

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0041

陈学斌,刘文霞,廖晓,等.2016.典型钢铁厂周边土壤中多氯联苯分布特征研究[J].环境科学学报,36(9):3333-3338

Chen X B, Liu W X, Liao X, et al. 2016. Concentrations and profiles of PCBs in the surrounding soil of a typical steel plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3333-3338

典型钢铁厂周边土壤中多氯联苯分布特征研究

陈学斌^{1,2}, 刘文霞^{1,*}, 廖晓², 韩莹², 王梦京², 刘文彬²

1. 河南农业大学, 郑州 450002

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

收稿日期: 2015-10-13

修回日期: 2016-02-02

录用日期: 2016-02-03

摘要: 钢铁厂中各工业热过程车间都会产生污染物并对周边环境造成危害, 本文以迁安市钢铁厂周边土壤为研究对象, 对该市内及钢铁厂周边土壤样品进行采集, 采用同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱方法(HRGC/HRMS)测定了多氯联苯(PCBs)的含量, 研究了 PCBs 的同类物分布特征. 结果发现, 市内及钢铁厂周边土壤样品中 dl-PCBs 的总含量为 4.77~462.04 pg·g⁻¹, WHO-TEQ(Toxic Equivalent Quantity) 即毒性当量值为 0.03~1.34 pg·g⁻¹. 由此可以看出, 该市及钢铁厂周边环境土壤受到了 PCBs 等有毒污染物的影响. 大部分土壤样品的同类物分布特征相似; PCB-118 对土壤 dl-PCBs 含量贡献率最大, 贡献率为 34%. PCB-101 对土壤指示性 PCBs 含量贡献率最大, 贡献率为 42.5%. 同时, 通过对样品中同类物分布可以看出, 低氯代的同类物(TrCBs~HxCBs)的含量要远高于高氯代同类物(HpCBs~DeCBs).

关键词: 土壤; 多氯联苯; 分布特征; 环境风险

文章编号: 0253-2468(2016)09-3333-06

中图分类号: X53

文献标识码: A

Concentrations and profiles of PCBs in the surrounding soil of a typical steel plant

CHEN Xuebin^{1,2}, LIU Wenxia^{1,*}, LIAO Xiao², HAN Ying², WANG Mengjing², LIU Wenbin²

1. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 13 October 2015;

received in revised form 2 February 2016;

accepted 3 February 2016

Abstract: Industrial thermal processes in typical steel plants can produce pollutants that are detrimental to the surrounding environment. The concentrations and distributions of polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface soil in the city of Qian'an, China were determined by analyzing soil samples using an isotope-dilution high resolution gas chromatography-high resolution mass spectrometry method. The total dioxin-like PCB concentrations in the samples were 4.77~462.04 pg·g⁻¹, and the toxic equivalent concentrations (calculated using World Health Organization toxic equivalence factors) were 0.03~1.34 pg·g⁻¹. We concluded that soil in Qian'an was contaminated with PCBs. The PCB homolog patterns in most of the soil samples were similar. PCB-118 was the main contributor to the total dioxin-like PCB concentrations, contributing 34%. PCB-101 was the main contributor to the total indicator PCB concentrations, contributing 42.5%. The less chlorinated PCB congeners (trichlorobiphenyls to hexachlorobiphenyls) were found at much higher concentrations than the more chlorinated congeners (heptachlorobiphenyls to decachlorobiphenyl).

Keywords: soil; PCBs; distribution patterns; environmental risk

1 引言(Introduction)

多氯联苯(Polychlorinated Biphenyls, PCBs)被《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》列为

首批控制消除的 12 种污染物之一, PCBs 的同类物多达 209 种, 由于其在环境中具有难降解性、生物累积性、长距离传输和生物毒性等特点(Alcock *et al.*, 1996), 因而被认为是环境中普遍存在的持久性有

基金项目: 国家自然科学基金(No.21477150, 21321004); 国家重点实验室开放基金(No.KF-2012-10)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.21477150, 21321004) and the Open Fund Project of State Key Laboratory (No.KF-2012-10)

作者简介: 陈学斌(1990—), 男, E-mail: xbinchen@yeah.net; * 通讯作者(责任作者), E-mail: hxliuwenxia@163.com

Biography: CHEN Xuebin(1990—), male, E-mail: xbinchen@yeah.net; * Corresponding author, E-mail: hxliuwenxia@163.com

机污染物 (POPs)。多氯联苯具有良好的化学惰性、抗热性、不可燃性、低蒸气压和高介电常数等优点,因此在 20 世纪 70 年代前曾被大量生产并广泛应用于电力工业、塑料加工业、化工和印刷等领域。我国虽然在 20 世纪 70 年代禁止了 PCBs 的生产,但生产和使用 PCBs 产生的废物和污染场地中 PCBs 经二次挥发进入大气,成为环境中 PCBs 的重要来源之一。除此之外,多氯联苯作为副产物,可以在很多工业过程中产生和排放,而这些工业过程中含有 PCBs 的工业废弃物如废气、废液、废渣的排放 (Guo *et al.*, 2009; Nie *et al.*, 2012a; 2012b; Lv *et al.*, 2011), 成为近年来环境中 PCBs 的重要来源。PCBs 在大气、水、土壤之间存在一个交换的平衡过程,大气环境中的 PCBs 随大气的干、湿沉降污染土壤和水体 (孟庆昱等, 2000; 王莎莎等, 2014)。土壤既是 PCBs 的源,也是重要的汇,而且在人类食物链中是一个关键的环境介质,与人类的生活关系极为密切,因此,成为近年来的研究热点。有研究显示,意大利背景土壤中 PCBs 含量为 $0.26 \sim 2.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (Domenico *et al.*, 1993); 土耳其烧结厂周边土壤中指示性 PCBs 含量约为 $7.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (Odabasi *et al.*, 2010); 而在日本某钢铁厂周边土壤中 PCBs-TEQ (Toxic Equivalent Quantity) 即毒性当量值为 $0.15 \sim 4.2 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以 TEQ 计, Yasuhiko *et al.*, 1994)。因此,关于土壤的 PCBs 的研究也越来越受到广泛关注。

近年来的研究表明,钢铁生产是多氯联苯特别是具有类二噁英多氯联苯 (dioxin-PCBs) 的排放源 (Lee *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2014)。中国作为钢铁大国,据国家统计局统计数据显示,2011 年全国粗钢产能高达 8.2 亿 t,粗钢总产量 6.83 亿 t。面对如此大规模的钢铁生产,研究钢铁厂对周边土壤 PCBs 污染水平的影响具有重要意义 (Nie *et al.*, 2011; Lv *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2013; Ba *et al.*, 2009)。而河北省是我国最大的钢铁生产省份,产能在 2.4 亿 t 左右,占全国总产量的 29.3%; 钢铁产量 1.65 亿 t,占全国总产量的 24%。迁安市位于河北省境内,矿石资源丰富,为钢铁厂提供了很好的环境依托,拥有多家大型钢铁生产企业,是开展 PCBs 环境水平研究的典型地区。因此,本研究通过在迁安市选择典型钢铁企业,对其周边土壤中的 PCBs 含量和分布特征开展研究,以期评估钢铁企业排放的 PCBs 对周边环境的影响提供参考。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样品采集和分析

研究选择的钢铁厂位于迁安市西北部,该地区属于华北地区,以黄壤为主,黄壤的物理性质表现为疏松、多孔隙,垂直节理发育,极易渗水,且有许多可溶性物质,易于 PCBs 等有毒物质的积累。该厂于 2004 年投产,年生产能力 800 万 t,从投产至今已有 10 年之久。因为该厂同时具备炼钢、烧结、焦化等工业热工程车间,PCBs 等有毒污染物在炼钢等工业热工程中可随烟道气和飞灰等途径进入到环境中并经过大气沉降进入土壤中,使得该市及钢铁厂周边环境土壤受到了 PCBs 等有毒污染物的影响。因此,该厂周边土壤中的 PCBs 等污染属于多方面复合污染。同时,该地区除了该钢铁厂炼钢、焦化、烧结等车间污染排放外,无其他污染源,因此,认为该钢铁厂为该地区污染源。于 2014 年夏季采集了所在区域周边的表层土壤,采样点位共有 9 处,具体点位如图 1 所示 (其中, Q1: $39^{\circ}58'36.50''\text{N}$, $118^{\circ}33'4.50''\text{E}$; Q2: $39^{\circ}58'29.50''\text{N}$, $118^{\circ}34'32.10''\text{E}$; Q3: $39^{\circ}57'36.60''\text{N}$, $118^{\circ}32'51.90''\text{E}$; Q4: $39^{\circ}57'31.80''\text{N}$, $118^{\circ}33'34.20''\text{E}$; Q5: $39^{\circ}59'9.50''\text{N}$, $118^{\circ}32'32.50''\text{E}$; Q6: $39^{\circ}59'17.20''\text{N}$, $118^{\circ}33'7.80''\text{E}$; Q7: $39^{\circ}59'23.60''\text{N}$, $118^{\circ}34'56.80''\text{E}$; Q8: $39^{\circ}57'0.80''\text{N}$, $118^{\circ}34'37.00''\text{E}$; Q9: $39^{\circ}58'26.80''\text{N}$, $118^{\circ}29'37.60''\text{E}$)。

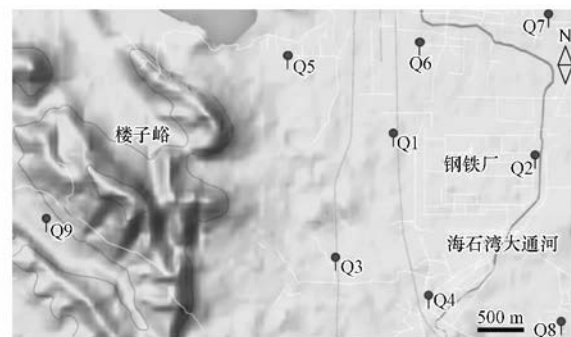


图 1 土壤样品分布示意图

Fig.1 Distribution of soil sampling sites

土壤样品采集参照我国标准方法《土壤和沉积物二噁英类的测定同位素稀释高分辨色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.4—2008)进行。使用金属铲具铲去表层杂草和石块,并在 10 cm 深度范围内采集土壤样品,而后将其放入聚乙烯密封袋中带回实验室并于 -4°C 下保存。采样点的具体位置由便携式 GPS 设备 (Magellan GPS, San Dimas, CA, USA) 记录。

PCBs 的样品分析依据 EPA-1668A 方法, 采用同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱(HRGC/HRMS)对样品进行分析。将土壤样品置于冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h 左右, 然后研磨过筛(60 目)。土壤样品中目标物的提取采用加速溶剂提取(ASE 350, DIONEX, USA)方法, 称取 10.0 g 左右样品置于烧杯中, 与 1/3~1/4 比例的硅藻土充分混合, 加入 1 ng $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的 PCBs 净化内标($^{13}\text{C}_{12}$ -CB-1, 3, 4, 15, 19, 37, 54, 81, 77, 104, 114, 105, 126, 155, 167, 156, 157, 169, 188, 189, 202, 205, 206, 208, 209)。混合标准溶液平衡至少 2 h 之后, 转入底部垫有滤膜的提取筒中。提取溶剂为正己烷/二氯甲烷(1:1, 体积比), 温度为 150 °C, 压力 10.34×10^6 Pa, 静态提取时间 15 min, 循环提取 2 次。溶剂淋洗体积为 70% 萃取池体积, 氮气吹扫时间为 120 s。提取液经酸性硅胶柱、复合硅胶柱和碱性氧化铝柱净化。净化分离后得到的组分经旋转蒸发器浓缩至 3~5 mL, 然后氮吹浓缩至 20 μL , 并加入 1 ng $^{13}\text{C}_{12}$ 标记的进样内标($^{13}\text{C}_{12}$ -PCB-9, 52, 101, 138, 194), 用于回收率的计算。

PCBs 分析采用 AutoSpecUltima 型高分辨质谱联用仪, 气相色谱为 Agilent 6890N, 色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱(60.0 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)。电离方式为电子轰击(EI), 测定时采用选择离子方式(SIM)。定量分析测定 12 种类二噁英 PCB(PCB-77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189)

和 7 种指示性 PCB(PCB-28, 52, 101, 118, 153, 138, 180) 含量(这 7 种 PCBs 在检测中具有代表性且有指示作用, 全球检测体系污染物评估和规划中规定了 PCB-28, 52, 101, 118, 153, 138, 180 作为 PCBs 污染状况的指示性单体)(Björklund *et al.*, 2002)。空白样品中主要检出的多氯联苯的回收率为 30%~150%, 符合 EPA-1668 的要求。

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 样品中 dl-PCBs 的含量

土壤样品中各采样点 dl-PCBs 的含量如表 1 所示。由表 1 可以看出, 土壤样品中 dl-PCBs 的总含量为 4.77~462.04 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 121.72 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤样品 dl-PCBs 的同类物分布特征比较相似, 大部分样品中 PCB-118 为主要贡献者, PCB-118 的含量范围为 0.23~148.72 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 贡献率为 4.82%~51.78%, 平均贡献率为 25.98%; 其次是 PCB-105、PCB-77 和 PCB-156, PCB-105 的含量为 0.58~58 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 贡献率为 9.02%~18.54%, 平均贡献率为 14.65%。PCB-77 含量为 0.76~48.51 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 贡献率为 6.52%~38.85%, 平均贡献率为 18.15%。而 PCB-156 含量为 0.33%~57.7%, 贡献率为 2.80%~12.49%, 平均贡献率为 7.22%。对于许多的热相关源、环境介质和生物样品, PCB-118 都是 dl-PCBs 最主要的毒性同类物(Kim *et al.*, 2004)

表 1 土壤样品中各采样点 dl-PCBs 含量

Table 1 Concentrations of dl-PCBs in the soil samples

采样点	PCB-77	PCB-81	PCB-105	PCB-114	PCB-118	PCB-123	PCB-126	PCB-156	PCB-157	PCB-167	PCB-169	PCB-189	Σ PCBs
Q1	17.06	3.09	11.74	3.15	16.31	3.73	8.28	5.35	3.52	2.33	3.98	4.62	83.16
Q2	48.51	14.84	58.00	29.73	138.64	50.78	11.68	57.70	20.69	13.56	5.06	12.85	462.04
Q3	8.47	1.92	6.28	2.03	9.22	3.70	5.17	3.70	2.19	1.82	2.27	3.19	49.96
Q4	24.54	4.17	24.41	4.77	41.91	7.12	8.12	9.48	4.05	3.38	2.79	4.46	139.20
Q5	5.50	0.81	4.50	0.70	7.22	1.47	1.15	1.30	0.67	0.65	0.34	0.53	24.84
Q6	3.77	0.67	4.54	0.83	8.60	1.65	1.37	1.92	0.88	0.80	0.45	0.92	26.40
Q7	0.76	0.16	0.58	0.34	0.23	1.36	0.31	0.33	0.15	0.16	0.12	0.27	4.77
Q8	18.73	3.30	53.24	4.61	148.72	13.27	0.95	27.63	5.65	8.71	0.29	2.13	287.23
Q9	6.93	0.62	1.61	0.47	3.10	0.82	2.05	0.50	0.18	0.51	0.56	0.49	17.84

该市及周边土壤中 dl-PCBs-TEQ 值分布特征如图 2。从图中可以清晰看出, 土壤中 dl-PCBs 的 TEQ 值为 0.03~1.34 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以 TEQ 计, 下同), 平均值为 0.49 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。围绕钢铁厂附近的土壤样品中 dl-PCBs 的 TEQ 相对较高, 距离企业较远的 Q9 土壤样品中

TEQ 值为 0.22 $\text{pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 钢铁厂周边土壤样品中 TEQ 值是对比土壤 Q9 中 TEQ 值的 1~6 倍; 从图 2 中可以看出, Q1、Q2、Q3、Q4 四处采样点污染较为严重, 且都是围绕着该市一家钢铁生产企业。由此可见, 该钢铁企业生产所排放的 PCBs 等污染物对该市环境

土壤污染较为严重,其中仍以 Q2 采样点居高,其 TEQ 值为 $1.34 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总量的 30%; 而 Q1 采样点 TEQ 值为 $0.95 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总量的 21%; Q4 处的 TEQ 值为 $0.9 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 只占总量的 20%; Q3 点的 TEQ 值为 $0.59 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 占 TEQ 总量的 13%.

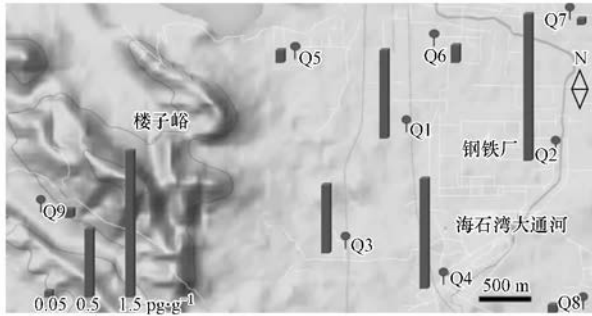


图2 土壤样品中 TEQ 值分布
Fig.2 TEQ of the soil samples

3.2 样品中指示性 PCBs 的含量分布

土壤样品中指示性 PCBs (PCB-180、PCB-153、PCB-138、PCB-101、PCB-52、PCB-28) 的总含量为 $0.01 \sim 287.81 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $89.95 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 样品中指示性 PCBs 同类物含量分布特征如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 在所有土壤样品中, 低氯代 PCB-101 都是指示性 PCBs 中最主要的贡献体. 钢铁厂周边土壤样品中, PCB-101 贡献率为 11.0% ~ 71.4%, 平均贡献率为 42.0%; 其次是 PCB-138、PCB-153 和 PCB-52, PCB-138 的贡献率为 9.4% ~ 32.1%, 平均贡献率为 18.0%; PCB-153 的贡献率为 5.6% ~ 24.5%, 平均贡献率为 13.0%; 而 PCB-52 的贡献率为 5.3% ~ 24.4%, 平均贡献率为 12.0%. 研究表明 (Tian *et al.*, 2012), 铁矿石烧结过程中烟气样品 PCB-138 和 PCB-153 的总贡献率为 6.55%, 远低于本研究土壤

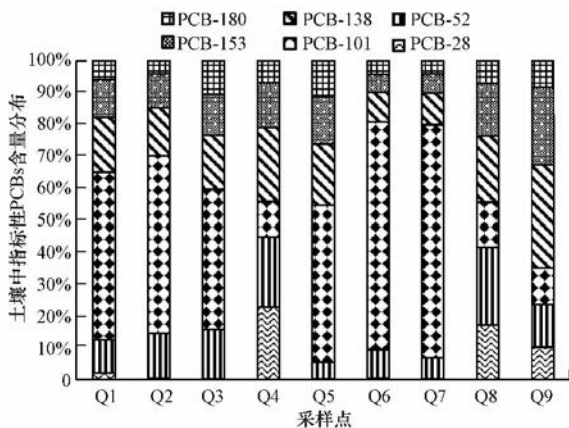


图3 土壤样品中指示性 PCBs 含量分布

Fig.3 Concentrations of indicator PCBs in the soil samples

样品的 31.3%; 而烟气样品中 PCB-28 的平均贡献率 (80.4%) 又远高于本研究土壤样品的 6.0%. 这可能是由于废气经过大气沉降进入土壤后, 经过一系列的富集、挥发等作用, 形成了指示性 PCBs 在烟气和土壤样品中不同的分布.

3.3 国内外土壤 PCBs 污染水平

该市及钢铁厂周边土壤样品中 dl-PCBs 和指示性 PCBs 总含量为 $0.015 \sim 288.09 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $90.07 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 图 4 对比了国内外土壤 PCBs 的研究结果 (李英明等 2010; Pirard *et al.*, 2005; Notarianni *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2013). 从图 4 中比较结果可得, 意大利某工业区周边土壤中 PCBs 含量在 $0.11 \sim 98 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $11.18 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 法国某垃圾焚烧厂周边土壤 PCBs 含量在 $5.2 \sim 41.2 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $14.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 都明显低于本研究土壤中 PCBs 含量, 而本研究中 PCBs 最高值为 $288.09 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别是这两个地区最高值的 3 倍和 7 倍. 中国东北部地区某钢铁厂周边土壤 PCBs 含量在 $0.26 \sim 3.50 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.95 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 中国华北地区某垃圾焚烧厂周边土壤中 PCBs 含量在 $0.02 \sim 0.26 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.12 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 通过对比可看出, 本研究土壤中 PCBs 含量也明显高于相关研究. 尽管如此, 通过与《国家土壤质量标准》(GB 15618—2008) 对比发现, 标准中列出的土壤中 PCBs 含量居民用地标准为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 商业用地标准为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 本研究结果与其相比仍远低于规定限值.

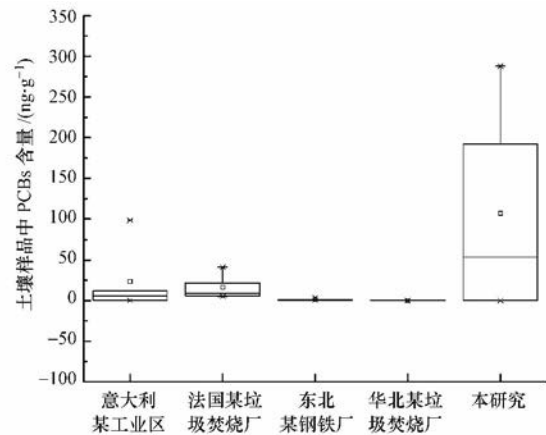


图4 土壤样品中 PCBs 含量与国内外研究对比

Fig.4 Comparison of PCBs in soil samples with studies worldwide

3.4 样品中 PCBs 同类物分布

本研究土壤样品中 PCBs 同类物分布特征如图

5 所示.由图 5 可以看出,大部分样品的同系物分布特征相似,其中,低氯代同类物(TrCBs~HxCBs)的含量要远高于高氯代同类物(HpCBs~DeCBs),从TrCBs到HxCBs,4种同类物的平均贡献率为89.39%~95.79%,平均贡献率为93.67%.其中,贡献率最高的同类物是PeCBs,贡献率为6.5%~71.59%,平均值为40.67%.同时,PeCBs前后都呈现逐级下降的趋势.从图5中还可以看出,Q1、Q2、Q3采样点的PCBs组成与其他样点存在很大差异,结合采样图可以看出,Q1、Q2、Q3是离钢铁厂最近的采样点位,更大程度上受到钢铁厂的影响,受到的污染更为直接且更为严重.

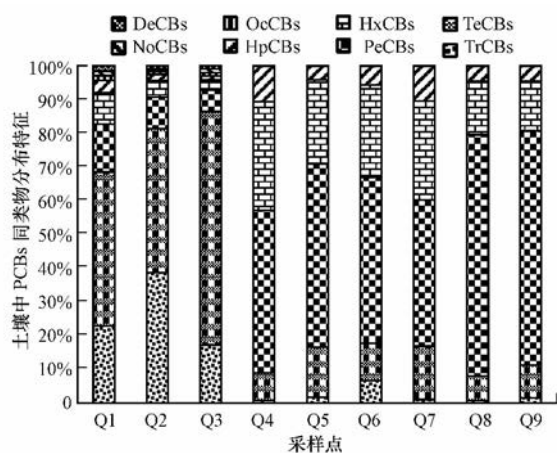


图5 土壤样品中PCBs同类物分布箱图

Fig.5 Box plot of PCBs-TEQ in Beijing soils samples

4 结论 (Conclusions)

1) 迁安市土壤样品中,以围绕钢铁厂周边土壤污染较为严重,同时TEQ值也高于其他地区.由此可以看出,钢铁厂周边环境土壤很大程度上受到了PCBs等有毒污染物的影响.

2) 迁安市钢铁厂周边土壤污染要高于其他地区,造成这一现象的原因可能是该市为主要钢铁生产基地,其PCBs排放量超过其他地区.

3) 迁安市大部分样土壤品的同系物分布特征相似,其中,低氯代同类物的含量要远高于高氯代同类物,含量最高的同类物是PeCBs.说明低氯代同类物更易在土壤环境中富集,对于土壤介质的危害更严重.

参考文献 (References):

Alcock R E, Jones K C. 1996. Dioxins in the environment: a review of trend data [J]. *Environmental Science & Technology*, 30 (11):

3133-3143

Ba T, Zheng M, Zhang B, et al. 2009. Estimation and characterization of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs from secondary copper and aluminum metallurgies in China [J]. *Chemosphere*, 75 (9): 1173-1178

Björklund E, Holst C V, Anklam E. 2002. Fast extraction, clean-up and detection methods for the rapid analysis and screening of seven indicator PCBs in food matrices [J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry* 21(1): 40-53

Di Domenico A, Ferri F, Fulgenzi A R, et al. 1993. Polychlorinated biphenyl, dibenzodioxin, and dibenzofuran occurrence in the general environment in Italy [J]. *Chemosphere* 27(1): 83-90

Guo L, Zhang B, Xiao K, et al. 2009. Levels and distributions of polychlorinated biphenyls in sewage sludge of urban wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 21 (4): 468-473

Hu J, Zheng M, Nie Z, et al. 2013. Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran and polychlorinated biphenyl emissions from different smelting stages in secondary copper metallurgy [J]. *Chemosphere*, 90 (1): 89-94

Kim K S, Hirai Y, Kato M, et al. 2004. Detailed PCB congener patterns in incinerator flue gas and commercial PCB formulations (Kanechlor) [J]. *Chemosphere*, 55(4): 539-553

Lee K T, Tanabe S, Koh C H. 2001. Contamination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea [J]. *Marine Pollution Bulletin* 42(4): 273-279

李英明, 王璞, 丁磊, 等. 2010. 钢铁厂及其周围土壤中二噁英和多氯联苯污染物的分布规律研究 [J]. *中国环境监测*, 26(2): 1-5

Li S, Zheng M, Liu W, et al. 2014. Estimation and characterization of unintentionally produced persistent organic pollutant emission from converter steelmaking processes [J]. *Environmental Science and Pollution Research* 21(12): 7361-7368

Liu W, Li H, Tian Z, et al. 2013. Spatial distribution of polychlorinated biphenyls in soil around a municipal solid waste incinerator [J]. *Journal of Environmental Sciences* 25(8): 1636-1642

Lv P, Zheng M H, Liu W B. 2011. Estimation of emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls from Chinese hot dip galvanizing industries [J]. *Environmental Engineering Science* 28: 671-676

Lv P, Zheng M, Liu G, et al. 2011. Estimation and characterization of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs from Chinese iron foundries [J]. *Chemosphere* 82(5): 759-763

孟庆昱, 储少岗. 2000. 多氯联苯的环境吸附行为研究进展 [J]. *科学通报* 45(15): 1572-1583

Nie Z, Liu G, Liu W, et al. 2012. Characterization and quantification of unintentional POP emissions from primary and secondary copper metallurgical processes in China [J]. *Atmospheric Environment*, 57: 109-115

Nie Z, Zheng M, Liu G, et al. 2012. A preliminary investigation of unintentional POP emissions from thermal wire reclamation at industrial scrap metal recycling parks in China [J]. *Journal of hazardous materials* 215: 259-265

- Nie Z ,Zheng M ,Liu W ,*et al.* 2011. Estimation and characterization of PCDD/Fs ,dl-PCBs ,PCNs ,HxCBz and PeCBz emissions from magnesium metallurgy facilities in China[J].*Chemosphere* 85(11) : 1707-1712
- Notarianni V ,Calliera M ,Tremolada P ,*et al.* 1998. PCB distribution in soil and vegetation from different areas in Northern Italy [J]. *Chemosphere* 37(14) : 2839-2845
- Odabasi M , Bayram A , Elbir T , *et al.* 2010. Investigation of soil concentrations of persistent organic pollutants ,trace elements ,and anions due to iron – steel plant emissions in an industrial region in Turkey [J].*Water ,Air & Soil Pollution* 213(1/4) : 375-388
- Pirard C ,Epe G ,Massart A C ,*et al.* 2005. Environmental and human impact of an old-timer incinerator in terms of dioxin and PCB level: a case study [J]. *Environmental science & technology* ,39 (13) : 4721-4728
- Tian B ,Huang J ,Wang B ,*et al.* 2012. Emission characterization of unintentionally produced persistent organic pollutants from iron ore sintering process in China [J].*Chemosphere* 89(4) : 409-415
- Yasuhiko O ,Takahiko M.1994.Levels ,features and a source of non-ortho polychlorinated biphenyl in soil [J].*Chemosphere* 28(1) : 47-56
- 王莎莎 ,高丽荣 ,田益玲 ,等.2014.渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 [J].*环境科学* , 35(6) : 2281-2286