

内蒙古河套灌区耕作层土壤中PCBs的污染特征和健康风险

李亚芳, 裴国霞, 张琦, 徐明

引用本文:

李亚芳, 裴国霞, 张琦, 等. 内蒙古河套灌区耕作层土壤中PCBs的污染特征和健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 114-122.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0819>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 王洋, 刘景双, 刘强, 崔政武, 杜连生

农业环境科学学报. 2015(6): 1127-1133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.016>

内蒙古农牧业区土壤中有机氯农药的分布特征及健康风险评估

孟佩俊, 李淑荣, 和彦苓, 张艾华, 张丽萍, 靳敏, 梁青青, 张凌燕

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 539-546 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1218>

浙江省农田土壤多环芳烃污染及风险评价

李欣红, 史咲岷, 马瑾, 方迪, 邱兴华

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1531-1540 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1568>

沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价

安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 魏树和

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 37-44 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.005>

基于GIS的泾惠渠灌区地下水污染人体健康风险评价

徐斌, 张艳

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 992-1000 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1257>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李亚芳, 裴国霞, 张琦, 等. 内蒙古河套灌区耕作层土壤中PCBs的污染特征和健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 114–122.

LI Ya-fang, PEI Guo-xia, ZHANG Qi, et al. Pollution characteristics and health risk of polychlorinated biphenyls in cultivated soil in the Hetao irrigation areas, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 114–122.



开放科学 OSID

内蒙古河套灌区耕作层土壤中PCBs的污染特征和健康风险

李亚芳, 裴国霞*, 张琦, 徐明

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:为探讨黄灌区耕作层土壤中多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)的污染特征, 评估其健康风险, 在典型黄灌区——内蒙古河套灌区采集74个粮食作物种植土壤表层样品, 检测分析土壤中PCBs的含量和组成, 利用主成分分析探索其来源, 通过USEPA健康风险评估模型评估人群暴露PCBs的致癌与非致癌风险。结果表明, PCBs浓度范围为ND~246.13 ng·g⁻¹, 均值为35.63 ng·g⁻¹, 与国内其他灌区相比, 处于较高污染水平, 其中乌拉特与乌兰布和灌域受污染程度最严重; 灌区以低氯联苯为主, 高氯联苯检出率不足1%。经主成分分析, 灌区PCBs污染主要来源于电力设备以及国产油漆涂层添加剂的使用、残留。健康风险评估结果显示, 土壤中PCBs对成人存在一定的致癌风险, 对儿童存在致癌与非致癌风险, 经口摄入和皮肤接触是主要的风险途径。

关键词:黄灌区; 多氯联苯; 污染特征; 健康风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)01-0114-09 doi:10.11654/jaes.2020-0819

Pollution characteristics and health risk of polychlorinated biphenyls in cultivated soil in the Hetao irrigation areas, Inner Mongolia, China

LI Ya-fang, PEI Guo-xia*, ZHANG Qi, XU Ming

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: To explore the pollution characteristics and assess the health risks of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the cultivated layer of the Yellow River irrigation area, 74 grain crop soil surface samples were collected in the Hetao irrigation area in Inner Mongolia. The content and composition of PCBs in the soil were detected and analyzed, and principal component analysis was used to explore their source. The carcinogenic and non-carcinogenic risks of PCBs were evaluated using the United States Environmental Protection Agency health risk assessment model. The results showed that PCBs concentrations ranged from below the detection limit to 246.13 ng·g⁻¹, with an average value of 35.63 ng·g⁻¹, which is higher than that in other domestic irrigation areas. Among these, Urat and Ulanbuhe irrigation areas were the most polluted. The irrigation areas were dominated by low-chlorinated biphenyls. The detection rate of high-chlorinated biphenyls was less than 1%. Principal component analysis identified that PCBs pollution in irrigation areas mainly originated from the use and residues of power equipment and domestic paint coating additives. The health risk assessment showed that PCBs in the soil pose a carcinogenic risk to adults, and carcinogenic and non-carcinogenic risks to children. Oral intake and skin contact were the main risk pathways.

Keywords: Yellow River irrigation area; polychlorinated biphenyls (PCBs); pollution characteristics; health risk

收稿日期: 2020-07-17 录用日期: 2020-09-25

作者简介: 李亚芳(1995—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与控制研究。E-mail: lyf950215@126.com

*通信作者: 裴国霞 E-mail: peiguoxia@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469023)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51469023)

河套灌区是中国最大的一首制灌区和全国3个特大型灌区之一^[1],也是我国和内蒙古自治区重要的商品粮油生产基地^[2]。灌区农作物生长气候条件良好,降水量虽少,但黄河年均过境水量大,故这一地区利用黄河灌溉发展农业历史悠久。近年来大量污染物的违规排放导致黄河水体污染程度加剧,根据黄河内蒙古段持久性有机污染物分布和迁移规律的研究发现,该段有多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)检出^[3]。PCBs是一类人工合成的典型持久性有机污染物。因具有优良的物理化学性质,PCBs可作绝缘油、热载体和润滑油等,还可作结合剂、涂料、农药延效剂等产品的添加剂^[4]。PCBs随黄河水进入农田后,不仅给土壤-作物系统造成潜在的威胁,而且可能通过口腔、呼吸、皮肤等直接途径和食物链进入人体,进而分布在全身组织,特别是肝脏和脂肪中,极大威胁人体健康,轻则造成腹泻、脱水、运动失调,重则引起肝脏萎缩、癌变,甚至死亡,其后果不容忽视^[5]。

国内外对污水灌溉、再生水灌溉及清灌区土壤中PCBs污染程度、分布特征、风险评估等进行了大量研究^[6-9],但对PCBs在黄灌区农作物种植土壤中的残留程度、来源和健康风险评估鲜有报道。本文以典型黄灌区——内蒙古河套灌区为研究区域,粮食作物种植土壤为研究对象展开PCBs污染研究,利用主成分分析解析其污染来源,并评估PCBs造成的人体致

癌与非致癌风险,以期为黄灌区土壤-作物系统中PCBs的分布、迁移和土壤中持久性有机污染物的管控、修复提供理论依据,也对保障粮食安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河套灌区位于黄河上中游内蒙古段北岸的冲积平原,引黄控制面积116.2万 hm^2 ,土壤类型主要为盐渍化浅色草甸土和盐土,土壤质地主要为砂壤土和粉壤土。包括义长、解放闸、永济、乌拉特和乌兰布和5个灌域。主要粮食作物有小麦、玉米、杂粮等,近年年均粮食总产量达30亿 kg 以上。灌区地形平坦,热量充足,全年日照3 100~3 200 h,无霜期120~150 d,农作物生长气候条件良好。但该地区雨量稀少,年降水量仅130~250 mm,蒸发量2 000~2 400 mm。灌区黄河年均过境水量280亿 m^3 ,年引黄水量50亿 m^3 。

1.2 样品采集

根据《土壤环境监测技术规范》,2015—2017年,采用网格法在河套灌区布设采样点,共74个,其中乌兰布和灌域9个,解放闸灌域26个,永济灌域23个,乌拉特灌域16个。用GPS确定具体位置,通过蛇形法采集土样,按四分法将采集的表层(0~20 cm)土壤缩分为1个。土样去除杂质,置于室内自然风干后研磨过筛,以备分析。采样点分布如图1所示。

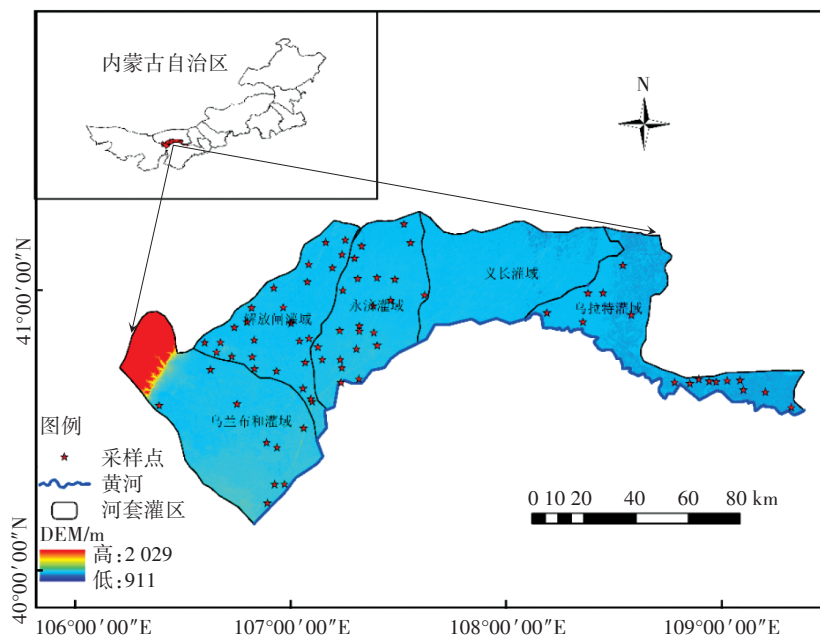


图1 河套灌区粮食作物土壤中PCBs的采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling points of PCBs in grain crop soils in Hetao irrigation area

1.3 样品处理和分析

采用快速溶剂萃取法提取土样中PCBs。土样风干研磨过0.25 mm筛,按质量比4:1的比例同1 g硅藻土混匀置于萃取池,以体积比1:1的正己烷和丙酮作为萃取剂,在温度100℃、压力10.34 MPa条件下,静态萃取6 min,循环3次。萃取液经旋转蒸发仪浓缩至20 mL,随后以1滴·s⁻¹的速度转移至活化好的弗罗里硅土柱进行净化,再依次用15 mL正己烷和15 mL含有2%丙酮的正己烷淋洗土柱,收集洗脱液,洗脱液用氮吹仪浓缩定容至1.5 mL,待色谱分析。

采用Varian450-GC气相色谱仪(配有Ni电子捕获检测器,色谱柱为30 m×0.32 mm×0.25 μm的SPB-1柱)进行色谱分析,升温程序为:初始温度120℃保持18 min,以5℃·min⁻¹升温至180℃保持5 min,以10℃·min⁻¹升温至230℃保持20 min。进样分流比为6:1,进样量为1 μL,载气为高纯氮气。

1.4 质量控制和质量保证

依据美国环保局(USEPA)的规范,设置方法空白、平行样和加标空白实验,确保实验数据的准确性和可靠性。以黄河内蒙古段中检出的7种PCBs(PCB5、PCB29、PCB47、PCB98、PCB154、PCB171、PCB201)为依据,选用包括8种PCBs单体(PCB1、PCB5、PCB29、PCB47、PCB98、PCB154、PCB171和PCB201)的混标。采用5点外标法,PCBs标样稀释配制为4、20、40、100、200 ng·L⁻¹浓度梯度的标准溶液,每一浓度设置3个平行。PCBs的加标回收率为78%~108%,方法的标准偏差(RSD)范围为11.64%~28.64%,满足USEPA的执行标准(70%~130%,RSD<30%),方法检测限为0.1~0.3 ng·g⁻¹。

1.5 数据处理

运用SPSS 25.0和Origin 2018处理分析数据。其中,采用双变量相关性分析进行PCBs各单体间相关性分析;K-S法检验数据,均符合正态分布;主成分分析进行来源解析(KMO值为0.629, Sig.=0.000)。

1.6 健康风险评价方法

1.6.1 暴露评估

采用USEPA健康风险评价模型,按长期日暴露量(CDI),从经口、皮肤、呼吸3种暴露途径进行河套灌区粮食土壤中PCBs的暴露评估。土壤中CDI计算公式如下:

$$CDI_{\text{经口}} = \frac{C \times IR \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$$

$$CDI_{\text{皮肤}} = \frac{C \times SA \times AF \times EF \times ED \times ABS \times CF}{BW \times AT}$$

$$CDI_{\text{呼吸}} = \frac{C \times HR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$$

式中: $CDI_{\text{经口}}$ 、 $CDI_{\text{皮肤}}$ 、 $CDI_{\text{呼吸}}$ 分别为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入3种途径下土壤的污染物暴露量,mg·kg⁻¹·d⁻¹。 C 为土壤中PCBs的浓度,mg·kg⁻¹。其余参数及含义见表1,参数取值参考USEPA标准和国内外相关研究^[10-12]。

表1 暴露评估参数取值

Table 1 Exposure evaluation parameter values

暴露参数 Parameters	含义 Implications	参数值 Parameter values	
		成人 Adults	儿童 Children
CF	转换系数	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
EF	暴露频率/(d·a ⁻¹)	350	350
ED	暴露年限/a	24	6
BW	人体质量/kg	70	15
AT	平均作用时间,非致癌/致癌/d	8 760/25 550	2 190/25 550
IR	每日摄入土壤量/(mg·d ⁻¹)	100	200
SA	接触土壤的皮肤表面积/cm ²	5 700	2 800
AF	皮肤表面土壤吸附系数/(mg·cm ⁻²)	0.07	0.2
ABS	皮肤接触吸收因子	0.13	0.13
HR	土壤尘的吸收频率/(m ³ ·d ⁻¹)	20	20
PEF	土壤尘产生因子/(m ³ ·kg ⁻¹)	1.36×10 ⁹	1.36×10 ⁹

1.6.2 致癌风险

致癌风险 R 计算公式如下:

$$R_i = CDI_i \times SF_i$$

$$R_T = \sum R_i$$

式中: R_i 为不同途径产生的致癌风险; R_T 为多种途径下总致癌风险; SF_i 为不同途径下的致癌斜率因子,kg·d·mg⁻¹,PCBs经口和皮肤的 SF 值取2 kg·d·mg⁻¹,呼吸取2.18×10⁻³ kg·d·mg⁻¹^[13]。USEPA规定, R_T 的值为10⁻⁶~10⁻⁴时为可接受的致癌风险水平。

1.6.3 非致癌风险

非致癌风险 HI 计算公式如下:

$$HQ_i = \frac{CDI_i}{RfD_i}$$

$$HI = \sum HQ_i$$

式中: HQ_i 为不同途径产生的非致癌风险; HI 为多种途径下的总非致癌风险; RfD_i 为不同途径下的非致癌污染物参考剂量,mg·kg⁻¹·d⁻¹,PCBs的 RfD 值取2.3×10⁻⁵ mg·kg⁻¹·d⁻¹^[10]。 HI 值为1是可接受的危害商。

2 结果与讨论

2.1 土壤中PCBs的污染特征

河套灌区粮食作物种植土壤中PCBs的统计分析

结果见表2,8种单体在各个样品点中有不同程度的检出,检出率为98.65%,检出率范围为2.7%~78.38%,PCB1和PCB98检出率最高,PCB154、PCB171、PCB201检出率均不足10%。PCBs总含量介于ND~246.13 ng·g⁻¹,均值为35.63 ng·g⁻¹,远超我国土壤PCBs背景值(0.48 ng·g⁻¹)^[14]。其中PCB1浓度均值最高,达18.76 ng·g⁻¹,高出其他单体数倍,PCB154、PCB171和PCB201浓度均低于0.2 ng·g⁻¹。8种PCBs单体变异系数均超过100%,离散程度较大,说明河套灌区PCBs表现出较强的分布差异性。

河套灌区PCBs整体呈现两侧高中部低的U型分布趋势。如表3所示,不同灌域土壤中PCBs浓度均值大小排序为乌拉特>乌兰布和>解放闸>永济。其中乌拉特灌域和乌兰布和灌域的PCBs浓度均大于80 ng·g⁻¹,明显高于其他灌域,是浓度最低的义长灌域的11倍。可能是由于乌拉特灌域和乌兰布和灌域

矿业公司、能源公司和变电站集中,产生大量焦油、增塑剂等废弃原材料和废旧电力设备,废气、废液的挥发、泄露导致土壤中PCBs含量升高。其余灌域PCBs残留较低,说明周围不存在集中点源污染,同时也与土壤有机质含量、理化性质、耕作方式有一定关系,气候变化也会引起土壤环境的变化^[15]。各单体在不同灌域中呈现出与灌区整体基本一致的分布特征,表现为PCB1和PCB29含量较高,PCB154、PCB171和PCB201含量远低于其他单体。

将本研究区PCBs的污染水平与国内外其他研究区对比,结果如表4所示。与国内其他灌区相比,河套灌区土壤中PCBs污染较高,其中乌拉特和乌兰布和灌域受污染最严重。我国通辽地区、北京市通州区、北京市东南灌区等灌区土壤中PCBs均值不及河套灌区1/20,也远低于本研究区各灌域PCBs浓度均值。太原市灌区污染程度也低于河套灌区,本研究区

表2 河套灌区粮食作物种植土壤中PCBs的统计特征值
Table 2 Descriptive statistics of PCBs in grain crop soils in Hetao irrigation areas

同系物 Homologues	组分 Constituent	浓度范围 Range/(ng·g ⁻¹)	均值 Mean/(ng·g ⁻¹)	标准差 Standard deviation/(ng·g ⁻¹)	变异系数 Coefficient of varition/%	检出率 Detection rate/%
1氯	PCB1	ND~246.13	18.76	37.14	197.98	78.38
2氯	PCB5	ND~50.99	3.62	9.98	275.69	48.65
3氯	PCB29	ND~80.87	3.49	10.46	299.71	70.27
4氯	PCB47	ND~46.03	3.25	8.30	255.38	35.14
5氯	PCB98	ND~34.83	6.26	7.71	123.16	78.38
6氯	PCB154	ND~10.50	0.19	1.25	648.09	5.41
7氯	PCB171	ND~0.98	0.04	0.14	350.00	8.11
8氯	PCB201	ND~0.69	0.02	0.11	550.00	2.70
	ΣPCBs	ND~278.22	35.63	51.46	144.42	98.65

注:ND表示未检出。下同。
Note:ND means not detected. The same below.

表3 不同灌域粮食作物种植土壤中PCBs的含量(ng·g⁻¹)
Table 3 Contents of PCBs in grain crop soils in different irrigation areas (ng·g⁻¹)

同系物 Homologues	组分 Constituent	解放闸灌域 Jiefangzha irrigation		永济灌域 Yongji irrigation		乌拉特灌域 Urat irrigation		乌兰布和灌域 Ulanbuhe irrigation	
		范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean	范围 Range	均值 Mean
1氯	PCB1	ND~6.94	1.89	ND~24.83	2.63	ND~112.79	52.24	2.39~246.13	49.02
2氯	PCB5	ND~2.90	0.41	ND~4.24	0.26	ND~50.99	13.75	ND~20.71	3.47
3氯	PCB29	ND~15.55	2.74	ND~11.54	1.61	ND~3.03	0.86	ND~80.87	15.54
4氯	PCB47	ND~17.03	4.67	ND	ND	ND~46.03	7.43	ND	ND
5氯	PCB98	ND~4.14	0.61	ND~25.24	5.73	ND~34.83	12.72	1.58~21.67	12.29
6氯	PCB154	ND~0.61	0.05	ND	ND	ND~2.52	0.16	ND~10.50	1.17
7氯	PCB171	ND~0.49	0.07	ND	ND	ND~0.98	0.06	ND	ND
8氯	PCB201	ND~0.61	0.02	ND	ND	ND~0.69	0.04	ND	ND
	ΣPCBs	ND~38.27	10.47	ND~41.70	10.24	0~180.78	87.25	ND~278.22	81.50

表4 不同地区土壤中PCBs的含量对比
Table 4 Comparison of PCBs in soil in different regions

项目 Item	研究区 Area	单体数量 Number of monomers	PCBs 含量 Concentrations of PCBs		文献来源 References
			范围 Range/(ng·g ⁻¹)	均值 Mean/(ng·g ⁻¹)	
不同灌区 研究结果	河套灌区	8	ND~246.13	35.63	本研究
	通辽地区清灌区与污灌区	8	0.70~0.99	0.79	[16]
			1.17~1.56	1.42	
	北京市东南郊灌区	58	ND~0.71	0.43	[12]
	北京通州区清灌区、污灌区、混灌区	26	0.15~0.42	0.31	[17]
			1.45~1.93	1.67	
			0.13~0.50	0.35	
	太原市灌区	7	9.03~16.20	11.74±2.97	[18]
	浙东污灌区		0.55~412.54	28.58	[19]
	巴基斯坦污灌区	33	0.70~30.00	9.20	[20]
不同土地利用 方式研究结果	西班牙东北部灌区	13		5.00	[21]
	突尼斯污灌区	18	11.26~21.89		[8]
	中国农田土壤	51	0.14~1.14	0.42	[22]
	加拿大农业土壤质量指导值			500	[23]
	南极未污染土壤	21	0.36~0.59		[24]
	江浙沪(华东)农田	17	0.41~73.50	15.20	[25]
	太原市工业区周边农田土壤	7	16.88~256.04	87.29	[26]
	西藏农田	6	0.05~0.42	0.19	[27]
	土耳其工业区	41	1.50~45.00	2.74	[28]
	迁安市钢铁厂周边	19	0.02~288.09	90.07	[29]
	清远电子拆解区	29	2.80~370.60	99.30	[30]

浓度检出最高值为 246.13 ng·g⁻¹,是太原市灌区最高值的 15 倍。浙东污灌区土壤中 PCBs 浓度范围较河套灌区更大,这是因为早期浙东地区是我国主要的电子垃圾拆解场地,导致该地 PCBs 污染严重,但整体污染与河套灌区比相差较小。对比国外灌区,巴基斯坦污灌区、突尼斯污灌区、西班牙东北部灌区等灌区土壤 PCBs 污染虽普遍高于我国大多数灌区,但较河套灌区偏低,与国外灌区相比,河套灌区 PCBs 处于中高污染。

与其他地区农田土壤中 PCBs 浓度相比,河套灌区明显高于我国农田土壤均值,高于西藏、四川和华东地区,低于太原市。但本研究区 PCBs 含量显著低于加拿大农业土壤质量指导值,主要是由于我国生产和使用 PCBs 年限短,总量整体上较少。同时可以看出农田土壤受污染程度普遍低于工业区、电子拆解区。

2.2 土壤中 PCBs 的组成特征

河套灌区土壤中 8 种 PCBs 均被检出,图 2 为 74 个采样点 PCBs 单体的分布情况,研究区 PCBs 各单体组成表现为:PCB1(52.66%)>PCB98(17.56%)>PCB5

(10.17%)>PCB29(9.80%)>PCB47(9.11%)>PCB154(0.54%)>PCB171(0.11%)>PCB201(0.05%),以 5 氯及以下的低氯联苯为主,高氯联苯占比总和不足 1%。该特征符合我国表层土壤中 PCBs 的组成规律。此外,印度工业城市居民区土壤中 PCBs 3~4 氯 PCBs 单体占 88%^[31],意大利南部那不勒斯市土壤中 PCBs 则呈现高氯联苯占优势的分布特征^[32]。这与研究区的土壤性质和灌溉方式有关。河套灌区土壤中 PCBs 的组成特征与黄河内蒙古段水体中 PCBs 单体的组分结构(PCB47>PCB29>PCB5>PCB154>PCB201>PCB98>PCB171)均是低氯联苯检出率较高,说明黄河水灌溉是河套灌区农田土壤 PCBs 污染累积的原因之一。两介质中个别单体组分排序有所差异,其原因是灌溉过程中各单体的水溶性、吸附性、挥发性不同^[33],则随水流流失的速率、总量也不同。灌区中 1 氯、2 氯含量增多,4 氯、6 氯含量降低,有研究表明,土壤中的生物降解作用比水体中更显著,尤其是高氯取代物^[34],推测研究区土壤中 PCBs 存在脱氯现象,在微生物的作用下,高氯代单体降解为更低氯。另外 5 氯较黄河水中浓度也有所升高,不排除有新污染源输入的可能。

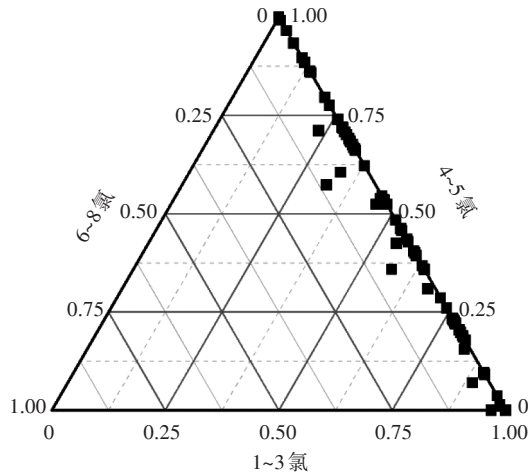


图2 PCBs的组成结构特征

Figure 2 Structural features of PCBs

2.3 土壤中PCBs的来源解析

我国生产的PCBs主要包括三氯联苯和五氯联苯,其中九成成为三氯联苯,多用于生产电容器和变压器,一成为五氯联苯,常用作油漆添加剂^[1],进口的PCBs产品包括变压器、电容器和含有PCBs的导热油、液压油,成分更为复杂。为调查河套灌区粮食作物土壤中PCBs的主要来源,对研究区74个样品点检出率较高的PCBs单体进行相关性分析和主成分分析,本研究中忽略灌区内含量少、污染小的6氯及以上组分,以便分析。

PCBs各组间相关性分析结果如表5所示。除PCB29外,其余各单体间存在显著正相关关系,表明其存在相似污染源。经主成分分析降维结合最大方差正交旋转,提取特征值大于1的因子,得到2个主成分。它们对研究区的污染贡献率分别为42.604%和22.992%,表示这两个主成分可以反映初始组分包含信息的65.596%,其他成分可忽略不计。

表5 河套灌区粮食作物土壤中PCBs皮尔逊相关系数矩阵

Table 5 Pearson coefficient matrix of PCBs in grain crop soils in

Hetao irrigation area

PCBs单体 Monomer	PCB1	PCB5	PCB29	PCB47	PCB98
PCB1	1				
PCB5	0.309**	1			
PCB29	0.113	-0.029	1		
PCB47	0.091	0.559**	-0.022	1	
PCB98	0.494**	0.437**	0.153	0.314**	1

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

Note: * means correlation is significant at the 0.05 level; ** means correlation is significant at the 0.01 level.

分析旋转后的因子载荷图(图3),主成分1以PCB5和PCB47为主,结合相关性分析结果,PCB5和PCB47与PCB98显著相关,三者来源相似,PCB98属于五氯联苯,是国产油漆、涂料的重要组成成分,因此判断PC1主要来自我国油漆添加剂的泄露。主成分2中,PCB1、PCB29和PCB98载荷较高,其中PCB1仅有1个氢原子被取代,与其他同系物相比,溶解度和蒸气压高,logK_{ow}低,更易在环境介质中迁移富集,同时在土壤中生物作用下,高氯代会降解为低氯取代物,PCB29属于三氯联苯,我国生产的变压器油中三氯联苯的含量高达63%,推测PC2反映的是环境介质的迁移转化和油漆添加剂、电力设备废弃材料及变压器油泄露挥发的复合影响。综合河套灌区PCBs的组成特征,研究区PCBs污染的可能来源主要有大气沉降、地表径流、微生物作用以及电容器、变压器历史使用残留和油漆涂料的渗漏等方面。

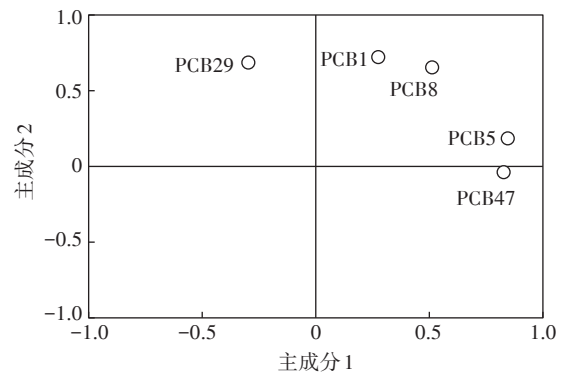


图3 PCBs各单体因子载荷图

Figure 3 Load factor diagram of PCBs

2.4 土壤中PCBs的健康风险评价

河套灌区粮食作物土壤中PCBs在不同暴露途径下对人体的致癌与非致癌风险结果见表6。结果显示,研究区中PCBs对人体造成了一定健康风险。成人与儿童累计致癌风险分别为 3.76×10^{-6} 和 7.88×10^{-6} ,均超过USEPA规定可接受风险的最低值,PCBs造成的潜在威胁不容忽视。从不同暴露途径来看,成人与儿童致癌风险大小的排序为经口摄入>皮肤接触>呼吸吸入,经口和皮肤引发的致癌风险均大于 10^{-6} ,呼吸吸入对致癌风险的贡献率非常微弱。

研究区成人与儿童累计危害商分别为0.24和2.00,对成人不会产生非致癌风险,但儿童受到一定非致癌危害。与致癌风险相同,3种暴露方式下,仍是经口产生的非致癌风险最高,皮肤接触其次,呼吸途径几乎不构成威胁,其中,经口途径对儿童产生的

非致癌风险为1.48,是儿童受到非致癌危害的主要途径。值得特别关注的是,无论何种暴露途径,儿童致癌与非致癌风险均高于成人,且儿童体质薄弱,PCBs对儿童构成的潜在威胁需引起高度重视。

不同单体的致癌与非致癌风险大小均为:PCB1>PCB98>PCB5>PCB29>PCB47>PCB154>PCB171>PCB201,与各单体在土壤中的赋存水平相对应,说明土壤中污染物的浓度对健康风险评价影响很大。吴娟娟等^[35]对松嫩平原地下水中氮污染健康风险评价的各风险指标进行了敏感性分析,同样指出,污染物浓度是各指标中敏感度最大的,对风险值贡献率达90%以上,远超其他参数,对风险值的大小具有决定作用。

3 结论

(1)河套灌区粮食作物土壤中PCBs整体呈现两侧高中间低的U型分布趋势,总浓度范围为ND~246.13 ng·g⁻¹,均值为35.63 ng·g⁻¹,显著高于国内其他灌区和农田土壤中PCBs浓度,与国外灌区相比处于中高污染水平。其中乌拉特和乌兰布和灌域污染最为严重。

(2)河套灌区PCBs以低氯联苯为主,与黄河内蒙古段中PCBs组分特征相似。低氯联苯各单体间相

关性结果表明除PCB29外,其余各单体存在显著正相关关系。综合组成特征、相关性分析和主成分分析结果,灌区PCBs污染主要来源于大气沉降、地表径流、电容器变压器历史使用残留,也有油漆涂料泄露输入的可能。

(3)PCBs污染对研究区成人和儿童均造成了一定致癌和非致癌风险,致癌风险主要途径是经口摄入和皮肤接触,非致癌风险为经口摄入。任何途径下,儿童所受健康风险均高于成人。不同单体间的风险值大小与其在灌区赋存水平相对应,污染物浓度对健康风险评价结果有重要影响。

参考文献:

- [1] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255-269. WANG Guo-shuai, SHI Hai-bin, LI Xian-yue, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different land types in Hetao irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 255-269.
- [2] 常晓敏. 河套灌区水盐动态模拟与可持续性策略研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019: 1. CHANG Xiao-min. Study on dynamic simulation of water and salt and sustainability strategy in Hetao irrigation district[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019: 1.
- [3] 裴国霞, 张岩, 马太玲, 等. 黄河内蒙古段水体中六六六和多氯联苯

表6 不同暴露途径下土壤中PCBs的致癌与非致癌风险

Table 6 Carcinogenic and non-carcinogenic risks of PCBs in soil under different exposure routes

暴露人群 Crowd	PCBs单体 Monomer	致癌 Carcinogenic				非致癌 Non-carcinogenic			
		$R_{\text{经口}}$	$R_{\text{皮肤}}$	$R_{\text{呼吸}}$	R_{T}	$HQ_{\text{经口}}$	$HQ_{\text{皮肤}}$	$HQ_{\text{呼吸}}$	HI
成人 Adults	PCB1	1.30E-06	6.76E-07	2.09E-13	1.98E-06	8.27E-02	4.29E-02	1.22E-05	1.26E-01
	PCB5	2.52E-07	1.31E-07	4.04E-14	3.82E-07	1.60E-02	8.28E-03	2.35E-06	2.43E-02
	PCB29	2.43E-07	1.26E-07	3.89E-14	3.69E-07	1.54E-02	7.99E-03	2.26E-06	2.34E-02
	PCB47	2.26E-07	1.17E-07	3.62E-14	3.43E-07	1.43E-02	7.42E-03	2.10E-06	2.17E-02
	PCB98	4.35E-07	2.26E-07	6.97E-14	6.60E-07	2.76E-02	1.43E-02	4.06E-06	4.19E-02
	PCB154	1.34E-08	6.97E-09	2.15E-15	2.04E-08	8.52E-04	4.42E-04	1.25E-07	1.29E-03
	PCB171	2.60E-09	1.35E-09	4.17E-16	3.95E-09	1.65E-04	8.56E-05	2.43E-08	2.51E-04
	PCB201	1.22E-09	6.33E-10	1.96E-16	1.85E-09	7.74E-05	4.02E-05	1.14E-08	1.18E-04
	ΣPCBs	2.48E-06	1.28E-06	3.97E-13	3.76E-06	1.57E-01	8.15E-02	2.31E-05	2.39E-01
儿童 Children	PCB1	3.04E-06	1.11E-06	2.44E-13	4.15E-06	7.72E-01	2.81E-01	5.67E-05	1.05E+00
	PCB5	5.88E-07	2.14E-07	4.71E-14	8.01E-07	1.49E-01	5.42E-02	1.10E-05	2.03E-01
	PCB29	5.67E-07	2.06E-07	4.54E-14	7.73E-07	1.44E-01	5.23E-02	1.06E-05	1.96E-01
	PCB47	5.27E-07	1.92E-07	4.22E-14	7.18E-07	1.34E-01	4.86E-02	9.82E-06	1.82E-01
	PCB98	1.01E-06	3.69E-07	8.13E-14	1.38E-06	2.57E-01	9.37E-02	1.89E-05	3.51E-01
	PCB154	3.14E-08	1.14E-08	2.51E-15	4.28E-08	7.95E-03	2.90E-03	5.85E-07	1.09E-02
	PCB171	6.07E-09	2.21E-09	4.87E-16	8.28E-09	1.54E-03	5.60E-04	1.13E-07	2.10E-03
	PCB201	2.85E-09	1.04E-09	2.28E-16	3.89E-09	7.23E-04	2.63E-04	5.31E-08	9.86E-04
	ΣPCBs	5.78E-06	2.10E-06	4.63E-13	7.88E-06	1.47E+00	5.33E-01	1.08E-04	2.00E+00

- 的分布特征[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 25-27, 33. PEI Guo-xia, ZHANG Yan, MA Tai-ling, et al. Distribution of HCHs and PCBs in water body of Inner Mongolia section of Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(4): 25-27, 33.
- [4] 肖磊, 裴国霞, 张琦, 等. 内蒙古解放闸灌域表层土壤多氯联苯污染特征和来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2772-2778. XIAO Lei, PEI Guo-xia, ZHANG Qi, et al. Residual characteristics and source analysis of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Jiefangzha irrigation area, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2772-2778.
- [5] Carpenter, David O. Polychlorinated biphenyls (PCBs): Routes of exposure and effects on human health[J]. *Rev Environ Health*, 2006, 21(1): 1-24.
- [6] Bruzzoniti M C, Rivoira L, Castiglioni M, et al. Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls from urban and olive mill wastewaters intended for reuse in agricultural irrigation[J]. *Journal of AOAC International*, 2020, 103(2): 382-391.
- [7] 于英鹏, 刘敏. 太湖流域水源多氯联苯分布特征与污染水平[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1): 147-153. YU Ying-peng, LIU Min. Distribution characteristics and pollution level of PCBs in water source area of Taihu River Basin[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(1): 147-153.
- [8] Haddaoui I, Mahjoub O, Mahjoub B, et al. Occurrence and distribution of PAHs, PCBs, and chlorinated pesticides in Tunisian soil irrigated with treated wastewater[J]. *Chemosphere*, 2016, 146: 195-205.
- [9] 刘娟, 赵振华, 江莹, 等. 典型灌区稻田多氯联苯残留特征及生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1979-1982. LIU Juan, ZHAO Zhen-hua, JIANG Ying, et al. PCBs residues characteristics and ecological risk assessment in paddy fields of typical small watershed[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1979-1982.
- [10] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Risk assessment guidance for superfund (Volume 1) human health evaluation manual, EPA/540/189/002[R]. Washington D C: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [11] 鲁垠涛, 刘明丽, 刘殷佐, 等. 长江表层土壤多氯联苯污染特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4617-4624. LU Yin-tao, LIU Ming-li, LIU Yin-zuo, et al. Characteristics and health risk assessment of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Yangtze River[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12): 4617-4624.
- [12] 李艳, 黄冠华, 顾华, 等. 北京典型灌区土壤和农产品多氯联苯污染风险评估[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 313-322. LI Yan, HUANG Guan-hua, GU Hua, et al. Assessment of contamination risk of PCBs in soils and agricultural products in typical irrigation district in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 313-322.
- [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状与健康风险评估[J]. 土壤与作物, 2016, 5(1): 14-23. CHEN Xiao-rong, WANG Yang, LIU Qiang, 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.
- [14] 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: 45. ZHANG Zhi. Polychlorinated biphenyls in China air and surface soil: Spatial distribution characteristics and thinerherent causes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 45.
- [15] 张仲胜, 李敏, 宋晓林, 等. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 273-282. ZHANG Zhong-sheng, LI Min, SONG Xiao-lin, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon pool: A general review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 273-282.
- [16] 鲁垠涛, 刘明丽, 王静, 等. 通辽地区农田土壤中多氯联苯分布特征及生态风险评估[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(4): 62-69, 61. LU Yin-tao, LIU Ming-li, WANG Jing, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls in farmland soil of Tongliao City[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(4): 62-69, 61.
- [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 Shan-long, WANG Bao-sheng, RUAN Ting, 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.
- [18] 高鹏. 太原市不同功能区土壤污染特征及健康风险评估[D]. 太原: 山西大学, 2016: 35-36. GAO Peng. Soil contamination characteristic and health risk assessment from different function areas in Taiyuan City[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016: 35-36.
- [19] 黄春雷, 宋明义, 徐琼, 等. 浙东固废拆解区污水灌溉对土壤多氯联苯含量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2312-2318. HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, XU Qiong, et al. Impact of wastewater irrigation on contents of polychlorinated biphenyls in soils of solid waste's dumping and unpacking site of Eastern Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12): 2312-2318.
- [20] Mahmood A, Syed J H, Malik R N, et al. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in air, soil, and cereal crops along the two tributaries of River Chenab, Pakistan: Concentrations, distribution, and screening level risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 596-604.
- [21] Abrahao R, Sarasa J, Jesus Causapé, et al. Influence of irrigation on the occurrence of organic and inorganic pollutants in soil, water and sediments of a Spanish agrarian basin (Lerma)[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2011, 9(1): 124-134.
- [22] Ren N, Que M, Li Y F, et al. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(11): 3871-3876.
- [23] 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.

- [24] Borghini F, Grimalt J, Sanchez H J, et al. Organochlorine pollutants in soils and mosses from Victoria Land (Antarctica) [J]. *Chemosphere*, 2005, 58(3):271-278.
- [25] Zhang H B, Li X H, Luo Y M, et al. Depth distribution of polychlorinated biphenyls in soils of the Yangtze River Delta region, China[J]. *Geoderma*, 2011, 160(3/4):408-413.
- [26] 张婧雯, 张红, 刘勇, 等. 太原市农田土壤中多氯联苯污染特征及健康风险[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(35):96-101. ZHANG Jing-wen, ZHANG Hong, LIU Yong, et al. Residues characters and health risk assessment of PCBs in agricultural soils of Taiyuan City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(35):96-101.
- [27] 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、环境行为和健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2):339-346. WANG Chuan-fei, GONG Ping, WANG Xiao-ping, et al. Distribution, environmental behavior, and health risks of polychlorinated biphenyls in the Tibetan agricultural soil and crops[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(2):339-346.
- [28] Odabasi M, Falay E O, Tuna G, et al. Biomonitoring the spatial and historical variations of persistent organic pollutants (POPs) in an industrial region[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(4):2105-2114.
- [29] 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 Xue-bin, LIU Wen-xia, LIAO Xiao, et al. Concentrations and profiles of PCBs in the surrounding soil of a typical steel plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(9):3333-3338.
- [30] 路风辉, 陈满英, 陈燕舞, 等. 电子垃圾拆解区氯化石蜡和多氯联苯的分布特征——以广东清远龙塘镇为例[J]. 环境化学, 2015, 34(7):1297-1303. LU Feng-hui, CHEN Man-ying, CHEN Yan-wu, et al. Distribution of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in E-waste, residues and sediment from E-waste areas of Qingyuan[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(7):1297-1303.
- [31] Kumar B, Verma V K, Singh S K, et al. Polychlorinated biphenyls in residential soils and their health risk and hazard in an industrial city in India[J]. *Journal of Public Health Research*, 2014, 3(2):68-74.
- [32] Qu C, Albanese S, Lima A, et al. The occurrence of OCPs, PCBs, and PAHs in the soil, air, and bulk deposition of the Naples metropolitan area, southern Italy: Implications for sources and environmental processes[J]. *Environment International*, 2019, 124:89-97.
- [33] 郭莉, 汪亚林, 李成, 等. 电子电器废弃物拆解区蔬菜多氯联苯污染及其健康风险[J]. 科学通报, 2017, 62(7):674-684. GUO Li, WANG Ya-lin, LI Cheng, et al. The pollution and health risk of polychlorinated biphenyls in vegetables in E-waste[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(7):674-684.
- [34] 阙明学. 我国土壤中多氯联苯污染分布及源解析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007:54. QUE Ming-Xue. Pollution distribution and source analysis of PCBs in Chinese surface soil[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007:54.
- [35] 吴娟娟, 卞建民, 万罕立, 等. 松嫩平原地下水氮污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8):3493-3500. WU Juan-juan, BIAN Jian-min, WAN Han-li, et al. Health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Songnen Plain[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(8):3493-3500.