

郑晶, 陈可慧, 陈社军 等. 2013. 电子废物拆解地区人群头发中持久性卤代有机污染物(PHCs) 的污染特征[J]. 环境科学学报, 33(11) : 2928–2934
Zheng J, Chen K H, Chen S J, et al. 2013. Persistent halogenated compounds (PHCs) in human hair in an e-waste recycling area: Levels and composition profiles [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(11) : 2928–2934

电子废物拆解地区人群头发中持久性卤代有机污染物(PHCs) 的污染特征

郑晶¹, 陈可慧², 陈社军^{2,*}, 彭晓武¹, 任明忠¹, 罗孝俊², 于云江¹, 麦碧娴² 杨中艺³

1. 环境健康研究中心, 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655
 2. 有机地球化学国家重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640
 3. 有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 中山大学生命科学学院, 广州 510275
- 收稿日期: 2013-06-16 修回日期: 2013-08-16 录用日期: 2013-08-16

摘要: 本研究以头发作为指示人群持久性卤代有机污染物(PHCs) 暴露的生物材料, 分析了电子废物拆解工人、电子废物拆解区普通居民、农村对照区居民和城市对照区居民头发中的 PHCs 浓度水平及组成特征. 结果发现: 电子废物拆解工人和拆解区普通居民头发中的 PHCs 含量显著高于两组对照地区人群($p < 0.05$), 表明电子废物拆解活动造成了当地人群对 PHCs 较高的暴露剂量. 在电子废物拆解区的普通居民中, 人群头发中的 PHCs 含量具有随年龄的增加而上升的趋势, 老年人组(> 60 岁)头发中的 PHCs 含量最高. 在电子废物污染地区和农村对照区人群中, PCBs 是最主要的 PHCs 污染物(39% ~ 52%), 表明这两个地区的人群均受到电子废物拆解活动的影响; 城市人群头发中则以 PBDEs 和 DBDPE 为主(共占 69%), 反映了珠三角地区人群主要受工业或生活活动 PHCs 排放的影响. 同时, 主成分分析显示, 不同人群头发中 PHCs 的组成模式也与污染物在环境中的迁移有关.

关键词: 电子废物拆解; 头发; 卤代有机污染物

文章编号: 0253-2468(2013)11-2928-07 中图分类号: X503.1 文献标识码: A

Persistent halogenated compounds (PHCs) in human hair in an e-waste recycling area: Levels and composition profiles

ZHENG Jing¹, CHEN Kehui², CHEN Shejun^{2,*}, PENG Xiaowu¹, REN Mingzhong¹, LUO Xiaojun², YU Yunjiang¹, MAI Bixian², YANG Zhongyi³

1. Center for Environmental Health Research, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655
2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640
3. State Key Laboratory for Biocontrol, School of Life Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

Received 16 June 2013; received in revised form 16 August 2013; accepted 16 August 2013

Abstract: This study investigated the concentrations and composition profiles of PHCs in human hair of e-waste recycling workers and residents from an e-waste area and compared with those from the rural and urban areas in southern China. The PHCs levels in the e-waste recycling workers and residents from the e-waste area were significantly higher than those from the two reference areas ($p < 0.05$). Furthermore, legacy PCBs dominated the PHCs in both the e-waste and rural areas. The findings indicated a substantial influence of e-waste recycling activities on the PHCs exposure of people in these areas. The highest PHCs levels were generally detected in the older group (> 60 years), suggesting a higher health risk for older people in the e-waste area. However, PBDEs and DBDPE were predominant pollutants in hair from the urban area, reflecting an influence of industrial or domestic sources. The PHCs composition profiles in the human hair, as suggested by the principal component analysis, were also attributed to the atmospheric transport of PHCs.

基金项目: 广东省自然科学基金自由申请项目(No. S2011010006081); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(No. PMZX021201211118)

Supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(No. S2011010006081) and the Basic Research Foundation of National Commonwealth Research Institute (No. PMZX021201211118)

作者简介: 郑晶(1986—), 男, 工程师(博士), E-mail: zhengjing@scies.org; * 通讯作者(责任作者) E-mail: chenshejun@gig.ac.cn

Biography: ZHENG Jing (1986—), male, engineer(Ph. D.), E-mail: zhengjing@scies.org; * Corresponding author, E-mail: chenshejun@gig.ac.cn

Keywords: e-waste recycling activities; human hair; persistent halogenated compounds

1 引言(Introduction)

据 2005 年联合国环境规划署预计,全世界每年产生的电子废弃物将达 2000 ~ 5000 万 t(UNEP, 2005) ,并在全球范围内以每年 3% ~ 5% 的速度增长. 发达国家产生的电子废物,有 50% ~ 80% 被运到亚洲和非洲等发展中国家,而我国是世界上最大的电子废物输入国(Kahhat *et al.*, 2008) . 同时,由于国内产品的更新换代,我国已成为全球第二大电子废物生产国(仅次于美国) ,并且仍在以高于全球平均增速的速度增长(郑骥 2010) .

废物回收是资源综合利用的重要环节,但是,在发展中国家电子废物回收处理行业长期以来主要采用了原始粗放的拆解方式(如机械拆解、酸洗、焚烧等) . 这不可避免地对当地环境造成了严重的污染,并危害生态系统和公众健康(杨中艺等, 2008) . 卤代有机污染物(PHCs) 和重金属是电子废物处理过程中产生的重要污染物. 我国有几个非常著名的电子废物拆解地,如广东省汕头贵屿镇、清远龙塘镇及浙江省台州. 研究表明,这些地区的土壤、大气、水等环境以及鱼、鸟等多种生物已受到 PHCs 的严重污染(Leung *et al.*, 2007; Wong *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2009b; Wu *et al.*, 2008) . 但是,由于采样的困难,有关这些地区人群的 PHCs 和重金属暴露及人体负荷方面的研究还不多(Bi *et al.*, 2007; Huo *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011) .

由于具有采集方便、费用低、易于运输和保存以及可以反映短期或长期暴露信息等优点,近年来,头发已被广泛用来作为指示人体毒品、重金属和一些有机污染物等暴露的生物材料(Pragst *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009; Tadeo *et al.*, 2009) . 针对电子废物拆解地区人群头发中的 PHCs 的污染状况也有一些报道,如 Zhao 等(2008) 对台州地区人发样品中 PBBs、PBDEs 和 PCBs 的含量情况做了研究,发现电子废物拆解地区的人群头发中上述 3 类有机污染物的含量分别是对照地区的 2 ~ 10 倍; Wen 等(2008) 也对台州市电子废物拆解区域人群头发中二噁英(PCDD/Fs) 、多溴联苯醚(PBDEs) 等 PHCs 的含量进行了研究.

最近,本课题组分别对广东某电子废物拆解地区人群头发中的重金属、多氯联苯(PCBs) 及 PBDEs 等卤代阻燃剂的污染情况进行了报道,了解当地人

群对这些污染物的暴露情况(Zheng *et al.*, 2010; 2011a; 2011b; 2013) . 本研究主要综合以上研究成果,系统地介绍电子废物拆解地区人群头发中 PHCs 的污染水平,并探讨年龄等因素对头发中 PHCs 含量的影响. 同时,通过对比城市地区居民和农村地区人群头发中的 PHCs,分析不同地区人群 PHCs 的组成特征及来源差异.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 样品采集

头发样品分别采集于电子废物拆解地区、邻近城市地区和农村地区,样品采自各地区的理发店. 在样品采集前,向采集对象说明本研究的目的和意义,并对采集对象做关于年龄、职业等的问卷调查. 所采集的头发在近期未经过任何染发、烫发等处理,样品采集前不对头发进行清洗等处理,并且尽可能剪取靠近头皮处的头发. 详细的样品采集方法和过程在已发表论文中均有描述(Zheng *et al.*, 2010; 2011b; Zheng *et al.*, 2013) . 总的来说,本研究头发采集人群的年龄在 0.5 ~ 90 岁之间,并归为以下几类: 电子废物区拆解工人、电子废物区居民、城市地区居民及农村地区居民. 综合考虑各种目标化合物的检出率,本文中 4 类人群的样本量分别为 25、75、31 和 25 人.

2.2 样品前处理和仪器分析

头发样品的处理方法及质量控制与质量保证(QA/QC) 措施详见文献(Zheng *et al.*, 2010; 2011b; 2013) . 简单地说,首先,使用 Milli-Q 超纯水在摇床中振荡洗涤样品 3 次后冷冻干燥,将干燥后的头发剪短至成 2 ~ 3 mm; 然后,称取约 2 g 的头发,添加回收率指示物,用盐酸(4 mol·L⁻¹) 和正己烷/二氯甲烷混合溶剂(4:1, V/V) 对样品进行液液萃取,萃取液经过多层硅胶复合柱净化后,采用气相色谱质谱联用仪进行测定.

2.3 主成分分析(PCA)

PCA 是将多个变量通过线性变换以选出少数几个重要变量的一种多元统计分析方法,用少数的变量来代表原始变量的信息. 对样品中 PHCs 污染物数据进行对数归一化(使服从正态分布) 后进行了主成分分析,对于低于检出限的数据以相应污染物检出限代替. PCA 通过软件 SPSS 16.0 完成.

3 结果分析和讨论(Results and discussion)

3.1 不同地区人群头发中 PHCs 的含量

从研究地区人群头发中 PHCs 的含量(表 1)可以看出,电子废物拆解工人和拆解区普通居民头发中的 PHCs 含量均显著高于城市和农村居民头发中的 PHCs 含量($p < 0.05$, Mann-Whitney rank sum test),其平均值分别为城市居民的 5 倍和 4 倍、农村居民的 9 倍和 7 倍。拆解工人头发中的 PHCs 含量也高于拆解区的普通居民,平均含量约为其 2 倍,但差异不具有统计意义上的显著性($p = 0.176$)。由于电子废物拆解工人和拆解区的普通居民生活在同一区域,和农村对照区人群相邻近,具有相同的生活习惯和饮食习惯,因此可知,电子废物拆解活动是造成拆解地区人群头发中高含量 PHCs 的主要原因。

表 1 电子废物拆解区工人、拆解区普通居民、农村和城市人群头发中 PHCs 的含量

Table 1 Concentrations of PHCs in human hair of e-waste recycling workers and residents in the e-waste, rural, and urban areas

污染物	人群头发中 PHCs 的含量/($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)			
	拆解工人(25 人)	拆解区居民(75 人)	农村对照区居民(25 人)	城市对照区居民(31 人)
PCBs	430.80 ± 447.90	211.90 ± 273.90	19.90 ± 14.30	19.30 ± 16.80
PBDEs	125.80 ± 166.80	55.80 ± 44.40	17.40 ± 20.40	26.90 ± 21.40
DBDPE	53.00 ± 75.30	22.00 ± 15.40	18.40 ± 29.90	28.30 ± 24.70
BTBPE	2.98 ± 5.79	0.99 ± 1.15	0.24 ± 0.38	0.42 ± 0.73
HBB	3.39 ± 3.02	2.27 ± 3.39	0.23 ± 0.24	0.32 ± 0.46
PBBs	2.80 ± 3.60	1.03 ± 0.92	0.19 ± 0.70	0.13 ± 0.24
DPs	14.50 ± 13.50	7.20 ± 8.22	1.09 ± 1.74	0.92 ± 1.09
PHCs	512.60 ± 574.10	298.30 ± 300.20	57.40 ± 49.70	75.30 ± 48.20

注:人群头发中 PHCs 含量以干重计。

3.2 不同年龄人群头发中 PHCs 的差异

本研究以拆解区普通居民为对象,研究了年龄对人群头发中 PHCs 含量的影响。将人群按年龄的大小,分为婴儿(< 2 岁)、学龄前儿童(3~7 岁)、未成年人(8~18 岁)、成年人(19~60 岁)和老年人组(> 60 岁),每组的样本量分别为 12、15、10、27 和 11 个。不同年龄段人群头发中总 PHCs 的含量情况如图 1 所示。

5 组人群头发样品中的 PHCs 含量从低至高依次为婴儿(平均值: $196 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、中位数: $119 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) < 学龄前儿童(平均值: $262 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、中位数: $121 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) < 未成年人(平均值: $310 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、中位数: $245 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) \approx 成年人(平均值: $296 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、中位数: $185 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) < 老年人(平均值: $454 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、中位数: $393 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。整体上,研究地区人群头发中的 PHCs 含量具有随着年龄的增高而上升的趋势。老年

虽然拆解工人和拆解区居民头发中 PHCs 含量没有显著差异,但拆解工人头发中的 PCBs、PBDEs 和 DPs 含量均显著高于当地相同年龄段的普通居民(18~60 岁)。由于拆解工人和拆解区普通居民的生活习惯、饮食结构等基本一样,由此可知,拆解工人长时间的职业暴露是其头发中 PHCs 含量偏高的主要原因。对于拆解工人,污染物可以通过接触电子废物处理过程中产生的粉尘及气体分配直接进入头发,也可以通过呼吸、口摄入、皮肤接触等途径进入人体后再进入头发。但是,目前还不清楚究竟以哪种途径为主。对电子废物污染区作坊内灰尘中 PBDEs、PCBs 和 DPs 的研究均发现,电子废物拆解作坊的灰尘中含有极高浓度的 PHCs(Leung *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010),也反映了电子废物拆解过程中产生的粉尘可能在该地区人群 PHCs 污染物暴露中起重要的作用。

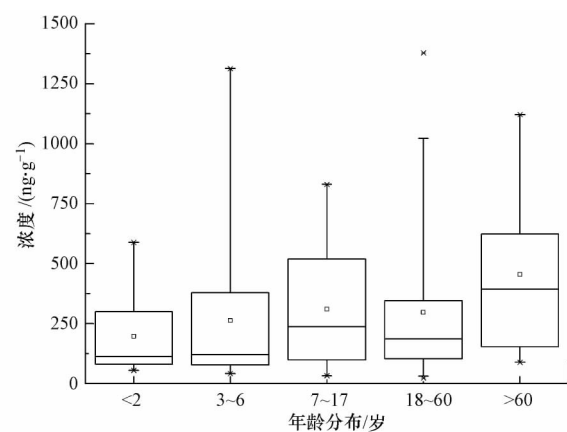


图 1 电子废物拆解地不同年龄组普通居民头发中 PHCs 的含量分布

Fig. 1 The PHC concentrations in human hair of residents from different age groups in the e-waste area

人组头发中的 PHCs 含量显著高于婴儿组和未成年组 ($p < 0.05$), 但其它各组之间的含量差异并不显著 ($p > 0.05$). 主要原因可能是老年人头发生长速度低于其他年龄段人群, 从而导致其头发中积累更高浓度的污染物 (Barth, 1986). 另外, 老年人对污染物的代谢能力低于其他年龄段人群也可能是主要原因之一.

3.3 不同地区人群头发中 PHCs 的组成特征

电子废物拆解工人、拆解区普通居民、农村和城市居民头发中的 PHCs 组成特征如图 2 所示. 很明显, PCBs、PBDEs 和 DBDPE 是研究地区人群头发中 3 类最重要的 PHCs. 在拆解工人头发中这 3 种污染物占总 PHCs 的比例分别为 41%、35%、15%. 在拆解区普通居民头发中它们分别占 52%、29%、13%, 与拆卸工人相比, 拆解区普通居民头发中 PCBs 所占的比重明显上升 (虽然含量有所降低), 而两种溴代阻燃剂 PBDEs 和 DBDPE 的比例有所下降. 这可能是因为污染物从电子废物拆解作坊释放、然后在迁移过程中由于污染物物理化学性 (挥发性、光稳定性等) 的差异而发生组分的改变, 从而导致拆解工人 (作坊暴露为主) 和普通居民 (家庭等) 在暴露源头上存在一定的差异. 另一种可能的解释是: PCBs 是比 PBDEs 和 DBDPE 在人体内更稳定的化合物, 并且已有研究发现生物体内 PBDEs 和 DBDPE 的降解 (Luo *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2008); 拆解工人存在相对高剂量的 PHCs 暴露, 代谢作用对体内组织中污染物含量的影响较小; 而居民暴露

量相对较小, 一定时期后, 代谢作用的影响可能比较显著.

在城市对照区, 居民头发中 PCBs、PBDEs 和 DBDPE 占 PHCs 的比例分别为 28%、35%、34%, 这与电子废物拆解区人群头发中的 PHCs 分布模式有较大的差异. 在城市居民头发中, PBDEs 和 DBDPE 是最主要的污染物 (累计占 69%), 显著高于电子废物拆解地区工人和居民, 但城市地区 PCBs 的比例明显较低 (检出率也不高). 这是因为城市地区居民头发中的 PHCs 主要是受当地污染影响, 比如工业或生活活动的排放. PHCs 在两地区人群头发中的分布模式反映了这两个地区 PHCs 的环境污染模式, 而这又与这些化学品的使用有关.

PCBs 作为润滑剂和热交换流体等曾被广泛用于变压器、电容器和一些电子电气设备中. 这类化学品已经于 20 世纪 70~80 年代被广泛禁止, 因此, 主要存在于较旧的电子电器产品中, 并且在我国的生产和使用量均非常小. 之前的研究也发现全国范围内 PCBs 的背景值非常低 (Wong *et al.*, 2007). PBDEs 工业品主要有五溴、八溴和十溴联苯醚 3 种. 五溴和八溴联苯醚工业品的主要组分已 (2009 年) 被正式列入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》, 我国也于 2006 年颁布《电子信息产品污染控制管理办法》禁止或限制这些 PBDEs 的使用, 但生产和使用量最大的十溴联苯醚仍然允许在许多国家和地区使用. DBDPE 是十溴联苯醚最重要的替代品, 最近几年在我国的生产和使用量急剧增加 (Luo *et al.*, 2010), 其在环境中的浓度也明显升高, 甚至超过了以前最重要的 BDE209 (即十溴联苯醚) (Chen *et al.*, 2013). 电子废物拆解地区人群头发样本中 PCBs 高含量和比例正是由于处理大量的从国外进口的旧电子废物造成的, 这也反映了电子废物的进口造成禁用的历史污染物 PCBs 对我国一些地区环境的污染. PCBs 毒性较高, 对人体的健康危害大, 应引起高度关注. 城市地区的 PBDEs 和 DBDPE 则一定程度上反映了国内 (特别是珠三角地区) 卤代阻燃剂的使用和污染情况.

在农村对照地区, 居民头发中 PCBs、PBDEs 和 DBDPE 分别占 39%、30%、27%, 也与电子废物拆解区人群头发中的 PHCs 的分布模式存在一定的差异, 最明显的是 DBDPE 的比例升高. 本研究认为, 农村对照区同时受电子废物拆解地和城市地区两种 PHCs 污染源的影响, PHCs 的组成是这两种源的

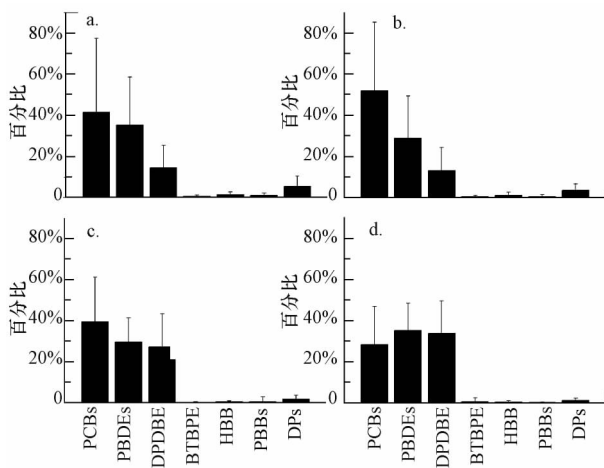


图 2 电子废物拆解工人 (a)、拆解区普通居民 (b)、农村村民 (c) 和城市居民 (d) 头发中 PHCs 的组成特征

Fig. 2 The patterns of PHCs in the e-waste recycling workers (a), residents from the e-waste recycling area (b), rural area and urban area (c)

组合,也是污染物在大气传输过程中变化的结果.

本研究中不同地区人群头发中其他 PHCs 污染物的比例都比较低,也反映了这些化学品(DPs、BTBPE、PBBs、HBB等)的使用量一直都较低.值得一提的是,DPs在电子废物拆解地的比例(工人6%,普通居民4%)明显高于对照区(农村2%,城市1%),这与DPs在北美使用量较大,而在我国使用量很小的情况是一致的.

3.4 主成分分析与头发中 PHCs 的来源分析

PCA结果显示,对于拆解工人头发中的 PHCs,主成分1(PC1)主要由五溴联苯醚 PBDEs(penta-BDEs)、PBBs、HBB和DPs构成,其他污染物在主成分2(PC2)上载荷较高(图3a),但规律不太明显,大致与污染物的分子量大小有关,这也说明该人群主要是受职业暴露影响.对于电子废物拆解区居民,虽然PHCs都来自电子废物拆解活动,但PCBs与其他PHCs分别代表不同的主成分(图3b).这可能是由于污染物在迁移过程中的组分变化造成的,PCBs

主要存在于大气气相,而其他污染物大部分存在于颗粒相中,因此PCBs在环境中的迁移能力要强于其他污染物,这与前面的分析结果一致.在距离电子废物拆解区更远的农村对照区也发现相似的结果(图3c).

对于城市地区居民中PHCs,也存在两个主成分,PC1与DBDPE、BTBPE和Deca-BDE相关性非常好,而PCBs主要集中在PC2上,DPs、HBB和penta-BDEs在两个主成分上的载荷都比较高.因此,PC1与PC2可能分别代表了新化学品(当前使用的)与旧化学品(较少或不使用的)来源.另外,污染物的物理化学性质对它们在PC1和PC2的载荷也有影响,PC1上的污染物几乎只存在于大气颗粒相中,PCBs大部分在气相中,HBB和penta-BDEs也以颗粒相为主.总之,研究结果显示,除电子废物拆解工人外,其他人群头发中PCBs在PCA载荷图中基本上远离其他化合物,这说明人群对PCBs和其它污染物的暴露方式可能存在着差异.

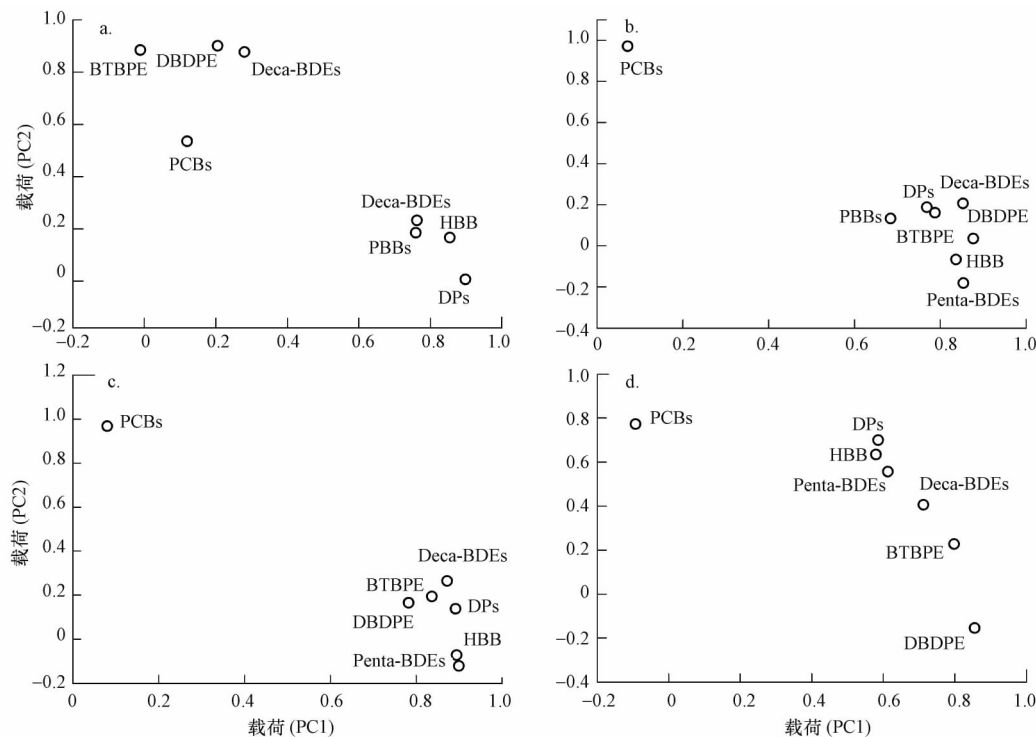


图3 不同人群头发中PHCs主成分分析因子载荷图(a. 拆解工人; b. 拆解区居民; c. 农村居民; d. 城市居民)

Fig. 3 Factor loading plots of principal component analysis of PHCs in the human hair (a. e-waste recycling workers; b. residents in the e-waste area; c. residents in the rural area; d. residents in the urban area)

4 结论(Conclusions)

1) 电子废物拆解活动造成拆解工人和拆解区

普通居民头发中的PHCs含量显著升高,有必要对当地人群暴露PHCs的健康风险和危害作进一步的研究.

2) 不同年龄段人群头发中的 PHCs 含量基本上呈现随年龄增加而含量上升的趋势, 老年人群头发中的 PHCs 含量要显著高于婴儿和未成年儿童。

3) 不同群体的人群头发中 PHCs 的组成模式存在较大的差异, 这反映了研究地区不同人群不同的 PHCs 暴露环境, 而这与各地区受电子废物拆解和城市活动的影响程度有关, 也与 PHCs 污染物在环境中的迁移有关。

致谢: 本实验的现场采样及化学分析工作由中国科学院广州地球化学研究所麦碧嫻研究员课题组和中山大学生命科学学院杨中艺课题组等协助完成, 在此表示感谢。

责任作者简介: 陈社军(1976—) 男, 副研究员, 主要从事有机污染物环境地球化学行为。E-mail: chenshejun@gig.ac.cn.

参考文献(References):

- Barth J H. 1986. Measurement of hair growth [J]. *Clinical and Experimental Dermatology*, 11(2): 127-138
- Bi X, Thomas G O, Jones K C, et al. 2007. Exposure of electronics dismantling workers to polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in South China [J]. *Environmental Science & Technology*, 41(16): 5647-5653
- Chen S J, Feng A H, He M J, et al. 2012. Current levels and composition profiles of PBDEs and alternative flame retardants in surface sediments from the Pearl River Delta, southern China: Comparison with historical data [J]. *Science of the Total Environment*, 444: 205-211
- Hu G C, Luo X J, Dai J Y, et al. 2008. Brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticide in giant panda (*Ailuropoda melanoleuca*) and red panda (*Ailurus fulgens*) from China [J]. *Environmental Science & Technology*, 42(13): 4704-4709
- Huo X, Peng L, Xu X, et al. 2007. Elevated blood lead levels of children in Guiyu, an electronic waste recycling town in China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 115(7): 1113-1117
- Kahhat R, Kim J, Xu M, et al. 2008. Exploring e-waste management systems in the United States [J]. *Rosources, Consevation and Recycling*, 52(7): 955-964
- Leung A O W, Luksemburg W J, Wong A S, et al. 2007. Spatial Distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at guiyu, an electronic waste recycling site in Southeast China [J]. *Environment Science & Technology*, 41(8): 2730-2737
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, et al. 2010. Advances in study of current-use non-PBDE brominated flame retardants and dechlorane plus in the environmental and humans [J]. *Science China Chemistry*, 53(5): 961-973
- Luo X J, Zhang X L, Liu J, et al. 2009. Persistent halogenated compounds in waterbirds from an e-waste recycling region in South China [J]. *Environmental Science & Technology*, 43(2): 306-311
- Pragst F, Balikova M A. 2006. State of the art in hair analysis for detection of drug and alcohol abuse [J]. *Clinica Chimica Acta*, 370(1/2): 17-49
- Rodrigues J I, Batista B L, Nunes J A, et al. 2008. Evaluation of the use of human hair for biomonitoring the deficiency of essential and exposure to toxic elements [J]. *Science of the Total Environment*, 405(1/3): 370-376
- Tadeo J L, Sanchez-Brunete C, Miguel E. 2009. Determination of polybrominated diphenyl ethers in human hair by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Talanta*, 78(1): 138-143
- UNEP. 2005. E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use [Z]. *Early Warning on Emerging Environmental Threats*, No 5.
- Wang H M, Han M, Yang S W, et al. 2011. Urinary heavy metal levels and relevant factors among people exposed to e-waste dismantling [J]. *Environmental International*, 37(1): 80-85
- Wang J, Ma Y J, Chen S J, et al. 2010. Brominated flame retardants in house dust from e-waste recycling and urban areas in South China: implications on human exposure [J]. *Environmental International*, 36(1): 535-541
- Wang T, Fu J J, Wang Y W, et al. 2009. Use of scalp hair as indicator of human exposure to heavy metals in an electronic waste recycling area [J]. *Environmental Pollution*, 157(8/9): 2445-2451
- Wen S, Yang F X, Gong Y, et al. 2008. Elevated levels of urinary 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine in male electrical and electronic equipment dismantling workers exposed to high concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans, polybrominated diphenyl ethers, and polychlorinated biphenyls [J]. *Environmental Science & Technology*, 42(11): 4202-4207
- Wong C S C, Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, et al. 2007. Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China [J]. *Environmental Pollution*, 148(1): 62-72
- Wong M H, Wu S C, Deng W J, et al. 2007. Export of toxic chemicals—A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling [J]. *Environmental Pollution*, 149(2): 131-140
- 吴江平. 2008. 多溴联苯醚和多氯联苯在典型污染区域水生生物体内的富集与放大[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- Wu J P, Luo X J, Zhang Y, et al. 2008. 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*, 34(8): 1109-1113
- 杨中艺, 郑晶, 陈社军, 等. 2008. 广东省电子废物处理处置地区环境介质污染研究进展[J]. *生态毒理学报*, 3(6): 533-544
- 张秀蓝. 2010. 电子垃圾处置区鸟类体内中卤代有机污染物富集特征的初步研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- Zhao G F, Wang Z J, Dong M H, et al. 2008. PBBs, PBDEs, and PCBs levels in hair of residents around e-waste disassembly sites in

- Zhejiang Province , China , and their potential sources [J]. *Science of the Total Environment* ,397(1/3) : 46-57
- Zheng J , Luo X J , Yuan J G , *et al.* 2011a. Heavy metals in hair of residents in an e-waste recycling area , South China: contents and assessment of bodily stat [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* ,61(4) : 696-703
- Zheng J , Luo X J , Yuan J G , *et al.* 2011b. Levels and sources of brominated flame retardants in human hair from urban , e-waste , and rural areas in South China [J]. *Environmental Pollution* ,159(12) : 3706-3713
- Zheng J , Wang J , Luo X J , *et al.* 2010. Dechlorane Plus in human hair from an e-waste recycling area in South China: comparison with dust [J]. *Environmental Science & Technology* ,44(24) : 9298-9303
- Zheng J , Yan X , Chen S J , *et al.* 2013. Polychlorinated biphenyls in human hair at an e-waste site in China: composition profiles and chiral signatures in comparison to dust [J]. *Environmental International* ,54: 128-133
- 郑骥. 2010. 中国电子废物再生产业发展现状分析 [J]. *新材料产业* ,(12) : 22-26