

太原市农田土壤中多氯联苯污染特征及健康风险

张靖雯¹, 张红^{1*}, 刘勇², 李深泉³ (1. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006; 2. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006; 3. 明尼苏达大学德鲁斯分校环境科学学院, 美国德鲁斯 MN558121)

摘要 [目的]研究多氯联苯(PCBs)在太原市农田土壤中的分布特征、来源以及对周围人群的健康风险。[方法]以太原市农田土壤为研究对象,分析测定土壤中7种指示性PCBs的含量,并根据太原市人群实际情况的暴露参数和USEPA的部分参数,对太原市农田土壤中PCBs的健康风险进行评价。[结果]太原市农田土壤中7种指示性PCBs的平均值为87.29 μg/kg,以六氯及以上的高氯联苯为主;与国内其他城市土壤中PCBs的残留量相比较,太原市农田土壤中PCBs残留量处于相对较高水平;且35%采样点的Σ7PCBs残留量高于农业用地限定值;主成分分析结果表明,土壤中PCBs污染可能主要与大型企业电子电力设备绝缘材料、电容器浸渍剂和变压器的泄漏,以及含有Aroclor1254绝缘材料、油漆添加剂和化产车间使用Aroclor1260一类的工业产品有关;太原市农田土壤中的PCBs在敏感用地和非敏感用地方式下均不会对成人和儿童产生非致癌健康风险;在2种不同用地方式下太原市农田土壤中PCBs对成人的综合致癌风险较小,但对儿童会存在一定的致癌风险,3种暴露途径对健康风险贡献率依次为经口摄入>皮肤接触>呼吸吸入。[结论]该研究可为太原市土壤污染残留分布分析及其评价提供参考。

关键词 多氯联苯;农田土壤;来源;健康风险评估;太原市

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)35-0096-06

Residues Characters and Health Risk Assessment of PCBs in Agricultural Soils of Taiyuan City

ZHANG Jing-wen¹, ZHANG Hong^{1*}, LIU Yong² et al (1. College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006; 2. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006)

Abstract [Objective] To study the distribution and source of PCBs in Taiyuan's agricultural soil and the health risks posed to the people nearby. [Method] Farm land soil in Taiyuan was selected as the research objective to measure the content of 7 indicative PCBs in the soil. Based on the Taiyuan residents' exposure parameter and some parameters of USEPA, the health risks caused by PCBs were analyzed in Taiyuan's farmland soil. [Result] The average value of 7 indicative PCBs in Taiyuan's agricultural soil was 87.29 μg/kg, majorly consisting of high-chlorinated biphenyls with hexachlor or above; Compared to the PCBs study in other regions, the PCBs residue level in Taiyuan's agricultural soil remained relatively high and the residue volume of Σ7PCBs at 35% sampling sites appeared to be higher than the limit of agricultural land; The analysis output of the major content revealed that the pollution of PCBs in the soil might be mainly caused by the leakage of insulation materials from large electronic enterprises and the impregnate and transformer of capacitor, as well as the paint additive containing Aroclor1254, insulation materials and other industrial products containing Aroclor1260 used in the chemical production plants; The amount of PCBs accumulated in Taiyuan's agricultural soil would not bring any non-carcinogenic health risks to adults or children no matter in sensitive land use or insensitive land use. Considering the utilization in both these two types of land, the amount of PCBs in Taiyuan's agricultural soil only indicated a minor comprehensive carcinogenic risk to adult, while the risk might increase a little when it comes to children. The contribution of three ways of exposure to the health risks turned out to be: oral intake > skin contact > respiratory inhalation. [Conclusion] The research can give reference for studying pollution residue distribution and assessment.

Key words PCBs; Agricultural soils; Source; Health risk assessment; Taiyuan City

多氯联苯(PCBs)是一类人工合成的具有良好物理化学性质的氯代芳香烃类持久性有机污染物,分子式为(C₁₂H₁₀)_nCl_n。由于其具有化学性质稳定、耐热性强、不易燃、蒸汽压低、介电常数高等特点,曾作为润滑剂、塑增剂、杀虫剂、变压器和电容器中的绝缘介质等常用化工产品中主要成分,而被化工业、电力工业、冶金业等领域广泛使用^[1-3]。PCBs具有高毒性,在环境介质中的高滞留性以及生物体中的高蓄积性^[4-5],对神经、生殖、免疫系统的病变及致癌都具有一定的诱导作用^[6]。发达国家在20世纪70年代就已禁止PCBs的生产和使用,但由于其化学稳定性以及目前仍有PCBs作为副产品进入环境中^[7-10],直至今天PCBs仍广泛存在于各种环境介质中^[11-12],并且极易通过地表径流、大气沉降等方式在土壤有机质中积累,通过直接或间接多种途径进入生物体,威胁周围人群生命财产安全^[2,13]。因此,土

壤中PCBs的污染及健康风险愈发受到人们的重视。

太原市是我国华北地区重要的矿产、电力、能源城市和重工业基地,也是我国华北地区主要粮食生产基地之一^[14],在为我国经济长期发展中做出突出贡献的同时,工业废水、废气、固体废料等污染物不合理排放导致太原市城区中土壤污染日益严重。与此同时,随着城市化的进程加快,原本在城郊的热电厂、焦化厂、化肥厂等污染源被囊括进入太原市城区范围内,这些大型企业周边的部分农田未来将被规划成为工业用地和居住用地。所以,太原城区内农田的污染情况与人群的身体健康密切相关,研究城市农田土壤中污染物残留分布及其评价对太原市未来发展规划具有十分重要的意义。

针对太原市PCBs的研究,目前仅郭掌珍等^[15]研究表明汾河太原段表层沉积物中PCBs会造成一定的生态风险,而对太原市农田土壤中PCBs的残留浓度分布、来源及人群的健康风险未见报道。因此,该研究选择了包含欧洲食品污染标准中的7种指示性PCBs(PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180)单体进行讨论,对太原市农田表层土壤进行采样,初步分析了农田土壤中PCBs的暴露格局,揭示其可能来源,采用土壤健康风险评估模型并通过大量查阅

基金项目 国家自然科学基金项目(41271513)。

作者简介 张靖雯(1992—),女,山西太原人,硕士研究生,研究方向:土壤质量评价与污染修复。*通讯作者,教授,博士,从事生态风险评估与区域生态学研究。

收稿日期 2017-10-18

国内外学者对太原市暴露参数的研究的结果,挑选出了较为符合太原市人群的实际暴露参数,对太原市农田土壤中的 PCBs 进行健康风险评价,计算 2 类土地利用方式下儿童和成人在 PCBs 暴露下的致癌风险和非致癌风险。为太原市农田土壤质量评价和环境污染防治提供科学有效的指导,并对太原市风险评价防治提供数据基础。

1 研究方法

1.1 样品的采集 2013 年 10 月,在太原市城区范围内的农田中进行采样,采样点分布见图 1。在土壤样品的采集过程中,利用 GPS 在 31 个采样点定位,用小土铲除去土壤表层 3 mm 左右的浮土杂质,然后采集农田表层土壤(0~20 cm)。每个土壤样品不少于 1 kg 且均由样点周边 5~10 个土样均匀混合而成,采集的土壤样品保存于真空玻璃瓶内,后经冷冻自然风干后研磨过 100 目筛备用。该研究中所有污染物浓度均为干重结果。

1.2 多氯联苯的检测及质量控制 准确称取 2.5 g 土壤样品置于 50 mL 玻璃离心管中,同时加入 5 ng 标准替代物,静置等待 1 h 后,进行 2 次萃取;第 1 次萃取向样品离心管中加入 20 mL 丙酮/正己烷(1:1, V/V),第 2 次萃取向样品离心管中加入 10 mL 丙酮/正己烷(1:1, V/V)后,首先振荡 15 min 充分混匀,然后超声波萃取 20 min,用离心机 3 000 r/min 离心 15 min,将 2 次萃取的上清液转移到另一个新的离心管中,最后将 2 次上清液混合。依次经过高纯氮气吹扫、浓缩、活化、上样过柱后需将净化液浓缩定容至 500 μ L,转移到棕色进样瓶中,准备上机分析。

采用 HP 6890A 气相色谱仪(Agilent, USA)配置⁶³Ni 电子捕获检测器,色谱柱为 HP-5 石英毛细管柱(30 m \times 0.32 mm \times 0.25 μ m)。检测器温度 280 $^{\circ}$ C,进样器的温度 250 $^{\circ}$ C。程序升温:柱温以 10 $^{\circ}$ C/min 的速率从 80 $^{\circ}$ C 升至 200 $^{\circ}$ C,保留 1 min,然后以 5 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 280 $^{\circ}$ C,保留 5 min。无分流进样,进样量 1 L。根据标准物质的保留时间进行定性,外标法进行定量,信噪比为 3:1。内含 PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153、PCB180 共 7 种标准样品购自国家标准测试中心 SB05-174-2008 标样。

在分析样品的过程中,为使结果更加准确,每批样品至少做 1 个空白试样,需保证容器及试剂的清洁程度,确定无干扰峰出现;每 8 个样品分析 1 个校准曲线的中间点浓度标准溶液,每 10 个样品分析 1 个重复样品,且测定 1 个加标回收率,加标回收率均为 71.92%~115.50%(表 1)。PCB209 作为回收率指标物在土壤样品中的回收率为 56.28%~146.27%,通过重复基质加标,得到 PCBs 的方法检测限为 0.06~0.6 μ g/kg。

1.3 人体健康风险评价方法 采用 EPA 提出的健康风险评价“四步法”对太原市农田土壤中 PCBs 在不同土地利用方式下通过经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入 3 种主要暴露途径对儿童和成人的致癌和非致癌暴露量进行计算,从而评价太原市农田土壤中的 PCBs 残留产生的健康风险^[16]。

不同暴露途径下污染物致癌效应和非致癌效应暴露量

计算公式^[16]如下:

$$CDI_{\text{经口摄入}(ca(nc))} = \frac{C_s \times OSIR \times ED \times EF \times CF}{BW \times AT_{ca(nc)}} \quad (1)$$

$$CDI_{\text{皮肤接触}(ca(nc))} = \frac{C_s \times CF \times SAE \times SSAR \times EF \times ED \times ABS}{BW \times AT_{ca(nc)}} \quad (2)$$

$$CDI_{\text{呼吸吸入}(ca(nc))} = \frac{C_s \times DAIR \times ED \times EF}{PEF \times BW \times AT_{ca(nc)}} \quad (3)$$

式中: C_s 为 PCBs 的平均浓度; $CDI_{\text{经口摄入}(ca(nc))}$ 为经口摄入土壤的暴露量(ca 为致癌效应,nc 为非致癌效应); $CDI_{\text{皮肤接触}(ca(nc))}$ 为皮肤接触土壤的暴露量(ca 为致癌效应,nc 为非致癌效应); $CDI_{\text{呼吸吸入}(ca(nc))}$ 为呼吸吸入土壤的暴露量(ca 为致癌效应,nc 为非致癌效应)。公式中其余参数说明见表 2。

表 1 PCBs 平均加标浓度、标准偏差、回收率

Table 1 The mean spike concentration, standard deviation, recovery rate of PCBs

污染物 Pollutant	加标浓度 Spike concentration	标准偏差 Standard deviation	回收率 Recovery rate/%
PCB28	16.302 49	0.260 806	81.51
PCB52	21.851 65	0.212 813	109.26
PCB101	15.438 47	0.094 068	77.19
PCB118	14.383 36	0.070 290	71.92
PCB138	15.918 68	0.028 990	79.59
PCB153	23.100 47	0.054 383	115.50
PCB180	14.430 92	0.021 518	72.15

所有 3 种暴露途径下污染物致癌风险和非致癌风险计算公式如下:

$$CR = \sum CR_i = \sum (CDI_i \times SF_i) \quad (4)$$

$$HI = \sum HQ_i = \sum \left[\frac{CDI_i}{RfD_i} \right] \quad (5)$$

式中:CR 为综合致癌风险指数,无量纲; CR_i 为某一种暴露途径的致癌风险,无量纲;HI 为综合非致癌风险危害商,无量纲; HQ_i 为某一种暴露途径的非致癌风险,无量纲; CDI_i 为某一种暴露途径下土壤的暴露量; RfD_i 为某一种暴露途径的非致癌物参考剂量,USEPA 中提供 3 种暴露途径下 RfD 的参考值为 2.0×10^{-5} mg/(kg \cdot d); SF_i 为某一种暴露途径的致癌强度系数,经口摄入和皮肤接触下 SF 的参考值均为 2.0 mg/(kg \cdot d),呼吸吸入参考值为 2.18×10^{-3} mg/(kg \cdot d)^[12]。

在健康风险评价中暴露参数是极为重要的一部分,在查阅文献的基础上,结合段小丽等^[17-21]对太原市城市人群开展体征参数等一部分暴露参数的调查以及其他学者的调查统计结果,选出了较为符合太原市人群身体实际情况的暴露参数,并结合 USEPA 提供的部分参数,对太原市农田土壤中 PCBs 的健康风险进行评价,各项暴露因子及参数见表 2。

2 结果与分析

2.1 太原市农田土壤 PCBs 的污染特征 对太原市 31 个农田土壤样点中的 PCBs 进行统计分析,结果见表 3。7 种指示性 PCBs 的同系物在各个样点中都有不同程度的检出,检出率为 61.30%~100%,其中 PCB28、PCB118 的检出率最大且

表2 暴露参数的选取

Table 2 Selection of exposure parameters

暴露参数 Exposure parameters	单位 Unit	工人 Adult (非敏感用地 Non-sensitive land)	儿童 Children (敏感用地 Sensitive land)	成人 Adult (敏感用地 Sensitive land)
BW(受体体重) ^[19]	kg	60.5	15.9	60.5
OSIR(每日摄入土壤量) ^[16]	mg/d	100	200	100
SAE(皮肤接触表面积) ^[22]	m ²	1.614	0.866	1.614
DAIR(每日呼吸空气量) ^[22]	m ³ /d	14.5	7.5	14.5
SSAR(土壤-皮肤黏附系数) ^[16]	mg/cm ²	0.2	0.2	0.07
ED(暴露期) ^[16]	a	25	6	24
EF(暴露频率) ^[16]	d/a	250	350	350
CF(转换系数) ^[16]	kg/mg	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
EFO(室外暴露频率) ^[16]	d/a	62.5	62.5	87.5
AT(平均接触时间,非致癌/致癌) ^[16]	d	9 125/25 550	2 190/25 550	2 190/25 550
PEF(土壤尘产生因子) ^[16]	m ³ /kg	1.32 × 10 ⁻⁹	1.32 × 10 ⁻⁹	1.32 × 10 ⁻⁹
ABS(吸收因子) ^[16]	无量纲	0.1	0.1	0.1

均达到100%,PCB101的检出率最低仅为61.30%。其余同系物PCB153、PCB138、PCB180的检出率均为96.80%,PCB52的检出率为87.10%。7种指示性PCBs浓度的变异系数在81.20%~176.77%,表明太原市农田土壤各采样点间PCBs残留浓度有较大差异。PCBs总量的范围为16.88~

256.04 μg/kg,PCBs平均值达87.29 μg/kg,远高于西藏农田土壤(1.13~13.2 pg/g)^[23]和南极未污染土壤(0.36~0.59 μg/kg)^[24],从各种PCBs同系物的含量来看,PCB138的平均值最高达31.47 μg/kg,PCB118的平均含量最低为1.17 μg/kg。

表3 太原市农田土壤中PCBs的统计描述分析

Table 3 Descriptive statistics of PCBs agricultural soils of Taiyuan City

序号 No.	同系物 Homologue	组分 Component	最大值 Maximum μg/kg	最小值 Minimum μg/kg	平均值 Mean μg/kg	检出率 Detection rate//%	标准差 Standard deviation μg/kg	变异系数 CV//%
1	三氯	PCB28	46.49	0.84	9.97	100	8.87	88.96
2	四氯	PCB52	59.25	nd	11.88	87.10	14.01	117.92
3	五氯	PCB101	28.44	nd	4.52	61.30	7.99	176.77
		PCB118	4.27	0.45	1.17	100	0.95	81.20
4	六氯	PCB138	166.87	nd	31.47	96.80	52.73	167.76
5	七氯以上	PCB153	80.19	nd	17.86	96.80	23.11	129.83
		PCB180	58.87	nd	10.41	96.80	12.83	123.24
总计		PCBs	256.04	16.88	87.29	100	75.86	86.91

注:nd表示未检出

Note:nd stand for not detected

从太原市农田土壤中PCBs的暴露格局来看(图1),土壤中PCBs总残留高值主要分布在太原市矿业和化工业较为集中的区域内,灌区周围有零星分布;从PCBs组成结构来看(图1),三氯、四氯、五氯、六氯、七氯及七氯以上联苯含量分别占PCBs残留总量的11.42%、13.61%、6.51%、36.05%、32.38%,各采样点均以六氯及以上高氯联苯为主,同时也含有一定比例的三氯、四氯和五氯联苯。由于不同PCBs同系物之间挥发性差别很大,低氯代PCBs相对于高氯代PCBs具有更高挥发性,容易随大气进行迁移,而高氯代PCBs的挥发性和水溶性较差,脂溶性较高,能在污染源周围的土壤中长期储存。太原农田土壤PCBs中高氯代组分明显高于国产PCBs产品,可能由于境外PCBs的输入和高氯代组分的富集。这与太原市的矿业、化工业、冶金工业较多有密切关系。太原市的太原钢铁集团和太原第一焦化厂、太原第二焦化厂、太化集团以及周边矿区、火力发电厂使用或产生焦油、沥

青、增塑剂等化工原材料和废旧电力设备,废水、废料的排放,以及化肥、农药、塑料薄膜及污水灌溉等因素直接影响土壤中PCBs的残留量。

将太原市农田土壤中PCBs的残留量与国内其他城市的研究结果进行比较,虽然研究的PCBs同系物种类和采样年份不同,但从PCBs的平均残留水平来看,太原市农田土壤中PCBs的平均残留量高于北京、上海、青岛、长春、黄河三角洲以及我国某电子废物拆解区等地,但低于贵屿、温岭以及吉林市土壤中的PCBs残留量^[9],与世界其他地区研究结果相比^[10-13](表4),该研究区域土壤中PCBs残留量显著高于一些国家地区农业中土壤PCBs的残留量,但远低于典型污染区。总而言之,太原市土壤中PCBs残留水平相对较高,表明矿业、化工业、重工业等企业的生产强度及其所占比重对土壤中PCBs残留量产生了重要的影响作用。

根据我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)(修

订征求意见稿)土壤环境质量二级标准规定,我国农业用地土壤中 PCBs (PCB28、PCB52、PCB101、PCB118、PCB138、PCB153 和 PCB180 7 种单体总和)的允许浓度限值为 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。太原市农田土壤中 35% 的采样点的 $\Sigma 7\text{PCBs}$ 残

留量高于农业用地限定值,即已累积了一定的 PCBs,存在一定的潜在生态风险,需要有关部门采取相关措施对其进行治理及修复。

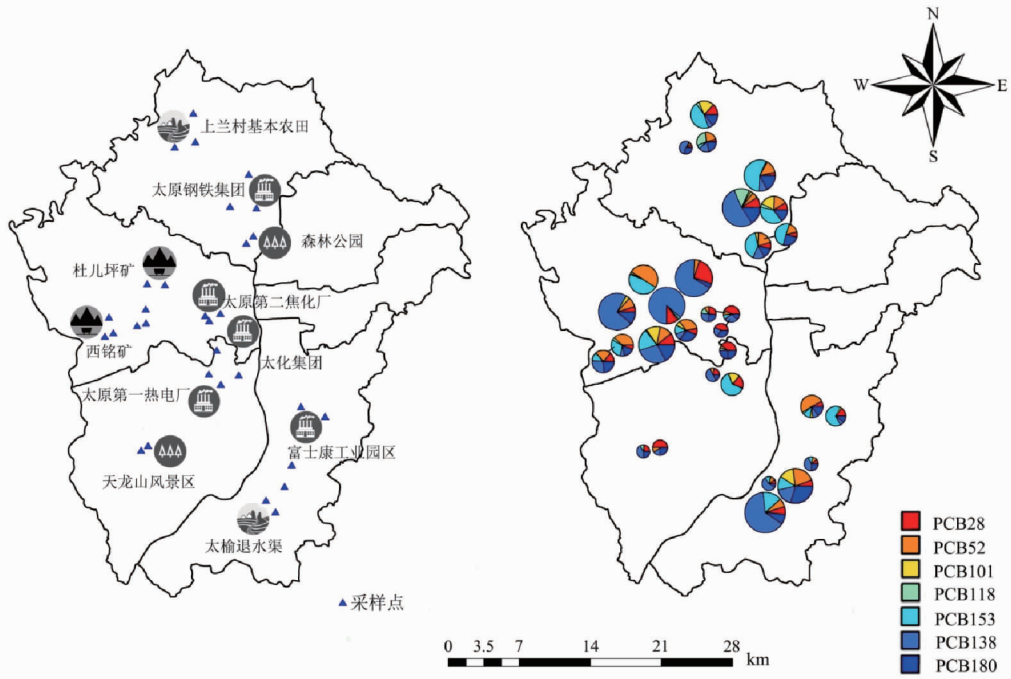


图 1 采样点分布及太原市农田土壤 PCBs 的暴露格局

Fig. 1 Distribution of soil samples and exposure pattern of PCBs agricultural soils of Taiyuan City

表 4 国内外城市土壤中 PCBs 的残留水平

Table 4 Concentrations of PCBs in urban soils around the world

序号 No.	地区 Area	PCBs 数目 PCBs number	浓度范围 Concentration range// $\mu\text{g}/\text{kg}$	均值 Mean// $\mu\text{g}/\text{kg}$
1	北京市 ^[25]	7	ND ~ 9.33	3.55
2	青岛市 ^[26]	7	3.1 ~ 14.9	8.0
3	上海崇明岛 ^[27]	8	0 ~ 261.0	56.0
4	贵屿农田 ^[28]	36	0.7 ~ 1 443.0	458.0
5	长春市 ^[4]	11	27.7 ~ 219.5	83.8
6	吉林市 ^[4]	11	58.2 ~ 253.1	111.0
7	温岭市 ^[29]	7	3.6 ~ 2 061.0	240
8	孟加拉 ^[30]	37	0.53 ~ 114.00	7.40
9	美国锡达拉皮兹 ^[31]	164	3.00 ~ 1 200.00	56.00
10	莫斯科 ^[32]	17	3.10 ~ 42.00	13.90
11	伦敦 ^[33]	—	9.00 ~ 2 642.00	123.0
12	英国农业土壤 ^[34]	—	1.7 ~ 1 199.0	—
13	德国农业土壤 ^[35]	—	-3.84 ~ 0.95	—
14	太原市	8	16.88 ~ 256.04	87.29
15	电子废物拆解区 ^[36]	—	0.38 ~ 937.00	75.70
16	我国典型污染区 ^[37]	—	—	788

2.2 太原市农田土壤 PCBs 的来源分析 利用 SPSS 19.0 对太原市 31 个农田土壤中 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 2 个主成分,主成分的变异数见表 5。这 2 个主成分的方差贡献率分别为 43.916%、21.107%,累计贡献率达 65.023%,即所得的 2 个主成分能够反映 7 个原始变量包含信息的 65.023%。

主成分 1 在 PCB28、PCB52、PCB101 中有较高正载荷,且方差贡献率为 43.916%,这些同系物大量存在于 Aroclor1242

产品中,且 PCB28、PCB52 的蒸汽压和水溶性较高,比较容易通过大气和降水传递,因此,主成分 1 的污染可能来源于大型企业电子电力设备绝缘材料和电容器的浸渍剂以及变压器的泄漏等(表 6)。主成分 2 中,PCB138、PCB153 所占载荷最大,且呈正相关,其方差贡献率为 21.107%,因此,主成分 2 可能与含有 Aroclor1254 油漆添加剂、绝缘材料以及化产车间使用 Aroclor1260 一类的工业产品有关。

矿业、化工业等活动是影响城市农业土壤污染物累积的

重要因素,太原市农田土壤中 PCBs 主要来源于境外 PCBs 的输入、钢铁冶炼、化工业、煤炭洗煤加工、污水灌溉等。这与太原市农田土壤中以高氯代 PCBs 为主要污染物的组成特征基本吻合,也与历史上太原市一直以煤炭、化工、金属冶炼、火力发电等重工业为主导产业,使用含 PCBs 工业品的事实相符合。

表 5 主成分得分

Table 5 Principal component scores for PCBs

成分 Component	旋转平方和载入 Rotated component square sum		
	特征根 Characteristic root	贡献率 Contribution rate // %	累计贡献率 Cumulative contribution rate // %
1	3.007	43.916	43.916
2	1.447	21.107	65.023

表 6 旋转后因子载荷

Table 6 Rotated component matrix

同系物 Homologue	主成分 Principal component	
	PC1	PC2
PCB153	0.578	0.614
PCB118	0.573	-0.420
PCB101	0.793	-0.241
PCB52	0.891	-0.037
PCB180	0.552	-0.572
PCB138	0.451	0.718
PCB28	0.696	0.146

2.3 太原市农田土壤中 PCBs 的健康风险评价 随着太原城市化进程的加快,太原市内一部分农田将被人群居住用地和工业用地等敏感用地和非敏感用地占用。采用 EPA 提出的健康风险“四步法”中提供的经口摄入、皮肤接触及呼吸吸入 3 种暴露途径在 7 种指示性 PCBs 平均浓度的 95% 置信上限对敏感用地方式下儿童和成人以及非敏感用地方式下工人进行致癌及非致癌风险指数计算,并以累积加和的方式计算总风险指数。太原市农田土壤 PCBs 的综合致癌健康风险和致癌健康风险结果见图 2、图 3。

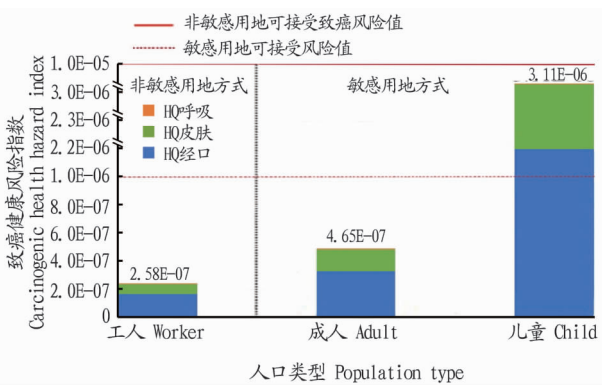


图 2 太原市农田土壤 PCBs 的综合致癌健康风险

Fig. 2 The carcinogenic health hazard index of PCBs agricultural soils of Taiyuan City

单一污染物的危害商 (HI) 的可接受值为 1^[38],在敏感和非敏感用地方式下成人、儿童和工人的累计危害商分别为

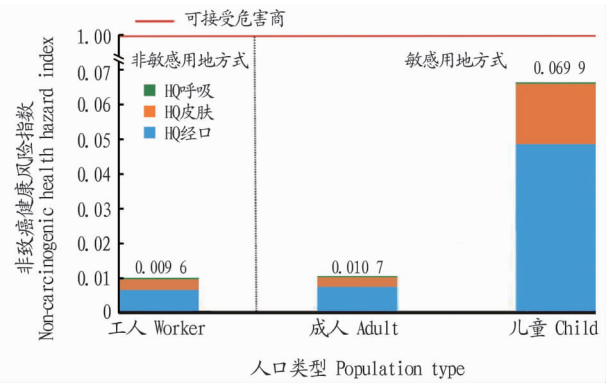


图 3 太原市农田土壤 PCBs 的综合非致癌健康风险

Fig. 3 The non-carcinogenic health hazard index of PCBs agricultural soils of Taiyuan City

0.010 7、0.069 9 和 0.009 6,均远小于 1,表明太原市农田土壤中的 PCBs 在不同用地方式下均不会对人体产生非致癌健康风险。3 种暴露人群中,敏感用地方式下儿童是最敏感的受体,其累计非致癌健康风险远高于成人和工人的非致癌健康风险。

从致癌指数来看,敏感用地方式下成人和非敏感用地方式下工人的累计致癌风险指数分别为 4.65×10^{-7} 和 2.582×10^{-7} ,均低于可接受致癌风险水平值(敏感用地 10^{-6} ,非敏感用地 10^{-5})^[38],表明太原市农田土壤中 PCBs 对成人和工人的致癌健康风险较小;但由于儿童普遍容易误食土壤,且体重远低于成人,平均作用时间较短,所以在敏感用地方式下,儿童的累计致癌风险指数 (3.11×10^{-6}) 超过了可接受致癌风险水平值 10^{-6} ,表明农田土壤中的 PCBs 会对儿童构成一定的致癌风险,需要引起有关部门的重视。从 3 种暴露途径来看,均以经口摄入途径对健康风险的贡献率所占比例最大,其次是皮肤接触途径,呼吸吸入途径对健康风险的贡献率十分微弱。最后值得注意的是,由于该研究只对 PCBs 的 7 种同系物进行健康风险评价,实际的致癌风险可能会更高。

3 结论与讨论

对太原市农田土壤中多氯联苯 (PCBs) 的暴露格局、来源以及在不同土地利用方式下对儿童和成人的健康风险进行研究,结果表明:

(1) 太原市农田土壤中 7 种指示性 PCBs 均有检出,PCBs 残留浓度范围在 16.88 ~ 256.04 $\mu\text{g}/\text{kg}$,PCBs 平均值为 87.29 $\mu\text{g}/\text{kg}$,土壤中 PCBs 总残留高值主要分布在太原市矿业和化工业较为集中的区域内,灌区周围有零星分布且各采样点均以六氯及以上高氯联苯为主,说明太原市农田土壤存在境外 PCBs 的输入和高氯代组分的富集。

(2) 与国内外其他城市土壤中 PCBs 的研究结果相比较,太原市农田土壤中 PCBs 残留量处于相对较高水平;且 35% 采样点的 $\Sigma 7\text{PCBs}$ 残留量高于农业用地限定值 (100 $\mu\text{g}/\text{kg}$),存在一定的潜在生态风险,需要有关部门采取相应措施对其进行治理及修复。

(3) 主成分分析进一步表明,土壤中 PCBs 污染可能主要与大型企业电子电力设备绝缘材料、电容器的浸渍剂和变

压器的泄漏,以及含有 Aroclor1254 油漆添加剂、绝缘材料、化生产车间使用 Aroclor1260 一类的工业产品有关。

(4) 健康风险评价结果表明,在敏感和非敏感用地方式下,成人和儿童的综合非致癌危害商均远小于 1,表明太原市农田土壤中的 PCBs 在不同用地方式下均不会对人体产生非致癌健康风险;在 2 种不同用地方式下太原市农田土壤中 PCBs 对成人的综合致癌健康风险较小,但对儿童会构成一定的致癌风险,需要引起有关部门的重视。3 种暴露途径对健康风险贡献率依次为经口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸吸入。

参考文献

- [1] 毕新慧,徐晓白.多氯联苯的环境行为[J].化学进展,2000,12(2):152-160.
- [2] 卢双,张旭,裴晋,等.黄河中下游流域表层土壤中多氯联苯的残留特征[J].中国环境科学,2016,36(9):2741-2748.
- [3] 刘耕耘,陈左生,史辉弘,等.北京土壤中的 PCBs 含量与组成[J].环境科学学报,2006,26(12):2013-2017.
- [4] 陈晓荣,王洋,刘强,等.不同工业城市郊区菜地土壤中多氯联苯的残留现状与健康风险评价[J].土壤与作物,2016,5(1):14-23.
- [5] SOBEK A, MCLACHLAN M S, BORGÁ K, et al. A Comparison of PCB bioaccumulation factors between an arctic and a temperate marine food web[J]. Science of the total environment, 2010, 408(13): 2753-2760.
- [6] 杨方星,徐盈.多氯联苯的羟基化代谢产物及其内分泌干扰机制[J].化学进展,2005,17(4):740-748.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SOLORZANO-OCCHOA G, DE LA ROS A D A, MAIZ-LARRALDE P, et al. Open burning of household waste: Effect of experimental condition on combustion quality and emission of PCDD, PCDF and PCB[J]. Chemosphere, 2012, 87(9): 1003-1008.
- [10] MARTINEZ A, ERDMAN N R, RODENBURG Z L, et al. Spatial Distribution of chlordanes and PCB congeners in soil in Cedar Rapids, Iowa, USA[J]. Environmental pollution, 2012, 161: 222-228.
- [11] 徐莉,滕应,张雪莲,等.多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合田间原位修复[J].中国环境科学,2008,28(7):646-650.
- [12] 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):228-234.
- [13] REN N Q, QUE M X, LI Y F, et al. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. Environmental science & technology, 2007, 41(11): 3971-3876.
- [14] 高鹏.太原市不同功能区土壤污染特征及健康风险评价[D].太原:山西大学,2016.
- [15] 郭掌珍,孟会生,张渊,等.汾河表层沉积物 PCBs 和 OCPs 含量、来源及生态风险[J].中国环境科学,2013,33(4):714-721.
- [16] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk Assessment Guidance for Superfund (Volume 1) Human Health Evaluation Manual, EPA/540/189/002 [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [17] 段小丽,聂静,王宗爽,等.健康风险评价中人体暴露参数的国内外研

究概况[J].环境与健康杂志,2009,26(4):370-373.

- [18] 王宗爽,段小丽,刘平,等.环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J].环境科学研究,2009,22(10):1164-1170.
- [19] 王贝贝,段小丽,蒋秋静,等.我国北方典型地区居民呼吸暴露参数研究[J].环境科学研究,2010,23(11):1421-1427.
- [20] 王喆,刘少卿,陈晓民,等.健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J].安全与环境学报,2008,8(4):152-156.
- [21] 莫小荣,吴烈善,邓书庭,等.某冶炼厂拆迁场地土壤重金属污染健康风险评价[J].生态毒理学报,2015,10(4):235-243.
- [22] 环境保护部.污染场地风险评估技术导则:HJ 25.3—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2014.
- [23] 王传飞,龚平,王小萍,等.西藏农田土和农作物中多氯联苯的分布、环境行为和与健康风险评估[J].生态毒理学报,2016,11(2):339-346.
- [24] BORGHINI F, GRIMALTI J O, SZNCHEZ-HERNANDEZ J C, et al. Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land (Antarctica)[J]. Chemosphere, 2005, 58(3): 271-278.
- [25] WU S, XIA X H, YANG L Y, et al. Distribution, source and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in urban soils of Beijing, China[J]. Chemosphere, 2011, 82: 732-738.
- [26] 耿存珍,李明伦,杨永亮,等.青岛地区土壤中 OCPs 和 PCBs 污染现状研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2006,21(2):42-48.
- [27] 周婕成,毕春娟,陈振杰,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.
- [28] WONG M H, WU S C, DENG W J, et al. Export of toxic chemicals: A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling[J]. Environment pollution, 2007, 149(2): 131-140.
- [29] TANG X J, SHEN C F, SHI D Z, et al. Heavy metal and persistent organic compound contamination in soil from Wenling: An emerging e-waste recycling city in Taizhou Area, China[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 173 (1/2/3): 653-660.
- [30] MAMONTOVA E A, MAMONTOV A A, TARASOVA E N, et al. Polychlorinated biphenyls in surface soil in urban and background areas of Mongolia[J]. Environment pollution, 2013, 182: 424-429.
- [31] MARTINEZ A, ERDMAN N R, RODENBURG Z L, et al. Spatial distribution of chlordanes and PCB congeners in soil in Cedar Rapids, Iowa, USA[J]. Environment pollution, 2012, 161(1): 222-228.
- [32] WILCKE W, KRAUSS M, SOFRONOV G, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in soils of the Moscow region: Concentrations and small-scale distribution along an urban-rural transect [J]. Environment pollution, 2006, 141(2): 327-335.
- [33] VANE C H, KIM A W, BERIRO D J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in urban soils of Greater London, UK[J]. Applied geochemistry, 2014, 51: 303-314.
- [34] FIEDLER H, HUB M, HUTZINGER O, et al. Stoffbericht Hexachlorcyclohexan HCH [M]. Baden-Württemberg: Landesamt für Umweltschutz Baden Württemberg, 1993.
- [35] MANZ M, WENZEL K D, DIETZE U, et al. Persistent organic pollutants in agricultural soils of central Germany[J]. Science of the total environment, 2001, 277(1/2/3): 187-198.
- [36] 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.
- [37] 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,1995,95(4):423-433.
- [38] NIU L L, XU C, YAO Y J, et al. Status, influences and risk assessment of hexachlorocyclohexanes in agricultural soils across China[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(21): 12140-12147.
- [19] 方圆,王妮,姚晓东,等.我国北方温带草地土壤微生物群落组成及其环境影响因素[J].北京大学学报(自然科学版),2017,53(1):142-150.
- [20] 樊晓刚,金珂,李兆君,等.不同施肥和耕作制度下土壤微生物多样性研究进展[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):744-751.
- [21] 肖辉林.华南红壤丘陵坡地的环境特征与可持续利用问题[J].山地学报,2002,20(5):594-599.
- [22] 吴才武,赵兰坡.土壤微生物多样性的研究方法[J].中国农学通报,2011,27(11):231-235.
- [23] 赵东鹏,马军,李姗姗,等.松花江佳木斯段北岸耕地水旱田土壤要素指标变迁[J].农业与技术,2017,37(7):11-12,27.

(上接第 95 页)

日趋板结,土壤有机质及保水能力均降低,所以应减少化肥的施用,增施有机肥;还可以根据不同的土壤微生物群落指标及理化性质,因地制宜配方施肥,促进精准农业的发展,增加土壤肥力,提高土地可持续利用能力。

参考文献

- [1] 王楠楠,韩冬雪,孙雪,等.降水变化对红松阔叶林土壤微生物功能多样性的影响[J].生态学报,2017,37(3):868-876.