

王雁, 何伟, 秦宁, 等. 2012. 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, 32(2): 308-316

Wang Y, He W, Qin N, *et al.* 2012. Residual levels and ecological risks of organochlorine pesticides in surface sediments from Lake Chaohu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(2): 308-316

## 巢湖表层沉积物中有机氯农药的残留与风险

王雁, 何伟, 秦宁, 何玘霜, 孔祥臻, 欧阳慧灵, 徐福留\*

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

收稿日期: 2011-04-23 修回日期: 2011-06-13 录用日期: 2011-06-13

**摘要:** 利用 GC-MS 分析了巢湖 14 个样点表层沉积物中有机氯农药 (OCPs) 残留水平, 研究了其分布与组成特征、与 TOC 的关系以及生态风险. 结果表明: 巢湖表层沉积物中 OCPs 总含量范围为  $0.58 \sim 32.91 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  (干重), 其中六六六类 (HCHs) 农药含量在  $0.23 \sim 1.81 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  之间, 滴滴涕类农药 (DDTs) 含量在  $0.34 \sim 31.01 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  之间. 表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 平均含量的空间分布特点为: 西部湖心 > 东部水源区 > 东部湖区 (不包括水源区) > 河流, 狄氏剂和异狄氏剂则主要为巢湖东部湖区和水源区的局部污染. HCHs 和 DDTs 的组成成分分析表明其主要来源于历史残留. OCPs 含量与 TOC 含量之间不存在显著相关关系, 说明 OCPs 在沉积物中的含量还受到其他因素的影响. 与共识沉积物质量基准 (CB-SQG) 相比较, 巢湖局部地区表层沉积物存在较大生态风险.

**关键词:** 巢湖; 表层沉积物; 有机氯农药; 生态风险

文章编号: 0253-2468(2012)02-308-09

中图分类号: X171, X592

文献标识码: A

## Residual levels and ecological risks of organochlorine pesticides in surface sediments from Lake Chaohu

WANG Yan, HE Wei, QIN Ning, HE Qishuang, KONG Xiangzhen, OUYANG Huiling, XU Fuliu\*

College of Urban & Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Process, Peking University, Beijing 100871

Received 23 April 2011;

received in revised form 13 June 2011;

accepted 13 June 2011

**Abstract:** The contents of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments from 14 sampling sites in Lake Chaohu were measured by GC-MS. The distributions, compositions, relationships with TOC and potential ecological risks of OCPs were analyzed. The results showed that the total concentrations of 12 detectable OCPs in the surface sediments of Lake Chaohu ranged  $0.58 \sim 32.91 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  (dry weight), within which the concentration ranges of HCHs and DDTs were  $0.23 \sim 1.81$  and  $0.34 \sim 31.01 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. The highest residual levels of HCHs and DDTs were found in the centre of western lake area, followed by the eastern water source area, the eastern part of the lake (water source district excluded), and the eastern inflow rivers. Dieldrin and endrin were mainly distributed in the eastern part of the lake. The correlation between OCPs contents and TOC contents in sediments was not significant, indicating that the content of OCPs in the sediments was also affected by other factors. HCHs and DDTs in the sediments of Lake Chaohu were originated mainly from their historical usage, as indicated by their composition characteristics. Compared to the consensus-based sediment quality guidelines (CB-SQGs) for freshwater ecosystem, OCPs in the surface sediments from some areas of Lake Chaohu posed big ecological risks to benthic organisms.

**Keywords:** Lake Chaohu; surface sediments; organochlorine pesticides; ecological risks

### 1 引言 (Introduction)

有机氯农药 (Organochlorine pesticides, OCPs) 作为一类典型的持久性有机污染物, 具有高毒性、

持久性、半挥发性和生物富集性等特点, 并且由于其历史上的大量施用, 至今仍在多种环境介质中有着广泛残留 (Wong *et al.*, 2005; Chrysikou *et al.*, 2008; Maskaoui *et al.*, 2005). 在水环境中, 由于其

**基金项目:** 国家水专项 (No. 2008ZX07103-005-01); 国家杰出青年基金项目 (No. 40725004); 国家自然科学基金重点项目 (No. 41030529); 国家环境保护公益性行业科研专项 (No. 20100932); 国家教育部博士点专项基金项目 (No. 20100001110035)

**Supported by** the National Project for Water Pollution Control (No. 2008ZX07103-005-01), the National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholars (No. 40725004), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 41030529), the Specific Scientific Research Funds for Environment Protection Commonweal Section of China (No. 20100932) and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 20100001110035)

**作者简介:** 王雁 (1987—), 女, E-mail: yoursfloating@gmail.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: xuffl@urban.pku.edu.cn

**Biography:** WANG Yan (1987—), female, E-mail: yoursfloating@gmail.com; \* **Corresponding author**, E-mail: xuffl@urban.pku.edu.cn

所具有的亲脂疏水的特性,OCPs 主要吸附在悬浮颗粒物表面,并最终通过沉降作用进入沉积物,故而沉积物被认为是水环境中 OCPs 重要的归宿之一(Zhou *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2010). 近年来,国内外对于河流、河口、海域等沉积物中的 OCPs 也已有较多的研究(胡雄星等, 2005; Hu *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010). 沉积物中的 OCPs 一方面可通过解吸和再悬浮作用重新进入水体,造成二次污染;另一方面则可通过食物链的富集和逐级放大作用,对人类和生物产生不良影响(Zhao *et al.*, 2009). 因此,研究沉积物中 OCPs 的残留分布状况对了解水体的污染情况以及有机氯农药在水环境中的行为具有重要意义.

巢湖位于安徽省中部,是我国第五大淡水湖泊,水域面积约 760 km<sup>2</sup>. 除用于发展渔业和农业灌溉之外,巢湖还作为周边地区 960 万居民饮用水水源地,其水质情况直接影响到居民的用水质量和健康安全. 目前,针对巢湖沉积物污染状况的研究较少,且主要集中在氮、磷、重金属等无机污染物上(李如忠等, 2010; 石志芳等 2010; Han *et al.*, 2011; Zan *et al.*, 2011),个别针对有机氯农药污染情况进行的研究(周婷婷等,2009)在研究区域和样点数目上也相对有限. 本文以巢湖湖区为研究对象,对表层沉积物中 OCPs 的残留水平与组成特征进行研究,分析其可能来源与生态风险,以期为巢湖持久性有机污染物控制提供科学依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 样品采集

在巢湖及其东部入湖河流布设了 14 个采样点(图 1),其中东部湖区样点 4 个(A1、A2、A3 和 A4)、东部水源区样点 6 个(A6、B2、B3、B4、B5 和 B7)、西部湖心样点 1 个(D1)、东部入湖河流样点 4 个(B6-双桥河口、C1-小柘皋河、C2-大柘皋河和 C4-火力发电站排水沟). 2009 年 8 月 8—9 日,使用抓斗式采泥器采集了上述 14 个样点的表层沉积物样品;样品采集后置于密封袋中,运回实验室放入 -20 °C 冰箱中冷冻保存至分析.

### 2.2 样品预处理

沉积物经自然风干后,去除混杂其中的植物组织、贝壳等底栖生物,研磨过 200 目筛. 称取经筛分混匀的样品 8 g,放入微波萃取管中,加入 25 mL 正己烷与丙酮的混合溶剂( $V:V = 1:1$ ),再加入回收率

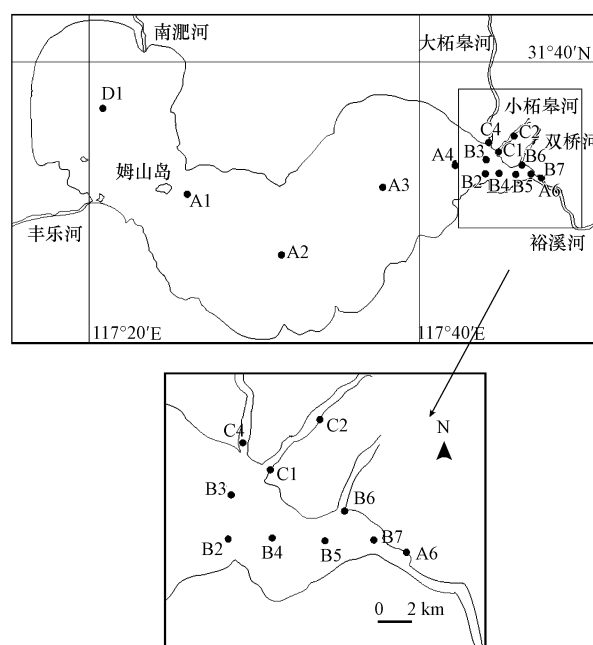


图 1 巢湖表层沉积物采样点分布

Fig. 1 Sampling map of surface sediments in Lake Chaohu

指示物-溴二硝基苯. 用微波消解/萃取系统于 1200 W 按以下步骤提取:10 min 升温至 100 °C,保持 10 min,降温 30 min. 提取后溶液过玻璃纤维滤膜后旋转蒸发浓缩并使用正己烷替换溶剂. 浓缩液用氧化铝/硅胶(下层/上层, $V:V = 1:1$ )净化,洗脱剂为 50 mL 二氯甲烷和正己烷的混合液( $V:V = 2:3$ ). 洗脱液浓缩至 1 mL,加入内标化合物五氯硝基苯,装入 GC 样品瓶待测.

### 2.3 样品分析

使用 Agilent 6890GC-5976C 气相色谱质谱检测器测定样品,色谱柱为 HP-5MS 石英毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 mm). 气相色谱载气为氦气,流速 1 mL·min<sup>-1</sup>,进样口温度 220 °C,不分流进样,进样量 1 μL. 升温程序:初始温度 50 °C 保持 2 min,以 10 °C·min<sup>-1</sup>速度升至 150 °C,再以 3 °C·min<sup>-1</sup>速度继续升至 240 °C 保持 5 min,最后以 10 °C·min<sup>-1</sup>速度升至 300 °C 保持 5 min. 质谱离子源温度 200 °C,传输线温度 250 °C,四级杆温度 150 °C. 以标准曲线内标法,选择离子模式定量化合物含量.

用配备岛津 SSM-5000A 固体总有机碳进样器的 TOC-5000A 分析仪测定沉积物样品中的总有机碳含量(TOC). 每个样品称取约 0.01 g,分别测其 TC 与 IC 的含量,二者差减即得到 TOC 含量. TC 的标准曲线用分析纯的葡萄糖测定;IC 的标准曲线用分析纯的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>测定.

## 2.4 质保与质控

样品分析过程中增加质量控制/质量保证(QA/QC)以控制样品分析. 包括方法空白、加标空白、基质加标、样品平行样和标准参考物质,并用指示物控制整个操作流程的回收率. 沉积物样品中各 OCPs 的回收率在 86.73% ~ 128.47% 之间,方法检出限为 0.007 ~ 0.67 ng·g<sup>-1</sup>. 数据分析和图表绘制采用 SPSS 19.0 及 Origin7.5 软件.

## 3 结果 (Results)

### 3.1 表层沉积物中 OCPs 的残留水平

巢湖 14 个沉积物样品中共检出 12 种有机氯农药,分别为 HCHs 的 4 种异构体( $\alpha$ -HCH、 $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、 $\delta$ -HCH), DDTs 的 5 种异构体( $p,p'$ -DDE、

$o,p'$ -DDD、 $p,p'$ -DDD、 $o,p'$ -DDT、 $p,p'$ -DDT), 六氯苯、狄氏剂和异狄氏剂. 正态检验发现样点 OCPs 总浓度及各污染物浓度均服从对数正态分布.

由表 1 各样点 OCP 的含量分布可以看出,OCPs 总含量范围为 0.58 ~ 32.91 ng·g<sup>-1</sup>(干重),湖区平均值( $3.81 \pm 2.71$ ) ng·g<sup>-1</sup>(几何均值  $\pm$  几何标准偏差). 其中,HCHs 类农药含量 0.23 ~ 1.81 ng·g<sup>-1</sup>,平均值( $0.58 \pm 2.07$ ) ng·g<sup>-1</sup>; DDTs 类农药含量 0.34 ~ 31.01 ng·g<sup>-1</sup>,平均值( $2.15 \pm 2.92$ ) ng·g<sup>-1</sup>; 其余四种有机氯农药中,六氯苯检出率为 100%,其含量为( $0.01 \pm 3.58$ ) ng·g<sup>-1</sup>;狄氏剂和异狄氏剂检出率仅为 21.43% 和 42.86%,但残留水平较高,含量分别为( $1.39 \pm 1.24$ ) ng·g<sup>-1</sup> 和 ( $1.24 \pm 2.59$ ) ng·g<sup>-1</sup>,均高于 $\Sigma$ HCHs.

表 1 巢湖表层沉积物中有机氯农药含量

Table 1 Concentrations of OCPs in surface sediments of Lake Chaohu

污染物	统计值/(ng·g <sup>-1</sup> )				百分位数					检出率
	最小值	最大值	几何均值	几何标准差	5%	25%	50%	75%	95%	
$\alpha$ -HCH	0.09	0.56	0.19	1.85	0.09	0.12	0.16	0.30	0.54	100%
$\beta$ -HCH	0.06	0.90	0.21	2.51	0.07	0.10	0.17	0.50	0.78	100%
$\gamma$ -HCH	0.03	0.30	0.10	1.90	0.04	0.08	0.09	0.17	0.25	100%
$\delta$ -HCH	0.00	0.22	0.07	2.53	0.00	0.03	0.05	0.15	0.21	85.7%
HCHs	0.23	1.81	0.58	2.07	0.27	0.33	0.44	1.14	1.70	100%
$p,p'$ -DDE	0.15	3.29	0.94	2.22	0.36	0.63	0.83	1.63	2.72	100%
$o,p'$ -DDD	0.06	1.02	0.16	2.01	0.07	0.10	0.17	0.21	0.51	100%
$p,p'$ -DDD	0.00	27.81	0.68	5.11	0.00	0.03	0.29	0.71	11.35	71.4%
$o,p'$ -DDT	0.00	0.31	0.12	2.57	0.00	0.00	0.00	0.14	0.26	42.9%
$p,p'$ -DDT	0.10	0.93	0.32	2.07	0.10	0.23	0.27	0.57	0.90	100%
DDTs	0.34	31.01	2.15	2.92	0.67	1.22	1.73	2.94	15.87	100%
HCB	0.00	0.19	0.01	3.59	0.00	0.00	0.01	0.02	0.13	100%
Dieldrin	0.00	1.76	1.39	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	21.4%
Endrin	0.00	6.13	1.24	2.95	0.00	0.00	0.00	0.92	4.05	42.9%

与国内外其他地区相比(表 2),巢湖表层沉积物中 HCHs 类农药的残留水平偏低,与福建兴化湾及罗马尼亚的巴赫卢伊河的测定值相近,低于中国的黄河、太湖、钱塘江、海河、淮河、渤海湾主要入海河流和印度恒河支流戈默蒂河 1 ~ 2 个数量级; DDTs 类农药含量则相对较高,高于杭州湾、黄河、淮河、洞庭湖以及韩国汉江的相应含量,低于国内污染较为严重的太湖、海河、钱塘江、渤海湾以及西班牙、印度的两条河流. 巢湖表层沉积物中六氯苯浓度普遍低于上述河流中的残留水平,狄氏剂和异狄

氏剂残留浓度处于较高水平,均高于杭州湾潮滩和福建兴化湾,但仍低于或接近于钱塘江及埃布罗河、戈默蒂河沉积物中相应污染物的含量. 与周婷婷等于 2008 年 12 月对巢湖沉积物进行的研究相比,本研究中测得的 $\Sigma$ HCHs ( $\alpha$ - +  $\beta$ - +  $\gamma$ - +  $\delta$ -HCH) 和 $\Sigma$ DDTs ( $o,p'$ - +  $p,p'$ -DDE, DDD, DDT) 含量偏低,并且在检出污染物类型上也存在较大差别,检出狄氏剂、异狄氏剂、六氯苯,未检出艾氏剂、七氯、 $\alpha$ -硫丹、硫丹硫酸酯,可能与采样季节及采样点设置上的差异有关.

表 2 国内外不同水体沉积物中 OCPs 含量比较

Table 2 Comparison of OCP concentrations in surface sediments from different water bodies worldwide

水体	时间	OCPs/(ng·g <sup>-1</sup> )					来源
		HCHs	DDTs	HCB	Dieldrin	Endrin	
福建兴化湾-中国	2004-08	0.23 ~ 2.61	6.19 ~ 309.79	—	ND ~ 0.25	ND ~ 0.15	Wang <i>et al.</i> , 2009
太湖-中国	2006-05	0.07 ~ 5.75	0.25 ~ 375.00	—	—	—	Zhao <i>et al.</i> , 2009
钱塘江-中国	2005-07	0.79 ~ 202.80	0.80 ~ 97.54	—	ND ~ 34.2	ND ~ 12.53	Zhou <i>et al.</i> , 2006
海河-中国	2007-08	1.00 ~ 1620.00	ND ~ 155.00	ND ~ 778.00	—	—	Zhao <i>et al.</i> , 2010
洞庭湖-中国	2004-03	0.21 ~ 9.59	ND ~ 10.15	—	—	—	Qian <i>et al.</i> , 2006
淮河-中国	2007-03	1.95 ~ 6.23	4.07 ~ 17.04	—	—	—	Sun <i>et al.</i> , 2010
渤海湾-中国	2007-05	6.21 ~ 141.77	8.56 ~ 154.75	ND ~ 272.56	—	—	秦延文等, 2010
杭州湾-中国	2004-07	0.33 ~ 8.75	0.02 ~ 3.74	—	0.02 ~ 1.15	ND ~ 1.99	高效江等, 2011
黄河 ~ 中国	2005-11	0.09 ~ 12.88	0.05 ~ 5.03	0.03 ~ 4.58	—	—	孙建辉等, 2008
巢湖-中国	2008-12	2.66 ~ 5.20	ND ~ 10.10	ND	ND	ND	周婷婷等, 2009
埃布罗河-西班牙	2004—2006	~	15.30 ~ 351	20.66 ~ 263.87	ND ~ 3.24	—	Navarro-Ortega <i>et al.</i> , 2010
巴赫卢伊河-罗马尼亚	2006—2007	0.40 ~ 3.00	0.18 ~ 18.00	—	—	—	Neamtu <i>et al.</i> , 2009
汉江-韩国	2005-11	—	1.75 ~ 8.94	0.49 ~ 2.56	—	—	Kim <i>et al.</i> , 2009
戈默蒂河-印度	2004—2005	ND ~ 155.17	1.63 ~ 368.70	ND ~ 0.98	ND ~ 1.65	ND ~ 11.96	Malik <i>et al.</i> , 2009
巢湖-中国	2009-08	0.23 ~ 1.81	0.34 ~ 31.01	ND ~ 0.19	ND ~ 1.76	ND ~ 6.13	本研究

### 3.2 表层沉积物中 OCPs 的空间分布

巢湖流域水系发达,丰乐河-杭埠河、南淝河-店埠河、派河及白石山河 4 个水系分别从西、北、南 3 个方向汇入巢湖的西部湖区,巢湖东部湖区入湖河流主要为柘皋河与兆河;东部裕溪河是巢湖汇入长江的唯一通道.自 1961 年裕溪河建巢湖闸控制湖流以来,巢湖转变为人工控制水量的半封闭水体,上述 8 条河流入湖水量占全部河流入湖水量的 90% 以上,其中西部 6 条河流流入西部湖区的水量约占 85%.各河流注入湖区的同时携带大量泥沙入湖(特别是丰乐河-杭埠河水系),造成了湖泊沉积物的多物源供应(杜磊等, 2004; 金相灿等, 1995).

巢湖沉积物中有机氯农药的含量空间分布差异较大,各样点污染物的含量与组成见图 2.其中, HCHs 类农药与 DDTs 类农药的空间分布特征基本一致.4 个河流样点 HCHs 和 DDTs 的平均含量为  $(0.30 \pm 1.20) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $(1.02 \pm 2.27) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 10 个湖泊样点 HCHs 和 DDTs 的平均含量为  $(0.76 \pm 1.98) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $(2.90 \pm 2.83) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,显著高于河流样点.这表明入湖河流沉积物中 HCHs 和 DDTs 含量均低于湖泊沉积物中二者的含量,主要原因可能是河流流量大、流速快,沉积物中的污染物可能因解吸和再悬浮作用而重新进入被带走;巢湖湖体除汛期开闸时湖水有梯度流,其余时期主要是风生流,流速很小,仅  $0.02 \sim 0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (金相灿等,

1995),利于沉积物中污染物的积累.在湖泊中,东湖区(不包括水源区)HCHs 和 DDTs 的平均含量为  $(0.38 \pm 1.22) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $(1.40 \pm 1.19) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,污染相对较轻.东湖水源区样点由于靠近河口和岸边,一方面泥沙淤积较为严重,另一方面受岸上土地开发、污染物排放等人为影响较大,污染程度较高,且水域面积狭小,不利于水体中污染物扩散,大部分吸附在底部沉积物中.该区 HCHs 和 DDTs 的平均含量为  $(1.14 \pm 1.54) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $(4.28 \pm 3.34) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,包括巢湖 HCHs 和 DDTs 类农药的极值点,分别为 A6 ( $\Sigma \text{HCHs} = 1.81 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和 B2 ( $\Sigma \text{DDTs} = 31.01 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ),其中样点 A6 位于巢湖闸附近的城市取水口,泥沙淤积较严重,水体较其他样点更为混浊.西部湖心(D1) HCHs 和 DDTs 的含量为  $1.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $7.72 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ,显著高于东部湖区和水源区相应污染物的含量,可能是受污染较为严重的西部入湖河流(如南淝河、十五河等)的影响(丁春等, 2007; 李如忠等, 2010),也可能是由于占入湖河流水量 40% 以上的丰乐河-杭埠河流域冲刷剧烈,水土流失严重,河流携带泥沙数量较多,导致西部湖底淤积情况较东湖区更为严重(顾成军等, 2004).对于整个湖泊, HCHs 和 DDTs 类有机氯农药污染呈现出西高东低的趋势,与地表水中污染物的残留水平一致(何伟等, 2011a; 2011b).但是由于西部湖区仅设有一个样点,尚不足以代表整个西部湖区的

污染情况,还需进一步研究确定. 沉积物中 OCPs 空间分布特征,可能受其来源与湖泊物理环境(水动力、河流分布、颗粒物分布与沉降等)及湖泊周缘的土地利用等因素的综合影响.

六氯苯在巢湖湖区全部样点中均有检出,其中六氯苯残留水平普遍较低,仅在东部湖区样点 A1 含量相对较高 ( $0.20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 污染物浓度在巢湖不同区域之间相差较大,在同一区域的不同样点之间也存在一定差异,未呈现出明显的分布特征. 狄氏剂和异狄氏剂则属于局部污染,且污染较为严重. 检出狄氏剂的样点全部位于东部湖区(A1、A2、A3), 检出异狄氏剂的样点分布于东部湖区和东部水源区,推测可能在巢湖的东半区曾有这类农药的施用.

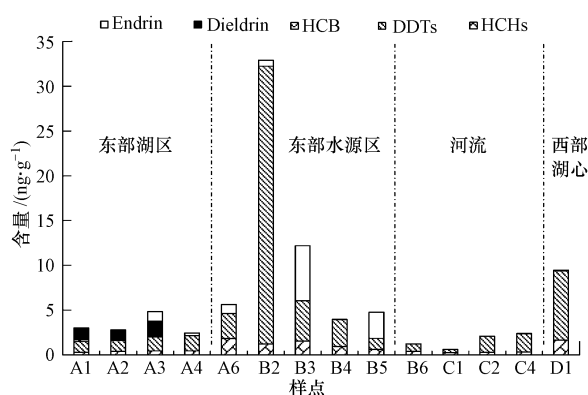


图2 巢湖表层沉积物中有机氯农药含量分布

Fig. 2 Distribution of OCPs in surface sediments of Lake Chaohu

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 巢湖表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 组成特征

通常认为,沉积物中的 OCPs 主要是陆源性输入,即施用 OCPs 的农田土壤风化侵蚀后,OCPs 随地表径流输入河流和湖泊(罗孝俊等,2005),因此周边地区的土地开发利用情况对沉积物中 OCPs 含量有很大影响. 巢湖流域历史上以农业经济为主,其中又以粮食生产占主导地位,水产养殖业次之,近年来工矿业亦有较快发展. 加之区域人口增长过快致使人多地少的矛盾日益凸显,大范围的土地开发及围湖造田都可能导致土壤中 OCPs 进入水体并沉积下来(吴开亚,2008).

环境中残留的 HCHs 异构体通常有两种来源,工业品 HCHs 粉剂中主要以  $\alpha$ -HCH 为主 ( $>60\%$ ),也含有少量的  $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH 和  $\delta$ -HCH; 农药林丹中 99% 为  $\gamma$ -HCH (Lee *et al.*, 2001). 此外,由于各

异构体空间构型上的差异,决定了其稳定性为  $\beta$ -HCH  $>$   $\delta$ -HCH  $>$   $\alpha$ -HCH  $>$   $\gamma$ -HCH, 其中  $\alpha$ -HCH 挥发性较强,易于进入大气发生远距离迁移, $\alpha$ -HCH 和  $\gamma$ -HCH 均可发生不可逆降解转化为  $\beta$ -HCH (Walker *et al.*, 1999). 因此,降解一段时间以后,沉积物中应以  $\beta$ -HCH 为主. 从巢湖沉积物中 HCHs 异构体的构成来看(图 3a),各样点 HCHs 均以  $\alpha$ -HCH 和  $\beta$ -HCH 为主,二者所占比例分别为 20.08% ~ 54.23% 和 23.61% ~ 49.69%.  $\gamma$ -HCH 和  $\delta$ -HCH 较少,说明巢湖大部分区域沉积物中的 HCHs 已发生一定程度的降解,近期无新的污染物大量输入,主要来源应为早期土壤的残留. 此外,大多数湖泊样点中  $\beta$ -HCH 丰度最大,河流样点中  $\alpha$ -HCH 则占据主导地位. 可能源于河流与岸上土壤交换较多,土壤冲刷进入河流的土壤颗粒物上含有一些近期施用的 HCHs 粉剂降解程度较低,也可能是河流沉积物中生物降解作用较弱的缘故(罗孝俊等,2005).

DDT 在环境中,可在好氧条件下脱氯化氢氧化生成 DDE,在厌氧环境中脱氯还原生成 DDD. 相较于 DDT,代谢产物 DDE 和 DDD 容易在环境介质内残留和累积. 因此,随着时间的推移,环境介质中的 DDT 代谢产物之间的比例会发生变化,表现为 DDT 百分含量的减少和 DDE、DDD 的增加. 一般研究使用 DDT/(DDE + DDD) 的比值大小来判断 DDT 的使用时间,比值  $>1$  表示该处近期有 DDT 的输入,比值  $<1$  说明 DDT 主要为历史残留 (Qiao *et al.*, 2010). 在 DDTs 组成三角图(图 3b)中,A 区的样点,其 DDT/(DDD + DDE)  $>1$ ,表明有新的 DDT 输入;B 区的样点 DDD/DDE  $>1$ ,表明代谢环境主要为厌氧条件;C 区的样点 DDD/DDE  $<1$ ,表明代谢环境为好氧条件 (Hitch and Day, 1992; 张颖等, 2006). 从图 3b 可以看出,除样点 B2、C4、D1 外,所有样点均位于 C 区,这一方面说明巢湖表层沉积物主要来源于风化较久的土壤,无新的 DDT 输入;另一方面说明湖区主要为好氧代谢条件,个别地区为厌氧条件.

工业 DDT 和三氯杀螨醇是环境中 DDTs 的主要来源. 中国从 1983 年起禁止工业 DDT 在农业活动中的使用,虽然局部地区此后仍存在非法使用,但是范围和数量都十分有限,因此环境中工业 DDT 主要为历史残留,三氯杀螨醇则成为近期环境中 DDT 输入的主要来源 (Qiu *et al.*, 2005). 根据二者不同的成分组成,通常使用残留物中 *o,p'*-/ *p,p'*-DDT 的

比值作为区分两种污染源的标准,比值在 0.2 到 0.3 之间,主要源于工业 DDT;比值在  $7.0 \pm 2.2$ , 则源于三氯杀螨醇(Qiu and Zhu, 2010). 经计算,巢湖表层沉积物中 *o,p'*-/*p,p'*-DDT 的比值在 0~2.24 之

间,其中比值低于 0.3 的有 10 个样点,说明区域 DDT 残留主要来自工业 DDT 残留,局部地区(A1、A2、C2、C4)曾受三氯杀螨醇污染.

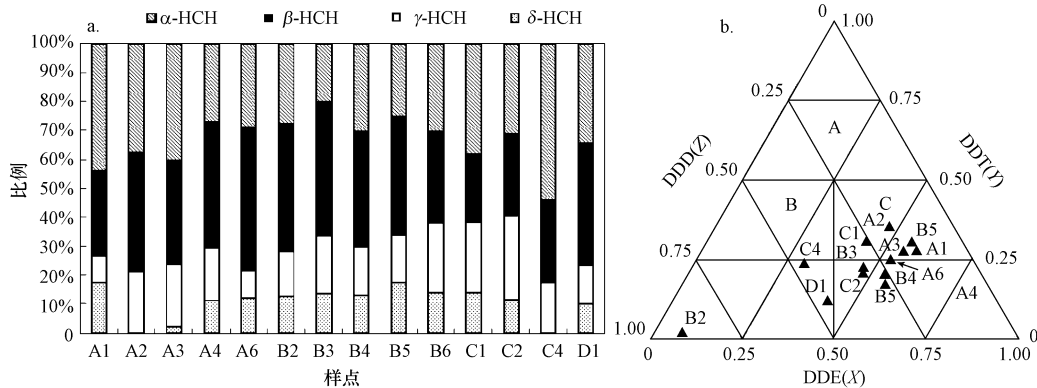


图3 巢湖表层沉积物中 HCHs、DDTs 类农药的组成特征

Fig. 3 Compositions of HCHs and DDTs in surface sediments of Lake Chaohu

#### 4.2 巢湖表层沉积物中 OCPs 与 TOC 的关系

以往研究表明,沉积物中的有机碳含量对其中 OCPs 的含量有着较大影响.一方面,由于 OCPs 具有疏水亲脂的特性,有机质通过吸附、络合对有机氯农药有着较高的富集作用(Drouillard *et al.*, 1996);另一方面,沉积物中高有机质含量通常代表着较高的微生物含量,而微生物对 OCPs 具有一定的降解作用(Hitch and Day, 1992).

巢湖沉积物中 OCP 类污染物与 TOC 的关系见表 3. 巢湖表层沉积物中各污染物的对数值(各污染

物浓度呈对数正态分布)与 TOC 含量(TOC 呈正态分布)之间均不存在显著相关关系,OCP 总量与 TOC 的关系与 Wang 等(2009)对福建兴化湾以及赵中华等(2008)对太湖表层沉积物中的研究结果类似.说明在受人类活动影响明显的地区,沉积物中 OCPs 与 TOC 相关性较低,且沉积环境条件、沉积物的粒径、沉积物中吸附剂类型以及区域污染情况等多种因素都是影响沉积物中 OCPs 含量的因素(Yang *et al.*, 2005; 吴启航等, 2004).

表 3 有机氯农药与有机碳含量的关系

Table 3 Correlation between OCPs and TOC

	统计量	lg[ HCHs /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]	lg[ DDTs /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]	lg[ HCB /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]	lg[ Dieldrin /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]	lg[ Endrin /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]	lg[ OCPs /(ng·g <sup>-1</sup> ) ]
TOC	<i>r</i>	-0.36	-0.17	-0.04	-0.23	-0.19	-0.32
	<i>p</i>	0.21	0.57	0.89	0.85	0.72	0.26
	<i>n</i>	14	14	14	3	6	14

#### 4.3 巢湖表层沉积物中 OCPs 的生态风险

众多研究组织尝试评估湖泊沉积物中有机氯农药的生态风险,但由于湖泊沉积物系统结构组成的复杂性,评价沉积物中 OCPs 的潜在环境风险较为困难,目前尚无国际通用沉积物系统生态风险评估标准. 沉积物质量基准 SQGs (Sediment Quality Guidelines) 是现今北美地区以及新西兰、澳大利亚等国家广泛使用的沉积物风险评价方法(Anderson *et al.*, 2006; Apitz *et al.*, 2007). 由于基于不同的

应用目的、保护目标、保护程度以及不同的基准建立方法,使得现有的各种淡水沉积物环境质量基准间存在较大的差异. MacDonald 等(2000)对现有淡水沉积物环境质量基准进行了分类比较,在整合了大量相关研究数据的基础上,提出了淡水环境中的共识沉积物质量基准(Consensus-Based Sediment Quality Guidelines, CB-SQGs). 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 ( $\leq$ TEC)、通常会出现不良反应 ( $\geq$ PEC) 以及可能出现不良反应 (介于二者之间) 的指标 (MacDonald *et al.*, 2000; 陈云增等, 2005).

应用此基准对巢湖表层沉积物中 OCPs 的生态风险进行评价, 结果见表 4. 巢湖各样点沉积物中  $\gamma$ -HCH、DDT 以及狄氏剂的残留浓度均低于相应 TECs, 基本不会对水生生物产生不良影响, 生态风险水平很低; 样点 D1 处的 DDE 及  $\Sigma$ DDTs 浓度, 样点 B2 处的  $\Sigma$ DDTs 浓度位于 TEC 和 PEC 之间, 可能对该处的底栖生物产生不良影响, 存在一定的生态

风险; 样点 B2 处的 DDD 浓度高于 PEC, 已达到对底栖生物造成不良影响的污染水平, 同时考虑到 B2 位于东部水源区内, 存在的生态风险值得引起高度重视. 总体而言, 巢湖地区表层沉积物中有机氯农药的生态风险较低, 但西部湖心以及东部水源区的个别地段由于污染较为严重, 已对底栖生物产生了不良影响, 存在一定的生态风险. 此外, 需要注意的是, 该沉积物评价指标仅仅是对沉积物的潜在毒性进行预测, 没有考虑到生物对有机氯农药类污染物的富集与放大作用, 因此对风险较低区域内有机氯农药污染的管理控制仍需要加强 (黄宏等, 2008).

表 4 巢湖表层沉积物中有机氯农药生态风险评估

Table 4 Toxicity evaluation of OCPs in surface sediments of Lake Chaohu

OCPs	TECs/(ng·g <sup>-1</sup> )	PECs/(ng·g <sup>-1</sup> )	实测浓度/(ng·g <sup>-1</sup> )	TEC-PEC 比例	$\geq$ PEC 比例
$\gamma$ -HCH	2.37	4.99	0.10	0.00%	0.00%
DDD	4.88	28.00	0.54	0.00%	7.14%
DDE	3.16	31.30	0.94	7.14%	0.00%
DDT	4.16	62.90	0.41	0.00%	0.00%
$\Sigma$ DDTs	5.28	572.00	2.15	14.29%	0.00%
Dieldrin	1.90	61.80	1.39	0.00%	0.00%
Endrin	2.22	207.00	1.24	14.29%	0.00%

## 5 结论 (Conclusions)

1) 巢湖表层沉积物中共检出 12 种有机氯农药, OCPs 总浓度范围 0.58 ~ 32.91 ng·g<sup>-1</sup> (干重计), 湖区平均值 (3.81 ± 2.71) ng·g<sup>-1</sup>. 其中 HCH 类农药含量在 0.23 ~ 1.81 ng·g<sup>-1</sup> 之间, DDT 类农药含量在 0.34 ~ 31.01 ng·g<sup>-1</sup> 之间.

2) 表层沉积物中 HCHs 和 DDTs 含量的空间分布特点为: 西部湖心 > 东部水源区 > 东部湖区 (不包括水源区) > 河流. 六氯苯区域内广泛检出, 浓度普遍较低, 分布无明显规律; 狄氏剂和异狄氏剂则主要为巢湖东部湖区和水源区的局部污染较为严重.

3) 湖区表层沉积物中 HCH 类农药以  $\alpha$ -HCH 和  $\beta$ -HCH 为主, 二者共同占总 HCHs 的 59.42% ~ 82.54%, 说明巢湖沉积物中的 HCHs 均已发生一定程度的降解, 主要来源于区域 HCHs 历史残留; DDT 类农药组成三角图显示, (DDE + DDD)/DDT 比值均大于 1, 且绝大多数样点 DDE 含量多于 DDD, 说明其主要来源于风化较久的土壤且降解环境主要为好氧条件.

4) 沉积物中 OCPs 含量与 TOC 含量之间无显著相关关系, 说明在受人类活动影响明显的地区, 沉积物中 OCPs 与 TOC 之间的相关系数较低, OCPs 含量还受到其他因素的影响.

5) 与共识沉积物质量基准 (CB-SQG) 相比较, 巢湖湖区沉积物中  $\gamma$ -HCH、DDT 以及狄氏剂生态风险较低; 样点 D1 处的 DDE 及  $\Sigma$ DDTs、样点 B2 处的  $\Sigma$ DDTs 可能对该处的底栖生物产生不良影响; 样点 B2 处的 DDD 浓度超过相应 PEC 值, 已对底栖生物造成明显影响, 生态风险较高.

责任作者简介: 徐福留 (1962—), 博士, 教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要从事污染物表生行为与环境效应研究.

## 参考文献 (References):

- Anderson B S, Phillips B A, Hunt J W, *et al.* 2006. Evidence of pesticide impacts in the Santa Maria River watershed, California, USA [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25: 1160-1170
- Apitz S E, Barbanti A, Bernstein A G, *et al.* 2007. The Assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines [J]. *Journal of Soils*

- and Sediments, 7: 326-341
- 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 2005. 淡水沉积物环境质量基准差异分析[J]. 湖泊科学, 17(3): 193-201
- Chen Y Z, Yang H, Zhang Z K, *et al.* 2005. The difference and cause analysis of freshwater sediment quality guidelines [J]. Journal of Lake Science, 17(3): 193-201 (in Chinese)
- Chrysikou L, Gemenetzi P, Kouras A, *et al.* 2008. Distribution of persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in soil and vegetation following a large scale landfill fire in northern Greece [J]. Environment International, 34: 210-225
- 丁春, 盛周君. 2007. 基于主成分分析法的南淝河水质综合评价[J]. 安徽农业科学, 35(35): 11583-11584, 11586
- Ding C, Sheng Z J. 2007. Evaluation of water quality evaluation in the South Feihe River based on principal component analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 35(35): 11583-11584, 11586 (in Chinese)
- Drouillard K G, Ciborowski J J H, Lazar R, *et al.* 1996. Estimation of the uptake of organochlorines by the mayfly hexagenialimbata (Ephemeroptera: Ephemeridae) [J]. Journal of Great Lakes Research, 22: 26-35
- 杜磊, 易朝路, 潘少明. 2004. 长江下游巢湖湖泊沉积物的粒度特征与沉积环境[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 27(1): 101-104
- Du L, Yi Z L, Pan S M. 2004. Grain-size characteristics and sedimentary environment in the lacustrine deposit of Chaohu Lake, the Yangtze Delta Region [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 27(1): 101-104 (in Chinese)
- 高效江, 周桂平, 胡姝, 等. 2011. 杭州湾滨岸潮滩表层沉积物中有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学学报, 31(2): 322-327
- Gao X J, Zhou G P, Hu S, *et al.* 2011. Distribution of OCPs in surface intertidal sediments of Hangzhou Bay [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(2): 322-327 (in Chinese)
- 顾成军, 戴雪荣, 张海林, 等. 2004. 巢湖沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质动态, 20(10): 10-13
- Gu C J, Dai X R, Zhang H L, *et al.* 2004. Grain size characteristics and sedimentary environment of the Chaohu Lake sediments [J]. Marine Geology Letters, 20(10): 10-13 (in Chinese)
- Han Y M, Cao J J, Kenna T C, *et al.* 2011. Distribution and ecotoxicological significance of trace element contamination in a similar to 150 yr record of sediments in Lake Chaohu, Eastern China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 13: 743-752
- 何伟, 秦宁, 何杞霜, 等. 2011a. 丰水期巢湖表层水体六六六类农药的残留与风险[J]. 环境科学学报, 31(5): 919-926
- He W, Qin N, He Q S, *et al.* 2011a. Residues and potential risks of hexachlorocyclohexanes, HCHs, in surface water from Lake Chaohu during the high water level period [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(5): 919-926 (in Chinese)
- 何伟, 秦宁, 王雁, 等. 2011b. 巢湖表层水体中 DDT 类农药的残留特征、来源解析与风险评价[J]. 湖泊科学, 23(3): 325-333
- He W, Qin N, Wang Y, *et al.* 2011b. Residues, source identification, and risk assessment of DDTs in surface water from Lake Chaohu [J]. Journal of Lake Science, 23(3): 325-333 (in Chinese)
- Hitch R K, Day H R. 1992. Unusual persistence of DDT in some western USA soils [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 48(2): 259-264
- Hu W Y, Wang T Y, Khim J S, *et al.* 2010. HCH and DDT in sediments from marine and adjacent riverine areas of north Bohai Sea, China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 59: 71-79
- 胡雄星, 韩中豪, 周亚康, 等. 2005. 黄浦江表层沉积物中有机氯农药的分布特征及风险评[J]. 环境科学, 26(3): 44-48
- Hu X X, Han Z H, Zhou Y K, *et al.* 2005. Distribution of organochlorine pesticides in surface sediments from Huangpu River and its risk evaluation [J]. Environmental Science, 26(3): 44-48 (in Chinese)
- 黄宏, 肖乾芳, 王连生. 2008. 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, 21(1): 41-45
- Huang H, Xiao Q F, Wang L S. 2008. Residues and risk evaluation of organochlorine pesticides in sediments from Huaihe River [J]. Research of Environmental Sciences, 21(1): 41-45 (in Chinese)
- 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 1995. 中国湖泊环境(第2册)[M]. 北京: 海洋出版社. 150-170
- Jin X C, Liu S K, Zhang Z S, *et al.* 1995. China Lake Environment (Volume 2) [M]. Beijing: Ocean Press. 150-170 (in Chinese)
- Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* 2009. Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han river, Korea [J]. Chemosphere, 75: 580-587
- Lee K T, Tanabe S, Koh C H. 2001. Distribution of organochlorine pesticides in sediments from Kyeonggi bay and nearby areas, Korea [J]. Environmental Pollution, 114: 207-213
- 李如忠, 洪齐齐, 罗月颖. 2010. 巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2: 144-151
- Li R Z, Hong Q Q, Luo Y Y. 2010. Pollution characteristics and source analysis of contaminants in bed sediments from Shiwuli River, Chaohu Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2: 144-151 (in Chinese)
- 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娟, 等. 2005. 珠江三角洲河流及南海近海区域表层沉积物中有机氯农药含量及分布[J]. 环境科学学报, 25(9): 1272-1279
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al.* 2005. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments in Pearl River Delta and its adjacent coastal areas of South China Sea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 25(9): 1272-1279 (in Chinese)
- MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39: 20-31
- Malik A, Ojha P, Singh K P. 2009. Levels and distribution of persistent organochlorine pesticide residues in water and sediments of Gomti River (India)-a tributary of the Ganges River [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 148: 421-435
- Maskaoui K, Zhou J L, Zheng T L, *et al.* 2005. Organochlorine micropollutants in the Jiulong River Estuary and Western Xiamen Sea, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 51: 950-959
- Navarro-Ortega A, Tauler R, Lacorte S, *et al.* 2010. Occurrence and transport of PAHs, pesticides and alkylphenols in sediment samples along the Ebro River Basin [J]. Journal of Hydrology, 383: 5-17
- Neamtu M, Ciomasu I M, Costica N, *et al.* 2009. Chemical, biological,



- and ecotoxicological assessment of pesticides and persistent organic pollutants in the Bahlui River, Romania [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(Suppl 1):S76-S85
- Qian Y, Zheng M H, Zhang B, *et al.* 2006. Determination and assessment of HCHs and DDTs residues in sediments from Lake Dongting, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 116: 157-167
- Qiao M, An T C, Zeng X Y, *et al.* 2010. Safety assessment of the source water within the Pearl River Delta on the aspect of organochlorine pesticides contamination [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 12: 1666-1677
- 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 2010. 渤海湾主要入海河流入海口沉积物有机氯农药污染特征及其来源分析[J]. *农业环境科学学报*, 29(10): 1900-1906
- Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* 2010. Distribution characteristics and sources of OCPs in estuary sediments of main runoff flowed into Bohai Bay, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 29(10): 1900-1906 (in Chinese)
- Qiu X H, Zhu T, Yao B, *et al.* 2005. Contribution of dicofol to the current DDT pollution in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 39: 4385-4390
- Qiu X H, Zhu T. 2010. Using the *o,p'*-DDT/*p,p'*-DDT ratio to identify DDT sources in China[J]. *Chemosphere*, 81: 1033-1038
- 石志芳, 姜霞, 杨苏文, 等. 2010. 巢湖表层沉积物中重金属污染的时空变化特征及潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 29(5): 948-954
- Shi Z F, Jiang X, Yang S W, *et al.* 2010. The spatial and temporal variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Chaohu, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 29(5): 948-954 (in Chinese)
- 孙剑辉, 王国良, 张干, 等. 2008. 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*, 28(2): 342-348
- Sun J H, Wang G L, Zhang G, *et al.* 2008. Correlation analysis and risk assessment of organochlorine pesticides in surface sediments from the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(2): 342-348 (in Chinese)
- Sun J H, Feng J L, Liu Q, *et al.* 2010. Distribution and sources of organochlorine pesticides (OCPs) in sediments from upper reach of Huaihe River, East China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 184: 141-146
- Walker K, Vallero D A, Lewis R G. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 33: 4373-4378
- Wang Y H, Qi S H, Xing X L, *et al.* 2009. Distribution and ecological risk evaluation of organochlorine pesticides in sediments from Xinghua Bay, China [J]. *Journal of Earth Science*, 20: 763-770
- Wong M H, Leung A O W, Chan J K Y, *et al.* 2005. A review on the usage of POP pesticides in China, with emphasis on DDT loadings in human milk [J]. *Chemosphere*, 60: 740-752
- 吴开亚. 2008. 巢湖流域环境经济系统分析[M]. 合肥: 中国科学技术出版社. 1-14
- Wu K Y. 2008. Analysis on Environmental Economic System in Chaohu Basin[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 1-14 (in Chinese)
- 吴启航, 麦碧娴, 杨清书, 等. 2004. 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*, 24(1): 89-93
- Wu Q H, Mai B X, Yang Q S, *et al.* 2004. The distribution state of PAHs and organochlorine pesticides in sediments [J]. *China Environmental Science*, 24(1): 89-93 (in Chinese)
- Yang H Y, Xue B, Yu P, *et al.* 2010. Residues and enantiomeric profiling of organochlorine pesticides in sediments from Yueqing Bay and Sanmen Bay, East China Sea [J]. *Chemosphere*, 80: 652-659
- Yang R Q, Jiang G B, Zhou Q F, *et al.* 2005. Occurrence and distribution of organochlorine pesticides (HCH and DDT) in sediments collected from East China Sea [J]. *Environment International*, 31: 799-804
- Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* 2011. Phosphorus distribution in the sediments of a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 62: 1643-1653
- Zhao L, Hou H, Zhou Y Y, *et al.* 2010. Distribution and ecological risk of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in surficial sediments from Haihe River and Haihe Estuary Area, China [J]. *Chemosphere*, 78: 1285-1293
- 张颖, 摆亚军, 徐福留, 等. 2006. 河北水库及湖泊沉积物中 DDT 农药的残留特征与风险评估[J]. *环境科学学报*, 26(4): 626-631
- Zhang Y, Bai Y J, Xu F L, *et al.* 2006. DDTs residues in sediments from Hebei lakes and reservoirs and their risk evaluation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(4): 626-631 (in Chinese)
- Zhao Z H, Zhang L, Wu J L, *et al.* 2009. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides in surface sediments and benthic organisms from Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 77: 1191-1198
- 赵中华, 张路, 于鑫, 等. 2008. 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*, 20(5): 579-584
- Zhao Z H, Zhang L, Yu X, *et al.* 2008. Distribution of organochlorine pesticide residues and potential genotoxicity in surface sediments from Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 20(5): 579-584 (in Chinese)
- Zhou R B, Zhu L Z, Yang K, *et al.* 2006. Distribution of organochlorine pesticides in surface water and sediments from Qiantang River, East China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, A137: 68-75
- 周婷婷, 李学德, 张明, 等. 2009. 巢湖东半湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 28(11): 2374-2378
- Zhou T T, Li X D, Zhang M, *et al.* 2009. Residues character and risk evaluation of organochlorine pesticides in sediments in the east area of Chaohu [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(11): 2374-2378 (in Chinese)