

南京市小河流表层沉积物中的有机氯农药残留及其分布现状

安琼¹, 董元华¹, 葛成军^{1,2}, 王辉¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 华南热带农业大学农学院, 儋州 571737)

摘要: 2004 年春, 以南京市西南部 4 条通入长江的小河流为试区, 采集不同断面表层沉积物和水样, 以及相应流域内农田土壤样品, 对所有样品中有机氯农药的残留及其分布状况进行研究, 并讨论了农田土壤有机氯农药残留量和理化性质对河流表层沉积物中有机氯残留量的影响。结果表明: 沉积物对水体 HCHs 和 DDTs 有明显的富集作用, 不同河流富集状况不尽相同。农田土壤中 HCHs 与沉积物中 HCHs 残留量基本相近, 土壤中 DDTs 残留量明显高于沉积物, 可见土壤中 HCHs 更易迁移至水系。由于土壤有机质易于从偏碱性的土壤中淋出, 吸附在有机质上的有机氯残留物易随之转移至沉积物中, 因此在流经偏碱性土壤的河流沉积物中 OCPs 残留量较高。各流域内农田土壤与河水及沉积物中 α/γ 及 DDE/DDT 值的变化有一定程度的趋同性, 反映了土壤是水体及沉积物中 OCPs 的主要来源。此外, 有机氯各组分在土壤-水体-沉积物的迁移过程中, 易迁移者在沉积物中含有较高比例。此外, 沉降作用将大大降低小河流向长江输入的 OCPs。

关键词: 小河流; 沉积物; 有机氯农药; 残留; 分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)04-0737-05

Residues and Distribution Character of Organochlorine Pesticides in Stream Sediments in Southwestern Suburb of Nanjing

AN Qiong¹, DONG Yuan-hua¹, GE Cheng-jun^{1,2}, WANG Hui¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China, 2. South China University of Tropical Agriculture, Danzhou 571737, China)

Abstract: Sediments and water samples were collected from different cross sections of 4 tributaries of Yangtze River in southwestern suburb of Nanjing city in spring 2004, and agricultural soil sample were collected also in those valleys. The residues and distribution of organochlorine pesticides in sediments from different streams were determined and the influence of soil character on organochlorine pesticides residues in sediments were studied. Result showed that accumulation of HCHs and DDTs occurred significantly in the sediments and related to soil erosion. Residues of organochlorine pesticides in sediments may be influenced obviously by pH of agricultural soil in the valleys. In the alkaline soil, organic matters could be leached easily and entered the stream water and accumulated into sediments, resulting in accumulation of organochlorine pesticides adsorbed on soil organic matters in sediments. In the transfer process of materials from soil to water and sediment, constituents of organochlorine pesticides in multiphase environmental medium were changed; usually those components easily leached from soils had higher residue levels in sediments. Meanwhile, sedimentation of soil in streams could reduce OCPs input to the Yangtze River.

Key words: stream; sediment; organochlorine pesticide; residues; distribution

河流沉积物能汇纳水、土壤及大气中的各种污染物, 对水生生态环境可造成重要影响。对持久性有机污染物而言, 不仅在沉积物中降解缓慢, 而且通过水生和底栖生物的摄取和生物富集放大, 进入食物链, 最终影响到人类健康。此外, 污染物还可不断地从沉积物中解吸出来, 并重新进入水体造成二次污染。因此, 研究水系沉积物中有机污染物具有特别重要的意义^[1~3]。有机氯农药 (organochlorine pesticides 下简称 OCPs) 是典型的疏水性有机污染物, 主要吸附在悬浮颗粒物上, 沉积物被认为是它们的重要的环境归宿之一^[4,5]。

小河流不仅具有与陆生系统直接进行频繁的物

质交换功能, 而且具有将所获得的物质转移到更大水生系统的传输功能, 因此, 研究小流水体及沉积物中的污染状况, 对于分析干流水系的污染物来源、研究污染物地层学无疑具有重要意义。国内外现有相关研究报告极少涉及小河流沉积物中有机氯残留及其与农田有机氯残留、土壤理化性质的关系。本文以南京市西南部通入长江的 4 条小河流为研究对

收稿日期: 2005-04-16; 修订日期: 2005-09-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB410805); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-427)

作者简介: 安琼 (1955~), 女, 副研究员, 主要研究方向为土壤环境科学, E-mail: qan@issas.ac.cn

象,侧重探讨表层沉积物中 OCPs 的残留及其分布状况,以及各流域农田土壤的理化性质对表层沉积物中 OCPs 残留状况的影响。

1 材料与方法

1.1 样点概况及样品的采集

在南京市西南方向选择 4 条小流域河流——南河(样品前缀 N)、秦淮新河(样品前缀 Q)、板桥河(样品前缀 B)、江宁河(样品前缀 J)为研究对象,这 4 条河流均进入长江,是附近农业生产的主要水源。2004-03,以 GPS 定位,分别在其上、中、下游不同断面上采取水样和表层沉积物。样点分布如图 1 所示,其中 B3 J2 Q3 接近入江口。

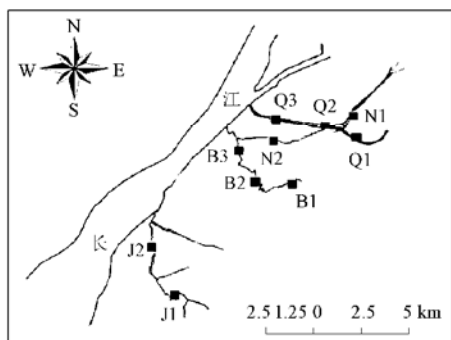


图 1 河水及底泥样点分布

Fig. 1 Sketch map of sampling waters and sediments

水样:以采样器采集深度<30cm 的表层水样,收集入棕色玻璃瓶中,避光保存,一周内完成样品的前处理和测定。表层沉积物样品:采集 0~10cm 表层沉积物,收集入广口棕色玻璃瓶中,运达试验室后,避光风干,磨碎过 60 目筛,待用。土样:在 4 条河流域内农田均匀布点,多点采集根层(0~20cm)土壤,避光风干,磨碎过 60 目筛,待用。

1.2 材料及仪器

所有试剂均为分析纯,石油醚(60~90℃)和丙酮经配有分馏柱的全玻璃装置重蒸; H_2SO_4 (98%);无水 Na_2SO_4 在马福炉 650℃烘 4h,待冷至常温后,置于玻璃瓶中密封放置,供试验用;以结晶 Na_2SO_4 (分析纯)配制的 6% Na_2SO_4 水溶液。OCPs 标液购于中国标准研究所,以石油醚逐步稀释至各组分浓度范围为 1.0~200 ng·mL⁻¹,用于制作工作曲线。

Agilent 6890N 气相色谱仪,配微池电子俘获检测器(GC/μECD),7683 自动进样系统、色谱工作站。毛细管柱 DB-1701,内径 0.32mm,长 30m。气相色谱仪在样品测试前,进行必要的校准、核对和条件

化,进标样 5~7 次,直到 RSD<5%,开始测试样品,以确保色谱仪的准确性。

1.3 OCPs 残留量的测试方法

水样:采用液-液萃取法,取 400mL 水样倒入分液漏斗中,加入 40mL 的石油醚振荡提取 5min,静置分层,下层水相以 20mL 的石油醚再萃取 2 次,合并萃取液,经 5~10mL 硫酸磺化多次,至硫酸层无色后,石油醚层用 6% Na_2SO_4 水溶液洗涤,直到水相 pH ≥5;有机相经无水硫酸钠脱水后浓缩,定容至 1mL,1 周内完成 GC 测定。

沉积物:准确称取 20.0g 待测样置入滤纸筒中,装入索氏提取器中,收集瓶中加入 10g 铜粉(100~200 目)用以脱硫,以 60mL 石油醚:丙酮(1:1)浸泡过夜,60℃水浴提取 6h,提取液的净化过程同上。净化提取液浓缩至 5mL,1 周内完成 GC 测定。

土样 OCPs 的测试方法及分析测定质量控制与保证措施见参考文献[6]。

1.4 色谱分析条件

工作条件:载气为 He,流速 2mL·min⁻¹,辅助气高纯氮气,流速 60mL·min⁻¹;进样量 1μL,不分流进样。进样口温 210℃,检测器温 320℃,柱温 165℃,保持 2min,以 6℃/min 的速度升温至 265℃,保持 2min。以峰高外标法定量。

2 结果与讨论

2.1 河水及沉积物中 OCPs 残留状况及其影响因素

4 条河流水样中 DDT 的残留量和检出率明显高于 HCH。从 OCPs 残留量均值来看,江宁河水样中 HCHs 最高,秦淮新河最低;板桥河水样中 DDTs 较低,秦淮新河与南河水中 DDTs 含量较高(96.7 ng·L⁻¹),统计结果表明不同河流水样中 OCPs 残留量并无明显差异。在所有沉积物样品中均检出了 OCPs(图 2),除个别样品未检出 δ-HCH 或 β-HCH 外,其余组分检出率达 100%。沉积物中残留量最高的是 α-HCH,其次为 p, p'-DDE 和 p, p'-DDT,残留量较低的是 o, p'-DDT 和 δ-HCH。从图 2 可见:江宁河沉积物中 HCHs 和 DDTs 残留量最高。

研究表明,表层沉积物中 OCPs 残留量远高于河水中的相应值,显然,沉积物对水体 OCPs 残留物富集作用相当明显,只是不同河流沉积物中 HCHs 和 DDTs 的富集指数略有差异(表 1),其中江宁河沉积物中 HCHs 和 DDTs 的富集高于其它河流。

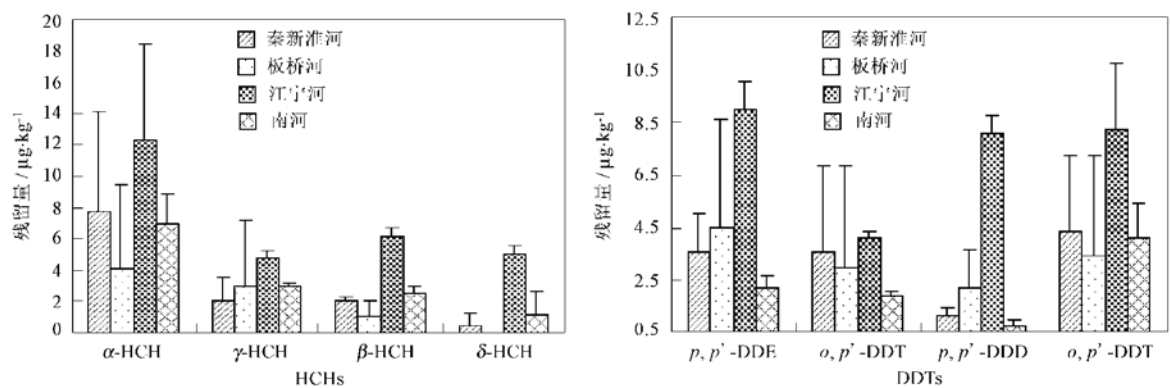


图 2 不同河流沉积物中有机氯残留状况

Fig. 2 Residues of organochlorine pesticide in sediments from several rivers

表 1 河流沉积物对水体有机氯农药的富集

Table 1 Sediment enrichment for organochlorine pesticides from water

河流	水样/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		沉积物/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		沉积物富集指数	
	$\sum\text{HCHs}$	$\sum\text{DDTs}$	$\sum\text{HCHs}$	$\sum\text{DDTs}$	$\sum\text{HCHs}$	$\sum\text{DDTs}$
江宁河	0.068 6	0.086 0	28.0	29.3	408.2	340.7
板桥河	0.051 5	0.083 7	8.1	12.9	157.3	154.1
南河	0.036 0	0.096 7	13.9	9.7	386.1	100.3
秦淮新河	0.035 3	0.096 7	12.4	12.5	351.3	129.3

关于河流沉积物中 OCPs 的来源,普遍认为除大气降尘外,主要为陆源性输入^[7~9],而且,农田土壤中的残留物是河水及沉积物的主要来源.河流在流经农田区时,将土壤中的 OCPs 残留物带入地表水系,并主要以悬浮物吸附态的形式存在于水中,随悬浮物的沉降进入沉积物中^[10].流经农田的河流将土壤 OCPs 残留物携至水体中,随后将有相当大部分的残留物随水体有机-无机胶体悬浮物的沉降而进入沉积物中^[11].为了了解流域内农田土壤中 OCPs 残留量及土壤的理化性质对河流沉积物中 OCPs 残留的影响,对 4 条河流域内农田土壤中 OCPs 残留量及相关理化性质进行了检测,结果如表 2 所示.各流域农田土壤中 $\sum\text{HCHs}$ 相近,而 $\sum\text{DDTs}$ 略有差异,板桥流域农田土壤 $\sum\text{DDTs}$ 最高,江宁河最低.表 1、表 2 的数据表明,除江宁河

外,其它流域农田土壤中 HCHs 与沉积物中 HCHs 残留量基本相近,而土壤中 DDTs 残留量明显高于沉积物,可见土壤中 HCHs 更易迁移至水系.众所周知,土壤有机质能选择性吸附有机污染物^[12,13],当土壤呈弱酸性时,有机质难溶于水,OCPs 倾向于持留在土壤中,反之,有机质则易随径流或淋溶迁移至水体^[14],吸附其上的 OCPs 随之进入水系,使沉积物获得较多的 OCPs.江宁河流域内农田土壤中 OCPs 残留量并非最高(表 2),但由于土壤 pH 均大于 7,呈弱碱性,土壤有机质含量较高,这种条件能促进有机质淋失,使更多的吸附态 OCPs 随有机胶体通过水体进入沉积物;相反,板桥河流域农田土壤有机质含量最低,土壤呈弱酸性,有机质不易淋失,尽管此流域中农田土壤中 OCPs 残留量最高,板桥河沉积物中 OCPs 残留量还是最低的.

表 2 不同流域农田土壤中 OCPs 残留量及相关理化常数

Table 2 Residues of organochlorine pesticide and chemistry characters for agricultural soil from different river valley

流域	$\sum\text{HCHs}/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\sum\text{DDTs}/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\sum\text{OCPs}/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
江宁河($n=33$)	12.1 ± 8.4	37.6 ± 23.9	49.7 ± 28.7	19.1 ± 3.6	7.9 ± 0.39
板桥河($n=27$)	12.8 ± 2.3	51.6 ± 45.5	64.4 ± 45.4	17.7 ± 7.6	6.5 ± 0.68
南河、秦淮新河($n=30$)	14.7 ± 3.3	41.4 ± 39.7	56.0 ± 38.3	25.7 ± 4.7	7.1 ± 0.88

除流域农田土壤 OCPs 残留量、土壤 pH 及有机质含量对河流沉积物中 OCPs 残留量有明显地影响

外,认为影响河流沉积物中 OCPs 残留量的原因还有:①河流的历史,历史较短的河流沉积物中含有较

少的污染物. 4 条河中仅秦淮新河形成期较短, 为 20 余年前人工开凿的河流, 河流形成时 OCPs 农药已禁用, 进入环境的残留物呈减少势态, 河流中沉积物所持有的 OCPs 较少; ②流经范围小的河流, 如南河、板桥河, 容纳径流或淋溶质流量较小, 其沉积物中 OCPs 残留量也较低.

2.2 OCPs 代谢物(或异构体)在环境介质中的分布

研究 HCHs 各异构体之比和 DDTs 母体物质与代谢物之比, 可以区别 OCPs 残留物是早期使用所至, 还是污染物的新近输入^[15]. 鉴于 HCHs 各异构体在水环境中的稳定性不同, Kathleen 和 Sheryl 认为环境样品中 α/γ (α -HCH/ γ -HCH) 在 4~7 之间, 则源于工业品, 若比值接近于 1, 则说明环境中新的林丹(γ -HCH) 输入, 若样品中 α/γ 增大, 则说明样品中 HCHs 更可能是来源于长距离大气传输^[16, 17]; 当 DDEs/DDTs [p, p' -DDE/ (o, p' -DDT

+ p, p' -DDT)] 小于 1 时, 表明母体 DDT 比降解产物 DDE 的残留量更高, 通常的解释也是有新的 DDTs 输入. 表 3 所示为各流域河水、沉积物及农田土壤中 α/γ 和 DDE/DDT. 由表可知: 农田土壤 α/γ 比值基本相近, 均大于 1, α -HCH 残留量高于 γ -HCH; DDEs/DDTs 比值有一定差异, 除南河流域农田土壤中 DDEs/DDTs 小于 1 外, 其余均大于 1, 表明土壤中 DDTs 残留物以其代谢物 DDE 为主, 可见, 试区内绝大部分农田中无新的 OCPs 输入. 相对于农田土壤, 沉积物中 α/γ 较高, 而水样 α/γ 较低, 沉积物和河水中 DDEs/DDTs 比值均明显低于土壤中的相应值, 表明沉积物及河水中 DDTs 残留物以 DDTs 为主. 尽管如此, 各流域河水及沉积物中 α/γ 及 DDEs/DDTs 值增减趋势与农田土壤有一定程度的同趋性, 反映了土壤是水体及沉积物中 OCPs 的主要来源.

表 3 河流水样及沉积物中 OCPs 残留相关比值

Table 3 Correlation specific values for organochlorine pesticide residues in water and sediments

河流	水 样		沉 积 物		农田土壤	
	α/γ ¹⁾	DDEs/DDTs ²⁾	α/γ	DDEs/DDTs	α/γ	DDEs/DDTs
秦淮新河	1.13	0.37	3.81	0.51	1.87	1.30
板桥河	0.95	0.38	1.39	0.71	1.70	1.59
江宁河	0.86	0.40	2.59	0.73	1.68	1.11
南 河	未检出	0.36	2.26	0.39	1.82	0.83

1) α/γ 为 α -HCH 与 γ -HCH 的残留量之比; 2) DDE/DDT 为 p, p' -DDE 与 o, p' -DDT + p, p' -DDT 之和的比

上述研究结果说明 OCPs 各组分在农田土壤、水体及沉积物中的分布存在着明显的差异: 农田土壤和沉积物中 HCH 残留均以 α -HCH 为主, 水体则以 γ -HCH 占优势(除南河外); 农田土壤中 DDTs 残留以 p, p' -DDE 为主, 而水体及沉积物中以 DDT 占优势, 可见 OCPs 各组分在土壤-水体-沉积物迁移时, 在多项环境介质中的分布发生了变化, 引起这种变化的根本原因应该是 OCPs 各组分自身的理化性质. p, p' -DDT (K_{oc} 为 792 158)^[18] 比 p, p' -DDE (K_{oc} 为 86 404)^[18] 更易于吸附在土壤有机质上, 因而优先随土壤有机质的淋失向沉积物转移; 而 α -HCH 和 γ -HCH 的 K_{oc} 相近, 远低于 DDTs(分别为 1 835 和 1 477)^[18], 水溶性较大的 γ -HCH(水溶性分别为 2.00 和 6.80 mg/L)^[19] 优先从土壤转移至水体, 最终进入沉积物. 可以认为: OCPs 各组分参与土壤-水体-沉积物的迁移过程是有选择性的, 分布在各环境介质中残留物组成发生了变化, 偏水溶性组分, 如 HCHs 既可以溶解态直接进入水系, 也可以与有机质的吸附态进入水系, 那么溶解度大小确定其进入水系的难易程度; 难溶组分如 DDTs^[19] 则主

要以吸附态随有机质通过径流和淋溶过程进入水体和沉积物, DDT 及其代谢物进入水系的难易程度主要由其在土壤有机质中吸附性能大小即 K_{oc} 确定. 由于迁移的途径的差异, 使分布在土壤中 OCPs 各组分在转入水体或沉积物时进行了再分配, 其结果是组成发生了变化, 易迁移者在水体或沉积物中含有较高比例. 因此, 当沉积物或水体中 $\alpha/\gamma < 1$ 或 DDEs/DDTs < 1 时, 不能简单地认为环境中新的林丹或 DDTs 的输入.

2.3 不同断面沉积物中 OCPs 残留状况

不同断面沉积物中 OCPs 的残留状况(表 4)表明: 除板桥河外, 其余 3 条河流随着与入江口距离减少, 表层沉积物中 OCPs 残留量递减, 板桥河则显示出先增后降的趋势. 在入江口附近, 4 条河流表层沉积物中 OCPs 的残留量均低于上游. 有关长江南京段水体中 OCPs 的残留量资料^[20] 表明: 长江上新河段(靠近本研究河流入江口下游) HCHs 的含量为 $(10.5 \pm 1.1) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, DDTs 为 $(1.6 \pm 0.3) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于本研究所得 4 条河水样相应结果, 其原因是: 供试河流直接携带农田土壤中的 OCPs 残留物于自身

水体中,并向长江输送所携带的物质,在此过程中, OCPs 除发生了生物和化学的降解外,还将有相当大部分的残留物随水体有机、无机胶体悬浮物的沉降进入沉积物中.在降解和沉降 2 个作用的共同影响下,将大大降低小河流向长江输入的 OCPs.

表 4 不同断面沉积物中有机氯的残留量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Organochlorine pesticide residues in water from different positions/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
河流	位置	$\sum\text{HCHs}$	$\sum\text{DDTs}$	$\sum\text{OCPs}$
秦淮新河	Q1	18.6	19.5	38.1
	Q2	15.1	12.93	28.0
	Q3	3.3	5.0	8.4
板桥河	B1	3.3	3.7	6.9
	B2	18.1	28.2	46.3
	B3	2.8	7.0	9.8
江宁河	J1	33.5	32.6	66.1
	J2	22.5	26.1	48.6
南河	N1	14.2	10.4	24.6
	N2	13.5	9.0	22.5

3 结论

(1) 南京市小河流表层沉积物中普遍存在着 OCPs, 沉积物对水体中 OCPs 有明显的富集作用, 不同河流沉积物对水体 OCPs 的富集有较大的差异. 流域的农田土壤性质对 OCPs 在河流沉积物中累积有明显的影响, 其中土壤 pH 的影响最为突出, 在流经偏碱性土壤的河流沉积物中 OCPs 残留量较高.

(2) 各流域内农田土壤与河水及沉积物中 α/γ 及 DDE/DDT 值的变化有一定程度的趋同性, 反映了土壤是水体及沉积物中 OCPs 的主要来源. OCPs 各组分参入土壤-水体-河流沉积物的迁移过程是有选择性的, 分布在各环境介质中 OCPs 的组成发生了变化, 易迁移者可在沉积物中含有较高比例.

(3) 由于沉降作用, 小河流下游沉积物中 OCPs 残留量较低, 沉降过程将大大降低小河流向长江输入的 OCPs.

参考文献:

[1] Nelson C R, Hites R A. Aromatic amines in and near the Buffalo river[J]. Environmental Science & Technology, 1980, 14(9): 1147~ 1150.

[2] Steinheimer T R, Pereira W E, Johnson S M. Application of capillary gas chromatography mass spectrometry/computer techniques to synoptic survey of organic material in bed sediment [J]. Analytica Chimica Acta. 1981, 129(1): 57~ 67.

[3] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲沉积物中毒害有机物的污染现状及评价[J]. 环境科学研究, 2001, 16(1): 19~ 23.

[4] 金相灿. 沉积物中的有机污染物[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[5] 王连生. 有机污染化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

[6] 安琼, 董元华, 王辉, 等. 苏南农田土壤有机氯农药残留规律[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 414~ 419.

[7] 张伟玲, 张干, 祁士华, 等. 西藏错鄂湖和羊卓雍湖水体及沉积物中有机氯农药的初步研究[J]. 地球化学, 2003, 32(4): 363~ 367.

[8] 张祖麟, 洪华生, 陈伟琪, 等. 闽江口水、间隙水和沉积物中有机氯农药的含量[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 117~ 120.

[9] 袁旭音, 王禹, 陈骏, 等. 太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 121~ 125.

[10] 许士奋, 蒋新, 冯建强, 等. 气相色谱法测定长江水体悬浮物和沉积物中有机氯农药的残留量[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 494~ 498.

[11] 吴启航, 麦碧娴, 杨清书, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药赋存状态[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 89~ 93.

[12] 郑和辉, 叶常明. 乙草胺和丁草胺在土壤中的移动性[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 117~ 121.

[13] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. 环境化学, 2003, 22(5): 427~ 433.

[14] 文启孝编著. 土壤有机质研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.

[15] 胡雄星, 夏德祥, 韩中豪, 等. 苏州河水及沉积物中有机氯农药的分布与归宿[J]. 中国环境科学, 2005, 25(1): 124~ 128.

[16] Kathleen Walker, Daniel A Vallero, Robert G Lewis. Factors influence the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexane in the environment[J]. Environ. Sci. & Tech., 1999, 33(24): 4372~ 4378.

[17] Sheryl A Law, Miriam L Diamond, Paul A Helm, et al. Factors affecting the occurrence and enantiomeric degradation of hexachlorocyclohexane isomers in north and temperate aquatic systems[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(12): 2690~ 2698.

[18] http://www.epa.gov/superfund/resources/soil/part_5.pdf

[19] <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

[20] 蒋新, 许士奋, Martens D, 等. 长江南京段水、悬浮物及沉积物中多氯有毒有机污染物[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 193~ 197.