

上海农村及郊区土壤中 PCBs 污染特征及来源研究

蒋煜峰^{1,2}, 王学彤², 吴明红², 盛国英^{2,3}, 傅家谟^{2,3}

(1.兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2.上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 3.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)

摘要:2007年3月采集上海市农村及郊区36个表层土壤样品,采用气相色谱法对土壤中的多氯联苯(PCBs)残留进行了分析,揭示了土壤中 PCBs 的残留水平、分布、组成特征及来源。结果表明,试区土壤中共检出62种PCB,总浓度最高 $2\,530\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低 $71.7\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量 $534\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。较高污染浓度主要是编号为BS2、SJ6、JS4和FX4的土壤样品,但从整体采样区域来看,其污染可能主要来源于城区污染导致的区域大气沉降或是全球大气传输所致。上海农村及郊区土壤PCBs污染物以Tri-CBs和Tetra-CBs为主,主要以工业Aroclor1242来源为主。相关性分析显示,土壤中PCBs与TOC具有显著相关性,尤其是对于挥发性较强的低氯代PCBs,表明TOC是影响上海市土壤中PCBs持留的重要因素之一。聚类分析显示,部分采样点PCBs污染与工业品使用有关,但可能还存在其他来源。

关键词:土壤;PCBs;污染特征;来源

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0899-05

Characteristics and Source of Polychlorinated Biphenyls in Agricultural Soil of Shanghai, China

JIANG Yu-feng^{1,2}, WANG Xue-tong², WU Ming-hong², SHENG Guo-ying^{2,3}, FU Jia-mo^{2,3}

(1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A new random sampling strategy was adopted to examine the PCBs in the agricultural lands nearby Shanghai and a total of 36 surface soil samples were collected from rice, bean, cotton and vegetable soils in the October of 2007. The concentrations of 144 polychlorinated biphenyls (PCBs) in the soil samples were determined by using gas chromatography equipped with ^{63}Ni micro-electron capture detector (GC- μECD). On basis of the analytical data of 62 PCB congeners, it was certified that the total concentrations of identified PCBs ranged from 71.7 to $2\,530\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ with means of $534\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$. According to the compositional profiles of soil PCBs homologues, the higher proportions of low chlorinated (Tri-CBs and Tetra-CBs) were observed. The results indicated that PCB15+13, PCB22, PCB66, PCB44 and PCB153 were the most dominant congeners among the identified PCBs with regard to the concentrations and detection frequencies. The high levels of PCBs were detected in soil samples taken from the agricultural field BS2, SJ6, JS4 and FX4, respectively. PCBs homologues analysis revealed that PCBs in the study areas might be originated from Aroclor1242. The correlation analysis showed that there was a relatively good correlation among the individual PCBs and soil TOC, suggesting the important influence of soil TOC on PCBs contamination.

Keywords: soil; PCBs; PCBs homologues; source

多氯联苯(Polychlorinated Biphenyls, PCBs)是人工合成的具有重大生态影响和长期环境危害的有机氯化合物,也是《POPs 公约》中在世界各地禁止或限制使用的12种持久性有机污染物之一^[1-2]。大多PCBs是对人类和动物有较高毒性的物质,近年来的实验室

研究和流行病学调查都表明它会抑制生物体免疫系统的功能,导致生物体内分泌紊乱,产生类雌激素效应和抗雌激素效应^[3]。目前有关PCBs在沉积物、水体、底泥和生物质的研究较多^[4-6]。近年来,土壤PCBs污染也引起了广泛的关注,已有有关城市、工业区、农田及公园土壤PCBs污染的相关报道^[7-8]。

上海市由于近年来快速的工农业、建筑、人口与交通的发展,正面临严重的环境污染问题。有报道指出,上海市大气、沉积物、城市污泥及海洋生物都普遍受到了PCBs的污染^[9-11]。国内已相继开展了对土壤中

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40830744);国家科技支撑计划项目(2008BAC32B03)

作者简介:蒋煜峰(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为土壤环境化学。E-mail:jiangyf7712@126.com

PCBs 污染的研究,但是,国内研究都集中在具有直接污染排放源的区域污染研究,针对其他区域的相关研究比较匮乏。本研究选取上海郊区及农村耕作区土壤,研究了 PCBs 在表层土壤中的污染种类、残留含量及污染特征,通过探讨其组成特征判断其在土壤中的来源。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

在上海市农村及郊区随机布点采集了 36 个表层土壤(0~15 cm)样品(图 1 所示,详细描述见文献[12])。采样前去除地表砾石及动植物残体,每一采样点采集 1 000 km² 内 5 点土样均匀混合,作为该样点的代表性样品。样品于室温(20 ℃)风干,研磨过 100 目筛,低温保存至分析。

1.2 试剂及药品

PCBs 标样购自 Supelco(Bellefonte, PA, USA),包括 4 组工业品组成混合标准物质,共有 144 种 PCBs 同系物(详见文献[13])。内标为四氯间二甲苯;实验所用溶剂为色谱纯试剂。硅胶购自青岛海洋化学试剂公司(130 ℃活化 16 h)。硅胶经酸化处理(44 g H₂SO₄·100g⁻¹ 硅胶),中性氧化铝加入 6 mL 超纯水·100g⁻¹ 去活化。无水硫酸钠(国药试剂,分析纯)450 ℃灼烧 6 h,冷却后存放干燥器中备用。

1.3 样品分析

精确称取 10 g 土壤样品,与 10 g 无水硫酸钠混合均匀后,放入索氏脂肪抽提器的抽滤筒中,加入回收率指示物,在 500 mL 平底烧瓶中依次加入 200 mL

二氯甲烷与正己烷混合液(V/V=1:1),2 g 活化铜片,连续提取 24 h。提取液旋转蒸发至 1~2 mL,以正己烷转换溶剂。将浓缩后的抽提液加入去活化硅胶柱分离净化。净化柱为 25 cm×1 cm 内径的玻璃柱,依次装入棉花,氧化铝,硅胶,无水硫酸钠。样品上柱后,依次用正己烷和二氯甲烷/正己烷(V/V=3:2)淋洗。将含 PCBs 部分浓缩后,进行定量分析。

检测仪器为 Agilent(6890)气相色谱配 ⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD),色谱柱为 DB-XLB(30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为 He,进样口温度 275 ℃,采用不分流进样,进样量 1 μL,采用程序升温:初始温度 70 ℃,保持 2 min,然后以 10 ℃·min⁻¹ 速率升至 150 ℃,再以 2.5 ℃·min⁻¹ 速率升至 275 ℃,保持 10 min,至样品完全流出色谱柱。在实验前进行基质加标回收率测试,基质加标回收率在 76%~117%之间,回收率指示物回收率在 65%~113%之间。样品重复样 RSD<20%,基质加标 RSD<15%。方法检测限在 1~79 pg·kg⁻¹。实验过程中还包括了方法空白,加标空白,溶剂空白或仪器空白,空白样品中无待测目标化合物检出。

2 结果与讨论

2.1 污染物组成与分布

在检测的 144 种 PCBs 中,上海市农村及郊区的土壤样品中最多有 62 种 PCBs 被检测到。对检出的 62 种 PCBs 和 Σ₆₂PCBs 进行统计分析(表 1)。结果表明,上海市农村及郊区土壤中 PCBs 的污染总浓度最高达 2 530 ng·kg⁻¹,最低值为 71.7 ng·kg⁻¹,平均含量 534 ng·kg⁻¹。就不同采样点总污染浓度来看(图 2),较高浓度 Σ₆₂PCBs 主要是编号为 BS2(2 530 ng·kg⁻¹)、SJ6(1 780 ng·kg⁻¹)、JS4(1 540 ng·kg⁻¹)和 FX4(790 ng·kg⁻¹)的采样点。高污染点无明显分布特征,这可能与存在点源污染有关。从整体采样区域来看,农村及郊区土壤样品中 PCBs 污染整体污染低残留浓度较低,采样点 PCBs 污染程度较低主要可能是这些采样点分布的区域较为偏僻,没有较多的污染源有关。这表明农村及郊区土壤中 PCBs 污染程度较轻,且污染浓度水平基本一致,其污染可能主要来源于城区污染导致的区域大气沉降或是全球大气传输所致。

从表 1 可以看出,上海市农村及郊区土壤中不同 PCBs 同系物检出率都不高,检出率相对较高的有 PCB15+13、PCB22、PCB66、PCB44 和 PCB153。从污染浓度来看,含量相对较高的 PCBs 同系物还有 PCB18、PCB15+13 和 PCB12,其污染浓度分别为

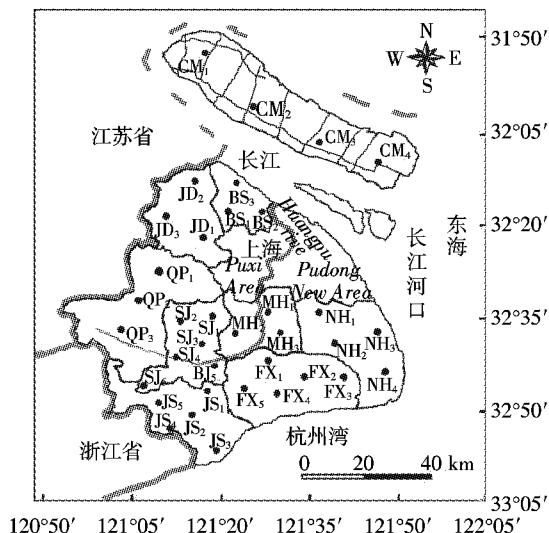


图 1 上海市农村及郊区采样点示意图

Figure 1 Map of sampling sites in Shanghai agricultural areas

124、81.8 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 53.5 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 污染浓度范围分别为 $\text{nd}\sim 1\,410\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{nd}\sim 550\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\text{nd}\sim 681\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其次, 检出率和污染浓度相对较高的 PCBs 还有 PCB22、PCB44 和 PCB66, 其污染浓度范围分别在 $\text{nd}\sim$

127 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{nd}\sim 682\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\text{nd}\sim 384\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。

2.2 污染物组成特征及来源分析

在本研究区域内土壤中, 不同氯代占总量的百分比结果如图 3 所示。结果显示, 在上海市农村及郊区土壤样品中, 低氯代($<4\text{Cl}$)PCBs 要比高氯代($>4\text{Cl}$)所占比例较高, 而且 Octa-CBs、Nona-CBs 和 Deca-CBs 检出率极低(3 种总和 $<5\%$)。其组成主要以 Tri-CBs 和 Tetra-CBs 为主, 平均残留分别占总量的 58% 和 16%, 残留范围分别在 10%~98% 和 0~58%。Di-CBs、Penta-CBs 和 Hexa-CBs 也占到一定比例, 平均残留分别为总量的 8%、6% 和 6%。Di-CBs 到 Hexa-CBs 占总量的 94%。

但各采样点中不同氯代 PCBs 相对组成不尽一致, JD3、NH2、JS1 和 FX5 采样点主要以四氯代和五氯代 PCBs 为主, 而在其他剩余的样品中检出的主要同族体为三氯代 PCBs。各采样点中, 不同氯代 PCBs 浓度总体上看, 在一至七氯代 PCBs 中, 以三氯代 PCBs 为主, 其含量为 50.2~1 957 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 383 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其次是四氯代 PCBs, 其浓度为 $\text{nd}\sim 1\,043\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均 109 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$); 再次是二氯代、五氯代和六氯代 PCBs, 浓度范围分别为 $\text{nd}\sim 810\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均 51.5 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $\text{nd}\sim 356\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均 46.4 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $\text{nd}\sim 226\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均 38.8 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$); 而一氯代和七氯代 PCBs 的浓度范围仅分别为 $\text{nd}\sim 248\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均为 18.9 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 $\text{nd}\sim 167\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均为 16.1 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$); 其他氯代 PCBs 检出率较低。

与各种工业 PCBs 组成相比较^[14], 推测研究区域土壤样品中 PCBs 污染可能来源于工业 Aroclor1242。由于不同 PCBs 同系物之间挥发性差别很大(从 Mono-CBs 到 Deca-CBs 其挥发性相差 6 个数量级), 导致具有较高挥发性的 PCBs 容易随气流转移, 而挥发性较差的只发生短距离迁移; 其次, 不同 PCBs 同

表 1 上海市农村及郊区土壤中 PCB 浓度及

总残留浓度($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 Concentrations of individual PCB and total PCBs in Shanghai agricultural soil($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)

化合物	平均值	SD	范围	检出率
PCB3	8.9	22.88	$\text{nd}\sim 24.8$	52%
PCB4+10	7.79	16.9	$\text{nd}\sim 83.2$	37%
PCB5	11.1	42.3	$\text{nd}\sim 243$	27%
PCB6	13.7	41.5	$\text{nd}\sim 236$	37%
PCB8	5.17	10.7	$\text{nd}\sim 51.1$	37%
PCB18	124	279	$\text{nd}\sim 1\,410$	37%
PCB15+13	81.8	102	$\text{nd}\sim 550$	97%
PCB12	53.5	133	$\text{nd}\sim 681$	30%
PCB24	5.10	15.3	$\text{nd}\sim 81.4$	52%
PCB26	2.84	8.51	$\text{nd}\sim 35.8$	64%
PCB45	15.5	36.1	$\text{nd}\sim 189$	67%
PCB22	7.4	28.7	$\text{nd}\sim 127$	61%
PCB73	0.368	1.86	$\text{nd}\sim 10.6$	45%
PCB69	14.3	35.6	$\text{nd}\sim 192$	70%
PCB72	4.59	17.3	$\text{nd}\sim 94.8$	42%
PCB47	3.99	7.38	$\text{nd}\sim 31.1$	42%
PCB44	30.2	118	$\text{nd}\sim 682$	42%
PCB66	22.9	68.9	$\text{nd}\sim 384$	45%
PCB109	7.46	20.9	$\text{nd}\sim 114$	39%
PCB144	4.06	7.04	$\text{nd}\sim 28.2$	42%
PCB149+123	3.86	7.50	$\text{nd}\sim 30.6$	39%
PCB146	9.57	24.7	$\text{nd}\sim 114$	30%
PCB153	12.9	36.1	$\text{nd}\sim 167$	42%
PCB176	0.228	0.895	$\text{nd}\sim 4.74$	33%
PCB183	6.83	20.8	$\text{nd}\sim 112$	36%
PCB128	2.14	7.71	$\text{nd}\sim 44.1$	33%
$\Sigma_{62}\text{PCBs}$	645	787	71.7~2 530	100%

注: nd , 低于检测限; SD, 标准偏差; $\Sigma_{62}\text{PCBs}$, 被检出 62 种 PCBs 浓度之和。表中未列出检出率低于 30% 的单个 PCB 浓度。

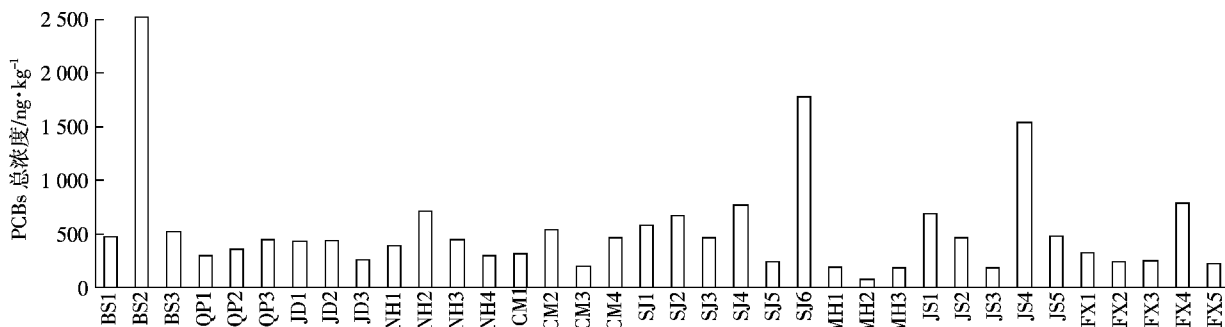


图 2 上海市农村及郊区土壤中 ΣPCBs 污染总浓度($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Figure 2 Total concentrations of ΣPCBs in Shanghai agricultural soil($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)

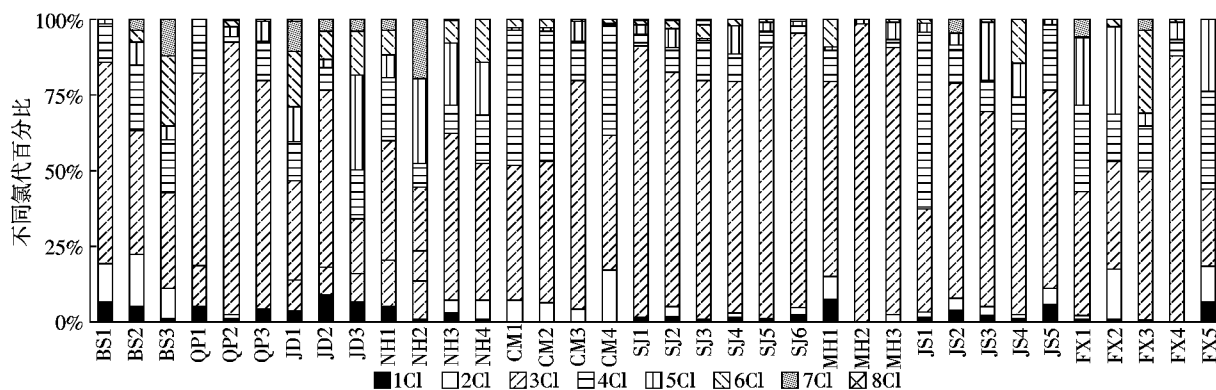


图3 上海市农村及郊区土壤中不同氯代 PCBs 组成百分比

Figure 3 Composition of different chlorinated PCBs in Shanghai agricultural soil

系物具有不同的水溶性,且 PCBs 同族物的吸附能力也由于其氯代位置的不同而相差很大。因而,进入土壤中的 PCBs 将按水溶性、吸附性的不同而以不同速率随降雨、灌溉等过程而随水流流失,造成其组成和污染源的明显不同。但是,农村及郊区土壤样品中 PCBs 分布模式较为一致,且总量变化范围不大,这表明不同的采样点之间来源可能相同。而采样点设置均为农业土壤,分布较为偏远,因此推断,农村土壤样品中 PCBs 污染可能主要是由于大气沉降所致,个别高污染点可能源于点源污染。

2.3 样点聚类分析

对上海市农村及郊区 36 个土壤样品的数据标准化后进行了 Q 型聚类分析。聚类结果见图 4。

由谱系聚类图可以看出,所有样品可分为两大类:第一类包括 JS1、JS2、JS3、JS4、SJ1、SJ2、SJ3、SJ4、SJ5、SJ6、CM2、CM4、QP1、BS1、FX4、MH1、NH2 和 JD2 共 18 个样品。第二类又包括两组,分别是 NH4、MH2 和 CM3,这一类中还有氯代工业品 Aroclor1242;第二组中包括了 BS2、BS3、QP2、QP3、JD3、NH1、NH3 和 FX1、FX2、FX3、FX5,其中还包括了低氯代的工业品 Aroclor1232。聚类分析结果表明了第一类中的采样点与多氯联苯工业品污染无相关性,可能来源于降解或是其他来源;而第二类中采样点则与低氯代工业品存在相关,表明第二类中采样点 PCBs 来源与低氯代工业品污染有关。结合采样点分布区域来看,金山区、松江区和南汇区、闵行区等西南部区域,其污染可能源于外来源,而奉贤区、南汇区、青浦区以及宝山区则可能存在地方污染源,且与低氯代工业品 Aroclor1232 的使用有关。

2.4 PCBs 与土壤 TOC 相关性分析

PCBs 的迁移和空间分布是一个复杂的过程,土

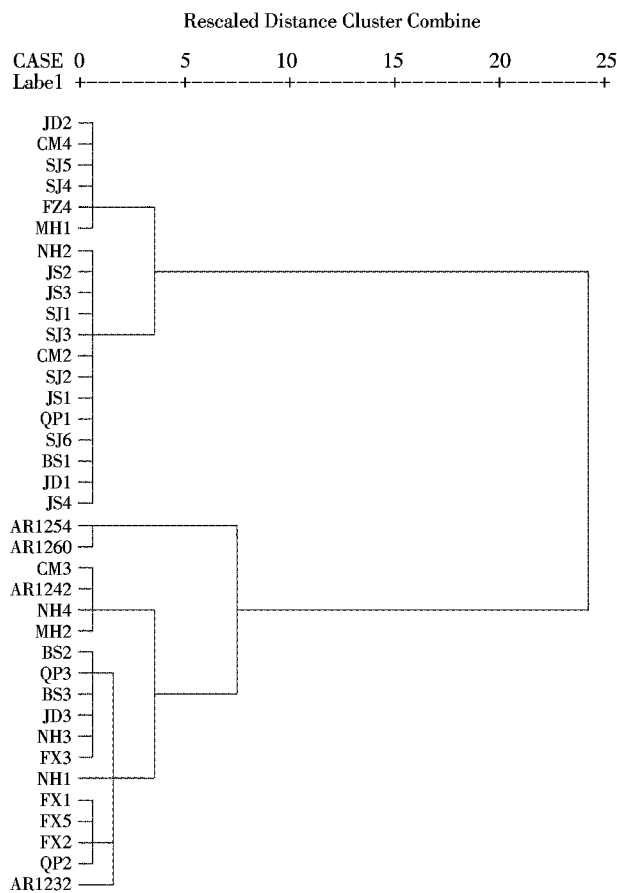


图4 土壤样品的谱系聚类图(Ward 聚类法、欧氏距离)

Figure 4 Three diagram for 33 soil samples

(Ward's Method, Euclidean Distances)

地利用类型、植被覆盖可能会影响大气-土壤的动力交换过程,而其他过程如局部挥发、降解、填埋、土壤保持力等等也都有可能成为影响因素。大量研究表明,土壤有机质含量是影响土壤残留水平的重要因素。把研究区域内土壤不同氯代百分比及其有机质含量的数据进行对数转换,并做相关性分析(相关性数

据见表 2), 发现 TOC 与低氯代 PCBs 具有显著相关性, 而与高氯代 PCBs 相关性较差, 这种挥发性较强的低氯代 PCBs 比高氯代 PCBs 与土壤 TOC (或是 OM%) 相关性要高, 与文献报道一致^[15-16], 说明大气传输和大气-土壤交换对土壤污染有较大影响, 同时也表明土壤 TOC 对低氯代 PCBs 污染持留有重要的影响。由表 2 可以看出, 一氯代到五氯代 PCBs 之间具有极高的相关性, 表明其来源可能相同; 七、八氯代 PCBs 与低氯代 PCBs 相关性较差, 说明其来源存在差异。

表 2 上海农村及郊区土壤中不同氯代 PCBs 相关性系数矩阵
($n=36, P<0.001$)

Table 2 Correlation matrix for different chlorinated PCBs in
Shanghai agricultural soil ($n=36, P<0.001$)

	一氯代	二氯代	三氯代	四氯代	五氯代	六氯代	七氯代	八氯代
二氯代	0.961							
三氯代	0.698	0.640						
四氯代	0.860	0.910	0.607					
五氯代	0.789	0.812	0.643	0.775				
六氯代	0.447	0.497	0.338	0.480	0.638			
七氯代	0.680	0.766	0.337	0.675	0.609	0.735		
八氯代	0.427	0.442	0.296	0.365	0.447	0.275	0.262	
TOC	0.550	0.577	0.597	0.955	0.812	0.134	0.087	0.072

3 结论

上海市农村及郊区土壤中共检出 62 种 PCB, 污染总浓度最高为 $2\,530\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最低为 $71.7\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量 $534\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Σ₆₂PCBs 较高浓度主要是采样点 BS2、SJ6、JS4 和 FX4, 且无明显分布特征, 可能存在点源污染。从整体采样区域来看, 上海农村区域 PCBs 污染水平不高, 其污染可能主要来源于城区污染导致的区域大气沉降或是全球大气传输所致。研究区域土壤 PCBs 污染物主要以 Tri-CBs 和 Tetra-CBs 为主, 来源分析表明可能主要以工业 Aroclor1242 来源为主。样点聚类分析显示, 大部分采样点 PCBs 污染与工业品使用有关, 但上海西南部区域采样点可能存在其他来源, 结果表明不同采样点之间污染存在差异。相关性分析显示, 土壤中 PCBs 与 TOC 具有显著相关性, 尤其是对于挥发性较强的低氯代 PCBs, 表明土壤不同 TOC 含量是影响土壤中 PCBs 持留的重要因素之一。

参考文献:

[1] Tyler C R, Jobling S, Sumpster J P. Endocrine disruption in wildlife: A critical review of the evidence [J]. *Critical Reviews in Toxicology*,

1998, 28:319-361.

- [2] Vallack H W, Bakker D J, Brandt I, et al. Controlling persistent organic pollutants—what next?[J]. *Environ Toxicol Pharma*, 1998, 6: 143-175.
- [3] National Toxicology Program (NTP). Report on Carcinogens, eleventh ed. Public Health Service[R]. US Department of Health and Human Services, 2005, Washington, DC.
- [4] Fu C T, Wu S C. Seasonal variation of the distribution of PCBs in sediments and biota in a PCB-contaminated estuary[J]. *Chemosphere*, 2006, 62: 1786-1794.
- [5] 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]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41: 2153-2158.
- [6] Nakata H, Hirakawa Y, Kawazoe M, et al. Concentration and compositions of organochlorine contaminants in sediments, soils, crustaceans, fishes and birds collected from Lake Tai, Hangzhou Bay and Shanghai city region, China[J]. *Environ Pollut*, 2005, 133: 415-429.
- [7] Ren N Q, Que M X, Li Y F, et al. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. *Environ Sci Technol*, 2007, 41(11): 3871-3876.
- [8] Salihoglu G, Tasdemir Y. Prediction of the PCB pollution in the soils of Bursa, an industrial city in Turkey[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2-3): 1523-1531.
- [9] 黎伟, 程金平, 马静, 等. 上海市某工业区可吸入颗粒物(PM10)中多氯联苯的表征与分布特征[J]. *环境化学*, 2007, 26(3): 403-404. Li Wei, CHENG Jin-ping, MA Jing, et al. Characterization and distribution of PCBs in PM10 in Shanghai industrial districts[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(3): 403-404.
- [10] 孙振中, 戚隽渊, 曾智超, 等. 长江口九段沙水域环境及生物体内多氯联苯分布[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(3): 92-97. SUN Zhen-zhong, QI Juan-yuan, ZENG Zhi-chao, et al. Polychlorinated biphenyls in the water, soil and aquatic animals from the Jiudu-an-sha Wetland of Yangtze River Estuary[J]. *Research of Environmental Science*, 2008, 21(3): 92-97.
- [11] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 长江三角洲地区城市污泥中多氯联苯和有机氯农药含量与组分研究[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 539-546. SHEN Rong-yan, LUO Yong-ming, ZHANG Gang-ya, et al. PCBs and OCPs in municipal sludges from Yangtze River Delta Area[J]. *Soil*, 2006, 38(5): 539-546.
- [12] Jiang Y F, Wang X T, Jia Y, et al. Occurrence, distribution and possible sources of organochlorine pesticides in agricultural soil of Shanghai, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(2-3): 989-997.
- [13] Fu S, Yang Z Z, Li K, et al. Polychlorinated biphenyl residues in sand-storm depositions in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2008, 73: 962-966.
- [14] Ishikawa Y, Noma Y, Mori Y, et al. Congener profiles of PCB and a proposed new set of indicator congeners[J]. *Chemosphere*, 2007, 67: 1838-1851.
- [15] Manzano M A. Catalyzed hydrogen peroxide treatment of polychlorinated biphenyl contaminated sandy soils[J]. *Water, Air and Soil Pollutant*, 2004, 154: 1-4.
- [16] Meijer S N, Ockenden W A, Sweetman A, et al. Global distribution and budget of PCBs and HCB in background surface soils: Implications for sources and environmental processes[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 667-672.