ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第5期
2012年5月15日

目 次

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险

邓代永[1,2,3], 孙国萍[1,2,3], 郭俊[1,2,3], 张宏涛[1,2,3], 张琴[1,2,3], 许玫英[1,2,3]*

(1. 广东省微生物研究所, 广州 510070; 2. 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070; 3. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广州 510070)

摘要: 为了解电子电器制造业聚集区纳污水体沉积物中重金属含量及其潜在的生态风险, 对广东佛山市顺德区容桂镇电器工业区河涌沉积物重金属含量进行了空间和垂直分布以及生态风险评估的研究. 根据电器制造业分布区域特点, 结合河涌水流情况选取 12 个采样点采集沉积物样品. 分析结果表明, 内河涌重金属污染状况严重. 各监测点元素 Cu、Zn、Cr、Pb、As、Cd、Hg 的浓度范围分别为 70.1 ~ 3 525.5、378.1 ~ 2 994、130.9 ~ 4 791.5、65.8 ~ 374.7、19.2 ~ 56.8、0.5 ~ 4.9、0.3 ~ 2.1 $mg \cdot kg^{-1}$. 各重金属元素的污染蓄积程度由强至弱依次为: Cd > Cu > Zn > Cr > Hg > Pb > As, 其中 Cd 和 Cu 的污染蓄积平均指数达到极强程度. 重金属在河道中潜在的生态危害由强至弱依次为: Cu > Hg > Cd > Cr > Pb > Zn > As, 其中 Cu、Hg 和 Cd 平均风险系数达到很强程度, 部分监测位点达到极强程度. 元素地累积状况和生态风险由下至上垂直分布模式中, Cu、Zn、Pb、Hg 和 As 有逐步减弱趋势, 高生态风险元素 Cd 由下至上从减少到稍有增加, 元素 Cr 则有稳定增加的趋势.

关键词: 沉积物; 重金属污染; 分布模式; 地累积指数; 潜在生态危害指数

中图分类号: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)05-1700-07

Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone

DENG Dai-yong[1,2,3], SUN Guo-ping[1,2,3], GUO Ju[1,2,3], ZHANG Hong-tao[1,2,3], ZHANG Qin[1,2,3], XU Mei-ying[1,2,3]

(1. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China; 3. State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base) South China, Guangzhou 510070, China)

Abstract: In order to investigate heavy metals contamination status in a river of a typical electrical equipment industrial area, Ronggui, Foshan, 12 sediment simples were sampled for analyzing Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As and Hg. The index of geoaccumulation (I_{geo}) and potential ecological risk index (PERI) were then employed to evaluate the pollution degree of heavy metals in the sediments. The spatial trends results indicate that the sediments in sampling sites have been severely contaminated and the concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr, As and Hg in the samples ranged from 70.1-3 525.5, 378.1-2 994, 130.9-4 791.5, 65.8-374.7, 19.2-56.8, 0.5-4.9, 0.3-2.1 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The descending order of pollution degree of metals was: Cd > Cu > Zn > Cr > Hg > Pb > As, and the average I_{geo} values of Cd and Cu reached severely contamination grade. Similarly, the potential ecological risk intensity caused by different metals was: Cu > Hg > Cd > Cr > Pb > Zn > As, and the average PERI values of Cu, Hg and Cd reached strong grade. Distribution profiles of heavy metals in vertical direction were different with depths. The concentrations of Cu, Zn, Pb, Hg and As reduced from the bottom to the upper layers. The high ecological risk element Cd showed a slight increase in the surface layer, whereas the concentration of Cr steadily increased with the reducing of depth.

Key words: sediments; heavy metals contamination; distribution profile; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

沉积物不但是水环境中外源污染物重要的汇, 在一定条件下又可成为重要的污染源. 由于重金属在沉积物中极强的蓄积和毒害作用, 因此成为水环境污染的重要指示物[1~2]. 水系发达的珠三角地区是我国电器制造业发展最快的地区之一, 大量重金属点源污染在频繁水交换作用下形成了严重的面源污染. 目前该地区重金属污染研究主要集中在流域、库区和湖泊等宏观尺度的污染调查研究[3~15]. 针对佛山地区的重金属污染相关研究大多采用空间或者垂直单一尺度的研究[16~20], 针对电器制造业重金属污染释放对受纳水体污染形成微观机制的报道较少. 从重金属污染蓄积的空间和垂直尺度, 结合潜在生态风险分析对典型电器工业区重金属污染的研究

收稿日期: 2011-07-07; **修订日期**: 2011-08-26

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目(2010B09031048); 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 佛山市院市合作项目(2010YS023); 佛山市顺德区容桂街道科技计划项目; 广东省科学院台站基金项目(sytz201009)

作者简介: 邓代永(1974 ~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为环境微生物污染控制技术研究, E-mail: dengdaiyong@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xumy@gdim.cn

鲜见报道.

“家电之乡”佛山顺德区容桂街道是全国首批千亿镇,在 185 家年产值超过3 000万元企业中,电器加工制造企业有 125 家,占比高达 68%. 该街道是河口三角洲平原,地势西高东低,街道为西江支流环绕成岛, 自然的地理隔离形成了内源污染物迁移规律研究的理想场所. 本研究通过对容桂街道内河涌沉积物中重金属空间尺度和垂直分布的研究,综合解析电器制造业聚集区重金属污染蓄积历史和现状. 并采用地累积指数和潜在生态危害指数对该地区重金属污染蓄积状况及其潜在的生态风险进行定量评估,以期为电器制造业为源头的重金属污染评估提供参考,为类似产业聚集区重金属污染治理和产业政策制定提供科学依据.

1　材料与方法

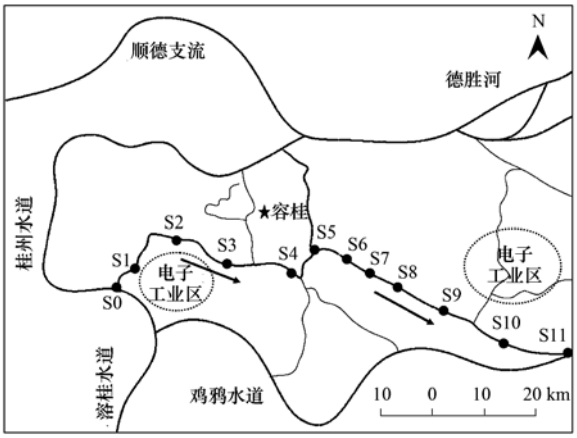
1.1　沉积物样品采集

为了解工业源重金属污染对受纳水体的影响范围,选择了包含两端是工业区,中间是居民生活区的河段为研究对象. 采样点设置沿着河涌感潮的水流方向从桂州水道的龙涌水闸(S0)至下游鸡鸭水道(S10),设置(S0 ~ S10)共 11 个采样点,其中 S0 为无内源污染的参照沉积物. 在垂直尺度样品采集中,为了避免临近工业区的排污口重金属浓度变化过大造成的异常波动,设置污染源下游影响区域,空间污染浓度接近中等水平的断面沉积物(S5)作为污染垂向迁移研究对象,具体采样点分布见图 1.

面源沉积物样品采集通过无扰动重力沉积物采样器采集表层 0 ~ 20 cm 沉积物. 垂直尺度污染分析样品使用柱状采样器采集(437 400/S, HYDRO-BIOS),分别采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 沉积物. 每个监测点样品均采集于河道中央及中弘线两侧各 2 m 处共 3 个位点的沉积物,混匀为一个样品装入聚乙烯瓶. 每个采样点采集 2 个平行样品,封口并标记带回实验室处理. 采集的沉积物样品经过自然风干,剔除石块、木屑后混合均匀用研钵研磨处理,过 100 目尼龙筛,用广口玻璃瓶保存备用.

1.2　沉积物样品分析测定

沉积物样品的消解和分析测试参照文献[21].



图中箭头方向表示水流方向

图 1　容桂内河涌沉积物采样点分布示意

Fig. 1　Location of sampling sites in Ronggui inland river

样品的 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Se 含量测定采用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 法进行消解,然后用原子吸收分光光度计测定其含量(ContrAA700, Analytikjena, German). 样品 Hg 测定采用 H_2SO_4-$2HNO_3$-$2K_2CrO_7$ 法消解; 样品 As 含量测定采用 H_2SO_4-$2HNO_3$ 法消解,样品 Hg、As、Se 均采用原子荧光法进行测定(SK-2003AZ AFS, 索坤技术, 北京). 样品测试分析过程中作全程序空白,以检查和控制样品在处理和测试过程中可能的污染. 测试过程中垂直和空间分析所有样品采用平行样和样品分析的平行测定来控制样品测试数据的精确度.

1.3　沉积物重金属污染程度评价方法

地积累指数法(index of geoaccumulation, I_{geo})是由 Müller 提出的利用某一种重金属的总含量与其地球化学背景值的关系来确定重金属污染程度的定量指标[22]. 该法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:

$$I_{geo} = \log_2[c_i/(K \times B_i)] \qquad (1)$$

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; K 为考虑造岩运动可能引起的背景值变动而设定的系数(一般取值为 1.5). 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)[23], I_{geo} 值与污染程度的对应关系见表 1.

表 1　地积累指数与污染程度分级

Table 1　Index of geoaccumulation and classification of pollution degree

污染程度	无	无 ~ 中度	中度	中 ~ 强度	强度	强 ~ 极强	极强
I_{geo}	≤0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6

参比值的选择是计算 I_{geo} 值的关键,不同的参比体系的差异较大. 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[24],参比背景值见表 2.

表 2 广东省土壤重金属元素背景值和国家土壤质量标准/mg·kg^{-1}

Table 2 Guangdong soil background values of heavy metals and national soil quality standards/mg·kg^{-1}

重金属元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
广东省土壤背景值[24]	12.1	32	42.7	40.9	0.026	7.3	0.041
土壤环境质量标准Ⅱ级1)	100~200	300	220	200~300	0.3	25~30	0.5
土壤环境质量标准Ⅲ级2)	400	500	500	300~400	1.0	30~40	1.5

1)Ⅱ级(土壤 pH 中性):为保障农业生产,人体健康的限定值(GB 15168-1995);2)Ⅲ级:为保障农业生产和植物正常生长的土壤限定值(GB 15168-1995)

1.4 沉积物重金属污染生态风险评价方法

重金属污染的潜在生态危害评价采用瑞典学者 Hakanson[25] 的潜在生态危害指数法(risk index, RI). 生态危害指数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. 该指数反映了 4 个方面的情况:①RI 值随重金属污染程度的加重而增加的浓度效应;②多种重金属污染物的协同效应,即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;④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:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i(C_s^i/C_n^i) \qquad (2)$$

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[25] 将 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As、Hg 等 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 3 和表 4).

表 3 重金属的参比值 C_n 和生物毒性系数 T_i

Table 3 References C_n and toxic coefficient T_i of different heavy metals

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

表 4 生态危害系数、指数与危害程度分级

Table 4 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

污染程度	轻微	中等	强	很强	极强
E_i	≤40	40~80	80~160	160~320	≥320
RI	<150	150~300	300~600	≥600	—

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属含量

2.1.1 重金属在内河涌沉积物中水平尺度的含量分布

监测河涌沉积物重金属含量如图 2. 从中可以看出,调查河涌的沉积物总体污染状况严重,部分监测位点的重金属类达到极高水平. 图 2(a)显示,Cu、Zn 和 Cr 的沉积物蓄积浓度远超过广东省土壤背景值[24]. 内河涌 11 个监测位点中,8 个监测位点污染浓度也已经超过我国土壤农用Ⅲ级标准(表 2),在河道上游 S2 和下游 S10 临近工业区的河涌沉积物中, Cu、Zn 和 Cr 的蓄积浓度达到国家Ⅲ级土壤标准的 5~9 倍. 元素 As、Hg 和 Cd 沉积物蓄积浓度也远超过广东省土壤背景值[24],浓度介于土壤Ⅱ级和Ⅲ级标准之间[图 2(b)和 2(d)]. 而重金属 Pb 蓄积浓度较低,除了 S2 介于土壤Ⅱ级和Ⅲ级标准之间,其余均低于Ⅱ级,但浓度普遍高于 35 mg·kg^{-1} 的Ⅰ级标准[图 2(c)].

通过对当地电器制造产业分布调查发现,位于 S1~S3 区域的电器加工制造相关企业约 36 家. 从 S4~S8 是居民区, 该区域只发现 1 家电器制造业企业. 位于河道下游的 S9~S10 附近汇聚约 65 家电器制造企业. 该调查数据和河道沉积物中重金属污染沿水流方向呈现两端高、中间低的趋势相吻合. 数据同时显示,多种监测重金属元素的含量变化从 S2~S7 呈现类似的递减趋势,监测点 S7 的重金属浓度为河涌监测各点的最低值,接近与河涌入水口(S0)的西江支流沉积物的背景值.

从重金属污染浓度变化趋势显示,重金属 Cu、Zn 和 Cr 的污染主要来源与工业源污染,居民生活区贡献较小. 3 种元素在不同采样点的分布模式差异较小, 表明三类污染物具有相似的纳污模式. 但监测数据显示,S0 的 As 和 Cd 含量超过内河涌的污

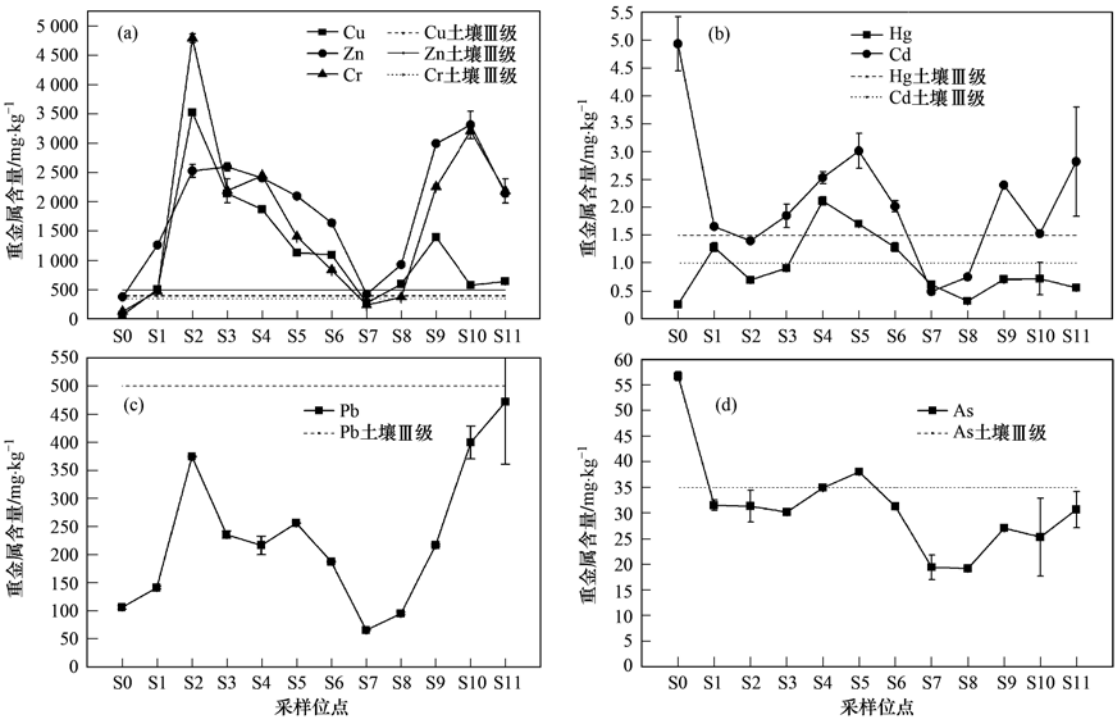


图 2　水平方向上沉积物样品重金属含量分布(各监测点)

Fig. 2　Horizontal distribution of heavy metal concentration

染浓度,重复测试数据显示类似结果. S0 的 As 和 Cd 含量虽然高于内河涌,但是与利锋等[19]报道的佛山水道 3.8 mg·kg^{-1}的 Cd 含量和 31.8 mg·kg^{-1}的 As 含量相当,和颜文等[20]报道的容桂工业区 41.5 mg·kg^{-1}的 As 含量接近. 造成内外不同的原因可能与该河涌是闸控河涌有关,街道内源 As 和 Cd 污染排放量较低,内河涌从周围水道有限调水量可能是导致 2 种元素蓄积量有限的原因. 数据同时显示, As、Hg 和 Cd 最高的蓄积浓度并不位于电器加工制造集中的 S2 区域,峰值出现在 S5 附近,然后逐步降低. 造成这种现象的原因可能与相关元素在水体中的迁移属性有关,也可能与居民生活和商业区段存在其它该类元素的污染源有关. 现场调查位于 S2 ~ S5 之间较少有电器加工企业,但有较多的家电销售等相关公司,因此电器商业销售等面源污染也可能是形成原因之一.

和颜文等[20]2000 年的容桂工业区以及利锋等[19]2006 年的佛山水道沉积物调查相比,河涌沉积物重金属污染浓度已经提高了数倍到几十倍不等. 这一对比反映了过去数年的工业化进程对河道重金属污染蓄积产生了重要的影响. 调查结果同时显示,位于河道下游的 S9 ~ S10 区域企业虽然多与上游 S2 ~ S3 区域,但重金属污染物浓度总体上却小于上游. 形成这种状况的因素可能源于两方面:一是上游工业企业存在时间早与下游,因此污染时间跨度长,总量积累高. 另一个因素可能是上游企业大多规模小,污染监管难度大,下游工业区实行了集中管理,环保监管有效有关.

2.1.2　重金属在沉积物中的垂直分布

数据显示,不同重金属种类在垂直尺度上变化趋势没有统一模式. 图 3(a)和图 3(d)显示,Cu、Zn 和 As 具有类似的变化趋势. 30 ~ 40 cm 界面和 20 ~ 30 cm 界面相比,蓄积浓度都有不同程度增加. 说明相应的历史时期,纳污水体沉积物中受纳的三类元素有所增加. 从 20 ~ 30 cm 界面到表层沉积物,Cu、Zn 和 As 的含量由下至上则逐步降低,反映近年元素 Cu、Zn 和 As 污染排放量正在逐步减少. 图 3(b)显示,重金属 Cd 在沉积物中从 30 ~ 40 cm 到 10 ~ 20 cm 呈现递减趋势,但是从 10 ~ 20 cm 至 0 ~ 10 cm 层面,浓度略有上升,说明近年 Cd 经过了一段从污染排放减少到有所增强的转变. 图 3(b)同时显示,重金属 Hg 的变化则经历了浓度先减少、再增加、再变成递减的两次变化,其中近期 Hg 排放减少趋势明显. 图 3(c)数据则显示,沉积物中重金属 Pb 含量由下往上逐步减少,反映了受纳河涌 Pb 的污染排放量呈稳步递减状态. 重金属 Cr 的垂直分布数据显示,重金属 Cr 在沉积物中由下至上含量呈现稳定增加趋势,这表明该元素污染排放呈明显的增加趋势[图 3(a)].

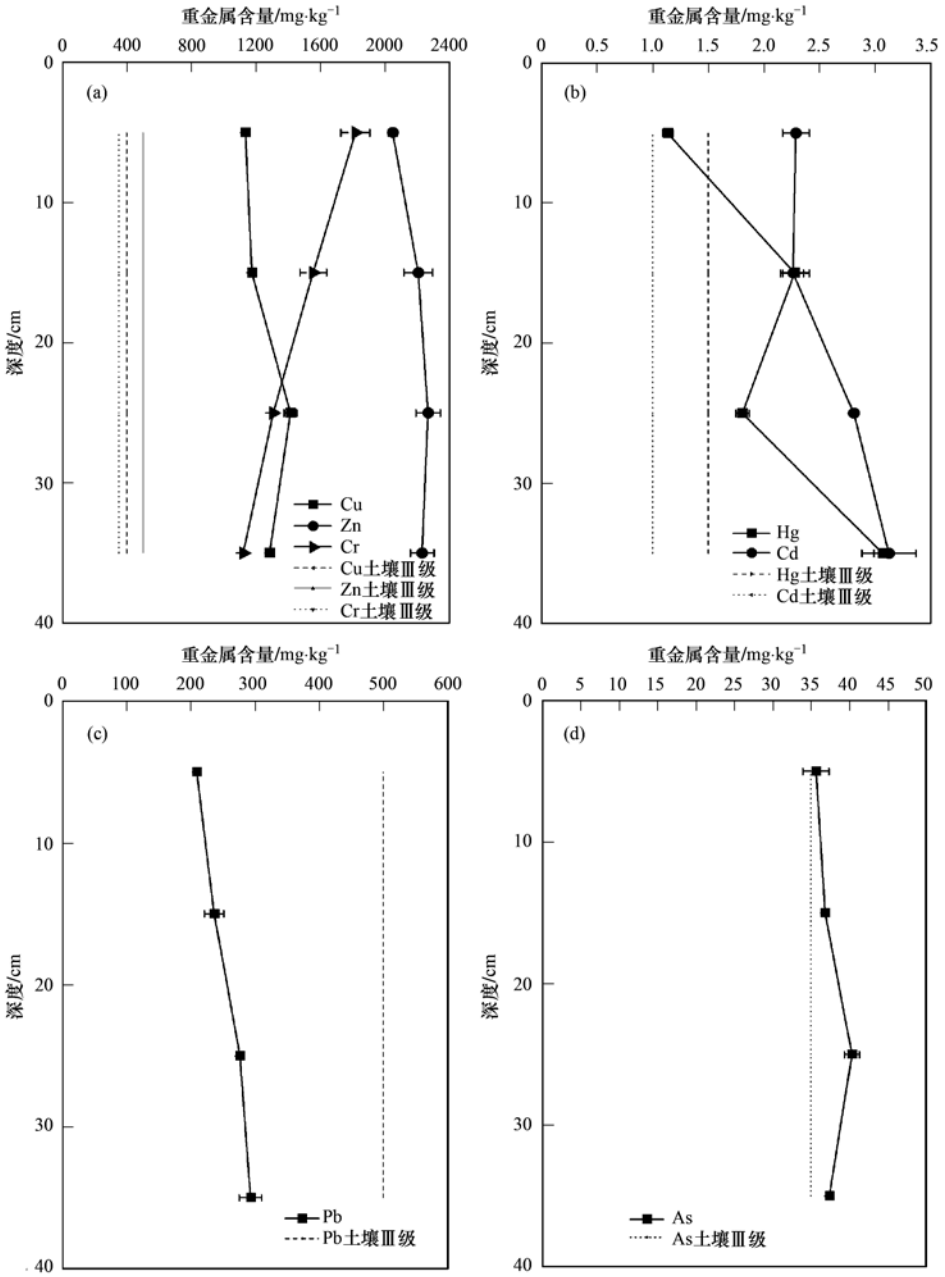


图 3 垂直方向上的重金属含量分布(S5 位点)

Fig. 3 Vertical distribution of heavy metal concentration

垂直尺度数据显示,监测区域内不同元素在沉积物中的含量随着深度不同分别呈现了不同的变化趋势,这反映不同元素在受纳河涌的沉积物中没有相同的归趋模式. 颜文等[20]的容桂工业区沉积物调查结果显示,除了个别监测点的 Cu 和 Cr 外,其它所有监测点的重金属元素基本都呈现出从柱状底层向表层的质量分数增加趋势. 其中 Hg 和 As 的变化最明显,跨越了 2 ~3 个污染级别. 而本研究结果显示,虽然重金属总体污染浓度已经远超过该研究报道,但是浓度一致增加的趋势已经得到部分改变,Pb、Zn、Hg 等元素呈现稳定递减趋势. 造成这种不同的因素可能有多种,既可能与该地区的重污染企业依法关闭或迁出、产业结构调整有关. 也可能是环保相关部门采取了截污减排措施有关. 另外在产业升级和技术革新过程中,电器加工制造业中 Hg、As、Cd 等毒害性很强的重金属原料使用量减少或者原料替换等也可能有一定的贡献.

2.2 沉积物中重金属污染程度和生态风险评价

2.2.1 沉积物中重金属污染程度评价

所有监测 7 种重金属平均地累积指数指标(表 5)显示,所有各点都呈现中度以上的重金属污染. 污染程度由强至弱的顺序依次为:Cd > Cu > Zn > Cr

表 5　沉积物中重金属的地累积指数

Table 5　I_{geo} of heavy metals in sediment

采样断面	Cu	Zn	Cr	Pb	As	Hg	Cd
S0	1.9	2.6	1.1	1.1	2.4	2.0	7.0
S1	4.8	4.3	2.9	1.6	1.5	4.4	5.4
S2	7.6	5.3	6.3	3.0	1.5	3.5	5.2
S3	6.9	5.3	5.2	2.3	1.5	3.9	5.6
S4	6.7	5.2	5.3	2.2	1.7	5.1	6.0
S5	6.0	5.0	4.5	2.4	1.8	4.8	6.3
S6	5.9	4.7	3.8	2.0	1.5	4.4	5.7
S7	3.9	2.7	2.0	0.5	0.8	3.3	3.7
S8	5.0	3.9	2.6	1.0	0.8	2.4	4.3
S9	6.3	5.5	5.2	2.2	1.3	3.5	5.9
S10	5.0	5.1	3.4	3.1	1.2	3.5	5.3
S11	5.1	5.3	4.5	3.3	1.5	3.2	6.2
内河涌均值	5.4	4.6	3.9	2.0	1.5	3.7	5.5

> Hg > Pb > As. 不同重金属种类中，Cd 和 Cu 为极强污染，均超过 6 级标准. Zn 达到 5 级，为强 ~ 极强污染. Cr 和 Hg 分别是 3.9 和 3.7 级，为强污染. Pb 和 As 为中度污染. 从不同采样点结果比较看出，外河涌（S0）的 Cd 污染严重，除此以外，其它各种元素介于 1 ~ 3 之间，属于中度污染. 从元素的地累积指数变化趋势可以看出，Cu、Zn、Cr、Pb 和 Cd 有着类似的趋势，最高指数出现在 S2，然后逐步降低至 S7 的最低位点，从 S8 进入下游工业区后逐步升高. 因此在内河涌沿着水流方向表现出两端高，中间低的基本趋势. 元素 Hg 和 As 在内河涌中则有着不同以上元素的污染特征，Hg 和 As 总累计指数变化范围虽然相对较小，但是表现出中间高、两端稍低的趋势. 这意味着 Hg 和 As 最大累积区间位于居民区附近的河涌，而不是两端的电器制造业工业区范围. 和颜文等[20]研究发现容桂街道的 Hg 和 As 在 7 种常见重金属中累积速度最快不同，本研究发现 Hg 的累积速度仅为第 5 位，As 是累积速度最慢的元素.

2.2.2　沉积物中重金属污染潜在生态风险评价

从表 6 的平均生态危害系数 E_i 可见，所监测 7 种重金属指标中，除了 Zn 和 As 外，其它 5 种重金属都有中等以上程度的潜在生态危害. 其中，Cu 和 Hg 为很强污染；Cd 为强污染；Cr 和 Pb 为中等污染；Zn 和 As 为微污染，污染指数由高到低分别为 Cu > Hg > Cd > Cr > Pb > Zn > As. 从潜在生态危害累积指数 RI 看出，所有监测点都呈现中等以上的生态风险. 和地累积指数相类似，河涌上游工业区 S2 的 RI 达到1 070.5，远超过 600 的极强生态风险范围. 监测点的生态风险由高到低分别为：S2 > S4 > S5 > S3 > S9 > S6 > S11 > S1 > S10 > S0 > S8 > S7. 其中，S2 > S4 > S5 > S3 > S9 > S6 皆达到 RI ≥ 600 很强生态风险的范围. S11 > S1 > S10 > S0 则位于 300 ~ 600 的强风险范围，只有 S8 > S7 属于中等污染范围，该变化趋势上和地累积指数具有类似的趋势.

在地累积指数中重度污染的元素为 Cd、Cu 和 Zn，但是在生态风险指数中，重度污染为 Cu、Hg 和 Cd. 出现这种差异和 Hg 的毒性系数较高有关. 该结果和许振成等[8]对广东北江中上游重金属污染监测结果相类似. 在利锋等[19]对佛山水道底泥重金属风险评估中，最高生态风险中也分别包含有 Hg、Cd 和 Cu，该结果和本研究相类似. 在利锋等研究中，Pb 的生态风险高于 Cu，但本研究中 Pb 的生态风险则较低.

表 6　沉积物中重金属生态危害评价指数

Table 6　Risk index of heavy metals in the sediments

采样断面	E_i							RI
	Cu	Zn	Cr	Pb	As	Hg	Cd	
S0	11.7	4.7	4.4	21.3	37.8	40.6	296.1	416.5
S1	84.5	15.8	15.8	28.3	21.0	205.6	99.3	470.3
S2	587.6	31.6	159.7	74.9	20.9	111.8	84.0	1070.5
S3	357.8	32.4	73.1	47.1	20.1	145.4	111.0	786.9
S4	311.7	30.1	81.7	43.3	23.3	338.4	152.1	980.6
S5	189.5	26.2	46.9	51.3	25.4	272.8	180.9	793.0
S6	182.3	20.5	28.0	37.5	20.9	205.6	121.2	615.9
S7	45.5	5.3	7.9	13.2	12.9	97.7	29.4	211.9
S8	99.4	11.7	12.4	19.0	12.8	50.9	45.0	251.1
S9	232.8	37.4	75.2	43.4	18.0	113.3	144.0	664.1
S10	96.7	27.8	21.3	80.0	16.9	115.2	91.8	449.6
S11	107.0	31.5	45.1	94.4	20.5	89.6	169.2	557.3
内河涌均值	192.2	22.9	47.6	46.1	20.9	148.9	127.0	605.7

3 结论

(1) 电器制造业聚集区的容桂街道内河涌存在多种重金属的污染，重金属污染程度相当严重. 重金属地累积污染程度由强至弱的次序分别为：Cd > Cu > Zn > Cr > Hg > Pb > As. 其中 Cd 和 Cu 达到极强的程度.

(2) 各种重金属污染对河道构成的潜在生态总体较强，潜在生态风险由强至弱依次为：Cu > Hg > Cd > Cr > Pb > Zn > As，其中 Cu、Hg 和 Cd 达到极强的程度.

(3) 空间分布研究显示，电器制造工业污染源是容桂街道内河涌重金属污染的主要来源. 沉积物中重金属污染蓄积和生态风险综合指标呈现两端高，中间低的趋势.

(4) 重金属的垂直尺度分布特征显示，不同重金属种类在垂直尺度上变化趋势没有统一模式. 其中 Cu、Zn、As、Hg 和 Pb 污染排放量逐步减少. 重金属 Cr 则呈现稳定增加的趋势，高生态风险元素 Cd 浓度由下降趋势转为稍有增加.

参考文献：

[1] 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.

[2] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2): 99-107.

[3] 林文杰，吴荣华，郑泽纯，等. 贵屿电子垃圾处理对河流底泥及土壤重金属污染[J]. 生态环境学报，2011，**20**(1)：160-163.

[4] Bai J H, Xiao R, Cui B S, *et al*. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(3): 817-824.

[5] Luo C L, Liu C P, Wang Y, *et al*. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(1): 481-490.

[6] Liu B L, Hu K, Jiang Z L, *et al*. Distribution and enrichment of heavy metals in a sediment core from the Pearl River Estuary[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62**(2): 265-275.

[7] Zhang H G, Cui B S, Xiao R, *et al*. Heavy metals in water, soils and plants in riparian wetlands in the Pearl River Estuary, South China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, **2**: 1344-1354.

[8] 许振成，杨晓云，温勇，等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 环境科学，2009，**30**(11)：3262-3268.

[9] 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.

[10] 吕文英，汪玉娟，刘国光. 北江底泥中重金属污染特征及生态危害评价[J]. 中国环境监测，2009，**25**(3)：69-72.

[11] 陈建军，胡祖武，刘振乾. 广州市石井河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 安徽农业科学，2009，**37**(7)：3202-3204.

[12] 宋宪强，雷恒毅，余光伟，等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究[J]. 环境科学学报，2008，**28**(11)：2258-2268.

[13] 黄向青，梁开，刘雄. 珠江口表层沉积物有害重金属分布及评价[J]. 海洋湖沼通报，2006，(3)：27-36.

[14] 柴世伟，温琰茂，韦献革，等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2004，**43**(14)：90-94.

[15] 付善明，周永章，赵宇鸫，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[J]. 环境科学，2007，**28**(4)：805-812.

[16] 邓日烈，聂呈荣，温玉辉，等. 佛山市 5 区菜地土壤的重金属含量特征[J]. 安徽农业科学，2010，**38**(14)：7488-7489，7540.

[17] 李梅，吴启堂，李锐，等. 佛山市郊污灌菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况与评价[J]. 华南农业大学学报，2009，**30**(2)：19-21.

[18] 李军辉，卢瑛，尹伟，等. 佛山市某工业区周边蔬菜重金属富集特征的研究[J]. 华南农业大学学报，2008，**29**(4)：7-20.

[19] 利锋，韦献革，余光辉，等. 佛山水道底泥重金属污染调查[J]. 环境监测管理与技术，2006，**18**(4)：12-15.

[20] 颜文，池继松，古森昌，等. 珠江三角洲工业区土壤沉积物重金属污染特征及防治对策——以石龙和容桂工业区为例[J]. 土壤与环境，2000，**9**(3)：177-182.

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

[22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geochemical Journal, 1969, **2**(3): 108-118.

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

[24] 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.

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

HUANJING KEXUE Vol. 33 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2012

CONTENTS

《环境科学》第 6 届编辑委员会

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2012 年 5 月 15 日　33 卷　第 5 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 5　May 15, 2012

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343；Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：70.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行