

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.037

# 北京典型灌区土壤和农产品多氯联苯污染风险评估

李艳<sup>1,2</sup> 黄冠华<sup>2</sup> 顾华<sup>1,3</sup> 黄权中<sup>2</sup> 李奎<sup>1,3</sup> 刘洪禄<sup>1,3</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

3. 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048)

**摘要:** 为明确北京东南郊灌区表层土壤和农作物多氯联苯(PCBs)含量和污染水平以及人体健康风险,2015年在该灌区采集了20个土壤样品和28个作物样品,利用气相色谱-质谱联用仪分析了样品中7大类PCBs含量。研究表明,灌区表层土壤PCBs质量比为ND(低于检出限)到0.711 776  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,均值为0.43  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,总体上土壤PCBs含量随污灌历史年限增加而增加。本研究区表层土壤PCBs含量处于较低水平,土壤未受到PCBs污染且其生态风险概率均小于10%。灌区采集的冬小麦籽粒、大葱、茄子、梨、白薯、芥蓝PCBs含量均低于实验检出限,未检出;夏玉米籽粒、菜心和油菜PCBs总量分别为0.17~0.47  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、1.63  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和5.91  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。不同污灌历史年限并未显著影响夏玉米籽粒PCBs含量。本研究区农产品PCBs含量处于较低水平,均低于美国卫生及公共服务部建议限量。采集的土壤和农产品样品仅四氯联苯含量高于实验检出限,能检测出;一氯联苯到三氯联苯和五氯联苯到七氯联苯均低于实验检出限,未检出。本研究区成人和儿童PCBs致癌风险分别为 $8.49 \times 10^{-7}$ 和 $4.66 \times 10^{-7}$ ,非致癌风险分别为 $1.41 \times 10^{-1}$ 和 $3.88 \times 10^{-1}$ ,均低于US EPA规定限值,说明PCBs未对人群产生明显的健康危害。致癌危害和非致癌危害均以口-作物(玉米和蔬菜)为主,其对人体健康所造成的风险占总个人年风险的比例分别为99.79%~99.95%和99.81%~99.94%。

**关键词:** 多氯联苯; 土壤; 农产品; 风险评估

中图分类号: X825; X954 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)05-0313-10

## Assessment of Contamination Risk of PCBs in Soils and Agricultural Products in Typical Irrigation District in Beijing

LI Yan<sup>1,2</sup> HUANG Guanhua<sup>2</sup> GU Hua<sup>1,3</sup> HUANG Quanzhong<sup>2</sup> LI Lei<sup>1,3</sup> LIU Honglu<sup>1,3</sup>

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Beijing Engineering Technique Research Center for Exploration and Utilization of Non-conventional Water Resources and Water Use Efficiency, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In order to find out the concentration and pollution characteristics of polychlorinated biphenyls (PCBs) in topsoil and agricultural products in irrigation district at the southeastern suburb of Beijing, seven kinds of PCBs in 20 topsoil samples and 28 agricultural products samples in the irrigation district were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) in 2015. Results showed that the total concentrations of PCBs in topsoil were ranged from ND (lower than the limits of detection) to 0.711 776  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , with average concentration of 0.43  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . The concentration of PCBs was increased with the increase of sewage irrigation history. The concentrations of PCBs in topsoil were relatively lower as compared with those in soil reported in other places. According to soil quality guidelines in Canada and American researcher's risk assessment report, the concentrations of PCBs in topsoil did not pose a threat to the surrounding ecological environment. The concentrations of PCBs in winter wheat, Chinese spring onion, eggplant, pear, sweet potato and Chinese kale were lower than the detection limit. The

收稿日期: 2017-10-10 修回日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51339007)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B00)和国家重点研发计划项目(2016YFC0403105)

作者简介: 李艳(1986—),女,高级工程师,中国农业大学博士后,主要从事农业水肥高效利用研究,E-mail: liyan7986@126.com

通信作者: 刘洪禄(1963—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事再生水灌溉和农业节水研究,E-mail: liuhonglu@yeah.net

concentrations of PCBs in summer maize grain, Chinese flowering cabbage, oil seed rapeseed were 0.17 ~ 0.47  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 1.63  $\mu\text{g}/\text{kg}$  and 5.91  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , respectively. There was no significant difference for PCBs concentrations in summer maize grain among regions with different sewage irrigation histories. The concentrations of PCBs in agricultural products were relatively lower as compared with other studies. According to the tolerable daily intake (TDI) proposed by the U. S. Department of Health and Human Services, the concentrations of PCBs in agricultural products were less than the corresponding reference limit. For both soil and agricultural products, only the concentrations of 4-PCB were higher than the detection limit, so only 4-PCB could be detected, 1-PCB ~ 3-PCB and 5-PCB ~ 7-PCB could not be detected. The carcinogenic risk of adult and child caused by PCBs were  $8.49 \times 10^{-7}$  and  $4.66 \times 10^{-7}$ , respectively. The non-carcinogenic hazard index of PCBs for child and adult were  $3.88 \times 10^{-1}$  and  $1.41 \times 10^{-1}$ , respectively. All of them were lower than the threshold values proposed by US EPA. Dietary intake was the major route of human exposure, which accounted for 99.79% ~ 99.95% of the total carcinogenic risk and 99.81% ~ 99.94% of the total non-carcinogenic hazard index, respectively.

**Key words:** polychlorinated biphenyls; soil; agricultural products; risk assessment

## 0 引言

多氯联苯 (Polychlorinated biphenyls, PCBs) 是苯环上与碳原子相连接的氢被氯不同程度地取代而形成的化合物,是人工合成化合物,因其有良好的导热性、绝缘性和惰性而被广泛用于化工、塑料、电力、油漆和印刷等领域<sup>[1]</sup>。其具有环境持久性、低水溶性、抗生物降解性和生物毒性,可在环境中长距离迁移和长期残留,威胁人体健康和生态系统安全,已成为人们关注的全球性污染物<sup>[2-3]</sup>。

增塑剂中 PCBs 挥发、废弃物焚烧时 PCBs 蒸发、含 PCBs 的工业液体渗漏是环境中 PCBs 3 个主要来源<sup>[4]</sup>。农田土壤中 PCBs 来源主要是大气沉降、生物固体污染物排放、油的泄漏和蒸发以及灌溉水源等<sup>[2,5]</sup>。由于 PCBs 容易被土壤有机质吸附,而且很难降解,从而容易造成土壤 PCBs 污染,土壤中的 PCBs 又可以通过食物链累积在生物体内,最终威胁人体健康。

国内外研究者调查了不同城市、不同功能区域、不同灌溉种植模式下土壤和作物 PCBs 残留情况以及人体健康风险水平,研究得出,某些电子垃圾拆解区和近电子拆解区以及垃圾焚烧区土壤和作物 PCBs 质量比均值分别为 14.43 ~ 146.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$  和 12.50 ~ 432.60  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[6-10]</sup>,某些钢铁、汽车或石油化工等生产区(长春、吉林、迁安市)土壤 PCBs 质量比均值为 7.10 ~ 111.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[11-14]</sup>;不同水质灌溉土壤 PCBs 含量由大到小排序为污灌、混合灌溉、地下水灌溉,污灌或排污河道周边土壤 PCBs 质量比均值为 1.01 ~ 1.67  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[15-17]</sup>;不同功能区土壤 PCBs 含量由大到小总体上为工业园区、路边绿化带和农田、公园<sup>[18-19]</sup>;上海、珠江三角洲和香港等区域普通农田土壤 PCBs 质量比均值为 0.42 ~ 11.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[20-23]</sup>;总体上电子垃圾拆解区、垃圾焚

烧区和工业生产区土壤和作物 PCBs 含量高于普通区域农田系统含量。我国土壤 PCBs 多以低氯联苯为主,经口摄入途径对累积致癌风险和非致癌风险贡献率最大,土壤 PCBs 残留量与土壤有机质、粘粒含量相关<sup>[20]</sup>。

北京市东南郊灌区是北京地区主要农业生产基地之一,该灌区从 20 世纪 50 年代开始利用北京城区污水灌溉,从 2003 年开始逐步利用再生水灌溉。李艳等<sup>[24]</sup>研究了该灌区 PAHS 分布特征。目前关于该灌区 PCBs 的研究仅集中在凉水河附近的部分土壤<sup>[15,17]</sup>,而整个灌区土壤 PCBs 空间分布和农产品污染水平的研究还未见报道,灌区人体健康风险水平还不明确。因此本文开展该灌区 PCBs 污染水平调查研究,从土壤、农产品和人体健康风险三方面综合评估灌区 PCBs 污染水平,以期为该灌区以及其他相似区域土壤、粮食安全问题分析提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及样品采集

研究区位于北京市东南郊,其范围为北纬  $39^{\circ}26' \sim 40^{\circ}02'$ 、东经  $116^{\circ}32' \sim 116^{\circ}43'$ (图 1)。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温在 11 ~ 12 $^{\circ}\text{C}$  之间,多年平均日照时数为 2 459 h,多年平均降水量 565 mm。该研究区表层(0 ~ 20 cm)土壤粉粒、粘粒及砂砾质量百分数分别为 46% ~ 78.5%、10.5% ~ 27.5% 和 1.5% ~ 43.5%,土壤质地为粘壤土和壤土。该研究区污水灌溉历史年限主要为 40 a(区域 1)、30 a(区域 2)和 20 a(区域 3),如图 1 所示。

为明确研究区表层土壤和农产品 PCBs 含量水平及污染程度,在区域主要灌溉河道、渠道附近的农田布置土壤采样点,共 20 个,如图 1 所示。2015 年



图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

6 月和 9 月采集了土壤和农产品样品。土样采集时,从 100 m<sup>2</sup>正方形的 4 个顶点处取表层 0 ~ 20 cm 土样组成混合样品, -4℃ 冷藏, -20℃ 冷冻干燥,干燥后研磨样品,过 50 目筛。过筛后的土壤样品放入玻璃瓶中 -20℃ 保存待测。

6 月和 9 月农作物收获时采集作物样品,包括冬小麦籽粒、夏玉米籽粒和果蔬可食用部位,农产品采样情况见表 1。采集的农产品样品放入保温箱中运输至实验室,用自来水、蒸馏水依次冲洗干净,用滤纸沾干表面水分,4℃ 保存。采集的土壤和农产品样品用铝箔纸包裹,避免二次污染。

表 1 农产品样品数

Tab. 1 Number of agricultural product samples

区域	小麦/个	玉米/个	果蔬
区域 1	4	3	茄子 1 个,白薯 1 个,芥蓝 1 个
区域 2	4	4	菜心 2 个,油菜 2 棵,梨 1 个
区域 3	0	3	葱 1 棵,茄子 1 个

### 1.2 土壤和农产品中 PCBs 的索氏提取与测定方法

取 10.00 g 干燥后土样,加入 0.10 mg/kg PCBs 替代物(邻苯二甲酸二乙酯-d4),搅拌均匀后密闭过夜,用滤纸包好后放入索氏提取器,加入 1:1(体积比)丙酮和甲醇的混合液 220 mL 作为提取液。农产品在 65℃ 真空干燥箱中干燥 22 h,取一定量(小麦籽粒和玉米籽粒各取 5.00 g,果蔬各取 2.00 g)干燥后样品,加入 PCBs 替代物(0.10 mg/kg),搅拌均匀后密闭 12 h,用滤纸包好后放入索氏提取器,放入 220 mL 正己烷作为提取液。土壤和农产品样品索氏提取 12 h 后,用 50 g 无水硫酸钠过滤脱水提取液,用约 15 mL 各自相应提取液进行润洗。脱水后的提取液用旋转蒸发仪(50℃)和氮吹仪(50℃)浓缩至 0.8 ~ 1.5 mL 后经过 0.22 μm 滤膜过滤(采用柱净化会增加目标物的损失率,仅采用滤膜过滤可以提高目标物的回收率),然后转移至 1.5 mL 的样品

瓶(最后液体在 0.5 ~ 1.0 mL 之间),放在冰箱保存至待测。

使用气相色谱(7890A 型)-质谱(5975C 型)联用仪进行样品 PCBs 分析,包括一氯联苯、二氯联苯、三氯联苯、四氯联苯、五氯联苯、六氯联苯、七氯联苯 7 类化合物(共计 58 种 PCBs)。气相色谱(7890A 型)-质谱(5975C 型)联用仪采用美国安捷伦公司 HP-5MS 型毛细管柱:30 m × 0.25 mm × 0.25 μm。无分流进样,进样口温度 280℃,进样 1 μL,四级杆温度为 150℃,离子源温度为 230℃,接口温度为 280℃。采用程序控制 GC 炉温升温,40℃ 保持 2 min,5℃/min 升温至 290℃,保持 4 min。样品分析时采用 SIM 扫描模式,根据特征峰和保留时间进行定性分析,根据基峰面积进行定量分析。

质量控制与保证:每批试剂均分析试剂空白,每批样品做至少 2 个空白样,空白样测试结果均低于实验检出限。空白加标(内标物为二萘嵌苯-d12,购自 Sigma 公司)回收率在 70% ~ 120% 之间,样品替代物回收率为 80% ~ 120%;为检查仪器是否受污染,每 12 h 做一次溶剂空白;本研究中一氯联苯到七氯联苯的检出限为 0.01 ~ 0.03 μg/kg。

### 1.3 人体健康风险评估方法

采用美国能源部风险评估信息系统中化学物质风险模型用户指南里的暴露模型计算人群经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触等途径暴露污染物的日平均暴露剂量<sup>[25]</sup>,计算公式如下

$$A_{DD} = \begin{cases} C_1 I_{R1} E_{F1} E_{D1} / (B_w A_T) & (\text{口-作物}) \\ C_2 I_{R2} C_F E_{F2} E_{D2} / (B_w A_T) & (\text{口-土壤}) \\ C_2 C_F S_{A1} A_F A_{BS} E_{F2} E_{D2} / (B_w A_T) & (\text{皮肤-土壤}) \\ C_2 E_T (1/P_{EF}) E_{F2} E_{D2} I_{R3} / (B_w A_T) & (\text{呼吸-土壤}) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A_{DD}$ ——PCBs 日均暴露剂量,mg/(kg·d)

剩余参数定义和参考值取值见表 2,取值参考美国能源部风险评估信息系统中化学物质风险模型用户指南以及美国环境保护署超级基金人体健康风险评估指导<sup>[25-26]</sup>。

根据 PCBs 组分致癌性,进行致癌和非致癌风险评估,计算公式和相应参数取值参考美国土壤筛选水平补充指导和美国环境保护署超级基金人体健康风险评估指导以及美国风险评估信息系统<sup>[26-28]</sup>,即

$$H_I = A_{DD} / R_{FD} \quad (2)$$

$$R_{isk} = \begin{cases} A_{DD} S_F & (\text{低剂量暴露}) \\ 1 - \exp(-A_{DD} S_F) & (\text{高剂量暴露}) \end{cases} \quad (3)$$

表2 健康风险评估暴露参数

Tab.2 Exposure parameters of health risk assessment

参数	参考值	
	成人	儿童
灌区作物 PCBs 质量比均值 $C_1/(mg \cdot kg^{-1})$		
灌区土壤 PCBs 质量比均值 $C_2/(mg \cdot kg^{-1})$		
日均食物摄入量 $I_{R1}/(kg \cdot d^{-1})$	0.15(面粉),0.1(玉米),	0.10(面粉),0.05(玉米),
	0.345(蔬菜鲜质量)	0.231(蔬菜鲜质量)
日均土壤摄入量 $I_{R2}/(mg \cdot d^{-1})$	100	200
日均空气摄入量 $I_{R3}/(m^3 \cdot d^{-1})$	20	8
作物暴露频率 $E_{F1}/(d \cdot a^{-1})$	350	350
土壤暴露频率 $E_{F2}/(d \cdot a^{-1})$	250	250
作物暴露年限 $E_{D1}/a$	30	6
土壤暴露年限 $E_{D2}/a$	24	6
体重 $B_W/kg$	70	15
平均作用时间 $A_T/d$	70 × 365(致癌物质)	70 × 365(致癌物质)
	$E_D \times 365$ (非致癌物质)	$E_D \times 365$ (非致癌物质)
土壤经口、皮肤单位转换因子 $C_F/(kg \cdot mg^{-1})$		$1 \times 10^{-6}$
皮肤黏滞系数 $A_F/(mg \cdot cm^{-2} \cdot d^{-1})$	0.07	0.20
与土壤接触的皮肤面积 $S_{A1}/cm^2$	5 700	2 800
皮肤吸收土壤因子 $A_{BS}$	0.14	0.14
暴露时间 $E_T/(h \cdot d^{-1})$	8.0	8.0
土壤产生因子 $P_{EF}/(m^3 \cdot kg^{-1})$		$1.36 \times 10^9$

$$R_{fDs} = R_{fDm} A_{BSgi} \quad (4)$$

$$S_{Fs} = S_{Fm} / A_{BSgi} \quad (5)$$

$$S_{Fb} = I_{URb} B_{Wa} / I_{R3a} \quad (6)$$

式中  $H_I$ ——非致癌风险指数

$R_{fD}$ ——非致癌参考剂量,  $mg/(kg \cdot d)$

$R_{fDs}$ ——经皮肤摄入参考剂量

$R_{fDm}$ ——经口摄入参考剂量

$R_{isk}$ ——致癌暴露风险,若低剂量计算值大于0.01时则用高剂量暴露计算

$S_F$ ——污染物的致癌斜率因子,  $(kg \cdot d)/mg$

$S_{Fs}$ ——经皮肤的致癌斜率因子

$S_{Fm}$ ——经口的致癌斜率因子

$S_{Fb}$ ——经呼吸的致癌斜率因子

$A_{BSgi}$ ——经肠胃吸收污染物分数,取1.0

$I_{URb}$ ——呼吸吸入单位致癌因子

$I_{R3a}$ ——成人日均空气摄入量

$B_{Wa}$ ——成人体重

PCBs 非致癌参考剂量和致癌斜率因子参考值见表3。

表3 PCBs 非致癌参考剂量( $R_{fD}$ )和致癌斜率因子( $S_F$ )

Tab.3 Reference dose( $R_{fD}$ ) and slope factor( $S_F$ ) of PCBs

	$S_F/(kg \cdot d \cdot mg^{-1})$			$R_{fD}/(\mu g \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})$	
	经口	经皮肤	经呼吸	经口	经皮肤
PCBs	2.0	2.0	0.35	0.007	0.007

用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,利用方差分析中 LSD 法分析三区域夏玉米 PCBs 含量差异显著性,显著性水平选取 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌区表层土壤 PCBs 含量空间分布

图2为灌区表层土壤 PCBs 含量空间分布,其质量比为 ND(低于检出限)到  $0.711776 \mu g/kg$ ,均值为  $0.43 \mu g/kg$ 。总体上灌区偏东北部和偏西部 PCBs 含量最高,主要分布在张家湾镇和长子营镇;其次为灌区中部、东北部和南部地区,分布在马驹桥镇、采育镇等附近。表层土壤 PCBs 含量空间分布

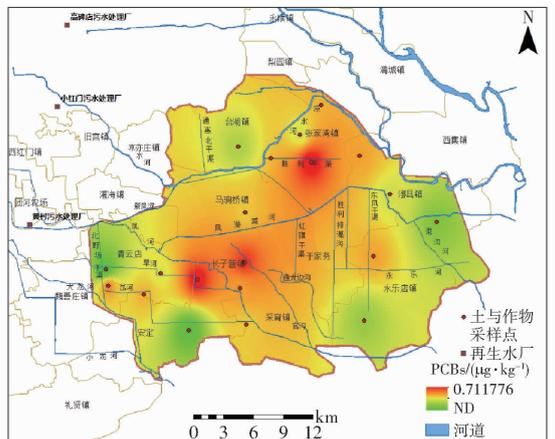


图2 灌区表层土壤 PCBs 含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of PCBs in topsoil in irrigation district

用 Microsoft Excel 2010 软件处理数据和作图,

特征总体上与灌区各区域污灌历史年限空间分布(图 1)相似。

表 4 显示了本研究成果与国内外其他不同研究区域土壤 PCBs 含量水平的比较。与国内研究成果相比,本研究灌区表层土壤 PCBs 含量与上海农村及郊区土壤、珠江三角洲农田土壤、北京通州混合灌溉和地下水灌溉农田土壤 PCBs 含量以及中国土壤背景值接近<sup>[17,21-22,29]</sup>;低于香港农村/城区、通州污灌农田以及天津市土壤 PCBs 含量<sup>[17-18,20]</sup>,远低于浙江电子废物拆解区、长春和吉林城郊菜地(工业基地)以及迁安市钢铁厂附近土壤 PCBs 含量<sup>[10,13-14]</sup>。

与国外研究成果相比,本研究灌区表层土壤 PCBs 含量低于德国农田、瑞士全境、瑞典非农业土壤、英国乡村土壤、意大利山区土壤 PCBs 含量以及全球土壤背景值<sup>[30-35]</sup>,远低于西班牙市区、法国垃圾焚烧厂周边土壤、南非工业区表层土壤和苏格兰市区土壤 PCBs 含量<sup>[6,36-38]</sup>。这说明总体上与国内研究成果相比,本研究区土壤 PCBs 含量处于较低水平,主要是我国 1965 年开始生产和使用 PCBs,1974 年停止生产和使用 PCBs 产品,我国生产和使用 PCBs 总体上比国外少,我国土壤(存在直接污染源除外)PCBs 含量总体较低<sup>[29,39]</sup>;另外研究区域为

郊区农田,一直用于农业生产,其 PCBs 主要来源于环境迁移和大气沉降。同时也可以看出总体上电器拆解区、污染区、工业基地土壤 PCBs 含量高于普通农田或乡村土壤 PCBs 含量。研究区存在几个值相对较高的点,分析发现这几个点分布在污灌历史较长的区域,另外这些点附近有加油站、高速公路或印刷厂(如胜利干渠值较高的点附近有印刷厂和加油站,官沟上游值较高的点离高速公路很近,旱河值较高的点附近存在加油站),因此这几个点土壤 PCBs 含量相对较高主要可能是受历史污灌、机动车尾气排放、加油站和印刷厂沉降等影响。参考加拿大农业土壤质量指导值(农业土壤 500 μg/kg)<sup>[40]</sup>,本研究区表层土壤 PCBs 含量远远低于该指导值,说明本研究区表层土壤未受到 PCBs 污染。

依据美国学者 LONG 等<sup>[41]</sup>建立的 PCBs 污染生态风险评估标准(PCBs 质量比小于 22.70 μg/kg 时,表示土壤生态风险概率小于 10%;PCBs 质量比为 22.70~180.00 μg/kg,表示土壤生态风险概率为 10%~50%;PCBs 质量比大于 180.00 μg/kg,表示土壤生态风险概率大于 50%),本研究区采集的土壤样品其 PCBs 生态风险概率均小于 10%。

### 2.2 灌区农产品 PCBs 含量

灌区采集的农产品中,冬小麦籽粒、大葱、茄子、

表 4 不同地区土壤 PCBs 含量的比较  
Tab. 4 Comparison of PCBs in soil from different regions

研究区域	PCBs 种类	PCBs 质量比/(μg·kg <sup>-1</sup> )		文献序号
		变化范围	均值	
北京市东南郊灌区	58	ND(低于检出限)到 0.711 776	0.43	(本文)
中国土壤背景值	51	0.19~1.14	0.42	[29]
香港农村/城区	7	0.07~9.90	2.45	[20]
上海农村及郊区土壤	62	0.07~2.53	0.53	[21]
珠江三角洲农田	6	0.00~32.79	0.42	[22]
国内研究成果				
北京通州区污灌、混合灌溉、地下水灌溉农田	26	1.45~1.93,0.13~0.50、0.15~0.42	1.67,0.35,0.31	[17]
天津市	84	0.82~8.88	3.56	[18]
浙江电子废物拆解区	141	0.78~937.00	75.70	[10]
长春工业基地城郊菜地	11	27.7~219	83.80	[13]
吉林工业基地城郊菜地	11	58.20~253.10	111.00	[13]
迁安市钢铁厂附近	25	0.02~288.10	90.07	[14]
国外研究成果				
德国农田	6	0.95~3.84	1.90	[30]
西班牙市区	20	9.00~66.00	32.00	[36]
全球土壤背景值	27	0.03~96.90	5.41	[35]
瑞士全境	7	0.86~12.00	3.55	[31]
法国垃圾焚烧厂周边土壤	17	5.20~41.20	14.43	[6]
瑞典非农业土壤	13	0.55~55.00	4.40	[32]
英国乡村土壤	33	0.27~80.60	5.03	[33]
南非工业区表层土壤	38		109.64	[37]
苏格兰市区	19	4.50~78.00	22.00	[38]
意大利山区土壤	12	0.50~5.00		[34]

梨、白薯、芥蓝的一氯联苯到七氯联苯含量均低于实验检出限,未检测出。其他作物 PCBs 含量见图 3。图 3 显示区域 1、2、3 夏玉米籽粒 PCBs 质量比均值分别为 0.47、0.17、0.44  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,显著性分析显示不同区域夏玉米籽粒 PCBs 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ),这说明不同污灌历史年限并未显著影响夏玉米籽粒 PCBs 含量。菜心和油菜 PCBs 质量比分别为 1.63、5.91  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

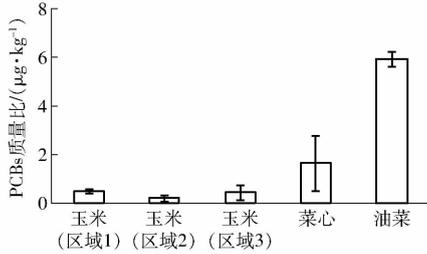


图 3 灌区农产品 PCBs 含量

Fig. 3 Content of PCBs in crops in irrigation district

表 5 不同地区作物 PCBs 含量的比较

Tab. 5 Comparison of PCBs in crops from different regions

研究区域	PCBs 种类	PCBs 质量比/ $(\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		文献序号
		变化范围	均值	
国内研究成果	北京市东南郊灌区	7	0.17 ~ 5.91	1.72 (本文)
	黄河三角洲白茅、芦苇	12	0.57 ~ 0.82	[42]
	广东贵屿污染区蔬菜	37	20.00 ~ 580.00	[46]
	浙江省电器拆解区蔬菜	14	5.98 ~ 130.70	64.00 [7]
	浙江台州污染区蔬菜	37	0.00 ~ 75.00	[47]
	浙江台州污染区蔬菜	21	1.30 ~ 1981.00	432.00 [9]
	广东贵屿污染区蔬菜	32	6.70 ~ 74.00	33.00 [48]
	吉林省工农业区水稻籽粒和玉米籽粒	7	8.70 ~ 52.90、6.50 ~ 82.70	21.80、29.60 [12]
国外研究成果	芬兰蔬菜	34		2.60 [43]
	意大利水果与蔬菜	21		1.54 [44]
	葡萄牙蔬菜	18		2.90 [45]
	西班牙蔬菜	18		2.60 [45]
	意大利蔬菜	18		4.10 [45]
	比利时蔬菜	18		2.20 [45]

注:其他研究区蔬菜 PCBs 含量如果是鲜质量含量,则按蔬菜水分含量 90% 转换为干质量含量。

美国卫生及公共服务部提出的经口摄入 PCBs 的每天平均允许摄入量为 20.00  $\text{ng}/\text{kg}$ <sup>[53]</sup>,若按成人体重 70 kg 计算,每人每天摄入小麦 0.15 kg、玉米 0.10 kg、蔬菜 0.345 kg(鲜质量),则美国建议摄入的冬小麦籽粒、夏玉米籽粒和蔬菜 PCBs 质量比限值分别为 9.33、14.00、40.58  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,本研究中农产品含量均低于规定限量。

### 2.3 灌区表层土壤和农产品 PCBs 各组分含量及来源

灌区表层土壤和农产品样品均能检测出四氯联苯;而一氯联苯到三氯联苯和五氯联苯到七氯联苯含量低于检出限,均未检测出。土壤和夏玉米籽粒四氯联苯检出率分别为 89.00% 和 70.00%。四氯

表 5 显示了国内外不同区域作物 PCBs 含量研究结果。与国内外研究结果相比,本研究灌区农作物 PCBs 含量与黄河三角洲白茅、芦苇、芬兰蔬菜、意大利水果与蔬菜、葡萄牙蔬菜、西班牙蔬菜以及比利时蔬菜 PCBs 含量接近<sup>[42-45]</sup>;远低于广东贵屿污染区蔬菜、浙江省电器拆解区蔬菜、浙江台州污染区蔬菜以及吉林省工农业区水稻籽粒和玉米籽粒 PCBs 含量<sup>[7,9,12,46-48]</sup>。这说明本研究区农作物 PCBs 含量处于较低水平,同时也可以看出总体上电器拆解区、污染区、工业基地作物 PCBs 含量高于普通农田农作物 PCBs 含量。本研究中油菜 PCBs 含量相对较高,主要可能受油菜自身结构和当地大气沉降影响。油菜叶子暴露在空气中容易受大气干湿沉降中 PCBs 的影响,同时研究区雾霾严重,大气中 PM2.5 含量高于国外其他地区<sup>[49-50]</sup>,大气中 PCBs 含量也相对较高<sup>[51-52]</sup>。

联苯检出率最多,这一现象可能与我国生产的 PCBs 有关。我国生产的 PCBs 包括约 9000t 1 号 PCBs 和 1000t 2 号 PCBs,根据这两种 PCBs 产品产量比例和成分,计算得出我国 PCBs 产品主要以三氯联苯和四氯联苯为主,因此我国环境介质中 PCBs 主要也以三氯联苯和四氯联苯为主,如刘耕耘等<sup>[54-55]</sup>在北京研究得出,土壤样品和大气沉降物中 PCBs 均以四氯联苯含量最高;张志<sup>[39]</sup>调查得出,我国表层土壤中 PCBs 以四氯同族体为主;李海玲<sup>[56]</sup>研究得出,我国城区土壤三氯联苯含量较高,而农村土壤四氯联苯含量较高。本研究中三氯联苯检出率较低原因有待进一步深入研究。

研究区目前用于灌溉的再生水仅能检测出四氯

联苯,一氯联苯到三氯联苯和五氯联苯到七氯联苯均未检测出;李淑珍等<sup>[57]</sup>研究得出,北京大气多氯联苯中四氯联苯含量远大于其他多氯联苯含量;本研究中土壤 PCBs 含量空间分布与污灌历史年限相关;因此本研区土壤中 PCBs 来源主要可能是历史污灌、再生水灌溉和大气沉降,农产品 PCBs 主要来源于土壤、灌溉水和大气沉降。

### 2.4 人体健康风险评估

表 6 显示了灌区 PCBs 人体健康致癌风险和非致癌风险(土壤、农产品 PCBs 含量取灌区均值)。US EPA 指出人体致癌风险水平上限为  $1 \times 10^{-4}$ ,一般可接受水平为  $1 \times 10^{-6}$ ;当非致癌危害指数大于 1 时,认为对人体健康产生危害<sup>[58]</sup>。

本研究中成人和儿童致癌风险分别为  $8.49 \times 10^{-7}$  和  $4.66 \times 10^{-7}$ ,均低于  $1 \times 10^{-6}$ ,说明 PCBs 未

对人群产生明显的致癌健康危害。致癌危害贡献以口-作物(玉米和蔬菜)为主,其对人体健康所造成的致癌风险占总个人年风险的比例分别为 99.95% (成人)和 99.79% (儿童),其中通过口-玉米的贡献率分别为 48.41% (成人)和 41.14% (儿童),通过口-蔬菜的贡献率分别为 51.54% (成人)和 58.65% (儿童)。

本研究中成人和儿童非致癌风险分别为  $1.41 \times 10^{-1}$  和  $3.88 \times 10^{-1}$ ,均低于 1,说明 PCBs 未对人群产生明显的非致癌健康危害。非致癌危害贡献以口-作物(玉米和蔬菜)为主,其对人体健康所造成的非致癌风险占总个人年风险的比例分别为 99.94% (成人)和 99.81% (儿童),其中通过口-玉米的贡献率分别为 48.41% (成人)和 41.15% (儿童),通过口-蔬菜的贡献率分别为 51.53% (成人)和 58.66% (儿童)。

表 6 PCBs 致癌健康风险计算结果  
Tab.6 Calculation results of carcinogenic risk of PCBs

人群	暴露途径-介质	致癌风险		非致癌风险	
		风险	各途径-介质贡献率/%	风险	各途径-介质贡献率/%
成人	皮肤-土壤	$1.61 \times 10^{-10}$	0.02	$2.4 \times 10^{-5}$	0.02
	口-玉米	$4.11 \times 10^{-7}$	48.41	$6.85 \times 10^{-2}$	48.41
	口-蔬菜	$4.37 \times 10^{-7}$	51.54	$7.29 \times 10^{-2}$	51.53
	口-土壤	$2.89 \times 10^{-10}$	0.03	$6.01 \times 10^{-5}$	0.04
	呼吸-土壤	$7.42 \times 10^{-15}$	0		
	小计	$8.49 \times 10^{-7}$	100	$1.41 \times 10^{-1}$	100
儿童	皮肤-土壤	$2.64 \times 10^{-10}$	0.06	$1.57 \times 10^{-4}$	0.04
	口-玉米	$1.92 \times 10^{-7}$	41.14	$1.60 \times 10^{-1}$	41.15
	口-蔬菜	$2.73 \times 10^{-7}$	58.65	$2.28 \times 10^{-1}$	58.66
	口-土壤	$6.73 \times 10^{-10}$	0.15	$5.61 \times 10^{-4}$	0.15
	呼吸-土壤	$3.46 \times 10^{-15}$	0		
	小计	$4.66 \times 10^{-7}$	100	$3.88 \times 10^{-1}$	100

### 3 结论

(1) 研究区灌区表层土壤 PCBs 质量比为 ND (低于检出限)到  $0.711\ 776\ \mu\text{g}/\text{kg}$ ,均值  $0.43\ \mu\text{g}/\text{kg}$ ,总体上随污灌历史年限增加而增加。与国内外研究成果相比,本研究区土壤 PCBs 含量处于较低水平。参考加拿大农业土壤质量指导值和美国学者土壤生态风险评估标准,本研究表层土壤未受到 PCBs 污染且其生态风险概率均小于 10%。

(2) 采集的冬小麦籽粒和部分果蔬一氯联苯到七氯联苯含量均低于实验检出限,未检出;夏玉米籽粒、菜心和油菜 PCBs 总量分别为  $0.17 \sim 0.47\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 、

$1.63\ \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $5.91\ \mu\text{g}/\text{kg}$ 。不同污灌历史年限并未显著影响夏玉米籽粒 PCBs 含量。与国内外研究结果相比,本研究区农产品 PCBs 含量处于较低水平且均低于美国卫生及公共服务部提出 PCBs 相应含量限值。

(3) 成人和儿童致癌风险分别为  $8.49 \times 10^{-7}$  和  $4.66 \times 10^{-7}$ ,非致癌风险分别为  $1.41 \times 10^{-1}$  和  $3.88 \times 10^{-1}$ ,均低于 US EPA 指出的可接受水平,说明 PCBs 未对人群产生明显的致癌和非致癌健康危害。致癌危害和非致癌危害贡献均以口-作物(玉米和蔬菜)为主,其对人体健康所造成的风险占总个人年风险的比例分别为 99.79% ~ 99.95% 和 99.81% ~ 99.94%。

### 参 考 文 献

1 BREIVIK K, SWEETMAN A, PACYNA J M, et al. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners—a mass balance approach: 1. global production and consumption[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 290:181–198.

- 2 ALCOCK R E, BACON J, BARDGET R D, et al. Persistence and fate of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sewage sludge-amended agricultural soils[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 93(1): 83–92.
- 3 MCGINN A P. POPs culture[J]. *World Watch*, 2000, 13(2): 26–36.
- 4 联合国环境规划署, 世界卫生组织. 环境卫生基准-2-多氯联苯和多氯三联苯[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 23–30.
- 5 WANG H, AN Q, DONG Y H, et al. Contamination and congener profiles of polychlorinated biphenyls from different agricultural top soils in a country of the Tai lake region, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 176(1–3): 1027–1031.
- 6 PIRARD C, EPPE G, MASSART A C, et al. Environmental and human impact of an old-timer incinerator in terms of dioxin and PCB level: a case study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(13): 4721–4728.
- 7 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其健康风险[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 434–441.  
ZHANG J Y, LI D F, WANG H F, 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. (in Chinese)
- 8 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.  
TANG X J. Investigation and bioremediation of agricultural soil contaminated with PCBs in E-Waste recycling area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- 9 邓绍坡, 骆永明, 宋静, 等. 典型地区多介质环境中多氯联苯、镉致癌风险评估[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 731–742.  
DENG S P, LUO Y M, SONG J, et al. Carcinogenic risk assessment of polychlorinated biphenyls and cadmium in multi-media of a typical area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 731–742. (in Chinese)
- 10 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 X T, LI Y C, ZHANG Y, et al. Characteristics of polychlorinated biphenyls in soils from an electronic waste recycling area[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 587–591. (in Chinese)
- 11 ODABASI M, BAYRAM A, ELBIR T, et al. Investigation of soil concentrations of persistent organic pollutants, trace elements, and anions due to iron-steel plant emissions in an industrial region in Turkey[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2010, 213(1–4): 375–388.
- 12 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 J, YANG Y L, GAI N, et al. Distribution of OCPs and PCBs in multi-medium environmental samples from typical industrial and agricultural areas in Jilin Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2210–2217. (in Chinese)
- 13 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况与健康风险评估[J]. *土壤与作物*, 2016, 5(1): 14–23.  
CHEN X R, WANG Y, LIU Q, et al. Residual characteristics and health risk assessment of polychlorinated biphenyls in suburban vegetable soils in different industrial cities[J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(1): 14–23. (in Chinese)
- 14 陈学斌, 刘文霞, 廖晓, 等. 典型钢铁厂周边土壤中多氯联苯分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(9): 3333–3338.  
CHEN X B, LIU W X, LIAO X, et al. The concentrations and profiles of PCBs in the surrounding soil of a typical steel plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(9): 3333–3338. (in Chinese)
- 15 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: 1045–1051.
- 16 薛源, 杨永亮, 万奎元, 等. 沈阳市细河周边农田土壤和大气中有机氯农药和多氯联苯初步研究[J]. *岩矿测试*, 2011, 30(1): 27–32.  
XUE Y, YANG Y L, WAN K Y, et al. Preliminary study on distribution of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils and atmosphere along the Xihe River in Shenyang City[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(1): 27–32. (in Chinese)
- 17 韩善龙, 王宝盛, 阮挺, 等. 不同水源灌溉的农田表层土壤中多氯联苯和多溴联苯醚的浓度分布特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(7): 958–965.  
HAN S L, WANG B S, RUAN T, et al. Within-field spatial distribution of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in farm soils with different irrigation sources[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(7): 958–965. (in Chinese)
- 18 李志勇, 刘金巍, 孔少飞, 等. 天津市区表层土壤中多氯联苯的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 685–690.  
LI Z Y, LIU J W, KONG S F, et al. Pollution characteristics of polychlorinated biphenyls in surface soils from Tianjin Urban Area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 685–690. (in Chinese)
- 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 X Y, DENG X F, YANG H D, et al. The distribution and source analysis of the seven indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in urban soils of Jinhua City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1512–1518. (in Chinese)
- 20 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(3–4): 244–251.

- 21 蒋焯峰,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 Y F, WANG X T, WU M H, et al. Study on pollution characteristics and sources of PCBs in rural areas and suburbs of Shanghai soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(5):899 - 903. (in Chinese)
- 22 江萍,赵平,万洪富,等. 珠江三角洲典型地区表层农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 土壤,2011,43(6):948 - 953.  
JIANG P, ZHAO P, WAN H F, et al. Concentrations of PCBs in agricultural soils of typical regions in Pearl River Delta[J]. Soils, 2011, 43(6):948 - 953. (in Chinese)
- 23 周霞,李拥军,李选统,等. 珠江三角洲典型地区菜地土壤中多氯联苯污染状况[J]. 广东农业科学,2011,38(4):130 - 132.  
ZHOU X, LI Y J, LI X T, et al. Contamination condition of PCBs in vegetable soil in typical area of Pearl River Delta[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011,38(4):130 - 132. (in Chinese)
- 24 李艳,顾华,黄冠华,等. 北京东南郊灌区多环芳烃污染风险与人体健康风险评估[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 237 - 249. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170930&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170930&flag=1). DIO:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.030.  
LI Yan, GU Hua, HUANG Guanhua, et al. Contamination and health risk assessment of PAHs in irrigation district in southeastern suburb of Beijing [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(9):237 - 249. (in Chinese)
- 25 RAIS(Risk assessment information system). Risk exposure models for chemicals user's guide[EB/OL]. [2017-08-20]. [https://rais.ornl.gov/tools/rais\\_chemical\\_risk\\_guide.html](https://rais.ornl.gov/tools/rais_chemical_risk_guide.html).
- 26 US EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: human health evaluation manual (Part E, Supplemental guidance for dermal risk assessment) final[EB/OL]. [2017-05-20]. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/part\\_e\\_final\\_revision\\_10-03-07.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/part_e_final_revision_10-03-07.pdf).
- 27 US EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[EB/OL]. [2017-5-20]. <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175878.pdf>.
- 28 US EPA. Chemical assessment summary, Integrated risk information system (IRIS)[EB/OL]. [2017-05-20]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm?keyword=polychlorinated+biphenyls>.
- 29 REN N Q, QUE M X, LI Y F, et al. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(11):3871 - 3876.
- 30 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.
- 31 SCHMID P, GUJER E, ZENNEGG M, et al. Correlation of PCDD/F and PCB concentrations in soil samples from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites[J]. Chemosphere, 2005, 58(3):227 - 234.
- 32 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.
- 33 HEYWOOD E, WRIGHT J, WIENBURG C L, et al. Factors influencing the national distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in British soils[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40: 7629 - 7635.
- 34 GUAZZON N, COMOLLI R, MARIANI L, et al. Meteorological and pedological influence on the PCBs distribution in mountain soils[J]. Chemosphere, 2011, 83(2):186 - 192.
- 35 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]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(4):667 - 672.
- 36 GARCÍA A S, PÉREZ P R M. Occurrence of PCBs in ambient air and surface soil in an urban site of Madrid[J]. Water Air Soil Pollut, 2003, 146(1-4): 283 - 295.
- 37 BATTERMAN S, CHERNYAK S, GOUDEN Y, et al. PCBs in air, soil and milk in industrialized and urban areas of KwaZulu - Natal, South Africa[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(2): 654 - 663.
- 38 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(2): 511 - 518.
- 39 张志. 中国大气和土壤中多氯联苯空间分布特征及规律研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
ZHANG Z. Polychlorinated biphenyls in Chinese air and surface soil: spatial distribution characteristics and thrie inherent causes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- 40 CANADIAN council of ministers of the environment. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Polychlorinated biphenyls (total)[S]//Winnipeg: Canadian Environmental Quality Guidelines, 1999:1 - 11.
- 41 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.
- 42 范国兰. 黄河三角洲典型植物中类二噁英类多氯联苯来源、积累、分布规律研究[D]. 济南:山东大学,2008.  
FAN G L. Sources, accumulation and distribution of Dioxin-like PCBs in the typical plants from Yellow River Delta[D]. Ji'nan: Shandong University, 2008. (in Chinese)
- 43 KIVIRANTA H, OVASKAINEN M L, VARTIAINEN T, et al. Market basket study on dietary intake of PCDD/Fs, PCBs and PBDEs in Finland[J]. Environment International, 2004, 30(7): 923 - 932.

- 44 TURCI R, TURCONI G, COMIZZOLI S, et al. Assessment of dietary intake of PCBs from a total diet study conducted in Pavia, Northern Italy[J]. *Food Additives & Contaminants*, 2006, 23(9): 919–938.
- 45 ZUCCATO E, GRASSI P, DAVOLI E, et al. PCB concentrations in some foods from European countries[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2008, 46:1062–1067.
- 46 XING G U, CHAN J K Y, LEUNG A O W, et al. Environmental impact and human exposure to PCBs in Guiyu, an electronic waste recycling site in China[J]. *Environment International*, 2009, 35: 76–82.
- 47 XING G U, WU S C, WONG M H, et al. Dietary exposure to PCBs based on food consumption survey and food basket analysis at Taizhou, China—the world’s major site for recycling transformers[J]. *Chemosphere*, 2010, 81(10):1239–1244.
- 48 WANG Y, LUO C L, LI J, et al. Characterization and risk assessment of polychlorinated biphenyls in soils and vegetations near an electronic waste recycling site, south China[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(3):344–350.
- 49 孙俊玲,刘大锰,张庆华,等.北京市冬季大气PM<sub>2.5</sub>中多氯联苯的污染水平与分布[J]. *现代地质*,2009,23(2):378–384.  
SUN J L, LIU D M, ZHANG Q H, et al. Pollution level and spatial distribution of polychlorinated biphenyls from atmospheric matter PM<sub>2.5</sub> in Beijing[J]. *Geoscience*, 2009, 23(2):378–384. (in Chinese)
- 50 郭家瑜,张英杰,郑海涛,等.北京2015年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J]. *环境科学学报*,2017,37(7):2409–2419.  
GUO J Y, ZHANG Y J, ZHENG H T, et al. Characteristics of spatial distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2017,37(7):2409–2419. (in Chinese)
- 51 杨国胜,马玲玲,徐殿斗,等.北京市石景山区夏季雨水和大气中PCBs的特征解析[J]. *中国环境科学*,2012,32(7):1234–1240.  
YANG G S, MA L L, XU D D, et al. Characterization of polychlorinated biphenyls in summer precipitation and atmosphere in Shijingshan District, Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7):1234–1240. (in Chinese)
- 52 朱晓华,杨永亮,盖楠,等.不同季风时节北京近地面大气颗粒物中<sup>7</sup>Be和POPs的变化[J]. *地球化学*,2014,43(2):101–113.  
ZHU X H, YANG Y L, GAI N, et al. Seasonal variations of beryllium-7 and typical POPs in near-surface atmospheric aerosols in Beijing[J]. *Geochimica*, 2014, 43(2):101–113. (in Chinese)
- 53 US CENTERS for DISEASE CONTROL(ATSDR). Toxicological profile for polychlorinated biphenyls(PCBs) [EB/OL]. [2017–05–20]. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp17.pdf>.
- 54 刘耕耘,陈左生,史焯弘,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.  
LIU G Y, CHEN Z S, SHI Y H, et al. The levels and compositions of PCBs in Beijing soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12):2013–2017. (in Chinese)
- 55 刘耕耘,陈左生,史焯弘,等.北京大气沉降样品中的PCBs[J]. *环境科学学报*,2007,27(1):40–44.  
LIU G Y, CHEN Z S, SHI Y H, et al. Polychlorinated biphenyls in Beijing atmospheric deposition samples[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1):40–44. (in Chinese)
- 56 李海玲.中国表层土壤中多氯联苯、多溴联苯醚的污染现状研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.  
LI H L. Research on pollution status of polychlorinated biphenyls and poly brominated diphenyl ethers in Chinese surface soil [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2013. (in Chinese)
- 57 李淑珍,徐殿斗,许国飞,等.北京石景山区大气中多氯联苯的研究[J]. *安徽理工大学学报:自然科学版*,2009,29(2):9–12.  
LI S Z, XUN D D, XU G F, et al. Study on polychlorinated biphenyls in atmosphere in Beijing Shijingshan District[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technolog: Natural Science*, 2009, 29(2):9–12. (in Chinese)
- 58 US EPA. Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Volume I: human health evaluation manual (HHEM), supplemental guidance, standard default exposure factors, interim guidance, Directive[M]. Washington, DC, OSWER: Office of Emergency and Remedial Response, 9285.6–03.1,1991.