

有机氯农药污染场地表层土壤有机-矿质复合体中污染物的分布

丛鑫^{1,2,3}, 薛南冬², 梁刚⁴, 王世杰⁵, 朱书全¹, 李发生^{2*}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 辽宁工程技术大学资源与环境工程学院, 阜新 123000; 4. 国家环境保护总局环境工程评估中心, 北京 100012; 5. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要 采用湿法物理分级方法将北京市某农药厂遗留场地表层土壤分成 4 种粒径的有机-矿质复合体组分: 粘粒、粉粒、细砂和粗砂 (< 2 μm 、2~20 μm 、20~200 μm 、> 200 μm), 研究有机氯农药在其中的分布特征及土壤不同有机-矿质复合体组分中有机质和矿物质组成的差异对污染物赋存分布的影响. 结果表明, 污染物质六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)在粉粒中分布较多, 含量分别为 463.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1 225.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 粗砂中分布最少, 含量仅为 157.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 384.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. $\lg K_{oc}$ 与污染物质在粘粒上的分布量存在显著的相关关系. 通过对有机-矿质复合体进行 X 射线衍射分析发现, 场地土壤粘粒和粉粒中粘土矿物含量较高. 由于有机-矿质复合体中粘土矿物组成和含量存在差别, 这在一定程度上影响了污染物质在其中的分布. 同时, 所研究的场地土壤中污染物易于富集的粒径范围与报道的北京大气颗粒物上 HCHs 和 DDTs 有较多吸附的粒径相近. 因此, 应当重视污染场地表层土壤对大气污染的可能贡献及其环境风险.

关键词 有机氯农药; 污染场地; 表层土壤; 有机-矿质复合体

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2586-06

Pollutant Distribution in Organo-Mineral Aggregates in Topsoils from a Site Contaminated by Organochlorine Pesticides

CONG Xin^{1,2,3}, XUE Nan-dong², LIANG Gang⁴, WANG Shi-jie⁵, ZHU Shu-quan¹, LI Fa-sheng²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Resource and Environmental Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. Environmental Engineering Evaluation Center, State Environmental Protection Administration of China, Beijing 100012, China; 5. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract Four different soil particle-size fractions that is clay, silt, fine sand and coarse sand (< 2 μm , 2-20 μm , 20-200 μm , > 200 μm) from the topsoils in an organochlorine pesticide (OCP) field were separated by physical method to characterize the OCPs distribution in soils and to study the effect of organic matter and mineral composition in different separates on pollutants distribution. The results show that the concentrations of HCHs and DDTs in silt with 463.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 1 225.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ are higher than those in coarse sand, 157.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 384.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. There is a significant correlations between $\lg K_{oc}$ and the contents of HCHs and DDTs in clay. The analysis on X-ray diffraction of organo-mineral aggregates demonstrates that clay and silt have a much higher content of the clay minerals than those in coarse sand within the contaminated soils. There are some differences with different particle-size fractions in the content and composition of the clay minerals in organo-mineral aggregates, which affect the OCP distribution in soils to some extents. The results also suggest that the distribution of HCHs and DDTs in the particle with more pollutants in the site is similar to that in airborne particles. So the environmental behavior of OCPs in topsoils from the contaminated site should be paid more attention especially in ambient air-soil interaction.

Key words organochlorine pesticides (OCP); contaminated site; topsoil; organo-mineral aggregates

有机氯农药如六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)是一类对人体健康和生态环境均具有严重危害的持久性有毒有机化合物, 其中 DDT 是 2001 年通过的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中列出的 12 种在环境中需要优先控制的持久性有机污染物中的一种^[1]. 由于 HCH 和 DDT 在环境中具有高毒性、持久性和生物富集性等特征, 我国已经于 1983

年停止生产和使用. 但在 1950~1983 年间, 我国 DDT 的生产量曾占到全球 DDT 总产量的 20%^[2]. 在

收稿日期 2008-02-05; 修订日期 2008-04-08

基金项目 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415007)科技部平台专项(2004DEA70890)

作者简介 丛鑫(1976~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: congxinex@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: lifs@ceaes.org.cn

1983年,我国 HCH 和 DDT 的库存量还有约 50 万 t。由于有机氯化合物与土壤有很强的结合力,有机氯农药很难在土壤中迁移转化^[3],因此尽管有机氯农药禁用已达 20 余年,至今在许多土壤中依然能检测到不同含量的 HCH 和 DDT。目前国内外学者对有机氯农药在农业土壤、城市和郊区土壤中的残留分布进行了大量的研究^[4-6],对其在大气中的空间和时间分布情况也做了相应的跟踪研究^[7,8],但对于曾进行过有机氯农药生产的重污染场地的研究还不多见,特别是对于这类重污染场地中有机氯农药在土壤有机-矿质复合体组分中的分布的报道更少。Huang 等^[9]的研究表明,土壤中有有机质和矿物质通常是以有机-矿质复合体的形态存在,土壤对疏水性有机污染物的吸附实际上是由土壤中的矿物质和有机质共同作用的结果。采用物理或化学的方法,可以将土壤分成不同的有机-矿质复合体组分,研究污染物在其中的赋存分布特征,这对于了解污染物在土壤中的迁移转化具有十分重要的意义。本研究对北京市某农药厂表层土壤有机-矿质复合体中污染物的分布情况进行了深入剖析,探讨了其中的矿物质和有机质对污染物赋存分布的影响,以期为相应场地的环境风险管理和土壤修复提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本实验采集的土样来自具有 30 多年农药生产历史的工厂搬迁遗留污染场地,该厂占地 13 万 m²,场地四周为居民生活区,企业搬迁后原厂址已规划为居住用地。六六六和滴滴涕粉剂是该农药厂在 1951~1981 年间的主要产品。2007 年 7 月,在该场地采用网格法均匀布设采样点,采用铁制工具采集 0~20 cm 表层土壤样品。取所采集的多点混合样品约 2 kg,过 2 mm 筛,置于不锈钢容器中,在 4℃ 条件下存放于冰箱中备用。

1.2 土壤有机-矿质复合体的提取与分析

样品分级参照严超升^[10]的方法,先用饱和 NaCl 溶液去除大粒径植物残体,超声法分散土壤颗粒,然后按国际制分级标准划分粒径为粘粒(< 2 μm)、粉粒(2~20 μm)、细砂(20~200 μm)及粗砂(> 200 μm)等 4 个有机-矿质组分,通过 Stokes 沉降公式计算出一定温度下各复合体的沉降参数,经离心分离、冷冻干燥后即可得到各粒级复合体。复合体中污染物采用加速溶剂萃取仪(DIONEX ASE-300)提取,气相色谱仪(SHIMADZU 2010)分析。

加速溶剂萃取仪萃取条件为丙酮/正己烷,1/1(体积比),加热温度为 100℃,静态萃取时间为 10 min,萃取压力为 1 500 Psi,静态萃取循环次数为 3 次,萃取后采用气相色谱(GC)分析。

采用 GC/ECD 测定样品中有机氯农药的浓度。色谱柱为 DB-1 型毛细管柱(30.0 m × 0.32 mm × 1.00 μm)。程序升温为,始温 70℃ 保留 1 min,以 20℃/min 的速率升温至 130℃,保留 2 min,以 5℃/min 的速率升温至 210℃,保留 2 min,以 15℃/min 的速率升温至 300℃,保留 5 min。总运行时间 35 min。进样口温度为 200℃,不分流进样,进样量 1 μL。检测器温度为 300℃。载气为高纯氮气(99.999%),柱流量为 2.32 mL·min⁻¹。对所测化合物根据保留时间进行定性,外标法峰面积进行定量。8 种有机氯农药(均为 500 μg·kg⁻¹)进行回收率实验,提取方法的加标回收率在 79%~129% 之间。

土壤矿物组成分析采用 X 射线粉晶衍射仪(D/Max-RC)。有机质含量的测定采用重铬酸钾氧化-稀释热法。比表面积测定采用表面积和孔隙度分析仪(NOVA3200e 型)。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机-矿质复合体的基本理化性质

分级研究样品的选择原则是土壤污染较为严重,所在功能区具有一定的代表性,并且污染物质 HCH 和 DDT 浓度相对较高的土壤样品。通过现场调查和土壤样品的初步分析检测结果,确定对厂区南部的库房所在地土壤进行分级研究,该处土壤样品 pH 为 8.0,污染物 DDT 含量范围为 846~1 042 mg·kg⁻¹,HCH 含量范围为 360~503 mg·kg⁻¹。所分离提取的土壤不同粒级有机-矿质复合体的理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤有机-矿质复合体的基本性质

Table 1 Basic characteristics of soil organo-mineral aggregates

有机-矿质复合体	有机质 /%	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	复合体组成 /%
粘粒(< 2 μm)	7.2	58.9	5.9
粉粒(2~20 μm)	9.6	25.1	17.0
细砂(20~200 μm)	7.7	10.8	21.0
粗砂(> 200 μm)	13.0	10.5	56.1

从表 1 可以看出粗砂占整个复合体组成的 56.1%,细砂次之,占 21.0%,粉粒占 17.0%,粘粒最少,仅为 5.9%。参照国际制土壤质地分类标准可知此土壤属砂质壤土^[11]。BET 比表面积测定结果表

明 样品的比表面积随着粒径的减小而增大,且在粉粒和粘粒阶段增大比较显著.此外,所测土壤不同有机-矿质复合体中有机质含量不同,有机质在粗砂中含量最高,粉粒和细砂居中,粘粒中含量最小,这可能与场地中不完全分解的动植物残体细屑含量较高有关.

2.2 土壤有机-矿质复合体中污染物的分布

表 2 列出了不同粒径有机-矿质复合体中污染物的含量.可以看出,不同污染物含量在不同复合体中的分布是不均匀的,其中 HCHs 含量为:粉粒 > 细砂 > 粘粒 > 粗砂;DDTs 含量为:粉粒 > 粘粒 > 细砂 > 粗砂.2 种污染物质在同一种土壤不同有机-矿质复合体中的分布不完全一致,但都呈现出粉粒上污染物质分布较多,粗砂上污染物质分布较少的特点.

表 2 场地表层土壤有机-矿质复合体中污染物含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Pollutant contents in topsoil organo-mineral aggregates within the site /mg·kg⁻¹

污染物质	粘粒	粉粒	细砂	粗砂	
α -HCH	35.3	22.6	36.1	27.3	
β -HCH	179.3	429.0	296.0	121.0	
HCH	γ -HCH	3.1	4.9	4.0	4.7
δ -HCH	1.2	6.6	8.7	4.8	
\sum HCH	218.9	463.1	344.8	157.8	
p, p' -DDE	299.8	328.0	70.0	63.4	
p, p' -DDD	266.2	314.0	213.0	147.0	
DDT	o, p' -DDT	149.8	144.0	83.1	53.1
p, p' -DDT	261.8	439.6	174.0	121.0	
\sum DDT	977.6	1225.6	540.1	384.5	

污染物质在土壤不同粒径有机-矿质复合体中的百分含量情况如图 1 所示.从图 1(a)可以看出, α -HCH、 γ -HCH 和 δ -HCH 在复合体中的含量变化趋势是一致的,均为粗砂 > 细砂 > 粉粒 > 粘粒.但 HCHs 异构体中含量最高的 β -HCH 却呈现出不同的变化趋势:粉粒 > 粗砂 > 细砂 > 粘粒. \sum HCH 在粗砂(35.1%)和粉粒(31.1%)中的百分含量已经比较接近.图 1(b)是 DDT 的异构体和代谢产物在复合体中的百分含量,其中 p, p' -DDE 和 p, p' -DDT 均呈现出在粉粒中含量大于在粗砂中含量的变化趋势,而 p, p' -DDD 和 o, p' -DDT 的变化趋势为粗砂 > 细砂 > 粉粒 > 粘粒.因此从图 1 可以看出之所以会呈现出粉粒上 2 种污染物质分布较多的特点,主要是由于 HCH 含量较高的异构体 β -HCH 和 DDT 含量较高的 p, p' -DDT 和 p, p' -DDE 在粉粒上分布均占一定优势造成的.

从表 2 也可以看出,HCH 的 4 种异构体中 β -HCH 含量要远远高于其它 3 种异构体,由于 β -HCH 是 HCHs 中最稳定,最难降解的一种异构体,因此如果 HCHs 中 β -HCH 含量较高,则表明 HCHs 主要为长时间降解后的农药残留^[12].可以推断,目标场地土壤中 HCHs 污染主要源于历史上的生产和遗留.通过计算可以得出场地土壤 4 种有机-矿质复合体组分中的(DDD + DDE)/DDT 比值均大于 1,这说明场地污染土壤经过了长期的风化^[13],土壤中 DDTs 类农药是由于以前农药生产活动所造成的.

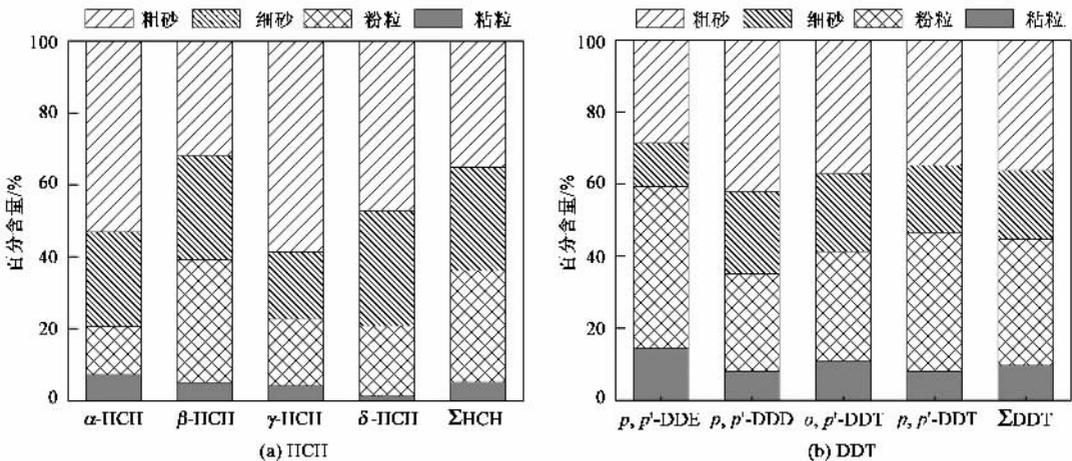


图 1 有机氯农药在场地表层土壤不同粒径有机-矿质复合体中的百分含量

Fig.1 Percentage of OCPs in topsoil organo-mineral aggregates with different particle-size fractions

2.3 土壤有机-矿质复合体中有机质与污染物分布的关系

20 世纪 80 年代初期,大多数学者普遍认为非

离子型有机污染物在土壤中的吸附行为实质上是在土壤有机质中的分配,并用 K_{oc} 来描述.图 2 为不同粒径有机-矿质复合体中 7 种污染物(除 p, p' -DDT

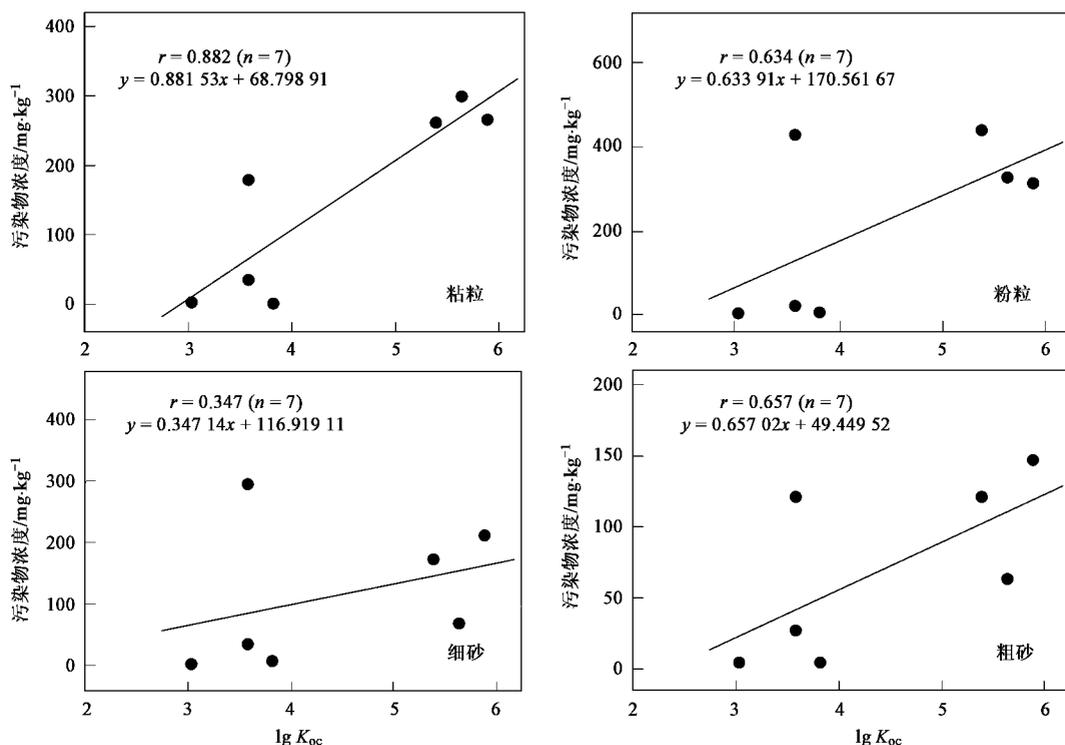


图2 场地土壤有机-矿质复合体中污染物 $\lg K_{oc}$ 值与污染物浓度间关系($\lg K_{oc}$ 值来自文献 [22])

Fig.2 Relationship between $\lg K_{oc}$ and the contents of pollutants in organo-mineral aggregates within the site

无数据外)的 $\lg K_{oc}$ 与污染物含量间的关系. 相关程度由应用 SPSS 软件 13.0 分析得出. SPSS 软件相关性分析中相关程度分为以下几种情况: 如 $|r| \geq 0.8$ 时, 视为高度相关; $0.5 \leq |r| < 0.8$ 时, 视为中度相关; $0.3 \leq |r| < 0.5$ 时, 视为低度相关. 从分析结果可以看出粘粒中污染物含量与 $\lg K_{oc}$ 值间相关系数为 0.88 ($p < 0.01$), 呈现显著相关. 在细砂中污染物与 $\lg K_{oc}$ 值间相关系数为 0.347 ($p < 0.446$), 没有显著的相关关系. $\lg K_{oc}$ 值大小表示疏水性有机化合物被土壤吸附的能力. 污染物在粘粒中的赋存量与土壤的吸附能力间具有显著的相关关系, 而在细砂中这种相关关系不显著, 分析其原因可能是由于此场地为高污染场地, 污染物质大量存在, 在细砂中污染物的分布很显然已经超过其吸附能力.

土壤有机质是影响疏水性有机污染物土壤环境行为的重要因素, 研究表明有机氯农药具有低水溶性和亲脂性特点, 容易吸附在土壤有机质中, 且主要锁定在有机质的微小孔隙中^[14]. 同时, 土壤有机质含量的增加能够提供更多的碳源从而促进有机氯农药的微生物降解. Zhang、Gong 和 Ribes 等^[15-17] 的研究结果表明, 土壤中的 TOC 和 \sum DDT 的含量间具有相关关系. 一般来说, 在平衡的土-气系统中, 土

壤中憎水性化学物质的含量应该与土壤有机质含量呈正相关^[18], 但在本研究场地中并没有发现相似的规律. 从表 1 数据可以看出在粗砂中有机质含量最高, 粘粒中含量最小, 而污染物质 HCH 和 DDT 在粗砂中赋存浓度最低, 粉粒中最高. 即污染物质与不同有机-矿质复合体中有机质含量间相关性不显著. 主要原因可能是本场地土壤污染较严重, 特别是进行分级研究的土壤样品, DDT 含量超过国家环境质量二级标准 1931 倍, HCH 含量超标 880 倍. 这使得有机化合物在土-气之间没有达到平衡状态, 土壤中的大多数污染物处于过饱和状态^[19].

很多学者从有机质结构上分析了污染物质在土壤不同有机-矿质复合体中分布差异性的原因. 一些学者认为砂粒组分中的有机质主要由新鲜的或轻度分解的植物残体和碎屑组成, 其碳水化合物含量较高, 很容易被土壤微生物分解. 而粘粒和粉粒组分中的有机质腐殖化程度较高, 主要由微生物难降解的芳香和脂肪结构的物质所组成^[20]. Gunasekara 等^[21] 研究认为脂肪碳与芳香碳属于非极性碳, 它们对疏水性有机化合物具有亲合性, 因此脂肪组分和芳香组分对疏水性有机污染物有着较强的吸附. 可以看出, 土壤不同粒径组分中有机质结构的差异性对疏

水性有机污染物吸附量有较大的影响. 本实验粉粒组分中赋存有机污染物较多, 可能因为粉粒组分中有机质的芳香和脂肪结构比较丰富, 其结构影响了复合体对疏水性有机污染物的吸附.

2.4 土壤有机-矿质复合体中矿物质与污染物分布的关系

无机矿物是土壤的重要组成部分, 也在一定程度上对污染物的赋存分布产生影响. 通过分析 X 射线衍射过程中所产生峰的特征数据, 由文献 [23] 可以了解其无机矿物组成情况. 研究场地土壤不同有机-矿质复合体的 X 射线衍射 (XRD) 图谱及其矿物成分如图 3 所示.

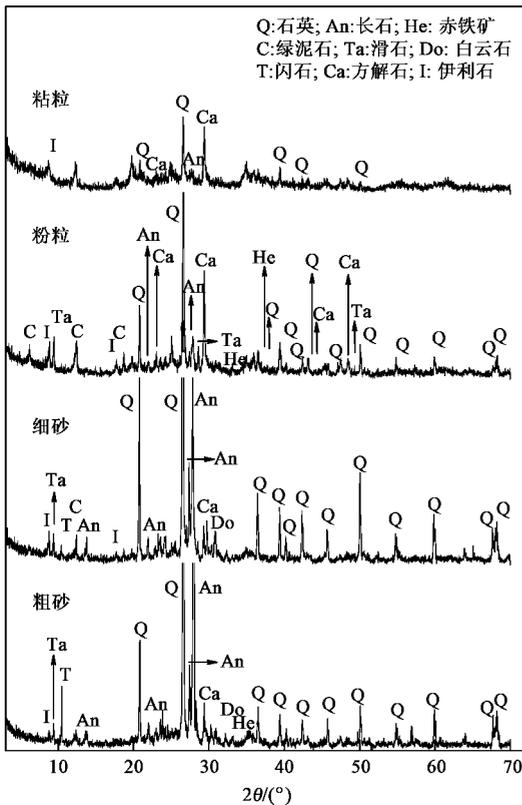


图 3 场地土壤不同粒径有机-矿质复合体的 XRD 图谱

Fig.3 X-ray diffractograms spectra of soil organo-mineral aggregates with different particle-size fractions in the site

从图 3 可以看出, 场地土壤不同粒径复合体含有相似的矿物组成, 只是在矿物组成的量上存在差别. 粗砂和细砂中矿物主要以石英和长石为主. 石英和长石代表岩石圈表层物质, 属原生矿物, 具有坚实而稳定的晶格, 它们不具有物理-化学吸收性能, 因此污染物难以赋存. 粉粒主要以石英和方解石为主. 在粉粒中方解石含量占总百分含量的 18%, 石

英占 17%, 其余为粘土矿物中的绿泥石、伊利石和滑石等. 粘粒中石英仅占 20%, 方解石占到了 30%, 还有极少量的长石, 其余为粘土矿物. 可见随着土壤粒级由大到小, 原生矿物含量逐渐减少. 粘土矿物的种类和含量相应增多. 在粗砂、细砂、粘粒和粉粒中, 粘土矿物含量依次约为 15%、30%~35%、40%~45% 和 45%. 与原生矿物不同, 粘土矿物是土壤胶体的主体, 对污染物有较高的吸附能力. 研究表明当粘土矿物含量相对较高时, 粘土矿物对土壤中疏水性有机污染物的吸附有显著的影响 [24, 25]. 本研究中场地土壤各粒径组分的粘土矿物含量不同, 对有机氯农药的吸附能力也存在一定的差异. 粘粒和粉粒中污染物浓度较高, 可能与粘粒和粉粒中粘土矿物含量相对较高有一定关系.

高污染场地表层土壤中残留有机氯农药通过大气交换给城市空气质量造成影响. 在吴水平等 [26] 所测定的分级样品中, 4.7~5.8 μm 范围内的颗粒更容易富集 HCHs 和 DDTs. 此粒径可进入咽喉穿透并滞留在人体上呼吸道, 对人体健康危害较大. 大气颗粒物上污染物吸附量较多的粒径范围与本地土壤污染物富集程度较高的粉砂粒径范围 (2~20 μm) 相近, 即大气颗粒物中污染物的分布与土壤污染粒径特征相似. 随着大气扬尘等方式, 赋存在土壤颗粒中的污染物可能会随风进入周边大气环境, 增加了城市颗粒物污染的危害. 因此, 应当高度关注场地表层土壤中污染物在土壤-大气中的交换过程及其环境风险.

3 结论

(1) 污染物质 HCHs 和 DDTs 在北京市某农药厂表层土壤不同有机-矿质复合体中的分布是不均匀的. 粉粒中污染物质最多, 粗砂中污染物含量最少. 另外污染物的 $\lg K_{oc}$ 值与其在复合体组分中的赋存含量间相关性分析结果表明, 污染物在粘粒中的吸附量与土壤的吸附能力间存在显著的相关关系.

(2) 土壤不同复合体的 X 射线衍射分析结果表明, 随着土壤复合体粒级由大到小, 粘土矿物由粗砂中约 15% 的含量增加至粘粒中约 45% 含量. 不同粒径复合体中粘土矿物含量不同, 对有机氯农药的吸附能力也存在一定的差异.

(3) 所研究的场地土壤中污染物易于富集的粒径范围与报道的大气颗粒物上污染物吸附量较多的颗粒物粒径范围相近. 因此, 应重视场地表层土壤对大气污染的可能贡献及其环境风险.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, *et al.* Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: an overview[J]. Chemosphere, 2003, **52**: 1411-1422.
- [3] 史雅娟,郭非凡,孟凡乔,等. 果园土壤有机氯农药残留的时间趋势研究[J]. 环境科学学报,2005,25(3):313-318.
- [4] Manz M, Wenzel K D, Dietze U, *et al.* Persistent organic pollutants in agricultural soils of central Germany[J]. Sci Total Environ, 2001, **277**: 187-198.
- [5] Feng K, Yu B Y, Ge D M, *et al.* Organo-chlorine pesticide residues in the Taihu lake region and its movement in soil-water system [Field survey of DDT and HCH residues in ecosystem of the region [J]. Chemosphere, 2003, **50**: 683-687.
- [6] Zhu, Y F, Liu H, Xi Z Q, *et al.* Organochlorine pesticides in soils from the outskirts of Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**: 770-778.
- [7] Su Y, Hung H, Blanchard P, *et al.* Spatial and seasonal variations of Hexachlorocyclohexanes (HCHs) and Hexachlorobenzene (HCB) in the Arctic atmosphere[J]. Environ Sci Technol, 2006, **40**: 6601-6607.
- [8] Hung H, Halsall C J, Blanchard P, *et al.* Temporal trends of organochlorine pesticides in the Canadian Arctic atmosphere[J]. Environ Sci Technol, 2002, **36**: 862-868.
- [9] Huang W, Schlautman M A, Weber W J, *et al.* A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments. 5. The influence of near-surface characteristics in mineral domains[J]. Environ Sci Technol, 1996, **30**: 2993-3000.
- [10] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京:农业出版社,1985. 48-55.
- [11] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,2004. 208-209.
- [12] 孙剑辉,王国良,张干,等. 黄河中下游表层沉积物中有机氯农药含量及分布[J]. 环境科学,2007,28(6):1332-1337.
- [13] 李红莉,李国刚,杨帆,等. 南四湖沉积物中有机氯农药和多氯联苯垂直分布特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1590-1594.
- [14] 章海波,骆永明,赵其国,等. 香港土壤研究 [IV 土壤中有机氯农药的含量和组成] J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 220-225.
- [15] Zhang H B, Luo Y M, Zhao Q G, *et al.* Residues of organochlorine pesticides in Hong Kong soils[J]. Chemosphere, 2006, **63**: 633-641.
- [16] Gong Z M, Tao S, Xu F L, *et al.* Level and distribution of DDT in surface soils from Tianjin, China[J]. Chemosphere, 2004, **54**: 1247-1253.
- [17] Ribes A, Grimalt J O. Temperature and organic matter dependence of the distribution of organochlorine compounds in mountain soils from the subtropical Atlantic (Teide, Tenerife Island) [J]. Environ Sci Technol, 2002, **36**: 821-827.
- [18] Borisover M D, Graber E R. Specific interactions of organic compounds with soil organic carbon[J]. Chemosphere, 1997, **34**: 1761-1776.
- [19] Harner T, Wideman J L, Jantunen L M M, *et al.* Residues of organochlorine pesticides in Alabama soils[J]. Environ Pollut, 1999, **106**: 323-332.
- [20] Krauss M, Wilcke W. Sorption strength of persistent organic pollutants in particle-size fractions of urban soil[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, **66**: 430-437.
- [21] Gunasekara A S, Xing B. Sorption and desorption of Naphthalene by soil organic matter: importance of aromatic and aliphatic components [J]. J Environ Qual, 2003, **32**: 240-246.
- [22] Xue N D, Zhang D R, Xu X B. Organochlorinated pesticide multiresidues in surface sediments from Beijing Guanting reservoir [J]. Water Research, 2006, **40**: 183-194.
- [23] 中国科学院贵阳地球化学研究所编. 矿物 X 射线粉晶鉴定手册[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [24] 倪进治,骆永明,魏然,等. 土壤有机和无机组分对多环芳烃环境行为影响的研究进展[J]. 土壤, 2006, **38**(5): 559-564.
- [25] 吴平霄. 黏土矿物材料与环境修复[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 184-185.
- [26] 吴水平,曹军,李本纲,等. 城区大气颗粒物中有机氯农药的含量与分布[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(4): 36-39.