

贵州百花湖水体中有机氯农药的残留及健康风险评价

沈焯冰¹, 张勇^{2①}, 李存雄^{2②}, 刘玉波², 赵君² (1. 贵州师范大学化学与材料学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为了研究贵州百花湖水体中有机氯农药(OCPs)对人体的潜在健康风险,在百花湖及其周边布设8个采样点分别采集水样,采用液液萃取-毛细管气相色谱法对OCPs的残留状况进行测定。结果显示,水样中11种有机氯的总含量范围为15.5~43.8 ng·L⁻¹,其中,BHCs和DDTs含量范围分别为3.2~14.6和1.2~7.8 ng·L⁻¹。采用美国国家环境保护局(EPA)推荐的健康风险评价方法的评价结果表明,百花湖水体中OCPs的致癌风险和非致癌风险均低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平,表明百花湖水体中11种OCPs对人体健康风险处于较低水平。

关键词: 百花湖; 有机氯; 气相色谱法; 健康风险评价

中图分类号: X592; X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)03-0311-05

Residues of Organochlorine Pesticides and Health Risk Assessment in Lake Baihuahu of Guizhou. SHEN Ye-bing¹, ZHANG Yong², LI Cun-xiong², LIU Yu-bo², ZHAO Jun² (1. College of Chemistry and Materials Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Key Laboratory for Information System of Mountain Areas and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to investigate potential health risk of residue of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of Lake Baihuahu to human beings, water samples were collected from 8 sampling sites located in Lake Baihuahu. Concentrations of OCPs in the water were determined with gas chromatography. Results show that the total concentration of the 11 kinds of organochlorine pesticides found in the water samples varied in the range of 15.5–43.8 ng·L⁻¹, of which 3.2–14.6 and 1.2–7.8 ng·L⁻¹ was BHCs and DDTs, respectively. Based on the model of water environmental health risk assessment recommended by USEPA, the health risk assessment indicates that the carcinogenic and non-carcinogenic risks of OCPs residue in the water of the Lake are both lower than the highest acceptable level of risk set by ICRP.

Key words: Lake Baihuahu; organochlorine pesticide; gas chromatography; health risk assessment

有机氯农药(OCPs)是由人类活动引起的在环境中常见的持久性有机污染物,具有生物累积性、生物放大和“三致”(致癌、致畸和致突变)作用^[1]。OCPs中六六六(BHCs)和滴滴涕(DDTs)在我国曾被长期使用,是目前研究较多的有机氯化合物。BHCs和DDTs已被列入我国68种环境优先控制污染物黑名单,也已被列为《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》首批控制的12种化合物^[2]。我国于1983年开始停止生产和使用OCPs,OCPs污染已大幅减少,但由于其难降解,且易于在生物体内蓄积、放大,环境中OCPs残留仍较高。OCPs残留对生态系统及人体健康仍构成一定的威胁^[3]。

贵州省贵阳市的两湖一库(红枫湖、百花湖和阿哈水库)是贵阳市主要的饮用水源地,其中,百花湖还是重要的水产养殖地。百花湖水质的直接影响到贵阳市居民的身体健康,因此对百花湖的治理与保护显得尤为重要。该研究在对百花湖水

体中OCPs残留进行调查的基础上,利用美国国家环境保护局(EPA)的健康风险评价方法对百花湖水体中的OCPs进行健康风险评价。

1 材料与方法

1.1 实验仪器与试剂

仪器: Agilent 6890N 气相色谱仪,电子捕获检测器(ECD),安捷伦 GC 工作站。毛细管色谱柱: OV-1701(30 m×0.32 mm×0.32 μm),贵州莱德

收稿日期: 2012-11-21

基金项目: 贵州省科技厅科学技术基金(黔科合J字LKS[2011]30号); 贵州省教育厅自然科学基金(黔教科2010017); 贵阳市科技局医疗卫生科技计划([2008]筑科科农合同字第14号); 贵州省教育厅招标项目[黔教科(2011)018号]; 贵阳市科技局产学研专项([2008]筑科I合同字第33号)

① 通信作者 E-mail: 790640977@qq.com

② 通信作者 E-mail: LCX@gzun.edu.cn

色谱技术公司。EYELAOSB-2000 旋转蒸发仪(日本 EYELA 公司);电子天平 AL204(梅特勒-托利多仪器上海有限公司);SHB-III 型循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司);80-2 型离心机(上海医疗器械集团);HB-10250 型数控超声波(江苏汉邦科技有限公司)。

试剂:正己烷、二氯甲烷和甲醇均为色谱纯(天津科密欧);HLB 固相萃取柱(Waters 公司);中性氧化铝、无水硫酸钠(分析纯,北京化工厂,研细后在 450 °C 条件下烘 4 h);弗罗里硅土(Florisil, TEDIA Company, Inc. USA, 650 °C 条件下烘 12 h 后,用 $w = 5\%$ 的纯净水灭活)。

农药标准品:六氯苯(HCB)、五氯硝基苯(PCNB)、七氯、 α -BHC、 γ -BHC、 β -BHC、 δ -BHC、 p, p' -DDE、 o, p' -DDT、 p, p' -DDD 和 p, p' -DDT, 购于农业部环境保护科研监测所,质量浓度均为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

1.2 样品采集

2012 年 8 月上旬,根据百花湖的面积、形状与水流流向在百花湖及其周边入库河流和自来水厂采集水样进行调查,8 个关键的采样点见图 1。各采样点水深为 1.5~3.0 m,采集的水样置于干净的棕色玻璃容器中,加入少量 $\varphi = 0.5\%$ 的甲醇(抑制微生物活性,保持目标化合物呈溶解状态)。

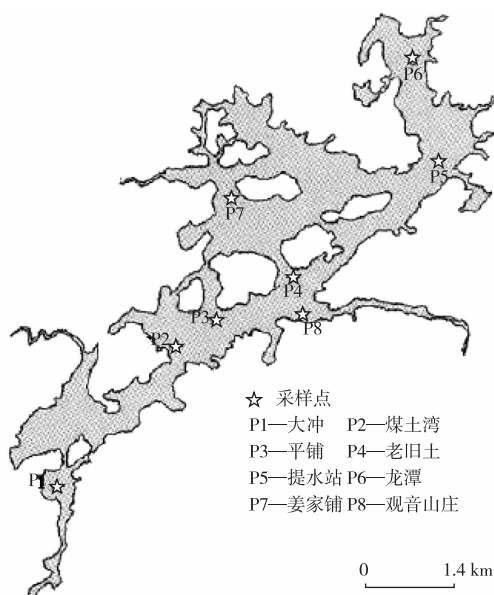


图 1 采样点分布示意

Fig.1 Location of sampling sites

1.3 样品处理

将水样过滤以去除悬浮颗粒物,取过滤水样 1

L 进行固相萃取。HLB 柱在使用前依次用二氯甲烷、甲醇和蒸馏水各 5 mL 对其进行淋洗。调节好真空度使水样过柱流速保持在 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。富集完毕后,用 15 mL 二氯甲烷淋洗液洗脱到离心管中旋蒸浓缩至 1 mL 后转移至装有弗罗里硅土、氧化铝和无水硫酸钠的净化柱中,对目标化合物进行净化,分别以正己烷和 $V(\text{正己烷}) : V(\text{二氯甲烷}) = 1 : 1$ 的混合液淋洗硅胶净化柱,得到 2 个组分,将洗脱下来的含 OCPs 的组分转入旋转蒸发仪中,旋转蒸发至干,用正己烷进行溶剂置换,再定量转移至 K-D 浓缩器中,旋转蒸发定容至 0.5 mL,立即转移至样品瓶中密封,置于冰箱中保存,待测。

1.4 样品分析

色谱条件:进样口温度 280 °C,柱温 200 °C 保持 1 min,以 $7 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 250 °C 后保持 4 min,检测器温度 320 °C,载气为高纯 N_2 ,柱压 81.75 kPa,柱流量 $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,尾吹气流量 $58.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,不分流进样 $1 \mu\text{L}$ 。

1.5 评价模型及参数的取值

对于饮用水源地水体中污染物进行健康风险评估有多种方法和模型,笔者采用美国 EPA 的污染物暴露计算方法对百花湖水体中 OCPs 所引起的人体健康风险进行初步评价^[4]。

1.5.1 风险评价模型^[5]

致癌风险值($P_{i,a}$)计算公式:

$$P_{i,a} = \frac{1 - \exp(-D_{i,a} \times q_o)}{73} \quad (1)$$

式(1)中, $P_{i,a}$ 为致癌物 i 经食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; $D_{i,a}$ 为致癌物 i 经食入途径的单位体质量日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; q_o 为致癌物 i 经食入途径的致癌斜率因子, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 73 为贵阳人群平均寿命, a 。

非致癌风险指数($P_{i,b}$)计算公式:

$$P_{i,b} = \frac{D_{i,b} \times 10^{-6}}{D_{r,o} \times 73} \quad (2)$$

式(2)中, $P_{i,b}$ 为非致癌物 i 经食入途径产生的平均个人非致癌年风险, a^{-1} ; $D_{i,b}$ 为非致癌物 i 经食入途径的单位体质量日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; $D_{r,o}$ 为非致癌物 i 经食入途径的参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 73 为贵阳人群平均寿命, a 。

总风险值(I_h)计算公式为 $I_h = \sum P_i$ 。研究表明饮用水中的 OCPs 对人体健康的毒性作用呈相加关系,而不是协同或颞颥关系^[3]。

通过饮水途径暴露的单位体质量日均暴露剂

量($D_{i,w}$)计算公式:

$$D_{i,w} = \frac{2.2 \times C_i}{70} \quad (3)$$

式(3)中, 2.2 为成人日均饮水体积, L; C_i 为污染物 i 质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 70 为成人人均体质量, kg。

1.5.2 风险模型参数

水环境健康风险评价主要针对水环境中对人体有害的污染物进行评价, 这些物质一般可分为致癌物和非致癌物, 但事实上致癌物同样具有非致癌物的危险效应。在计算每种污染物的健康风险时, 采用美国 EPA 已经公布的同类参考剂量或致癌斜率因子(表 1)。

表 1 污染物健康风险评价模型参数 q_o 和 $D_{r,o}$ 值^[6]

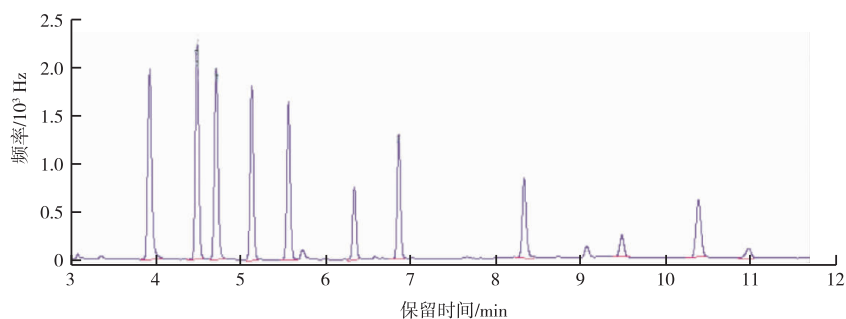
Table 1 Parameter q_o and $D_{r,o}$ of the pollutants in the health risk assessment model

农药名称	$q_o/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$D_{r,o}/(\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
六氯苯	1.6	8.0
七氯	4.5	5.0
α -BHC	6.3	5.0
γ -BHC	1.3	3.0
β -BHC	1.8	2.0
DDTs	0.34	5.0

q_o 为致癌斜率因子; $D_{r,o}$ 为非致癌参考剂量。

1.6 预期寿命损失

根据杨宇等^[7]的研究, 计算得到 10^{-5} 癌症超额发病率所对应的成人预期寿命损失 (lost of expectancy, L_e) 为 62.16 min。据此, 因癌症导致的预期寿命损失计算公式为 $L_e = 62.16 \times P_{i,a} \times 10^5$ 。



各组分的出峰时间 (min) 分别为: 六氯苯, 3.913; α -BHC, 4.478; 五氯硝基苯, 4.696; γ -BHC, 5.113; 七氯, 5.546; β -BHC, 6.322; δ -BHC, 6.846; p,p' -DDE, 8.320; o,p' -DDT, 9.470; p,p' -DDD, 10.373; p,p' -DDT, 10.964。

图 2 11 种有机氯农药混标图谱

Fig. 2 Chromatogram of 11 organochlorine pesticides

2.2 百花湖水体中有机氯农药含量

由表 3 可知, 百花湖水体中共检测出 9 种 OCPs 组分, 这 9 种组分的总质量浓度范围为 15.5 ~ 43.8

1.7 生态风险评价

内梅罗综合指数 (P) 法被广泛运用于持久性有机污染物的污染评价:

$$P = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{\max})^2}{2}} \quad (4)$$

式(4)中, \bar{P}_i 为水体中各污染指数平均值; P_{\max} 为水体中各污染指数最大值。

2 结果与分析

2.1 百花湖水样中目标化合物的回收率和检出限

百花湖水样中目标化合物回收率为 90.00% ~ 110.00%, 检出限为 0.10 ~ 1.00 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 2)。11 种有机氯农药的混标图谱见图 2。

表 2 百花湖水体中目标化合物的回收率和检出限

Table 2 The recoveries and detection limits of the targeted OCPs in Lake Baihuahu

农药名称	不同添加量 (μg) 下回收率/%		不同添加量 (μg) 下 RSD		检出限/ ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)
	0.02	0.10	0.02	0.10	
六氯苯	90.42	95.37	7.41	2.31	0.12
五氯硝基苯	90.88	96.04	4.77	5.42	0.12
七氯	99.59	94.24	3.96	5.32	0.22
α -BHC	91.20	94.64	3.04	4.24	0.10
γ -BHC	95.58	98.25	4.88	0.83	0.18
β -BHC	101.96	109.02	10.73	19.13	0.35
δ -BHC	109.04	102.70	6.36	3.58	0.28
p,p' -DDE	91.74	94.06	6.53	5.93	0.32
o,p' -DDT	99.97	100.27	8.27	12.32	0.83
p,p' -DDD	96.31	91.79	8.44	1.25	0.63
p,p' -DDT	93.96	106.84	10.42	8.22	1.00

$n=3$ 。RSD 为相对标准偏差。

$\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 α -BHC 和七氯被列入美国 EPA 水体中 129 种优先控制污染物黑名单。 α -BHC 被列入中国水体中 68 种优先控制污染物黑名单。各采

样点水体 OCPs 残留以老旧土和观音山庄两地较高,分别为 43.8 和 40.4 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,姜家铺最低,为 15.5 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表3 百花湖8个采样点水体中有机氯农药含量
Table 3 Concentrations of OCPs in 8 sampling sites in Lake Baihuahu $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

农药名称	大冲	煤土湾	平铺	老旧土	提水站	龙潭	姜家铺	观音山庄
六氯苯	14.0	12.4	8.2	22.2	9.4	5.8	7.2	11.1
α -BHC	ND	0.8	6.4	8.8	4.2	3.5	0.4	ND
五氯硝基苯	10.7	ND	ND	ND	ND	ND	0.5	7.8
γ -BHC	ND	ND	ND	ND	3.4	2.6	ND	ND
七氯	3.0	6.3	9.7	5.0	2.9	2.2	2.7	ND
β -BHC	ND	5.0	8.2	ND	ND	ND	2.8	9.5
δ -BHC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
p,p' -DDE	ND	4.1	4.1	7.8	3.9	2.6	1.5	ND
o,p' -DDT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.8
p,p' -DDD	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.4	7.2
p,p' -DDT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ OCPs	27.7	28.6	36.7	43.8	23.8	16.8	15.5	40.4

ND表示未检出。

由表3还可知,大多数采样点 β -BHC浓度高于 α -BHC。 β -BHC是最稳定和最难被微生物降解的异构体,其他异构体在环境中也会逐渐转化为 β -BHC而达到最稳定状态。工业生产的DDT主要含有 w 为75%的 p,p' -DDT、15%的 o,p' -DDT、5%的 p,p' -DDE和5%的不明成分^[8]。环境中DDT通过化学和生物过程可缓慢降解为DDE和DDD^[8-9]。表3显示,检出的DDTs以DDE居多,而DDT几乎未检出,说明环境中没有新的DDT农药进入^[10-11],这与近年来对百花湖的治理和保护密切相关。

由图3可知,百花湖8个样点所受OCPs污染以六氯苯为主,其含量为5.8~22.2 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,所占比例为27%~51%;其次为BHCs和DDTs,两者含量分别为3.2~14.6和1.2~7.8 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,所占比例分别为20%~40%和11%~30%。

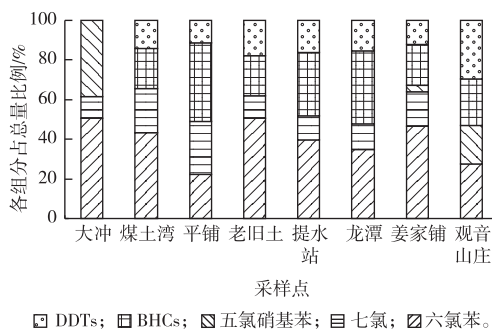


图3 百花湖各样点水体中各有机氯农药组分含量的分布
Fig.3 Concentration distribution of the OCPs in the water samples in Lake Baihuahu

2.3 与国内其他水体中有机氯农药污染状况的比较

百花湖水体中BHCs含量范围为3.2~14.6 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为7.9 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,DDTs含量范围为1.2~7.8 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为5.2 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,百花湖水体中OCPs含量略高于乌鲁木齐乌拉泊水库 [ρ (BHCs) = 4.0 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, ρ (DDTs) = 0 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$]^[3],但低于北京官厅水库 [ρ (BHCs) = 13.2 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, ρ (DDTs) = 8.8 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$]^[2]。九龙江口水体中BHCs含量为71.8 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,DDTs含量为12.8 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[12];黄浦江水体中BHCs含量为55.4 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,DDTs含量为12.0 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[13];苏州河水体中BHCs含量为43.0 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$,DDTs含量为75 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[14]。百花湖水体中BHCs和DDTs含量均低于上述水体,可见,百花湖水体中OCPs的污染程度较小。

2.4 健康风险评价

采用表3中的数据,根据健康风险评价模型和模型参数(表1),可以计算出百花湖水体中OCPs通过饮水途径所引起的平均个人年风险(表4~5)。由表4可知,OCPs通过饮水途径引起的致癌平均个人年健康风险值为 $0.99 \times 10^{-8} \sim 4.30 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$,远低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受值($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$)^[15],因此认为百花湖水体中OCPs不会对人体产生致癌危害。

表4 百花湖水体中有机氯农药的饮水途径致癌危害的平均个人年风险

Table 4 Average per capita annual risk of the carcinogenic hazard of OCPs in the Lake through drinking water

采样点	六氯苯	α -BHC	γ -BHC	七氯	β -BHC	DDTs	总风险
大冲	0.97	—	—	0.17	—	—	1.14
煤土湾	0.85	0.22	—	0.35	0.39	0.06	1.87
平铺	0.57	1.75	—	0.54	0.64	0.06	3.56
老旧土	1.53	2.38	—	0.28	—	0.11	4.30
提水站	0.65	1.13	0.19	0.16	—	0.06	2.19
龙潭	0.40	0.95	0.16	0.12	—	0.04	1.67
姜家铺	0.49	0.10	—	0.15	0.22	0.03	0.99
观音山庄	0.76	—	—	—	0.74	0.18	1.68

—表示无数据。

由表5可知,OCPs对人体的非致癌风险范围为 $8.06 \times 10^{-12} \sim 19.78 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$,远低于ICRP推荐的最大可接受值,可见,百花湖饮用水源地中OCPs对人体的健康风险较低,饮用危害较小。

2.5 预期寿命损失

通过表4中的致癌风险指数可计算出水体中

OCPs 通过饮用暴露对成人所造成的预期寿命损失在 $0.062 \sim 0.267 \text{ min} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。

表5 百花湖水体中有机氯农药的饮水途径非致癌危害的平均个人年风险

Table 5 Average per capita annual risk of the noncarcinogenic hazard of OCPs in the Lake through drinking water

采样点	六氯苯	α -BHC	γ -BHC	七氯	β -BHC	DDTs	总风险
大冲	7.55	—	—	1.62	—	—	9.17
煤土湾	6.67	0.44	—	3.38	2.70	2.21	15.40
平铺	4.43	3.48	—	5.24	4.42	2.21	19.78
老旧土	1.20	4.72	—	2.71	—	4.19	12.82
提水站	5.09	2.24	1.86	1.55	—	2.09	12.83
龙潭	3.15	1.89	1.38	1.18	—	1.42	9.02
姜家铺	3.86	0.19	—	1.47	1.53	1.01	8.06
观音山庄	5.98	—	—	—	5.13	6.48	17.59

—表示无数据。

2.6 生态风险评价

根据内梅罗综合指数(P)可确定 OCPs 污染级别:安全($P \leq 0.7$)、警戒限($0.7 < P \leq 1.0$)、轻度污染($1.0 < P \leq 2.0$)、中度污染($2.0 < P \leq 3.0$)和重度污染($P > 3.0$)。百花湖 8 个采样点水体中 OCPs 的 P 值为 $0.005 \sim 0.018$, 表明百花湖水体受 OCPs 的污染属于安全级别。

3 结论

(1) 百花湖 8 个采样点水体中 11 种 OCPs 总含量为 $15.5 \sim 43.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中, 六氯苯和七氯检出率较高。六氯苯含量为 $5.8 \sim 22.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 七氯含量为 $2.2 \sim 9.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, BHCs 含量为 $3.2 \sim 14.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, DDTs 含量为 $1.2 \sim 7.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(2) 水体中检出的 BHCs 以 β -BHC 为主, DDTs 以 DDE 为主, 表明近年来进入百花湖的 BHCs 和 DDTs 得到有效控制。

(3) 百花湖 8 个采样点水体中 OCPs 致癌平均个人年健康风险值为 $0.99 \times 10^{-8} \sim 4.30 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 低于 ICRP 推荐的标准, 表明百花湖水体中 OCPs 对人体的致癌风险较小; 非致癌平均个人年健康风险值为 $8.06 \times 10^{-12} \sim 19.78 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$, 远低于

于 ICRP 推荐的最大可接受值, 表明百花湖饮用水源地中的 OCPs 对人体健康风险处于较低水平。

参考文献:

- [1] XUE N D, WANG H B, XU X B. Progress in Study on Endocrine Disrupting Pesticides(EDPs) in Aquatic Environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(20): 2257-2266.
- [2] 万译文, 康天放, 周忠亮, 等. 北京官厅水库有机氯农药分布特征及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 803-807.
- [3] 郑江, 王灵, 刘宁, 等. 乌鲁木齐地表水饮用水源地水体有机氯农药健康风险评价[J]. 环境检测管理与技术, 2010, 22(5): 26-30.
- [4] US EPA. Guidelines for Exposure Assessment[R]. FRI4129-5. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment, US EPA, 1992.
- [5] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 467-482.
- [6] US EPA. Risk-Based Concentration Table[R]. US EPA Region III, Philadelphia, Pennsylvania, 2004.
- [7] 杨宇, 胡建英, 陶澍. 天津地区致癌风险的预期寿命损失[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 69-73.
- [8] 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.
- [9] BAXTER T M. Reductive Dechlorination of Certain Chlorinated Organic Compounds by Reduced Hematin Compared With Their Behaviour in the Environment[J]. Chemosphere, 1990, 21(4/5): 451-458.
- [10] 刘立丹, 王玲, 高丽荣. 鸭儿湖表层沉积物中有机氯农药残留及其分布特征[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1643-1649.
- [11] 刘兴健, 葛晨东, 崔雁玲, 等. 连云港潮滩表层沉积物中有机氯农药残留特征与风险评估[J]. 环境化学, 2012, 31(8): 966-972.
- [12] 张祖麟, 陈伟琪, 哈里德, 等. 九龙江口水体中有机氯农药分布特征及归宿[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 88-92.
- [13] 夏凡, 胡雄星, 韩中豪, 等. 黄浦江表层水体中有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 11-16.
- [14] 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和归宿[J]. 中国环境科学, 2005, 25(1): 124-128.
- [15] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health Evaluation Manual EPA/540/R92/003[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 1991.

作者简介: 沈焯冰(1988—), 男, 江苏南通人, 硕士生, 主要从事环境分析化学方面的研究。E-mail: sybycit@163.com