

广东大中型水库底泥重金属含量特征 及潜在生态风险评价

宁建凤, 邹献中*, 杨少海, 陈 勇, 巫金龙, 孙丽丽

(广东省农科院土壤肥料研究所, 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要:广东省 45 宗大中型水库底泥重金属含量分析评价结果表明:除 Cr 外,广东省大中型水库底泥中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量均高于广东省土壤重金属含量背景值。广东省四大地理区域中,粤北地区大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 平均含量均为最高,分别为 89.71、321.21、154.95 mg/kg 和 1.46 mg/kg;其次是粤东和粤中地区;粤西大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 平均含量均为最低,但 Cr 平均含量居四大区域之首,为 130.81 mg/kg。粤东和粤北大中型水库底泥重金属富集系数以 Cd 最高;粤中和粤西大中型水库底泥重金属富集系数则以 Cu 最大。总体而言,粤北大中型水库底泥重金属具有很强的潜在生态风险,粤东和粤中大中型水库底泥重金属潜在生态风险程度为中等;粤西大中型水库底泥重金属属于轻微生态风险程度。结果说明,广东省大部分地区大中型水库底泥的重金属潜在生态风险主要是由于底泥中 Cd 的潜在生态风险系数过高所造成。人为生产活动,特别是矿产开采造成的污染是广东省大中型水库底泥重金属潜在生态风险等级提高的主要原因。

关键词:大中型水库;底泥;重金属;生态风险

文章编号:1000-0933(2009)11-6059-09 中图分类号:X820.4 文献标识码:A

Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium -scaled reservoirs in Guangdong Province

NING Jian-Feng, ZOU Xian-Zhong*, YANG Shao-Hai, CHEN Yong, WU Jin-Long, SUN Li-Li

Soil and Fertilizer Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6059 ~ 6067.

Abstract: To evaluate the potential ecological risks of heavy metals in sediment of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong province, the contents of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in sediments of 45 reservoirs were analyzed. The results showed that Cu, Zn, Pb and Cd contents in sediment were higher than the soil background values of Guangdong province except for Cr. The mean concentrations of Cu, Zn, Pb and Cd in sediment of reservoirs in northern area of Guangdong province were the highest which was 89.7, 321.21, 154.95 and 1.46 mg/kg, respectively, followed by those in eastern and central areas, and the lowest in western area, however, Cr content was the highest in sediment of reservoirs in western area which was 130.81 mg/kg. The enrichment factor of Cd was the highest in sediment of reservoirs in eastern and northern areas while that of Cu was the highest in sediment of reservoirs in western and central areas. In general, the potential ecological risk of heavy metals in sediment of reservoirs was very strong in northern area of Guangdong province, moderate in eastern and central areas, and slight in western area. The potential ecological risk of heavy metals in sediment of large and medium-scaled reservoirs in most areas of Guangdong province resulted from high potential ecological risk factor of Cd in sediment. Anthropogenic activities, especially mining, were the main reason for elevated potential ecological risk of heavy

基金项目:广东省重点科技攻关计划资助项目(2005A30402007)

收稿日期:2009-02-06; 修订日期:2009-06-22

致谢:华南农业大学卢瑛副教授对写作给予帮助;广东省农科院土肥所曾招兵对采样水库分布图制作,在此一并致谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: patroonkiller@sina.com

metal in sediment of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province.

Key Words: large and medium-scaled reservoirs; sediment; heavy metal; ecological risk

底泥是水体底部有毒有害污染物的贮藏库^[1]。众多污染物中,重金属由于其毒性和持久性而成为影响底泥质量较严重的一类^[2,3]。进入水体的重金属通过化学吸附、物理沉淀等作用转移至底泥沉积物中^[4~6],这些与底泥沉积物结合的重金属不仅可通过多种途径对水生生物产生毒害作用,还可重新释放出来产生潜在的生物毒性风险^[7~9]。因此,底泥重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标^[10,11]。

广东省是我国水库比较集中的地区之一^[12],由于自然湖泊面积仅 13km²,兴建水库成为广东省调节水资源时空分布的主要手段^[13]。经济发展对水资源的需求快速增加,使得广东省水库的供水功能变得日益重要,同时广东省也是港、澳地区的主要水源地,水库水质对两地供水具有极其重要的影响^[13,14],水库水环境已成为制约广东水库水资源利用的一个主要因素。目前,广东省 6559 宗水库(2004 年计)中,大、中型水库 321 宗,其总库容占全省水库总库容的 86.65%^[15]。近年来,广东省水库泥沙淤积和水体污染等问题日趋突出,严重影响了水库功能的发挥^[15]。

目前,国内外关于水体底泥重金属的研究主要集中于重金属分布规律、污染特征和污染程度评价以及来源分析等方面^[16],由于各种原因,鲜有针对大中型水库底泥进行较大范围的调查采样研究和报道。本文系在对广东省四十余宗大中型水库进行底泥样品采集、分析的基础上,开展大中型水库底泥重金属含量特征分析及其潜在生态风险评价研究,旨在了解广东省大中型水库的水环境质量现状,为全省水库水污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 底泥样品采集

根据广东水库的地理分布与库容,选择分布于粤东、粤西、粤北和粤中 45 宗大中型水库(图 1),于 2007 年 11 月~2008 年 1 月对各水库进行底泥样品采集。取样前,根据水库地形及对水下泥沙淤积情况的初步了解(2006 年已对广东省大中型水库周边生态环境及泥沙淤积现状进行过调研),各水库设 6~19 个样点,所有样点均采用 GPS 定位仪定位确定。

采用 ETC-200 型蚌式抓斗采样器采集表层底泥 5~10 cm。各样点均取样 3~4 次,充分混匀后取 2 kg 左右带回实验室,风干碾磨,分别过 0.1 mm 和 0.01 mm 筛,保存、待测。

1.2 样品分析测定

底泥样品重金属含量均采用国标法进行分析测定。其中,铅(Pb)和镉(Cd)采用石墨炉原子吸收分光光度法^①;铜(Cu)和锌(Zn)采用火焰原子吸收分光光度法^②;铬(Cr)采用火焰原子吸收分光光度法^③。样品分析测定所用仪器为 Z-5000 型原子吸收分光光度计(HITACHI,日本),该仪器火焰法测 Cu 检出限为 0.004 μg/ml,石墨炉法测 Cd 检出限为 0.4 pg。分析所用试剂均为优级纯,所用水均为超纯水。同时,样品分析测试过程中,均加入国家标准土壤参比物质(GBW-07404)进行质量控制,标准土壤中每种元素质量控制的误差范围均在 10% 以内,分析结果符合质控要求。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS9.0 统计软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 广东大中型水库底泥重金属含量特征

广东大中型水库底泥重金属含量如表 1。从表中可以看出,除 Cr 外,水库底泥中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 4 种重

① GB/T17141-1997

② GB/T17138-1997

③ GB/T17137-1997

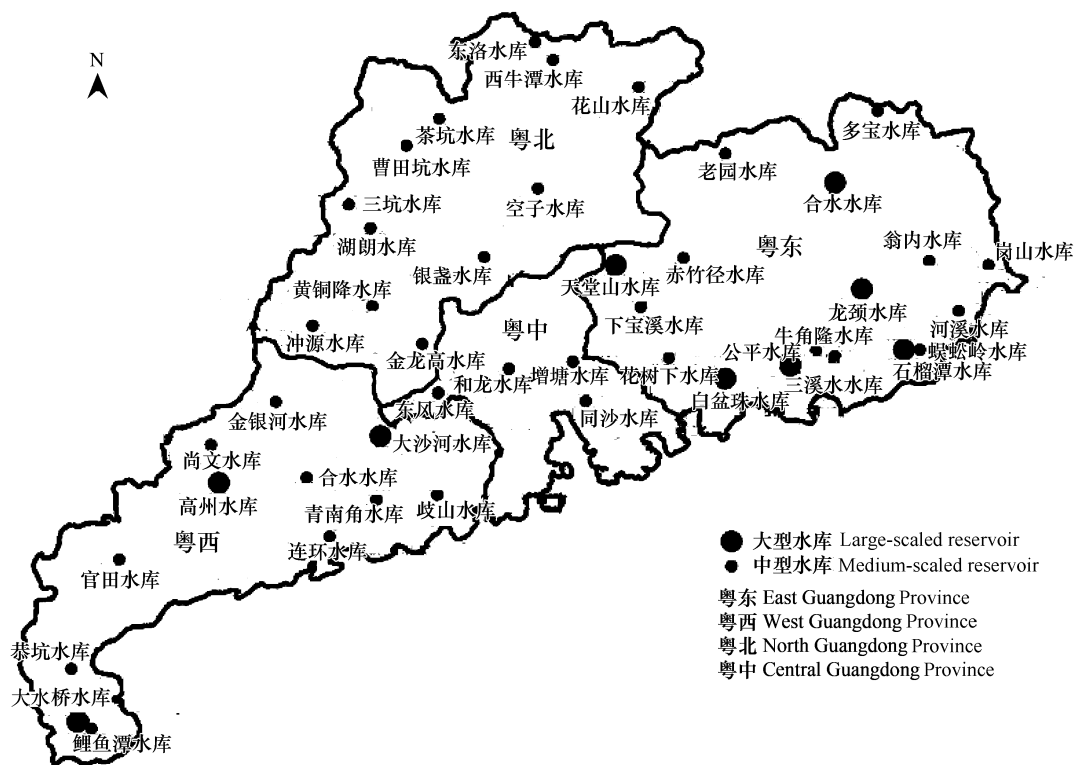


图 1 采样水库分布示意图
Fig.1 The location of sampling reservoirs

表 1 广东大中型水库底泥重金属含量 (mg/kg)

Table 1 Heavy metal contents in sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province						
分区 District	项目 Item	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
粤东	平均值	76.02	162.56	78.40	0.49	29.23
	含量范围	5.10 ~ 612.53	57.75 ~ 635.32	41.91 ~ 166.84	0.06 ~ 3.49	9.11 ~ 61.14
	标准差	158.71	143.54	30.14	0.98	16.77
	变异系数 (%)	208.78	88.30	38.45	198.18	57.36
粤西	平均值	48.12	125.31	59.05	0.17	130.81
	含量范围	4.29 ~ 97.68	64.38 ~ 342.23	17.34 ~ 111.74	0.11 ~ 0.28	11.96 ~ 330.47
	标准差	33.71	72.24	30.15	0.06	111.27
	变异系数 (%)	70.04	57.65	51.06	36.27	85.06
粤北	平均值	89.71	321.21	154.95	1.46	40.49
	含量范围	9.26 ~ 360.87	45.47 ~ 1460.63	27.22 ~ 473.05	0.08 ~ 4.55	9.74 ~ 92.66
	标准差	123.94	443.51	171.65	1.73	25.65
	变异系数 (%)	138.15	138.08	110.78	117.83	63.35
粤中	平均值	57.52	303.47	82.12	0.44	65.27
	含量范围	25.29 ~ 89.42	63.39 ~ 669.07	70.05 ~ 103.21	0.24 ~ 0.98	37.59 ~ 88.33
	标准差	29.15	277.92	15.41	0.36	25.58
	变异系数 (%)	50.67	91.58	18.76	81.66	39.19
重金属元素背景值		14.2	58.9	22.8	0.08	55.7

粤东 East Guangdong Province; 粤西 West Guangdong Province; 粤北 North Guangdong Province; 粤中 Central Guangdong Province; 平均值 Average value; 含量范围 Content range; 标准差 Standard deviation; 变异系数 Coefficient of variation; 重金属元素背景值 Heavy metal background value; 下同 the same below

金属含量平均值均明显高于其相应背景值(表1中重金属背景值采用广东省土壤重金属含量平均值^[17])。粤东、粤西、粤北和粤中地区大中型水库底泥 Cu 平均含量分别为 76.02、48.12、89.71mg/kg 和 57.52 mg/kg。其中,粤东和粤北地区水库底泥 Cu 含量变幅较大,在 5.10 ~ 612.53mg/kg 和 9.26 ~ 360.87mg/kg 之间,其相应变异系数也较高,分别高达 208.78% 和 138.15%;粤西和粤中地区大中型水库底泥 Cu 含量变幅及相应变异系数相对较小。大中型水库底泥中 Zn 含量在不同地区间存在较大差异。粤北和粤中大中型水库底泥中 Zn 含量平均值相对高于粤东和粤西地区,分别为 321.21mg/kg 和 303.47mg/kg,其中粤北水库底泥 Zn 含量变化范围较大,在 45.47 ~ 1460.63mg/kg 间;粤东和粤西水库底泥 Zn 平均含量为 162.56 mg/kg 和 125.31mg/kg,变异系数相对较小。表1中,大中型水库底泥 Pb 平均含量总体状况是:粤北地区最高,达 154.95mg/kg;依次为粤中、粤东地区,含量分别为 82.12mg/kg 和 78.40mg/kg;粤西地区水库底泥 Pb 含量最低,为 59.05mg/kg;粤北地区水库底泥 Pb 含量变幅较大,变异系数较高,达 110.78%,其他地区水库底泥 Pb 含量变幅相对较小,变异系数在 18% ~ 52% 之间。与 Pb 含量分布情况相似,Cd 含量平均值在粤北大中型水库底泥中最高,达 1.46mg/kg,含量变幅较大,在 0.08 ~ 4.55mg/kg 之间,变异系数为 117.83%;其次为粤东地区,水库底泥 Cd 含量均值为 0.49mg/kg,含量变幅大,表现为变异系数最高,达 198.18%;粤西和粤中大中型水库底泥 Cd 平均含量分别为 0.17mg/kg 和 0.44mg/kg,含量范围在 0.11 ~ 0.28 mg/kg 和 0.24 ~ 0.98 mg/kg 之间,变异系数相对低于粤北和粤东地区水库,在 36% ~ 82% 间。与底泥中其他四种重金属含量情况不同,粤东和粤北大中型水库底泥 Cr 含量均低于其相应背景值,分别为 29.23mg/kg 和 40.49mg/kg,粤西和粤中水库底泥 Cr 含量均高于背景值,为 130.81 mg/kg 和 65.27mg/kg。不同地区大中型水库底泥 Cr 含量变异系数在 39% ~ 86% 之间。

上述分析结果表明,总体上粤北地区大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量较高,其次是粤东和粤中地区,粤西大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量相对较低,但 Cr 含量最高,粤东水库底泥 Cr 含量最低。重金属变异系数分析表明,不同地区间,粤东大中型水库底泥 Cu 和 Cd 变异系数最高,粤北大中型水库 Zn 和 Pb 变异系数最大,粤西水库底泥 Cr 变异系数最高。

2.2 广东大中型水库底泥重金属富集特征

底泥中重金属富集系数表示其超过背景值的程度。按照单丽丽等^[18]的计算方法,重金属含量平均值与其相应背景值的比值即为该元素的富集系数。图2为广东大中型水库底泥重金属富集系数。从图2可以看出,粤东大中型水库底泥 Cd 富集系数最高,为 22.73;其次是粤北地区,Cd 富集系数为 19.88;粤西和粤中地区大中型水库底泥 Cd 富集系数相对较低,分别为 2.13 和 5.51。粤中大中型水库底泥 Cu 富集系数高于其他地区,为 11.94;粤北和粤中水库底泥 Zn 富集系数较高,为 5.45 和 5.33;水库底泥 Pb 的富集系数粤北地区最高,其他地区水库底泥富集系数在 2.5 ~ 3.8 之间;Cr 富集系数以粤西水库底泥最高,为 2.35;其他地区大中型水库底泥 Cr 富集系数在 0.5 ~ 1.1 之间。从图2中还可以看出,同一地区水库中,粤东和粤北大中型水库底泥 Cd 的富集系数明显高于其他重金属;粤中和粤西大中型水库底泥 Cu 富集系数在五种重金属中较高。重金属富集系数分析结果表明,不同地区水库底泥及不同重金属超出背景值的程度存在具有明显特征的差异性。

2.3 广东大中型水库底泥重金属潜在生态风险评价

2.3.1 评价方法

目前,关于重金属污染评价方法有多种,包括地质累积指数法^[19]、基于生物效应浓度评价法^[20]及潜在生

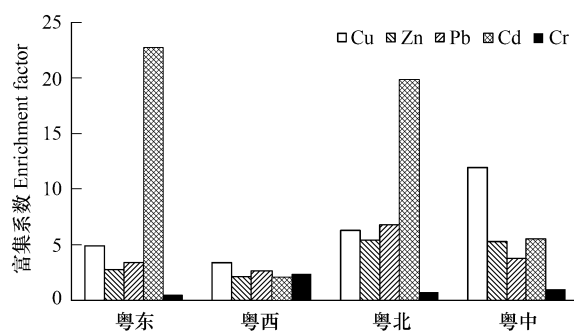


图2 水库底泥重金属富集系数

Fig. 2 Enrichment factors of heavy metals in reservoir sediments

态危害指数法^[21~23]等。其中,地质累积指数法是德国科学家 Muller 于 1979 年提出的用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,适用于研究现代沉积物中重金属污染的评价,以沉积物中重金属含量的高低反映污染水平^[16]。基于生物效应浓度评价法是 Long 等在对沉积物中污染物浓度和生物效应浓度之间的关系进行研究的基础上,将各重金属浓度与相应的生物毒性效应阈值 ERL(效应范围低)和 ERM(效应浓度中等)比较,若重金属浓度高于 ERM 值,表明沉积物受到严重污染,并呈现严重生物毒性效应;若重金属浓度低于 ERL 值,则表明沉积物未受污染或受到轻度污染,基本无生物毒性效应;若重金属浓度值介于 ERM 和 ERL 之间,表明沉积物属于中等污染水平^[1,20]。潜在生态危害指数法是瑞典科学家 Hakanson 根据重金属性质及其环境行为特点,从沉积学角度提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。该方法不仅考虑土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价,并定量地区分出潜在生态危害程度,是应用比较广泛、比较先进的方法^[22,23]。本文研究重点在于水库底泥重金属潜在生态风险状况,故采用潜在生态危害指数法进行重金属潜在生态危害程度评价。潜在生态风险指数法^[22]计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i}$$

(1)

式(1)中, RI 为潜在生态危害指数; E_r^i 为某一污染物潜在生态危害系数; T_r^i 为污染物毒性响应系数; C_f^i 为某一污染物的污染指数(又称富集系数); C^i 为底泥中某一污染物的实测浓度; C_n^i 为底泥中相应污染物的背景值。在计算 Hakanson 生态风险指数时,一般采取全球工业化以前的沉积物重金属最高值或当地沉积物的背景值为参考值^[1]。底泥背景值的地区性强,采用不同的背景值对计算潜在生态危害指数有较大的影响^[22]。本文采用广东省土壤重金属背景值^[17](表 1)作为参比,对广东大中型水库底泥重金属潜在生态风险进行评价。Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 5 种重金属对应的毒性系数(T_r^i)分别为 5、1、5、30、2。重金属潜在生态危害系数 E_r^i 、潜在生态危险指数 RI 与污染程度的关系如表 2。

表 2 重金属潜在生态风险系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(RI)与污染程度的关系
Table 2 Potential ecological risk factor(E_r^i) and index (RI) for pollution level

指数类型 Index type	所处范围 Range	生态风险程度 Ecological risk level	指数类型 Index type	所处范围 Range	生态风险程度 Ecological risk level
潜在生态风险系数 E_r^i	< 40	轻微 Slight	潜在生态风险指数 RI	< 150	轻微 Slight
Potential ecological risk factor	$40 \leq E_r^i < 80$	中等 Moderate		$150 \leq RI < 300$	中等 Moderate
	$80 \leq E_r^i < 160$	强 Strong		$300 \leq RI < 600$	强 Strong
	$160 \leq E_r^i < 320$	很强 Very strong		$RI \geq 600$	很强 Very strong
	$E_r^i \geq 320$	极强 Greatly strong			

2.3.2 重金属潜在生态风险评价

利用公式(1)计算出广东大中型水库底泥重金属潜在生态风险系数和生态风险指数,其结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,粤西大中型水库底泥中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 5 种重金属潜在生态风险系数(E_r^i)分别为 16.94、2.13、2.59、2.13 和 2.35,均低于 40,属轻微的生态风险状态。粤东、粤北和粤中地区大中型水库底泥中,除 Cd 外,其他四种重金属(Cu、Zn、Pb、Cr) E_r^i 值均低于 40,处于轻微生态风险状态。粤东和粤中大中型水库底泥中 Cd 的 E_r^i 值分别为 185.62 和 165.42,均具有很强的生态风险;粤北大中型水库底泥中 Cd 元素 E_r^i 值最高,为 549.20,生态风险极强。从表 3 还可以看出,粤西大中型水库底泥重金属 RI 值为 100.62,低于 150,属于轻微生态风险程度;粤东和粤中大中型水库底泥重金属 RI 值分别为 233.39 和 211.18,均属中等生态风险范畴;粤北大中型水库底泥重金属 RI 值为 621.68,具有很强的生态风险。

3 讨论

广东大中型水库底泥重金属含量分析结果表明,除 Cr 外,水库底泥中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 4 种重金属含量平均值均明显高于广东省土壤重金属含量背景值,大中型水库底泥重金属已经表现出明显的富集累积趋势。不

同地区大中型水库底泥中五种重金属含量存在一定差异性。总体上,粤北地区大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量较高,粤西大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量相对较低。同一种重金属元素在不同地区间,其在水库底泥中含量变化较大。Cu 和 Cd 在粤东大中型水库底泥中变异系数最高;Zn 和 Pb 在粤北大中型水库底泥中含量变异系数最大;Cr 含量变异系数在粤西大中型水库底泥中最高。

表 3 广东大中型水库底泥重金属潜在生态风险系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(RI)

Table 3 Potential ecological risk factor(E_r^i) and potential ecological risk index(RI) of heavy metals in sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province

分区 District	潜在生态风险系数 E_r^i Potential ecological risk factor					潜在生态风险指数 RI Potential ecological risk index
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	
粤东	26.77	2.76	17.19	185.62	1.05	233.39
粤西	16.94	2.13	2.59	2.13	2.35	100.62
粤北	31.59	5.45	33.98	549.20	1.45	621.68
粤中	20.25	5.15	18.01	165.42	2.34	211.18

水体底泥污染物一般通过大气沉降、废水排放、雨水淋溶与冲刷等途径进入水体,最后沉积到底泥中并逐渐富集,使底泥受到污染。广东省不同地区大中型水库底泥重金属含量水平差异性与该地区自然因素和人为活动有密切关系。水库底泥中重金属的来源一般可分为两种,即自然来源和人为来源。自然来源主要来自岩石和矿物。广东省地处热带和南亚热带,境内矿产资源丰富且矿种相对齐全,同时由于广东省内大面积的低山、丘陵地形、以及以花岗岩和砂岩风化土为主要成土母质的酸性土壤加之降雨量大、降雨强度高的气候等特殊的地理环境特征极易发生水土流失^[24]。在各种自然因素的综合作用下,一定程度上易导致库区周边土壤中矿质元素向水库内迁移,增加底泥重金属含量。

除自然因素外,人为活动是造成水库底泥重金属污染的主要来源。一些工农业生产活动包括采矿、金属冶炼加工、化石燃料燃烧、废弃物焚烧及处置、化肥农药的生产和使用过程以及工业废水和城市生活污水排放等均可导致重金属进入环境^[1,25],并因此在环境中产生累积。广东省大中型水库库区周边生态环境现状的实地调研结果表明,大中型水库周边均不同程度的存在开矿、挖路、种植、养殖等现象,以上现象的存在是导致各区水库底泥重金属含量超标,从而引起潜在生态危害的重要原因。

其中,粤北地区多大型的硫铁矿、铅锌矿、钨矿、铀矿、煤矿及钢铁厂、冶炼厂等^[26],矿产开采过程中释放出大量酸性废水并浸滤出大量有毒有害重金属离子,严重危害矿区及河流生态环境^[27]。如粤北的东洛水库,库区周边植被较差,水库上游采矿面积约 40km²;曹田坑水库集雨区内分布有多个煤矿开采点;茶坑水库集雨区内铁矿和采石场林立;空子水库集雨区内存在大面积云石矿、铁矿和硫矿等矿产露天开采现象;黄铜降水库和银盏水库周边存在多处粘土矿开采点。水库周边矿产开采活动会不同程度的导致水库水质及底泥的重金属污染。付善明等^[27]的研究表明,粤北大宝山铁多金属矿开发活动产生的选冶废水对横石河流域沿岸环境产生严重影响,Pb、Zn、Cd、Cu 等均不同程度的对沿岸土壤造成污染,且以 Cd 污染最为严重,Pb、Zn 也达到中度污染至强污染。本研究结果中,综合污染最为严重的茶坑水库底泥重金属平均含量中 Zn 为 983.11mg/kg, Cu 为 360.87mg/kg, Cd 为 3.35mg/kg, Pb 为 473.05mg/kg。粤北的西牛潭水库、花山水库、湖朗水库、三坑水库、冲源水库及金龙高水库等周边生态环境较好,除部分水库库区内存在种植和养殖现象外,没有矿产开采点。与库区周边存在矿产开采现象的水库相比,这几宗水库其底泥中各种重金属的含量相对较低。如金龙高水库底泥 Zn 含量为 74.83mg/kg, Cu 含量为 11.46mg/kg, Cr 为 38.70mg/kg, Cd 含量为 0.11mg/kg。

粤东和粤中地区工矿企业较集中,采矿业对周边环境造成一定污染^[26]。粤东地区的老园水库周边有稀土矿开采;河溪水库和翁内水库周边均有采石场;岗山水库周边有钨锡矿、公平水库周边原有硫铁矿的开采、天堂山水库上游多处瓷土矿、铅锌矿开采点。上述水库周边矿产开采产生的废水、废渣是水库底泥重金属污染的重要来源。如底泥各项重金属含量均相对较高的岗山水库其 Zn 含量高达 635.32mg/kg, Cu 含量为

329.43mg/kg, Cr 为 34.94mg/kg, Pb 含量达到 108.53mg/kg。结合底泥数据分析及库区周边环境实地调查结果,可以认为,岗山水库周边的钨锡矿开采产生的废水、废渣是水库底泥重金属污染的主要原因。粤东地区其他水库周边生态环境较好,水库底泥重金属含量相对较低。

粤中地区四宗水库中,在水库库区内均存在生活排污入库的现象,同时同沙水库上游有工厂,东风水库库尾有工业区分布。从粤中水库底泥重金属含量分析结果来看,以同沙水库和东风水库底泥重金属含量较高,其中 Zn 含量分别为 669.07mg/kg 和 368.28mg/kg; Cu 含量为 89.42mg/kg 和 73.38mg/kg; Cr 含量为 88.33mg/kg 和 49.50mg/kg; Cd 含量为 0.28mg/kg 和 0.98mg/kg; Pb 含量分别为 84.00mg/kg 和 103.21mg/kg。牛红义等^[28]对地处粤中地区的珠江广州河段表层沉积物中重金属的研究表明,接纳了较多城市工业废水和生活污水的断面沉积物中重金属污染均比较严重。本文研究分析结果表明,粤中地区水库底泥重金属污染一定程度上受周边生活排污的影响,但总体上库区周边工矿废水等的排放对底泥的污染更为严重。

粤西地区厂矿不多,严重的重金属污染尚限于个别地区^[26]。粤西地区 12 宗水库中,库区周边均存在农业种植、库内养殖现象,其中连环水库位于阳江市,其城市废水排放对水库污染较重。除青南角水库上游存在金矿开采、高州水库库区内有炼钢厂外,其他水库周边没有采矿现象。水库底泥重金属含量分析结果表明,连环水库底泥重金属 Zn、Cu 和 Pb 含量高于其他 11 宗水库,分别为 342.23、97.68mg/kg 和 111.74mg/kg;官田水库 Cr 含量较高,为 330.47mg/kg;合水水库 Cd 含量相对较高,为 0.28mg/kg。结合实地调研和采样分析结果,库区周边的污水排放对粤西水库底泥有一定的污染,种植、养殖引起的重金属污染则相对较轻。

广东大中型水库底泥重金属潜在生态风险评价表明,粤北大中型水库底泥重金属潜在生态风险指数最高,生态危害“强”;粤东和粤中地区大中型水库底泥重金属属于“中等”潜在生态危害程度,粤西大中型水库底泥重金属潜在生态风险最低,为“轻微”状态。从大中型水库底泥重金属生态危害评价表中(表 3)可以看出, Cd 潜在生态风险系数较高是导致粤北水库底泥重金属潜在生态风险呈现“强”、粤东和粤中水库底泥重金属呈“轻微”程度的主要原因。与其他四种重金属比较, Cd 的毒性响应系数 T_r^i 相对较高,进而使得其潜在生态风险系数 E_r^i 和潜在生态风险指数 RI 的计算结果较大,因此 Cd 较 Cu、Zn、Pb 和 Cr 的潜在生态风险较大。本文研究结果表明,在影响水库底泥重金属含量和潜在生态危害的各种因素中,由采矿所引起的重金属污染对水库底泥环境的影响最为严重,其次是工厂企业及生活排污,种植、养殖等农业生产活动所导致的危害程度相对较低。

4 结论

(1)广东大中型水库底泥不同程度的受到重金属污染。除 Cr 外,水库底泥中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 四种重金属含量平均值均明显高于广东省土壤重金属含量背景值,表现出明显的富集累积趋势。

(2)总体上,粤北地区大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量较高,其次是粤东和粤中地区,粤西大中型水库底泥 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量相对较低,但 Cr 含量最高,粤东水库底泥 Cr 含量最低。粤东和粤北大中型水库底泥 Cd 的富集系数明显高于其他重金属;粤中和粤西大中型水库底泥 Cu 富集系数在五种重金属中较高。

(3)重金属潜在生态风险评价表明,粤北大中型水库底泥重金属具有很强的生态风险,其中 Cd 潜在生态风险系数最大;其次是粤东和粤中地区,均处于中等生态风险范围内, Cd 具有很强的生态风险;粤西大中型水库底泥重金属属于轻微生态风险。

(4)结合本文研究结果,水库周边的采矿、工业生产、生活排污、农业种植、养殖等人为活动是水库底泥重金属的重要来源。其中,粤北和粤东地区大中型水库底泥重金属主要来源于库区上游及库区内采矿污染;粤中大中型水库底泥重金属除来源于库区周边生活排污外,工矿废水排放是其主要的污染来源;粤西地区大中型水库周边污水排放对水库底泥有一定污染,库区内农业种植和养殖造成的污染相对较轻。上述各种污染因素中,尤以采矿活动对水库底泥重金属影响的最为严重。

References:

- [1] Li L F, Zeng X B, Li G X, *et al.* Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27

- (2): 289—297.
- [2] Li Y, Yu Z M, Song X X. Application of principal component analysis (PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments. *Environmental Science*, 2006, 7(1): 137—141.
- [3] Hawa Bibi M, Faruque Ahmed, Hiroaki Ishiga. Assessment of metal concentrations in lake sediments of southwest Japan based on sediment quality guidelines. *Environmental Geology*, 2007, 52: 625—639.
- [4] Stead-Dexter K, Ward N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater. *Science of the Total Environment*, 2004, 334-335: 271—277.
- [5] Wakida F T, Lara-Ruiz D, Temores-Pena J, *et al.* Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico. *Environmental Geology*, 2008, 54: 637—642.
- [6] Li X D, Onyx W H, Wai, Li Y S, *et al.* Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(5): 567—581.
- [7] Fan W H, Zhang B, Chen J S, *et al.* Pollution and potential biological toxicity assessment using heavy metals from surface sediments of Jinzhou Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6): 1000—1005.
- [8] Brekhovskikh V F, Volkova Z V, Kocharyan A G. Heavy Metals in the Ivan'kovo Reservoir Bottom Sediments. *Water Resources*, 2001, 28: 278—287.
- [9] Li Liu, Fasheng Li, Daiqun Xiong, *et al.* Heavy metal contamination and their distribution in different size fractions of the surficial sediment of Haihe River, China. *Environmental Geology*, 2006, 50: 431—438.
- [10] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Bu-yak Menderes and Gediz river sediments. *Water Research*, 2003, 37(4): 813—822.
- [11] Marengo E, Gennaro M C, Robottie E, *et al.* Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida River sediments. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 560: 172—183.
- [12] Lin Q Q, Zhao S Y, Han B P. Rotifer distribution in tropical reservoirs, Guangdong Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1123—1131.
- [13] Lin Q Q, Hu R, Duan S S, *et al.* Phytoplankton composition and distribution in typical reservoirs of Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1101—1108.
- [14] Hu R, Lin Q Q, Wang Z H, *et al.* Phytoplankton composition and distribution in typical reservoirs of Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1939—1944.
- [15] Chen Z H, Fang G X, Li X H, *et al.* Sedimentation control of the large-and medium-sized reservoirs in mountain areas of Guangdong. *Tropical Geography*, 2007, 27(5): 429—434.
- [16] Zhang J, Wang S Q, Xie Y, *et al.* Distribution and Pollution Character of Heavy Metals in the Surface Sediments of Liao River. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2413—2418.
- [17] General detailed soil survey office of Guangdong province. *Soils of Guangdong*. Beijing: Science Press, 1993. 621.
- [18] Shan L L, Yuan X Y, Mao C P, *et al.* Characteristics of heavy metals in sediments from different sources and their ecological risks in the lower reaches of the Yangtze River. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2399—2404.
- [19] Loska K, Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, 51: 723—733.
- [20] Long E R, McDonald D, Smith S I, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments and biota. *Marine Environmental Residues*, 1995, 19: 81—87.
- [21] Cao H C, Luan Z Q, Wang J D, *et al.* Potential ecological risk of cadmium, lead and arsenic in agricultural black soil in Jilin Province, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2009, 23: 57—64.
- [22] Wang L P, Zhou X W, Zheng B H, *et al.* Sediments eco-environmental quality assessment in the Changjiang Estuary and its adjacent waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2191—2198.
- [23] Ren H L, Cui B S, Bai J H, *et al.* Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani Terrace core zone and assessment on its potential ecological risk. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1625—1634.
- [24] Sun X, Li D C, Tu Y C, *et al.* Changes of soil and water loss in Guangdong Province. *Soils*, 2008, 40(3): 382—385.
- [25] Susana O R, Daniel D LR, Lazaro L, *et al.* Assessment of heavy metal levels in Almendares river sediments-Havana City, Cuba. *Water Research*, 2005, 39: 3945—3953.
- [26] General detailed soil survey office of Guangdong province. *Soils of Guangdong*. Beijing: Science Press, 1993. 628—631.
- [27] Fu S M, Zhou Y Z, Zhao Y Y, *et al.* Study on heavy metals in soils contaminated by acid mine drainage from Dabaoshan Mine, Guangdong.

Environmental Science, 2007, 28 (4): 805—812.

- [28] Niu H Y, Wu Q H, Chen X G. Study on the ecological risk of heavy metals in the surface sediments in Guangzhou section of the pearl river. Acta Hydrobiologica Sinica, 2008, 32(6): 802—810.

参考文献:

- [1] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价. 环境科学学报, 2007, 27(2): 289~297.
- [2] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源. 环境科学, 2006, 7(1): 137~141.
- [7] 范文宏, 张博, 陈静生, 等. 锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1000~1005.
- [12] 林秋奇, 赵帅营, 韩博平. 广东省水库轮虫分布特征. 生态学报, 2005, 25(5): 1123~1131.
- [13] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应. 生态学报, 2003, 23(6): 1101~1108.
- [14] 胡韧, 林秋奇, 王朝晖, 等. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征. 生态学报, 2002, 22(11): 1939~1944.
- [15] 陈朝辉, 方国祥, 李鑫华, 等. 广东山区大中型水库淤积与整治. 热带地理, 2007, 27(5): 429~434.
- [16] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究. 环境科学, 2008, 29(9): 2413~2418.
- [17] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤. 北京: 科学出版社, 1993. 621.
- [18] 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 等. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险. 环境科学, 2008, 29(9): 2399~2404.
- [22] 王丽萍, 周晓蔚, 郑丙辉, 等. 长江口及毗邻海域沉积物生态环境质量评价. 生态学报, 2008, 28(5): 2191~2198.
- [23] 任华丽, 崔保山, 白军红, 等. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险. 生态学报, 2008, 28(4): 1625~1634.
- [24] 孙昕, 李德成, 俞元春, 等. 广东省水土流失的动态演变. 土壤, 2008, 40(3): 382~385.
- [26] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤. 北京: 科学出版社, 1993. 628~631.
- [27] 付善明, 周永章, 赵宇鵒, 等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染. 环境科学, 2007, 28(4): 805~812.
- [28] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的生态风险研究. 水生生物学报, 2008, 32(6): 802~810.