

广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究

胡国成, 许振成*, 彭晓武, 赵学敏, 刘伟锋, 姚玲爱, 周 杨, 邹 洁

(环境保护部华南环境科学研究所城市环境研究中心, 广州 510655)

摘 要:采用原子吸收方法分析了广东蕉岭长潭水库表层沉积物重金属(Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg)含量水平,以广东省红壤重金属环境背景值和我国《土壤环境质量标准》Ⅰ级自然背景值为参比标准,采用地积累指数和 Håkanson 潜在生态危害指数法对长潭水库表层沉积物重金属污染特征及其生态风险进行评价。结果表明,长潭水库表层沉积物重金属污染较轻,Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As 和 Hg 平均含量分别为 55.7、65.1、280.9、30.7、16.2、10.9 mg·kg⁻¹ 和 0.05 mg·kg⁻¹,Cd 在所有沉积物中未检出。重金属地积累指数和潜在生态风险指数评价结果显示,长潭水库处于无污染至中度污染范畴,具有轻微潜在生态风险。工农业生产、生活污水排放及旅游观光等人为活动及自然因素是长潭水库重金属污染的重要来源。对库区上游的农业面源污染应引起相关部门重视。

关键词:重金属;污染特征;生态风险评价;沉积物;长潭水库

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)06-1166-06

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China

HU Guo-cheng, XU Zhen-cheng*, PENG Xiao-wu, ZHAO Xue-min, LIU Wei-feng, YAO Ling-ai, ZHOU Yang, ZOU Jie

(Urban Environment Research Center, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The concentrations of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg) in eight surface sediment samples from Changtan Reservoir, Guangdong Province were analyzed by using atomic absorption spectroscopy. Pollution characteristics of heavy metals were observed on the basis of background values of heavy metals in red soil of Guangdong Province and Grade I values of the National Standard of Soil Environmental Quality. Potential ecological risk assessment was evaluated by using the geoaccumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (RI). The results indicated that the sediments from Changtan Reservoir had been slightly contaminated by heavy metals. The average concentrations of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, As and Hg in surface sediments from Changtan Reservoir were 55.7 mg·kg⁻¹, 65.1 mg·kg⁻¹, 280.9 mg·kg⁻¹, 30.7 mg·kg⁻¹, 16.2 mg·kg⁻¹, 10.9 mg·kg⁻¹ and 0.05 mg·kg⁻¹, respectively. Cd was not detected in all samples. According to the geoaccumulation index, the pollution degree of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir ranged from zero pollution to moderate degree. The potential ecological risk of heavy metals was slight degree. Natural factors and anthropogenic activities contributed to potential sources of heavy metals in Changtan Reservoir, which included industrial and agricultural activities, untreated sewage discharge, and tourism activities. Environmental management should pay attention to the surface source pollution in the upstream of Changtan Reservoir.

Keywords: heavy metals; pollution characteristics; ecological risk assessment; sediment; Changtan Reservoir

收稿日期:2010-12-01

基金项目:中央级公益性科研院所专项资金项目(zx_200910_26);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07527-005)

作者简介:胡国成(1978—),男,河北承德人,博士,研究方向为水生生态学。E-mail: huguocheng@scies.org

* 通讯作者:许振成 E-mail: xuzhencheng@scies.org

重金属是广泛存在于自然界的元素,研究某地区重金属元素在沉积物中的含量和分布,可以揭示重金属元素在该区域的污染程度。在特定的环境地球化学条件下,水库沉积物中重金属可通过一系列物理、化学和生物过程而释放出来,导致水环境“二次污染”,严重威胁水库生态环境安全^[1-3]。因此,沉积物中重金属含量常被用作判别水环境质量的重要参考指标。研究重金属含量水平及其变化规律,有助于了解沉积物中重金属元素的地球化学演化特征及潜在的环境效应,有利于探讨流域或库区人类活动和自然环境相互作用的过程。

长潭水库位于广东省梅州市蕉岭县长潭镇,西邻平远县,北靠福建省武平县,南以长潭水库大坝为界,集水面积 1 990 km²,总库容 1.72 亿 m³,多年平均流量 55.8 m³·s⁻¹。长潭水库是一座以发电为主,兼有防洪、灌溉、供水、旅游等功能的大型水库,是梅州市和蕉岭县城的备用水源地。长潭水库库尾处在福建省和广东省交界处,库尾由福建武平县境内的武平河和广东省平远县的差干河在蕉岭县合子口汇合而成,如图 1 所示。

近年来,随着库区经济的发展,工业点源及农业面源污染加剧,长潭水库水质呈逐年下降趋势,每年高温季节均出现不同程度的阶段性蓝藻“水华”现象。目前,关于长潭水库生态环境的研究主要集中在库区周边土壤有机碳含量^[4-6]、植被类型^[7]等方面,关于沉积物重金属污染尚未见报道。本文以长潭水库沉积物为研究对象,分析 8 种重金属的污染特征及其分布规律,评估潜在生态风险,解析污染来源,以期防治长潭水库重金属污染,保障梅州市及蕉岭县供水安全,保护水库周边生态环境及合理开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2010 年 6 月,用彼得逊采泥器在长潭水库采集表层(0~10 cm)沉积物样品,采样点经纬度如表 1 所示,采样点分布如图 1 所示。各样点均取样 3 次,混合均匀后,取 1 kg 保存于洁净的密封袋中,运回实验室后 4 ℃保存备用。沉积物样品经真空冷冻干燥机干燥,研磨,用 200 目筛网过筛后待分析。

1.2 样品分析与测试

准确称取样品 0.5 g 放入聚四氟乙烯烧杯中,加入浓硝酸 5.0 mL,氢氟酸 2.0 mL 后,平板加热至近干,再加入 1.0 mL 高氯酸,加热至白烟冒尽,冷却。然后用 5 mL 稀硝酸(体积比为 1:1)溶解烧杯中的残留物,转移至 25 mL 容量瓶定容,过滤待测,并作空白样品。利用石墨炉原子吸收分光光度法测定 Pb 和 Cd 含量;利用火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Zn、Cr 和 Ni 含量;利用冷原子吸收法测定沉积物中总汞含量。样品分析测定所用仪器为岛津 6800 型原子吸收分光光度计。利用双道原子荧光光度计(AFS-230a 2001-12224,北京万拓仪器有限公司)测定 As^[8]。测试过程中用程序空白、标准物质 GSD-12(GBW07312)及样品平行样来控制测试的准确性和精确性。标准物质中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 的变异系数分别为 2.7%、3.9%、3.6%、8.6%、10.2%、7.5%、3.9% 和 10.7%,均小于 15%,说明该分析方法具有较高的精确性和准确度,分析结果符合质控要求。

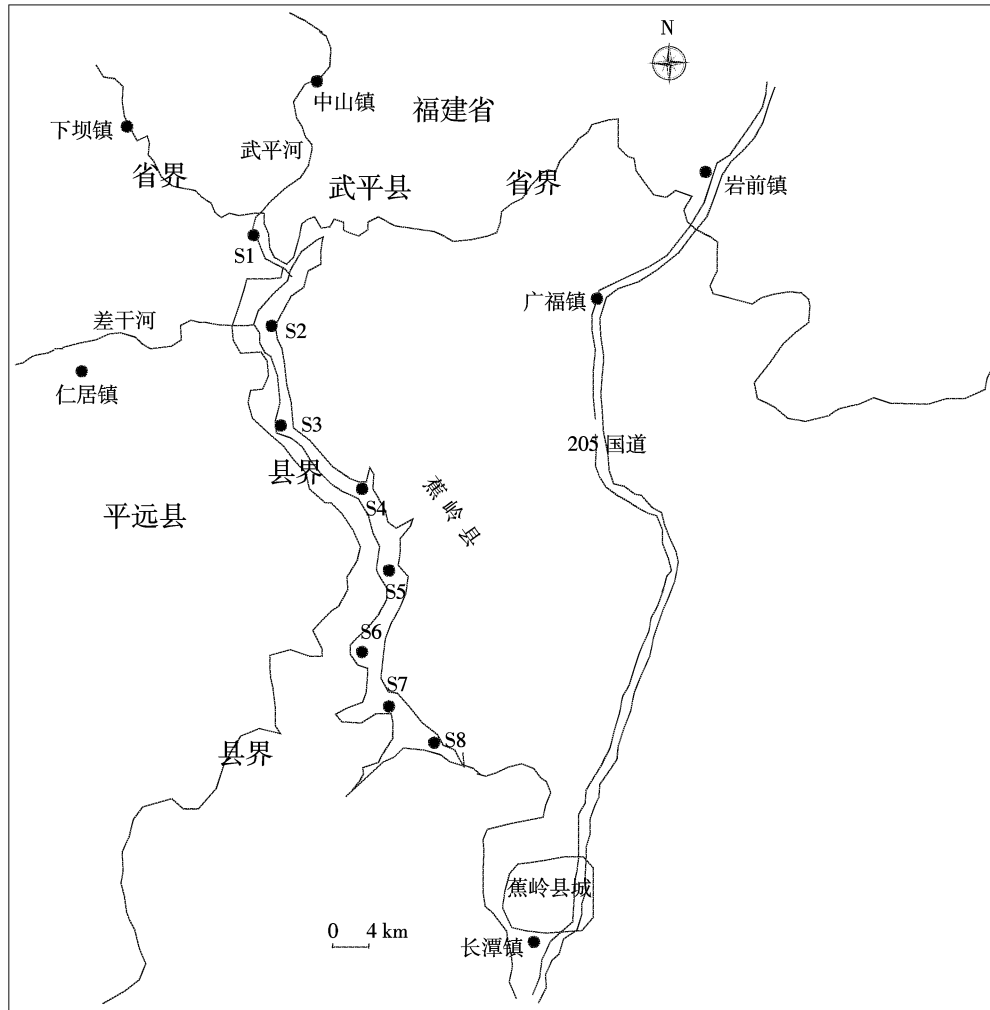
1.3 环境风险评价

1.3.1 地积累指数法

地积累指数法(I_{geo})是德国科学家 Müller 提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[9],

表 1 广东蕉岭长潭水库沉积物采样位点描述
Table 1 The description of sample sites from Changtan Reservoir, Guangdong Province

编号	名称	地理坐标(N,E)		备注
S1	圆丰电站	24°51′26.4″	116°04′43.4″	位于武平河上,来自福建省武平县
S2	普滩码头	24°49′29.1″	116°04′30.0″	位于差干河汇入长潭水库处
S3	西山渡口	24°48′05.6″	116°05′11.9″	有蓝藻“水华”,库区漂浮垃圾
S4	沙坪电站	24°46′29.2″	116°06′29.5″	有蓝藻“水华”,库区漂浮垃圾
S5	竹叶峰	24°42′53.7″	116°07′00.0″	有蓝藻“水华”,库区漂浮垃圾
S6	八溪	24°42′53.6″	116°06′59.7″	位于旅游山庄附近
S7	百美	24°42′25.1″	116°07′20.9″	位于旅游山庄附近
S8	水库坝上	24°42′16.4″	116°07′47.1″	位于长潭水库大坝前 500 m



S1-圆丰电站, S2-普滩码头, S3-西山渡口, S4-沙坪电站, S5-竹叶峰, S6-八溪, S7-百美, S8-水库坝上

S1-Yuanfen Station, S2-Putan Station, S3-Xishan Station, S4-Shaping Station, S5-Zhuyefeng, S6-Baxi, S7-Baimei, S8-Changtan Dam

图 1 长潭水库表层沉积物采样示意图

Figure 1 Sampling sites of surface sediments in Changtan Reservoir, Guangdong Province

其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right)$$

式中: C_n 是元素 n 在沉积物中的含量; B_n 为沉积岩(即普通页岩)中该元素的地球化学背景值, 本文采用蕉岭地区红壤重金属环境背景值作为参比值^[10]; 1.5 为修正系数。

按 I_{geo} 数值可将重金属污染划分为 7 个等级, 分别为: (0) 清洁 ($I_{geo} < 0$)、(1) 轻度 ($0 < I_{geo} < 1$)、(2) 偏中度 ($1 < I_{geo} < 2$)、(3) 中度 ($2 < I_{geo} < 3$)、(4) 偏重 ($3 < I_{geo} < 4$)、(5) 严重 ($4 < I_{geo} < 5$)、(6) 极重污染 ($I_{geo} > 5$)^[11]。

1.3.2 潜在生态风险指数法

采用瑞典学者 Hakanson 潜在生态危害指数法对长潭水库沉积物重金属潜在生态风险进行评价^[12]。潜

在生态危害指数集中反映了表层沉积物中重金属的含量、种类、毒性水平及水体对重金属污染的敏感性。根据该方法, 沉积物中多种重金属的潜在生态风险指数 RI 表示为:

$$RI = \sum_i^m E_i^i = \sum_i^m T_i^i \times \frac{C_i^i}{C_n^i}$$

式中: C_i^i 为单一元素实测值; C_n^i 为单一元素背景参考值, 蕉岭长潭自然保护区土壤类型为红壤^[7], 本文采用蕉岭地区红壤重金属环境背景值作为参比值^[10]; T_i^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数; E_i^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数。

依据重金属的潜在生态危害指数 (RI) 可将沉积物中重金属污染程度划分为 4 个等级。重金属的参比值、毒性系数和评价标准如表 2、表 3 所示。

表 2 重金属元素参比值(C_n^i)及毒性系数(T_i^i)								
Table 2 Reference values and toxicity coefficients of different heavy metals								
元素	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	Cd	As	Hg
$C_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	14.38	34.38	48.75	13.00	43.25	0.034	10.50	0.075
T_i^i	5	5	1	2	2	30	10	40

表 3 重金属潜在生态危害系数(E_i^i)、危害指数(RI)与危害程度分级的关系		
Table 3 Relationship between potential ecological risk coefficients (E_i^i), risk indices(RI)of heavy metals and pollution degree		
E_i^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

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量水平

长潭水库表层沉积物中 8 种重金属含量水平见表 4。从表 4 可以看出,长潭水库沉积物中 Cd 的含量低于仪器检出限(小于 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),因此在风险评估时不考虑该元素;其他 7 种重金属含量水平由高到底的顺序为 $\text{Zn}>\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Cr}>\text{Ni}>\text{As}>\text{Hg}$ 。不同监测位点重金属含量水平存在差异,Cu、Pb、Zn 和 Ni 的含量水平在沙坪电站(S4)最低,分别为 32.6 、 28.1 、 54.2 、 $10.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Cr 和 Hg 的含量水平在百美(S7)最低,分别为 $7.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;普滩码头(S2)As 含量最低($5.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。Cu、Pb、Zn 的含量水平分别在西山渡口(S3)、八溪(S6)、普滩码头(S2)最高,分别为 83.7 、 117.0 、 $428.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Cr 和 Hg 的含量水平在圆

表 4 长潭水库表层沉积物重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
Table 4 Heavy metals concentrations in surface sediments from Changtan Reservoir, Guangdong Province($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
采样点	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni	Cd	As	Hg
S1	46.2	49.9	46.9	77.6	19.6	<0.1	10.2	0.06
S2	46.9	36.8	26.6	428.1	11.2	<0.1	5.7	0.05
S3	83.7	62.6	32.5	394.0	14.5	<0.1	5.9	0.06
S4	32.6	28.1	20.6	54.2	10.7	<0.1	7.2	0.05
S5	59.7	69.8	33.3	294.4	16.1	<0.1	8.4	0.06
S6	52.6	117.0	39.4	402.2	17.2	<0.1	14.3	0.02
S7	71.2	80.8	7.15	340.2	23.6	<0.1	23.4	0.02
S8	52.7	75.5	38.7	257.0	16.9	<0.1	12.0	0.04

丰电站(S1)最高,分别为 $46.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Ni 和 As 的含量水平在百美(S7)最高,分别为 $23.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $23.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

长潭水库功能定位为国家水源保护区,对水环境质量要求较高。本文利用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) I 级标准来评价长潭水库沉积物中重金属的污染情况^[13]。长潭水库沉积物中 Cr、Ni、As 和 Hg 的平均含量均低于国家《土壤环境质量标准》I 级自然背景值;Cu、Zn 和 Pb 的平均含量超出自然背景值(I 级标准),但是超标倍数不高,分别为 2、2 和 3。与广东省其他水库沉积物重金属比较,梅州蕉岭长潭水库重金属含量低于粤东、粤北和粤中地区水库沉积物重金属含量^[14]。不同重金属在长潭水库沉积物中的含量水平及分布趋势显示:长潭水库受重金属污染轻微,生态环境质量良好。

2.2 沉积物中重金属来源

一般情况下,重金属等污染物通过大气沉降、废水排放、雨水淋溶与冲刷等途径进入水体,最后沉降到沉积物中并富集。长潭水库沉积物中的重金属含量水平差异性与该地区的自然因素和人为活动有密切关系。蕉岭县地处亚热带海洋性季风气候区,矿产资源丰富;地质构造比较复杂,岩石类型主要有砂页岩、侵入岩、石灰岩、变质岩等,构成山地、丘陵、盆地等地貌^[15]。长潭水库地形以丘陵、山地为主,山地坡度多在 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[7]。在风化侵蚀、雨水冲刷等自然因素的综合作用下,导致库区周边土壤中矿物质元素向水库内迁移,增加库区沉积物中重金属含量。

除自然因素外,人为活动可能是造成长潭水库沉积物中重金属污染的另一来源。一些工农业生产活动包括采矿、金属冶炼、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^[16]。长潭水库库区周边生态环境现状的调查结果表明:福建省武平县岩前镇、中山镇、下坝乡及广东平远县仁居镇有造纸、稀土开采及氮肥厂等企业;长潭水库上游的畜禽养殖废水未经过任何处理直接排入武平河和差干河;库区周边村镇则排放一定量的生活污水。另外,在八溪(S6)、百美(S7)和水库大坝(S8),旅游观光的车船排放一定量的废气。上述污染源的存在是导致长潭水库重金属污染的重要原因。

2.3 沉积物中重金属污染评价

2.3.1 地积累指数法

蕉岭长潭水库沉积物重金属地积累指数(I_{geo})和

指数分级如表 5 所示。可以看出,长潭水库沉积物中 Ni、Cr、As 和 Hg 的 I_{geo} 小于 0,说明长潭水库 8 个采样点均未受到上述 4 种重金属元素的污染。这一研究结果与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)相比的结果基本一致。Cu、Pb 和 Zn 在沙坪电站(S4)的 I_{geo} 值最低,属于无污染至轻度污染水平;在其他采样位点,上述 3 种重金属元素 I_{geo} 值介于 1~3 之间,属于轻度污染至中度污染水平,其中,Zn 是主要污染元素,在 8 个采样点中有 5 个采样点 I_{geo} 值大于 2,分级为 3,其次是 Cu 和 Pb。综上所述,长潭水库重金属污染程度强弱顺序为 $Zn>Cu>Pb>Ni\approx Cr\approx As\approx Hg$ 。

2.3.2 潜在生态风险指数法

根据 Håkanson 潜在生态风险指数法,计算长潭水库表层沉积物中重金属生态风险系数(E_i^r)和生态风险指数(RI),其结果如表 6 所示。长潭水库沉积物中 7 种重金属的生态风险系数(E_i^r)从大到小的顺序为 $Hg>Cu>As>Pb>Zn>Ni>Cr$,平均值分别为 24.5、19.4、10.4、9.5、5.8、2.5、1.4。与表 2 的评价标准相比,均低于 40,属轻微的生态风险危害。潜在生态风险指数(RI)评价表明:长潭水库沉积物重金属潜在生态风险较低(低于 150),属轻微的生态风险危害。

2.3.3 评价结果比较与分析

对某个区域的重金属污染评价,需要用多种方法进行比较评价,以保证结果的准确性与科学性。地积累指数法和 Håkanson 潜在生态风险指数法都是通过测定重金属含量与背景值相比,但是两种方法各有侧重。地积累指数法主要反映外源重金属的富集程度,而 Håkanson 潜在生态风险指数法侧重考虑不同金属的生物毒性影响。本研究按照地积累指数评价重金属污染程度,其强弱顺序为 $Zn>Cu>Pb>Ni\approx Cr\approx As\approx$

表 6 长潭水库表层沉积物潜在生态危害系数和危害指数

Table 6 Potential ecological risk coefficient s(E_i^r) and risk indices (RI) of heavy metals in surface sediments from Changtan Reservoir, Guangdong Province

采样点	生态危害系数(E_i^r)							危害指数(RI)
	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	As	Hg	
S1	16.1	7.3	1.6	3.0	2.2	9.7	32.6	72.4
S2	16.3	5.4	8.9	1.7	1.2	5.4	28.4	67.2
S3	29.1	9.1	8.1	2.2	1.5	5.6	31.9	87.5
S4	11.3	4.1	1.1	1.6	1.0	6.9	25.7	51.7
S5	20.7	10.2	6.1	2.5	1.5	8.0	32.3	81.2
S6	18.3	17.0	8.3	2.6	1.8	13.6	11.6	73.2
S7	24.8	11.8	7.0	3.6	0.3	22.3	11.1	80.9
S8	18.3	11.0	5.3	2.6	1.8	11.4	22.5	72.9

Hg,而 7 种重金属的生态风险系数(E_i^r)从大到小的顺序为 $Hg>Cu>As>Pb>Zn>Ni>Cr$ 。本文选用蕉岭地区红壤重金属元素背景值作为参比指标,消除了空间异质性的影响。重金属元素毒性系数差别较大很可能导致两种方法评价结果不一致。Hg 的毒性系数最大(40),虽然沉积物中 Hg 的含量较低,但是其潜在的生态风险应引起注意。

3 结论

(1)广东蕉岭长潭水库表层沉积物受到重金属不同程度污染。8 种重金属平均含量水平由高到低的顺序为 $Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As>Hg>Cd$ 。Zn、Pb 和 Cu 的含量水平高于《土壤环境质量标准》自然背景值;Cr、Ni、As、Hg 和 Cd 的含量低于《土壤环境质量标准》自然背景值。

(2)长潭水库周边地区的农业生产(种植、养殖等)、工业生产(造纸、采矿、化肥等)、生活排污、旅游

表 5 长潭水库表层沉积物重金属元素地积累指数和划分等级

Table 5 Index of geoaccumulation(I_{geo}) and classification of heavy metals pollution of the surface sediments from Changtan Reservoir, Guangdong Province

采样点	Cu		Pb		Zn		Ni		Cr		As		Hg	
	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
S1	1.1	2	-0.1	0	0.1	1	0.0	0	-0.5	0	-0.6	0	-0.9	0
S2	1.1	2	-0.5	0	2.6	3	-0.8	0	-1.3	0	-1.5	0	-1.1	0
S3	1.9	2	0.3	1	2.4	3	-0.4	0	-1.0	0	-1.4	0	-0.9	0
S4	0.6	1	-0.9	0	-0.4	0	-0.9	0	-1.7	0	-1.1	0	-1.2	0
S5	1.5	2	0.4	1	2.0	3	-0.3	0	-0.9	0	-0.9	0	-0.9	0
S6	1.3	2	1.2	2	2.5	3	-0.2	0	-0.7	0	-0.1	0	-2.4	0
S7	1.7	2	0.7	1	2.2	3	0.3	0	-3.2	0	0.6	0	-2.4	0
S8	1.3	2	0.6	1	1.8	2	-0.2	0	-0.7	0	-0.4	0	-1.4	0

观光等人为活动及自然因素是水库沉积物重金属污染的重要来源。尤其是水库上游养猪业对武平河和差干河的水质影响较大。

(3)地积累指数评价结果表明:长潭水库表层沉积物重金属污染较轻,处于无污染至中度污染程度,其中Cu、Pb和Zn的污染程度较强。

(4)根据单个重金属的潜在生态危害系数和多个重金属的潜在生态危害指数的评价结果:长潭水库表层沉积物重金属对水库生态系统的潜在危害非常小,属于轻微潜在生态危害范畴,顺序为 $Hg>Cu>As>Pb>Zn>Ni>Cr$ 。

参考文献:

- [1] Almeida C, Mucha A, Vasconcelos M. Influence of the sea rush *Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant[J]. *Environmental Science Technology*, 2004, 38(11):3112-3118.
- [2] Bryan W, Langston W. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1992, 76(2):89-131.
- [3] 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 湖泊沉积物中微量金属二次迁移过程中微生物作用的实验研究[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(1):49-56.
- WANG Fu-shun, LIU Cong-qiang, LIANG Xiao-bing, et al. Impact on the remobilization of trace metals in lake sediments by micro-organisms [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(1):49-56.
- [4] 张友胜, 黄国阳, 郑定华, 等. 长潭自然保护区不同功能区森林土壤有机碳分布规律[J]. *热带林业*, 2009, 37(3):1-4.
- ZHANG You-sheng, HUANG Guo-yang, ZHENG Ding-hua, et al. Soil organic carbon contents in relation to vegetation types in Changtan Nature Reserve, Guangdong Province[J]. *Tropic Forestry*, 2009, 37(3):1-4.
- [5] 张友胜, 郑定华, 李海. 广东长潭自然保护区土壤有机碳含量与植被类型的关系[J]. *广东林业科技*, 2009, 25(5):46-49.
- ZHANG You-sheng, ZHENG Ding-hua, LI Hai. Soil organic carbon contents in relation to vegetation types in Changtan Nature Reserve, Guangdong Province[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2009, 25(5):46-49.
- [6] 周毅, 黎艳明, 郭乐东, 等. 蕉岭长潭省级自然保护区表土有机碳研究[J]. *广东林业科技*, 2009, 25(5):1-7.
- ZHOU Yi, LI Yan-ming, GUO Le-dong, et al. The Research on topsoil organic carbon in Jiaoling Changtan Nature Reserve, Guangdong Province[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2009, 25(5):1-7.
- [7] 钟锡均, 周毅, 钟军民, 等. 广东蕉岭长潭自然保护区主要森林植被类型的调查[J]. *广东林业科技*, 2006, 22(2):50-53.
- ZHONG Xi-jun, ZHOU Yi, ZHONG Jun-min, et al. The investigation of mainly forestry community characteristic in Jiaoling Changtan Nature Reserve, Guangdong Province[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2006, 22(2):50-53.
- [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.
- China Environmental Monitoring Center. Analysis methods of heavy metals in soils[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [9] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3):108-118.
- [10] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. *华南农业大学学报*, 1996, 17(4):58-62.
- XU Lian-feng, LIU Teng-hui. The Zonal differentiation of soil environmental background values and critical contents in Guangdong[J]. *Journal South China Agricultural University*, 1996, 17(4):58-62.
- [11] Santos B J C, Beltran R, Gomez A J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (Southwest Spain)[J]. *Environmental International*, 2002, 29(1):69-77.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(1):975-1000.
- [13] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准[S]. 北京, 1995.
- Ministry of Environmental Protection. Environmental quality standard for soils[S]. Beijing, 1995.
- [14] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 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[J]. *生态学报*, 2009, 29(11):6059-6067.
- NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai, et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium scaled reservoirs in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6059-6067.
- [15] 蕉岭年鉴编辑部. 蕉岭年鉴[M]. 2009.
- [16] Susana O, Daniel D L R, Lazarol, et al. Assessment of heavy metal levels in Almendares river sediments Havana City, Cuba [J]. *Water Research*, 2005, 39(16):3945-3953.

致谢: 广东省蕉岭县环保局李辉等同志参与样品采集工作;环境保护部华南环境科学研究所分析测试中心陈晓燕工程师、陈亚玲工程师参与样品分析测试工作,在此表示感谢!