

太原市污灌区土壤和浅层地下水中有有机氯农药残留特征

刘 敏, 张彩香*, 廖小平, 徐 亮, 李佳乐, 姚琳琳, 向青清

(中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 为了研究有机氯农药(OCPs)在污灌区土壤和浅层地下水中的残留特征, 运用气相色谱电子捕获检测器(GC-ECD)对太原市小店污灌区 3 个钻孔不同层位土样和 16 个浅层地下水样中的 OCPs 进行检测。结果表明: 六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)普遍存在于污灌区土壤和地下水中, 土壤中 HCHs 含量范围为 $0.25\sim 9.21\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, DDTs 残留范围为 $0.14\sim 30.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 浅层地下水中, HCHs 含量范围为 $0.30\sim 51.23\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, DDTs 残留范围为 $1.41\sim 32.78\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 污灌对 OCPs 不同组分在土壤中的垂直迁移影响不同, 相对于 DDTs, HCHs 更容易向深层土壤中迁移; 土壤中 p,p' -DDE 含量最高, 地下水中 β -HCH 平均含量最高。

关键词: 有机氯农药; 污灌区; 土壤; 浅层地下水; 垂直迁移

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)09-1821-06 doi:10.11654/jaes.2013.09.017

Residue Characters of OCPs in Soil and Shallow Groundwater of Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City

LIU Min, ZHANG Cai-xiang*, LIAO Xiao-ping, XU Liang, LI Jia-le, YAO Lin-lin, XIANG Qing-qing

(State key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan, 430074)

Abstract: To study the residue characters of organochlorine pesticide(OCPs) in soil and shallow groundwater of Xiaodian sewage irrigation area, Taiyuan city, three profile soils and sixteen shallow groundwater samples were collected to analyze the content of OCPs detected by GC-ECD. The results showed that HCHs and DDTs predominate in soil-groundwater systems. The concentration of HCHs in the soil ranged from 0.25 to $9.21\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, and 0.14 to $30.4\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ for DDTs; The content of HCHs and DDTs in the shallow groundwater ranged from 0.30 to $51.23\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 1.41 to $32.78\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Various OCPs components presented different migration in soil under the impact of wastewater irrigation. HCHs migrated faster than DDTs. p,p' -DDE was main DDTs in the soil samples while β -HCH of HCHs present the highest content in groundwater.

Keywords: organochlorine pesticide; sewage irrigation; soils; groundwater; migration

有机氯农药(OCPs)具有高生物富集性、毒性和持久性^[1]。在 1970 年以前, OCPs 类农药已经大量开始使用^[2]。在我国, 尽管自 1983 年开始禁止使用 OCPs 这类农药, 但是滴滴涕(DDTs)、六六六(HCHs)分别作为生产三氯杀螨醇(DDTs 占 3%~7%)和林丹(HCHs 占 99%)的工业原料, 仍被生产或者进口^[3]。蒸馏效应使得 OCPs 广泛分布在不同地区的不同环境介质中, 其中土壤就是 OCPs 这类农药使用后的一个

重要赋存场所^[3], 同时残留在土壤中的 OCPs 可能成为新污染源, 被再释放到环境中^[4]。

我国水资源短缺和污染问题越来越突出, 污灌作为缓解水资源匮乏地区农业用水紧张和实现污水资源化利用的有效途径, 可能会使 OCPs 向深层土壤迁移^[5], 甚至对地下水安全造成潜在威胁^[6]。国内外已对 OCPs 在表层土壤中残留水平及污染情况进行了大量的研究^[7-8], 但研究的土层大都是在 0~5 m 之内。为了更好地了解 OCPs 在污灌区土壤中的迁移转化及其对浅层地下水威胁, 本文以太原市小店污灌区为研究对象, 对该地区不同深度土壤和浅层地下水样进行研究, 分析 OCPs 在研究区不同深度土壤、浅层地下水中残留状况、分布特征, 以期为解决污灌条件下土壤

收稿日期: 2013-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972156)

作者简介: 刘 敏(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境有机污染物环境化学。E-mail: liuminliurong@yahoo.cn

* 通信作者: 张彩香 E-mail: Caixiangzhang@yahoo.com

和浅层地下水污染问题提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集

根据小店污灌区的灌溉渠特点和地下水的污染特征^[9],于2011年9月沿小店东干渠、北张退水渠、太榆退水渠采集浅层地下水样(来自附近20~100 m的民用井,这些井主要用于浇灌农作物)16个、土样(0~20 m)40个,F-15为清灌区,F-5、F-4位于污灌区,其中F-5濒临汾河,图1为采样点分布图。采集样品的玻璃器皿均先用重铬酸钾洗液浸泡过,利用不锈钢铲除去土壤表面树叶等杂质,取不同层位的土壤时,均将每层位上、下2 cm的土壤去掉(防止产生交叉污染),且每一个土样均取自每一个层位上、中、下3处,混匀后装入事先洗净并烘干的铝盒。取水样前用水样将玻璃瓶润洗3遍,并用封口膜将瓶口封紧(防止产生交叉污染)。所有的样品被立即送到实验室,放入冰箱-4℃冷冻保存,一周内进行处理和分析。

1.2 主要材料和仪器

主要材料:22种有机氯农药组成的混标,回收率指示剂为2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCMX)和十氯联

苯(PCB209),内标化合物为五氯硝基苯(PCNB),上面提及的农药标准试剂均购自美国 Ultra Scientific 公司。硅胶(青岛海洋化工厂分厂,分析纯);氧化铝(国药集团化学试剂有限公司,分析纯);无水硫酸钠(天津市福晨化学试剂厂,分析纯);二氯甲烷、正己烷、丙酮(美国 TEDIA 公司,农残级)。

主要仪器:采用 GC-ECD(Agilent HP6890,USA)进行定量分析,分析条件参考廖小平等的方法^[9];旋转蒸发仪(瑞士 Buchi 公司);12 管氮吹仪(美国 Orga-nomation 公司)。

1.3 样品前处理

土样预处理:称取经自然风干的土样(10 ± 0.01) g,加入少量无水硫酸钠和回收率指示剂 TCMX 和 PCB209 20 ng 至索氏抽提器内,并加入已活化的铜片和二氯甲烷(120 mL)。水浴恒温(45℃)抽提 12 h,加无水硫酸钠去除水分。旋蒸至 3 mL,用洗脱液[二氯甲烷/正己烷(体积比为 2:3)混合液]过硅胶/氧化铝(体积比为 2:1)层析柱净化。浓缩至 0.5 mL,用氮吹仪吹至 0.25 mL 后,加入内标物 PCNB 20 ng 进行测定。

水样预处理:量取水样 500 mL 于 1 L 分液漏斗中,加入回收率指示剂 TCMX。随后用二氯甲烷进行

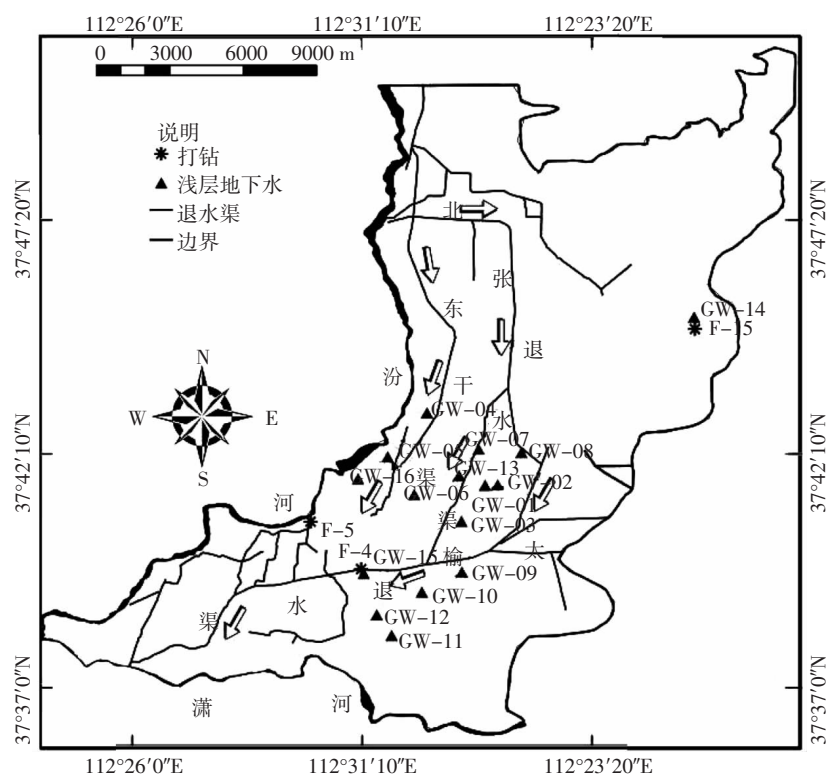


图1 太原市小店区采样点分布图

Figure 1 The distribution of sampling site in Xiaodian area, Taiyuan

液液萃取,向萃取后溶液加入活化好的少量铜片脱硫,并加入少量无水硫酸钠。利用旋转蒸发仪在 40 ℃ 恒温水浴下浓缩至 3 mL,转移至硅胶/氧化铝(体积比为 2:1)层析柱净化,洗脱溶液为二氯甲烷与正己烷(体积比为 2:3)混合液。洗脱后,旋蒸至 0.5 mL。用氮吹仪浓缩至 0.25 mL 之后,加入内标物 PCNB 20 ng 进行测定。

1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

所有样品 TCMX 回收率平均值为 75%~96%,PCB209 回收率平均值为 70%~88%。每预处理 6 个样时,做一个方法空白,结果空白样中均没有检测到目标化合物。对 Agilent 色谱工作站进行日校正,分析有机氯农药标准物质(100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),所有样品都经过回收率校正和仪器校正。土样中 OCPs 的检测限范围为 0.001~0.005 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,水样中 OCPs 的检测限范围为 0.005~0.01 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 OCPs 在深层土壤中的残留水平

表 1 为小店深层土壤中有机氯的残留情况。如表 1 所示,10 种 OCPs 组分的检测率均较高,大部分土样检测率高达 100%,表明 OCPs 普遍存在于研究区深层土壤中。OCPs 残留范围为 0.41~39.61 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 HCHs 的残留范围为 0.25~9.21 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$;DDTs 的残留范围为 0.14~30.47 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。DDTs 和 HCHs 的残留量均低于我国土壤环境质量一级标准值 50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (GB 15618—1995)。在不同地点的土样,这 10 种 OCPs 组分的残留量存在明显差异,OCPs 在区域上的残留差异可能是由于农业施用量的不同而造成的^[10],如污灌区 F-5 中的 OCPs 残留量最大,最高达 30.40 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 HCHs 残留量最高是 β -HCH(2.92 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$);DDTs 残留量最高是 p,p' -DDE(10.99 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.2 土壤中 OCPs 的垂直分布特征及来源分析

图 2 为小店灌区 HCHs 和 DDTs 含量及其各组分百分含量在不同层位土壤中的垂直分布。由 DDTs 和 HCHs 含量的垂直分布来看,从土壤顶层到底层,F-4 土样中 OCPs 在底层含量最低,DDTs 含量在 8~10 m、10~12 m 层位上达到最大;F-5 土样中 HCHs 和 DDTs 表层(0~2 m)残留较高,但其在其他层位上的变化比较小。这可能是此剖面濒临汾河,表层的土壤中含有丰富的有机质,表层以下大都为砂土,这致使 OCPs 大部分均被截留在表层,而表层以下土壤变化不明显。F-15 土样中 DDTs 随着深度的加深,其残留

表 1 太原市小店区土壤中 HCHs 和 DDTs 的残留状况($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)
Table 1 Residues of HCHs and DDTs in soil of study area($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)

OCPs 组分	F-4		F-5		F-15	
	检测率	范围	检测率	范围	检测率	范围
α -HCH	100%	0.02~0.16	100%	0.03~5.78	100%	0.02~0.15
β -HCH	100%	0.10~0.38	100%	0.21~2.92	100%	0.35~1.22
γ -HCH	100%	0.01~0.06	100%	0.03~0.30	100%	0.01~0.22
δ -HCH	100%	0.03~0.14	100%	0.07~0.31	100%	0.03~0.89
o,p' -DDE	80%	ND~0.04	80%	ND~0.32	100%	0.02~0.10
p,p' -DDE	100%	0.03~0.25	100%	0.03~10.99	100%	0.03~0.75
o,p' -DDD	100%	0.03~0.15	100%	0.02~2.12	100%	0.02~0.30
p,p' -DDD	100%	0.03~0.15	100%	0.03~5.55	100%	0.02~0.19
o,p' -DDT	80%	ND~0.12	100%	0.01~1.27	100%	0.01~0.09
p,p' -DDT	100%	0.03~0.53	100%	0.06~10.16	100%	0.01~0.65
Σ HCHs		0.25~0.55		0.36~9.21		0.54~2.17
Σ DDTs		0.16~0.70		0.15~30.47		0.14~2.05
Σ OCPs		0.41~1.25		0.51~39.61		0.68~4.22

注: Σ HCHs= α -HCH+ β -HCH+ γ -HCH+ δ -HCH; Σ DDTs= o,p' -DDE+ p,p' -DDE+ o,p' -DDD+ p,p' -DDD+ o,p' -DDT+ p,p' -DDT; Σ OCPs= Σ HCHs+ Σ DDTs

量逐渐减少,而 HCHs 残留量有增加趋势,且在 8~10 m 残留量达到最大。HCHs 的 4 种同分异构体中,大部分样品所测结果都为 β -HCH 百分含量最高,因为 β -HCH 物理化学性质稳定,不易被微生物降解^[11],而且其他同分异构体在光化学或者微生物作用下,可以转化为 β -HCH^[12]。所有土样中, α -HCH 均主要残留于土样的表层,由土壤表层至底层其百分含量有逐渐降低趋势,说明此类物质易被表层土壤中有机质吸附和降解。在污灌区(F-4、F-5)发现,土壤表层中 α -HCH 是 HCHs 同分异构体中百分含量最高的,原因可能有两方面:一方面是由于污灌引进了新的工业 HCHs 输入源,因为在工业 HCHs 中,异构体组成比例为 α 型 60%~70%, β 型 5%~12%, γ 型 10%~12%, δ 型 6%~10%,最初进入土壤中, α -HCH 含量最高^[11];另一方面是由于远距离传输所致^[13]。灌区(F-15)则显示 β -HCH 百分含量最高,且除 β -HCH 外,其他 HCHs 同分异构体随着深度的增加其百分含量均有逐步降低趋势。综上可知,污灌可能对 HCHs 这类农药在土壤中的垂直分布有一定的影响,清灌区这类农药主要以历史残留为主。

由 DDTs 的百分含量图可知,在 o,p' -DDE, p,p' -DDE, o,p' -DDD, p,p' -DDD, o,p' -DDT, p,p' -DDT 中, p,p' -DDD 和 p,p' -DDE 的百分含量也普遍高于 o,p' -DDE, o,p' -DDD。这是由于 p,p' -DDD 和 p,p' -

DDE 是 p,p' -DDT 分别在厌氧和好氧条件下的降解产物^[14],且 p,p' -DDT 比 o,p' -DDT 更易降解的缘故^[13]。大部分土样中 p,p' -DDT 的百分含量较高,说明近期可能还有 DDT 这类农药的输入^[15]。在表层上,3 个采样点处 DDE 含量普遍高于 DDD,可能是表层土壤受到人为扰动,致使表层处于好氧环境,DDT 主要代谢产生 DDE 的缘故^[13]。污灌区的 p,p' -DDT 百分含量分别在 8~10 m、10~12 m 和 14~16 m、16~18 m 这两个层位达到最大,而在清灌区的 4~6 m、6~8 m 两个层位上达到最大。这可能是一方面由于污灌废水中含有 p ,

p' -DDT,其随废水向下迁移,另一方面污灌使得原来截留在土壤中的 p,p' -DDT 向更深处渗透^[4]。由此可知,污灌影响 p,p' -DDT 垂直向下迁移^[16],同时,发现污灌区 o,p' -DDE 均比清灌区同一层位的 o,p' -DDE 的百分含量要低。

2.3 OCPs 在浅层地下水中的残留水平

赋存于土壤中的有机氯农药可能随着水体迁移,淋溶进入地下含水层中,导致地下水受污染^[5,9]。由污灌区和清灌区(GW-14)地下水中 OCPs 的残留情况(表 2)可知,浅层地下水中 10 种 OCPs 的残留量

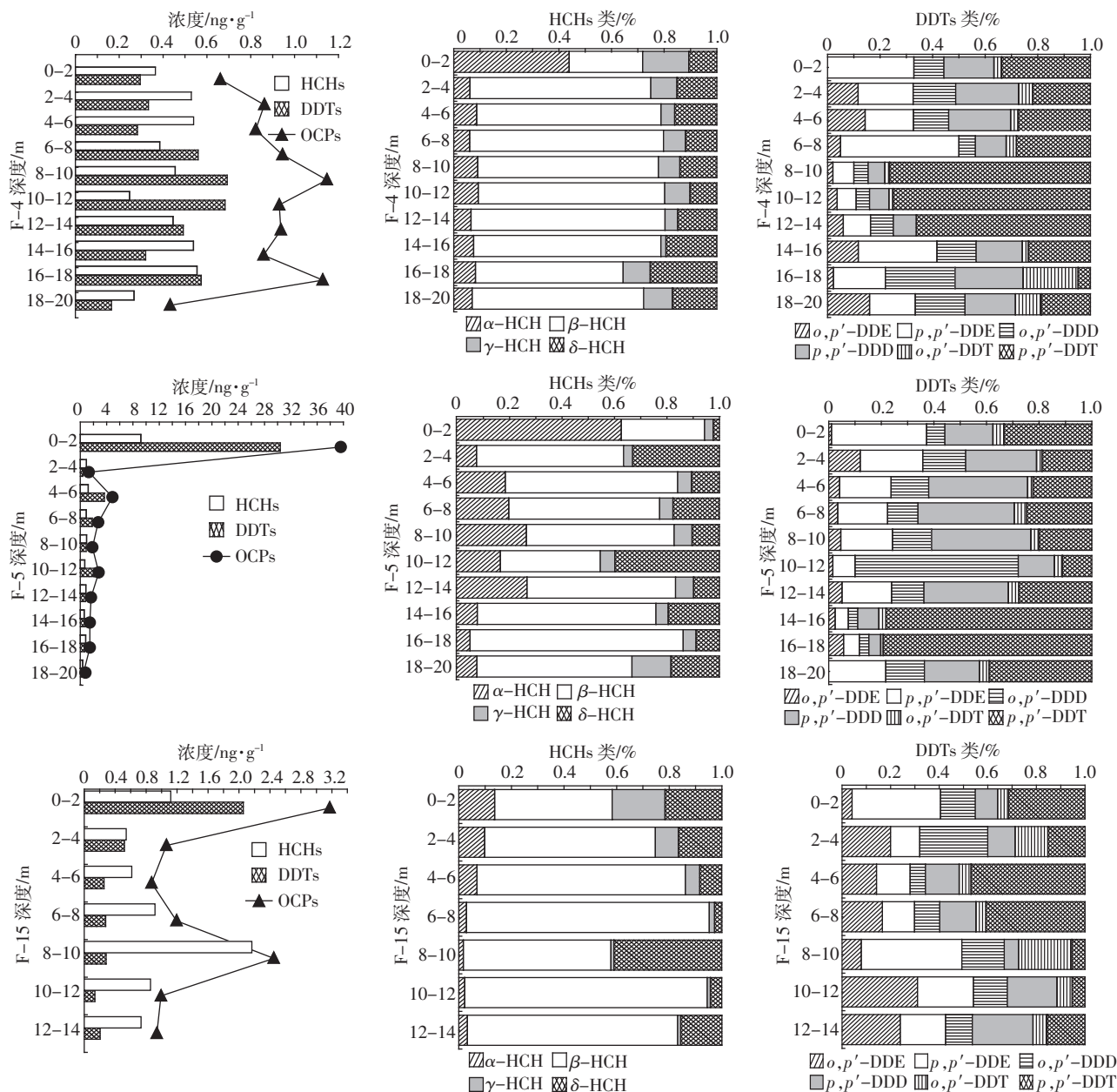


图2 小店污灌区土壤中 DDTs 与 HCHs 的垂直分布与其组成

Figure 2 Vertical distributions of contents and patterns of HCHs and DDTs in the soils of irrigated area, Xiaodian

介于 5.22~54.26 ng·L⁻¹。其中, HCHs 的检测率为 60%~100%, 残留范围是 0.30~51.23 ng·L⁻¹; DDTs 的检测率为 33%~100%, 残留范围是 1.41~32.78 ng·L⁻¹。浅层地下水系统中平均残留量最高的是 β -HCH (4.01 ng·L⁻¹), 平均残留量最低的为 p,p' -DDT (0.33 ng·L⁻¹)。本研究区中 HCHs 和 DDTs 残留量均远低于我国生活饮用水卫生标准 (GB 5749—2006), 可见研究区浅层地下水有机氯含量残留水平较低。浅层地下水中 HCHs 平均总残留量大于 DDTs 平均总残留量, 可能是 HCHs 同分异构体的有机碳-水分配系数均比 DDTs 的有机碳-水分配系数低, 且 HCHs 向下迁移能力较强的缘故^[17]。

表 2 研究区浅层地下水中 HCHs 和 DDTs 的残留状况 (ng·L⁻¹)

Table 2 Residues of HCHs and DDTs in the surficial groundwater of study area (ng·L⁻¹)

OCPs 组分	污灌区			清灌区
	检测率	范围	平均值	浓度
α -HCH	100%	0.07~29.43	2.47	0.46
β -HCH	60%	ND~43.34	4.01	1.13
γ -HCH	80%	ND~4.16	1.31	0.94
δ -HCH	100%	0.23~5.07	2.06	1.09
o,p' -DDE	33%	ND~4.41	0.8	0
p,p' -DDE	60%	ND~2.34	0.58	0
o,p' -DDD	100%	0.71~5.34	2.59	2.39
p,p' -DDD	47%	ND~27.96	2.23	0.84
o,p' -DDT	80%	ND~1.66	0.68	0.13
p,p' -DDT	67%	ND~1.59	0.33	0
Σ HCHs		0.30~51.23	9.85	3.61
Σ DDTs		1.41~32.78	7.21	3.36
Σ OCPs		5.22~54.26	17.06	6.97

2.4 浅层地下水中 OCPs 的分布

由表 1、表 2 对比可知, 污灌区土壤中 DDTs 比 HCHs 含量高, 而浅层地下水中则是 HCHs 含量高于 DDTs。这可能与它们本身理化性质^[18](如溶解性、吸附性能等)、人类的活动^[19](如不同耕作方式, 施用不同量的农药等)、土壤的理化性质(如土壤的岩性)以及生物扰动有关^[20]。土壤中 OCPs 的检测率高于浅层地下水, 说明部分 OCPs 在经过土壤向下迁移的过程中被土壤吸附而截留或者被土壤中微生物降解。在 HCHs 中, β -HCH 在土壤和浅层地下水中的平均残留量是最高的, 这符合 β -HCH 的难降解、难溶特性^[20]; 而在 DDTs 中, 浅层地下水中 DDT 的降解产物 o,p' -DDD 平均残留量最高, 这是由于其在浅层地下水主要处于

厌氧环境的缘故。

3 结论

(1) 通过对小店污灌区土壤和浅层地下水中 OCPs 分析可知, 土壤和浅层地下水中 OCPs 的残留范围分别为 0.41~39.61 ng·g⁻¹, 5.22~54.26 ng·L⁻¹; HCHs 的残留范围分别为 0.25~9.21 ng·g⁻¹, 0.30~51.23 ng·L⁻¹; DDTs 残留范围分别为 0.14~30.47 ng·g⁻¹, 1.41~32.78 ng·L⁻¹。可见, OCPs 在研究区的这两种环境介质中残留水平平均较低。

(2) 对研究区 OCPs 的组成及分布特征的分析发现, 土壤中有有机氯农药残留以 DDTs 为主, 且 p,p' -DDE 含量最高达 (10.99 ng·g⁻¹)。地下水中有有机氯农药残留以 HCHs 为主, 其中以 β -HCH 平均含量最高; 清灌区土壤中 o,p' -DDE 的百分含量比污灌区同一层位的 o,p' -DDE 的百分含量均要高。

(3) 对比土壤和浅层地下水中 OCPs 发现, 土壤中 OCPs 的检测率比浅层地下水中 OCPs 的检测率高。10 种 OCPs 组分中 β -HCH 在所用样品中的平均残留量最高。

参考文献:

- [1] Kurt-Karakus P B, Bidleman T F, Jones K C. Chiral organochlorine pesticide signatures in global background soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(22): 8671-8677.
- [2] Wong M H, Leung A O W, Chan J K Y, et al. A review on the usage of POP pesticides in China, with emphasis on DDT loadings in human milk[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(5): 740-752.
- [3] Wang F, Jiang X, Bian Y R, et al. Organochlorine pesticides in soils under different land usage in the Taihu Lake region, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 19(5): 584-590.
- [4] Tao S, Liu W, Li Y, et al. Organochlorine pesticides contaminated surface soil as reemission source in the Haihe Plain, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(22): 8395-8400.
- [5] Zhang H, Luo Y, Li Q. Burden and depth distribution of organochlorine pesticides in the soil profiles of Yangtze River Delta Region, China: Implication for sources and vertical transportation[J]. *Geoderma*, 2009, 153(1-2): 69-75.
- [6] Zhang G, Li J, Cheng H, et al. Distribution of organochlorine pesticides in the Northern South China Sea: Implications for land outflow and air-sea exchange[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(11): 3884-3890.
- [7] Kim J H, Smith A. Distribution of organochlorine pesticides in soils from South Korea[J]. *Chemosphere*, 2001, 43(2): 137-140.
- [8] 廖小平, 张彩香, 赵 旭, 等. 太原市污灌区地表土中有机氯农药分布特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(9): 1321-1327.

LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, et al. Distribution of

- organochlorine pesticides in topsoil of sewage irrigated area in Taiyuan City[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(9):1321-1327.
- [9] Zhang Cai-xiang, Liao Xiao-ping, Li Jia-le, et al. Influence of long-term sewage irrigation on the distribution of organochlorine pesticides in soil-groundwater systems[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(4):337-343.
- [10] Zhang Z L, Huang J, Yu G, et al. Occurrence of PAHs, PCB and organochlorine pesticides in Tonghui River of Beijing, China[J]. *Environ Pollut*, 2004, 130(2):249-256.
- [11] 杨国义, 万开, 张天彬, 等. 广东省典型区域农业土壤中六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)的残留及其分布特征[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(1):113-117.
- YANG Guo-yi, WANG Kai, ZHANG Tian-bin, et al. Residues and distribution character of HCHs and DDTs in agricultural soils from the typical areas of Guangdong Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1):113-117.
- [12] 尹可锁, 吴文伟, 张雪燕, 等. 滇池流域农田土壤有机氯农药残留特征[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(04):674-679.
- YIN Ke-suo, WU Wen-wei, ZHANG Xue-yan, et al. Residues characteristics of organochlorine pesticides in the cultivated soils from Dianchi Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):674-679.
- [13] Doong R A, Sun Y C, Liao P L, et al. Distribution and fate of organochlorine pesticide residues in sediments from the selected rivers in Taiwan[J]. *Chemosphere*, 2002, 48(2):237-246.
- [14] Zhu Y F, Liu F, Xi Z Q, et al. Organochlorine pesticides(DDTs and HCHs) in soils from the outskirts of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(6):770-778.
- [15] 魏永霞, 何江涛, 金爱芳, 等. 污灌区土壤理化参数与有机氯农药含量的相关性分析[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(8):1607-1612.
- WEI Yong-xia, HE Jiang-tao, JIN Ai-fang, et al. The relevant analysis between the physical-chemical indexes of soil samples and the contents of organochlorine pesticides in the polluted irrigation areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8):1607-1612.
- [16] Shen L, Wania F. Compilation, evaluation, and selection of physical-chemical property data for organochlorine pesticides[J]. *Chem Eng Data*, 2005, 50(3):742-768.
- [17] Kumarasamy P, Govindaraj S, Vignesh S, et al. Anthropogenic nexus on organochlorine pesticide pollution: A case study with Tamiraparani River basin, South India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(6):3861-3873.
- [18] Meijer S N, Shoeib M, Jones K C, et al. Air-soil exchange of organochlorine pesticides in agricultural soils: 2. Laboratory measurements of the soil-air partition coefficient[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(7):1300-1305.
- [19] Abhilash P, Singh N. Seasonal variation of HCH isomers in open soil and plant-rhizospheric soil system of a contaminated environment[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2009, 16(6):727-740.
- [20] Walker K, Vallero D A, Lewis R G. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, 33(24):4373-4378.