,通过柱状沉积物中重金属的含量分析和污染评价,反映人类活动对沉积物及其流域内重金属污染的影响及变化进程<sup>[9,11-12]</sup>。

改革开放以来,惠州市城市化、工业化进程加快,农林业生产全面发展,大量未经处理的工业废水、农林业和生活污水的直接排放,以及交通运输和矿产开采等人类活动,导致东江惠州段重金属(Cu、Zn、Cr、Hg 和 Pb)污染状况加剧<sup>[7]</sup>。与此同时,广东省大多数水库沉积物也面临着重金属污染加重<sup>[13]</sup>等水质恶化现象,给水库供水安全带来极大挑战。在国内,沉积物重金属的研究主要集中于近海、河口、潮间带、潮滩、陆架区、海洋、湖泊等自然水体<sup>[14]</sup>,而对水库这类半人工水体的研究相对较少。本文研究

了惠州市 3 座具有代表性的供水水库柱状沉积物中 6 种重金属(Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg)的垂直分布特征,应用地积累指数法和潜在生态风险进行污染评价,了解人类活动对惠州市供水水库重金属污染的影响、现状和历史污染水平,并运用 PCA 分析探讨各水库沉积物中重金属的可能途径,以期为水库生态系统保护、重金属污染防治和供水安全提供指导和依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

惠州市(22°24′—23°57′N,113°51′—115°28′E)位于广东省东南部,珠江三角洲东端,南海大亚湾北部。地处亚热带,北回归线横贯全市,属南亚热带海洋性季风气候,阳光充足,雨量充沛,年均降水量为 1700~2000 mm,主要集中在 4—9 月。惠州市北部以山地居多,东部和南部为丘陵台地,东江沿岸和南部沿海有极小面积的平原。全境有大小河流 20 多条,较大的河流有东江和东江的支流西枝江、增江(又称为龙门河)。有湖泊和大小水库约 130 个,较大的有西湖、白盆珠水库、天堂山水库、显岗水库、花树下水库、角洞水库、水东陂水库等。惠州市工业(主要有电子制造业、石化工业)、农林业(主要包括粮食、肉类、蔬菜、水果、桉树等经济作物)发达,矿产资源丰富,是粤东的交通枢纽之一,公路、铁路、水运、空运等交通网络完善。

白盆珠水库位于惠州市惠东县境内,西枝江上游,莲花山西北麓,原称西枝江水利枢纽,是以防洪、供水为主,兼顾灌溉、发电效能的大型水库。西枝江是广东珠江水系东江第二支流主流,全长 176 km,流域面积 4120 km<sup>2</sup>。其中,白盆珠水库控制流域面积 856 km<sup>2</sup>,整个库区有石涧、黄瑶、三坑、横坑、马山、宝口、高潭等近 10 条支流流入水库。白盆珠水库总库容 12.2×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,其中死库容 1.9×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,有效库容 3.85×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,调洪库容 6.45×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。在年平均降雨量 1900 mm 条件下,它与新丰江水库、枫树坝水库联合调洪,对减轻东江上游的洪涝灾害有较大作用。沙田水库位于惠阳县城东北 10.5 km,1969

表 1 惠州市 3 座水库以及所采集沉积物的主要参数

Table 1 Major parameters of the three water reservoirs and sedimentary cores in Huizhou

水库 Reservoir	位置 Location	经纬度 Latitude and longitude	建成时间 Completion time (Year)	集水面积 Catchment area (km <sup>2</sup> )	库容 Reservoir capacity (m <sup>3</sup> )	类型 Type	年均降雨量 Average annual precipitation (mm)	沉积物深度 Sediment depth (cm)	样品数 Sample numbers
白盆珠水库 Baipenzhu Reservoir	惠东县 Huidong County	115°01'49" E 23°04'55" N	1985	856	12.2×10 <sup>8</sup>	大型 Large-scaled	1900	24	6
沙田水库 Shatian Reservoir	惠阳区 Huiyang Area	114°32'60" E 22°51'30" N	1969	26.8	2.17×10 <sup>7</sup>	中型 Medium-scaled	1767.4	28	7
观洞水库 Guandong Reservoir	惠城区 Huicheng Area	114°13'20" E 23°05'11" N	1958	41.6	3.12×10 <sup>7</sup>	中型 Medium-scaled	-	16	4

年建成,集水面积 26.8 km<sup>2</sup>,总库容约 2.17×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,库区多年平均降雨量 1767.4 mm,降水集中在夏秋两季.观洞水库位于惠阳县城西北 39 km,是惠阳县最大的水库,1958 年竣工,集水面积 41.6 km<sup>2</sup>,正常蓄水量为 3.12×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>.

### 1.2 样品采集与测定方法

于 2008 年 5 月 13—15 日,在惠州市具有代表性的白盆珠水库、沙田水库和观洞水库(水库参数见表 1)大坝前湖泊区用奥地利产 Uwhitec 柱状采泥器(PVC 管长 60 cm,直径 6 cm)垂直采集未受扰动的柱状沉积物,以 4 cm 为单位进行切割后,用聚乙烯封口袋密封带回实验室处理,各水库所采集的沉积物泥柱的长度和样本数见表 1.其中 0~4 cm 为表层沉积物,距底部 4 cm 为底层沉积物,两者之间是中层沉积物.沉积物样品除去植物根系、底栖生物及石块等杂质后经自然风干,用玛瑙研钵研磨过 100 目尼龙筛后保存备用<sup>[15]</sup>.

称取 50 mg 沉积物样品放置 Teflon 管中,加 1 mL HNO<sub>3</sub> 和 0.8 mL HF 后密封于钢罐中高温(180~190 °C)消解 30 h,冷却取出;取出后将 Teflon 管置于电热板上 140 °C 蒸干,再加入少量 HNO<sub>3</sub>( <1 mL)继续蒸干;蒸干后加 2 mL HNO<sub>3</sub> 和 3 mL 去离子水,密封于钢罐中 140 °C 下加热 5 h,冷却取出定容至 100 mL;摇匀后取 10 mL 加 0.2 mL 内标物 Rh 后,利用 ICP-MS(型号 ELAN DRC-e)测定重金属 Cu、Cr、Pb、Zn、Cd 含量,并随机选取样品做平行,其中微量元素的重复性测试相对标准偏差 < 5%;取 0.2 g 样品经王水水浴(95 °C)消解后用 F732-S 测汞仪测定重金属 Hg 含量,同时测量水系沉积物标准物质 GBW-07305(GSD-5),以保证数据的准确性.沉积物有机质的测定采用烧失法,以烧失量(LOI)代替有机质含量<sup>[16]</sup>.

### 1.3 地积累指数评价

采用 Müller<sup>[17]</sup>于 1969 年提出的地积累指数

法,评价沉积物中重金属污染程度,该方法被广泛运用于水生生态系统沉积物重金属的污染评价<sup>[18-20]</sup>.选用广东省土壤元素背景值<sup>[21]</sup>(表 2)为参照,地积累指数计算方法如下:

$$I_{geo}(i) = \log_2 \left( \frac{c_i}{k B_i} \right) \quad (1)$$

式中:  $I_{geo}(i)$  为重金属  $i$  的地积累指数;  $c_i$  为重金属  $i$  在沉积物中的含量(mg·kg<sup>-1</sup>);  $B_i$  为沉积物中所测该重金属的地球化学背景值;  $k$  为考虑到成岩作用可能引起的背景值变动而设定的常数,一般取  $k=1.5$ .根据  $I_{geo}$  值的大小,将沉积物重金属污染程度划分为 7 个等级,各等级的划分参考 Müller<sup>[17]</sup>.

### 1.4 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价法(potential ecological risk index)是瑞典科学家 Håkanson<sup>[22]</sup>提出的沉积物评价方法.该评价法综合考虑了重金属毒性在沉积物中普遍的迁移转化规律以及评价区域对重金属污染的敏感性,可以综合反映沉积物中重金属的潜在生态影响<sup>[23]</sup>.计算公式如下:

$$C_r(i) = C(i) / C_b(i) \quad (2)$$

表 2 地积累指数分级

Table 2 Grade of geoaccumulation index ( $I_{geo}$ )

地积累指数 $I_{geo}$	分级 Grade	污染程度 Pollution level
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染 Unpolluted
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中度污染 Lightly to moderately polluted
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中度污染 Moderately polluted
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度-重度污染 Moderately to heavily polluted
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	严重污染 Heavily polluted
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	严重-极严重污染 Heavily to extremely polluted
$5 < I_{geo} \leq 10$	6	极严重污染 Extremely polluted

$$E_r(i) = T_r(i) \cdot C_r(i) \tag{3}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r(i) \tag{4}$$

式中:  $C_r(i)$  为重金属  $i$  的污染指数;  $C(i)$  为重金属  $i$  的实测浓度;  $C_b(i)$  为重金属  $i$  的评价背景值;  $E_r(i)$  为重金属  $i$  的潜在生态风险指数;  $T_r(i)$  为重金属  $i$  的毒性系数<sup>[21]</sup>(表 2);  $RI$  为综合潜在生态风险指数. 污染程度及潜在生态风险等级的等级见表 3.

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2010、Origin Pro 8.5 和 SPSS 19 软件进行数据处理, 并进行相关分析 ( $\alpha = 0.05$ ) 及主成分分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物重金属分布特征

由表 4 可以看出 3 座水库沉积物中 Cr 含量为 19.58 ~ 92.94  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均含量大小顺序为观洞水库 > 沙田水库 > 广东省背景值 > 白盆珠水库; 沉积物 Cu 的含量为 16.85 ~ 45.46  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均含量大小顺序为沙田水库 > 观洞水库 > 白盆珠水库 > 广东省背景值, 最大含量约为背景值的 2.5 倍; Zn 在 3 座水库沉积物中的含量为 49.98 ~ 640.29  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其平均含量大小顺序为白盆珠水库 > 沙田水库 > 观洞水库 > 广东省背景值, 最大含量约为广东省背景值的 14 倍; 重金属 Cd 的含量在 3 座水库中波动较大, 含量范围为 0.22 ~ 0.91  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其平均含量大小顺序为沙田水库 > 白盆珠水库 > 广东省背景值 > 观洞水库; Pb 平均含量的大小顺序与 Cd 一致, 其含量均高于广东省背景值, 其中沙田水库的最低含量约为广东省背景值的 3 倍. 3 座水库沉积物中 Hg 的平均含量相似, 而且均高于广东省背景值.

### 3 座水库沉积物中各种重金属含量的垂直分布

不同(图1). 其中, 白盆珠水库沉积物中各种重金属含量在垂直剖面上的变异系数(CV)的大小顺序为 Zn > Cr > Hg > Cu > Pb > Cd (27.9% ~ 71.6%) 除 Zn 的含量与沉积深度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ) 外, 其他 5 种重金属的垂直变化不显著, 但均在中层沉积物中(16 ~ 20 cm) 形成峰值. 沙田水库沉积物中各种重金属含量的垂直变化不显著, 其 CV 大小为 Hg > Cr > Cu > Pb > Zn > Cd (25.7% ~ 84.2%). Cr、Cu 和 Cd 的含量在底层沉积物中(20 ~ 24 cm) 较高, 并在泥柱中层(8 ~ 12 cm) 达到峰值; Hg 在整个泥柱中垂直变化不大, 而 Pb 和 Zn 在沉积物泥柱中波动较大. 观洞水库沉积物 Cu 含量在垂直剖面上先降低再升高, 其他重金属的含量与深度显著相关 ( $P < 0.05$ ). 其中, Cr 的含量与沉积深度成正相关, 而 Zn、Cd、Pb 和 Hg 的含量均与沉积深度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 其 CV 大小顺序为 Zn > Pb > Cd > Hg > Cr > Cu (23.7% ~ 59.0%).

Table 3 Potential ecological risk coefficient [ $E_r(i)$ ],  $RI$  and ecological risk

$E_r(i)$	$RI$	生态风险 Ecological risk
<40	<150	低 Low
40 ~ 80	150 ~ 300	中等 Moderate
80 ~ 160	-	相当高 Considerably high
160 ~ 320	300 ~ 600	高 High
$\geq 320$	$\geq 600$	很高 Very high

2.2 沉积物重金属的地积累指数

根据 3 座水库沉积物重金属的地积累指数, 表明 3 座水库沉积物主要受到 Zn、Pb 和 Cu 的污染, 而基本上未受到 Cr、Cd 和 Hg 的污染, 各水库沉积物中不同沉积深度 Zn、Pb 和 Cu 的污染水平不同(图 2).

### 白盆珠水库沉积物 Zn 污染与沉积深度呈负相

白盆珠水库沉积物 Zn 污染与沉积深度呈负相

表 4 广东省土壤元素背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、惠州市 3 座水库沉积物中各种重金属含量、毒性系数 [ $T_r(i)$ ] 和 LOI (%)

Table 4 Guangdong soil background constants ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), concentration and toxicity factor [ $T_r(i)$ ] of heavy metals and LOI (%) in sediments from three reservoirs in Huizhou

重金属 Heavy metal	白盆珠水库 Baipenzhu Reservoir			沙田水库 Shatian Reservoir			观洞水库 Guandong Reservoir			背景值 Background value	$T_r(i)$
	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean±SD	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean±SD	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean±SD		
Cr	66.58	19.58	32.01±17.94	92.94	24.34	50.68±30.87	81.76	46.96	60.01±16.08	50.5	2
Cu	42.21	16.85	25.14±9.20	45.46	16.86	29.40±11.85	37.24	21.81	28.73±6.79	17	5
Zn	640.29	57.49	315.10±225.70	270.12	129.52	173.40±48.00	175.18	49.98	96.28±56.82	47.3	1
Cd	0.83	0.34	0.65±0.18	0.91	0.43	0.67±0.17	0.52	0.22	0.33±0.14	0.056	30
Pb	93.78	39.78	65.0±21.64	300.70	122.20	188.60±60.00	51.90	21.94	32.49±14.17	36	5
Hg	0.22	0.08	0.13±0.05	0.15	0.11	0.13±0.01	0.18	0.08	0.12±0.04	0.078	40
LOI (%)	42.66	5.11	9.08±3.76	10.46	7.88	9.05±0.94	9.15	3.81	3.45±2.71		

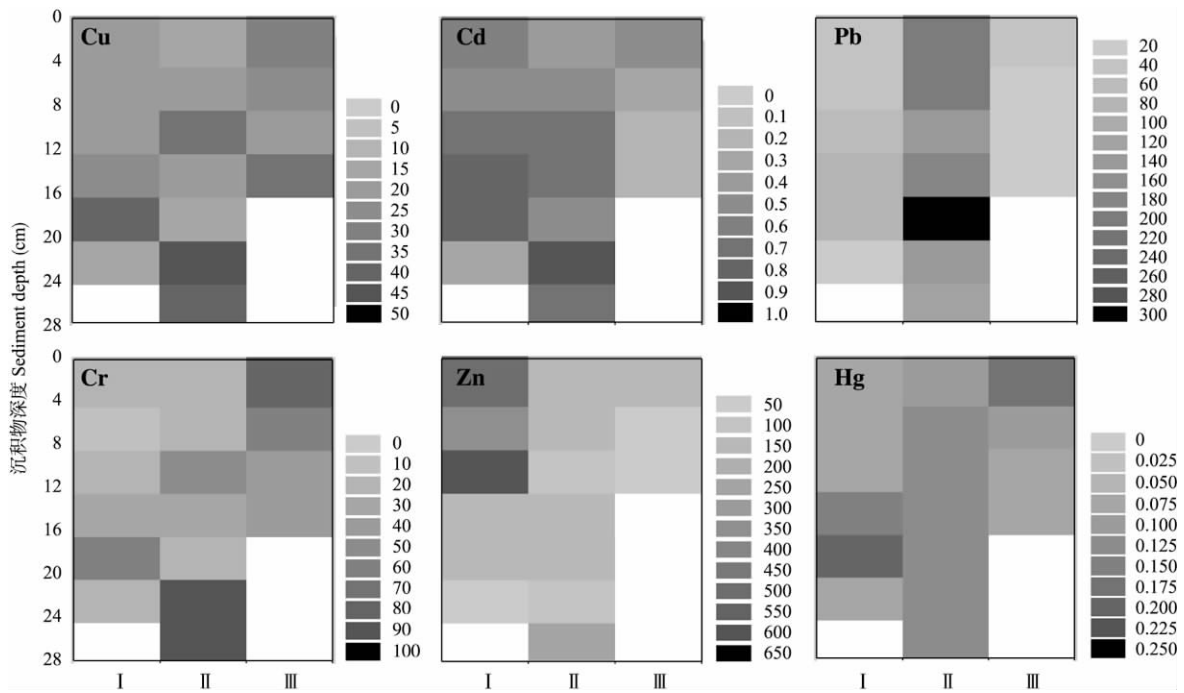


图 1 惠州市 3 座水库沉积物中重金属含量的垂直分布

Fig. 1 Vertical distributions of heavy metals in the sediments of three reservoirs in Huizhou ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

白色区域表示无数据 White area meant no data. I: 白盆珠水库 Baipenzhu Reservoir; II: 沙田水库 Shatian Reservoir; III: 观洞水库 Guandong Reservoir. 下同 The same below.

关,说明建库以来白盆珠水库 Zn 污染加剧,并在沉积物表层达到强度污染 ( $3 < I_{\text{geo}} < 4$ ). 中层沉积物受到轻度-中度 Pb 污染 ( $1 < I_{\text{geo}} < 2$ ),表层沉积物和底层沉积物均未受到 Pb 污染 ( $I_{\text{geo}} < 0$ ). 只有部分中层沉积物 (12 ~ 20 cm) 受到轻度 Cu 污染 ( $0 < I_{\text{geo}} < 1$ ),沉积物其他层并未受到 Cu 污染. 沙田水库沉积物除表层没有受到 Cu 污染外,中层和底层均受到轻度-中度污染 ( $1 < I_{\text{geo}} < 2$ ),而整个沉积物受到轻度至轻度-中度的 Zn 污染 ( $0 < I_{\text{geo}} < 2$ ),同时也受到轻度至中度的 Pb 污染 ( $1 < I_{\text{geo}} < 3$ ). 观洞水库沉积物早期沉积阶段,沉积物中层 (8 ~ 16 cm)、底层未受到 Zn 污染 ( $I_{\text{geo}} < 0$ ),而表层、中层 (4 ~ 8 cm) 沉积物受到轻度-中度污染到中度的 Zn 污染 ( $1 < I_{\text{geo}} < 3$ ),并与沉积深度呈负相关,说明近年来水库 Zn 污染加重. 底层沉积物 (12 ~ 16 cm) 受到到轻度-中度的 Cu 污染 ( $1 < I_{\text{geo}} < 2$ ),中层沉积物没有受到 Cu 污染 ( $I_{\text{geo}} < 0$ ),然后随着沉积物的积累,沉积物 Cu 含量增加,

在表层沉积物中达到轻度-中度污染水平 ( $0 < I_{\text{geo}} < 1$ ). 沙田水库沉积物未受到 Pb 污染 ( $I_{\text{geo}} < 0$ ).

总之 3 座供水水库沉积物主要受到 Zn 和 Pb 的污染,中层或底层沉积物受到轻度 Cu 污染,而基本上未受到 Cr、Cd 和 Hg 的污染. 其中,白盆珠水库沉积物以 Zn 污染为主,沙田水库主要是 Zn 和 Pb 污染,观洞水库受到轻度的 Zn 污染.

### 2.3 沉积物重金属的潜在生态危害评价

由表 5 可以看出,水库沉积物中 6 种重金属的单项潜在生态风险指数均小于 40,因此 3 座水库各种重金属的潜在生态风险均较低. 另外,根据 RI 值可知 3 座水库沉积物潜在生态风险低 ( $< 120$ ). 其中 Cd 是 3 座水库沉积物 RI 的主要贡献者,沙田水库沉积物中重金属 RI 的另一个主要贡献者是 Pb.

### 2.4 相关分析和 PCA 分析

对 3 座水库沉积物各种重金属和有机质 (以 LOI 计) 进行相关分析和 PCA 分析. PCA 采用 Kai-

表 5 惠州市 3 座水库沉积物重金属的潜在生态风险指数、RI 及生态风险等级

Table 5 Potential ecological risk indices of heavy metals, RI and risk grades in the sediments of three reservoirs in Huizhou

水库 Reservoir	$E_r(i)$						RI	生态风险 Ecological risk
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg		
白盆珠水库 Baipenzhu Reservoir	0.87	6.40	10.58	33.32	6.91	5.11	63.19	低 Low
沙田水库 Shatian Reservoir	1.00	4.96	3.30	23.23	27.91	5.88	66.28	低 Low
观洞水库 Guandong Reservoir	3.24	9.07	3.70	28.61	7.21	9.19	60.42	低 Low

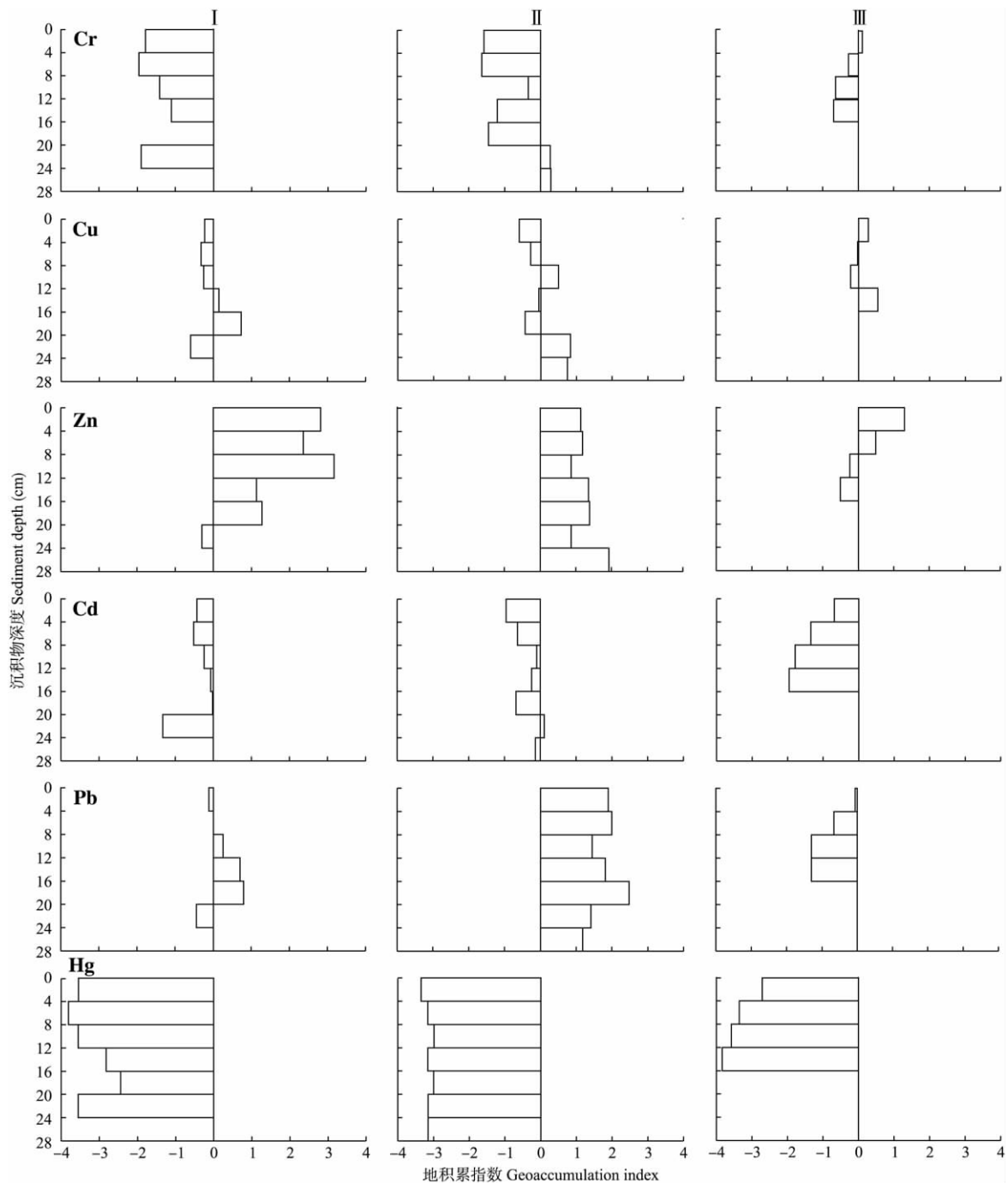


图 2 惠州市 3 座水库沉积物重金属地积累指数  
 Fig.2 Geoaccumulation index of heavy metals in the sediments of three reservoirs in Huizhou.

标准化的四分旋转法进行旋转,使 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 和 LOI 等 7 个变量的解释量最大化(表 6)。Cr、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg 和 LOI 被分成 3 个主成分(表 7 和图 3),这 3 个主成分对重金属和 LOI 解释量为 85.5%,可见这 3 个主成分能够反映出全部数据的大部分信息。

第 1 主成分的贡献率为 44.2%,主要由 Cd、Pb、Hg 和 LOI 组成,并且在 3 座水库柱状沉积物中,

它们含量间的相关性显著(表 6),表明它们具有同源性。但 Pb 与 Cd、Hg 和 LOI 相距较远,表明 Pb 还存在其他来源(图 3)。第 2 主成分的贡献率为 24.5%,主要由 Cr、Cu 组成,Cr 和 Cu 的相关性显著(表 6),说明它们的来源比较相似。第 3 主成分的贡献率为 16.8%,主要由 Zn 组成,并且 Zn 与 Cr、Cu、Cd、Pb、Hg 和 LOI 的相关性不显著(表 6),说明 Zn 与其他重金属的来源不同。

表 6 惠州市 3 座水库沉积物重金属含量与 LOI 的 Pearson 相关性分析

Table 6 Pearson's correction matrix for the heavy metal contents and LOI of three reservoirs in Huizhou

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	LOI
Cr	1						
Cu	0.849**	1					
Zn	-0.272	-0.203	1				
Cd	0.322	0.508*	0.363	1			
Pb	-0.132	-0.101	-0.086	0.315	1		
Hg	0.443	0.446	-0.205	0.545*	0.302	1	
LOI	0.190	0.326	0.217	0.764**	0.303*	0.696**	1

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

表 7 惠州市 3 座水库沉积物重金属含量与 LOI 的 PCA 分析

Table 7 PCA for heavy metal contents and LOI in the sediments of three reservoirs in Huizhou

项目 Item	主成分 Principal component		
	1	2	3
Cr	0.170	0.909	-0.165
Cu	0.289	0.900	-0.045
Zn	0.118	-0.226	0.926
Cd	0.809	0.287	0.393
Pb	0.672	-0.447	-0.372
Hg	0.771	0.345	-0.247
LOI	0.868	0.146	0.232
特征值 Eigenvalue	3.095	1.716	1.173
贡献率 Contributive rate (%)	44.2	24.5	16.8
累积贡献率 Accumulative rate (%)	44.2	68.7	85.5

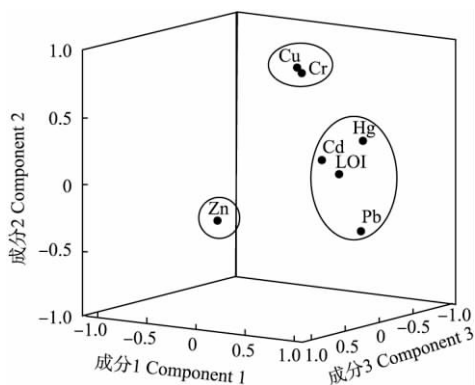


图 3 惠州市 3 座水库沉积物重金属含量和 LOI 的 PCA 分析图

Fig. 3 PCA plot for heavy metal contents and LOI in the sediment of three reservoirs in Huizhou.

### 3 讨论

#### 3.1 矿产开采与冶炼对水库沉积物重金属含量的影响

重金属矿产开采与冶炼过程中产生的尾矿和矿山酸性废水 (acidic mine drainage, AMD) 通过地表

径流和大气沉降等途径进入水体, 是对水体环境具有潜在威胁的污染源, 能使水体、水体沉积物中重金属含量增加<sup>[24]</sup>. 大量研究表明, 重金属矿产开采与冶炼均严重导致矿山流域内土壤和水体环境沉积物中重金属含量增加<sup>[25-27]</sup>. 例如, 大冶铁矿的长期勘探、开采和冶炼活动, 导致东港河区、西港河区 and 洪山溪区内河流水、水系沉积物、土壤和植物受到 Cd、As、Cu 和 Hg 污染<sup>[26]</sup>. 王友保等<sup>[27]</sup>通过对铜陵铜尾矿库区土壤重金属进行研究发现, 矿区土壤受到不同程度的 Cu、Cd、Pb 和 Zn 污染. 重金属冶炼污泥排放也导致流域下游土壤受到重金属污染<sup>[25]</sup>. 土壤中的重金属通过降雨、径流等途径进入水体而最终沉积在沉积物中. 观洞水库、沙田水库和白盆珠水库建于 20 世纪 50 年代末至 80 年代, 而在 20 世纪 60 至 70 年代, 惠州市矿产开发极为盛行. 惠州市主要有铁、铅锌、稀土、高岭土、砖瓦粘土、建筑用石料和煤等矿产资源, 并伴生 Cr、Cu、Hg、Cd、Zn、Pb 和 Sn 等重金属. 到 20 世纪 90 年代早期, 金属矿产已基本停采, 但为满足市场需求, 铅锌矿仍继续开采<sup>[28]</sup>. 杨元根等<sup>[29]</sup>通过对赫章县铅锌矿附近河流沉积物重金属的研究, 发现铅锌矿石开采造成附近环境介质土壤和河流沉积物中 Pb、Zn 的显著积累, 并且沉积物中主要的重金属与附近的金属矿产类似<sup>[27, 30-31]</sup>. 3 座水库中, 白盆珠水库上游存在大量矿山 (铁矿、钼矿、钨矿、锡矿及其他非金属矿等矿山) 和 Zn 冶炼厂, 导致白盆珠水库表层和 0~12 cm 中层沉积物 Zn 含量达到  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 达到强度污染; 沙田水库上游存在铅锌矿, 开采过程中尾矿及 AMD 排放导致沙田水库沉积物 Zn 和 Pb 的含量均超过  $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 达到轻度至强度污染; 而观洞水库流域内及附近金属矿山少, 沉积物重金属污染较轻. 因此, 水库周围和流域内矿山开采与重金属冶炼是导致惠州市 3 座水库沉积物 Zn 和 Pb 污染的主要原因, 这与宁建风等<sup>[13]</sup>的研究结果一致.

#### 3.2 城市化进程对水库沉积物重金属含量的影响

城市化促进了机动车保有量的增加和城内及城际交通的发展, 特别在经济发达地区, 交通道路密集导致机动车尾气排放增加. 机动车尾气中的重金属 (主要为 Pb) 可以通过大气干沉降作用积累于道路和周围环境介质<sup>[32-34]</sup>. 经降雨冲刷后由地表径流进入水体, 也可以通过大气环流随大气干、湿沉降进入水体<sup>[35]</sup>. 因此, 城市化交通运输产生的重金属对土壤、水系环境影响范围广泛. 陈景辉等<sup>[36]</sup>通过 CA (相关分析)、PCA (主成分分析) 和聚类分析发现,

道路周边土壤中的重金属 As、Mn 和 Ni 来自于自然源和交通源, Cu、Zn 和 Pb 来自于交通源, 而 Co 和 Cr 则来自于工业源. 观洞水库流域内和周围的 Pb 污染工、矿业较少, 沉积物 Pb 含量较低, 但沉积物的表层和中层 Pb 含量存在一个逐渐增加的趋势. 惠州市内和城际交通网络密集, 机动车尾气污染严重. 可以推测, 观洞水库沉积物 Pb 污染加重与城内和城际交通运输过程中机动车尾气排放量的增加密切相关. 而白盆珠水库和沙田水库沉积物中 Pb 的含量主要受到矿产开发与冶炼的影响, 机动车尾气排放对水库沉积物 Pb 污染的贡献相对较小. 城市化进程也会导致经济发达地区的郊区人口增加, 大量未经处理的生活污水直接排放, 固体废弃物没有经过统一处理, 而未处理的生活污水和固体废弃物中的重金属最终都会经地表径流进入水体. 此外, 生活污水和固体废弃物中的有机物能加强沉积物对 Zn 和 Pb 的吸附, 利于沉积物中重金属的稳定, 特别是对于 Zn、Cd 和 Pb<sup>[37]</sup>. 根据 PCA 分析可知, 3 座水库沉积物中 Pb、Cd、Hg 和有机物的相关性较强, 它们具有同源性, 因此水库沉积物重金属污染与有机污染(如生活污水和养殖废水未经处理排入水体)有关.

### 3.3 农林业发展对水库沉积物重金属含量的影响

农药、化肥等农林物资的应用, 推动了农林业生产发展, 但长期不合理的使用也可导致重金属污染. 绝大多数农药为有机化合物, 少数为有机-无机化合物或纯矿物质, 个别农药含有 Cu 等重金属成分, Cu 也是肥料(特别是磷肥)中报道最多的污染物<sup>[38]</sup>. 惠州市农业、林业发展快速, 白盆珠水库、沙田水库和观洞水库周边农业(粮食、蔬菜)、林业(果树、树苗、桉树等经济林)较多, 生产过程中大量使用农药和化肥. 农业和林业活动产生的重金属(主要是 Cu)随地表径流进入水体, 积累在沉积物中. 随着科技发展和重金属污染问题的日益突出, 近年来农药、化肥等的重金属含量有所降低, 表现为 Cu 含量在中层和底层沉积物中较高而在表层沉积物中较低.

## 4 结 论

地积累指数评价表明, 3 座水库沉积物主要受到 Zn 和 Pb 的污染, 中层和底层沉积物受到轻度的 Cu 污染, 而基本未受到 Cd 和 Hg 污染. 其中, 白盆珠水库以 Zn 污染为主, 沙田水库主要是 Zn 和 Pb 污染, 观洞水库受到轻度的 Zn 污染. 潜在生态风险评价表明, 3 座供水水库表层沉积物中 6 种重金属的生态风险均较低(<40), 综合潜在生态风险指数

也处于低水平(<120), 表明沉积物重金属污染程度均较低.

沉积物重金属 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的含量随沉积深度的变化差异明显, 各种重金属在不同水库沉积物中呈现特有的垂直分布特征. 其中, Zn 含量除在沙田水库垂直变化不明显外, 在白盆珠水库和观洞水库中均与沉积物深度呈负相关, 呈现污染加重的趋势; 3 座水库沉积物中 Pb 含量的垂直变化各不相同, 在白盆珠水库沉积物中部形成峰值, 在沙田水库沉积物中的垂直变化不明显, 而在观洞水库中与沉积物深度呈负相关, 表明污染加剧. Cu 在 3 座水库的底层和(或)中层沉积物中污染较重.

矿山开采与冶炼、城市化进程和农林业快速发展是影响 3 座水库沉积物重金属污染的主要原因. 其中, Zn 主要来源于矿产开采与冶炼; 除矿产开采与冶炼导致沙田水库 Pb 污染外, 机动车尾气排放以及生活垃圾和养殖业是 3 座水库沉积物 Pb 污染的主要途径; Cu 污染则主要来自于农业、林业污染.

### 参考文献

- [1] Linnik PM, Zubenko IB. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2000, **5**: 11-21
- [2] Zheng Z-X (郑志侠), Pan C-R (潘成荣), Ding F (丁凡). Distribution and environmental pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China. *Journal of Agro-Environment Science (农业环境科学学报)*, 2011, **30**(1): 161-165 (in Chinese)
- [3] Yu S (俞慎), Li H-B (历红波). Perspectives on the release of heavy metals via sediment resuspension. *Ecology and Environmental Sciences (生态环境学报)*, 2010, **19**(7): 1724-1731 (in Chinese)
- [4] Fan C-X (范成新), Zhu Y-X (朱育新), Ji Z-J (吉志军), et al. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin. *Journal of Lake Science (湖泊科学)*, 2003, **14**(3): 235-241 (in Chinese)
- [5] Förstner U. Lake sediments as indicators of heavy-metal pollution. *Die Naturwissenschaften*, 1976, **63**: 465-470
- [6] Wang J (王军), Chen Z-L (陈振楼), Wang C (王初), et al. Heavy metals accumulation in river sediments of Chongming Island, Shanghai City, and its environmental risk. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(7): 1518-1522 (in Chinese)
- [7] Liu J-L (刘金铃), Feng X-B (冯新斌), Zhu W (朱伟), et al. Distribution characteristics and pollution assessments of heavy metals in Dongjiang River sediments. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2011, **30**(5): 981-986 (in Chinese)
- [8] Kim KW, Myung JH, Ahn JS, et al. Heavy metal contamination in dusts and stream sediments in the Taejeon area, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, **64**: 409-419
- [9] Singh KP, Malik A, Sinha S, et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomati river (India) using principal component analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, **166**: 321-341



- [10] Cai L-Y (蔡龙炎). Analysis of the source of heavy metal contamination in surface sediments of Quanzhou Bay based on principal component analysis (PCA). *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), 2010, **29**(3): 325-331 (in Chinese)
- [11] Müller G, Förstner U. Heavy metals in sediments of Elbe near Stade: Changes since 1973. *Die Naturwissenschaften*, 1976, **63**: 242-243
- [12] Singh KP, Mohan D, Singh VK, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti River sediments-A tributary of the Ganges, India. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**: 14-27
- [13] Ning J-F (宁建凤), Zou X-Z (邹献中), Yang S-H (杨少海), et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(11): 6059-6067 (in Chinese)
- [14] Wang Y (王艳), Huang Y-M (黄玉明). Research progress of heavy metals in water environment of China. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis* (癌变·畸变·突变), 2007, **19**: 198-201 (in Chinese)
- [15] Jin X-C (金相灿). Lake Eutrophication in China. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990 (in Chinese)
- [16] Heiri O, Lotter AF, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**: 101-110
- [17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, **3**: 108-118
- [18] Luiz-Silva W, Matos RHR, Kristosch GC. Geochemistry and index of geoaccumulation of mercury in surface sediments from Santos-Cubatão estuary, State of São Paulo, Brazil. *Quimica Nova*, 2002, **25**: 753-756
- [19] Cevik F, Goksu MZL, Derici OB, et al. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan Dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **152**: 309-317
- [20] Hu G-C (胡国成), Xu Z-C (许振成), Peng X-W (彭晓武), et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(6): 1166-1171 (in Chinese)
- [21] Chai S-W (柴世伟), Wen Y-M (温琰茂), Zhang Y-L (张亚雷), et al. Application of index of geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) to pollution evaluation of heavy metals in soil. *Journal of Tongji University* (Natural Science) (同济大学学报·自然科学版), 2006, **34**(12): 1657-1661 (in Chinese)
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, **14**: 975-1001
- [23] Yu H (余辉), Zhang W-B (张文斌), Yu J-P (余建平). Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake. *Environmental Science* (环境科学), 2011, **32**(2): 437-444 (in Chinese)
- [24] Xu S-T (徐水太), Rao Y-Z (饶运章). Evaluation and research progress of heavy metal pollution in mine exploitation. *Copper Engineering* (铜业工程), 2010(4): 5-9 (in Chinese)
- [25] Wang G-L (王广林), Wang L-L (王立龙), Wang Y-P (王育鹏), et al. Cu and Zn pollution and soil enzyme activities in sewage irrigation area near smelter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(2): 328-332 (in Chinese)
- [26] Zhang X-J (张晓军), Hu M-A (胡明安). Heavy metal distribution of creek water and its sediments in Tieshan, Daye, Hubei Province. *Geological Science and Technology Information* (地质科技情报), 2006, **25**(2): 89-92 (in Chinese)
- [27] Wang Y-B (王友保), Zhang L (张莉), Shen Z-J (沈章军), et al. Chemical forms of heavy metals in the soils and plants of copper tailings yard. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2418-2422 (in Chinese)
- [28] Land Resources Bureau in Huizhou (惠州市国土资源局). Mineral Resources Master Plan (2008-2015) in Huizhou. [2010-09-07] (2010-12-26). [http://land.huizhou.gov.cn/word-content\\_getWordContent.action?contentid=310724](http://land.huizhou.gov.cn/word-content_getWordContent.action?contentid=310724) (in Chinese)
- [29] Yang Y-G (杨元根), Liu C-Q (刘丛强), Zhang G-P (张国平), et al. Heavy metal accumulations in environmental media induced by lead and zinc mine development in northwestern Guizhou Province, China. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry* (矿物岩石地球化学通报), 2003, **20**(4): 305-309 (in Chinese)
- [30] Charriau A, Lesven L, Gao Y, et al. Trace metal behaviour in riverine sediments: Role of organic matter and sulfides. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**: 80-90
- [31] Dassenakis M, Garcia G, Diamantopoulou E, et al. The impact of mining activities on the hypersaline Mar Menor Lagoon. *Desalination and Water Treatment*, 2010, **13**: 282-289
- [32] Marie DC, Chaparro MAE, Claudia SGG, et al. Vehicle-derived emissions and pollution on the road autovia investigated by rock-magnetic parameters: A case study from Argentina. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2010, **54**: 135-152
- [33] Zhu W (朱伟), Bian B (边博), Ruan A-D (阮爱东). Analysis of sources of heavy metal contamination in road-deposited sediment from Zhenjiang. *Environmental Science* (环境科学), 2007, **28**(7): 1584-1589 (in Chinese)
- [34] Wang J-D (王金达), Liu J-S (刘景双), Yu J-B (于君宝), et al. The distribution character of lead in soil and dust in urban region of Shenyang City. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2003, **23**(3): 300-304 (in Chinese)
- [35] Lopez-Lopez JA, Garcia-Vargas M, et al. A chemometric approach to the evaluation of atmospheric and fluvial pollutant inputs in aquatic systems: The Guadalquivir River estuary as a case study. *Environmental Pollution*, 2011, **159**: 1136-1143
- [36] Chen J-H (陈景辉), Lu X-W (卢新卫), Zhai M (翟萌). Sources and potential risk of heavy metals in roadside soils of Xi'an City. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(7): 1810-1816 (in Chinese)
- [37] Schmidt-Wygasch C, Schamuhn S, Meurers-Balke J, et al. Indirect dating of historical land use through mining: Linking heavy metal analyses of fluvial deposits to archaeobotanical data and written accounts. *Geoarchaeology*, 2010, **25**: 837-856
- [38] Huang L (黄琳), Cai L-S (蔡鲁晟), Jia Y (贾莹). Research on the pollution evaluation of soil heavy metal based on geostatistics model in Huizhou City of Guangdong Province. *Sci-Tech Information Development & Economy* (科技情报开发与经济), 2007, **17**(7): 189-191 (in Chinese)

作者简介 陈修康 男, 1986年生, 硕士研究生. 主要从事水域生态学和供水安全研究. E-mail: chenqiang861023@163.com

责任编辑 肖红