

新乡市地表水沉积物中 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险

冯精兰, 刘书卉, 申君慧, 栗笑迎, 孙剑辉

(河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:利用 GC-ECD 测定了新乡市地表水沉积物中的有机氯农药六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)的含量,分析其可能来源并进行生态风险评估。结果表明:新乡市地表水沉积物中 Σ HCHs 和 Σ DDTs 的含量范围分别为 1.13~8.12 ng·g⁻¹ dw(平均为 2.88 ng·g⁻¹ dw)和 2.38~22.67 ng·g⁻¹ dw(平均为 8.07 ng·g⁻¹ dw)。HCHs 和 DDTs 的组成特征表明,新乡市地表水沉积物中的 DDTs 主要来源于历史上 DDTs 的使用,同时存在局部地区三氯杀螨醇的使用,而 HCHs 主要来源于林丹的使用。根据沉积物中 HCHs 和 DDTs 的质量评估标准,新乡市地表水沉积物中 HCHs 未对生态构成威胁,而 DDTs 存在生态风险。

关键词:HCHs; DDTs; 风险评价; 沉积物; 新乡市地表水

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)06-1219-07 doi:10.11654/jaes.2013.06.019

Distribution and Risk Assessment of HCHs and DDTs in Sediments from Xinxiang Surface Water

FENG Jing-lan, LIU Shu-hui, SHEN Jun-hui, LI Xiao-ying, SUN Jian-hui

(School of Environment, Henan Normal University, Key Laboratory of Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Xinxiang 453007, China)

Abstract: This work investigated contamination status of the HCHs and DDTs in sediments from surface water, Xinxiang City. Sediments used in this study were collected from 18 sites in surface water of Xinxiang in January 2007. The levels and distribution patterns of the HCHs and DDTs in samples were investigated by the technique of soxhlet extraction followed by the analysis of gas chromatography (GC) coupled with a electron capture detector (ECD). In addition, the potential sources as well as ecological risks of HCHs and DDTs were analyzed. The concentrations of Σ HCHs (α -, β -, γ - and δ -HCH) and Σ DDTs (p -, p' -DDT, o -, p' -DDT, p -, p' -DDE and p -, p' -DDD) in sediments ranged from 1.13 ng·g⁻¹ to 8.12 ng·g⁻¹ (average, 2.88 ng·g⁻¹ dw) and 2.38 ng·g⁻¹ to 22.67 ng·g⁻¹ dw (average, 8.07 ng·g⁻¹ dw), respectively. The compositional analysis of DDTs suggested that historical usage of technical DDTs was the main reason for DDTs residues in the sediments from surface water of Xinxiang, while fresh DDTs inputs from dicofol application were likely to occurred in this region. The ratios of HCHs isomers indicated the present of lindane in the area. Compared with some published guideline values of OCPs in sediments, the concentrations of HCHs were at safe levels while the residues of DDT would pose adverse biological effects in this studied area.

Keywords: HCHs; DDTs; risk assessment; sediment; Xinxiang surface water

有机氯农药 (Organochlorine pesticides, OCPs) 作为持久性有机污染物 (POPs) 之一, 具有理化性质稳定、难以降解、容易在环境中累积等特点, 其对生态环

境和人体健康的潜在风险一直是环境科学家关注的焦点^[1-4]。六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 是 OCPs 的主要品种, 具有很强的杀虫效力, 曾在全球范围大量使用^[5]。中国是一个生产和使用有机氯农药的大国, 在 1983 年禁止生产和使用有机氯农药前, 共生产了 490 万 t HCHs 和 40 万 t DDTs, 分别占世界生产量的 33% 和 20%^[6]。尽管大部分有机氯农药已经禁止生产和使用近 30 年, 但其在各环境介质中仍有广泛的残留^[7-10]。通过地表径流、大气沉降等途径进入水环境中的有机氯农药, 由于其脂溶性高、疏水性强, 易吸附存留于沉

收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41103071); 国家博士后基金资助 (2012M511580); 河南省基础与前沿技术研究项目 (102300410193, 102300420196, 122300410270); 河南省科技创新人才计划 (134200510014); 河南省创新型科技人才队伍建设工程

作者简介: 冯精兰 (1979—), 女, 河南新乡人, 博士, 副教授, 研究方向为环境污染控制理论与技术。E-mail: fengjl1123@yahoo.com.cn

积物的有机质中,沉积物被认为是水环境中有机氯农药的主要归宿之一^[11-12]。目前,国内学者已对长江、珠江、黄河、淮河及太湖等主要河流、湖泊和三角洲滨岸沉积物中有机氯农药的含量分布特征进行了大量研究^[13-19]。

新乡市地处黄河中下游,平原占地总面积78%,土地肥沃,自然条件、土地耕作条件较好,是中国粮棉主产区、国家优质小麦生产基地和河南省畜牧生产加工基地。同全国一样,作为广谱杀虫剂的有机氯农药在20世纪50年代开始应用,至1983年被禁用之前曾大量施用。这些农药只有少量附着于农作物上,其余绝大部分残留在土壤或挥发至大气中,并通过地表径流、大气沉降等途径进入到水体并蓄积在沉积物中。蓄积在沉积物中的有机氯农药在一些条件下(如沉积物再悬浮),可重新释放进入水体,造成“二次污染”,给当地居民的身体健康和经济建设的可持续发展带来了严重威胁。因此,本文对新乡市地表水体表层沉积物中的有机氯农药HCHs和DDTs进行定量分析,研究HCHs和DDTs在该地区的空间分布特征,并初步探讨HCHs和DDTs的组成特征、来源及其风险水平,为新乡市地区的环境保护提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2007年1月在新北市主要河流共产主义渠、卫河、金堤河、天然文岩渠共采集表层沉积物18个,具

体采样点位置如图1所示。表层沉积物用不锈钢抓斗采泥器采集后,取其表层2~5 cm置于铝盒中,放置干冰保存,运回实验室冷干过100目筛后-20℃保存至分析。各采样器皿均为玻璃或金属容器,采样前以洗涤剂清洗去除油污,并以丙酮荡洗3次,采样时再以采样地点的表层水荡洗3次,避免器皿污染。

1.2 仪器及试剂

仪器:采用HP6890气相色谱(GC)仪,配63Ni电子捕获检测器(ECD)。

试剂:OCPs单标购于中国标准物质中心,OCPs混标(US-1128)[α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、六氯苯、七氯、艾氏剂、七氯环氧化物、 γ -氯丹、 α -硫丹、 α -氯丹、狄氏剂、 p,p' -DDE、 β -硫丹、 p,p' -DDD、 o,p' -DDT、 p,p' -DDT、异狄氏剂醛、硫丹硫酸盐、异狄氏剂、异狄氏剂酮、甲氧滴滴涕]和内标物五氯硝基苯(PCNB)以及回收率指示物2,4,5,6-四氯间二甲苯(TCMX)和十氯联苯(PCB209)]均购自Accustandard公司。硅胶:80~100目(青岛化工厂),以二氯甲烷索氏抽提72 h,真空干燥,使用前经180℃活化12 h,置于干燥器中冷却至室温,加入3%(重量比)的蒸馏水去活化,摇匀,密封,保存干燥器中待用。硫酸硅胶:取一定量的去活化硅胶,加入等重量的分析纯浓硫酸,采用边加边摇的方式,直到全部浓硫酸加入硅胶中,振摇20 min,使硅胶与浓硫酸完全混匀。氧化铝:100~200目(上海五四化工厂),以二氯甲烷索氏抽提72 h,真空干燥,使用前经250℃活化12 h,置于干燥器

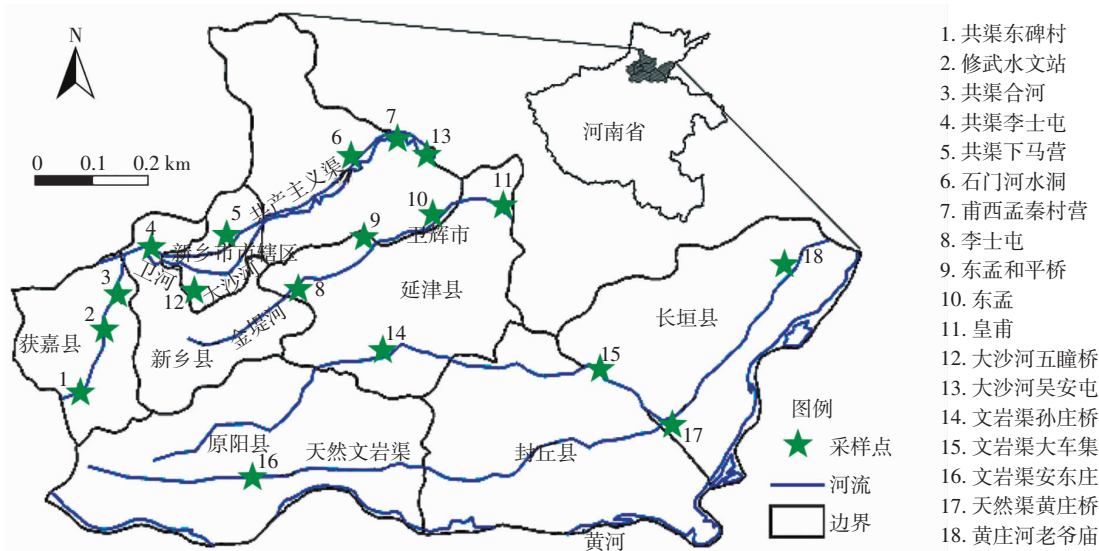


图1 新乡市地表水沉积物采样点

Figure 1 Sampling sites of sediment in surface water of Xinxiang

中冷却至室温,加入 3%(重量比)的蒸馏水去活化,摇匀,密封,保存于干燥器中待用。无水硫酸钠:(北京化工厂)用铝箔纸包裹一定量的无水硫酸钠置于马弗炉中 450 ℃ 烧 4 h,当温度冷却至略高于 100 ℃ 时,将其转入干净干燥的玻璃瓶中于干燥器中保存备用。二氯甲烷、正己烷(色谱纯,美国 Tedia)。

1.3 实验方法

提取与净化:准确称取 20 g 土样用滤纸包裹,加入回收率指示物 TCMX 和 PCB209,装入 150 mL 索氏抽提器。取 2 g 铜片加入索氏抽提底瓶中,装上索氏抽提器,用 120 mL 二氯甲烷索氏抽提 24 h,提取液在旋转蒸发仪上浓缩至 5~10 mL,然后分 3 次加入正己烷 10~15 mL,浓缩近 2 mL,将浓缩液通过硫酸硅胶:硅胶:氧化铝(1:1:2)的玻璃层析柱,用 25 mL 正己烷/二氯甲烷(V:V,1:1)的混合液洗脱有机氯农药组分,将淋洗液旋转浓缩至 0.5 mL,转移至 2 mL 样品瓶,用高纯氮气吹至 0.2 mL,加入内标物 PCNB 后上机分析。

OCPs 测定:色谱柱为 HP-5 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm,美国 Agilent Co. Ltd.)。进样口温度 290 ℃,检测器温度为 315 ℃。柱升温程序为:初始温度 60 ℃,保持 2 min,以 6 ℃·min⁻¹ 升温至 200 ℃,然后以 1 ℃·min⁻¹ 升温至 210 ℃,最后以 10 ℃·min⁻¹ 升温至 290 ℃,保持 10 min。载气是高纯氮气,柱流量为 1.0

mL·min⁻¹,非分流进样 1.0 μL。OCPs 采用单标化合物的保留时间定性,定量采用混标峰面积经内标校正定量。整个实验过程中的质量控制/质量保证(QA/QC)措施按照文献[20]进行。方法空白无目标化合物的检出,回收率和检测限见表 1。TCMX 和 PCB209 回收率范围为 76%~105%。

2 结果与讨论

2.1 地表水沉积物中 HCHs 和 DDTs 污染水平

新乡市地表水体表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 的残留列于表 2。4 种 HCHs 和 4 种 DDTs 在多数采

表 1 HCHs 和 DDTs 的回收率和检测限

Table 1 Recoveries, method detection limits and relative standard derivation(RSD) of the used analytical procedure of HCHs and DDTs

有机氯农药	沉积物		
	回收率/%	检测限/ng·g ⁻¹	RSD/%
α-HCH	105.4	0.02	7.4
β-HCH	95.2	0.01	9.3
γ-HCH	107.4	0.02	5.6
δ-HCH	89.8	0.03	4.7
p,p'-DDE	69.7	0.03	5.4
p,p'-DDD	97.2	0.03	8.3
o,p'-DDT	103.2	0.02	6.5
p,p'-DDT	83.7	0.02	7.9

表 2 新乡市地表水沉积物中 HCHs 和 DDTs 的含量(ng·g⁻¹)

Table 2 Concentration of HCHs and DDTs in sediments from surface water of Xinxiang(ng·g⁻¹)

采样点	α-HCH	β-HCH	γ-HCH	δ-HCH	ΣHCHs	p,p'-DDE	p,p'-DDD	o,p'-DDT	p,p'-DDT	ΣDDTs	ΣOCPs
1	0.42	0.57	0.41	0.35	1.75	0.14	8.44	0.67	0.54	9.79	11.54
2	0.39	1.15	0.57	0.43	2.54	0.27	4.84	0.70	0.80	6.61	9.15
3	0.30	0.80	1.47	0.45	3.02	0.31	4.90	1.92	1.46	8.59	11.61
4	0.30	1.20	1.73	0.50	3.73	0.51	7.79	0.75	0.81	9.86	13.59
5	0.47	0.97	1.44	0.38	3.26	0.21	5.09	0.73	0.83	6.86	10.12
6	0.37	1.11	2.52	0.44	4.44	5.36	6.95	8.56	1.80	22.67	27.11
7	0.30	0.59	0.39	0.36	1.64	0.18	4.12	0.70	0.93	5.93	7.57
8	0.58	1.12	2.67	0.50	4.87	0.52	14.30	2.12	1.00	17.94	22.81
9	0.76	2.29	3.75	1.32	8.12	0.78	2.14	n.d.	0.58	3.50	11.62
10	0.46	0.47	0.67	0.50	2.10	n.d.	3.05	0.55	0.44	4.04	6.14
11	0.25	0.75	1.05	0.41	2.46	0.31	9.33	3.55	0.92	14.11	16.57
12	0.15	0.79	2.12	0.36	3.42	0.32	8.24	2.98	1.01	12.55	15.97
13	0.12	0.44	0.30	0.27	1.13	0.06	1.26	0.52	0.54	2.38	3.51
14	0.11	0.60	0.39	0.37	1.47	n.d.	1.58	0.71	0.57	2.86	4.33
15	0.10	0.64	0.09	0.39	1.22	n.d.	1.75	0.76	0.61	3.12	4.34
16	0.28	0.60	0.58	0.39	1.85	n.d.	1.90	0.71	0.57	3.18	5.03
17	0.26	0.58	1.72	0.36	2.92	0.12	5.03	1.50	0.81	7.46	10.38
18	0.30	0.62	0.55	0.38	1.85	0.12	2.25	0.74	0.68	3.79	5.64

注:n.d.表示未检出或低于检出限;ΣOCPs 表示 8 种有机氯农药的总量。

样点均有检出。 Σ HCHs(包括 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH和 δ -HCH)浓度为1.13~8.12 ng·g⁻¹dw,平均为2.88 ng·g⁻¹ dw; Σ DDTs 含量为2.38~22.67 ng·g⁻¹ dw, 平均为8.07 ng·g⁻¹ dw。该区域沉积物中 Σ HCHs 含量整体上低于 Σ DDTs,与以前其他的研究相一致^[21-22],这可能是HCHs的溶解度和蒸汽压都较DDTs高,因而更易在水体和大气中残留;而DDTs疏水性强,辛醇水分分配系数高,更易在沉积物中富集。

和国内其他的河流相比(表3),新乡市地表水沉积物中HCHs的残留浓度(1.13~8.12 ng·g⁻¹dw)中等,与新疆孔雀河^[23]、淮河上游^[24]相近,高于长江南京段^[21]、北京通惠河^[25]及上海黄浦江^[26],而低于其他河流^[27-33]。新乡市地表水沉积物中DDTs的污染水平(2.38~22.67 ng·g⁻¹ dw)较高,仅低于海河、钱塘江^[32]和京杭运河(徐州铜山段)^[31],与长江武汉段、珠江、淮河上游、苏州河和南京市中小河流相近,高于其他河流。

表3 新乡市地表水沉积物中HCHs和DDTs污染水平与其他河流的比较

Table 3 Comparison of HCHs and DDTs concentrations in sediments from the studied Chinese River

Rivers	Σ HCHs/ng·g ⁻¹ dw	Σ DDTs/ng·g ⁻¹ dw	References
长江武汉段	0.10~11.72	1.55~15.63	[27]
长江南京段	0.18~1.41	0.21~4.50	[21]
大辽河	1.86~21.48	0.5~2.81	[28]
海河	1.88~18.76	0.32~80.18	[22]
钱塘江	8.22~152.1	1.14~100.2	[32]
北京通惠河	0.06~0.38	0.11~3.78	[25]
珠江	5.0~91.0	1.2~17.0	[33]
淮河上游	1.95~6.23	4.07~17.04	[24]
黄河中下游	0.09~12.88	0.05~5.03	[19]
新疆孔雀河	0.13~6.58	0.10~1.54	[23]
苏州河(上海境内)	n.d.~13.38	8.47~28.46	[29]
上海黄浦江	0.14~0.77	0.68~4.43	[26]
南京市小河流	8.1~28.0	9.7~29.3	[30]
京杭运河(徐州铜山段)	12.19~43.08	3.29~135.08	[31]
新乡市地表水	1.13~8.12	2.38~22.67	本研究

2.2 地表水沉积物中HCHs和DDTs的组成特征和来源分析

工业品HCHs中含有65%~70% α -HCH、7%~10% β -HCH、6%~10% γ -HCH和10%的 δ -HCH及其他一些含量较低的异构体^[21]。这些异构体中, α -HCH的亨利常数最大,易于挥发; γ -HCH也具有较大的亨利常数和溶解性; β -HCH的亨利常数和溶解性最低^[34]。

α -HCH和 γ -HCH在环境中均会转化为 β -HCH^[35-36],因此环境中多以 β -HCH为主要组成^[35]。新乡市地表水沉积物中HCHs异构体的组成为 α -HCH(12.4%)< δ -HCH(17.8%)< β -HCH(31.8%)< γ -HCH(38.0%), γ -HCH为主要成分,高比例的 γ -HCH反映了林丹的使用是HCHs残留的主要来源。此外,工业品HCHs中 α -HCH/ γ -HCH比值多在3~7之间,如果 α -HCH/ γ -HCH的比值小于1,则意味着有林丹的输入。因此环境中 α -HCH/ γ -HCH的比值可以用来判断HCHs的使用和来源^[37]。新乡市地表水沉积物中 α -HCH/ γ -HCH比值为0.15~0.74,平均为0.41,该比值小于1,进一步表明新乡市地表水沉积物中HCHs主要来源于林丹的使用。

我国历史上大约累计使用了4×10⁵ t DDTs,并于1983起禁止生产和使用^[38]。好氧环境中DDT降解为 p,p' -DDE,厌氧环境中降解为 p,p' -DDD^[39]。因此,由DDE/DDD比值可以判断DDT的降解环境。新乡市地表水沉积物中DDE/DDD比值基本都小于1(图2),表明沉积物DDTs的降解主要以厌氧为主。 $(p,p'-DDE+p,p'-DDD)/\Sigma$ DDTs比值能判断环境中是否存在新的DDTs输入。当 $(p,p'-DDE+p,p'-DDD)/\Sigma$ DDTs大于0.5时,认为DDTs是来自于早期残留或者施用农药后的长期风化残留;而 $(p,p'-DDE+p,p'-DDD)/\Sigma$ DDTs小于0.5则表明环境中存在新的DDTs来源^[39-40]。由图2可知,新乡市地表水沉积物中 $(p,p'-DDE+p,p'-DDD)/\Sigma$ DDTs均大于0.5,表明该区域DDTs主要来源于历史使用的残留。此外,工业品DDTs中 p,p' -DDT(80%~85%)含量远大于 o,p' -DDT(15%~20%)^[41],被调查的18个沉积物样品中有13个 o,p' -DDT含量大于 p,p' -DDT,这表明存在着

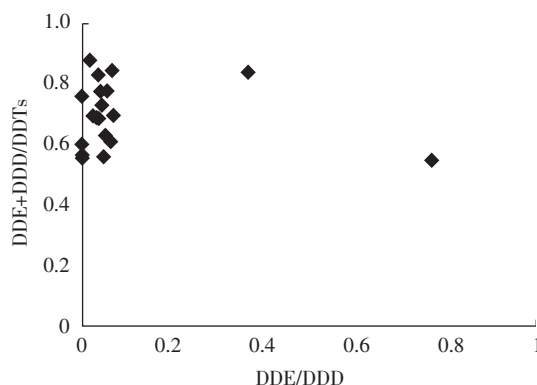


图2 新乡市地表水沉积物中DDTs的组成

Figure 2 Compositions of DDT isomers in different sediments from surface water of Xinxiang

新的DDTs污染源。有研究证实,三氯杀螨醇中含有11.4% o,p' -DDT和1.7% p,p' -DDT,其中 o,p' -DDT含量远大于 p,p' -DDT^[42]。因此,可认为该区域存在着三氯杀螨醇DDT来源。

2.3 地表水沉积物中HCHs和DDTs的生态风险评价

我国目前还没有制定淡水沉积物中HCHs和DDTs污染的环境标准。本文采用MacDonald^[42]提出的淡水环境中的共识沉积物质量基准(Consensus Based Sediment Quality Guidelines, CB-SQGs)来指示沉积物的风险程度。该基准选用阈值效应含量(Consensus Based Threshold Concentration, TECs, 危害<25%)和可能效应含量(Consensus Based Probable Effect Concentration, PECs, 危害>75%)来作为判定底栖生物通常不会出现不良反应($\leq$ TECs)、通常会出现不良反应($\geq$ PECs)以及可能出现不良反应(介于二者之间)的指标^[42-43]。

新乡市地表水表层沉积物中HCHs和DDTs的含量以及TECs、PECs值如表4所示。新乡市地表水沉积物中 p,p' -DDE含量以及 p,p' -DDT和 o,p' -DDT的总量介于TECs与PECs之间,分别为5.6%、11.2%,绝大部分点位的 p,p' -DDD含量以及 p,p' -DDT和 o,p' -DDT的总量都低于TECs,生态风险低。而 p,p' -DDD的含量和 Σ DDTs残留量介于TECs与PECs之间的比例分别达到了50.0%和61.1%,说明新乡市地表水沉积物中DDTs存在一定的生态风险。新乡市地表水沉积物中 γ -HCH平均含量低于TECs,仅有3个点位 γ -HCH含量超过了TECs。因此,新乡市地表水沉积物中HCHs的含量是基本安全的。

3 结论

(1)新乡市地表水沉积物中HCHs和DDTs含量范围分别为1.13~8.12 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和2.38~22.67 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。与国内河流沉积物中HCHs和DDTs的残留相比,新乡市地表水沉积物中HCHs的污染水平中等,而DDTs

的含量较高。

(2)HCHs和DDTs的组分分析表明,新乡市地表水沉积物中HCHs以 γ -HCH为主,同时 α -HCH/ γ -HCH的值小于1,表明HCHs主要来源于林丹的使用;DDTs以厌氧降解产物DDD比例最高,且 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\Sigma\text{DDTs}$ 均大于0.5,表明工业品DDTs的历史使用是其主要来源。此外,局部地区 o,p' -DDT相对含量大于 p,p' -DDT,表明该区域存在着三氯杀螨醇DDTs来源。

(3)与沉积物环境基准相比,新乡市地表水沉积物中HCHs的含量基本安全,而DDTs污染的生态风险较大。

参考文献:

- [1] Jones K C, de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): State of the science[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 100: 209-221.
- [2] 黄冠星, 孙继朝, 汪 珊, 等. 珠江三角洲地下水有机氯农药分布特征的初探[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1471-1475.
HUANG Guan-xing, SUN Ji-zhao, WANG Shan, et al. Elementary research of organochlorine pesticide in groundwater of Pearl River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1471-1475.
- [3] 潘 静, 杨永亮, 盖 楠, 等. 吉林省典型工农业地区多介质样品中有机氯农药和多氯联苯分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2210-2217.
PAN Jing, YANG Yong-liang, GAI Nan, et al. Distribution of OCPs and PCBs in multi-medium environmental samples from typical industrial and agricultural areas in Jilin Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2210-2217.
- [4] 邵 超, 张坤峰, 周天健, 等. 丹江口水库库边降雨径流中有机氯农药赋存及风险评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1046-1053.
TAI Chao, ZHANG Kun-feng, ZHOU Tian-jian, et al. Distribution characteristics and risk evaluation of organochlorine pesticides in runoff from typical area of Danjiangkou Reservoir[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(6): 1046-1053.
- [5] 庞绪贵, 张 帆, 王红晋, 等. 鲁西南地区土壤中有机氯农药的残留及其分布特征[J]. 地质通报, 2009, 28(5): 667-670.
PANG Xu-gui, ZHANG Fan, WANG Hong-jin, et al. Residual of organochlorine pesticide and distribution features of soils in Southwest area of

表4 新乡市地表水沉积物中HCHs和DDTs含量与沉积物基准的比较($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}$)

Table 4 Comparison HCHs and DDTs levels in this study with sediment concentrations as guideline values($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}$)

化合物	TECs	PECs	本研究	所占比例		
				$\leq$ TECs	TECs-PECs	$\geq$ PECs
p,p' -DDD	4.88	28.0	1.26~14.3(5.16)	50.0%	50.0%	
p,p' -DDE	3.16	31.3	n.d.~5.36(0.51)	94.4%	5.6%	
p,p' -DDT and o,p' -DDT	4.16	62.9	0.58~10.36(2.39)	86.8%	11.2%	
Σ DDTs	5.28	572.00	2.38~22.67(8.07)	38.9%	61.1%	
γ -HCH	2.37	4.99	0.09~3.75(1.24)	83.4%	16.6%	

- Shandong Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(5): 667-670.
- [6] 阳文锐, 王如松, 李 锋. 废弃工业场地有机氯农药分布及生态风险评价[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5454-5460.
- YANG Wen-rui, WANG Ru-song, LI Feng. Organochlorine pesticides distribution and ecological risk assessment in a abandoned industrial sites[J]. *China Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5454-5460.
- [7] 南淑清, 周培疆, 戎 征, 等. 典型农业生产功能区土壤中六六六滴滴涕类农药残留及其异构体分布[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(6): 81-84.
- NAN Shu-qing, ZHOU Pei-jiang, RONG Zheng, et al. Residues of HCHs, DDTs and theirs structures in soils of different typical agro-yielding areas[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(6): 81-84.
- [8] 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.
- SUN Jian-hui, WANG Guo-liang, ZHANG Gan, et al. Distribution of organochlorine pesticides in surface sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1332-1337.
- [9] 金广远, 王铁宇, 颜 丽, 等. 北京官厅水库周边土壤和暴露特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1359-1364.
- JIN Guang-yuan, WANG Tie-yu, YAN Li, et al. DDTs and HCHs residues in soils around guanting reservoir and related environmental risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 1359-1364.
- [10] 赵炳梓, 张佳宝, 周凌云, 等. 黄淮海地区典型农业土壤中六六六(HCH)和滴滴涕(DDT)的残留量研究: I 表层残留量及其异构体组成[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 761-768.
- ZHAO Bing-zi, ZHANG Jia-bao, ZHOU Ling-yun, et al. Residues of HCH and DDT in typical agricultural soils of Huang-Huai-Hai plain, China I. Residues in surface soils and their isomeric composition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 761-768.
- [11] Bakan G, Ariman S. Persistent organochlorine residues in sediments along the coast of mid-Black Sea region of Turkey[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(11-12): 1031-1039.
- [12] 乔 敏, 王春霞, 黄圣彪, 等. 太湖梅梁湾沉积物中有机氯农药的残留现状[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(5): 592-595.
- QIAO Min, WANG Chun-xia, HUANG Sheng-biao, et al. Present residual state of organochlorine pesticides in the sediments of Meiliang Bay, Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5): 592-595.
- [13] Xu S F, Jiang X, Dong Y Y, et al. Polychlorinated organic compounds in Yangtze River sediments[J]. *Chemosphere*, 2001, 20: 128-131.
- [14] Liu M, Chen S, Ou D, et al. Organochlorine pesticides in surface sediments and suspended particulate matters from the Yangtze estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156: 168-173.
- [15] 麦碧娴, 林 峥, 张 干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究: 多环芳烃和有机氯农药的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(2): 192-197.
- MAI Bi-xian, LIN Zheng, ZHANG Gan, et al. Organic contaminants in surface sediments from rivers of the Pearl River Delta and Estuary: The distributions and characteristics of PAHs and organochlorine pesticides[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(2): 192-197.
- [16] Zhao Z, Zhang L, Wu J, et al. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides in surface sediments and benthic organisms from Taihu Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2009, 77: 1191-1198.
- [17] 赵中华, 张 路, 于 鑫, 等. 太湖表层沉积物中有机氯农药残留及遗传毒性初步研究[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 579-584.
- ZHAO Zhong-hua, ZHANG Lu, YU Xin, et al. Distribution of organochlorine pesticide residues and potential genotoxicity in surface sediments from Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 579-584.
- [18] 黄 宏, 肖乾芬, 王连生. 淮河沉积物中有机氯农药的残留与风险评价[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 41-45.
- HUANG Hong, XIAO Qian-fen, WANG Lian-sheng. Residues and risk evaluation of organochlorine pesticides in sediments from Huaihe River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 41-45.
- [19] 孙剑辉, 王国良, 张 干, 等. 黄河表层沉积物中有机氯农药的相关性分析与风险评价[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 342-348.
- SUN Jian-hui, WANG Guo-liang, ZHANG Gan, et al. The correlation analysis and risk assessment of organochlorine pesticides in the surface sediments of the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 342-348.
- [20] 林 峥, 麦碧娴, 张 干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. *环境化学*, 1999, 18(2): 115-121.
- LIN Zheng, MAI Bi-xian, ZHANG Gan, et al. Quality assurance/quality control in quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(2): 115-121.
- [21] Xu S, Jiang X, Dong Y, et al. Polychlorinated organic compounds in Yangtze River sediments[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(12): 1897-1903.
- [22] Yang R Q, Lv A H, Shi J B, et al. The levels and distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from the Haihe River, China[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(3): 347-354.
- [23] 陈 伟, 宋 琪, 刘 梦, 等. 新疆孔雀河表层沉积物中有机氯农药的分布及风险评价[J]. *环境化学*, 2009, 28(2): 289-292.
- CHEN Wei, SONG Qi, LIU Meng, et al. Distribution and risk assessment of organochlorine pesticides in surface sediment from the Peacock River in Xinjiang, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(2): 289-292.
- [24] Sun J H, Feng J L, Liu Q, et al. Distribution and sources of organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from upper reach of Huaihe River, East China[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 184: 141-146.
- [25] Zhang Z L, Huang J, Yu G, et al. Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China[J]. *Environ Pollut*, 2004, 130: 249-261.
- [26] 胡雄星, 韩中豪, 周亚康, 等. 黄浦江表层沉积物中有机氯农药的分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2005, 26(3): 44-48.
- HU Xiong-xing, HAN Zhong-hao, ZHOU Ya-kang, et al. Distribution of organochlorine pesticides in surface sediments from Huangpu River and its risk evaluation[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 44-48.
- [27] Tang Z W, Yang Z F, Shen Z Y, et al. Distribution and sources of

- organochlorine pesticides in sediments from typical catchment of the Yangtze River, China[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2007, 53:303–312.
- [28] Wang H Z, He M C, Lin C Y, et al. Monitoring and assessment of persistent organochlorine residues in sediments from the Daliaohe River Watershed, Northeast of China[J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 133: 231–242.
- [29] 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.
- HU Xiong-xing, XIA De-xiang, HAN Zhong-hao, et al. Distribution characteristics and fate of organochlorine pesticide in water-sediment of Suzhou River[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(1): 124–128.
- [30] 安琼, 董元华, 葛成军, 等. 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[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 737–741.
- AN Qiong, DONG Yuan-hua, GE Cheng-jun, et al. Residues and distribution character of organochlorine pesticides in stream sediments in Southwestern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 737–741.
- [31] 项玮, 韩宝平, 许爱芹. 京杭大运河(徐州铜山段)沉积物表层样品中有机氯农药残留状况[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2151–2154.
- XIANG Wei, HAN Bao-ping, XU Ai-qin. Residual state of organochlorine pesticides in surface sample of sediments from Beijing-Hangzhou grand canal (Tongshan Xuzhou section)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2151–2154.
- [32] Zhou R B, Zhu L Z, Yang K, et al. Distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediments from Qiantang River, East China[J]. *J Hazard Mater*, 2006, 137: 68–75.
- [33] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China[J]. *Environ Pollut*, 2001, 117: 457–474.
- [34] Lee K T, Tanabe S, Koh C H. Contamination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea[J]. *Mar Pollut Bull*, 2001, 42(4): 273–279.
- [35] Walker K, Vallero D A, Lewis R G. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32(15): 2197–2207.
- [36] Walker K, Vallero D A, Lewis R G. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment[J]. *Environ Sci Technol*, 1999, 33(24): 4373–4378.
- [37] Li Y F, Barrie L A, Bidleman T F, et al. Global hexachlorocyclohexane use trends and their impact on the arctic atmospheric environment[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 39–42.
- [38] 华小梅, 单正军. 我国农药的生产、使用状况及其污染环境因子分析[J]. 环境科学进展, 1996, 4(2): 33–45.
- HUA Xiao-mei, SHAN Zheng-jun. The production and application of pesticides and factor analysis of their pollution in environment in China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, 4(2): 33–45.
- [39] Hitch R K, Day H R. Unusual persistence of DDT in some Western USA soils[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1992, 48(2): 259–264.
- [40] Metcalf R L. A century of DDT[J]. *J Agric Food Chem*, 1973, 21(4): 511–520.
- [41] Qiu X, Zhu T, Yao B, et al. Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(12): 4385–4390.
- [42] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2000, 39: 20–31.
- [43] 王雁, 何伟, 秦宁, 等. 巢湖表层沉积物中有机氯农药的残留与风险[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 308–316.
- WANG Yan, HE Wei, QING Ning, et al. Residual levels and ecological risks of organochlorine pesticides in surface sediments from Lake Chao-hu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 308–316.