

# 珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险

朱智成<sup>1,2</sup>, 陈社军<sup>1\*</sup>, 丁南<sup>1,2</sup>, 王璟<sup>3</sup>, 罗孝俊<sup>1</sup>, 麦碧娴<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 工业和信息化部电子第五研究所赛宝认证中心, 广州 510610)

**摘要:** 本研究对珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯 (PCBs) 进行了分析. 结果表明, 清远电子垃圾区灰尘中 PCBs 的含量为 12.4 ~ 87 765 ng·g<sup>-1</sup>, 平均 10 167 ng·g<sup>-1</sup>. 室内和庭院灰尘中 PCBs 的含量无显著差别. 电子垃圾区灰尘中 PCBs 组成模式 (以 3-, 5-, 6-, 4 氯代 PCBs 为主) 与我国工业品中 PCBs 的组成并不相似, 并且室内外灰尘中的组成没有明显的差别. 采用化学质量平衡受体模型进行源解析显示, 电子垃圾区灰尘中 PCBs 主要来自 Aroclor 1262 (36.7%)、Aroclor 1254 (26.7%)、Aroclor 1242 (21.4%) 和 Aroclor 1248 (18.5%). 电子垃圾区婴幼儿、儿童/青少年、成人通过灰尘对 PCBs 的平均日暴露量分别为 42、17 和 2.9 ng·(kg·d)<sup>-1</sup>. 风险评估显示, 婴幼儿、儿童和青少年通过灰尘暴露 PCBs 的总非癌症危害商数 (HQ) 均高于 1, 可对身体健康产生危害, 人群终生平均致癌风险为 4.5 × 10<sup>-5</sup>, 处于美国 EPA 可接受的致癌风险范围. 广州地区家庭灰尘中 PCBs 的平均含量仅为 48.7 ng·g<sup>-1</sup>, 这与 PCBs 并未在我国大范围使用一致. 广州地区人群通过家庭灰尘暴露 PCBs 的风险很低.

**关键词:** 多氯联苯; 家庭灰尘; 电子垃圾; 来源; 暴露风险

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3066-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.08.033

## Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China: Sources and Human Exposure and Health Risks

ZHU Zhi-cheng<sup>1,2</sup>, CHEN She-jun<sup>1</sup>, DING Nan<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>3</sup>, LUO Xiao-jun<sup>1</sup>, MAI Bi-xian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Polychlorinated biphenyls (PCBs) were measured in house dust from an e-waste site and urban site in the Pearl River Delta, southern China. The PCB concentrations in house dust at the e-waste site ranged from 12.4 to 87 765 ng·g<sup>-1</sup>, with an average of 10 167 ng·g<sup>-1</sup>. There was no significant difference in the PCB concentrations between indoor and outdoor dust. The PCB homologue pattern was dominated by tri-, penta-, hexa-, and tetra-CBs, which was not similar to that in Chinese technical PCB product. There was also no significant difference in the PCB compositions between indoor and outdoor dust. PCB sources in house dust at the e-waste site were apportioned by chemical mass balance (CMB) model. The results showed that the PCBs were derived primarily from Aroclor 1262 (36.7%), Aroclor 1254 (26.7%), Aroclor 1242 (21.4%), and Aroclor 1248 (18.5%). The daily exposure doses were 42, 17, and 2.9 ng·(kg·d)<sup>-1</sup> for toddlers, children/adolescents, and adults in the e-waste area, respectively. Risk assessment indicated that the hazard quotients were higher than 1 for toddlers and children/adolescents indicating adverse effects for them. The lifetime average excess carcinogenic risk for population in the e-waste area was 4.5 × 10<sup>-5</sup>, within the acceptable range of U. S. Environmental Protection Agency. The mean concentrations of PCBs in house dust in Guangzhou was 48.7 ng·g<sup>-1</sup>. The low PCB level is consistent with the fact that technical PCBs were not widely used in China in the past. The risks of exposure to PCBs via house dust in Guangzhou are very low.

**Key words:** polychlorinated biphenyls (PCBs); house dust; e-waste; source; risk assessment

家庭(或室内)灰尘可能包含矿物尘粒、纺织纤维、甚至化学粉尘等,往往是某些污染物的重要载体,并可能在室内长期存在.人们 80% 以上的时间都是在室内度过,每天都会不知不觉地通过许多途径(如口手接触、皮肤接触、呼吸以及饮食等)摄入灰尘.因此,家庭灰尘是人体暴露一些污染物的一个

重要的源头<sup>[1]</sup>.

收稿日期: 2014-01-03; 修订日期: 2014-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41273115, 41230639, 41073078)

作者简介: 朱智成 (1986 ~) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为有机污染物的环境行为. E-mail: zcz006749@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: chenshejun@gig.ac.cn

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是一种人工合成的、曾被广泛应用于电力工业、塑料加工业、化工和印刷等领域的氯代芳烃类化合物<sup>[2]</sup>。虽然 PCBs 的生产和使用已被禁止多年, PCBs 也于 2001 年被列入《斯德哥尔摩 POPs 公约》首批受控制名单中, 但由于其在环境中的持久性依然在许多环境介质中被检出; PCBs 已经被证明具有致癌性, 并可对免疫、生殖和神经系统等产生危害<sup>[3-4]</sup>, 所以也一直是环境科学研究关注的一类重要的有机污染物<sup>[5]</sup>。欧美地区最近的研究表明, 旧建筑材料、旧电器和油漆等依然是环境中 PCBs 的释放源<sup>[6-8]</sup>。我国 PCBs 的生产和使用量不大, 估计 1965 ~ 1974 年间的总产量仅 1 万 t 左右<sup>[9]</sup>。Zhang 等<sup>[10]</sup>对我国大范围的大气和土壤中的 PCBs 调查发现, 我国 PCBs 的污染水平整体不高。然而, 国内的旧电器正步入淘汰的高峰期, 尤其是近一二十年来大量国外电子废弃物通过非法途径进入我国, 这些电子垃圾在一些地区(主要是农村或者城市郊区)进行粗放式的拆解, 成为我国环境中 PCBs 的重要来源<sup>[11]</sup>。

目前针对家庭灰尘多溴联苯醚 (PBDEs) 的研究比较多<sup>[12]</sup>, 比如有研究发现母乳中与家庭灰尘中多溴联苯醚的浓度存在显著正相关<sup>[13]</sup>, 而针对家庭灰尘中 PCBs 的研究较少。最近, 李琛等<sup>[14]</sup>评估了上海人群通过室内外灰尘对 PCBs 的暴露, Tue 等<sup>[15]</sup>对越南电子垃圾地区室内灰尘中 PCBs 等有机污染物进行了调查。我国一些电子垃圾地区 PCBs 的污染态势比较严重, 当地人群对 PCBs 存在高暴露风险<sup>[16]</sup>。然而, 目前很少就我国人群对 PCBs 的暴露风险进行评估。在本研究中, 笔者对广东省某一电子垃圾地区和广州市城区家庭灰尘中的 PCBs 污染进行了调查, 对灰尘中 PCBs 的来源进行了分析, 估计了当地人群通过灰尘对 PCBs 的暴露量以及相关的致癌和非致癌风险。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集

样品的采集在之前的研究中已经详细说明<sup>[17]</sup>, 本研究仅进行简单描述。灰尘样品于 2006 年 10 月和 2007 年 10 月采自广东省清远一电子废弃物处理地以及广州市区。该电子垃圾地区覆盖范围大概在 100 km<sup>2</sup>。据不完全统计, 每年拆解出来的金属、废塑料、橡胶等再生原料多达 170 万 t, 是我国最大的电子废弃物拆卸地之一。拆卸活动早期以家庭作坊式为主, 现在为中小型厂房与家庭作坊庭院式并存,

处理方式依然较为落后。灰尘样品采自当地的农民家庭中, 包括有拆解作坊的和普通的家庭。由于在我国农村地区人们在家中的活动范围包括室内和庭院, 因此我们的样品范围包括室内(地板或家具等,  $n = 24$ ) 以及庭院(器物、餐桌等,  $n = 15$ )。广州的样品均采自室内( $n = 25$ )。电子垃圾区样品的采集使用柔软的毛质刷子, 广州地区主要使用吸尘器。样品包于锡箔纸中, 用密实袋密封后于干燥器避光储存待分析。

### 1.2 试剂材料

PCBs 标准品购于美国 AccuStandards 公司, 丙酮、正己烷、二氯甲烷经全玻璃系统蒸馏后使用。硅胶和氧化铝经二氯甲烷索氏抽提、干燥和活化处理。所用玻璃器皿洗液洗涤后 450℃ 马弗炉烘烤。

### 1.3 样品处理

灰尘样品过 200 目筛子, 添加回收率指示物后, 用丙酮正己烷混合溶剂(体积比 1:1)索氏提取 48 h; 抽提液旋转蒸发至 1 ~ 2 mL、过多层硅胶氧化铝复合柱净化, 用 80 mL 二氯甲烷正己烷混合溶剂(体积比 1:1)洗脱, 洗脱液旋至 1 mL 左右, 转至 1.8 mL 棕色玻璃小瓶, 氮吹, 加入内标, 定容到 200  $\mu$ L。详细的流程以及质量控制和质量保证措施可参考文献[17]。

### 1.4 仪器分析

本研究主要对 102 种 PCBs 进行了定量分析。样品采用安捷伦气相色谱质谱仪(6890-5975B GC-EI-MS)对 PCBs 进行分析, 色谱柱为 DB-5MS(60 m  $\times$  0.25 mm i. d., 0.25  $\mu$ m film thickness; J&W Scientific, Folsom, CA)。选择离子扫描模式, 无分流进样, 进样量 1  $\mu$ L。载气为高纯氦气, 进样口、离子源温度和界面温度分别为 290、250 和 290℃, 柱流速为 1.50 mL  $\cdot$  min<sup>-1</sup>。升温程序: 起始温度 120℃, 6℃  $\cdot$  min<sup>-1</sup> 升温至 180℃, 1℃  $\cdot$  min<sup>-1</sup> 升温至 240℃, 然后 6℃  $\cdot$  min<sup>-1</sup> 升温至 290℃ 并保留 17 min。

### 1.5 暴露风险评估

本研究评价了当地人群通过灰尘摄入暴露 PCBs 的暴露量、致癌风险和非致癌风险。采用的参数见表 1。平均日暴露量 [ADD, ng  $\cdot$  (kg  $\cdot$  d)<sup>-1</sup>] 是灰尘浓度与日灰尘摄入量的乘积。非致癌风险一般用危害商 (HQ) 来表征人体经某一途径暴露污染物而受到的危害水平, 为污染物每日摄入量与参考剂量的比值,

$$HQ = ADD/RfD \quad (1)$$

式中, RfD 为参考剂量。致癌风险 (R) 指因暴露于致癌物质而引发癌症的概率或可能性, 通常用一定数

量(100万)人群的终生(75 a)有可能死于癌症的概率来表示,

$$R = LADD \times SF \quad (2)$$

$$LADD = \frac{c \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{LT}} \quad (3)$$

式中, LADD 为终生平均日暴露量, SF 致癌斜率因子 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ] $^{-1}$ ,  $c$  为灰尘 PCBs 含量 ( $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), IngR 日灰尘摄入量 ( $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ), EF 暴露频率 ( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ), ED 为暴露持续时间 (a), BW 为体重 (kg), LT 为寿命 (d).

表1 通过家庭灰尘摄入 PCBs 健康风险评估采用的参数

Table 1 Parameters applied in the health risk assessment for human PCBs exposure via house dust

参数	模型采用值	文献
$c/\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$	10 167(平均含量), 45 027(第95百分位含量)	本研究
$\text{RfD}/\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	Aroclor 1254: 0.02, Aroclor 1016: 0.07	[18]
$\text{SF}/[\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}]^{-1}$	2(上限值)	[17]
$\text{IngR}/\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	200(儿童), 50(成人)	[12]
$\text{EF}/\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	365	[17]
$\text{ED}/\text{a}$	75	[17]
$\text{BW}/\text{kg}$	12(婴幼儿), 30(儿童/青少年), 70(成人)	[19]
$\text{LT}/(\text{d})$	$75 \text{ a} \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1} = 27\,375$	[17]

## 2 结果与讨论

### 2.1 含量水平

清远电子垃圾区灰尘中 PCBs 的含量波动很大, 为  $12.4 \sim 87\,765 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均含量为  $10\,167 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  (图1). 虽然室外灰尘中 PCBs 的平均含量 ( $13\,157 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 高于室内的含量 ( $9\,269 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 室内外 PCBs 含量并无显著差别 ( $P = 0.419$ , Mann-Whitney Rank Sum 检验). 最近欧美地区的研究表明, 来自室内产品的释放是环境中 PCBs 的重要来源, 因此室内环境中 PCBs 的含量往往高于室外<sup>[20, 21]</sup>. 然而, 本研究结果显示, 研究地区庭院或作坊中的电子垃圾拆解是灰尘中 PCBs 的来源, 并经过一些途径(比如空气流通、沉降)进入室内灰尘中. 由于农村卫生条件较差, 并且 PCBs 是一种较难降解的持久性有机污染物, 因此室内灰尘中 PCBs 可能会长期存在并被人体暴露. 广州地区家庭灰尘中 PCBs 的含量介于未检出(nd)  $\sim 187 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均含量  $48.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均比电子垃圾地区 PCBs 含量低 3 个数量级. 这样的结果并不意外, 因为 PCBs 被禁止较早, 在我国并未被大范围使用, 与欧美等发达地区不同, 来自家庭中旧电器或建筑材料的释放非常小. 目前, 我国家庭灰尘中 PCBs 的数据非常少. 李琛等<sup>[14]</sup>对上海市室内外灰尘中 PCBs 的调查显示, 大部分灰尘样品中 PCBs 的含量很低 ( $1.0 \sim 1\,972 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 平均  $127 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 但是这一含量水平是广州地区 PCBs 平均含量的 2 倍, 这很可能与我国改革开放之前上海是重要的工业产地、PCBs 使用量较大有关. 本研究电子垃圾地区家庭灰尘中

PCBs 的含量比最近报道的越南电子垃圾地区的含量 ( $4.8 \sim 320 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 高很多<sup>[15]</sup>, 这很可能和两地区拆卸的电子垃圾种类有很大关系. 美国田纳西州(均值  $220 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、英国伯明翰 ( $110 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、加拿大多伦多 ( $290 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )、新西兰惠灵顿 ( $67 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 家庭灰尘中 PCBs 的含量都比清远电子垃圾地区要低很多, 但这些地区灰尘中 PCBs 的含量均高于广州地区<sup>[22]</sup>.

在电子垃圾地区灰尘中, 13 种类二噁英 PCBs (dl-PCBs) 有 6 种 (PCB77、105、118、156、170 和 180) 被检出, 基于其毒性当量因子<sup>[23]</sup>, 其毒性当量含量(以 TEQ 计, 下同)在  $\text{nd} \sim 0.56 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均  $0.10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . 广州地区灰尘没有 dl-PCBs 被检出.

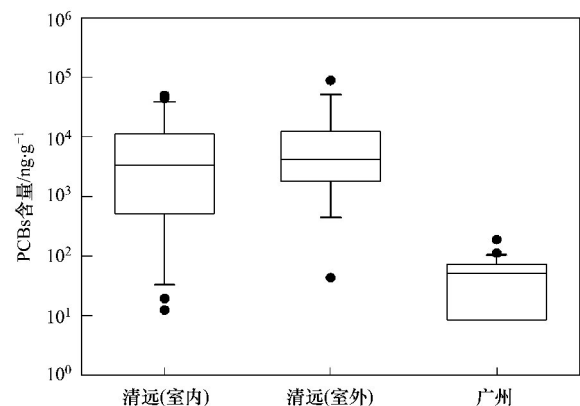


图1 清远电子垃圾区和广州地区家庭灰尘中 PCBs 的含量  
Fig. 1 Total concentrations of PCBs in house dust of the e-waste site and Guangzhou

### 2.2 组成特征及源解析

图2显示了电子垃圾区灰尘中 PCBs 同族体的平均组成模式, 以 3、5、6、4 氯代 PCBs 为主. 这一

组成特征与我国 PCBs 工业品中 PCBs 的组成并不相似(主要以 3、4、2、5 氯代 PCBs 为主),却与欧美城市地区大气中 PCBs 的组成较为相似<sup>[10]</sup>。另外,电子垃圾区室内外灰尘中 PCBs 的组成没有明显的差别( $P > 0.411$ ),室内外灰尘中 7 种指示性 PCBs (PCB28、52、101、118、138、153 和 180) 的组成(图 2)也非常相似( $P > 0.214$ ),说明了二者具有相似的来源(电子垃圾拆卸)以及在室内外环境中相似的环境行为过程。PCBs 混合物主要以各种 Aroclor 工业品的形式被用于多种产品中,如 Aroclor 1242、Aroclor 1254 等,不同的 Aroclor 具有不同的同系物组成<sup>[24]</sup>。图 3 显示了灰尘样品以及一些 PCBs 工业品中主要的 PCBs 同系物(PCBs 在灰尘中的检出率 60%)组成模式。从中可以看出,除了 3 氯代的 PCBs,灰尘中还是以高氯代的 PCBs 为主,而且 PCBs 的组成模式并不由一种 PCBs 工业品主导,这说明该电子垃圾地区灰尘中 PCBs 很可能是来自几种 PCBs 工业品的共同污染。

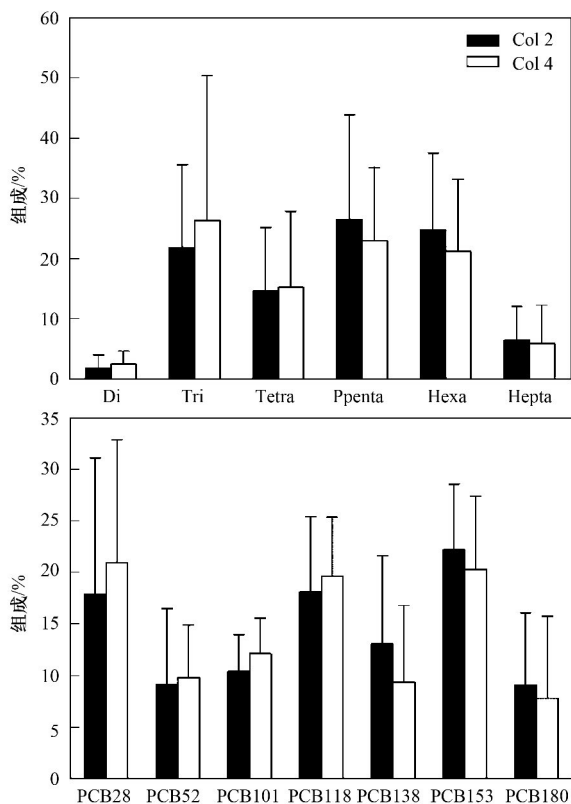


图 2 清远电子垃圾区室内外灰尘中 PCBs 的组成

Fig. 2 PCB composition patterns in indoor and outdoor dust at the e-waste site

化学质量平衡(CMB)法是常用的源解析受体模型研究方法之一<sup>[25]</sup>,已被用于包括大气颗粒物、沉积物、土壤等多种介质。CMB 受体模型由一组可

以用最小二乘法求解的方程组成,这些方程说明受体样品中每种污染物的浓度为排放源中该污染物浓度与源贡献度乘积的线性加合。运用美国 EPA 的化学质量平衡模型工具 EPA-CMB8.2,笔者对电子垃圾区灰尘样品中 PCBs 的来源进行了解析。PCBs 排放源的成分谱采用 Frame 等<sup>[24]</sup>测定的 Aroclor 组成(图 3),由于某些 Aroclor 的 PCBs 组成相似,即对 CMB 受体模型存在共线性的问题,本研究仅采用了 Aroclor 1242、Aroclor 1248、Aroclor 1254 和 Aroclor 1262 源成分谱。分析结果表明,清远电子垃圾区灰尘中 PCBs 贡献最大的来自 Aroclor 1262( $36.7\% \pm 17.8\%$ ),其次是 Aroclor 1254( $26.7\% \pm 17.4\%$ ),Aroclor 1242 和 Aroclor 1248 的贡献分别为  $21.4\% \pm 19.0\%$  和  $18.5\% \pm 15.1\%$ 。需要指出的是,由于共线性的问题,模型无法区分 Aroclor 1262 和 Aroclor 1260 的贡献以及 Aroclor 1242、Aroclor 1232 和 Aroclor 1016 的贡献。研究地区灰尘中 PCBs 并不显著地以某种来源为主,显示了其来源的多重性,可能是由于电子垃圾的多样性决定的。据笔者的实地调查清远拆解的电子垃圾包括变压器、家用电器、电脑零配件、电线电缆等多种电子废弃物,并且这些电子废弃物可能来自不同的国家和地区,因此造成 PCBs 来源的多样性。Zhang 等<sup>[10]</sup>对我国大范围的大气和土壤中 PCBs 进行了分析,认为其来源主要来自国产的 PCBs 工业品和变压器油。最近,有研究人员分析我国台州电子垃圾地区土壤中的 PCBs 来源,发现 PCBs 主要来自 Aroclor 1254<sup>[26]</sup>,与本研究结果有一定的差异,这可能与两地区拆解的电子垃圾类型存在差异有关。

### 2.3 暴露及健康风险

PCBs 已经被证明具有致癌性,并且可以对免疫系统、生殖系统、神经系统等产生有害影响。由于人们每天都不可避免地接触和摄入灰尘,室内灰尘也是人体暴露污染物的重要途径。基于美国 EPA 公布的人体通过口头摄入暴露 PCBs 的参考剂量和癌症斜率因子,笔者对研究地区人群通过灰尘暴露 PCBs 的癌症和非癌症风险分别进行了评估。

研究地区婴幼儿(0.5~3岁)、儿童/青少年、成人的平均日暴露量分别为 42、17 和 2.9  $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ,清楚地表明了由于儿童(0.5~15岁)较高的灰尘摄入量和较小的体重,这一群体的暴露剂量明显比成人高。考虑到我国农村的情况和人们的卫生意识,研究地区人群的灰尘实际暴露量很可能比较高,因此采用高灰尘摄入量(儿童 200

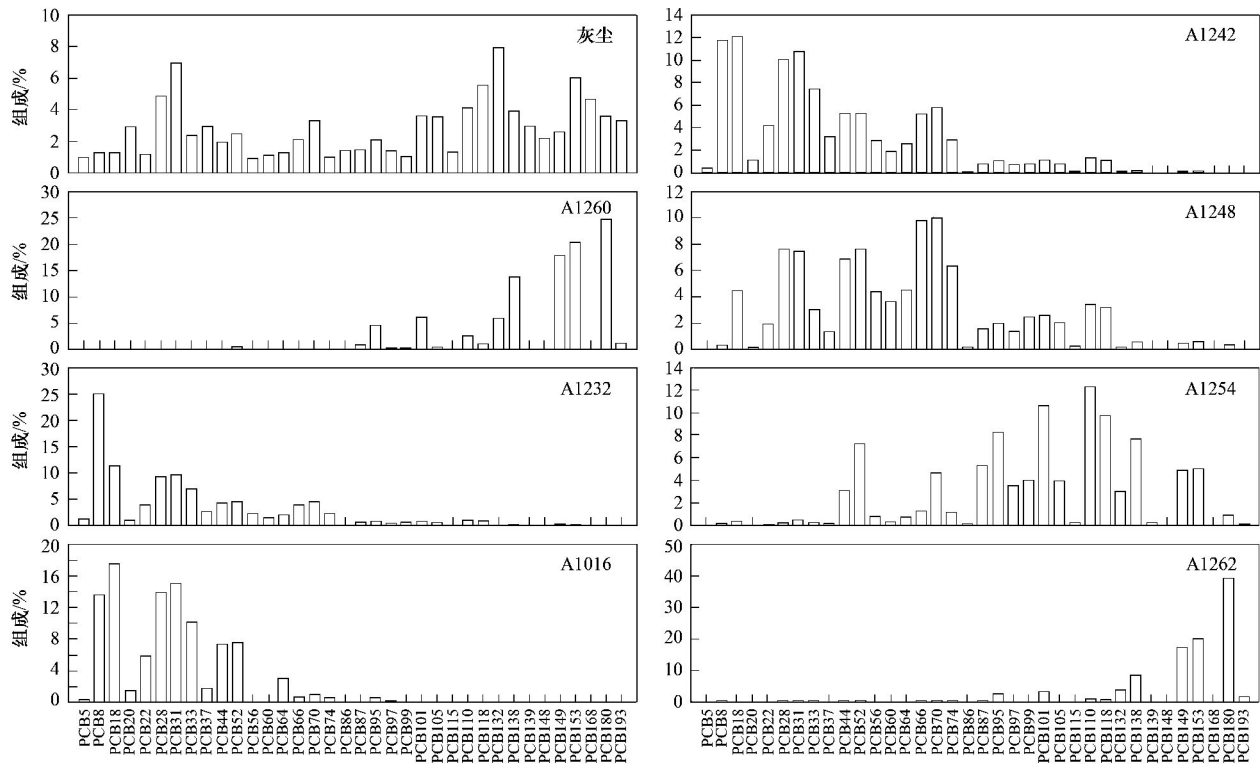


图3 清远电子垃圾区家庭灰尘以及 PCBs 工业品 Aroclor 1016、Aroclor 1232、Aroclor 1242、Aroclor 1248、Aroclor1254、Aroclor1262 中主要 PCBs 同系物的组成

Fig. 3 PCB congener patterns in house dust at the e-waste site and Aroclor1016 , Aroclor 1232 , Aroclor 1242 , Aroclor 1248 , Aroclor 1254 , and Aroclor 1262

$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$ , 成人  $50\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 估算, 儿童和成人分别为  $169$ 、 $68$  和  $7\text{ ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$  (表 2)。这一暴露量比李琛等<sup>[14]</sup>估计的上海地区市民的灰尘 PCBs 暴露量 [儿童  $8.2\text{ ng}\cdot\text{d}^{-1}$ , 成人  $4.1\text{ ng}\cdot\text{d}^{-1}$ , 约为  $0.06\sim 0.68\text{ ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ] 要高得多, 虽然他们采用的儿童灰尘是我们的  $1/2$  ( $100\text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$ )。美国 EPA 仅仅评估了 Aroclor 1254 和 Aroclor 1016 的 RfDs<sup>[18]</sup>。前面源解析显示研究地区灰尘中约有  $26.7\%$  的 PCBs 来自 Aroclor 1254, 假设来自 Aroclor 1242、Aroclor 1232 和 Aroclor 1016 均为 Aroclor 1016 ( $21.4\%$ ) 那么研究地区三类人群对 Aroclor 1254 和 Aroclor 1016 暴露的总非癌症危害商数 (HQ) 分别为  $4.1$ 、 $1.6$  和  $0.2$  (表 2)。很明显婴幼儿和儿童/青少年群体 HQ 均高于  $1$ , 这说明在本研究地区通过灰尘暴露 PCBs 可能会对儿童和青少年的人体健康产生危害, 而且笔者还没考虑到人群对其他来源 PCBs 暴露的非癌症风险, 例如贡献率最大的 Aroclor 1262。

运用美国 EPA 给出的通过灰尘摄入途径的上限 SF 值对癌症风险进行了评估。电子垃圾区人群的平均致癌风险为  $4.5\times 10^{-5}$ , 处于美国 EPA 可接受的致癌风险范围 ( $10^{-6}\sim 10^{-4}$ ), 风险较低。但是

值得一提的是, 少数高暴露人群 (例如电子垃圾拆卸作坊工人或其家庭成员) 通过灰尘 PCBs 暴露的致癌风险达  $2\times 10^{-4}$ , 超过了可接受范围, 具有较高的致癌风险。研究地区的家庭灰尘相当一部分来自大气沉降, 所以可以推测呼吸也是当地人群暴露 PCBs 的重要途径。另外, 饮食途径也会是暴露 PCBs 的途径之一, 虽然由于没有数据的支持, 笔者还无法得知其重要性。因此, 本研究的结果暗示了电子垃圾地区人群存在对 PCBs 的较高暴露风险, 全面评估当地人群 PCBs 的暴露剂量和风险十分必要。与笔者早期在该地区对溴代阻燃剂多溴联苯醚 (PBDEs) 的研究对比, 电子垃圾地区人群通过家庭灰尘暴露 PCBs 的非癌症风险要比 PBDEs ( $\text{HQ} < 3\times 10^{-3}$ ) 高很多。

相比较而言, 广州地区人群婴幼儿、儿童/青少年和成人通过灰尘暴露 PCBs 的风险非常低, 即使采用与电子垃圾区相同的高灰尘摄入量, 广州地区婴幼儿、儿童/青少年和成人通过灰尘暴露 PCBs 的日剂量为  $1.1$ 、 $0.4$  和  $0.05\text{ ng}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。暴露的风险也非常低, 采用同样的计算方法, 总的非癌症风险 HQ 为  $0.001\sim 0.03$ , 而癌症风险也仅为  $3\times 10^{-7}$ 。

表 2 清远电子垃圾区人群通过家庭灰尘摄入对 PCBs 的暴露剂量、癌症风险和非癌症风险

Table 2 Average daily doses, carcinogenic risks, and noncarcinogenic risks of oral exposure to PCBs via house dust ingestion at the e-waste site

人群	非致癌风险							
	低暴露人群(平均含量)				高暴露人群(第 95 百分位含量)			
	暴露剂量 /ng·(kg·d) <sup>-1</sup>	危害商 <sup>1)</sup>	危害商 <sup>2)</sup>	危害商 <sup>3)</sup>	暴露剂量 /ng·(kg·d) <sup>-1</sup>	危害商	危害商	危害商
婴幼儿(0.5~3岁)	170	2.26	1.81	4.08	188	10.0	8.03	18.0
儿童/青少年(4~15岁)	67.8	0.90	0.73	1.63	75.0	4.01	3.21	7.22
成人(>15岁)	7.30	0.10	0.08	0.17	12.9	0.43	0.34	0.77

斜率因子 /[mg·(kg·d) <sup>-1</sup> ] <sup>-1</sup>	致癌风险			
	低暴露人群(平均含量)		高暴露人群(第 95 百分位含量)	
	终生平均日摄入量 /ng·(kg·d) <sup>-1</sup>	致癌风险	终生平均日摄入量 /ng·(kg·d) <sup>-1</sup>	致癌风险
2.0	23.4	4.7 × 10 <sup>-5</sup>	104	2.1 × 10 <sup>-4</sup>

1) Aroclor 1254 暴露危害商; 2) Aroclor 1016 暴露危害商; 3) 总暴露危害商

### 3 结论

(1) 清远电子垃圾地区的拆卸活动造成了当地家庭灰尘中 PCBs 的污染, 室内外灰尘中 PCBs 含量和组成均无显著差别, 说明它们具有相似的来源. 广州地区家庭灰尘中 PCBs 的含量和检出率都非常低.

(2) 化学质量平衡受体模型对灰尘中 PCBs 的源解析表明, 电子垃圾地区灰尘 PCBs 的来源具有多重性, 可能是由于该地区拆解电子垃圾的多样性决定的.

(3) 电子垃圾地区人群, 婴幼儿和儿童/青少年群体通过家庭灰尘暴露 PCBs 的非癌症危害较高 (HQ 为 1.63 ~ 4.08), 终生平均癌症致死风险为  $4.5 \times 10^{-5}$ , 处于美国 EPA 可接受的致癌风险范围, 但高暴露群体(如电子垃圾拆卸工人)存在较高的癌症致死风险. 广州地区人群通过家庭灰尘暴露 PCBs 的健康风险非常低.

#### 参考文献:

[1] Butte W, Heinzow B. Pollutants in house dust as indicators of indoor contamination [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **175**: 1-46.

[2] Harrad S J, Sewart A P, Alcock R, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the British environment: Sinks, sources and temporal trends [J]. *Environmental Pollution*, 1994, **85** (2): 131-146.

[3] Anderson L M, Dixon D, Beebe L E, et al. Long-term persistence of polychlorinated biphenyl congeners in blood and liver and elevation of liver aminopyrine demethylase activity after a single high dose of Aroclor 1254 to mice [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1991, **10**(5): 681-690.

[4] Fischer L J, Seegal R F, Ganey P E, et al. Symposium overview: Toxicity of non-coplanar PCBs [J]. *Toxicological*

*Sciences*, 1998, **41**(1): 49-61.

- [5] Breivik K, Gioia R, Chakraborty P, et al. Are reductions in industrial organic contaminants emissions in rich countries achieved partly by export of toxic wastes? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(21): 9154-9160.
- [6] Diamond M L, Melymuk L, Csiszar S A, et al. Estimation of PCB stocks, emissions, and urban fate: will our policies reduce concentrations and exposure [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(8): 2777-2783.
- [7] Robson M, Melymuk L, Csiszar S A, et al. Continuing sources of PCBs: The significance of building sealants [J]. *Environment International*, 2010, **36**(6): 506-513.
- [8] Jartun M, Ottesen R T, Steinnes E, et al. Painted surfaces - important sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination to the urban and marine environment [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 295-302.
- [9] 邢颖, 吕永龙, 刘文彬, 等. 中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 228-234.
- [10] Zhang Z, Liu L Y, Li Y F, et al. Analysis of polychlorinated biphenyls in concurrently sampled Chinese air and surface soil [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(17): 6514-6518.
- [11] Liu H X, Zhou Q F, Wang Y W, et al. E-waste recycling induced polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans pollution in the ambient environment [J]. *Environment International*, 2008, **34**(1): 67-72.
- [12] Jones-Otazo H A, Clarke J P, Diamond M L, et al. Is house dust the missing exposure pathway for PBDEs? An analysis of the urban fate and human exposure to PBDEs [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(14): 5121-5130.
- [13] Wu N, Herrmann T, Paepke O, et al. Human exposure to PBDEs: associations of PBDE body burdens with food consumption and house dust concentrations [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(5): 1584-1589.
- [14] 李琛, 余应新, 张东平, 等. 上海室内外灰尘中多氯联苯及其

- 人体暴露评估[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(4): 433-441.
- [15] Tue N M, Takahashi S, Suzuki G, *et al.* Contamination of indoor dust and air by polychlorinated biphenyls and brominated flame retardants and relevance of non-dietary exposure in Vietnamese informal e-waste recycling sites [J]. *Environment International*, 2013, **51**: 160-167.
- [16] Bi X H, Thomas G O, Jones K C, *et al.* Exposure of electronics dismantling workers to polybrominated diphenyl ethers, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticides in South China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(16): 5647-5653.
- [17] 王璟, 陈社军, 田密, 等. 电子废弃物处理地室内外灰尘中多溴联苯醚的污染及其人群暴露水平[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 174-179.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency. PCB risk assessment review guidance document [S].
- [19] 张绍岩, 韩一三, 沈勋章, 等. 中国大中城市汉族儿童青少年身高、体重和体质指数生长图表[J]. *中国儿童保健杂志*, 2008, **16**(3): 257-259.
- [20] Balfanz E, Fuchs J, Kieper H. Sampling and analysis of polychlorinated biphenyls (PCB) in indoor air due to permanently elastic sealants [J]. *Chemosphere*, 1993, **26**(5): 871-880.
- [21] Currado G M, Harrad S. Comparison of polychlorinated biphenyl concentrations in indoor and outdoor air and the potential significance of inhalation as a human exposure pathway [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(20): 3043-3047.
- [22] Harrad S, Ibarra C, Robson M, *et al.* Polychlorinated biphenyls in domestic dust from Canada, New Zealand, United Kingdom and United States: implications for human exposure [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(2): 232-238.
- [23] Ahlborg U G, Becking G C, Birnbaum L S, *et al.* Toxic equivalency factors for dioxin-like PCBs: Report on WHO-ECEH and IPCS consultation, December 1993 [J]. *Chemosphere*, 1994, **28**(6): 1049-1067.
- [24] Frame G M, Cochran J W, Bowadt S S. Complete PCB congener distributions for 17 aroclor mixtures determined by 3 HRGC systems optimized for comprehensive, quantitative, congener-specific analysis [J]. *Journal of High Resolution Chromatography*, 1996, **19**(12): 657-668.
- [25] 李先国, 范莹, 冯丽娟. 化学质量平衡受体模型及其在大气颗粒物源解析中的应用[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2006, **36**(2): 225-228.
- [26] 王学彤, 李元成, 张媛, 等. 电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 587-591.