

金华城区土壤中 7 种指示性多氯联苯(PCBs)的分布特征和来源分析

王祥云¹, 邓勋飞², 杨洪达³, 徐浩¹, 章虎¹, 李振¹, 齐沛沛¹, 王新全^{1*}

(1.浙江省农业科学院农产品质量标准研究所,农业部农药残留检测重点实验室,省部共建国家重点实验室培育基地“浙江省植物有害生物防控重点实验室”,杭州 310021; 2.浙江省农业科学院数字农业研究所,杭州 310021; 3.东北农业大学农学院,哈尔滨 150030)

摘要:采用气相色谱串联质谱测定了金华城区 20 份土壤样品中的 7 种指示性 PCBs(PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB153, PCB180),并分析了其分布特征和来源。结果显示金华城区 PCBs 残留总量在 0.111~2.688 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干重)之间,相比国内外其他城市污染程度较轻。和我国其他地区相类似,PCBs 的构成中主要以低氯代的三氯联苯和四氯联苯为主,即可能的污染源是我国历史上生产和使用较多的 1 号 PCB,但个别点也显示 2 号 PCB 或进口 PCBs 污染的存在。PCBs 污染程度为工业园区>农田>公园,说明城市中 PCBs 的污染源仍是工业园区,其他区域的污染可能来自于大气传播。农田土壤在作物采收后直接暴露在空气污染中,可能是导致其 PCBs 含量高于公园土壤的主要原因。

关键词:多氯联苯;金华;城区土壤

中图分类号:X833 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)08-1512-07

The Distribution and Source Analysis of the Seven Indicator Polychlorinated Biphenyls(PCBs) in Urban Soils of Jinhua City, China

WANG Xiang-yun¹, DENG Xun-fei², YANG Hong-da³, XU Hao¹, ZHANG Hu¹, LI Zhen¹, QI Pei-pei¹, WANG Xin-quan^{1*}

(1.Institute of Quality and Standard for Agro-products, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences; State Key Lab Breeding Base for Zhejiang Sustainable Plant Pest Control; MOA Key Lab for Pesticide Residue Detection, Hangzhou 310021, China; 2.Institute of Digital Agriculture, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3.Agricultural College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A total of 20 surface(0~20 cm) soil samples covering the whole urban areas of Jinhua were collected to analyze the seven indicators of PCB congeners (PCB28, PCB52, PCB101, PCB118, PCB138, PCB153, PCB180). The PCB residues concentration ranging from 0.111 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 2.688 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (dry weight), determined by a gas chromatography tandem mass spectrometry, was lower than that of the most of the cities around the world. Compared to the other cities in China, the PCB homologue composition and the distribution herein were similar. The results that tri- and tetra-PCBs were the main compositions of detected PCBs indicating the source of residues was #1 PCB which used to be popularly produced and used in the country. However, there were also some evidences of the pollution of #2 PCB or imported PCBs. The median concentrations of PCBs in samples from industry regions were obviously higher than that of farmlands and parks. Combined the result of principal component analysis that 12 samples from three different functional regions assemble together suggested that the source of PCBs was the industry regions, and air transport might be the main way to dissipation over the city. It was also observed that the concentrations of PCBs in soil samples from farmlands were higher than that from parks, and it might be result from the difference of plants which could also adsorb the pollutions such as PCBs on the land that the plants on the farmlands will be harvested sometime and left the soil exposed in air, while the vegetation in parks always protect the soil from the direct air pollution.

Keywords: polychlorinated biphenyls; Jinhua; urban soil

收稿日期:2012-01-05

基金项目:国家自然科学基金(20807038);浙江省农业科学院科技创新能力提升工程项目

作者简介:王祥云(1983—),男,浙江金华人,助理研究员,主要从事环境和农产品中的污染物研究。E-mail:wangxy@mail.zaas.ac.cn

* 通讯作者:王新全 E-mail:wangxq@mail.zaas.ac.cn

多氯联苯 (PCBs) 是《关于持久性有机污染物 (POPs) 的斯德哥尔摩公约》首批禁止生产和使用的 POPs 之一, 具有高毒性、持久性、易于生物积累并在环境中长距离转移等特点, 曾被广泛用作变压器油、传热剂、溶剂油^[1]以及油漆添加剂^[2]。PCBs 的大规模生产和使用在 20 世纪 70 年代就已经被禁止, 环境中的多氯联苯主要来自于受其污染的废弃物的泄漏和挥发^[3]以及非故意产生的多氯联苯^[4]。

浙江省的 PCBs 污染由于该省某地近 20 年来持续的电子垃圾拆解同样引起了较高关注^[3,5-10], 其中大气^[3,7]、底泥^[8-9]、农田土壤^[5-6,10]中 PCBs 的残留已有较多报道, 但尚未见该省城市土壤污染状况的相关研究。随着城市化进程的发展, 原本外围的水泥厂、造纸厂、废品收购站和油漆厂等 PCBs 污染源被囊括进入城区范围, 带来了潜在的残留风险, 已有研究表明, 城区土壤尤其是工业区土壤中 PCBs 的含量往往高于城郊以及郊区^[11], 加之城市的人口密度显著高于其他地区, 对城市土壤中 PCBs 残留和分布情况的研究及其评价具有十分重要的意义。我国上海^[12]、北京^[13]、大连^[14]、哈尔滨^[15]和香港^[16]等城市以及世界其他国家和地区的部分城市^[17]已进行了 PCBs 调查工作, 结果显示我国的 PCBs 残留以低氯代 PCBs 为主, 总体污染水平相对国外较低。

金华地处浙江省中部, 目前处于高速的城市化进

程中, 2010 年人口普查数据显示城区 (婺城区) 常住人口达 76.17 万, 研究和评价其城区土壤中多氯联苯残留量具有十分重要的意义。本研究采集了金华城区范围内不同功能区块的 20 份土壤样品, 分析其中 7 种指示性多氯联苯, 研究其分布特征和同系物构成, 并通过与文献资料的比较和分析推测其来源。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

在金华城区范围内采集 20 份表层 (0~20 cm) 土壤样品, 以网格法为基础, 兼顾不同的场地类型, 最终获得工业园区土壤 8 份、农田土壤 6 份、公园土壤 6 份。现场以 GPS 确定具体位点 (见图 1), 并记录实地环境状况。在 10 m×10 m 的范围内取 5 个点的土样, 取样前去除地表砾石和动植物残体, 合计约 2 kg 混合后作为该点样品, 置于棕色玻璃容器中。样品在实验室自然风干后过 70 目筛, 密封保存于棕色玻璃瓶中待测。称取 10 g 样品置于 105 °C 烘箱中烘烤过夜, 计算含水量, 文中所有数据均为干重结果。

1.2 样品的分析

1.2.1 试剂

目标分析物标样: PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180 (10 mg·L⁻¹, 德国 Dr)。回收率指示物: PCB15、PCB209 和内标物 PCB198 为固体

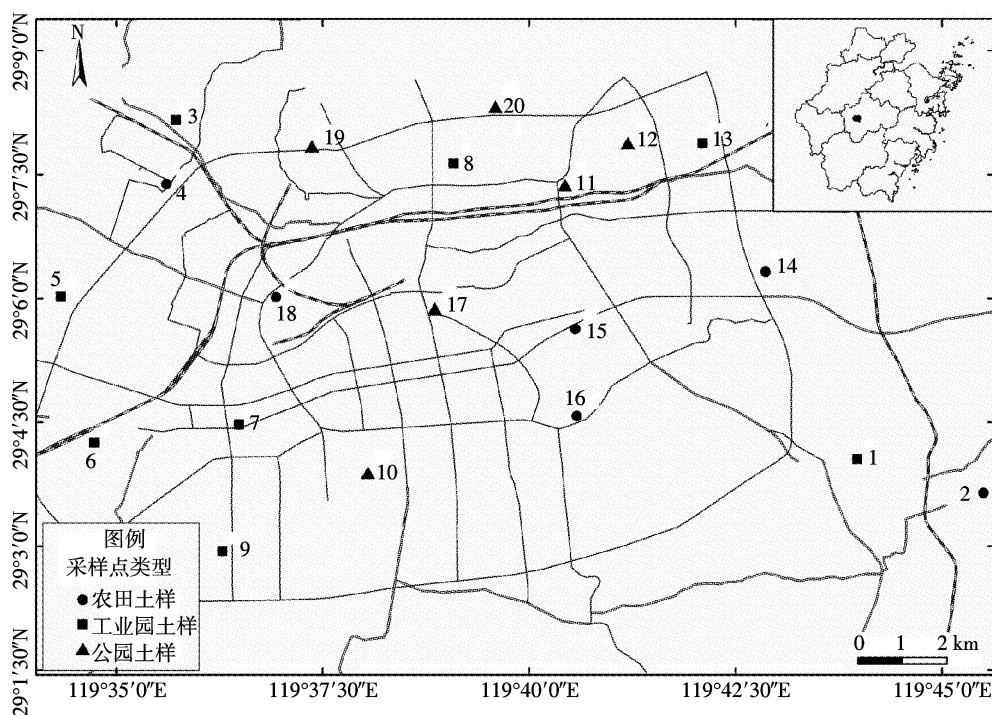


图 1 金华城区土壤采样分布图

Figure 1 Sampling map of urban soils in Jinhua

标样(纯度>98%,德国Dr)。

丙酮、二氯甲烷、正己烷、硫酸、无水硫酸钠、氯化钠等均为分析纯,其中无水硫酸钠在使用前经 300 ℃ 烘 4 h。弗罗里硅土(Flrolisi 60~100 目,农残级),使用前 650 ℃ 烘 4 h,干燥器中冷却后,每 100 g 弗罗里硅土加入 5 g 水,摇匀后隔夜使用。

1.2.2 前处理步骤

准确称取上述土壤样品 20 g,加入回收率指示物 PCB15、PCB209 和内标物 PCB198,混匀后以滤纸包裹、棉线扎紧,放入索氏提取器中。以 100 mL 正己烷-二氯甲烷(1:1,体积比)提取液在 60 ℃ 水浴下循环提取 24 h。提取液转移至平底烧瓶后浓缩至约 5 mL,并替换成异辛烷,最后在刻度试管中定容为 4 mL,浓硫酸磺化,依次以 5%氯化钠水溶液洗涤有机相,无水硫酸钠干燥。准确移取 2 mL 上清液至 10 mL 正己烷预淋洗的弗罗里硅土柱(从下至上依次装有 1 cm 无水硫酸钠,4 g 弗罗里硅土,1 cm 无水硫酸钠),并开始收集,再以 40 mL 正己烷-乙酸乙酯(99:1,体积比)洗脱,40 ℃ 水浴减压浓缩近干,最后定容至 0.600 mL,待分析进样。

1.2.3 仪器条件

热电 Trace Ultral GC 气相色谱带 Thermo TSQ Quantum GC 串联质谱检测器,配 Varian VF-1 MS(30 mm×0.25 mm×0.25 μm)低流失质谱柱,进样口温度为 280 ℃,质谱连接线温度为 280 ℃,离子源温度为 250 ℃,灯丝电流为 100 mA。柱温箱升温程序如下:起始温度为 80 ℃,保持 1 min,以 30 ℃·min⁻¹ 升至 200 ℃,保持 1 min,再以 10 ℃·min⁻¹ 升至 280 ℃,保持 6 min。载气为高纯氮气,流速为 1.0 mL·min⁻¹。碰撞气为高纯氩气,压力为 1.0 mTorr。进样量为 2 μL,内标法定量。质谱测试参数见表 1。

1.2.4 质量控制与质量保证

每批分析样带 1 个空白样,确认试剂和容器无干扰峰出现;每份样品中添加质量浓度为 1 μg·kg⁻¹ 的回收率指示物 PCB 15 和 PCB 209 以及 1 μg·kg⁻¹ 的内标物 PCB198,指示物回收率为 78.4%~119%,因此所得数据无需进行校正。通过重复基质加标,得到方法检测限为 0.005~0.05 μg·kg⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 金华城区土壤中多氯联苯的残留水平

由表 2 可见,20 份金华城区土壤中,均不同程度地检出 PCBs 残留。7 种指示性多氯联苯残留量总值

表 1 质谱测试参数

Table 1 The parameters of mass spectrometry for PCBs detection

农药名称	母离子	子离子	碰撞能量(eV)
PCB28	255.96	185.97*	20
	257.96	185.97	20
PCB52	289.92	219.94*	20
	291.92	219.94	20
PCB101	323.88	253.91*	20
	325.88	255.91	20
PCB118	323.88	253.91*	20
	325.88	255.91	20
PCB138	357.84	287.88	25
	359.84	289.87*	25
PCB153	357.84	287.88	25
	359.84	289.87*	25
PCB180	391.81	321.84	25
	393.81	323.84*	25
PCB198	427.77	357.8*	25
	429.76	357.8	25

注:PCB198 为内标,* 为定量离子。

(Σ PCBs)在 0.111~2.688 μg·kg⁻¹ 之间,分别为 20 号的公园区土壤样品和 18 号的农田土壤样品,其平均值为 0.858 μg·kg⁻¹。PCB 单体仅有 18 号农田土壤样品中的 PCB28 和 6 号工业园区土壤中的 PCB52 高于 1 μg·kg⁻¹,分别为 1.948、1.094 μg·kg⁻¹。同系物残留量均值依次是:PCB28>PCB52>PCB138>PCB101>PCB153>PCB118>PCB180;检出率依次是:PCB28, PCB52>PCB138>PCB118, PCB153, PCB18>PCB101。

国内外城市土壤 Σ PCBs 研究报道中检测指标相互之间存在一定的差异,如北京土壤^[13]中的 Σ PCBs 是 18 个 PCB 同系物的总值,大连土壤^[14]中的 Σ PCBs 为 57 个 PCB 同系物的总值,而欧洲 5 城^[17]的是 19 个 PCB 同系物的总值。为便于国内外城市土壤中 Σ PCBs 横向比较,以明确金华城区土壤中 PCBs 污染状况,将文献报道的数据以通常用来比较的 7 个指示性 PCBs 进行重新整合,具体见表 3。比较结果表明,金华城区 Σ PCBs 值,略高于大连^[14]和哈尔滨^[15],明显低于北京^[13]、上海^[12]、香港^[16]以及欧洲 5 城^[17]等城区土壤中 PCBs 的含量,更远低于台州污染地区^[9],即金华城区 PCBs 污染程度相对国内外其他大城市仍较低。

2.2 金华城区土壤中多氯联苯的构成和分布

图 2 是国内 5 个城市和地区表土中多氯联苯的构成情况比较图,显示各地多氯联苯的构成既存在较大差异,也存在一定的相似性。虽然 PCB 同系物在各地的比例均不同,但占比最高的均为低氯代联苯

表 2 金华城区土壤中多氯联苯残留($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Tale 2 The levels of PCBs in urban soils of Jinhua($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

序号	采样区域	三氯	四氯	五氯	六氯		七氯		ΣPCBs
		PCB28	PCB52	PCB101	PCB118	PCB138	PCB153	PCB180	
1	工业园区	0.069	0.033	ND	0.017	0.015	ND	0.005	0.139
3		0.187	0.117	0.124	0.075	0.150	0.147	0.055	0.855
5		0.313	0.198	0.261	0.195	0.262	0.180	0.139	1.548
6		0.217	1.094	0.104	0.055	0.124	0.074	0.043	1.711
7		0.210	0.097	0.140	0.077	0.182	0.079	0.082	0.867
8		0.107	0.043	ND	0.056	0.096	0.096	0.006	0.404
9		0.102	0.023	0.030	0.014	0.050	ND	0.016	0.235
13		0.047	0.012	0.031	0.013	0.009	0.007	ND	0.119
2	农田	0.106	0.052	0.013	ND	0.025	0.039	ND	0.235
4		0.341	0.092	0.022	0.084	0.068	0.029	0.024	0.66
14		0.057	0.019	ND	0.028	0.053	0.066	0.011	0.234
15		0.085	0.061	0.386	0.081	0.542	0.231	0.053	1.439
16		0.095	0.030	0.052	0.030	0.070	0.028	0.030	0.335
18	公园	1.948	0.499	ND	0.063	0.150	0.028	ND	2.688
10		0.088	0.041	ND	0.036	0.038	0.017	0.014	0.234
11		0.076	0.036	0.181	ND	0.227	0.174	0.078	0.772
12		0.076	0.044	0.016	0.034	0.088	0.030	0.050	0.338
17		0.087	0.030	ND	0.056	0.087	0.043	0.011	0.314
19		0.056	0.031	0.037	0.033	0.104	0.039	0.016	0.316
20		0.084	0.027	ND	ND	ND	ND	ND	0.111
平均含量		0.218	0.129	0.070	0.047	0.117	0.065	0.032	0.858

注:ND 表示残留量低于检测限。下同。

表 3 国内外城市土壤中 7 种指示性多氯联苯残留水平($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 3 The levels of 7 indicator PCBs in urban soils of cities around the world($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

地名	Σ PCBs	Σ PCBs 均值	三氯	四氯	五氯	六氯		七氯	
			PCB28	PCB52	PCB101	PCB118	PCB138	PCB153	PCB180
金华城区(本研究)	0.111~2.688	0.858	0.218	0.129	0.070	0.047	0.117	0.065	0.032
上海新江湾城 ^[12]	1.83~8.46	3.99	0.41	1.76	0.65	0.33	0.75	0.64	0.32
台州污染地区 ^[9]	—	226.8	23.0 ^a	58.0	33.0	59.0 ^b	26.0	20.0	7.8
北京城区 ^[13]	ND~9.33	3.55	0.98	0.60	0.32	0.44 ^c	0.37	0.33	0.51
香港城市公园 ^[16]	1.62~9.87	4.81	2.16	1.05	0.32	0.06	0.81	0.18	0.22
大连城区 ^[14]	0.136~1.649	0.576	— ^a	—	—	—	—	— ^d	—
哈尔滨城区 ^[15]	0.19~1.19	0.53	—	—	—	—	—	—	—
Aveiro(葡萄牙) ^[17]	0.15~41 ^e	2.6 ^f	—	—	—	—	—	—	—
Uppsala(瑞典) ^[17]	0.54~47 ^e	2.3 ^f	—	—	—	—	—	—	—
Glasgow(苏格兰) ^[17]	1.9~43 ^e	9.4 ^f	—	—	—	—	—	—	—
Torino(意大利) ^[17]	0.72~86 ^e	6.6 ^f	—	—	—	—	—	—	—
Ljubljana(斯洛文尼亚) ^[17]	0.67~29 ^e	2.1 ^f	—	—	—	—	—	—	—

注:a:与 PCB31 合计;b:与 PCB108 合计;c:与 PCB123 合计;d:与 PCB132 合计;e:PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 和 PCB180 合计;f:中位值;—:原文未给出具体数据。

(PCB28 或 PCB52),仅台州^[9]污染地区 PCB118 (26.0%)略高于 PCB 52(25.6%),证明该 5 个城市和地区表土中多氯联苯的污染源存在一定程度上的相似性。其中与金华城区多氯联苯构成最为相似的为北

京^[13],两者仅有 PCB180 和 PCB118 的比例差异较大,且北京 PCB118 中包含了 PCB123。因此,金华城区 PCBs 污染物来源可能与北京较为类似。

为避免个别异常值对数据分析的影响,图 3 采用中位值对各功能区中 PCB 含量及比例进行比较。结果显示各功能区 PCBs 表现出明显的工业园区>农田>公园的浓度顺序,这与大连^[14]等地的情况是一致的。PCB138 和 PCB153 略有不同,其中 PCB138 呈现出工业园区>公园>农田的浓度顺序,PCB153 的浓度顺序则为工业园区>公园≈农田,其成因较难解释。本文认为,一方面样品点的相对偏少可能会导致数据统计的偏差,另一方面可能公园本身存在少量的 2 号 PCB 污染,最终的解释仍需进一步的研究支持。

2.3 金华城区土壤中多氯联苯的来源分析

土壤中 PCBs 的污染主要来源于污染物的排放、泄露和大气的干湿沉降等^[18],污染物包括我国历史上生产和进口的 PCBs 原料及其制品,以及目前在燃烧过程中形成的副产品。我国从 1965 年开始生产 PCBs

原料,至 1974 年禁止,共生产以三氯联苯为主的 1 号 PCB 约 9000 t 和以五氯联苯为主的 2 号 PCB 约 1000 t,分别用在电力电容器的浸制剂和油漆添加剂^[2]。进口的 PCBs 原料和制成品则主要是 20 世纪 70—80 年代进口的变压器和电力电容器,以及含有 PCBs 的液压油和导热油^[19],其中高氯代 PCBs 的比例一般被认为较国内产品更高^[20]。含有 PCBs 的电力电容器和变压器目前均已报废,液压油和导热油也是如此,而油漆添加剂(包括印染油墨^[21])更是被认为已完全进入环境中^[22-23]。

在环境污染物来源分析中,主成分分析法是个极为有效的统计学手段,在前人的研究中进行了较多的应用^[13,16-17]。本研究采用 SPSS 19.0 对数据进行了主成分分析,获得两个特征值>1 的主要成分 C1 和 C2,分别涵盖了 55.4%和 21.2%的总方差。C1 代表 PCB101、PCB118、PCB 138、PCB 153 和 PCB 180 等高氯代残留,而 C2 给出的则是 PCB28 和 PCB52 的情况。以 C1 和 C2 分别对所有数据进行重新评价,并以 C1 的得

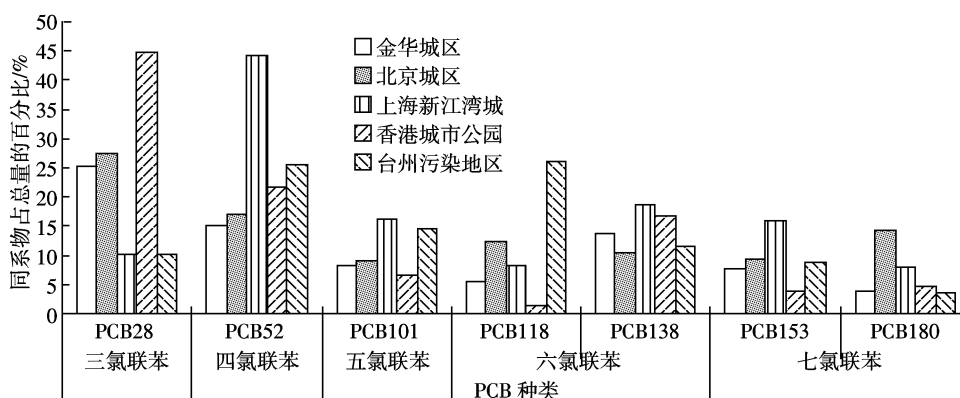


图 2 国内 5 个城市和地区表土中多氯联苯构成^[9,12-13,16]

Figure 2 PCB homologue composition in the average in surface soils in five cities and regions

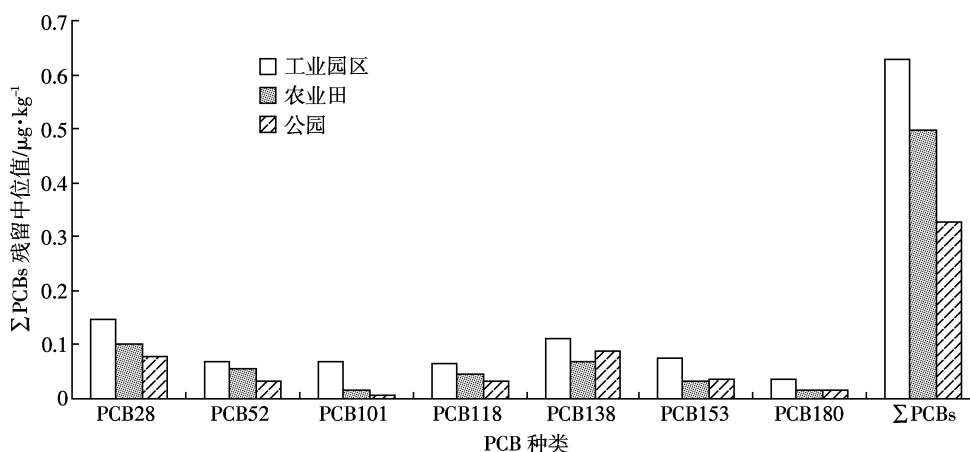


图 3 金华城市土壤中各功能区中 PCBs 分布图

Figure 3 Composition of PCB homologue groups in the soil samples from urban industrial sites, urban parks and urban garden

分作为 X 轴, C2 的得分作为 Y 轴, 获得的散点图可表征各点数据的相似度^[13], 本研究结果见图 4。

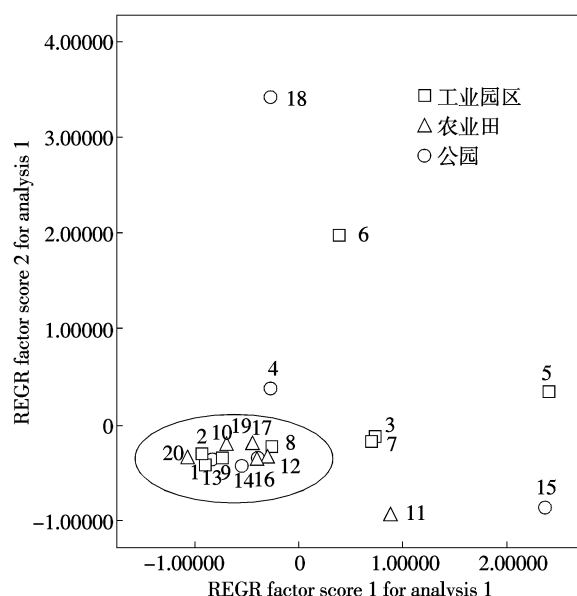


图4 金华城区土壤样品中 Σ PCBs主成分分析结果

Figure 4 Principal component plot of PCBs for urban soils of Jinhua

图4显示, 20个样品点中, 除3号、4号、5号、6号、7号、11号、15号、18号等8个点外, 其余12个点的得分情况聚拢成一团。这意味着该12个点的污染情况极为类似, 并进一步推测其可能来自相同的污染源, 而差异较大的点并不意味着其来源一定不同, 已有的研究结果^[8]表明, 低氯代的PCB具有更高的挥发性, 即使相同污染源不同时间后在土壤中残留同系物比例也会出现较大的差异。结合前面金华城区土壤中PCBs的分布特征, 低氯代(PCB28, PCB52)PCBs的100%检出率和较高检出量, 本文有充分有理由判断金华城区土壤中PCBs污染主要源自1号PCB, 其中以18号农田土壤中的三氯联苯含量最为典型。该农田曾被用作废品收购站的堆放场地, 期间可能有电力电容器破损或现场拆解, 而15号土壤样品中比其他样品更高的五氯(PCB101, PCB118)和六氯(PCB138, PCB153)联苯残留则显示同样存在部分进口PCBs或2号PCB的污染。工业园区>农田>公园的 Σ PCBs污染程度顺序说明, 工业园区是当地最显著的污染源, 而所有样品中PCBs残留量最低的20号公园为近年新建, 其土壤来自附近土山被挖开后的深层土, 其中的PCBs残留可能来自大气干湿沉降^[14]。农田土壤中的PCBs污染同样主要受沉降的影响, 但与公园土壤上方常年有能吸附PCBs等污染物的植被遮蔽不同,

农田土壤在作物收获后往往直接暴露在空气中, 且其上生长的作物也存在一定比例的回田, 导致农田土壤中的PCBs污染明显高于公园土壤。

3 结论

(1) 金华城区土壤中均有PCBs检出, Σ PCBs在 $0.111 \sim 2.688 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 其平均值为 $0.858 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比国内外其他城市污染程度较轻。

(2) 金华城区PCBs在城市不同功能区块的分布明显呈现出工业园区>农田>公园的顺序。

(3) 金华城区PCBs各点同系物组成存在较大差异, 但PCB28或PCB52是除个别样品外所有土壤中占比最大的PCB种类。

(4) 金华城区PCBs的污染主要来自于我国1号PCB的污染, 个别点存在进口PCB或2号PCB的污染; 工业园区是城市中最显著的污染源, 而扩散的途径可能是大气的干湿沉降。

参考文献:

- [1] 安 琼, 董元华, 王 辉, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 528-532.
AN Qiong, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Residues of PCBs in agricultural fields in the Yangtze Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3): 528-532.
- [2] Xing Ying, Lu Yong-long, Richard W D, et al. A spatial temporal assessment of pollution from PCBs in China[J]. *Chemosphere*, 2005, 60: 731-739.
- [3] 李英明, 江桂斌, 王 亚, 等. 电子垃圾拆解地大气中二噁英、多氯联苯、多溴联苯醚的污染水平及相分配规律[J]. 科学通报, 2008, 53(2): 165-171.
LI Ying-ming, JIANG Gui-bin, WANG Ya, et al. The levels and phase distribution rule of dioxin, polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of e-waste area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(2): 165-171.
- [4] 杨淑伟, 黄 俊, 余 刚. 中国主要排放源的非故意产生六氯苯和多氯联苯大气排放清单探讨[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(7): 82-85.
YANG Shu-wei, HUANG Jun, YU Gang. The list of air emission of unintentional produced hexachlorobenzene and polychlorinated biphenyls from main source in China[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010, 32(7): 82-85.
- [5] 张雪莲, 骆永明, 滕 应, 等. 长江三角洲某电子垃圾拆解区土壤中多氯联苯的残留特征[J]. 土壤, 2009, 41(4): 588-593.
ZHANG Xue-lian, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Residue characters of PCBs in soils of typical polluted areas in Yangtze River delta region[J]. *Soils*, 2009, 41(4): 588-593.
- [6] 张建英, 李丹峰, 王慧芬, 等. 近电器拆解区土壤-蔬菜多氯联苯污染及健康风险[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 434-441.
ZHANG Jian-ying, LI Dan-feng, WANG Hui-fen, et al. The health risk

- assessment and bioaccumulation of PCBs in soil-vegetables nearby e-waste area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3):434-441.
- [7] 邓绍坡, 骆永明, 宋 静, 等. 电子废弃物拆解地 PM10 中多氯联苯、镉和铜含量调查及人体健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2010, 23(6):733-740.
- DENG Shao-po, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Concentrations of polychlorinated biphenyls, cadmium and copper in inhalable particulate (PM10) from an e-waste recycling area and human health risk assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6):733-740.
- [8] 储少岗, 杨 春, 徐晓白, 等. 典型污染地区底泥和土壤中残留多氯联苯(PCBs)的情况调查[J]. 中国环境科学, 1995, 15(3):199-203.
- CHU Shao-gang, YANG Chun, XU Xiao-bai, et al. Polychlorinated biphenyl congener residues in sediment and soil from pollution area[J]. *China Environmental Science*, 1995, 15(3):199-203.
- [9] 储少岗, 徐晓白, 童逸平. 多氯联苯在典型污染地区环境中的分布及其环境行为[J]. 环境科学学报, 1995, 15(4):423-432.
- CHU Shao-gang, XU Xiao-bai, TONG Yi-ping, et al. Transport and distribution of polychlorinated biphenyls in a polluted area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(4):423-432.
- [10] 黄春雷, 宋 明, 徐 琼, 浙东固废拆解区污水灌溉对土壤多氯联苯含量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2312-2318.
- HUANG Chun-lei, SONG Ming, XU Qiong, et al. Impact of wastewater irrigation on contents of polychlorinated biphenyls in soils of solid waste's dumping and unpacking site of Eastern Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2312-2318.
- [11] Jamshidi A, Hunter S, Hazrati S, et al. Concentrations and chiral signatures of polychlorinated biphenyls in outdoor and indoor air and soil in a major UK conurbation[J]. *Environment Science Technology*, 2007, 41:2153-2158.
- [12] 武振艳, 杨永亮, 安丽华, 等. 新江湾城开发区表层土壤中有机氯农药和多氯联苯的分布特征[J]. 岩矿测试, 2010, 29(3):231-235.
- WU Zhen-yan, YANG Yong-liang, AN Li-hua, et al. Distribution characteristics of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in top soils from development zone in New Jiangwan City[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(3):231-235.
- [13] Wu Shan, Xia Xing-hui, Yang Ling-yan, et al. Distribution, source and risk assessment of polychlorinated biphenyls(PCBs) in urban soils of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2011, 82:732-738.
- [14] Wang De-gao, Yang Meng, Jia Hong-liang, et al. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China[J]. *Chemosphere*, 2008, 73:38-42.
- [15] Ma Wan-li, Li Yi-fan, Sun De-zhi, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in topsoils of Harbin, China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 57:670-678.
- [16] Zhang H B, Luo Y M, Wong M H, et al. Concentrations and possible sources of polychlorinated biphenyls in the soils of Hong Kong[J]. *Geoderma*, 2007, 138:244-251.
- [17] Cachada A, Lopes L V, Hursthouse A S, et al. The variability of polychlorinated biphenyls levels in urban soils from five European cities[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:511-518.
- [18] 冯精兰, 刘相甫, 李怡帆, 等. 多氯联苯在我国环境介质中的分布[J]. 人民黄河, 2011, 33(2):86-89.
- FENG Jing-lan, LIU Xiang-fu, LI Yi-fan, et al. The distribution of polychlorinated biphenyls in environmental media of China[J]. *Yellow River*, 2011, 33(2):86-89.
- [19] 张 志, 田崇国, 贾宏亮, 等. 中国多氯联苯(PCBs)网格化的使用清单研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2010, 27(1):111-116.
- ZHANG Zhi, TIAN Chong-guo, JIA Hong-liang, et al. Gridded Chinese polychlorinated biphenyls(PCBs) usage inventories[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2010, 27(1):111-116.
- [20] 张 志, 齐 虹, 刘丽艳, 等. 中国生产的多氯联苯(PCBs)组分特征[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2009, 26(6):809-815.
- ZHANG Zhi, QI Hong, LIU Li-yan, et al. Congener and homologue profiles of polychlorinated biphenyls(PCBs) produced in China[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2009, 26(6):809-815.
- [21] 祝心如, 王怡中, 王大力, 等. 白洋淀地区的多氯联苯污染研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(1):86-91.
- ZHU Xin-ru, WANG Yi-zhong, WANG Da-li, et al. PCBs pollution in Baiyangdian area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(1):86-91.
- [22] 降巧龙, 周海燕, 徐殿斗, 等. 国产变压器油中多氯联苯及其异构体分布特征[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5):608-612.
- JIANG Qiao-long, ZHOU Hai-yan, XU Dian-dou, et al. Characteristics of PCB congeners and homologues in Chinese transformer oil[J]. *China environmental Science*, 2007, 27(5):608-612.
- [23] 郑明辉, 刘鹏岩, 包志成, 等. 二噁英的生成及降解研究进展[J]. 科学通报, 1999(5):455-464.
- ZHEN Ming-hui, LIU Peng-yan, BAO Zhi-cheng, et al. The research progress of the formation and degradation of dioxin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999(5):455-464.