

典型电子废物集中处置场地及周边土壤中 多溴联苯醚的污染特征

陈涛, 周纯^①, 牟义军, 余彬彬 (台州市环境监测中心站, 浙江台州 318000)

摘要: 采用快速溶剂萃取-凝胶净化-气相色谱质谱法(GC-MS)测定了浙江省台州市某典型电子废物集中处置场地及周边土壤中多溴联苯醚(poly brominated diphenyl ethers, PBDEs)浓度,研究了8种PBDEs(BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183、BDE-209)的浓度水平、组成特征和垂直分布规律。结果表明,BDE-209污染与其他几种PBDEs污染之间具有很大的关联性;BDE-209是主要污染物,占8种PBDEs总含量的90%左右;处置场地内8种PBDEs的浓度高于其周边土壤,其平均质量含量分别为0.625和0.209 mg·kg⁻¹;随着与场地集中区域中心距离的增加,PBDEs总含量呈逐渐下降趋势。

关键词: 电子废物处置; 土壤; 多溴联苯醚; 污染特征

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2011)03-0020-05

PBDEs Pollution of Soils in a Typical E-waste Disposal Site and Its Surrounding Area. CHEN Tao, ZHOU Chun, MOU Yi-jun, YU Bin-bin (Taizhou Environmental Monitoring Center Station, Taizhou 318000, China)

Abstract: Concentrations of 8 kinds of PBDE congeners (BDE-28, BDE-47, BDE-99, BDE-100, BDE-153, BDE-154, BDE-183, BDE-209) in soils of a typical e-waste disposal site and its surrounding area in Taizhou, Zhejiang were determined with the accelerated solvent extraction (ASE) - gel permeation chromatography technology (GPC) - GC-MS method, to study concentration level, composition characteristics and vertical distribution of the pollutants in the area. Results show that BDE-209 was the major pollutant, accounting for 90% of the content of the total 8 PBDEs in the soil. The total concentration of the pollutants in soil was higher in the site per se than in its surrounding area, being 0.625 and 0.209 mg·kg⁻¹, respectively. PBDE concentration decreased with the distance from the center of the disposal site.

Key words: electronic waste recycling; soil; poly brominated diphenyl ethers (PBDEs); pollution characteristic

多溴联苯醚(poly brominated diphenyl ethers, PBDEs)作为一种添加型阻燃剂被广泛地应用在电子、电器、化工、交通、建材、纺织、石油、采矿等领域^[1]。PBDEs具有一定的挥发性,可以散逸到空气中,随大气长距离迁移,同时具有强亲脂性,化学性质稳定,可以经食物链生物富集和放大。已有研究证实,这类有毒溴化物会干扰甲状腺激素,妨碍人类和动物脑部与中枢神经系统的正常发育^[2-5]。近年来,各种环境介质中纷纷检出PBDEs,引起了学术界的广泛关注。但有关土壤中PBDEs的研究并不多见,国内学者对青岛沉积物,珠江三角洲沉积物、水体以及珠江河口水生生物中PBDEs的含量和分布进行了研究,发现电子废物拆解是环境中PBDEs的重要来源,但不同文献的描述有很大的差别^[6-8]。

自20世纪70年代末起,浙江省台州地区就存在零星废旧电器拆解业。经过30多a的发展,台州地区已成为世界上进口废旧电器最多的地区之一,也是我国最大的洋垃圾回收再利用之地。电子垃圾

具有双重性,即资源再生性和潜在的环境污染性^[9]。一方面,电子垃圾中含有金、铜、铝、银等贵金属及塑料,有一定的回收利用价值;另一方面,电子垃圾中含有铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯和PBDEs等大量有害物质,如果回收利用不当或者任意丢弃,就会成为周边环境介质(水、土、气、生)的重要污染源,从而危害人体健康及生命安全。因此,研究该区域PBDEs的污染现状意义重大。笔者探讨台州某电子废物处置场地及周边土壤中PBDEs的含量、分布和组成,以了解电子废物拆解场地及周边土壤的污染情况,为土壤利用方式调整以及污染修复提供参考依据。

收稿日期: 2011-03-04

基金项目: 浙江省环保科研项目(200937)

① 通信作者 E-mail: zhouchunjoy@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与标准物质

材料: PBDEs 混合标样(BDE - CSM, 包括 BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183、BDE - 209) 购自美国 Accustandard 公司, 回收率测定所用标样 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 139 和 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 209 及内标物 $^{13}\text{C}_{12}$ - PCB - 138 购自英国剑桥同位素实验室(Cambridge Isotope Laboratories), 所用试剂(二氯甲烷、正己烷、丙酮) 购自德国 CNW 公司。

仪器: Agilent 7890 - 5975C 气相色谱质谱仪(美国安捷伦公司), HP - 5 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), DB - 5 HT 色谱柱(15 m × 0.25 mm × 0.10 μm); ASE - 300 快速溶剂萃取仪(美国戴安公司); 全自动凝胶净化系统 GPC(德国 LC-Tech 公司), 填料为 38 ~ 75 μm 孔径的 Bio-beads S - X3; Zymark 自动氮吹浓缩仪(美国 Zymark 公司)。

1.2 样品采集与保存

在台州某电子废物处置场地内共布设 23 个场地调查样点, 所有场地样点均采集 0 ~ 20、> 20 ~ 40、> 40 ~ 60 和 > 60 ~ 80 cm 4 个剖面样品; 同时在场地周边布设 46 个表层土壤采样点。采集的土壤样品用棕色广口玻璃瓶带回实验室后, 置于 400 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘烤过的干净 500 mL 烧杯中, 放在暗室中让其自然风干, 烧杯口用黑色纸张盖住以防止灰尘落入。样品经去除颗粒和沙石等杂物, 放入研钵中研磨后过 0.85 mm 孔径筛, 置于磨口棕色样品瓶中, 于 -4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下冰箱保存。

1.3 样品前处理

根据《全国土壤污染状况调查样品分析测试(前处理)技术规定》^[10] 对土样进行前处理。称取 10 g 经过冷冻干燥、磨碎的土壤, 加入采样内标 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 139 (2.5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 和 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 209 (5.0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$), 用二氯甲烷进行快速溶剂萃取, 萃取池炉温 100 $^{\circ}\text{C}$, 压力 1.03×10^7 Pa, 加热 6 min, 萃取 2 次, 然后将提取液浓缩进行 GPC 净化, 流动相为二氯甲烷, 流速 5.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 预淋洗时间 1 100 s, 样品收集时间 920 s, 在净化液中加入进样内标 $^{13}\text{C}_{12}$ - PCB - 138, 最后浓缩至 1.0 mL, 进行质谱分析。

1.4 样品分析

1.4.1 色谱条件

BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183 测定采用 HP - 5

色谱柱, 氦气流量 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 柱程序升温 70 $^{\circ}\text{C}$ 保留 2 min, 以 20 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$, 进样口温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 传输线 280 $^{\circ}\text{C}$, 离子源 230 $^{\circ}\text{C}$, 无分流进样; BDE - 209 测定采用 VF - 5 ht MS 色谱柱, 柱流量 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 色谱柱温 40 $^{\circ}\text{C}$ 保留 1.5 min, 以 45 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 140 $^{\circ}\text{C}$, 再以 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 325 $^{\circ}\text{C}$, 保留 1 min, 进样口温度 280 $^{\circ}\text{C}$, 传输线 280 $^{\circ}\text{C}$, 离子源 200 $^{\circ}\text{C}$, 无分流进样。

1.4.2 质谱条件

质谱采集方式为选择离子模式(SIM), BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183 采用电子轰击源气相色谱质谱法(GC - EI/MS) 分析, 内标物 $^{13}\text{C}_{12}$ - PCB - 138 扫描离子为 302.0(+), 371.9(+), 373.9(+)。BDE - 209 采用负化学源气相色谱质谱法(GC - NCI/MS) 分析, 以 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 209 为内标物作定量分析, 可以消除 BDE - 209 在前处理和色谱分析中的损失, $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 209 扫描离子为 415.6(-), 494.4(-), BDE - 209 扫描离子为 407.5(-), 488.4(-), BDE - 209 以质荷比(m/Z) 488.4 与 m/Z 494.4 的强度之比进行定量, $^{13}\text{C}_{12}$ - PCB - 138 扫描离子为 302.0(-), 371.9(-), 373.9(-)。

1.5 质量控制措施

样品采集与测试具有严格的质量保证和质量控制。样品分析时设置溶剂空白、标准样品、空白加标样、基质加标样测试、平行样分析, 只有满足要求方可进行实际样品测试。质控样、平行样、基质加标样所占样品比例大于 10%, 回收率和重复性只有达到要求后数据方为有效, 8 种 PBDEs 的平均回收率为 45.7% ~ 97.2%, 回收率标样 $^{13}\text{C}_{12}$ - BDE - 139 的加标回收率为 30.6% ~ 82.9%, 样品平均相对偏差基本小于 30%。具体方法检测限、质量保证和质量控制指标基本符合 HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[11] 或美国环境保护署(EPA)^[12] 的相关要求。

按照分析条件得到仪器的线性范围、检出限和定量限。仪器的线性范围(溶液中质量浓度): PBDEs 为 7 ~ 182 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, BDE - 209 为 40 ~ 2 000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。检出限按照 EPA SW - 846 方法计算, 以无水硫酸钠颗粒物为空白, 加入高于检出限浓度 3 ~ 5 倍的标准溶液, 按照样品前处理方法进行处理, 得到空白加标液, 以 7 次空白加标液的测定浓度计算相对标准偏差(RSD), 以 3 倍 RSD 为方法检出限, 得到检出限为 0.15 ~ 0.40 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, BDE - 209 检出限为 4.0 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 处置场地及周边土壤中 PBDEs 的浓度水平

对处置场地表层及其周边土壤中 PBDEs 的监测结果进行统计分析,结果见表 1~2。监测数据显示,处置场地中 19 号样点 \sum^7 PBDEs (BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 的总含量) 和 \sum^8 PBDEs (8 种 PBDEs 的总含量) 值最小,12 号样点值最大。场地周边土壤中 29 号样点 \sum^7 PBDEs 和 \sum^8 PBDEs 均达最大值,66 和 67 号样点 \sum^7 PBDEs 和 \sum^8 PBDEs 分别达最小值,这 2 个点位所在地理位置比较接近,说明该地区的

BDE-209 含量与其他几种 PBDEs 含量之间具有很大的关联性。表 1~2 显示,无论是处置场地还是周边土壤中,BDE-209 含量比其他 7 种 PBDEs 的含量总和约高 10 倍,这与 BDE-209 是国内产量最大的含溴阻燃剂,而生产企业主要分布在我国东部沿海一带有关^[13]。处置场地 BDE-209 占 8 种 PBDEs 总含量的比例达 89.36% 以上,其平均比例超过 90%,周边土壤中 BDE-209 所占比例也达 87.52% 以上(表 1)。因此,今后在进行类似区域的 PBDEs 监测时,若考虑节省经费或时间,可减少监测物质的种类,主要通过监测 BDE-209 来反映 PBDEs 的污染状况。

表 1 电子废物处置场地及周边土壤中 PBDEs 总含量特征

Table 1 PBDEs contents in the surface soils of the disposal site and its surrounding area

统计分析结果	处置场地			周边土壤		
	\sum^7 PBDEs ¹⁾ / (mg · kg ⁻¹)	\sum^8 PBDEs ²⁾ / (mg · kg ⁻¹)	占比 ³⁾ / %	\sum^7 PBDEs ¹⁾ / (mg · kg ⁻¹)	\sum^8 PBDEs ²⁾ / (mg · kg ⁻¹)	占比 ³⁾ / %
平均值	4.57×10^{-2}	6.25×10^{-1}	91.85	2.61×10^{-2}	2.09×10^{-1}	87.52
最大值	2.33×10^{-1}	2.19	98.34	4.01×10^{-1}	3.46	93.47
中位值	1.98×10^{-2}	4.49×10^{-1}	95.59	9.10×10^{-3}	8.99×10^{-2}	89.88
最小值	5.50×10^{-4}	3.32×10^{-2}	89.36	9.80×10^{-4}	1.62×10^{-2}	88.41

1) BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183 的总含量; 2) BDE-28、BDE-47、BDE-99、BDE-100、BDE-153、BDE-154、BDE-183、BDE-209 的总含量; 3) BDE-209 含量占 8 种 PBDEs 总含量的比例。

表 2 电子废物处置场地及周边土壤中 8 种 PBDEs 含量

Table 2 Averages and ranges of the contents of 8 PBDEs in the surface soils of the disposal site and its surrounding area

PBDEs	处置场地				周边土壤			
	最小值 / (mg · kg ⁻¹)	最大值 / (mg · kg ⁻¹)	平均值 / (mg · kg ⁻¹)	占比 ¹⁾ / %	最小值 / (mg · kg ⁻¹)	最大值 / (mg · kg ⁻¹)	平均值 / (mg · kg ⁻¹)	占比 ¹⁾ / %
BDE-28	ND	2.25×10^{-3}	1.15×10^{-3}	0.24	ND	9.50×10^{-4}	7.10×10^{-4}	0.34
BDE-47	5.50×10^{-4}	3.96×10^{-2}	1.11×10^{-2}	1.77	0.000 58	9.66×10^{-2}	5.55×10^{-3}	2.65
BDE-100	ND	2.92×10^{-2}	4.04×10^{-3}	0.65	ND	2.20×10^{-2}	1.96×10^{-3}	0.94
BDE-99	ND	5.23×10^{-2}	1.43×10^{-2}	2.28	0.000 4	1.31×10^{-1}	6.84×10^{-3}	3.27
BDE-154	ND	2.17×10^{-2}	2.65×10^{-3}	0.42	ND	1.36×10^{-2}	1.21×10^{-3}	0.58
BDE-153	ND	5.79×10^{-2}	6.72×10^{-3}	1.07	ND	9.90×10^{-2}	4.27×10^{-3}	2.04
BDE-183	ND	3.03×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.61	ND	9.91×10^{-2}	5.56×10^{-3}	2.66
BDE-209	3.26×10^{-2}	1.96	5.75×10^{-1}	91.85	0.014	3.06	1.83×10^{-1}	87.52

ND 为未检出。1) 占 8 种 PBDEs 总含量的比例。

由表 2 可见,电子废物处置场地周边土壤中数种 PBDEs 的最大值甚至比处置场地中还要高,但通过分析具体数据发现这只是个别现象。总体来说,处置场地 \sum^8 PBDEs 平均值为 $0.625 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于周边土壤($0.209 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。对处置场地周边土壤各样点间的 \sum^8 PBDEs 值进行比较,结果显示,随着与处置场地中心距离的增加, \sum^8 PBDEs 值呈逐

渐下降趋势,说明电子废物处置对周边土壤产生了一定的污染,离处置场地越近污染越严重。

2.2 处置场地及周边土壤中 PBDEs 的组成特征

由表 2 可见,处置场地及周边土壤中 8 种 PBDEs 的含量由高到低的顺序均为: BDE-209、BDE-99、BDE-47、BDE-183、BDE-153、BDE-100、BDE-154 和 BDE-28,两者完全一致,具有很好的相关性,其中 BDE-209 的检出率均在 90% 左

右, BDE - 28 的检出率最低, 在 12.9% ~ 15.2% 之间。

2.3 处置场地 PBDEs 的垂直分布规律

电子废物处置场地不同深度土层中 8 种 PBDEs 的平均质量含量如表 3 所示。从表 3 中可以发现, 除 BDE - 28 在 >40 ~ 60 cm 土层的平均含量高于其他土层外, BDE - 154、BDE - 153、BDE - 183 含量由高到低依次为 0 ~ 20 cm、>20 ~ 40 cm、>40 ~ 60 cm、>60 ~ 80 cm 土层, 其他几种 PBDEs 以及 PBDEs 总含量由高到低依次为 0 ~ 20 cm、>40 ~ 60 cm、>20 ~ 40 cm、>60 ~ 80 cm 土层。其原因是在 8 种 PBDEs 中 BDE - 28 未检出率最高, 检出浓度值最低, 并且其在电子废物中含量极少, 未对处置场地带来明显污染, 而自然界中原本存在的一些 BDE - 28 因为雨水淋洗, 逐渐在深层土壤中累积, 从而降低了其在表层的浓度。

2.4 处置场地及周边土壤 PBDEs 污染水平比较

将该电子废物处置场地及周边土壤中 PBDEs

污染水平, 与已有文献报道过的其他地区土壤中 PBDEs 污染水平进行对比, 结果见表 4。

表 3 电子废物处置场地 8 种 PBDEs 的垂直分布规律

Table 3 Distribution of 8 PBDEs in soil profile at the disposal site

PBDEs	不同土层深度 (cm) w(PBDEs)			
	0 ~ 20	>20 ~ 40	>40 ~ 60	>60 ~ 80
BDE - 28	1.15×10^{-3}	6.37×10^{-4}	3.64×10^{-3}	
BDE - 47	1.11×10^{-2}	5.42×10^{-3}	7.69×10^{-3}	1.76×10^{-3}
BDE - 100	4.04×10^{-3}	1.90×10^{-3}	1.92×10^{-3}	9.18×10^{-4}
BDE - 99	1.43×10^{-2}	6.97×10^{-3}	7.62×10^{-3}	2.18×10^{-3}
BDE - 154	2.65×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.31×10^{-3}	7.36×10^{-4}
BDE - 153	6.72×10^{-3}	3.30×10^{-3}	2.99×10^{-3}	1.18×10^{-3}
BDE - 183	1.01×10^{-2}	6.52×10^{-3}	4.81×10^{-3}	2.97×10^{-3}
BDE - 209	5.75×10^{-1}	2.52×10^{-1}	3.43×10^{-1}	1.20×10^{-1}
$\sum_{7} \text{PBDEs}^{1)}$	5.01×10^{-2}	2.62×10^{-2}	3.00×10^{-2}	9.75×10^{-3}
$\sum_{8} \text{PBDEs}^{2)}$	6.25×10^{-1}	2.78×10^{-1}	3.73×10^{-1}	1.30×10^{-1}

1) BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183 的总含量; 2) BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183、BDE - 209 的总含量。

表 4 与各地区土壤中 PBDEs 含量的比较

Table 4 Comparison between areas in PBDEs content in soil

PBDEs	欧洲 ¹⁾	贵屿 ¹²⁾	贵屿 ²²⁾	美国 ³⁾	瑞典 S ⁴⁾	瑞典 F ⁵⁾	珠三角 ⁶⁾
BDE - 28	0.022	3	5				0.036
BDE - 47	0.374	125	217	13.3	75.10	1.40	0.629
BDE - 100	0.068	46		15.4	20.00	0.56	0.028
BDE - 99	0.513	314	548	1.3	98.50	2.30	0.137
BDE - 154	0.056	26	49		7.68	0.27	0.029
BDE - 153	0.111	127	74		8.68	0.29	0.045
BDE - 183	0.043	418	12		0.51	0	0.080
BDE - 209					367.00	330	13.800
$\sum_{7} \text{PBDEs}^{7)}$	1.187	1059	905	30	210.47	4.82	0.984
$\sum_{8} \text{PBDEs}^{8)}$					577.47	334.82	14.784
参考文献	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[18]	[19]

1) 背景点, 无污染土壤; 2) 电子废物处置场地内部土壤, 2 篇不同文献报道的 2006 和 2007 年监测结果; 3) 可能受 PBDEs 污染区域; 4) 污泥回填土壤; 5) 用污染河水进行灌溉的农场土壤; 6) 处置场地及周边土壤; 7) BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183 的总含量; 8) BDE - 28、BDE - 47、BDE - 99、BDE - 100、BDE - 153、BDE - 154、BDE - 183、BDE - 209 的总含量。

在表 4 所列的各地土壤中, 珠三角和贵屿土壤的使用类型与台州类似, 均为电子废物拆解场地及周边土壤的检测数据。结合表 2 可知, 台州电子废物拆解场地内部和周边土壤的 8 种 PBDEs 总含量分别为 625 和 209 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 625 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 比同为电子废物拆解场地内部的贵屿均值 982 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 低, 但远高于珠三角的检测值 14.8 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$, 也高于瑞典污泥回填土壤和用污染河水进行灌溉的农场土壤; 周边土壤 PBDEs 检测数据 209 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 则远高于欧洲的背景值和美国可能受 PBDEs 污染的土壤。这与当地电子废物处置场地分散, 规模较

小, 容易造成周边污染有关。以上分析说明台州电子废物拆解场地的土壤受 PBDEs 污染已达到一个较严重的水平, 假如受污染地块重新改作其他用途, 需要对其进行评价分析, 必要的话应采取一些措施加以修复后利用。

3 结论

(1) 电子废物处置场地及其周边土壤中 8 种 PBDEs 的浓度水平监测数据显示, BDE - 209 污染与其他几种 PBDEs 污染之间具有很大的关联性, BDE - 209 是主要污染物, 占 8 种 PBDEs 总含量的

90%左右。当涉及经费和时间问题时,可通过监测 BDE-209 来反映类似区域 PBDEs 的总体污染状况。

(2) 总体来说,处置场地内 8 种 PBDEs 的浓度要高于其周边土壤,随着与场地集中区域中心距离的增加,PBDEs 总含量呈逐渐下降趋势,说明电子废物处置对周边土壤产生了一定的污染,离处置场地越近污染越严重。

(3) 处置场地及其周边土壤中 8 种 PBDEs 含量从高到低依次为:BDE-209、BDE-99、BDE-47、BDE-183、BDE-153、BDE-100、BDE-154 和 BDE-28,其中 BDE-209 的检出率均在 90%左右,BDE-28 的检出率最小,为 12.9%~15.2%。

(4) 8 种 PBDEs 在电子废物处置场地的垂直分布规律为除 BDE-28 在 >40~60 cm 土层的平均含量高于其他土层外,BDE-154、BDE-153、BDE-183 含量表现为随土层深度增加而逐渐降低,其他几种 PBDEs 以及 PBDEs 总含量则由高到低依次为 0~20 cm、>40~60 cm、>20~40 cm、>60~80 cm 土层。

参考文献:

[1] 薛铮然,李海静. 高效溴系阻燃剂十溴联苯醚生产工艺研究[J]. 山东化工,2002,31(4):31-32.

[2] US Department of Health and Human Services. National Toxicology Program[R]. Washington DC, USA: US Department of Health and Human Services,1986;246.

[3] Environmental Health Criteria 162, Brominated Diphenyl Ethers[S].

[4] 石毓岷. 环境监测中 POPs 分析的关键问题与对策[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(2):178-184.

[5] 黄春雷,宋明义,蔡子华,等. 基于环境背景值的重金属污染地块划定:以浙东沿海某典型固体废物拆解区污染土壤为例[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(3):90-93.

[6] 杨永亮,潘静,李悦,等. 青岛近岸沉积物中持久性有机污染物多氯萘和多溴联苯醚[J]. 科学通报,2003,48(21):2244-2251.

[7] 陈社军,麦碧烟,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):1256-1271.

[8] 向彩红,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.

[9] 徐莉,骆永明,滕应,等. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究IV:废旧电子产品拆解场地周边农田土壤酸化和重金属污染特征[J]. 土壤学报,2009,46(5):833-839.

[10] 国家环境保护总局. 全国土壤污染状况调查样品分析测试(前处理)技术规定[M]. 北京:国家环境保护总局,2006:302-305.

[11] HJ/T 166—2004,土壤环境监测技术规范[S].

[12] EPA Method 1614, Brominated Diphenyl Ethers in Water Soil, Sediment and Tissue by HRGC/HRMS[S].

[13] 刘汉霞,张庆华,江桂斌. 多溴联苯醚及其环境问题[J]. 化学进展,2005,17(3):554-562.

[14] HASSA N, BREI V, MEI J, *et al.* PBDEs in European Background Soils: Levels and Factors Controlling Their Distribution [J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(3):738-745.

[15] WANG D L, CAI Z W, JIANG G B, *et al.* Determination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soil and Sediment From an Electronic Waste Recycling Facility [J]. Chemosphere, 2005, 60(6):810-816.

[16] CAI Z, JIANG G. Determination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soil From E-waste Recycling Site [J]. Talanta, 2006, 70(1):88-90.

[17] HALER C, LA G J, HARVEY E, *et al.* Potential Role of Fire-retardant-Treated Polyurethane Foam as a Source of Brominated Diphenyl Ethers to the US Environment [J]. Chemosphere, 2002, 46(5):729-735.

[18] SELLSTR M, DEWITC A, LUNDGREN N, *et al.* Effect of Sew-Age-Sludge Application on Concentrations of Higher-Brominated Diphenyl Ethers in Soils and Earthworms [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(23):9064-9070.

[19] 邹梦遥,龚剑,冉勇. 珠江三角洲流域土壤多溴联苯醚(PBDEs)的分布及环境行为[J]. 生态环境学报,2009,18(1):122-127.

作者简介:陈涛(1969—),男,浙江台州人,高级工程师,主要从事环境管理方面的研究。E-mail:chentao903@163.com