

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.07.2014111103

路风辉, 陈满英, 陈燕舞, 等. 电子垃圾拆解区氯化石蜡和多氯联苯的分布特征——以广东清远龙塘镇为例[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1297-1303

LU Fenghui, CHEN Manying, CHEN Yanwu, et al. Distribution of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in e-waste residues and sediment from e-waste areas of Qingyuan[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(7): 1297-1303

电子垃圾拆解区氯化石蜡和多氯联苯的分布特征 ——以广东清远龙塘镇为例*

路风辉¹ 陈满英^{2**} 陈燕舞¹ 刘付建² 罗孝俊³ 麦碧娴³

(1. 顺德职业技术学院, 顺德, 528300; 2. 广东产品质量监督检验研究院, 广州, 510330;

3. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州, 510640)

摘 要 采用 GC/MS 法测定了广东清远龙塘镇电子垃圾拆解区电子垃圾、电子垃圾焚烧后残渣、当地池塘沉积物和对照区沉积物 24 种短链氯化石蜡 (SCCPs)、24 种中链氯化石蜡 (MCCPs) 和 29 种多氯联苯 (PCBs) 的浓度水平。结果显示, 氯化石蜡 (CPs) 和 PCBs 大量存在于电子垃圾中。电子垃圾、残渣和池塘沉积物 SCCPs 和 MCCPs 浓度范围 (干重) 分别为 1.6—46.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 7.3—215 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, PCBs 的浓度范围 (干重) 为 0.15—370.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 明显高于对照区, 对周边造成了极大环境风险。SCCPs、MCCPs 和 PCBs 均呈现低碳低氯同系物的相对含量在电子垃圾、电子垃圾焚烧残渣、拆解区池塘沉积物、对照区沉积物中依次递增的现象, 表明 CPs 和 PCBs 在由电子垃圾向沉积物迁移过程中可能存在脱碳脱氯的降解过程。

关键词 氯化石蜡, 多氯联苯, 电子垃圾, 残渣, 沉积物。

Distribution of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in e-waste residues and sediment from e-waste areas of Qingyuan

LU Fenghui¹ CHEN Manying^{2**} CHEN Yanwu¹
LIU Fujian² LUO Xiaojun³ MAI Bixian³

(1. Shunde Polytechnic, Shunde, 528300, China; 2. Guangdong Testing Institute of Product Quality Supervision, Guangzhou, 510330, China;

3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou, 510640, China)

Abstract: The concentration level of short-chain and medium-chain chlorinated paraffins (SCCPs and MCCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in e-wastes, incineration residues, and sediments from the electronic waste recycling areas of Qingyuan, Guangdong Province were determined using gas chromatographic-mass spectrometric (GC/MS). The results showed that electronic waste dismantling activities were important sources of CPs and PCBs contamination, which was obviously higher than that in the reference region. SCCPs concentrations in the electronic wastes, the residues and pond sediments were in the range of 1.6—46.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, MCCPs 7.3—215 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ and PCBs 0.15—370.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ respectively. The concentrations were significantly higher than the reference area, which might impose risk on the surrounding environment. The relative contents of low carbon and low chlorine homologue increased from electronic wastes, electronic waste incineration residues, to the dismantling pond sediments, which indicated that decarbonization and dechlorination of the CPs and PCBs might develop during their migration from the electronic waste

2014 年 11 月 11 日收稿。

* 国家质检总局项目 (2013KQ284); 佛山市标准战略项目 (2012B01002) 资助。

** 通讯联系人, Tel: 0757-22802844; E-mail: heroross@sina.com

polluted area to the sediment.

Keywords: chlorinated paraffins, polychlorinated biphenyls, e-waste, sediment, residue.

据统计,全世界每年约有 4000 万吨废旧电子产品被丢弃,其中约 70% 在中国拆解与遗弃^[1]. 清远龙塘镇电子垃圾拆解区每年处理电子垃圾近百万吨,主要采用手工拆解、焚烧、填埋等粗放式的处理方式^[2]. 在回收贵金属后,大量回收价值较低的拆解废料(如塑料外壳、电路板)和处理残渣等被随意丢弃在田地、池塘或露天焚烧,导致电子垃圾中污染物进入大气、水和土壤等环境介质. 电子垃圾废弃物的无序焚烧和扬尘释放了大量的颗粒物,附着了高浓度的持久性有机污染物(POPs),向四周传播. 近几年来,电子废物拆解区环境介质中重金属、多环芳烃、二噁英和多溴联苯醚(PBDEs)污染报道较多,其中,PBDEs 等污染物的污染水平处在全球污染的高值区^[3-8].

多氯联苯(PCBs)是联苯的氯化衍生物,因良好的绝缘性和导热性,被大量用做电容和变压器的导热油和绝缘油. 因其“三致”作用和环境持久性已于上世纪 80 年代被禁止生产,并被列为 POPs,受到各国严密监控. 上世纪 80 年代前生产的变压器逐步退役,夹杂在电子垃圾中,被粗暴拆解,造成严重的 PCBs 污染. 如拆解区水鸟体内 PCBs 含量大大高于其它地区的水平. PCBs 已通过扩散作用影响珠三角整个区域环境^[1].

氯化石蜡(CPs)是石蜡烃的氯化衍生物,因良好的阻燃性、绝缘性,大量用做电子产品中的阻燃剂. 因具有 POPs 的特征^[1,9-12],目前已经被列入 POPs 的候选名单^[13-15]. 电子垃圾拆解区周边的土壤、沉积物、水生生物均被检出较高浓度 SCCPs,并呈现向四周扩散的趋势^[17]. 如贵屿电子垃圾拆解区土壤中短链氯化石蜡(SCCPs)和中链氯化石蜡(MCCPs)总含量是对照区的 10 倍以上^[17],由拆解区中心向四周扩散^[18].

本研究以清远龙塘镇为采样现场,采集不同环境介质,包括电子垃圾、焚烧残渣、当地池塘沉积物. 并以龙塘镇大燕河上游 10 km 处为对照点采集沉积物,开展 24 种 SCCPs、24 种 MCCPs 和 29 种 PCBs 在电子垃圾拆解区环境中的污染水平、污染特征和转化规律研究,进一步了解污染物对相邻周边地区影响的范围和程度.

1 实验部分

1.1 样品采集

2010 年 11 月,在清远龙塘镇 6 个村庄和白鹤塘采集电子垃圾样品共 8 个,包括向西屋村、神石山、东家铺、湓冲村、大沙村和泗合村各 1 个样品,白鹤塘 2 个样品. 电子垃圾焚烧后对应的残渣样品 8 个(以下简称残渣),电子垃圾区池塘沉积物 8 个样品,对照区对照点 3 个,每个点 2 个沉积物样品,总共 30 个样品(表 1). 样品采集后置于密实袋内. 样品运回实验室后,于 -20 °C 冰箱内保存.

表 1 采样点位置信息

Table 1 Information of sampling sites

| 样品 | 清远采样点 | 纬度 | 经度 |
|----|-------|-------------|--------------|
| 1 | 白鹤塘 | N 23°35'47" | E 113°01'53" |
| 2 | 白鹤塘 | N 23°35'47" | E 113°01'57" |
| 3 | 向西屋村 | N 23°34'75" | E 113°01'93" |
| 4 | 神仙山 | N 23°35'43" | E 113°00'07" |
| 5 | 东家铺 | N 23°32'79" | E 113°02'90" |
| 6 | 湓冲村 | N 23°34'38" | E 113°01'51" |
| 7 | 大沙村 | N 23°35'63" | E 113°00'37" |
| 8 | 泗合村 | N 23°35'35" | E 113°01'22" |
| 9 | 对照点 1 | N 23°26'60" | E 112°52'89" |
| 10 | 对照点 2 | N 23°21'56" | E 112°53'29" |
| 11 | 对照点 3 | N 23°13'93" | E 112°48'95" |

1.2 样品前处理及仪器分析

样品前处理方法、CPs 和 PCBs 检测与定量方法详述参考陈等^[16,49]的论文。将电子垃圾、残渣和沉积物样品冷冻干燥,除去贝壳、沙石等杂物,研磨后过 100 目筛。称取一定质量环境介质样品,其中电子垃圾和残渣质量范围为 0.1—1 g,池塘沉积物质量为 2 g,对照区河流沉积物质量为 10 g。用二氯甲烷 200 mL 索氏抽提 24 h,在抽提液中加入 CPs 的回收率指示物¹³C-氯丹和 PCBs 的回收率指示物(PCB30、PCB65 和 PCB204),用活化铜片除硫。抽提液浓缩至 1 mL 左右。电子垃圾和残渣提取液先过 GPC 柱子,除去石蜡等 C—H 或 C—H—O 化合物。然后经多层硅胶/佛罗里复合柱净化(从下到上:佛罗里:中性硅胶:酸性硅胶=20 cm:2 cm:8 cm)。先用 80 mL 正己烷淋洗,收集正己烷淋洗液即得到 PCBs 组分;再用 60 mL 二氯甲烷淋洗,收集二氯甲烷淋洗液即得到 CPs 组分。旋转蒸发,氮吹至干,异辛烷定容。进行仪器分析前加入 CPs 组分内标 ϵ -HCH 和 PCBs 内标 PCB30、PCB65 和 PCB204。

CPs 检测采用 QP-2010 气相色谱-质谱联用仪进行检测。CPs 的分子结构上带有较强的电负性基团,采用 ECNI 离子源。每一个样品进样 4 次,依次扫描碳链长度为 C₁₀—C₁₁、C₁₂—C₁₃ 的 SCCPs 和 C₁₄—C₁₅、C₁₆—C₁₇ 的 MCCPs,共计 24 种 SCCPs(C₁₀₋₁₃, Cl₅₋₁₀) 和 24 种 MCCPs(C₁₄₋₁₇, Cl₅₋₁₀) 同族物。

PCBs 检测同系物 29 种,分别为 PCB 6、PCB 7、PCB 8 (5)、PCB 18、PCB 22、PCB 28 (31)、PCB 32、PCB 44、PCB 52、PCB 56、PCB 66、PCB 74、PCB 87、PCB 99、PCB 101、PCB 105、PCB 110、PCB 118、PCB 128、PCB 130、PCB 138、PCB 146、PCB 149、PCB 153 (132)、PCB 174、PCB 180、PCB 187、PCB 190、PCB 209。

1.3 质量控制和质量保证

所有玻璃器皿用洗液浸泡、清洗,450 °C 下灼烧 4 h,使用前用丙酮、二氯甲烷和正己烷依次洗两次。用方法空白、空白加标、基质加标、基质加标平行样进行质量控制。电子垃圾中 CPs 回收率范围 66.0%—126%,PCBs 回收率范围为 92.3%—120%。残渣的 CPs 回收率范围为 111%—103%,PCB 回收率范围为 78.5—108%。池塘沉积物中 CPs 回收率范围为 68.0%—107%,PCBs 的回收率为 72.0%—122%。对照区的 CPs 回收率范围为 91.8%—103%,PCBs 回收率范围为 88.0%—110%。所有浓度数据均基于干重,每个样品测量 2 次,取平均值作为讨论。

2 结果和讨论

2.1 电子垃圾区 CPs 和 PCBs 含量的总体特征

CPs 和 PCBs 在不同介质中的浓度变化趋势基本相似。残渣中 CPs 和 PCBs 平均值最高,其次是电子垃圾和池塘沉积物。电子垃圾、残渣和池塘沉积物 SCCPs 浓度范围分别为 1.6—4.8、3.4—46.8 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 3.2—13.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 平均值分别为 2.8、17.0、7.2 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。电子垃圾、残渣和池塘沉积物 MCCPs 浓度范围 7.3—98.3、32.0—215 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 25.7—165 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; 平均值分别为 43.2、136.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 71.6 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。电子垃圾、残渣和池塘沉积物 PCBs 的浓度范围分别为 0.15—196、2.8—370.6、5.8—25.9 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其平均浓度分别为 41.2、99.3 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 17.1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 1)。焚烧过程去除了大部分碳氢成分,残留下阻燃剂,导致残渣的 CPs 和 PCBs 含量比电子垃圾高。燃烧过程中 CPs 和 PCBs 脱氯生成腐蚀性气体 HCl,使得电子垃圾焚烧残渣附近的积水 pH 值小于 1,对周边环境带来强烈的酸污染。

对照区的 PCBs 和 CPs 浓度较低,且浓度波动范围不大,可能主要来源于 PCBs 和 CPs 远距离迁移。对照区沉积物的 SCCPs 平均浓度较低为 823 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 浓度范围为 590—1230 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, MCCPs 平均浓度为 3.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 浓度范围为 2.4—4.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。PCBs 浓度范围分别为 6.9—10.1 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 8.67 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。电子垃圾区池塘沉积物中 CPs 浓度较对照区高约 5—20 倍,而两地 PCBs 浓度则相差约 2 到 3 个数量级。废旧变压器焚烧的残渣中检出的 PCBs 浓度最高,为 370 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在清远龙塘镇,废旧变压器随处可见。在上世纪 80 年代前,PCBs 在国外曾大量用于变压器中,现阶段正是这些变压器报废回收时段。清远龙塘的电子垃圾回收活动,已造成局部地区极高浓度的 PCBs 污染,在珠三角潮湿炎热的气候条件下,这类挥发性相对较大(相对于 PBDEs)的卤代污染物,有可能已从高污染区向外扩散,造成珠三角整体区域的污染。

电子垃圾区池塘沉积物中 CPs 和 PCBs 浓度最高的是白鹤塘, SCCPs 浓度为 $13.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, MCCPs 达到 $165 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是其它池塘沉积物 MCCPs 浓度 ($26\text{--}72 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的两倍以上. 同期监测的珠三角地区工业和城市区域的河流沉积物中 SCCPs 浓度为 $0.3\text{--}6.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, MCCPs 浓度为 $0.88\text{--}3.8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ [16], 远低于本研究结果. 北京垃圾处理场的 SCCPs 浓度 ($1.1\text{--}8.7 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) [20] 和本研究相当.

白鹤塘沉积物 PCBs 浓度为 $25 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是其它池塘沉积物的 1.5 倍. 采样现场比较, 白鹤塘内丢弃的电子垃圾较其他池塘更多. 本研究的结果与同一区域池塘沉积物 44 种 PCBs 的浓度 $24.5\text{--}38.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ [21] 一致. 本研究沉积物中 PCBs 含量高, 高出广东贵屿 [22] 和浙江台州 [23] 电子垃圾回收地沉积物 (平均含量分别为 $0.74 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 两个数量级, 表明本研究区域电子垃圾回收活动已造成了当地水环境 PCBs 的严重污染.

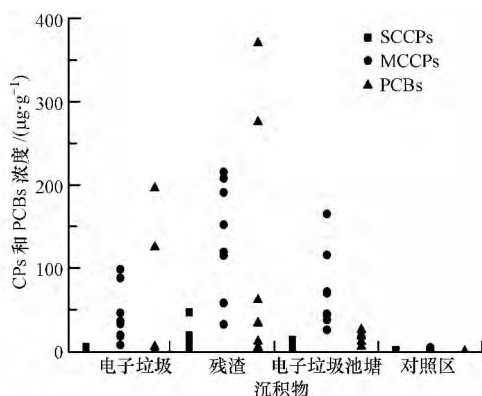


图 1 清远龙塘电子垃圾拆解区不同介质中 SCCPs、MCCPs 和 PCBs 浓度

Fig.1 Concentrations of SCCPs, MCCPs and PCBs in e-wastes from Qingyuan Longtang

2.2 CPs 和 PCBs 同系物组成

SCCPs 同系物组成模式较为复杂, 不同介质 SCCPs 的碳链组成模式存在较大差别 (图 2).

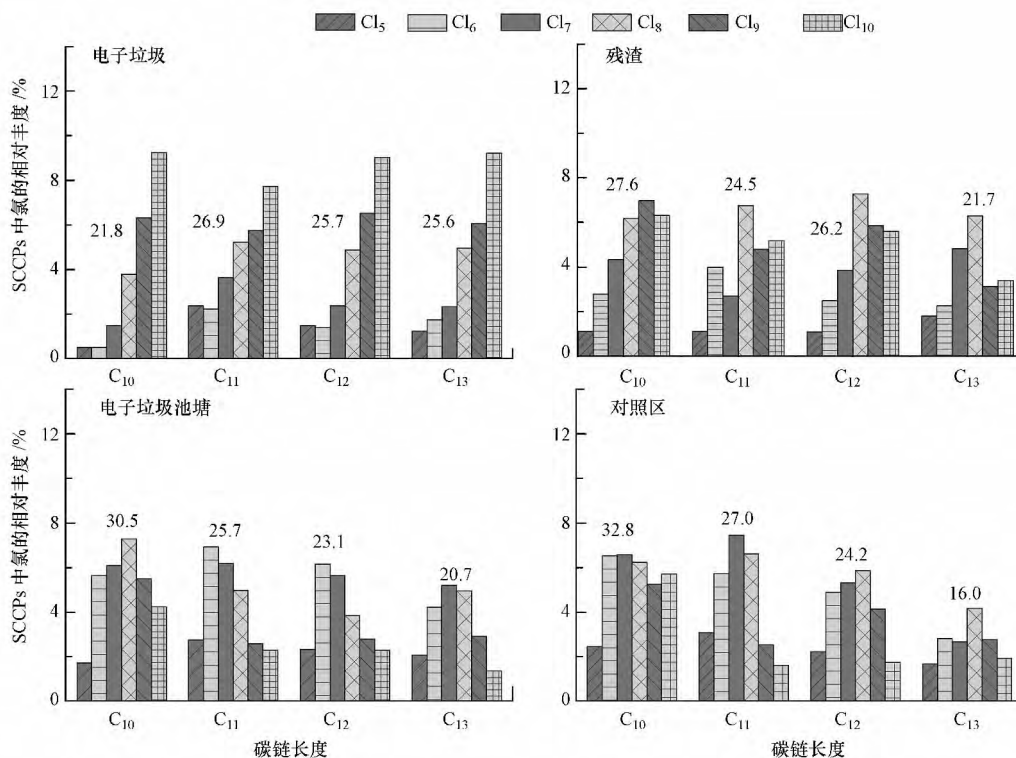


图 2 电子垃圾区和对照区样品中 SCCPs 同族体分布模式

图中数字代表 SCCPs 中 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} 同系物的相对百分含量 (%)

Fig.2 SCCPs congener profiles of different sampling materials

对于电子垃圾和残渣, SCCPs 的 4 个不同碳链(C_{10} — C_{13}) 的同系物贡献在 21.7%—27.6% 之间. 池塘沉积物和对照区沉积物的 C_{10} 达到了 30% 以上, 高于电子垃圾和残渣. 不同介质中 SCCPs 的氯取代差别明显, 电子垃圾主要是 Cl_9 和 Cl_{10} (合计为 60%), 残渣主要是 Cl_8 和 Cl_9 (合计为 47%), 池塘沉积物和对照区主要是 Cl_7 和 Cl_8 (合计均为 45%). 残渣中 SCCPs 的低氯低碳组成含量明显比对应的电子垃圾增加, 表明燃烧过程中脱氯脱碳明显. 随着碳链增长, SCCPs 同系物 $\lg K_{ow}$ 从 C_{10} 的 5.93 增长到 C_{14} 的 7.14, 而蒸汽压从 6.6×10^{-2} Pa 降低到 1×10^{-4} Pa, 即低碳组分的迁移性更强^[10]. 对照区沉积物中 SCCPs 的低碳低氯代同系物相对含量最高, 与珠江三角洲工业不发达地区的河流表层沉积物情况类似^[16], 表明对照区的 SCCPs 主要来源于高污染地区的迁移, 并可能受到沉积过程脱碳脱氯降解的影响. 现场痕迹和较高的 SCCPs 的浓度, 表明电子垃圾区池塘沉积物中 SCCPs 的来源就是被随意丢弃的电子垃圾及其残渣. 但池塘沉积物中低碳低氯代同系物相对含量高于电子垃圾及电子垃圾残渣, 表明 SCCPs 在进入池塘沉积物过程中可能存在脱碳脱氯的降解行为.

MCCPs 同系物在不同介质中均以 C_{14} 为主(图 3). C_{14} 同系物丰度在对照区沉积物(68.4%) 和池塘沉积物(65.8%) 明显高于电子垃圾和残渣(57.0% 和 61.1%). 与 SCCPs 类似, 低碳低氯同系物在对照区和池塘沉积物中明显高于电子垃圾和残渣等直接来源, 表明 MCCPs 在沉积过程中存在明显的脱碳脱氯行为.

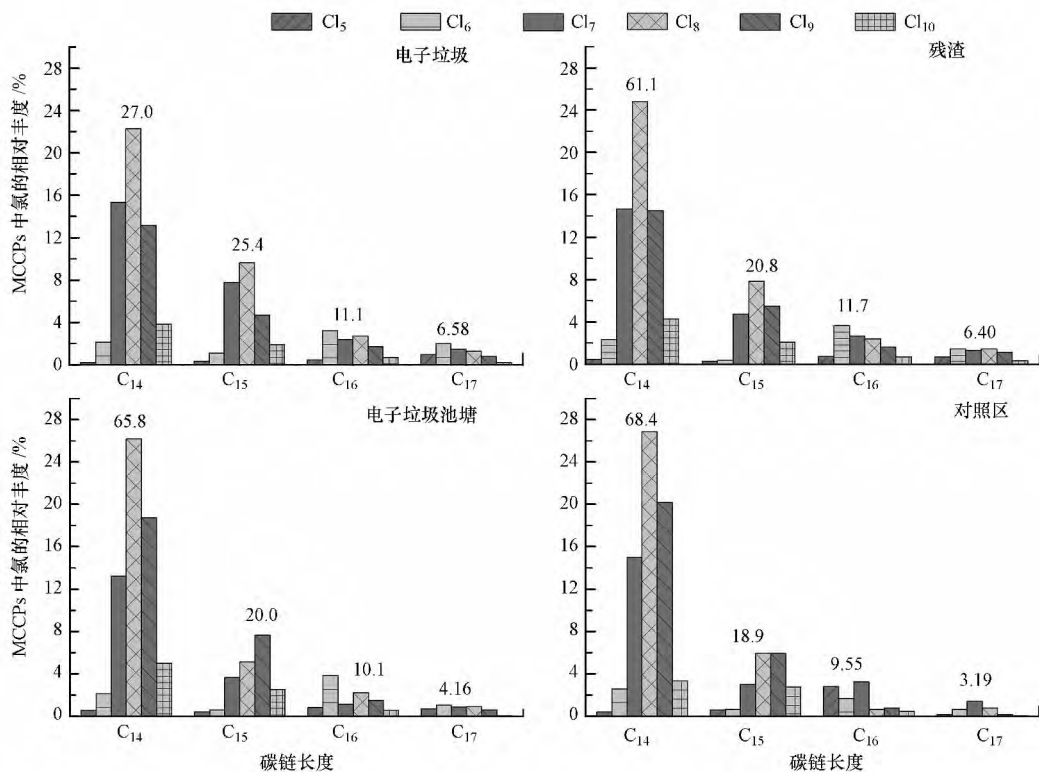


图 3 电子垃圾区和对照区样品中 MCCPs 同系物组成
图中数字代表 MCCPs 中 C_{14} 、 C_{15} 、 C_{16} 和 C_{17} 同系物的相对百分含量

Fig.3 MCCPs congener profiles of different sampling materials

电子垃圾和残渣中的 PCBs 组成主要以 6 氯取代同族体为主(34.4%、26.9%) (图 4). 其次为 5 氯取代同族体(均为 31% 左右), 2、3 氯取代同族体相对含量较低, 合计为 10% 左右. 这种组成特征与前期研究的椒江河口和休斯敦船道的研究结果一致^[24-25].

池塘沉积物中 PCBs 的 7、10 氯取代同族体的相对含量(3.4% 和 1.7%) 较电子垃圾(8.2% 和 3.4%) 和残渣(12.1% 和 2.3%) 下降, 5 氯取代的化合物丰度最高达到 37.4%, 其次是 6 氯取代化合物(27.0%). 与国外变压器油中 PCBs 以高氯取代为主(Aroclor 1254、1260) 一致^[26]; 与以 3、4 氯取代为主的国内废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 差别较大^[27]. 表明电子垃圾拆解区 PCBs 的污染可能主要来自国外输入的电子垃圾. 对照区的 3、4 氯取代同族体相对含量增加, 而 5、6 氯取代化合物的较池塘沉积物下降明显.

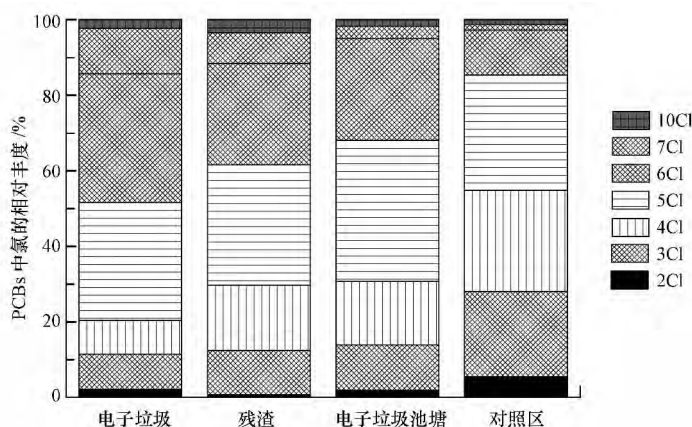


图 4 电子垃圾区和对照区样品中 PCBs 同族体分布模式

Fig.4 PCBs congener profiles in different sampling materials

3 结论

(1) 电子垃圾拆解区池塘沉积物中 CPs 浓度较对照区高约 5—20 倍, PCBs 浓度高出 2—3 个数量级. 与其他地区相比, 也处于较高水平, 表明电子垃圾拆解活动给当地带来极大的环境风险.

(2) 与电子垃圾污染源相比, 电子垃圾焚烧残渣、拆解区池塘沉积物和对照区沉积物的 CPs 和 PCBs 中低碳低氯代同系物相对含量依次增加, 表明 CPs 和 PCBs 在焚烧过程存在明显的脱碳脱氯, 在迁移过程中除受低碳低氯迁移能力的影响外, 还可能存在脱碳脱氯降解行为.

参 考 文 献

- [1] Wu J P ,Luo X J ,Zhang Y ,et al. Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild aquatic species from an electronic waste (e-waste) recycling site in South China [J]. *Environment International* ,2008 ,34(8) : 1109-1113
- [2] Zhang K ,Schnoor J L ,Zeng E Y. E-waste recycling: where does it go from here? [J]. *Environmental Science & Technology* ,2012 ,46(20) : 10861-10867
- [3] Mai B X ,Fu J M ,Sheng G Y ,et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta ,China[J]. *Environmental Pollution* ,2002 ,117(3) : 457-474
- [4] Luo X J ,Chen S J ,Mai B X ,et al. Distribution ,source apportionment and transport of PAHs in sediments from the Pearl River Delta and the northern South China Sea[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* ,2008 ,55(1) : 11-20
- [5] Deng H M ,Peng P A ,Huang W L ,et al. Distribution and loadings of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xijiang River in Guangdong , South China[J]. *Chemosphere* ,2006 ,64(8) : 1401-1411
- [6] Yu M ,Luo X J ,Chen S J ,et al. Organochlorine pesticides in the surface water and sediments of the Pearl River Estuary ,South China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* ,2008 ,27: 10-17
- [7] Mai B X ,Chen S J ,Luo X J ,et al. Distribution of polybrominated diphenyl ethers in sediments of the Pearl River Delta and adjacent South China Sea[J]. *Environmental Science & Technology* ,2005 ,39(10) : 3521-3527
- [8] He M J ,Luo X J ,Yu L H ,et al. Tetrabromobisphenol-A and hexabromocyclododecane in birds from an e-waste region in South China: Influence of diet on diastereoisomer- and enantiomer-specific distribution and trophodynamics[J]. *Environmental Science & Technology* , 2012 ,44: 5748-5754
- [9] Janssen E M ,Croteau M N ,Luoma S N ,et al. Measurement and modeling of polychlorinated biphenyl bioaccumulation from sediment for the marine polychaete *Nereis acanthodes* and response to sorbent amendment[J]. *Environmental Science & Technology* ,2009 ,44(8) : 2857-2863
- [10] Muir D ,Bennie D ,Teixeira C ,et al. Short chain chlorinated paraffins: Are they persistent and bioaccumulative? [M]//Persistent , bioaccumulative and toxic chemicals II . American Chemical Society 2000: 184-202
- [11] Muir D ,Tomy G ,Teixeira C. Accumulation of short chain chlorinated paraffins in water ,sediments and fish from Lake Ontario[J]. *IAGLR Conference Program and Abstracts* ,2001 ,44: 97-108
- [12] Van G J L ,Mackay D ,Poirier D G ,et al. Accumulation and depuration of polychlorinated biphenyls from field-collected sediment in three

- freshwater organisms[J]. *Environmental Science & Technology* 2011 45(16): 7011-7018
- [13] Poremski H J, Wiandt S, Knacker T. Chlorinated paraffins—a further POP to consider? [J]. *Organohalogen Compounds* 2001 52: 397-400
- [14] Alecock R E, Jones K. New organic compounds in the environment[J]. *Atmos Environ Int* 1999 33: 1645-1646
- [15] 联合国环境规划署. UNEP/POPS/COP.3/12 持久性有机污染物审查委员会: 引发缔约方大会酌情采取行动的相关事态进展 [R]. 达喀尔, 2007
- [16] Chen M Y, Luo X J, Zhang X L, et al. Chlorinated paraffins in sediments from the Pearl River Delta, South China: Spatial and temporal distributions and implication for processes [J]. *Environmental Science & Technology* 2011 45(23): 9936-9943
- [17] 袁博, 王亚韡, 傅建捷, 等. 氯化石蜡分析方法的研究及土壤样品中氯化石蜡的测定 [J]. *科学通报* 2010 49: 1879-1885
- [18] 江桂斌, 陈茹, 王亚韡, 等. 短链氯化石蜡在台州电子拆解地区的分布特征 [J]. *环境化学* 2014 33(6): 873-879
- [19] 陈满英, 张秀蓝, 余乐涸, 等. 沉积物中氯化石蜡与多氯联苯的分离及气相色谱-质谱检测 [J]. *分析测试学报* 2012 31(6): 651-657
- [20] Zeng L X, Wang T, Wang P, et al. Distribution and trophic transfer of short-chain chlorinated paraffins in an aquatic ecosystem receiving effluents from a sewage treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology* 2011 45: 5529-5535
- [21] 吴江平, 管运涛, 张荧, 等. 广东电子垃圾污染区水体底层鱼类对 PCBs 的富集效应 [J]. *中国环境科学* 2011 31(4): 637-641
- [22] Leung A, Cai Z W, Wong M H. Environmental contamination from electronic waste recycling at Guiyu, southeast China [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2006 8: 21-33
- [23] Zhao G, Xu Y, Han G, et al. Biotransfer of persistent organic pollutants from a large site in China used for the disassembly of electronic and electrical waste [J]. *Environmental Geochemistry and Health* 2006 28(4): 341-351
- [24] Howell N L, Suarez M P, Rifai H S, et al. Concentrations of polychlorinated biphenyls (PCBs) in water, sediment and aquatic biota in the Houston Ship Channel, Texas [J]. *Chemosphere* 2008 70(4): 593-606
- [25] Zhou S S, Shao L Y, Yang H Y, et al. Residues and sources recognition of polychlorinated biphenyls in surface sediments of Jiaojiang Estuary, East China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin* 2012 64(3): 539-545
- [26] Breivik K, Sweetman A, Pacyna J M, et al. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners—a mass balance approach [J]. *The Science of the Total Environment International* 2002 290: 181-198
- [27] 陈来国, 蔡信德, 黄玉妹, 等. 废弃电容器封存点多氯联苯的含量和分布特征 [J]. *中国环境科学* 2008 28(9): 833-837