

珠江三角洲典型地区表层农田土壤中多氯联苯残留状况^①

江萍^{1,2,3}, 赵平¹, 万洪富^{1,2*}, 郭志兴², 张天彬², 杨国义², 侯梅芳^{1,2}

(1 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 采集了珠江三角洲典型区域 384 个表层农田土壤样品, 分析了其中常见 6 种土壤多氯联苯 (PCB28、PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 与 PCB180) 的残留状况。研究表明: 6 种多氯联苯总量 ($\Sigma 6\text{PCBs}$) 的检出率为 78.13%, 其平均值为 0.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。PCB138 的检出率与含量高于其他 5 种 PCBs; 土壤中 6 种多氯联苯的残留状况存在很大的差异; PCB101 的检出率最低, 仅为 10.16%, 但其平均值 (0.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 较高, 主要源于某点位 PCB101 高达 32.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 土壤受到了严重污染。线性相关关系分析结果表明: 土壤有机质、黏粒含量则与 PCB52 存在显著正相关关系。总体而言, 低氯代的 PCBs 含量与土壤理化性质具有一定的相关性, 高氯代的 PCBs 呈现典型的点位污染且在点位土壤中其含量显著高于低氯代同系物。

关键词: 农田土壤; 多氯联苯; 珠江三角洲

中图分类号: X53

近年来土壤有机氯污染问题备受人们关注^[1]。多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 相比有机氯农药更难被生物降解, 其是公认的一类最复杂的内分泌干扰物^[2]。由于多氯联苯性能稳定, 具有良好的化学稳定性、热稳定性、阻燃性、导热性、绝缘性, 长期以来被广泛用作变压器/电容器的绝缘油、液压系统的传压介质、导热系统热载体以及润滑油、涂料、印刷墨水、塑料、树脂、橡胶、油漆的添加剂等^[3]。随着日本北九川福岗县米糠油事件、美国通用电器公司排放含 PCBs 废水等污染事件的发生, 许多国家先后禁止生产 PCBs, 《斯德哥尔摩公约》中甚至明确了包括 7 种 PCBs 在内的高毒持久性有机物在 2025 年前将在全世界范围内完全禁止生产和使用^[3]。我国曾生产 PCBs 近万吨, 也从国外进口过大量装有 PCBs 的电力电容器、动力变压器等^[4]。在 PCBs 生产、使用以及废弃品堆置处置过程中难免有 PCBs 的泄漏与排放, 使得 PCBs 可能通过大气、水等途径进入土壤环境^[4-5]。

珠江三角洲是广东省经济发展迅速的重要区域, 国内生产总值 (GDP) 年均增长 16.9%, 远高于全国 9.6%; 2008 年其 GDP 为 2.97 万亿元, 占全国的近 1/10, 财政收入和税收也占全国的近 1/8, 在全国经济格局中具有举足轻重的地位。在经济高速发展的同时, 土壤污染问题也随之而出。以往的研究结果表明, 珠江三角洲典型区域土壤有机氯农药、多环芳烃有机污染物

检出率高, 含量也较高, 其土壤环境有机污染问题不容忽视^[6-7]。

国内外的专家学者进行了大量的有关土壤 PCBs 的含量状况分析研究^[8-12], 经总结发现检出率高、含量高且较难降解的为 6 种 PCBs, 即 2,4,4'-三氯联苯 (PCB28)、2,2',5,5'-四氯联苯 (PCB52)、2,2',4,5,5'-五氯联苯 (PCB101)、2,2',3,4,4',5-六氯联苯 (PCB138)、2,2',4,4',5,5'-六氯联苯 (PCB153) 与 2,2',3,4,4',5,5'-六氯联苯 (PCB180)^[12-15]。由于 PCBs 的收集、检测分析成本较高, 通常人们研究的样本量较少或范围较小^[8-15]。

本课题组在国家、广东省以及珠江三角洲各地市的相关部门支持下, 在珠江三角洲采集典型地区表层农田土壤 384 个, 本文对其 PCBs 残留状况进行分析, 以期为该地区土壤环境质量的维护、污染控制及修复提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与保存

调查区域涵盖珠江三角洲经济区范围, 行政上包括广州市、深圳市、珠海市、佛山市、江门市、东莞市、中山市、惠州 (市区、惠阳县、惠东县、博罗县)、肇庆 (市区、高要市、四会市) 等 14 个市、县。地理坐标: 112°00' ~ 115°24'E, 21°43' ~ 23°56'N。行政区国

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (20907011) 和广东省科技攻关项目 (2010B031800015) 资助。

* 通讯作者 (hfwan@soil.gd.cn)

作者简介: 江萍 (1976—), 女, 江西婺源人, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染调查与修复。E-mail: gzuping@163.com

土面积 41 689 km²，约占广东省国土面积的 23.2%。

采样点主要根据当地的工业布局、“三废”排放状况、灌溉水类型、土壤类型、农业生产布局等因素来确定，首先布设在面积较大、有代表性的农业生产基地。土壤采集深度为 0~20 cm，采取多点采样混合法，

即在一定面积的土壤采集 10~15 个点形成一个土壤混合样，四分法留取 1 kg 装入棕色玻璃瓶迅速带回实验室冷冻 (-20℃) 保存至分析，在分析前将冷冻保存的土样在室温条件下风干，研磨过 60 目筛备用。图 1 为采样点位布设简图。

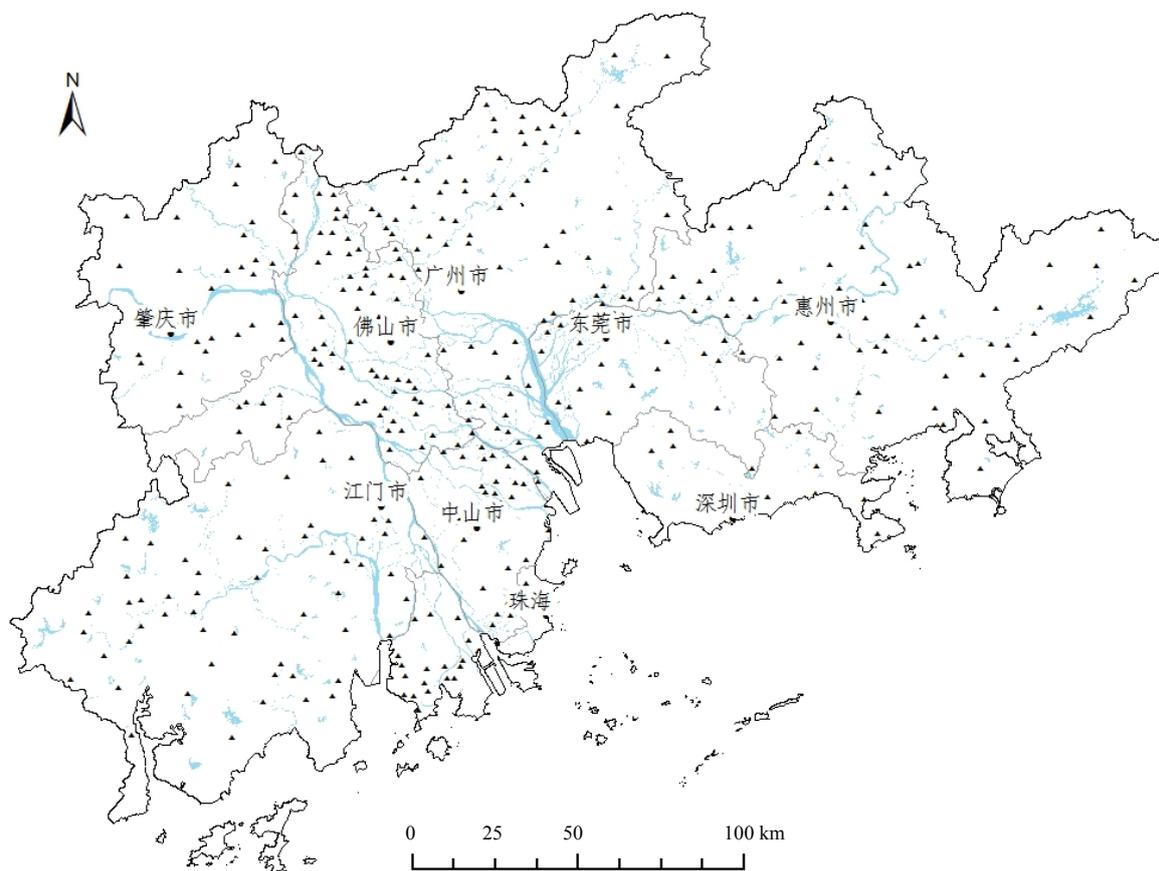


图 1 多氯联苯残留状况调查采样示意图

Fig. 1 The map of sampling for investigation of PCBs

1.2 分析方法

多氯联苯测定采用美国 EPA 分析方法，具体是提取方法采用 EPA3540，净化方法采用 EPA3610，定量方法采用 EPA8082 [6, 9, 12-13]。

1.3 样品处理与分析

1.3.1 器皿清洗流程 所有玻璃器皿在经一般洗涤法清洗并晾干后，再经洗液浸泡数小时后经双蒸水洗净，150℃ 条件下烘干。

1.3.2 前处理步骤 称取土壤样品 20 g (干样) 于滤纸筒中包好。量取 1:1 己烷/丙酮约 200 ml，加 2 g 活化过的铜片，加回收率指示物，于 58℃ 下抽取 24 h。冷却循环水温度调节为 22℃，控制回流速度在 5~6 次/h。提取液在旋转蒸发仪上浓缩到 4~5 ml，通过无

水硫酸钠过滤到 50 ml 的鸡心瓶中，再用旋转蒸发仪浓缩到 2~3 ml，加 10 ml 正己烷进行溶剂转换，继续浓缩至 1 ml。

多级复合硅胶净化柱，用己烷湿法装柱。从上到下柱高为：12 cm 硫酸化硅胶，10 cm 的去活化硅胶及 6 cm 的硝酸银改性硅胶，装柱过程中注意保持己烷对柱子的湿润，以 50 ml 正己烷淋洗。浓缩后加入内标物进行定量分析。

1.3.3 分析测试 采用日本岛津 Shimadzu GC-2010 气相色谱仪，63Ni 电子捕获检测器 (ECD)，色谱柱为 Rtx-5 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。进样口温度 280℃，检测器温度 290℃。程序升温：初始温度 90℃，保留 0 min，以 6℃/min → 280℃，保持 5 min。

载气与补充气均为高纯 N ($\geq 99.999\%$), 不分流进样, 进样量 1 μl , 柱流量 2.5 ml/min。定性以标准物质的相对保留时间进行, 多氯联苯测定是以内标法峰面积定量样品中各目标化合物含量。

1.3.4 多氯联苯分析过程的质量控制 在样品分析过程中, 增加美国环保署的 QA/QC 控制样品分析: 方法空白、加标空白、基质加标样、基质加标平行样及样品平行样分析。在样品进行溶剂抽提之前, 向每个分析样品加入回收率指示物标样(十氯联苯), 用于监测样品的制备和分析过程, 以及基质的可能影响; 样品中对多氯联苯的定量均以内标法 6 点校正曲线法进行, 相关系数均在 0.998 以上。

本实验中用十氯联苯进行的回收率实验表明: 所有样品指示物回收率在 70%~110% 之间, 所有化合物定量结果未经空白及回收率校正。所用十氯联苯质控标样购自美国 Sigma-Aldrich 公司, 6 种多氯联苯混合标样(PCB-Mix 1) 购自德国 Dr.Ehrenstorfer 公司。表 1 为多氯联苯分析质量控制结果。

表 1 多氯联苯的方法检出限

Table 1 Detection limits of PCBs

序号	分析项目	检出限 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	平均回收率 (%)	相对标准偏差
1	PCB28	0.04	78.0	18.5
2	PCB52	0.04	74.7	8.4
3	PCB101	0.03	86.1	14.4
4	PCB138	0.04	72.2	11.2
5	PCB153	0.03	107.6	13.4
6	PCB180	0.04	106.5	14.4

2 结果与讨论

2.1 土壤基本理化性质

国内外研究表明土壤及沉积物 pH、有机质以及粒级组成可能与 PCBs 残留状况具有一定的关联性, 特别是有机质的含量与 PCBs 的线性相关性较强^[12-15]。因此, 本研究详细分析了 384 个土壤样品的基本理化性质。如表 2 所示, 珠江三角洲典型地区表层农田土壤 pH 平均值在 5.59, 多数为酸性土壤; 土壤有机质含量在 1.5~94.4 g/kg 之间, 平均值为 24.4 g/kg; 样间粒级组成差异明显, 就平均值而言则相差不大, 总体呈现粉粒含量高于砂粒含量、黏粒含量。

表 2 珠江三角洲典型地区表层农田土壤样品基本理化性质

Table 2 Physico-chemical properties of surface soils in typical regions of Pearl River Delta

特征值	pH	有机质 (g/kg)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)
最小值	3.71	1.5	0.6	55.9	52.4
10% 值	4.29	12.6	20.7	191.7	187.5
25% 值	4.69	16.7	96.4	270.5	243.9
中位数	5.29	22.8	256.7	396.3	324.3
75% 值	6.34	29.8	457.4	501.1	411.4
90% 值	7.37	37.2	563.1	546.6	472.6
最大值	8.28	94.4	816.9	697.2	661.2
算术平均值	5.59	24.4	286.9	382.9	330.1
标准差	1.13	10.7	212.0	138.2	112.1
变异系数	495.89	2283.3	1353.3	2771.5	2944.5
偏度系数	0.61	14.4	3.6	-2.2	1.5
峰度系数	-0.65	53.7	-9.6	-9.0	-4.5

2.2 PCBs 的含量特征

如表 3 所示, PCB28、PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 及 PCB180 的检出率分别为 36.72%、45.05%、10.16%、48.70%、34.64% 及 32.55%, $\sum 6\text{PCBs}$ 的检出率为 78.13%。PCB28、PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 及 PCB180 的平均值分别为 0.05、0.05、0.11、0.14、0.04 及 0.04 $\mu\text{g}/\text{kg}$, $\sum 6\text{PCBs}$ 的平均值为 0.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。PCB28、PCB52、PCB101、PCB138、PCB153 及 PCB180 对 $\sum 6\text{PCBs}$ 的贡献率平均值分别为 16.59%、18.43%、9.88%、27.80%、12.75% 及 14.54%。

相比较而言, PCB138 的检出率、平均含量以及对总量 $\sum 6\text{PCBs}$ 的贡献率均高于其他 5 种 PCBs; 土壤中 6 种 PCBs 的残留状况彼此间存在很大的差异; PCB101 的检出率最低, 仅为 10.16%, 但其平均值 (0.112 $\mu\text{g}/\text{kg}$) 较高, 主要源于某样点位周边土壤 PCB101 高达 32.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 土壤受到了严重污染。除因一个土壤样品 PCB101 高达 32.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 而造成 $\sum 6\text{PCBs}$ 为 32.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之外, 其他 383 个土壤样品的 $\sum 6\text{PCBs}$ 的残留量介于 ND 与 3.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间。相比德国农田土壤, 英国、意大利、瑞典等国家城市周边土壤的 PCBs 含量^[16-17], 珠江三角洲典型地区表层农田土壤的 PCBs 残留量较低。

通常低氯代多氯联苯具有相对较强的挥发性, 较容易挥发到大气中并随之漂移到较远的地方; 高氯代多氯联苯挥发性与水溶性均较弱, 随水、气等媒介的

表3 珠江三角洲典型地区表层农田土壤常见 PCBs 的检出率 (%) 与含量特征 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

Table 3 Detection frequencies and concentrations of PCBs of surface soils in typical regions of Pearl River Delta

特征值	PCB28	PCB52	PCB101	PCB138	PCB153	PCB180	$\Sigma 6\text{PCBs}$
氯原子数 (邻位 Cl)	3(1)	4(2)	5(2)	6(2)	6(2)	7(2)	-
检出率	36.72	45.05	10.16	48.70	34.64	32.55	78.13
最小值	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10% 值	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25% 值	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.13
中位数	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.19
75% 值	0.06	0.06	ND	0.12	0.04	0.05	0.35
90% 值	0.11	0.08	0.03	0.33	0.06	0.08	0.68
最大值	0.63	0.34	32.44	3.00	0.39	0.36	32.79
平均值	0.05	0.05	0.11	0.14	0.04	0.04	0.42
标准差	0.05	0.04	1.66	0.29	0.05	0.05	1.70
变异系数	87.79	118.06	6.74	46.84	75.90	91.13	24.41
偏度系数	5.12	2.84	19.55	5.11	4.12	3.33	18.17
峰度系数	45.06	13.12	382.71	34.62	20.21	13.58	346.05
长三角	135.1	110.9	296.2	249.1	217.0	63.6	

注：ND 表示未检出，在统计时未检出的样品 PCB 含量按检出限的一半计算。

迁移性较差，易在污染源附近累积^[9]。

长江三角洲典型地区农田土壤调查发现 PCB138 的残留量高于其他多氯联苯同系物且其检出率也相对较高^[12]。由于工业的发展，使得珠江三角洲地区靠近工业区的一些表层沉积物中也呈现含 6 个氯的同系物在多氯联苯总量的贡献率最高，甚至达 92.16%，作者认为这可能与 Anoclor1260 一类的工业品污染有关^[13]。对于全国大范围的采样分析结果也表明在大城市郊区附近土壤中含 6 个氯的同系物在多氯联苯总量的贡献率明显高于其他同系物，空气中多氯联苯也以六氯代为主^[14]，而背景区以及农村地区土壤中多氯联苯主要为含 2、3 个氯原子的同系物为主^[15]。土耳其、法国城市集中区或工业区周边土壤也存在六氯代多氯联苯含量明显高于其他氯代 PCB 同系物的现象^[8, 18]。从而可推测，珠江三角洲高速经济发展和城镇化建设中使用、堆置或处置含高氯代多氯联苯以及易转化为高氯代多氯联苯的化学品或工业产品是其土壤中六氯代多氯联苯较多的重要原因之一。

2.3 相关性分析

进入环境中的 PCBs 由于受气候、生物、水文地质等因素的影响，在不同的环境介质间发生一系列的迁移转化，最终的贮存所主要是土壤、河流和沿岸水体的底泥^[14]。由于 PCBs 化合物的辛醇-水分配系数 (Kow) 很高，但水溶解度 (S) 很低 (表 4)，即易

溶于有机溶剂难溶于水，且具有环境持久性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性等性质，因此对环境、生物和人类有很大危害^[5]。PCBs 的高度亲油憎水性使得其容易吸附于比表面积大和富含有机质的介质上^[5, 22]。现代黄河三角洲表层土壤 PCBs 含量调查中发现土壤有机质含量高对吸附滞留 PCBs 有重要的影响，同时土壤黏粒部分因表面积大、活性高而可能成为吸附滞留 PCBs 重要部分，同样国内外其他研究也表明土壤有机质和黏粒含量是影响 PCBs 含量的重要因素^[11, 15, 23-25]。

如表 5 所示，珠江三角洲典型地区表层农田土壤 pH 与 PCB28、PCB153 以及 PCB180 存在显著正相关关系；土壤有机质与 PCB28、PCB52 存在正相关关系；土壤有机质、黏粒含量则与 PCB52 存在显著正相关关系；土壤砂粒含量则与 PCB52 存在显著负相关关系。以上分析说明珠江三角洲典型地区表层农田土壤多氯联苯残留量与土壤有机质、黏粒含量具有一定的相关性。

3 结论

珠江三角洲典型地区表层农田土壤的 PCBs 检出率较高，六氯代多氯联苯所占比例较多，可能源于珠江三角洲高速经济发展和城镇化建设中使用、堆置或处置含高氯代多氯联苯以及易转化为高氯代多氯联苯

表 4 PCBs 的基本理化性质^[16, 19-21]

Table 4 Environmentally important physico-chemical properties of PCBs

PCBs	分子量	蒸汽压 (Pa)	水溶解度 (g/L)	亨利常数 (计算值, Pa m ³ /mol)	辛醇-水分配系数 (log K _{ow})
PCB28	256.0	1.5 × 10 ⁻²	(0.9 ~ 4.0) × 10 ⁻⁴	24	5.70
PCB52	289.9	(0.5 ~ 1.9) × 10 ⁻²	(0.3 ~ 1.2) × 10 ⁻⁴	33	6.10 ~ 6.30
PCB101	323.9	(1.2 ~ 3.5) × 10 ⁻³	(0.1 ~ 4.0) × 10 ⁻⁵	19	5.90 ~ 7.10
PCB138	357.8	(0.5 ~ 5.0) × 10 ⁻³	1.6 × 10 ⁻⁵	7.6	7.44
PCB153	357.8	0.7 × 10 ⁻³	(1.0 ~ 9.0) × 10 ⁻⁶	10	6.70 ~ 7.80
PCB180	391.8	(1.3 ~ 5.0) × 10 ⁻⁴	6.6 × 10 ⁻⁶	3.2	7.20

表 5 珠江三角洲典型地区表层农田土壤 PCBs 含量与土壤理化性质相关性分析

Table 5 Correlations between the concentrations of PCBs and the physico-chemical properties of surface soils in typical regions of Pearl River Delta

因素	相关性	PCB28	PCB52	PCB101	PCB138	PCB153	PCB180	∑6PCBs
pH	<i>r</i>	0.157	-0.057	-0.046	0.016	0.234	0.155	-0.028
	<i>p</i>	0.002**	0.271	0.372	0.076	<0.000 1**	0.002**	0.587
有机质	<i>r</i>	0.111	0.165	0.056	0.033	0.087	0.040	0.071
	<i>p</i>	0.029*	0.001**	0.273	0.522	0.088	0.434	0.166
砂粒	<i>r</i>	-0.032	-0.135	-0.053	-0.006	-0.062	-0.019	-0.059
	<i>p</i>	0.531	0.008**	0.297	0.901	0.228	0.712	0.247
粉粒	<i>r</i>	0.040	0.089	0.039	0.012	0.096	0.066	0.048
	<i>p</i>	0.434	0.081	0.441	0.811	0.059	0.198	0.348
黏粒	<i>r</i>	0.011	0.146	0.052	-0.003	-0.002	-0.045	0.053
	<i>p</i>	0.827	0.004**	0.307	0.952	0.963	0.374	0.303

注: *r* 表示线性相关系数; *p* 表示概率; * 表示相关性达到 $p < 0.05$ 显著水平; ** 表示相关性达到 $p < 0.01$ 显著水平。

的化学品或工业产品释放所致。土壤有机质和黏粒含量是影响 PCBs 含量的重要因素。由于 PCBs 可通过食物链威胁人体健康, 珠江三角洲土壤 PCBs 污染问题不容忽视, 应设置监测系统网络, 及时监控污染状况且从源头进行污染控制与修复, 以保障该区域经济可持续发展和土壤环境质量安全。

参考文献:

- [1] 张海秀, 蒋新, 王芳, 卞永荣, 陈峰. 南京市城郊蔬菜生产基地有机氯农药残留特征. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 76-80
- [2] 周景明, 秦占芬, 丛琳, 徐晓白. 多氯联苯内分泌干扰作用及机理研究进展. 科学通报, 2004, 49(1): 34-39
- [3] 聂湘平. 多氯联苯的环境毒理研究动态. 生态科学, 2003, 22(2): 171-176
- [4] 毕新慧, 徐晓白. 多氯联苯的环境行为. 化学进展, 2000, 12(2): 152-160
- [5] 曹先仲, 陈花果, 申松梅, 宋艳辉, 连小英. 多氯联苯的性质及其对环境的危害. 中国科技论文在线, 2008, 3(5): 375-381
- [6] 吴对林, 张天彬, 刘申, 万洪富, 侯梅芳. 珠江三角洲典型区域蔬菜地土壤中有有机氯农药的污染特征—以东莞市为例. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1261-1265
- [7] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 郭治兴, 万洪富, 高原雪. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染源. 环境科学, 2007, 28(10): 2350-2354
- [8] Güray S, Yücel T. Prediction of the PCB pollution in the soils of Bursa, an industrial city in Turkey. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164: 1523-1531
- [9] 张雪莲, 骆永明, 滕应, 俞元春, 王家嘉, 徐莉, 李振高. 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. 土壤, 2009, 41(4): 588-593
- [10] Wang DG, Yang M, Jia HL, Zhou L, Li YF. Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian, China. Chemosphere, 2008, 73: 38-42
- [11] Zhang HB, Luo YM, Wong MH, Zhao QG, Zhang GL. Concentrations and possible sources of polychlorinated biphenyls in soils of Hong Kong. Geoderma, 2007, 138: 244-251
- [12] 安琼, 董元华, 王辉, 陈芳, 张劲强. 长江三角洲典型地区农

- 田土壤中多氯联苯残留状况. 环境科学, 2006, 27(3): 528-532
- [13] 康跃惠, 盛国英, 傅家谟, 麦碧娟, 林峥, 张干, 闵玉顺. 珠江三角洲一些表层沉积物中多氯联苯的初步研究. 环境化学, 2000, 19(3): 262-269
- [14] Zhao YL, Yang LM, Wang QQ. Modeling persistent organic pollutant (POP) partitioning between tree bark and air and its application to spatial monitoring of atmospheric POPs in Mainland China. Environ. Sci. Technol., 2008, 42: 6046-6051
- [15] Ren NQ, Que MX, Li YF, Liu Y, Wan XN, Xu DD, Sverko E, Ma JM. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils. Environ. Sci. Technol., 2007, 41: 3871-3876
- [16] Manz M, Wenzel KD, Dietze U, Schüürmann G. Persistent organic pollutants in agriculture soils of central Germany. Science of the Total Environment, 2001, 277: 187-198
- [17] Cachada A, Lopes LV, Hursthouse AS, Biasioli M, Gröman H, Otabbong E, Davidson CM, Duarte AC. The variability of polychlorinated biphenyls levels in urban soils from five European cities. Environmental Pollution, 2009, 157: 511-518
- [18] Motelay-Massei A, Ollivon D, Garban B, Teil MJ, Blanchard M, Chevreuil M. Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River Basin, France. Chemosphere, 2004, 55: 555-565
- [19] Mackay D, Shiu WY, Ma KC. Illustrated Handbook of Physical Chemical Properties of Environmental Fate of Organic Chemicals. Vol. V. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1997
- [20] Streit B. Lexikon Ökotoxikologie. Weinheim, New York: VCH-Verlag, 1994
- [21] Rippen G. Handbuch Umweltchemikalien. Landsberg Lech, Germany: Ecomed, 1996
- [22] 孟庆昱, 储少岗, 徐晓白. 多氯联苯的环境吸附行为研究进展. 科学通报, 2000, 45(15): 1572-1583
- [23] 刘静, 崔兆杰, 宋现军, 陈淑芬, 路风, 徐娜. 现代黄河三角洲土壤特性对多氯联苯分布的影响规律. 生态环境学报, 2010, 19(1): 86-91
- [24] Meijer SN, Steinnes E, Ockenden WA, Jones KC. Influence of environmental variables on the spatial distribution of PCBs in Norwegian and UK soils: Implications for global cycling. Environ. Sci. Technol., 2002, 36: 2146-2153
- [25] Jae JN, Orjan G, Perihan KK, Knut B, Eiliv S, Kevin CJ. Relationships between organic matter, black carbon and persistent organic pollutants in European background soils: Implications for sources and environmental fate. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 809-817

Concentrations of PCBs in Agricultural Soils of Typical Regions in Pearl River Delta

JIANG Ping^{1,2,3}, ZHAO Ping¹, WAN Hong-fu^{1,2}, GUO Zhi-xing², ZHANG Tian-bin², YANG Guo-yi², HOU Mei-fang^{1,2}

(1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2 Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; 3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A total of 384 soil samples were collected from surface agricultural soils of typical regions of Pearl River Delta, China. Six common congeners of PCBs (PCB28, PCB52, PCB101, PCB138, PCB153 and PCB180) were analyzed. The results showed that the detection frequency of Σ 6PCBs was 78.13% and the average concentration of Σ 6PCBs was 0.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Both the detection frequency and the average concentration of PCB138 were higher than those of the other PCBs. There were differences among the concentrations of six PCBs in soil. The detection frequency of PCB101 was lowest (10.16%), but its average concentration was up to 0.11 $\mu\text{g}/\text{kg}$ owing to PCB101 of 32.44 $\mu\text{g}/\text{kg}$ found in one soil sample, which suggested the heavy soil pollution around the site. There were the significant linear correlations of the concentration of PCB52 with soil organic matter and clay content. It could be also derived that there was the correlation between the concentration of low chlorinated PCBs and soil physicochemical properties. High chlorinated PCBs were easily concentrated in typical sites and their concentration might be much higher than that of low chlorinated PCBs.

Key words: Agricultural soil, PCBs, Pearl River Delta