

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

王^{1,2}, 陈社军¹, 田密^{1,2}, 马云娟^{1,2}, 罗孝俊¹, 麦碧娴^{1*}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2006 年 10 月和 2007 年 10 月, 在广东省清远市一个典型电子废弃物处理地采集了 24 个室内和 15 个室外灰尘样品, 分析了其中的 17 种多溴联苯醚(PBDEs)。结果显示, PBDEs 在所有灰尘样品中均有检出, 室内灰尘中 PBDEs 含量为 230~157 500 ng·g⁻¹, 平均 9 400 ng·g⁻¹; 室外灰尘中 PBDEs 含量为 212~25 880 ng·g⁻¹, 平均 3 311 ng·g⁻¹。与世界其他地区灰尘中 PBDEs 的含量相比, 本研究地区灰尘中 PBDEs 的含量处在较高水平。BDE209 是灰尘中最重要的同族体; 与工业品中 PBDEs 的组成对比显示, 灰尘中相对高丰度的八至九溴同族体可能来自 BDE209 的降解。婴幼儿、儿童和成人通过灰尘对 PBDEs 的平均日暴露量分别为 470、329 和 188 ng·d⁻¹, 婴幼儿和儿童的最高日暴露量(31 500 和 19 700 ng·d⁻¹) 分别是成人的 4 和 2.5 倍。灰尘可能是当地人群(特别是婴幼儿和儿童)暴露 PBDEs 的重要途径。

关键词: 多溴联苯醚(PBDEs); 灰尘; 电子废弃物; 暴露; 室内外

中图分类号: X131; X18 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0173-06

Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Indoor and Outdoor Dust from an Electronic Waste (E-Waste) Recycling Area in South China: Contamination and Human Exposure

WANG Jing^{1,2}, CHEN She-jun¹, TIAN Mi^{1,2}, MA Yun-juan^{1,2}, LUO Xiao-jun¹, MAI Bi-xian¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Twenty-four indoor and fifteen outdoor dust samples were collected from an electronic waste (e-waste) area, South China in October 2006 and October 2007 and analyzed for seventeen PBDE congeners. PBDEs were detected in all dust samples. The total PBDE concentrations for indoor dusts ranged from 230-157 500 ng/g, with a mean value of 9 400 ng/g, and 212-25 880 ng/g, with a mean value of 3 311 ng/g for outdoor samples, respectively. The PBDE concentrations in the present study were at the high end of the worldwide figures. BDE209 was the predominant congener. Comparison of the PBDE congener patterns in dusts and technical products suggests that the relatively high abundances of octa- to nona- PBDE congeners in the dusts might be originated from the degradation of BDE209. The average exposure estimates of PBDEs via dusts are 470, 329 and 188 ng/d for infants, toddlers and adults, respectively. The highest exposure estimates for infants and toddlers (31 500 and 19 700 ng/d) were 4 and 2.5 fold higher than those for adults. These results indicate that dust may be a very important route of exposure for PBDEs in local residents.

Key words: polybrominated diphenyl ethers(PBDEs); dust; E-waste; exposure; indoor and outdoor

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是目前最主要的溴代阻燃剂之一, 被广泛添加到纺织、家具、建材、交通工具、电子和电器产品中。作为一种添加型阻燃剂, PBDEs 容易从产品中释放进入环境。PBDEs 在环境中往往比较稳定, 并且具有长距离扩散、生物富集和通过食物链传递等性质; 一些毒理试验表明, PBDEs 可对生物体产生内分泌干扰作用、生殖和神经发育毒性等^[1]。五溴和八溴联苯醚已经相继在欧盟和北美等一些地区被禁止或限制使用^[2,3], 我国也于 2006 年颁布了《电子信息产品污染控制管理办法》, 限制这 2 种产品的使用。虽然去年欧盟将十溴联苯醚列入 RoHS 禁用名单, 但

十溴联苯醚仍在世界范围内被广泛大量地使用。

人体对 PBDEs 的暴露途径与对其它传统持久性有机污染物(如多氯联苯, PCBs) 明显不同, 食物摄入是人体暴露 PCBs 等传统持久性有机污染物的主要来源; 而对 PBDEs 来说, 越来越多的研究发现, 室内灰尘可能是人体暴露 PBDEs 最主要的途径, 如 Lorber^[4] 最近对美国人体内 PBDEs 的暴露途径进行总结, 发现 82% 的暴露来自室内尘土, 摄取途径包

收稿日期: 2009-03-04; 修订日期: 2009-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40632012, 40801199, 40821003)

作者简介: 王 (1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为有机污染物的环境行为, E-mail: ustcjoey@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: nanyimai@gig.ac.cn

括直接摄入和皮肤接触。一些研究还发现,人体血清或母乳中 PBDEs 的浓度与室内尘土中 PBDEs 的浓度存在显著正相关^[5,6]。我国环境中 PBDEs 的研究主要集中于沉积物、大气和生物体^[7-9],对于人体 PBDEs 的暴露研究也仅包括食物(特别是水产品)和空气吸入 2 种途径^[10-12],对灰尘及其引起 PBDEs 暴露的研究极少。本研究采集了我国华南地区一典型污染区室内外灰尘样品,分析了灰尘中 PBDEs 的含量及组成,初步评估了人群通过这一途径的暴露水平,研究结果对了解这一地区尘土中 PBDEs 的污染状况和潜在风险有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

灰尘样品采自广东省清远市郊一电子废弃物处理地。自 20 世纪 90 年代中期开始,包括各种废旧电脑设备、电视机、电冰箱、电缆线以及其它电子产品等国外“进口”废旧物资涌入该地区,据不完全统计,每年拆解出来的金属、废塑料、橡胶等再生原料达 170 万 t,清远已成为我国最大的电子废弃物拆卸地之一。该地区的拆卸活动在早期以农民庭院式为主,现在为中小型厂房与庭院式并存,但处理方式依然较为原始落后(拆解,焚烧和酸洗等)。笔者所在的课题组早期的研究发现该地区一些环境和生物样品已受到了一定程度的 PBDEs 污染^[13,14]。

灰尘样品采自电子废弃物处理地(约 100 km²)的农民家庭中,其中一个室内样品采自距处理区约 10 km 的村庄;样品采于 2006 年 10 月和 2007 年 10 月,包括室内和室外灰尘。样品的采集使用柔软的毛质刷子,采样前刷子用蒸馏水清洗干净、烘干再用正己烷清洗一遍、晾干、包于锡箔纸中。室内灰尘($n = 24$)主要采自桌面、门框或其他家具上,室外样品($n = 15$)采自窗台或一些室外器物表面。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

PBDE 标样,包括三溴代(BDE28)、四溴代(BDE66)、五溴代(BDE85、99 和 100)、六溴代(BDE138、153 和 154)、七溴代(BDE183)、八溴代(BDE196、197 和 203)、九溴代(BDE206、207 和 208)和十溴代(BDE209)共 17 种 PBDE 同族体,以及内标(BDE118 和 128)购自美国 Accustandards 公司;¹³C-BDE208(内标)和¹³C-PCB141(回收率指示物)购自美国剑桥同位素实验室。

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式抽提、干燥和活化处理。碱性硅胶和酸性硅胶的制备详见文献[9]。所用玻璃器皿用重铬酸钾洗液洗涤,450℃马弗炉烘烤,使用前,用溶剂荡洗。

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(体积比为 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,用 80 mL 二氯甲烷/正己烷混合溶剂(体积比为 1:1)洗脱,洗脱液旋至 1 mL 左右,转至细胞瓶内,氮吹,加入内标,定容到 200 μ L。详细的流程可参考文献[15]。

1.4 仪器分析

样品采用岛津气相色谱-质谱联用仪(Shimadzu GCMS-QP2010)进行分析,负化学离子源(NCI)和选择离子监测模式,载气为高纯氮,反应气为甲烷。三至七溴联苯醚的分离采用 DB-XLB(30 m \times 0.25 mm i. d. \times 0.25 μ m, J&W Scientific)色谱柱,柱流速为 1.0 mL \cdot min⁻¹。八至十溴代联苯醚的分离采用 DB-5HT(15 m \times 0.25 mm i. d. \times 0.10 μ m, J&W Scientific)色谱柱,柱流速 1.5 mL \cdot min⁻¹。使用 1 μ L 无分流高压进样,离子源温度为 200℃,界面温度为 280℃。

1.5 质量控制与质量保证

每个样品都添加回收率指示物以监控整个处理过程的回收率,每批样品(12 个)同时运行 1 个流程空白样,用于控制实验过程中可能引入的污染,另外,还进行空白加标平行样、样品平行样的质量控制分析。样品中回收率指示物(¹³C-PCB141)的回收率范围为 75%~119%。空白加标平行样的回收率为: BDE28 85%~91%; BDE47 97%~104%; BDE66 94%~108%; BDE85 89%~105%; BDE99 95%~103%; BDE100 98%~104%; BDE153 85%~99%; BDE154 93%~101%; BDE183 80%~83%; BDE209 85%~114%。BDE47、99 和 153 在部分流程空白中有检出,浓度分别 < 1.7、< 1.8 和 < 1.4 ng \cdot mL⁻¹,远低于样品中的含量。样品平行性测试结果显示,所有 PBDE 同族体的相对标准偏差均 < 12%。另外,在进行仪器分析时,每天进一个固定浓度的日校正标样,确保仪器运行稳定。实际样品的含量已进行空白扣除,但未进行回收率校正。仪器检出限定义为 3 倍信噪比(即 S/N > 3)。

2 结果与讨论

2.1 PBDEs 的含量水平

PBDEs 在所有的灰尘样品中都被检出(表 1)。室内灰尘中 PBDEs 总含量(\sum PBDEs)为 230~157 500 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值和中值分别为 9 400 和 1 740 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 室外灰尘中 \sum PBDEs 含量为 212~25 880 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值和中值分别为 3 311 和 1 320 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明它们在该地区这一环境介质中普遍存在。所检测的 17 个 PBDE 同族体在几乎所有的样品中都以

BDE209 含量为最高, 其在室内外灰尘中的平均含量分别为 7 672 和 2 416 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总体来说, PBDEs 在研究地区整体含量较高, 但不同采样点含量差异也很大, 这可能与采样点距电子废弃物处理活动的距离、处理活动规模和持续时间等因素有关; 例如, 最高含量的样品是在一家院子内正在大规模拆解的居民室内采得。但是, 室内含量的最低点并不是在距处理活动区最远的居民家发现的, 最远的居民室内灰尘中 BDE209 含量达 1 751 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于中值含量水平。这说明, 电子废弃物处理地的活动可能已经影响到周

表 1 电子废弃物处理地室内外灰尘中不同溴代联苯醚的含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 PBDE concentrations in indoor and outdoor dusts from an e-waste area in South China/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

| PBDEs | 室内($n=24$) | | | 室外($n=15$) | | |
|--------------|--------------|---------|-----------------|--------------|---------|----------------|
| | 平均值 | 中值 | 浓度范围 | 平均值 | 中值 | 浓度范围 |
| BDE28 | 2.9 | 1.3 | 0.1~34.5 | 2.1 | 0.8 | 0.2~10.5 |
| BDE47 | 30.3 | 13.2 | 1.3~220.1 | 18.8 | 7.3 | 1.6~77.3 |
| BDE66 | 6.7 | 3.3 | 0.5~66.2 | 4.5 | 2.4 | 0.5~22.2 |
| BDE85 | 4.2 | 1.6 | 0.3~40.7 | 1.9 | 0.9 | 0.3~10.0 |
| BDE99 | 59.8 | 24.5 | 2.6~453.1 | 30.7 | 13.3 | 1.7~135.6 |
| BDE100 | 6.7 | 2.6 | 0.3~57.0 | 3.6 | 1.5 | 0.1~15.4 |
| BDE138 | 5.8 | 2.9 | 1.0~34.0 | 3.6 | 3.3 | 0.7~10.1 |
| BDE153 | 32.3 | 10.2 | 1.3~296.1 | 18.0 | 6.4 | 0.7~78.4 |
| BDE154 | 11.1 | 4.9 | 0.6~118.6 | 5.6 | 2.3 | 1.0~28.6 |
| BDE183 | 92.3 | 32.0 | 2.8~644.3 | 47.5 | 16.9 | 1.0~216.1 |
| BDE196 | 62.9 | 23.3 | 2.4~567.7 | 44.4 | 20.5 | 3.8~391.2 |
| BDE197 | 17.3 | 17.7 | 12.1~23.7 | 15.8 | 15.6 | 12.9~19.9 |
| BDE203 | 64.1 | 20.7 | 1.9~673.1 | 41.0 | 21.5 | 3.7~354.6 |
| BDE206 | 586.2 | 83.9 | 9.8~9 307.3 | 264.7 | 111.5 | 18.8~2 368.2 |
| BDE207 | 528.8 | 140.3 | 15.2~6 925.6 | 271.7 | 116.8 | 27.2~2 126.6 |
| BDE208 | 228.6 | 45.7 | 5.5~3 247.0 | 121.7 | 52.3 | 11.1~1 057.5 |
| BDE209 | 7 672.3 | 913.8 | 104.5~134 913.1 | 2 416.3 | 893.0 | 113.1~18 996.8 |
| \sum PBDEs | 9 412.4 | 1 741.1 | 229.5~157 480.1 | 3 311.9 | 1 319.5 | 212.2~25 880.7 |

边地区, 但还需更多样品去印证。

整体上, 室内灰尘中 PBDEs 的含量较高, 是对应的室外灰尘中 PBDEs 含量的 0.64~8.40 倍, 平均 2.7 倍。有关室内外空气中 PBDEs 的大部分研究也发现, 室内环境中 PBDEs 的含量比室外高^[11], 一般认为主要是室内电器、家具等排放造成的, 但在本研究中, 由于采样地区居民家用电器、防火家具的数量很少, 家用电器等室内排放源并不能成为室内尘土中 PBDEs 的主要来源, 从对室内外尘土中 PBDEs 的组成(图 1)分析可以看到, 室内外尘土中 PBDEs 的组成基本相似。而且很多采样居民家庭靠近废弃物处理工场, 一些处理工场位于家庭的院子内, 显然, 室内灰尘中 PBDEs 主要受电子/电器废弃物处理活

动的影 响, 通过大气颗粒物传输等途径进入室内, 室外灰尘中 PBDEs 含量较室内低, 应归因于室外空气强的流动性或者其它来源颗粒物的稀释作用等。

与世界其它地区家庭室内灰尘中 PBDEs 对比可以发现(表 2), 本研究地区 PBDEs 的总浓度范围处于已有研究报道的高值区, BDE209 的平均含量(7 672 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 仅低于 Harrad 等^[17]报道的英国室内灰尘中 BDE209 的浓度(260 000 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 高于其它地区的报道值, 而对大部分的低溴同族体(如 BDE47、BDE99、BDE153 和 BDE154)来说, 本研究灰尘样品中的浓度远低于美国、加拿大和新加坡灰尘样品中的含量, 考虑到这些低溴组分一般添加在一些防火家具或其它室内装饰品(如地毯), 因此这些

表 2 与国外家庭室内灰尘 PBDEs 浓度的对比¹⁾/ng·g⁻¹Table 2 Comparison of PBDE concentrations in house dust from different countries/ng·g⁻¹

| 国家 | BDE28 | BDE47 | BDE66 | BDE85 | BDE99 | BDE100 | BDE138 | BDE153 | BDE154 | BDE183 | BDE209 | 总浓度范围(平均值) |
|---------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------------------|
| 瑞典 ^[6] | 2.2 | 51 | 3.3 | NA ¹ | 79 | 23 | NA | 4.9 | 3.9 | 5.6 | 466 | 168~1 625(639) |
| 西班牙 ^[16] | NA | 24 | NA | 1.1 | 20 | 5.5 | NA | 3.8 | 3.8 | 48 | 400 | 302~1 636(506) |
| 英国 ^[17] | 0.7 | 15 | NA | NA | 36 | 5.6 | NA | 14 | 4.4 | 71 | 260 000 | 12~22 000 000 |
| 新加坡 ^[18] | 1.2 | 110 | NA | NA | 340 | 65 | NA | 76 | 43 | 18 | 2 200 | 110~13 000(2 853) |
| 科威特 ^[19] | 0.4 | 6.6 | NA | 0.7 | 6.0 | 1.2 | NA | 1.3 | 1.4 | 3.6 | 129 | 1~393(150) |
| 加拿大 ^[20] | 15 | 1 100 | 37 | 190 | 1 800 | 490 | 37 | 470 | 380 | 44 | 1 100 | 64~170 000(4 626) |
| 美国 ^[21] | 21 | 1 220 | 28.5 | 83.4 | 1 700 | 274 | 17.3 | 181 | 156 | 30.7 | 2 090 | 780~30 100(5 785) |
| 中国 | 2.9 | 30 | 6.7 | 3.7 | 60 | 6.7 | 5.8 | 32 | 11 | 92 | 7 672 | 120~140 000(7 918) |

1) NA 表示引文中无法得到该数据

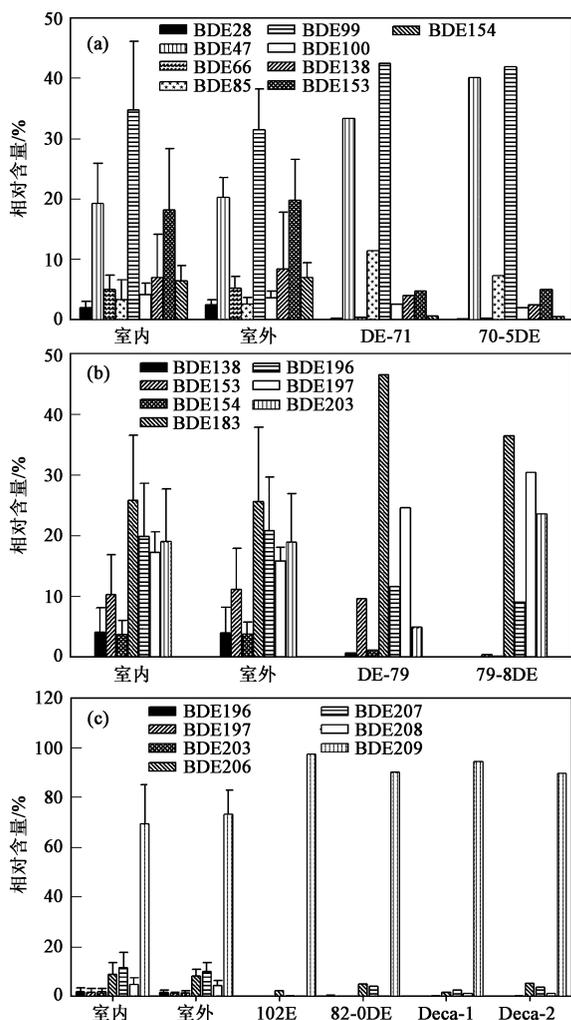
室内用品被认为是这些地区室内灰尘中低溴 PBDEs 的主要来源^[17,20,21], 而本研究地区 BDE209 的高含量主要来自电子/电器废弃物。

2.2 PBDEs 的组成

多溴联苯醚主要有 3 种工业品: 五溴联苯醚 (penta)、八溴联苯醚 (octa) 和十溴联苯醚 (deca), 环境中的 PBDEs 直接或间接地来源于这 3 类工业品。按照 Stapleton 等^[21] 估算不同工业品对环境样品中 PBDEs 贡献的方法 [即 $\text{penta}\% = (\text{BDE47} + \text{BDE99} + \text{BDE100}) / \sum \text{PBDE}$, $\text{octa}\% = \text{BDE183} / \sum \text{PBDE}$, $\text{deca}\% = \text{BDE209} / \sum \text{PBDE}$], 几乎所有样品中十溴联苯醚的贡献都是最大的, 占 24.0%~91.7%, 平均 65.1%, 而五溴和八溴产品的贡献分别 < 21.2% (平均 3.2%) 和 < 14.2% (平均 2.2%)。这与十溴联苯醚产品在电子/电器产品中的广泛使用是一致的。

图 1 显示了按照不同工业品来源 PBDEs 的组成模式。可以看出, 研究地区灰尘中 PBDEs 的组成模式和相应的五溴 (DE-71 和 70-5DE)、八溴 (DE-79 和 79-8DE) 和十溴 (102E、82-0DE、Deca-1 和 Deca-2) 工业品的组成模式很相似。室内外灰尘中 PBDE 组成也很相似, 说明它们具有相同的来源。五溴组分中相对高比重的 BDE138、153 和 154 主要是受八溴产品的影响, 因为它们同时也是八溴产品的组分。在十溴组分中, 无论是相对于国外十溴产品 (102E 和 82-0DE) 还是国内十溴产品 (Deca-1 和 Deca-2), 研究区域灰尘中八、九溴代 BDEs (BDE196、BDE197、BDE203、BDE206、BDE207 和 BDE208) 的相对含量 (30% ± 15%) 都比工业品中 (< 10%) 高。这些高溴代的 PBDE 同族体可能来自于 BDE209 的降解, 许多研究已证实 BDE209 的光、生物和热降解行为^[23-25]; 但是, 这一降解过程是在 BDE209 释放到环境以后、电子废弃物处理过程中, 还是在电子产品使用过程中

中发生的, 还需要进一步深入研究。



工业品 DE-71、70-5DE、DE-79、79-8DE、102E 和 82-0DE 的数据来自文献^[22]
图 1 室内外灰尘和不同多溴联苯醚工业品中 PBDE 同族体的分布模式

Fig. 1 PBDE congener patterns in the dusts and the commercial PBDE products

3 人体暴露

人体对灰尘中的 PBDEs 暴露可通过皮肤接触、呼吸作用和伴随食物摄取等途径; 特别是对于儿童, 他们的许多行为特点(如吮吸手指)会导致他们对灰尘中 PBDEs 的高暴露量, 而且儿童具有体重小、生长快、身体器官发育不完全、对一些异源有毒物质耐受性低等特点, 因此, 儿童通过室内灰尘对 PBDEs 的暴露量分析, 对了解 PBDEs 对儿童的健康风险十分重要。

根据文献[17]提供的数据, 假定不同年龄段人群对灰尘的日摄入量最高为: 婴幼儿 $200 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、儿童: $125 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、成人: $50 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$, 而平均日摄入量则分别为: $50 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $35 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。PBDEs 的日暴露量由灰尘中 PBDEs 的浓度和不同年龄段人群对灰尘的摄入量计算得出(表 3)。可以看到, 来自灰尘的 PBDEs 暴露对儿童比对成年人重要得多。

表 3 不同年龄段人群对灰尘中 PBDEs 的暴露水平/ $\text{ng} \cdot \text{d}^{-1}$

Table 3 Summary of estimated exposure of infants, toddlers, and adults to PBDEs via house dust in the e-waste area/ $\text{ng} \cdot \text{d}^{-1}$

| 年龄组 | 最高日灰尘摄入量 | | | 平均日灰尘摄入量 | | |
|--------|----------|------|-----|----------|-----|----|
| | 范围 | 平均值 | 中值 | 范围 | 平均值 | 中值 |
| 0.5~4岁 | 46~31500 | 1880 | 348 | 12~7875 | 470 | 87 |
| 5~12岁 | 29~19700 | 1175 | 218 | 8.1~5513 | 329 | 61 |
| 成年人 | 12~7875 | 470 | 87 | 4.6~3150 | 188 | 35 |

4 结论

PBDEs 在广东省清远电子废弃物处理地室内外灰尘中普遍存在, 其组成以 BDE209 为主, 总浓度处于世界各地已有报道的高值区, 显示了电子废弃物处理活动对当地环境的影响。室内外灰尘中 PBDE 组成和来源相似, 一些八至九溴 PBDE 同族体可能来自 BDE209 的降解。暴露的估算显示, 灰尘是当地人群(特别是婴幼儿和儿童)暴露 PBDEs 的重要途径之一。

参考文献:

[1] Darnerud P O, Eriksen G S, Johannesson T, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers: occurrence, dietary exposure, and toxicology [J]. *Environ Health Perspect*, 2001, **109**(supply 1):49-68

[2] Renner R. Government Watch: In U. S., flame retardants will be voluntarily phased out [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(1): 14A.

[3] Bimbaum L S, Staskal D F. Brominated flame retardants: cause for concern? [J]. *Environ Health Perspect*, 2004, **112**(1):9-17.

[4] Lorber M. Exposure of Americans to polybrominated diphenyl ethers [J]. *J Exposure Anal Environ Epidemiol*, 2008, **18**: 2-19.

利用平均日灰尘摄入量, 婴幼儿和儿童对 PBDEs 的平均日暴露量分别达 470 和 $329 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$, 成人仅为 $188 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$; 依本研究测到的尘土中的最高浓度计算, 婴幼儿和儿童对 PBDEs 的日暴露量可分别高达 31500 和 $19700 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$, 成人日暴露量最高为 $7875 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这些暴露量远高于该地区居民食用家禽的 PBDEs 暴露量 ($7.8 \sim 3585 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均 $67.5 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$)^[26]。因此, 灰尘是当地人群, 特别是婴幼儿和儿童暴露 PBDEs 的重要途径之一。本研究地区婴幼儿和儿童对尘土中 PBDEs 的平均日暴露量高于加拿大 ($124 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$), 但低于英国 ($14000 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$) 和美国 ($1400 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$) 儿童对尘土中 PBDEs 的平均日暴露量^[17, 20, 27]; 对于成人, 本结果也低于英国的平均日暴露量 ($4300 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$), 高于美国 ($154 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$) 和加拿大 ($53 \text{ ng} \cdot \text{d}^{-1}$) 的暴露量。但值得一提的是, 由于卫生和生活习惯等的差异, 中国人群的日灰尘摄入量可能与国外不一致, 更准确的计算还需进一步的研究。

[5] Wu N, Hermann T, Paepke O, *et al.* Human exposure to PBDEs: Associations of PBDE body burdens with food consumption and house dust concentrations [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(5): 1584-1589.

[6] Karlsson M, Julander A, Bavel B V, *et al.* Levels of brominated flame retardants in blood in relation to levels in household air and dust [J]. *Environ Intern*, 2007, **33**(1): 62-69.

[7] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平等. 珠江三角洲及南海北部海域表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(9): 1265-1271.

[8] 陈多宏, 李丽萍, 毕新慧, 等. 典型电子垃圾拆解区大气中多溴联苯醚的污染 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2105-2110.

[9] 向彩虹, 罗孝俊, 余梅, 等. 珠江河口水生生物中多溴联苯醚的分布 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1732-1737.

[10] Meng X Z, Zeng Y Z, Yu L P, *et al.* Assessment of human exposure to polybrominated diphenyl ethers in China via fish consumption and inhalation [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(14): 4882-4887.

[11] Chen L G, Mai B X, Xu Z C, *et al.* In- and outdoor sources of polybrominated diphenyl ethers and their human inhalation exposure in Guangzhou, China [J]. *Atmos Environ*, 2008, **42**(1): 78-86.

[12] Cheung K C, Zheng J S, Leung H M, *et al.* Exposure to polybrominated diphenyl ethers associated with consumption of marine and freshwater fish in Hong Kong [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(9):

- 1707-1720
- [13] 张荧, 吴江平, 罗孝俊, 等. 多溴联苯醚在典型污染区域水生食物链上的生物富集特征[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(3): 28-34.
- [14] Luo Y, Luo X J, Lin Z, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in Southern China: Concentrations, source profiles potential dispersion and deposition [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(3): 1105-1113.
- [15] 陈社军, 麦碧娴, 曾永平, 等. 沉积物中多溴联苯醚的测定[J]. 环境化学, 2005, 24(4): 474-477.
- [16] Regueiro J, Lombart M, Garcia-Jares C, *et al.* Factorial design optimization of gas chromatographic analysis of tetrabrominated to decabrominated diphenyl ethers. Application to domestic dust [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2007, 388(5-6): 1095-1107.
- [17] Harad S, Harra C, Abdallah M A, *et al.* Concentrations of brominated flame retardants in dust from United Kingdom cars, homes, and offices: Causes of variability and implications for human exposure [J]. *Environ Intern*, 2008, 34(8): 1170-1175.
- [18] Tan J, Cheng S M, Loganath A, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in house dust in Singapore [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(6): 985-992.
- [19] Gevaio B, Al-Bahloul M, Al-Ghadban A N, *et al.* House dust as a source of human exposure to polybrominated diphenyl ethers in Kuwait [J]. *Chemosphere*, 2006, 64(4): 603-608.
- [20] Wilford B H, Shoeb M, Harner T, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in indoor dust in Ottawa, Canada: Implications for sources and exposure [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(18): 7027-7035.
- [21] Stapleton H M, Dodder N G, Offenbergh J H, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in house dust and clothes dryer lint [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(4): 925-931.
- [22] Guardia M L, Hale R C, Harvey E. Detailed polybrominated diphenyl ether (PBDE) congener composition of the widely used penta-, octa-, and deca-PBDE technical flame-retardant mixtures [J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(20): 6247-6254.
- [23] Kajiwara N, Noma Y, Takigami H. Photolysis studies of technical decabromodiphenyl ether (DecaBDE) and ethane (DeBDethane) in plastics under natural sunlight [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(12): 4404-4409.
- [24] 丁娟, 周娟, 姜玮颖, 等. 多溴联苯醚好氧生物降解研究[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3179-3184.
- [25] Nose K, Hashimoto S, Takahashi S, *et al.* Degradation pathways of decabromodiphenyl ether during hydrothermal treatment [J]. *Chemosphere*, 2007, 68(1): 120-125.
- [26] Luo X J, Luo Y, Zhang X L, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDES) in free-range domestic fowl from an e-waste recycling site in South China: Levels, profile and human dietary exposure [J]. *Environ Intern*, 2009, 35(2): 253-258.
- [27] Heather M S, Shannon M K, Joseph G A, *et al.* Measurement of polybrominated diphenyl ether on hand wipes: estimating exposure from Hand-to-Mouth contact [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(9): 3329-3334.