

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.

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

肖磊, 裴国霞*, 张琦, 姚雨彤

(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: 在内蒙古解放闸灌域采集49个表层土壤样品, 采用气相色谱-电子捕获检测器(GC-ECD)测定8种多氯联苯PCBs的浓度, 探讨PCBs的污染特征、组成特征、空间分布和污染来源, 以及土壤理化性质对PCBs浓度分布的影响。结果表明, 解放闸灌域表层土壤中 Σ PCBs浓度范围为ND~209.95 ng·g⁻¹, 均值为15.09 ng·g⁻¹, 与国内外其他地区相比, 处于较低污染水平。PCB1、PCB29和PCB47的均值和检出率均较高, 是解放闸灌域表层土壤中的优势污染物。土壤中PCBs同系物组成表现为: PCB29(38.65%)>PCB1(33.33%)>PCB47(11.62%)>PCB5(8.25%)>PCB98(8.14%), 其余单体的检出量很少, 说明主要以低氯联苯污染为主。土壤中PCBs浓度的空间分布存在一定差异性, 表现为东北高于西南, 其西南部呈点状分布。土壤理化性质对PCBs浓度的影响表现为: PCBs浓度分布受pH值的影响, 而不受有机质、EC值、砂粒、粉粒和黏粒的影响。相关性分析和因子分析结果显示, 解放闸灌域表层土壤中PCBs的污染源主要来自电容器和变压器油的泄露。

关键词: 解放闸灌域; 多氯联苯; 表层土壤; 污染特征; 来源分析

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)12-2772-07 doi:10.11654/jaes.2019-0503

Residual characteristics and source analysis of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Jiefangzha irrigation area, Inner Mongolia, China

XIAO Lei, PEI Guo-xia*, ZHANG Qi, YAO Yu-tong

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

Abstract: The residual characteristics of polychlorinated biphenyl (PCB) congeners in 49 surface soil samples collected from the Jiefangzha irrigation area were analyzed by gas chromatography-electron capture detection. The residual characteristics, spatial distribution, and pollution sources were also analyzed. The results showed that the total PCB concentrations in surface soil ranged from below detection limits to 209.95 ng·g⁻¹, with an average value of 15.09 ng·g⁻¹. PCB concentrations observed in this study were comparatively low. PCB1, PCB29, and PCB47 were identified as the most prevalent contaminants in surface soil. The relative PCB homologue content in soil decreased in the following order: PCB29 (38.65%)>PCB1 (33.33%)>PCB47 (11.62%)>PCB5 (8.25%)>PCB98 (8.14%), indicating that the surface soil in the Jiefangzha irrigation area was mainly contaminated with lower-chlorinated biphenyls. There was a noticeable pattern in the spatial distribution of PCB concentrations in the soil, which was higher in the northeast than in the southwest, and was also sporadic in the southwest. While the soil pH was found to have a significant effect on PCB concentration, it was not affected by organic matter, electrical conductivity, or sand, powder, and clay content. The results of correlation analysis and factor analysis showed that the main sources of PCB pollution in the topsoil of the irrigation area were capacitor and transformer oils.

Keywords: Jiefangzha irrigation area; PCBs; surface soil; residual characteristics; source analysis

收稿日期: 2019-05-07 录用日期: 2019-10-09

作者简介: 肖磊(1991—), 男, 内蒙古丰镇人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与控制方面的研究。E-mail: leixiao.910801@qq.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)

多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)是经人工合成的有机化合物,由于其具有良好的绝缘性、导热性和惰性特性,被广泛用于电容器和变压器的热交换剂和绝缘油等^[1-2]。目前,绝大部分的污染来源都以泄露和蒸发、灌溉水源、大气沉降和固体污染物排放为主,且PCBs的污染程度和危害是引起人们重视的原因^[3]。解放闸灌域是河套灌区的第二大灌域,也是内蒙古河套地区重要的粮油基地和养殖业产地,主要以黄河水为灌溉水源地。有报道不同水源灌溉土壤中PCBs浓度表现为:污灌>混合灌溉>地下水灌溉,说明灌溉水源对PCBs污染具有一定的影响^[4]。由于土壤中PCBs具有远距离迁移性、难降解性及生物蓄积性,可通过农作物进入食物链富集,最终危害人体健康^[5-8]。

目前国内外关于PCBs的研究主要集中在黄河水体^[9-10]和黄河岸边^[11-12]土壤,关于黄河周边灌域土壤中PCBs的研究还未见报道。近年来,本研究团队在黄河内蒙古段水体中检出PCBs存在^[9]。考虑到PCBs可能会吸附在颗粒物上,在水动力条件下经灌溉渠道输入灌域土壤中,并在土壤中长期残留并富集。本文对解放闸灌域表层土壤中PCBs进行研究,揭示了灌域土壤中PCBs的残留特征、空间分布和污染来源,以及土壤理化性质对其的影响。为合理规划、利用、保护灌域土地资源提供理论依据,也为研究区域食品和居民健康安全提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

解放闸灌域位于内蒙古自治区河套灌区的西部,东与永济灌域毗邻,西傍乌兰布和沙漠,南邻黄河,北靠阴山,地理坐标为:106°43′~107°27′E,40°34′~41°14′N。灌域总控制面积为21.57万hm²,灌溉面积为14.21万hm²,其中耕地面积为12.20万hm²,林果和牧草总面积为2.01万hm²^[13]。灌域北部土壤质地以粉黏土为主,南部以粉壤土为主。

1.2 样品采集

2015年9月,在研究区域内以10 km×10 km的网距网格布设采样点,并用蛇形布点法进行采样,以GPS定位,并记录实地环境情况,共采集49个采样点,如图1所示。在研究区内采集0~20 cm土壤若干,去除土壤中碎石、残枝败叶等杂物,采用四分法留取1 kg土样装入干净的布袋中带回实验室,经自然风干后研磨过60目筛,冷藏保存时间不超过7 d直至分析。

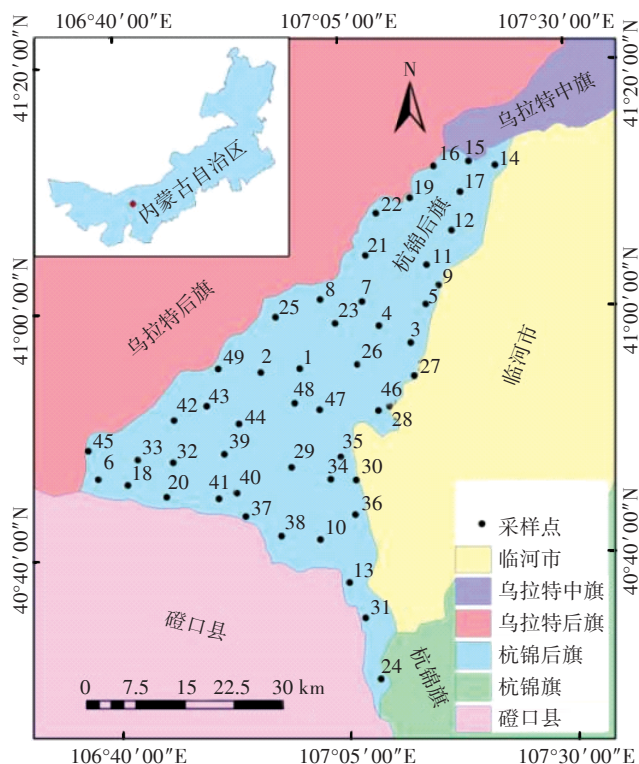


图1 表层土壤采样点示意图

Figure 1 Map of surface soil sampling sites

1.3 土壤理化性质测定

有机质的测定:采用重铬酸钾容量法-外加法进行测定。pH和EC值的测定:将一定量的土壤样品过2 mm筛,精确称取20 g土样放入250 mL锥形瓶中,用量筒量取100 mL超纯水,全部倒入锥形瓶,将锥形瓶置于恒温培养振荡器中,再将锥形瓶静置30 min,取锥形瓶上清液置于抽滤瓶过滤后转入大烧杯,用pH计和EC计测定pH和EC值。土壤颗粒粒径采用干法激光粒度仪进行测定。

1.4 样品的预处理和样品的净化

精确称取4 g土样和1 g硅藻土混合后置于快速溶剂萃取(ASE)池中,先预热5 min,按丙酮和正己烷的体积比为1:1混合,再静态萃取6 min,萃取压力为1500 psi(1 psi=6895 Pa),萃取温度为100 °C,循环3次。将萃取液移至100 mL烧杯中,经35~40 °C水浴旋转蒸发和氮吹浓缩至约10 mL,以备净化处理。净化的步骤如下:先将萃取液在35~40 °C水浴旋转蒸发和氮吹后浓缩至10 mL,用30 mL丙酮和20 mL正己烷以1滴·s⁻¹的速度依次充分活化弗罗里硅土柱,将收集的萃取液加入弗罗里硅土柱,依次用15 mL正己烷和15 mL含2%丙酮的正己烷淋洗土柱,收集洗脱液。洗脱液被35~40 °C水浴旋转蒸发和氮吹后,使其浓缩至1.5 mL,用于色谱

分析。

1.5 样品的分析条件

采用气相色谱-电子捕获检测器测定 PCBs 的浓度,色谱柱采用 SPB-1 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm)。色谱分析条件:载气为高纯氮气(99.999%),检测器温度为 300 ℃,进样口温度为 250 ℃;进样量为 1 μL,分流比为 6:1,初始温度为 120 ℃,保持 18 min,以 5 ℃·min⁻¹升温至 180 ℃,持续 5 min,以 10 ℃·min⁻¹升温至 230 ℃,持续 20 min。采用色谱峰的保留时间和峰面积外标法进行定性与定量。选用含有 8 种 PCBs 单体的混合标样(Method-X25-Mix 2),分别为 PCB1、PCB5、PCB29、PCB47、PCB98、PCB154、PCB171 和 PCB201,购于美国 AccuStandard 公司。

1.6 质量控制与质量保证

本实验整个过程进行质量控制与质量保证,保证数据的准确性和精确性。设置平行样及加标空白实验,设 1 个空白样、3 个平行样,同一样品进行 5 次重复测试。样品的加标回收率为 95.51%~126.45%,方法的相对标准偏差(RSD)均在 15% 以内,方法检测限为 0.1~0.3 ng·g⁻¹。PCBs 标准溶液用正己烷分别稀释定容至 5 个浓度,采用 5 点外标法定量,各单体标准曲线的相关系数均大于 0.97。

1.7 数据处理

采用 SPSS 24.0 进行数据处理与分析。其中,采用双变量对 PCBs 各单体之间进行相关性分析,利用因子分析法对 PCBs 的来源进行分析,其中 KMO 值为 0.680。

2 结果与讨论

2.1 土壤中 PCBs 的污染特征

解放闸灌域土壤中 PCBs 及各单体统计特征值如表 1 所示,解放闸灌域土壤中 Σ PCBs 的浓度为 ND ~ 209.95 ng·g⁻¹,均值为 15.09 ng·g⁻¹。最高值点位于某镇周围的低洼地带,其值为 209.95 ng·g⁻¹,分析发现可能受到点源污染。有研究显示,在气象动力条件下,会导致土壤中 PCBs 含量增加^[14]。由于土壤和沉积物作为介质是 PCBs 存在的重要“源”和“汇”,可能是导致该点最高的主要原因^[15]。最低值点位于某镇耕地土壤中,其值低于检测限。由于该点周围不存在明显点源污染,考虑到该点种植作物可能通过根、叶和茎等组织吸收土壤中 PCBs,另外可能人们的耕作方式改善了土壤的通气状况,加强了土壤中 PCBs 的蒸发,使得该点浓度低于检测限^[16]。PCBs 各单体中

PCB47 和 PCB1 的平均值较高,分别为 5.84 ng·g⁻¹ 和 4.80 ng·g⁻¹,说明其残留浓度较高。检出率最高的是 PCB29 和 PCB47,其值均为 96%;检出率最低的是 PCB201,其值为 16%,说明主要以低氯联苯的检出率为主。PCBs 各单体的变异系数为 102%~427%,其中 PCB1、PCB5、PCB154 和 PCB201 均超过了 200%,说明均达到强变异程度。

本研究与其他地区土壤中 PCBs 的研究结果进行比较,如表 2 所示。由于研究的 PCBs 单体种类不同,从残留浓度范围和平均值来看,与国外研究地区相比,高于韩国蔚山市、韩国安城市和意大利山区,低于伦敦土壤。与国内其他地区相比,高于金华城区、北京市东南郊灌区,低于上海崇明岛、吉林市城郊。由于未受直接污染的土壤浓度一般在几十至几千 ng·g⁻¹^[24],可见解放闸灌域土壤中 PCBs 浓度处于较低水平。

表 1 土壤中 PCBs 的统计特征值

Table 1 Descriptive statistics of PCBs concentrations in the soil

同系物 Homologue	范围 Range /ng·g ⁻¹	平均值 Mean value/ ng·g ⁻¹	标准差 Standard deviation/ ng·g ⁻¹	变异系数 Coefficient of variation/%	检出率 Detection rate/%
PCB1	ND~144.91	4.80	20.50	427	73
PCB5	ND~8.95	0.57	1.38	242	47
PCB29	ND~15.55	2.89	3.40	118	96
PCB47	ND~37.98	5.84	5.98	102	96
PCB98	ND~3.64	0.55	0.79	144	57
PCB154	ND~2.04	0.17	0.36	212	29
PCB171	ND~0.88	0.12	0.23	192	31
PCB201	ND~2.34	0.14	0.43	307	16
Σ PCBs	ND~209.95	15.09	29.36	195	98

注:ND 为低于检出限。下同。

Note:ND is below the detection limit. The same below.

表 2 不同地区表层土壤中 PCBs 的浓度

Table 2 Concentrations of PCBs in the soil from different districts

研究地区 Research area	PCBs 种类 PCBs kinds	范围 Range/ng·g ⁻¹	平均值 Mean value/ng·g ⁻¹	文献 Document
解放闸灌域	8	ND~209.95	15.09	本研究
上海崇明岛	8	ND~265.65	56.00	[17]
吉林市城郊	11	58.20~253.08	111.00	[18]
金华城区	7	0.11~2.69	0.86	[19]
北京市东南郊灌区	58	ND~0.71	0.43	[3]
英国伦敦	—	9.00~2642.00	123.00	[20]
韩国蔚山市	29	0.27~1.82	0.59	[21]
韩国安城市	29	0.11~0.22	0.15	[22]
意大利山区	12	0.50~5.00	—	[23]

2.2 土壤中PCBs的组成特征

解放闸灌域表层土壤中PCBs各单体组成如图2所示,表现为:PCB29 (38.65%)>PCB1 (33.33%)>PCB47 (11.62%)>PCB5 (8.25%)>PCB98 (8.14%),其他单体的检出量很少,主要以低氯联苯为主。我国于1965年开始生产PCBs,直至1974年后开始逐步停产,虽然已经禁止生产和使用PCBs,但PCBs污染仍广泛存在。我国是生产和使用化学品的大国,PCBs的累计产量约1万t,其中三氯联苯约为9000t,主要用于电力电容器浸渍剂,五氯联苯约为1000t,主要用于油漆添加剂^[14]。目前,一些PCB29污染是由于我国生产的变压器、电容器等在处理不当或管理不善的情况下,变压器、电容器油泄露到土壤环境中造成的^[11]。另外,由于PCB1所含氯原子数最少,其水溶性和蒸汽压最大,在土壤中更容易富集^[25]。PCB98会在环境中发生脱氯反应形成PCB47,而PCB47的降解速率较低,会使其在土壤环境中富集^[26]。这些原因可能导致表层土壤中PCB29、PCB1和PCB47浓度较高。

由表1可知,低氯联苯(PCB1、PCB5、PCB29和PCB47)的均值和检出率均高于高氯联苯(PCB98、PCB154、PCB171和PCB201),其可能存在以下几种原因:PCBs单体所含氯原子越少,水溶性和蒸汽压越高,低氯联苯在土壤中越容易富集^[25]。低氯联苯含量较高的原因可能是光化学降解、微生物和植物根际作用可使高氯PCBs转化代谢为低氯PCBs造成的^[27]。黄河内蒙古段水体中主要以低氯PCBs为主,低氯PCBs吸附在颗粒物上会随水流迁移到灌域土壤中并富集,这也是低氯PCBs含量较高的原因^[9]。

2.3 土壤中PCBs的空间分布

本文采用反距离权重法对土壤中 Σ PCBs浓度进行空间分布,如图3所示。解放闸灌域表层土壤中

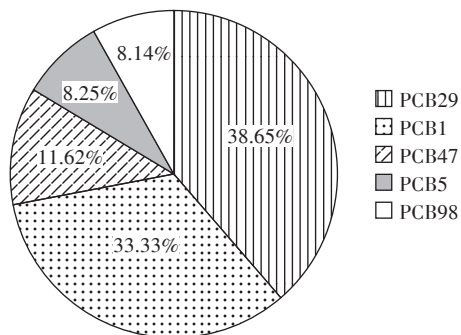


图2 PCBs各同系物的百分比

Figure 2 Percentages of isomers in PCBs

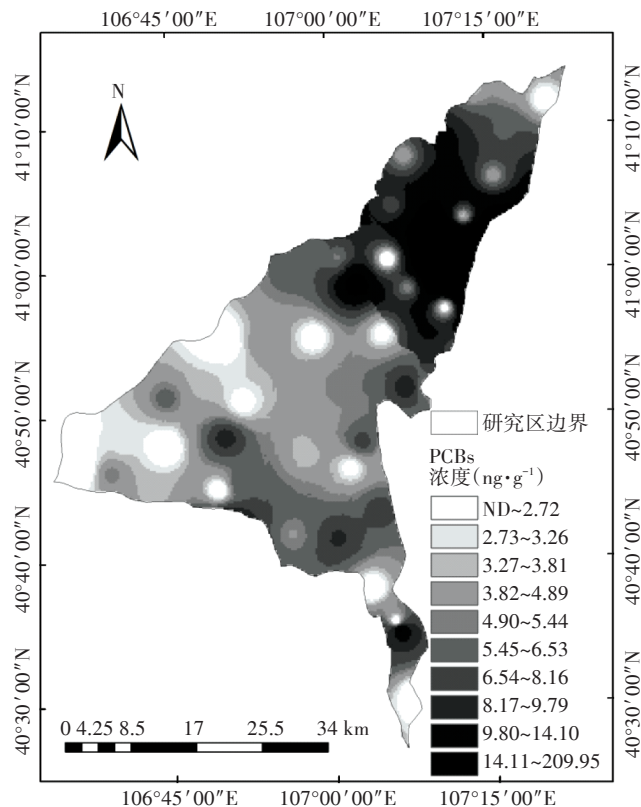


图3 解放闸灌域表层土壤PCBs残留浓度空间分布图

Figure 3 Spatial distribution map of soil residual PCBs concentration in Jiefangzha irrigation area

PCBs浓度分布存在一定的空间差异性,表现为东北高于西南,其西南部呈点状分布。灌域高值区主要分布在灌域的东北部,低值区主要分布在中部。

2.4 土壤理化性质对PCBs浓度的影响

采用SPSS 24.0对土壤理化性质与 Σ PCBs浓度分布进行相关性分析,结果如表3所示。可见,pH与PCBs浓度之间存在显著相关关系,这与Weber等^[28]的研究结果相类似。有机质、EC值、砂粒、粉粒和黏粒与PCBs浓度均没有显著的相关关系,该结论与江萍等^[29]研究成果不同。造成这一现象的原因可能是其他因素,如土地利用类型、土壤水分以及灌溉方式等对PCBs浓度的影响更大^[30]。

2.5 土壤中PCBs的来源分析

利用SPSS 24.0对PCBs各组分及参数进行相关性分析,结果如表4所示。可见低氯联苯(PCB1、PCB5、PCB29和PCB47)各组分之间存在极显著正相关关系,表明低氯联苯可能存在同一污染源;高氯联苯(PCB154、PCB171和PCB201)各组分之间存在显著正相关关系,这表明其来源存在相似性。

对PCBs各单体浓度进行因子分析,提取出2个

表3 各参数皮尔逊相关系数矩阵
Table 3 Pearson coefficients matrix of parameters

理化性质 Physicochemical property	PCBs同系物 Homologue								
	PCB1	PCB5	PCB29	PCB47	PCB98	PCB154	PCB171	PCB201	Σ PCBs
有机质	0.250	0.224	0.132	0.170	0.129	0.513**	0.147	0.013	0.246
pH	0.336*	0.251	0.190	0.278	0.168	-0.067	0.037	0.049	0.330*
EC值	0.079	0.041	0.059	-0.034	-0.107	-0.106	0.033	-0.041	0.053
砂粒	0.002	-0.047	0.047	0.013	0.137	0.178	-0.111	0.080	0.014
粉粒	0.028	0.062	-0.071	0.015	0.159	0.183	0.090	-0.086	0.004
黏粒	0.144	0.221	0.314*	-0.271	-0.157	-0.039	0.254	0.022	0.208

注:**表示在0.01水平(双尾)上显著相关;*表示在0.05水平(双尾)上显著相关。下同。
Note:**means correlation is significant at the 0.01 level;*means correlation is significant at the 0.05 level. The same below.

特征值大于1的主要成分,主成分F1和F2解释了44.91%和19.90%的方差变异,累积贡献率为64.81%,如表5所示。如图4所示,从各PCBs单体载荷分布来看,这两组PCBs的污染来源明显不同。在F1上,低氯联苯(PCB1、PCB5、PCB29和PCB47)具有较高的正因子载荷(>0.827),可划为一组。这4种低氯联苯的污染来源具有同源性,表明F1主要来源是电容器、变压器油的泄露。在解放闸灌域有超过1525台配电变压器及其所含的电容器在使用,其中一些报废的变压器和电容器由于管理不善或处理不当,有相当一部分变压器和电容器油泄露到土壤环境中,导致灌域土壤中低氯联苯含量较高。这与太湖竺山湾及入湖河流沉积物中低氯联苯的来源相一致^[31]。在F2上,PCB98、PCB154、PCB171和PCB201具有一定的正载荷(>0.169),可划为另一组,表明其污染来源具有相似性,F2主要来源是大型电力设备的输入。PCB98与PCB154、PCB171和PCB201的正载荷和相关系数均较小,由于PCB98的主要来源是油漆添加剂和涂料,可能有少量是来自大型电力设备

的输入,这是造成其正载荷和相关系数较小的主要原因。我国在1950—1980年间,从日本、法国、比利时和德国等进口大量大型电力设备,有研究发现,这些国外的大型电力设备中高氯联苯的含量较高^[32]。可能有少量大型电力设备泄露于灌域土壤中,造成了高氯联苯的污染。这与黄河中下游流域土壤中高氯联苯的来源类似^[12]。总之,解放闸灌域PCBs的污染来源主要是电容器和变压器油泄露。

3 结论

(1)内蒙古解放闸灌域土壤中ΣPCBs浓度为

表5 主成分变异系数分析结果
Table 5 Results of principal component analysis
variation coefficient

成分 Composition	提取载荷平方和Extraction sums of squared loadings		
	特征根 Characteristic root	方差贡献率 Variance contribution/%	累积 Cumulative contribution rate/%
1	3.59	44.91	44.91
2	1.59	19.90	64.81

表4 PCBs浓度及各参数皮尔逊相关系数矩阵
Table 4 Pearson coefficients matrix of PCBs and parameters

项目Project	PCB1	PCB5	PCB29	PCB47	PCB98	PCB154	PCB171	PCB201	Σ PCBs
PCB1	1								
PCB5	0.890**	1							
PCB29	0.536**	0.569**	1						
PCB47	0.787**	0.766**	0.822**	1					
PCB98	0.238	0.227	0.406**	0.423**	1				
PCB154	0.043	0.056	-0.083	-0.031	0.204	1			
PCB171	0.188	0.157	0.393**	0.394**	0.156	0.310*	1		
PCB201	0.072	0.086	0.170	0.283*	0.130	0.310*	0.437**	1	
Σ PCBs	0.972**	0.900**	0.700**	0.903**	0.343*	0.042	0.287*	0.157	1

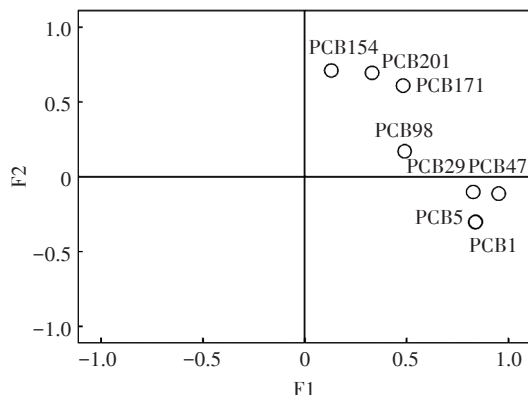


图4 PCBs各单载体荷示意图

Figure 4 Plot of PCBs congeners

ND~209.95 ng·g⁻¹,均值为15.09 ng·g⁻¹,与其他研究地区相比,处于较低水平。解放闸灌域土壤中PCBs各单体成分主要为PCB29>PCB1>PCB47>PCB5>PCB98,其余单体的检出量很少,说明解放闸灌域主要以低氯联苯为主。

(2)解放闸灌域表层土壤中PCBs分布存在一定的空间差异性,表现为东北高于西南,其西南部呈点状分布。

(3)土壤理化性质对PCBs浓度存在一定的影响,其中pH值与其显著相关,有机质、EC值、砂粒、粉粒和黏粒与其不相关。

(4)用因子分析法对PCBs各单体浓度进行分析表明,PCBs污染的主要来源是电容器、变压器油的泄露。

参考文献:

- [1] 杨凯,姚笑颜,陈晨,等.水稻土泥浆体系中多氯联苯的微生物厌氧脱氯[J].应用生态学报,2015,26(10):3083-3090.
YANG Kai, YAO Xiao-yan, CHEN Chen, et al. Microbial anaerobic dechlorination of polychlorinated biphenyls in paddy soil slurry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10):3083-3090.
- [2] 马子龙,高宏,方利江,等.兰州地区PCBs的长距离传输潜力及其总持久性模拟研究[J].农业环境科学学报,2012,31(1):60-66.
MA Zi-long, GAO Hong, FANG Li-jiang, et al. Simulation of long-range transport potential and overall persistence of polychlorinated biphenyls (PCBs) in Lanzhou Area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1):60-66.
- [3] 李艳,黄冠华,顾华,等.北京典型灌域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]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):313-322.
- [4] 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.
- [5] 胡国成,李雪梅,彭晓武,等.白洋淀鱼类体内多氯联苯积累特征及其毒性评价[J].农业环境科学学报,2012,31(4):667-672.
HU Guo-cheng, LI Xue-mei, PENG Xiao-wu, et al. Bioaccumulation and toxicity assessment of polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Baiyangdian Lake, North China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):667-672.
- [6] Ren N, Que M X, Li Y F, et al. Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(11):3871-3876.
- [7] Bergkvist C, Akesson A, Glynn A, et al. Validation of questionnaire-based long-term dietary exposure to polychlorinated biphenyls using biomarkers[J]. *Molecular Nutrition Food Research*, 2012, 56(11):1748-1754.
- [8] Hopf N B, Ruder A M, Waters M A. Historical reconstruction of polychlorinated biphenyl (PCB) exposures for workers in a capacitor manufacturing plant[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 21(10):6419-6433.
- [9] 裴国霞,张岩,马太玲,等.黄河内蒙古段水体中HCHs和多氯联苯的分布特征[J].水资源与水工程学报,2010,21(4):25-27.
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.
- [10] 张琦,裴国霞,刘耕耘,等.黄河头道拐断面水中多氯联苯的时间分布特征[J].干旱区研究,2014,31(5):937-942.
ZHANG Qi, PEI Guo-xia, LIU Geng-yun, et al. Temporal distribution of PCBs in river water at Toudaoguai section of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(5):937-942.
- [11] 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.
LU Shuang, ZHANG Xu, PEI Jin, et al. Residual characteristics of polychlorinated biphenyls in surface soil of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River[J]. *Chinese Environmental Science*, 2016, 36(9):2741-2748.
- [12] 姚宏,卢双,张旭,等.黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险[J].环境科学,2018,39(1):123-129.
YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, et al. The status and risk of two of dioxin-like polychlorinated biphenyls in soil of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):123-129.
- [13] 陆圣女.基于GIS解放闸灌域土壤墒情变化规律及预报模型研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008:8-11.
LU Sheng-nü. Study on soil moisture change rules and prediction models base on GIS in Jiefangzha Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008:8-11.
- [14] 盖楠.若尔盖湿地有机氯农药和多氯联苯的生态地球化学研究[D].北京:中国地质科学院,2012:41-45.

- GAI Nan. Ecological geochemistry of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Zoige alpine wetland[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012:41-45.
- [15] 丁海霞, 陶雪梅, 吕康乐, 等. 兰州市土壤中PAHs和PCBs的分布特征及风险评价[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(2):25-29.
- DING Hai-xia, TAO Xue-mei, LÜ Kang-le, et al. Distribution characteristics and risk analysis of PAHs and PCBs in soils of Lanzhou[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2018, 30(2):25-29.
- [16] 韩志超. 基于被动采样技术的土壤中PCBs和DDTs污染特征、空间分布及来源分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2018:41-42.
- HAN Zhi-chao. The pollution characteristics, spatial distribution and source apportionment of PCBs and DDTs in soil by passive sampling techniques[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018:41-42.
- [17] 周健成, 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. Residues of polychlorinated biphenyls in agricultural fields of Chongming Island in Shanghai[J]. *Chinese Environmental Science*, 2010, 30(1):116-120.
- [18] 陈晓荣, 王洋, 刘景双, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6):1127-1133.
- CHEN Xiao-rong, WANG Yang, LIU Jing-shuang, et al. Residues and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls in suburban vegetable soils of Jilin City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6):1127-1133.
- [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 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.
- [20] 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.
- [21] Kim L, Jeon J W, Lee Y S, et al. Monitoring and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in agricultural soil collected in the vicinity of an industrialized area[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2016, 59(4):655-659.
- [22] Kim L, Jeon J W, Son J Y, et al. Monitoring and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in agricultural soil from two industrialized areas[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2017, 39(2):1-13.
- [23] 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.
- [24] 魏中青, 刘丛强, 梁小兵, 等. 贵州红枫湖地区水稻土多氯联苯和有机氯农药的残留[J]. 环境科学, 2007, 28(2):255-260.
- WEI Zhong-qing, LIU Cong-qiang, LIANG Xiao-bing, et al. Residue of PCBs and OCPs in the paddy soil from Hongfeng reservoir area, Guizhou, China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2):255-260.
- [25] Kwon H D, Lee Y S, Kim L, et al. Spatial distribution and source identification of indicator polychlorinated biphenyls in soil collected from the coastal multiindustrial city of Ulsan, South Korea for three consecutive years[J]. *Chemosphere*, 2016, 163:184-191.
- [26] 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价[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. Residual characteristics and ecological risk assessment of polychlorinated biphenyls in surface sediments from Yangtze estuary and nearshore of east China sea[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(10):1500-1505.
- [27] 张雪, 刘维涛, 梁丽琛, 等. 多氯联苯(PCBs)污染土壤的生物修复[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1):1-11.
- ZHANG Xue, LIU Wei-tao, LIANG Li-chen, et al. Bioremediation of soils polluted by polychlorinated biphenyls (PCBs) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1):1-11.
- [28] Weber J B, Wilkerson G G, Reinhardt C F. Calculating pesticide sorption coefficients (K_d) using selected soil properties[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(2):157-166.
- [29] 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 Ping, ZHAO Ping, WAN Hong-fu, et al. Concentrations of PCBs in agricultural soils of typical regions in Pearl River Delta[J]. *Soils*, 2011, 43(6):948-953.
- [30] 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 and bioremediation of agricultural soil contaminated with PCBs in e-waste recycling area[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011:47-51.
- [31] 徐磊, 刘莎, 秦庆东, 等. 太湖竺山湾及入湖河流沉积物中多氯联苯单体分布及源解析[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11):4333-4341.
- XU Lei, LIU Sha, QIN Qing-dong, et al. Distribution and source apportionment of polychlorinated biphenyl congeners in surface sediments from Zhushan Bay and the inflow rivers of Lake Taihu[J]. *Chinese Environmental Science*, 2017, 37(11):4333-4341.
- [32] 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]. *Science of the Total Environment*, 2002, 290(1/2/3):181-198.