

吉林市城郊蔬菜土壤中多氯联苯 残留特征及生态风险评价

陈晓荣^{1,2}, 王 洋^{1*}, 刘景双¹, 刘 强¹, 崔政武¹, 杜连生¹

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为揭示我国重要化工城市郊区蔬菜土壤中多氯联苯(PCBs)的残留现状,对吉林市城郊菜田表层土壤中 11 种多氯联苯的含量及分布特征进行了分析,并采用环境质量标准风险评价法和毒性当量因子法进行了生态风险评价。结果表明:研究区蔬菜土壤中多氯联苯总量的空间变异较大,变化范围为 58.20~253.08 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量达 111.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,部分超出土壤环境质量二级标准,已存在一定的潜在危害;土壤中多氯联苯同系物以五氯及以上的高氯联苯为主,占总量的 63.27%;多氯联苯含量最高值主要分布在城郊北部,即吉林市化工厂集中区,表明该区域蔬菜土壤环境质量受人为活动影响较显著。主成分分析发现:主成分 1 的方差贡献率为 31.67%,主要来自油漆、绝缘材料等工业品;主成分 2 的方差贡献率为 20.05%,主要来源于电力电容器的浸渍剂;主成分 3 和主成分 4 的方差贡献率分别为 11.16%和 9.62%,主要来源于废弃物焚烧及增塑剂中 PCBs 的挥发。总体上看,吉林市近郊蔬菜土壤中多氯联苯污染水平或毒性当量处于中度生态污染水平,已具有一定的潜在生态风险,应引起足够重视以避免对人体健康构成威胁。

关键词:化工城市;蔬菜地;多氯联苯;残留特征;风险评价

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)06-1127-07 **doi:**10.11654/jaes.2015.06.016

Residues and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in Suburban Vegetable Soils of Jilin City

CHEN Xiao-rong^{1,2}, WANG Yang^{1*}, LIU Jing-shuang¹, LIU Qiang¹, CUI Zheng-wu¹, DU Lian-sheng¹

(1.Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Polychlorinated biphenyls (PCBs) have contaminated agricultural soils. In order to investigate residues and ecological risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in vegetable soils in Jilin suburbs, we analyzed concentrations and distribution characteristics of 11 PCBs in the vegetable topsoils from Jilin suburbs, assessed the ecological risks using environmental quality standard and toxicity equivalent factor. The total concentrations of PCBs in the vegetable soils varied greatly, ranging from 58.20 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 253.08 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average concentration of 111.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The total concentrations of PCBs in some areas exceeded the secondary standard of the national soil environmental quality, indicating potential risks in the vegetable fields. Soil PCBs were mainly five- or more ring congeners. The highest concentration of PCBs was found in the northern suburbs, where chemical plants were highly concentrated, showing the impact of human activities on the environmental quality of vegetable soils in this area. Principal component analysis revealed that the principal component 1 contributed 31.67% to the variance, mainly from paint, insulation materials and other industrial products. The principal component 2 made 20.05% contribution to the variance, which resulted from power capacitor impregnant. The percent contribution of principal component 3 and 4 were respectively 11.16% and 9.62%, which were waste incineration and volatilization of PCBs in plasticizer. Overall, the pollution level or toxic equivalence of PCBs in vegetable soils of Jilin suburbs was at a moderate level, and posed a potential ecological risk. Attentions should be paid to their threats to human health.

Keywords: chemical industry region; vegetable soil; polychlorinated biphenyls; residual characteristics; risk assessment

收稿日期:2015-01-05

基金项目:吉林省世行贷款农产品质量安全项目(P101716);吉林省科技发展规划项目(20140101003JC);国家自然科学基金(41171392)

作者简介:陈晓荣(1989—),女,山东费县人,在读硕士,研究方向为环境生态与生物地球化学。E-mail:rongchen128@163.com

*通信作者:王 洋 E-mail:wangyang@neigae.ac.cn

多氯联苯 (Polychlorinated biphenyls, PCBs) 是与苯环上碳原子相连接的氢被氯不同程度地取代而形成的一类联苯化合物^[1], 因其有良好的绝缘性、导热性和惰性被广泛用于电力、塑料、化工和印刷等行业。同时, 含有苯环和氯原子的分子结构又决定了它具有低水溶性、化学稳定性和生物毒性的特点^[2], 极易在生物体内累积造成全球性环境的污染。因此, PCBs 的生产和使用在 20 世纪 70 年代就已经被禁止。作为一类亲脂性化合物, PCBs 一旦进入土壤, 即被土壤有机质牢固吸附, 很难降解, 从而造成土壤 PCBs 污染^[3], 土壤中 PCBs 可通过食物链的富集效应, 最终威胁人体健康。虽然 PCBs 已被禁用多年, 但许多区域土壤中 PCBs 仍有较高含量的检出^[4-6], 所以 PCBs 污染仍需引起人们高度重视, 特别是工业比较集中的城市。

吉林市是我国重要的工业城市, 是石油化工的重要生产基地^[7], 近年来, 随着工业化和城市化水平不断提高, 人口剧增, 土壤污染日益严重, 但东北典型重工业城市城郊蔬菜土壤中 PCBs 的残留特征及生态风险尚未引起人们的重视。本文以吉林市近郊蔬菜土壤为研究对象, 对其表层土壤中 PCBs 的残留特征及生态风险进行分析, 旨在明晰该区蔬菜土壤 PCBs 污染的状况, 该研究对保障土壤污染防治的有效实施和蔬菜的安全生产具有理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林市 (42°31'~40°40'N, 125°40'~127°56'E) 位于长白山区向松嫩平原过渡地带, 面积 27 000 km² (其中耕地面积 395 916 hm²) 是吉林省第二大城市。研究区土壤类型主要为暗棕壤、白浆土和草甸土, 土地利用类型以农业和林业为主, 属于温带大陆性季风气候。作为典型工业地区, 吉林市是我国重要的石油化工生产基地。

1.2 样品的采集与保存

2012 年 10 月, 在吉林市近郊共采集了 50 个有代表性的菜田表层 (0~20 cm) 土壤样品 (图 1), 同时, 以 GPS 定位, 并记录实地环境情况。每个代表性菜田采集约 1.0 kg 土壤, 混合均匀后, 按四分法分取样品并装入密封袋中, 带回实验室。一部分土样低温冷冻保存以备进行 PCBs 测定的前处理; 另一部分土样在室温下风干, 研磨过 2 mm 筛, 以测定有机质含量和 pH 值。

1.3 样品处理与分析

称取土壤鲜样 20.0 g (已测含水率), 加入适量无水硫酸钠后, 加入 30 mL 丙酮/正己烷混合液 (体积比为 1:1), 超声提取 15 min, 取出提取液, 再分别用 20 mL 提取液提取 2 次, 每次 15 min, 合并提取液。旋转

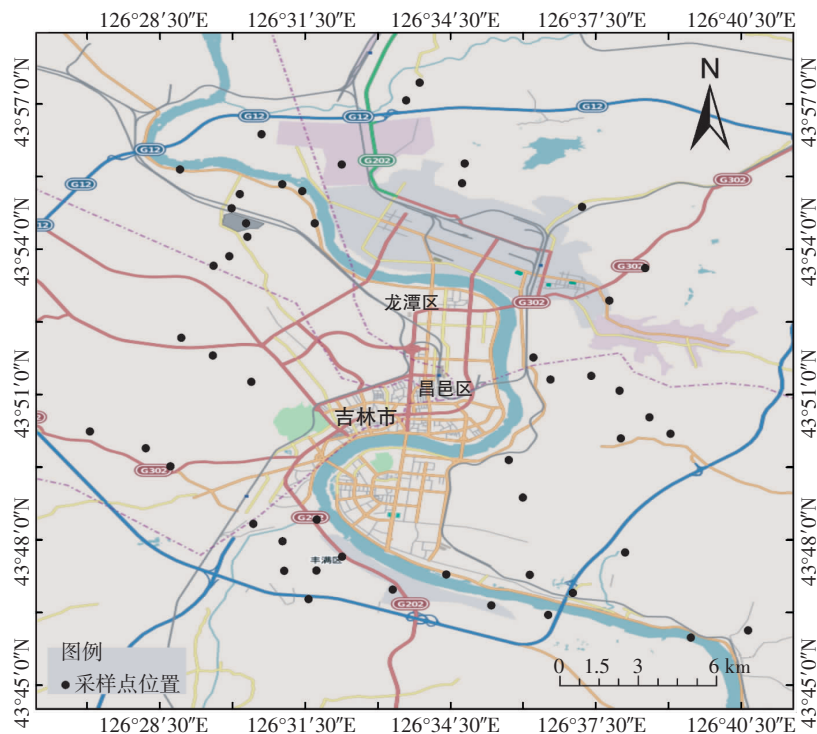


图 1 土壤采样点分布图

Figure 1 Distribution map of soil samples

蒸发至近干,加入 2 mL 正己烷。将浓缩液通过佛罗里硅土净化柱(Agela 公司的 1000 mg/6 mL 的佛罗里硅土固相萃取净化柱),用 10 mL 丙酮/正己烷混合液(体积比为 1:9)洗脱,将洗脱液旋转蒸发浓缩,用正己烷定容至 2 mL,待上机分析。

采用日本岛津 GC-2010 气相色谱仪,色谱柱为 Rtx-5(30 m×0.25 m×0.25 μm),GC-ECD 检测器。进样口温度 250 ℃,检测器温度 320 ℃。程序升温:初始温度 100 ℃保持 2 min,以 5 ℃·min⁻¹升温至 200 ℃,不保持,以 3 ℃·min⁻¹升温至 290 ℃,保持 10 min,再以 20 ℃·min⁻¹升温至 300 ℃。不分流进样,进样量 1 μL,载气为高纯氮气,流量为 7 mL·min⁻¹。

1.4 质量控制与保证

在样品分析过程中,每批样品加一个空白样,以确认试剂和容器无干扰峰出现。每批分析样加一个待测样添加标样。样品的基质加标回收率范围为 62.7%~101.2%。以 3 倍信噪比作为方法的检测限为 0.02~0.48 ng·g⁻¹。每个分析样品中加入回收率指示物 PCB103 和 PCB209,指示物回收率为 75.9%~106.6%。每批分析样加入 2 个平行样,以检测结果的重现性,且对同一样品进行 4 次重复测试,相对标准偏差<5.6%。PCBs 标准溶液用正己烷分别稀释定容至 4 个浓度,采用外标法和 4 点校正曲线进行定量,各组分标准曲线相关系数均大于 0.99。文中所有数据均为干重结果,数据质量可靠。

2 结果与讨论

2.1 PCBs 的含量特征

从表 1 可以看出,研究区蔬菜土壤中各 PCBs 同系物的检出率为 4.00%~100%,其中 PCB8、PCB28、PCB44、PCB52、PCB126、PCB138、PCB180 检出率为 100%,PCB153 检出率最低,为 4%。PCBs 各同系物浓度的变异系数为 23.87~407.32,说明研究区各样点 PCBs 的浓度差异较大。从浓度来看,11 种 PCBs 总量变化范围为 58.20~253.08 μg·kg⁻¹,平均含量为 111.00 μg·kg⁻¹,与我国其他地区相比,高于上海^[4]、北京通州^[5]、哈尔滨^[6]和南极^[8]土壤残留,但低于我国某电子废物拆解区土壤中的 PCBs 含量^[9],与世界其他区域研究结果相比^[10-13](表 2),虽然 PCBs 包含的各同系物有所不同,但从 PCBs 的残留浓度来看,本研究区域的蔬菜土壤中 PCBs 含量显著高于一些国家地区农业土壤 PCBs 的含量,但远低于典型污染区 PCBs 含量。《GB 15618—2008 土壤环境质量标准(修订)》

表 1 蔬菜土壤中 PCBs 组分的统计特征值
Table 1 Statistical characteristic values of PCBs in vegetable soils

组分	最小值/ ng·g ⁻¹	最大值/ ng·g ⁻¹	均值/ ng·g ⁻¹	标准差/ ng·g ⁻¹	变异系数 CV/%	检出率/ %
PCB8	2.91	55.76	11.25	11.66	103.64	100.00
PCB28	1.69	30.18	5.75	5.44	94.61	100.00
PCB44	1.43	11.85	4.92	2.80	56.91	100.00
PCB52	5.51	29.89	18.85	4.50	23.87	100.00
PCB101	0	12.77	4.90	3.39	69.18	82.00
PCB118	0	19.97	3.32	3.27	98.49	72.00
PCB126	2.26	67.30	13.06	11.83	90.58	100.00
PCB138	4.82	57.11	17.78	11.49	64.62	100.00
PCB153	0	9.20	0.41	1.67	407.32	4.00
PCB180	1.92	66.43	18.60	20.53	110.38	100.00
PCB198	0	77.62	12.16	13.07	107.48	92.00
Σ11PCBs	58.20	253.08	111.00	38.51	34.69	100.00

表 2 本研究与其他地区土壤 PCBs 浓度对比
Table 2 Content of soil PCBs in different districts

研究地点	土壤类型	含量/ng·g ⁻¹	参考文献
吉林市	菜田土壤	58.20~253.08	本研究
南极	表层土壤	0.36~0.59	[8]
北京通州	农田土壤	0.26~2.14	[5]
哈尔滨	表层土壤	0.03~1.80	[6]
上海	农田土壤	0.07~2.53	[4]
电子废物拆解区	农田土壤	0.78~937.00	[9]
德国	农田土壤	0.95~3.84	[10]
瑞典	农田土壤	0.55~55.00	[11]
波兰 Katowice	表层土壤	80.00~680.00	[12]
英国	农田土壤	1.70~1 199.00	[13]

对土壤中 PCBs 总量的二级控制标准为 200 μg·kg⁻¹,该区域部分菜田土壤中 PCBs 含量超出了二级控制标准,即已累积了一定的 PCBs,存在潜在生态风险。因此,需要积极采取相关措施对该部分农田进行监控或者治理,以保障人群健康。

在所测定的同系物中,毒性较大的 PCB28、52、101、118、138、153、180 被规定为欧洲食品污染标准中 7 种 PCBs 指示性同系物,它们的平均浓度为 69.61 μg·kg⁻¹,占被测 PCBs 总量平均值的 62.71%,其在土壤中的潜在生态风险应成为关注的重点。从土壤中 PCB 的组成结构来看,二至三氯、四氯、五氯、六氯、七氯、八氯联苯含量分别占 PCBs 总量的 15.32%、21.41%、19.17%、16.39%、16.76%、10.95%,土壤中以五氯及以上高氯联苯为主,同时也含有一定比例的三氯和四氯联苯,与潘静等^[7]报道的东北地

区较高氯代的多氯联苯异构体含量较高一致。

2.2 PCBs 的分布特征

通过图2可以看出,蔬菜种植土壤中 PCBs 含量的高值主要分布于吉林市城郊北部与南部区域,最高值分布在北部。吉林市目前拥有多家石油化工企业,其中吉林石化公司是国家“一五”期间兴建的以“三大化”为标志的第一个大型化学工业基地,拥有吉林石化公司乙二醇厂、合成树脂/橡胶厂、电石厂、有机合成厂、石化染料厂等众多下属厂,这些工厂大部分分布在吉林市北部的龙潭区,而且吉林市作为石油化工产业城,较高氯代的多氯联苯异构体含量也要显著高于其他地区^[7]。高氯联苯具有蒸汽压小、水溶性低、脂溶性高等特点,在环境中不易挥发,通过大气进行长距离输送的趋势减弱,与低氯联苯相比更加稳定,因此更易于在污染源附近的土壤中积累。

2.3 PCBs 的相关性分析

土壤有机质含量是影响疏水性有机物在土壤中吸附量的重要因素之一,有机质含量越高,土壤对 PCBs 的吸附量也越高^[9]。利用 SPSS19.0 对 PCBs 各成分进行相关性分析。由表3可见,PCB44、PCB101、PCB138、PCB126、PCB180 和 PCB198 之间呈显著相关关系,表明其来源可能相同;同时,PCB28、PCB118 和 PCB153 之间显示出显著相关性,表明其来源的相

似性。PCBs 各同系物和有机质之间基本上不存在显著的相关性,表明 PCBs 在土壤中的富集基本上不受有机质的影响。这与 Fabietti 等^[14]报道的情况类似,在其研究中也发现,农田土壤中有有机质与 PCBs 之间没有显著的相关关系。这种现象可能是因为除了土壤中有有机质以外,存在其他的因素如水分、土地利用类型以及相距污染点的远近等对污染物传输迁移具有更强影响^[15]。

2.4 PCBs 的来源解析

环境中的 PCBs 主要来自以下3个途径^[16]:增塑剂中的 PCBs 挥发;废弃物焚烧时 PCBs 蒸发;含 PCBs 的工业液体的渗漏。我国20世纪60—70年代累计生产了近万吨 PCBs,其中9000 t 为1号 PCBs (主要成分为三氯代 PCBs),其构成与 Aroclor1242 类似,主要用作电力电容器的介质;另外1000 t 为2号 PCBs (主要成分为五氯代 PCBs),其构成与 Aroclor1254 类似,主要用作油漆添加剂、绝缘材料等产品。我国的 PCBs 还有一部分由国外输入,一些进口变压器油中 PCBs 含量高达70%以上,同时由于人为因素,PCBs 泄露现象时有发生^[17]。

在解析有机污染物来源时,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^[18-19]。本文利用 SPSS19.0 分析吉林市城郊蔬菜地

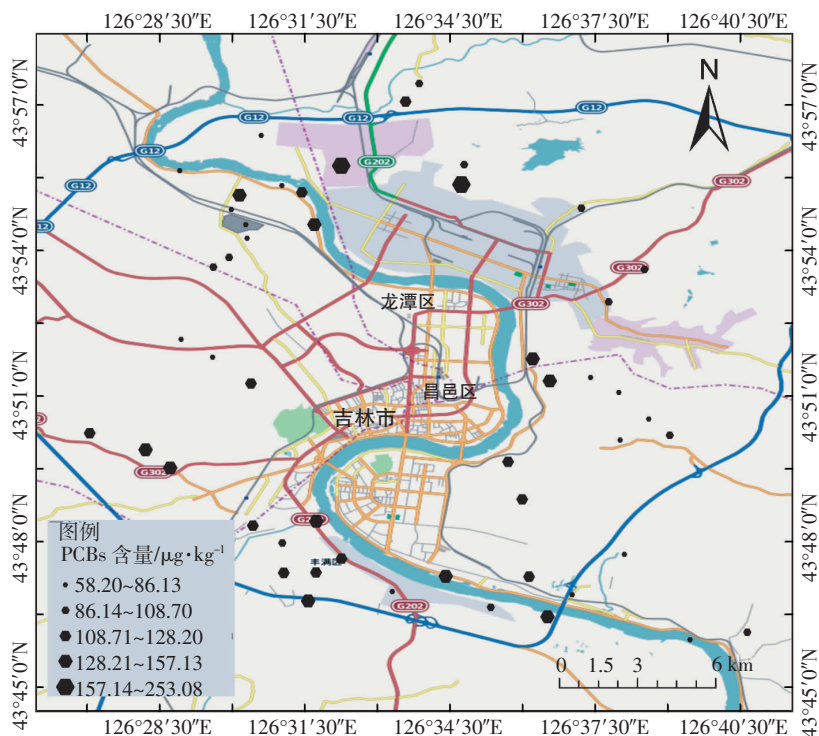


图2 土壤中 PCBs 含量分布图

Figure 2 Distribution of PCBs content in vegetable soils

表 3 PCBs 浓度及各参数 Pearson 相关系数矩阵
Table 3 Pearson coefficients between PCBs and PCBs and soil properties

项目	PCB8	PCB28	PCB52	PCB44	PCB101	PCB118	PCB153	PCB138	PCB126	PCB180	PCB198	Σ11PCBs	有机质
PCB8	1.000	0.155	0.097	0.405**	0.092	0.254	0.103	0.039	0.135	-0.055	0.280**	0.518**	0.069
PCB28		1.000	0.007	-0.088	0.062	0.365**	0.462**	-0.168	-0.096	0.219	-0.131	0.232	-0.053
PCB52			1.000	0.014	0.011	-0.117	0.034	0.129	-0.013	-0.026	0.181	0.223	0.174
PCB44				1.000	0.375**	0.065	-0.024	0.662**	0.491**	-0.296**	0.575**	0.608**	0.154
PCB101					1.000	0.459**	0.319**	0.510**	0.105	-0.366**	0.433**	0.342**	0.060
PCB118						1.000	0.549**	-0.068	-0.032	-0.077	-0.003	0.196	0.097
PCB153							1.000	0.068	-0.200	-0.175	0.002	0.083	0.084
PCB138								1.000	0.563**	-0.506**	0.744**	0.547**	0.156
PCB126									1.000	-0.181	0.648**	0.658**	0.048
PCB180										1.000	-0.370**	0.144	-0.036
PCB198											1.000	0.730**	0.103
Σ11PCBs												1.000	0.139
有机质													1.000

注:* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

中 50 个采样点的表层土壤中 PCBs 的主要来源。对 PCBs 各组分进行主成分分析,提取特征值大于 1 的主要因子,得到 4 个主成分,主成分的变异数见表4。这 4 个主成分的方差贡献率分别为 31.671%、20.053%、11.161% 和 9.624% , 累 计 贡 献 率 达 72.508%,即所得的 4 个主成分能够反映 11 个原始变量包含信息的 72.508%以上。

表 4 主成分变异数分析表
Table 4 Results of principal component analysis

成分	旋转平方和载入		
	合计	贡献率/%	累计贡献率/%
主成分 1	3.484	31.671	31.671
主成分 2	2.206	20.053	51.723
主成分 3	1.228	11.161	62.884
主成分 4	1.059	9.624	72.508

从表 5 可以看出,主成分 1(PC1)中,同系物 PCB44、PCB101、PCB138、PCB126 和 PCB198 具有较大的正载荷(>0.60),负方向为 PCB180,因子载荷超过 0.50,其余组分的因子载荷不大。这 6 种同系物在 Aroclor1254 和 Aroclor1260 中相对含量较高,因此主成分 1 的污染可能主要来自含 Aroclor1254 的油漆、绝缘材料等工业品。主成分 2(PC1)中,PCB28、PCB118、PCB153 具有较大的正载荷(>0.65),其余组分的因子载荷很小。这 3 种同系物中 PCB28 的含量占 60%以上,其在 Aroclor1242 中相对含量较高,因此可以认为主成分 2 的污染主要来源于电力电容器的浸渍剂。对于主成分 3(PC3)和主成分 4(PC4),PCB8

表 5 因子载荷表
Table 5 Factor loading table

变量	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4
PCB8	0.329	0.271	0.687	-0.022
PCB28	-0.131	0.677	0.343	0.042
PCB52	0.126	-0.060	0.195	0.941
PCB44	0.791	-0.055	0.249	-0.160
PCB101	0.616	0.438	-0.348	-0.009
PCB118	0.151	0.822	-0.007	-0.198
PCB153	0.108	0.818	-0.181	0.172
PCB138	0.884	-0.149	-0.184	0.077
PCB126	0.662	-0.302	0.275	-0.234
PCB180	-0.575	-0.030	0.509	-0.094
PCB198	0.867	-0.135	0.122	0.081

(>0.65)和 PCB52(>0.90)分别具有较大的正载荷,其余组分的因子载荷较小,通常情况下,氯原子数较低的低氯代 PCBs 比氯原子数较高的高氯代 PCBs 蒸汽压高,更容易在大气中进行迁移,最终经大气干湿沉降返回地表,因此主成分 3 与主成分 4 的污染可能主要来源于废弃物焚烧及增塑剂中 PCBs 的挥发。以上各主成分的解释与吉林市近郊蔬菜地中 PCBs 以高氯代 PCBs 为主的组成特征相吻合,也与吉林市作为重要石油化工城市使用含 PCBs 工业品的事实相符合。

2.5 PCBs 的生态风险评价

本文采用目前国际上广泛应用的环境质量标准风险评价值和毒性当量因子法对吉林市近郊蔬菜土壤中 PCBs 污染状况进行了评价。

2.5.1 环境质量标准风险评价法

运用美国学者 Long 等^[20]建立的污染物风险评价标准综合评价吉林市城郊蔬菜土壤中 PCBs 潜在风险情况,参数和结果见表 6。其中:ERL 表示低毒性效应值,当土壤中多氯联苯大于 ERL,则生态风险概率小于 10%;ERM 表示毒性效应中值,当土壤中多氯联苯大于 ERM,则生态风险概率大于 75%。从表 2 可知,50 个土壤样品中总 PCBs 的含量均大于 ERL,2 个大于 ERM。据此可界定,吉林市近郊蔬菜土壤中 PCBs 对生物毒性效应几率介于 10%~75%,偶尔会出现毒性效应,为中度生态污染,应引起足够重视。

表 6 土壤中多氯联苯生态风险评价
Table 6 Ecological risk assessment of PCBs in soil

项目	ERL/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	ERM/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	样本数/个	
			>ERL	>ERM
PCBs	22.7	180	50	2

2.5.2 毒性当量因子法

毒性当量因子(Toxic Equivalency Factors, TEFs)方法,即某 PCBs 的毒性与 2,3,7,8-TCDD(2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-D-dioxin)的毒性相比得到的系数,样品中某 PCBs 的质量浓度或质量分数与其毒性当量因子 TEF 的乘积,即为其毒性当量(Toxic Equivalent Quantity, TEQ)浓度,而样品的毒性大小就等于样品中各同类物的 TEQ 总和^[21]。计算公式如下:

$$\text{TEQ} = \sum \text{PCB}_i \times \text{TEF}_i$$

式中:TEQ 为 PCBs 毒性当量; PCB_i 为某 PCBs 质量浓度; TEF_i 为某 PCBs 毒性当量因子。

本文选取世界卫生组织(WHO)提供的几种常见指示性 PCBs 的 TEF_i 值计算土壤中 PCBs 的毒性当量^[21](表 7)。计算结果表明,本研究 PCBs 毒性当量(TEQ)的范围为 $0.323\sim 1.717 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $0.898 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与国内其他地区相比,吉林市近郊蔬菜土壤 PCBs 的 TEQ 明显高于上海($8\times 10^{-3} \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[22],但远低于浙江($0.153\sim 34.8 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[23]和某废旧电容器封存点土壤($9.94 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[24],与北京($0.350 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[25]处于同一数量级。总的来说,吉林市近郊蔬菜土壤 PCBs 生态风险属于中等水平,与风险质量标准的评价结果一致;但是低于美国 EPA 规定的土壤污染 TEQ 容许值

$250 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且根据其他国家居住地土壤中二噁英 TEQ 控制标准(新西兰为 $1.50\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、德国为 $1.50\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、美国为 $1.00\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、日本为 $1.00\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、芬兰为 $500 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[26],吉林市近郊蔬菜土壤中 PCBs 的 TEQ 符合标准,在适中范围内,故风险性较小。但由于 PCBs 具有生物累积性、难降解性及远距离迁移性,仍需引起重视。

3 结论

(1)吉林市近郊蔬菜土壤中 PCBs 含量具有较大的空间分布差异,主要以高氯联苯为主,部分土壤中 PCBs 含量超出 GB 15618—2008《土壤环境质量标准(修订)》二级控制标准,其中最高值主要分布在城郊北部。

(2)主成分分析发现,吉林市近郊蔬菜土壤中 PCBs 的主要来源是油漆、绝缘材料等工业品及电力电容器的浸渍剂,其次是废弃物焚烧及增塑剂所含 PCBs 的挥发。

(3)吉林市近郊蔬菜土壤环境质量已受到人为活动的显著影响,PCBs 生态风险整体处于中等水平,具有潜在的人群健康风险。

参考文献:

- [1] 曹先仲,陈花果,申松梅,等.多氯联苯的性质及其对环境的危害[J].中国科技论文在线,2008,3(5):375-381.
CAO Xian-zhong, CHEN Hua-guo, SHEN Song-mei, et al. The nature of PCBs and its harm to the environment[J]. China Sciencepaper Online, 2008, 3(5):375-381.
- [2] 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.
- [3] 聂志强,李卫建,王璐,等.土壤环境中 POPs 污染现状及治理技术研究进展[J].安徽农业科学,2008,36(15):6478-6480.
NIE Zhi-qiang, LI Wei-jian, WANG Lu, et al. Pollution status of POPs and research progress in treatment technology in soil environment[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(15):6478-6480.
- [4] 蒋煜峰,王学彤,吴明红,等.上海农村及郊区土壤中 PCBs 污染特征及来源研究[J].农业环境科学学报,2010,29(5):899-903.
JIANG Yu-feng, WANG Xue-tong, WU Ming-hong, et al. Study on pollution characteristics and sources of PCBs in rural areas and suburbs of

表 7 各 PCBs 对应 TEF_i 值

Table 7 Toxic equivalent factors(TEF_i) of PCBs

PCBs 同系物	PCB28	PCB52	PCB101	PCB118	PCB153	PCB138	PCB180
TEF_i 值	0.000 002	0.000 005	0.000 03	0.000 03	0.000 01	0.000 02	0.000 01

- Shanghai soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2010, 29(5): 899-903.
- [5] Wang T, Wang Y W, Fu J J, et al. Characteristic accumulation and soil penetration of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in wastewater irrigated farmlands[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(8): 1045-1051.
- [6] 马万里, 齐虹, 孙德智. 哈尔滨市土壤中 PCBs 污染现状研究[J]. 环境保护科学, 2008, 34(2): 67-69.
MA Wan-li, QI Hong, SUN De-zhi. Study on pollution status of PCBs in the soil of Harbin city[J]. *Environmental Protection Science*, 2008, 34(2): 67-69.
- [7] 潘静, 杨永亮, 盖楠, 等. 吉林省典型工农业地区多介质样品中有机氯农药和多氯联苯分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2210-2217.
PAN Jing, YANG Yong-liang, GAI Nan, et al. Distribution of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in multi-media samples in typical industrial and agricultural area of Jilin Province[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(11): 2210-2217.
- [8] Broghini F, Grimalt J O, Aanchez-Hernandez J C, et al. Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land(Antarctica)[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(3): 271-278.
- [9] 王学彤, 李元成, 张媛, 等. 电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 587-591.
WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, et al. Pollution characteristics of PCBs in agricultural soils in e-waste dismantling area[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 587-591.
- [10] Manz M, Wenzel K D, Dietz U, et al. Persistent organic pollutants in agricultural soils of central Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 277(1-3): 187-198.
- [11] Armitage J M, Hanson M, Axelman J, et al. Levels and vertical distribution of PCBs in agricultural and natural soils from Sweden[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1-3): 344-352.
- [12] Falandysz J, Brudnowska B, Kawano M, et al. Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in soils from the southern part of Poland[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2001, 40: 173-178.
- [13] Fiedler H, Hub M, Hutzinger O, et al. Stoffbericht Hexachlorcyclohexan HCH[M]. Baden-Wurtemberg: Landesamt für Umweltschutz Baden Wurtemberg, 1993: 30-38.
- [14] Fabietti Q, Biasioli M, Barberis R, et al. Soil contamination by organic and inorganic pollutants at the regional scale: The case of Piedmont, Italy[J]. *Soil Sediment*, 2009, 10(2): 290-300.
- [15] 唐先进. 固废拆解地区农田土壤多氯联苯污染调查与生物修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 47-51.
TANG Xian-jin. Investigation on PCBs pollution and research on biological remediation in farmland soils of solid waste dismantling area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 47-51.
- [16] 联合国环境规划署, 世界卫生组织. 多氯联苯和多氯三联苯的环境卫生基准[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 23-30.
The United Nations Environment Programme, World Health Organization. Environmental health criteria of PCBs and PCTs[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1987: 23-30.
- [17] 邢颖, 吕永龙, 刘文彬, 等. 中国部分水域沉积物中多氯联苯污染物的空间分布、污染评价及影响因素分析[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 228.
XING Ying, LÜ Yong-long, LIU Wen-bin, et al. Assessment of PCBs pollution in spatial distribution and analysis of the PCBs sources in sediments in China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 228.
- [18] 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海崇明岛农田土壤中多氯联苯的残留特征[J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 116-120.
ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, et al. The residual characteristics of PCBs in farmland soils in Shanghai Chongming Island[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(1): 116-120.
- [19] 王祥云, 邓勋飞, 杨洪达, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1512-1518.
WANG Xiang-yun, DENG Xun-fei, YANG Hong-da, et al. The analysis of distribution characteristics and sources of seven kinds indicative PCBs in Jinhua city[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2012, 31(8): 1512-1518.
- [20] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects with ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [21] 黄宏, 尹方, 吴莹, 等. 长江口表层沉积物中多氯联苯残留和风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1500-1505.
HUANG Hong, YIN Fang, WU Ying, et al. The residues and risk assessment of PCBs in surface sediments of Yangtze Delta[J]. *Tongji University(Natural Science)*, 2011, 39(10): 1500-1505.
- [22] Jiang Y F, Wang X T, Zhu K, et al. Polychlorinated biphenyls contamination in urban soil of Shanghai: Level, compositional profiles and source identification[J]. *Chemosphere*, 2011, 83: 767-773.
- [23] 韩见龙, 沈海涛, 于村, 等. 浙江省部分地区土壤中二噁英和多氯联苯的污染水平初探[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(5): 1124-1127.
HAN Jian-long, SHEN Hai-tao, YU Cun, et al. Study on pollution levels of dioxins and PCBs in the soil in some areas of Zhejiang Province[J]. *China Medical Journal*, 2009, 19(5): 1124-1127.
- [24] 周玲莉, 吴广龙, 薛南冬, 等. 废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 704-710.
ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, et al. The pollution characteristics and health risk assessment of PCBs waste capacitor sealing point soils[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 704-710.
- [25] Wu S, Xia X H, Yang L Y, et al. Distribution, source and risk assessment of PCBs in urban soils of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2011, 82: 732-738.
- [26] 王楠楠. 辽河口湿地土壤 PAHs 及 PCBs 的健康风险与生态风险研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 50-51.
WANG Nan-nan. Study on health risk and ecological risk of PAHs and PCBs of Liaohu estuarine wetland soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 50-51.