

博斯腾湖沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价*

杨彬^{1,2}, 解启来^{1**}, 廖天¹, 王勤锋¹, 吴攀碧¹

(1: 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

(2: 广东省环境保护产业协会, 广州 510045)

摘要: 对新疆博斯腾湖表层沉积物中有机氯农药进行分析, 探讨其分布特征及来源, 并对其生态风险进行评价。结果表明, 沉积物中总有机氯农药的含量为 2.15 - 16.80 ng/g, 其中氯丹和滴滴涕的含量较高, 分别为 0.12 - 12.08 ng/g、0.42 - 5.13 ng/g。博斯腾湖总有机氯农药的含量从入湖口到湖心呈现出下降的趋势, 说明其污染主要来源为上游开都河、黄水沟和附近农田排水的输入。沉积物中滴滴涕的组成特征表明, 滴滴涕主要来自于农田土壤的历史残留, 近期没有污染源输入; 反式氯丹和顺式氯丹的比值表明该地区为氯丹的直接施用地, 近期可能仍有氯丹输入。与沉积物风险评估值相比较, 氯丹的含量超过了风险评价高值, 博斯腾湖沉积物中有机氯农药存在较高的生态风险。

关键词: 有机氯农药; 博斯腾湖; 沉积物; 分布; 风险评价

Distribution and ecological risk evaluation of organochlorine pesticides in sediments from Lake Bosten

YANG Bin^{1,2}, XIE Qilai¹, LIAO Tian¹, WANG Qinfeng¹ & WU Panbi¹

(1: *College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, P. R. China*)

(2: *Guangdong Association of Environmental Protection Industry, Guangzhou 510045, P. R. China*)

Abstract: The organochlorine pesticides (OCPs) were analyzed in the surface sediments of Lake Bosten in Xinjiang Uygur Autonomous Region, and distribution characteristics, sources and ecological risk were evaluated. The results showed that the concentration range of total OCPs in sediments was 2.15 - 16.80 ng/g. Chlordane and DDTs had higher concentrations than other pesticides. The concentration range of Chlordane and DDTs were 0.12 - 12.08 ng/g and 0.42 - 5.13 ng/g, respectively. The total OCPs contents of Lake Bosten decreased from the entrances of the rivers to the center of the lake, which indicated that the main pollution sources were the water flowing from Kaidu River, Huangshui Ditch upstream and agricultural draining nearby. The composition of DDTs indicated that DDT compounds in sediments might be derived from the DDT-treated aged in agricultural soils, and there was no pollution source into the lake recently. The ratios of trans-chlordane/cis-chlordane for the sediments demonstrated that chlordane may still be used in Bosten basin. Compared with the *ERL* and *ERM* value of risk evaluation for sediments, the concentration of chlordane compounds was present in excess of the *ERM* value, which indicated that Lake Bosten would impose a high potential ecological risk.

Keywords: Organochlorine pesticides; Lake Bosten; sediment; distribution; risk evaluation

有机氯农药 (Organochlorine Pesticides, 简称 OCPs) 是一类性质稳定、难以降解的有毒有机污染物, 《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》规定首批控制的 12 种 POPs 中就包括滴滴涕 (DDTs)、六六六 (HCHs)、氯丹等 9 种有机氯农药^[1]。有机氯农药能通过地表径流、大气沉降等途径进入水体, 因其疏水亲脂性而易在沉积物中富集^[2-3], 对生态系统造成危害。虽然自 20 世纪 80 年代起我国逐步停止了有机氯农药的生产和使用, 但由于其难以降解, 目前在多种环境介质中仍可检出^[4]。

博斯腾湖地处新疆的焉耆盆地, 位于巴音郭楞蒙古自治州博湖县, 地理位置为北纬 41°49' - 42°07'、东经

* 2010-01-29 收稿; 2010-07-12 收修改稿。杨彬, 男, 1983 年生, 硕士; E-mail: yangbin4852@163.com.

** 通讯作者; E-mail: xieql@scau.edu.cn.

86°26′–87°30′, 是我国最大的内陆淡水湖. 它既是开都河的尾间, 又是孔雀河的源头, 兼有调控开都河来水、供应孔雀河流域的工农业及生活用水, 以及向塔里木河中下游紧急调水等多种功能. 博斯腾湖水域面积约 1300km², 东西长 55km, 南北平均宽 20km, 平均水深为 7.5m, 最深为 16m.

2003 年博斯腾湖周边四县的国民生产总值中, 第一产业占 39.99%, 第二产业占 26.26%, 第三产业占 33.75%. 博斯腾湖工业基础相对薄弱, 直接或间接向博斯腾湖排污的企业有制糖业、造纸业、制药业、建材业等 32 家, 年排污量约为 1463×10^4 t, 占博斯腾湖接纳污水总量的十五分之一^[5]. 进入博斯腾湖的大小河流有十多条, 主要河流为开都河、黄水沟和清水河, 此外还有几十条农田排水渠. 1991–2000 年博斯腾湖的水质均为劣 V 类, 其主要污染指标为硫酸盐、总氮、pH 和氯化物^[6]. 随着流域内工农业的发展和人口的增加, 农田排水、工业废水和生活污水急剧增多, 博斯腾湖的污染物入湖量远大于出湖量, 目前湖水仍处在污染物的积累过程中^[7].

长期以来, 国内学者对博斯腾湖水体有机污染的研究局限在 BOD₅、高锰酸钾指数等综合污染指标^[8–10], 而对有机氯农药污染的研究尚属空白, 因此开展博斯腾湖有机氯农药的污染研究和生态风险评价具有重要的意义. 本文研究博斯腾湖表层沉积物中有机氯农药的组成及分布特征, 探讨其污染来源, 并对有机氯农药的污染水平和生态风险进行初步评价, 为了解博斯腾湖有机氯农药的污染状况, 以及控制水体的有机污染提供科学依据.

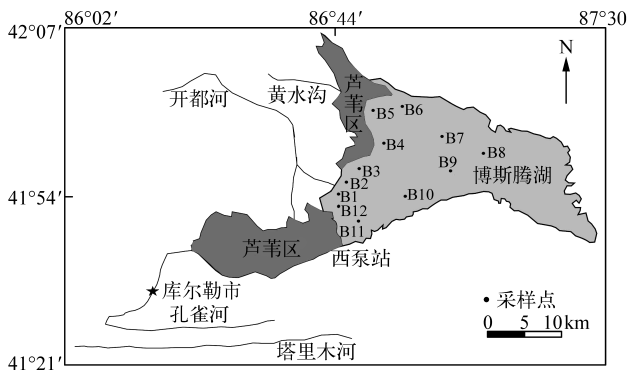


图 1 博斯腾湖沉积物采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of sediments in Lake Bosten

1 实验方法

1.1 样品采集

2008 年 8 月运用抓斗式采样器在博斯腾湖采集 12 个表层沉积物样品, 样点布设充分考虑湖水流向、补水来源、污染来源、湖岸线等因素的影响 (图 1). 样品采集后用聚乙烯 (PE) 密实袋封装, 立即放入恒温箱, 运回实验室后于冰箱冷冻 (-20°C) 保存至分析.

1.2 实验材料

实验所用的有机溶剂正己烷、二氯甲烷均为分析纯 (经全玻系统二次蒸馏); 无水硫酸钠为分析纯, 经抽提后于 450°C 下

灼烧 6h, 平衡后储于干燥器中; 硅胶 (80–100 目)、氧化铝 (100–200 目) 层析用, 经抽提后硅胶在 60°C 、氧化铝在 250°C 下活化 12h, 冷却后再加入其重量 3% 的蒸馏水去活化, 平衡后储于干燥器中. 以上试剂均购自天津市化学试剂一厂.

有机氯农药的标准物质 (US-1128): 由 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、 ε -HCH、 o,p' -DDD、 p,p' -DDD、 o,p' -DDE、 p,p' -DDE、 o,p' -DDT、 p,p' -DDT、六氯苯、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、 α -硫丹、 β -硫丹、顺式氯丹、反式氯丹、氧化氯丹、灭蚊灵、七氯、环氧七氯、甲氧-DDT 共 24 种有机氯农药组成的混合标样, 购自美国 Accustandard 公司; 回收率指示物为 2,4,5,6-四氯间二甲苯 (TCMX) 和十氯联苯 (PCB209), 内标为五氯硝基苯 (PCNB).

玻璃器皿经洗液 (重铬酸钾/硫酸) 清洗, 自来水、蒸馏水冲洗, 再经过 450°C 灼烧 4h, 使用前用二氯甲烷淋洗. 滤纸经抽提、干燥后备用.

1.3 样品处理与分析

沉积物冷冻干燥后, 研磨过 80 目筛. 准确称取样品约 15g, 用滤纸包样, 加入回收率指示物, 同时加入活化的铜片脱硫, 用 150ml 二氯甲烷抽提 48h. 将抽提液旋蒸至约 1ml, 添加 10ml 正己烷, 再次旋蒸浓缩至 1ml. 将浓缩液转移至氧化铝/硅胶 (3cm:1cm) 的层析柱分离纯化, 用正己烷/二氯甲烷 (V:V = 1:1) 混合液淋洗, 并用 8ml 棕色小瓶接洗脱液至约 7ml. 再用氮气吹至约 1ml, 然后转移至 2ml 细胞瓶中, 继续用氮气吹

至约 0.4ml,加入 4 μ l 内标物,进行 GC-ECD 测定. 采用保留时间对化合物进行定性,采用 6 点标准曲线和内标法对化合物进行定量.

1.4 仪器条件

气相色谱仪:HP6890 GC/ECD -⁶³Ni,采用 HP-5MS 毛细管柱(30m \times 0.25mm \times 0.25 μ m,美国 Agilent Co Ltd 产品);载气为高纯氦气;柱流量 1.0ml/min;检测器温度为 315 $^{\circ}$ C;程序升温:柱温初始 100 $^{\circ}$ C,保持 1min,再升温至 290 $^{\circ}$ C,升温速率为 40 $^{\circ}$ C/min,最后在 290 $^{\circ}$ C 保留 20min;无分流进样 1 μ l.

1.5 质量控制与质量保证

采用方法空白、加标空白、样品平行样对整个分析过程进行控制. 各样品中回收率指示物的回收率范围为 76% - 114%. 最后结果经回收率校正.

2 结果与分析

2.1 有机氯农药的含量及分布特征

对博斯腾湖沉积物中有机氯农药(OCPs)进行分析,共检测出 17 种 OCPs,其中氯丹、HCHs、DDTs、六氯苯的存在比较普遍,氯丹和 DDTs 的检出率达到 100%. 这可能是由于博斯腾湖地处焉耆盆地最低处,周围有大片农田分布,每年都有大量的农田排水注入,而且有机氯农药曾作为主要的杀虫剂和除草剂使用^[11]. 由沉积物中 OCPs 的含量水平(表 1)可知,主要 OCPs 含量的大小顺序为:氯丹 > DDTs > 六氯苯 > 七氯 > HCHs > 灭蚊灵 > 艾氏剂. 总有机氯农药(Σ OCPs)含量的变化范围为 2.15 - 16.80ng/g,平均值为 7.91ng/g,其中氯丹和 DDTs 的含量较高,分别为 0.12 - 12.08ng/g、0.42 - 5.13ng/g. OCPs 含量的变异系数均超过 60,离散程度大,表明不同采样点 OCPs 的含量差异较大.

表 1 博斯腾湖表层沉积物中有机氯农药的含量*
Tab. 1 Concentrations of OCPs in surface sediments from Lake Bosten

样品编号	六氯苯 (ng/g)	七氯 (ng/g)	艾氏剂 (ng/g)	氯丹 (ng/g)	灭蚊灵 (ng/g)	HCHs (ng/g)	DDTs (ng/g)	Σ OCPs (ng/g)
B1	0.62	0.03	nd	0.72	nd	0.06	1.99	3.43
B2	0.52	3.29	0.19	4.56	nd	0.49	3.08	12.14
B3	1.53	nd	nd	5.94	nd	0.00	0.46	7.94
B4	0.44	nd	nd	7.22	nd	0.08	5.13	12.88
B5	0.99	nd	nd	3.59	nd	nd	4.03	8.61
B6	0.41	nd	nd	12.08	nd	nd	2.97	15.47
B7	0.85	nd	nd	0.84	nd	nd	2.15	3.93
B8	nd	nd	nd	2.53	nd	nd	0.42	2.96
B9	0.78	nd	nd	3.43	nd	1.12	0.90	6.24
B10	nd	nd	nd	0.61	nd	0.80	0.95	2.36
B11	1.77	0.39	nd	9.83	1.51	0.33	2.97	16.80
B12	1.21	nd	nd	0.12	nd	0.20	0.62	2.15
平均值	0.76	0.31	0.02	4.29	0.13	0.27	2.14	7.91
变异系数(%)	72	306	346	90	346	137	72	67
检出率(%)	83	25	8	100	8	67	100	100

* nd:未检出.

从分布上看,采自开都河河口(B1、B2)、农田排水入湖口(B3、B4)以及黄水沟下游(B5、B6)的样品, Σ OCPs 的平均含量为 10.08ng/g;采自湖心的样品 B7 - B10, Σ OCPs 的平均含量仅为 3.87ng/g. 从入湖口到湖心,OCPs 的含量呈现明显的下降趋势. 说明上游开都河、黄水沟和附近农田排水的输入是湖区 OCPs 的主要来源,OCPs 随河水和农田排水进入博斯腾湖后,浓度得到稀释. 样品 B11 周围没有地表径流输入,其含量的偏高可能来自于偶然源的引入或大气沉降^[12].

2.2 不同地区沉积物中有机氯农药的对比

博斯腾湖沉积物中氯丹和 DDTs 的含量约占 Σ OCPs 的 81%,因此这里主要讨论氯丹和 DDTs 这两类农

表2 不同地区表层沉积物中 DDTs 和氯丹的含量对比*

Tab. 2 Comparison of DDTs and Chlordanes in surface sediments in different areas

地区	DDTs (ng/g)	氯丹 (ng/g)
博斯腾湖(本研究)	0.42 - 5.13 (2.14)	0.12 - 12.08 (4.29)
黄浦江, 上海 ^[13]	0.68 - 4.43 (2.17)	nd - 1.88 (0.21)
孔雀河, 新疆 ^[14]	0.10 - 1.54 (0.80)	nd - 1.62 (0.28)
错鄂, 西藏 ^[15]	0.8 - 3.2 (1.7)	7 - 36 (19)
黄河中下游, 河南 ^[16]	0.05 - 5.03 (1.02)	0.07 - 2.42 (0.33)
洪湖, 湖北 ^[17]	2.39 - 25.8 (9.19)	-
Michigan 湖, 美国 ^[18]	290	-
Erie 湖, 美国 ^[19]	8	-

* (): 括号内数字为平均值; nd: 未检出; -: 无资料.

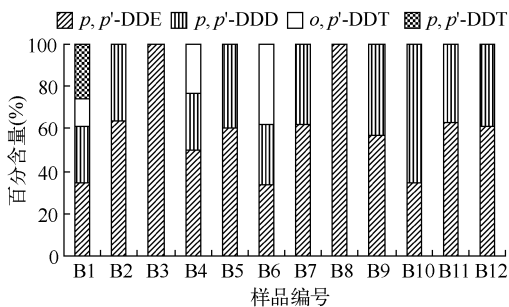


图2 博斯腾湖表层沉积物中 DDTs 的组成特征

Fig. 2 Composition of DDTs in surface sediments of Lake Bosten

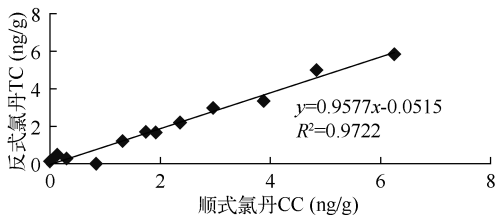


图3 博斯腾湖表层沉积物中顺式氯丹和反式氯丹的相关性

Fig. 3 Relationship between CC and TC in surface sediments of Lake Bosten

DDE, 说明博斯腾湖表层沉积物为好氧环境, 多发生好氧性生物降解.

氯丹主要用来防治白蚁, 是我国目前仍在使用的有机氯杀虫剂, 其主要成分为顺式氯丹 (CC)、反式氯丹 (TC) 和氧化氯丹. 工业氯丹中, TC 与 CC 的比值一般在 1 左右. 李军等^[22]对珠三角土壤中氯丹残留特征的研究表明: TC 与 CC 的比值与工业氯丹原始含量中的比值越接近, 说明该地区为氯丹的直接施用地或施用时间较短.

博斯腾湖沉积物中氯丹的检出率达 100%, 且含量较高, 可以由 TC/CC 的比值得出该地区两者降解速率的相对大小. TC 和 CC 具有显著的线性相关 (图 3), 依据回归方程可得: $TC/CC = 0.9577$, 这一比值与工业氯丹的原始含量相近, 说明沉积物中高浓度的氯丹主要来自于氯丹的直接施用, 近期可能仍有氯丹输入.

药, 国内外部分水体表层沉积物中氯丹和 DDTs 的含量对比见表 2.

与国内的水体相比, 博斯腾湖沉积物中 DDTs 含量要明显低于洪湖, 与黄浦江相近, 略高于西藏的错鄂、新疆孔雀河和黄河中下游, 与国外发达国家相比, 远低于与其纬度相近的五大湖区的 Michigan 湖和 Erie 湖, 博斯腾湖 DDTs 的污染程度较轻. 沉积物中氯丹的平均含量明显低于同属高山内流湖的错鄂, 但与国内许多地区相比, 要高出一个数量级, 表明博斯腾湖流域氯丹的使用量和排放量较大, 氯丹的含量属于中等偏高的水平.

2.3 有机氯农药的组成特征

工业源 DDTs 主要由 p,p' -DDT 和 o,p' -DDT 组成, 其主要有两种降解途径: 在好氧环境下通过微生物降解为 p,p' -DDE; 而在厌氧环境下, 主要降解为 p,p' -DDD^[20]. 如果存在持续的 DDT 输入, 则 DDT 的相对含量就会维持在一个较高的水平; 如果没有新的 DDT 输入, 则 DDT 的相对含量就会不断降低, 而相应的降解产物含量就会不断升高. 因此常用 DDD/DDE 及 $(DDD + DDE)/DDT$ 这两个指标来示踪 DDT 类农药的降解环境和降解速度, 并用于判定是否有新的 DDT 类农药输入^[21].

博斯腾湖沉积物中 DDTs 类农药的组成特征表明, p,p' -DDE 所占的百分含量最高, 绝大多数样品都在 50% 以上; 而 p,p' -DDT 的百分含量最低, 仅在 B1 有检出, 其他样品均未检出; o,p' -DDT 也仅在 B1、B4、B6 有检出, 所占百分含量不高, 介于 10% - 40% 之间 (图 2). 由于所有沉积物 $(DDD + DDE)/DDT$ 的比值都大于 0.5, 且大多数样品该比值在 0.8 以上, 说明 DDT 已基本降解, 沉积物中的 DDT 主要来源于农田土壤的历史残留, 近期没有污染源输入. 除 B10 外, 其他样品的 DDD/DDE 均小于 1, 因此 DDT 主要降解为好氧产物

CC 的含量整体上略高于 TC, 说明反式氯丹在博斯腾湖地区较容易降解, 这与北美洲的研究结果相似^[23], 与珠三角的研究结果相反^[24].

2.4 生态风险评价

由于沉积物中污染物的种类众多, 生物效应有很大差异, 对于沉积物中污染物的风险评价尚未建立统一的标准^[25]. 目前广泛使用的标准有两种: 美国佛罗里达海洋和河口沉积物化学样品风险评估标准^[26] 和 Ingersoll 风险评价标准^[27]. Ingersoll 标准应用于评价淡水沉积物生态风险, 吻合程度较好, 其基本原则是: 一般情况下, 当有机污染物的残留程度小于风险评价低值 (*ERL*, 生物效应几率 < 10%), 毒性风险小于 25%, 当有一项高于风险评价高值 (*ERM*, 生物效应几率 > 50%), 毒性风险大于 75%.

博斯腾湖沉积物中, DDD、DDT 的含量均低于 *ERL* 值; DDE、DDTs 的含量高于 *ERL* 值而小于 *ERM* 值的样品比例分别达到 17% 和 58%; 大部分样品氯丹的含量都超过了 *ERL* 值, 甚至有 25% 的样品超过了 *ERM* 值, 存在较高的生物毒性 (表 3). 说明博斯腾湖沉积物中有机氯农药总体的生态风险较高, 可能对水体环境造成一定的危害, 应当引起重视.

表 3 博斯腾湖沉积物中有机氯农药与沉积物质量标准的比较*

Tab. 3 Comparison of sediment quality guidelines with OCPs of sediment in Lake Bosten

化合物	<i>ERL</i>	<i>ERM</i>	沉积物中 OCPs 含量 (ng/g)	< <i>ERL</i> 的比例 (%)	<i>ERL</i> - <i>ERM</i> 的比例 (%)	> <i>ERM</i> 的比例 (%)
DDE	2.2	27	0.33 - 2.91 (1.17)	83	17	0
DDD	2	20	nd - 1.94 (0.81)	100	0	0
DDT	1	7	nd - 0.65 (0.16)	100	0	0
DDTs	1.58	46.1	0.42 - 5.13 (2.14)	42	58	0
氯丹	0.5	6	0.12 - 12.08 (4.29)	8	67	25

* (): 括号内数字为平均值; nd: 未检出.

3 结论

(1) 博斯腾湖表层沉积物中有机氯农药以氯丹和 DDTs 为主, 其含量分别为 0.12 - 12.08 ng/g、0.42 - 5.13 ng/g. 总有机氯农药含量为 2.15 - 16.80 ng/g, 平均值为 7.91 ng/g. 上游开都河、黄水沟和附近农田排水的输入是湖区 OCPs 的主要来源.

(2) 与国内外其他地区水体的沉积物相比, 博斯腾湖沉积物中 DDTs 的含量较低, 污染程度较轻, 而氯丹的平均含量比国内许多地区高, 属于中等偏高的水平.

(3) 博斯腾湖沉积物中 DDTs 类农药的组成特征表明, DDT 主要来源于农田土壤的历史残留, 近期没有新的污染源输入. 顺式氯丹和反式氯丹的相关性分析表明, 沉积物中高浓度的氯丹主要来自于氯丹的直接施用, 近期可能仍有氯丹的输入.

(4) 生态风险评价表明, 博斯腾湖沉积物中有机氯农药总体的生态风险较高, 部分样品中氯丹的含量超过了风险评价高值, 可能对水体环境造成一定的危害.

致谢: 本研究的样品分析工作得到中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室张干研究员和李军副研究员的大力协助, 谨致谢意!

4 参考文献

- [1] 岳瑞生. 《关于就某些持久性有机污染物采取国际行动的斯德哥尔摩公约》及其谈判背景. 世界环境, 2001, 1: 24-28.
- [2] Smith AG, Gangolli SD. Organochlorine chemicals in seafood: occurrence and health concern. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40 (6): 767-779.
- [3] Park JS, Wade TL, Sweet S. Atmospheric deposition of organochlorine contaminants to Galveston Bay, Texas. *Atmospheric Environment*, 2004, 35: 3315-3324.
- [4] 黄业茹, 田洪海, 郑明辉等. 持久性有机污染物调查监控与预警技术. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 7-14.

- [5] 刘卫国, 安尼瓦尔·木扎提, 吕光辉. 博斯腾湖流域风险评价. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(8):33-37.
- [6] 兰文辉, 刘建平. 博斯腾湖水质变化分析与对策研究. 重庆环境科学, 2000, **24**(4):86-88.
- [7] 徐海量, 陈亚宁, 李卫红. 博斯腾湖湖水污染现状分析. 干旱区资源与环境, 2003, **17**(3):95-97.
- [8] 李新贤, 党新成, 李红等. 新疆主要湖泊、水库的水质综合特征评价模式及营养状态分析. 干旱区地理, 2005, **28**(5):588-591.
- [9] 徐燕. 博斯腾湖低水位运行水质超标的问题. 地下水, 2008, **30**(1):511-514.
- [10] 胡小伟, 海米提·依米提, 伊元荣等. 博斯腾湖水质综合评价因子分析方法. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(1):79-83.
- [11] 李卫红, 陈跃滨, 郭永平等. 博斯腾湖环境与资源的保护和可持续利用. 干旱区地理, 2002, **25**(3):225-230.
- [12] Glubala CP, Landers DH, Monetti M *et al.* The rates of accumulation and chronologies of atmospherically derived pollutants in Arctic Alaska, USA. *Science of the Total Environment*, 1995, **161/162**:347-361.
- [13] 胡雄星, 韩中豪, 张进等. 黄浦江表层沉积物中重金属污染的潜在生态风险评价. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(1):109-112.
- [14] 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. 环境化学, 2009, **28**(2):289-292.
- [15] 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. 地球化学, 2003, **32**(4):363-367.
- [16] 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. 环境科学学报, 2008, **28**(2):342-348.
- [17] 龚香宜, 祁士华, 吕春玲等. 洪湖表层沉积物中有机氯农药的含量及组成. 中国环境科学, 2009, **29**(3):269-273.
- [18] Sondra MM, Mark LG, Joseph VD *et al.* Results from the Lake Michigan mass balance study: concentrations and fluxes of atmospheric polychlorinated biphenyls and trans-nonachlor. *Environment Science & Technology*, 2001, **35**:278-285.
- [19] Marvin CH, Painter S, Charlton MN *et al.* Trends in spatial and temporal levels of persistent organic pollutants in Lake Erie sediment. *Chemosphere*, 2004, **54**(1):33-40.
- [20] Hitch RK, Day HP. Unusual persistence of DDT in some Western USA soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1992, **48**(2):259.
- [21] Wilfred E, Frances D, John B *et al.* Distributions and fate of chlorinated pesticides, biomarkers and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments along a contamination gradient from a point-source in San Francisco Bay, California. *Marine Environmental Research*, 1994, **41**(3):299-314.
- [22] 李军, 张干, 祁士华等. 珠江三角洲土壤中氯丹的残留特征. 土壤学报, 2007, **44**(6):1058-1062.
- [23] Bidleman TE, Jantunen LM, Helm PA *et al.* Chlordane enantiomers and temporal trends of chlordane isomers in arctic air. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4):539-544.
- [24] 李军. 珠江三角洲有机氯农药污染区域地球化学研究[学位论文]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2005:109-110.
- [25] McCauley DJ, DeGraeve GM, Linton TK. Sediment quality guidelines and assessment: overview and research needs. *Environmental Science & Policy*, 2000, **3**:133-144.
- [26] Long ER, Macdonald DD, Smith SL *et al.* Incidence of adverse biological effects with ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, **19**(1):81-97.
- [27] Ingersoll CG. Calculation and evaluation of sediment effect concentrations for the amphipod *Chironomus riparius*. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, **22**:602-623.