

北京官厅水库有机氯农药分布特征及健康风险评价

万译文, 康天放, 周忠亮, 张 雁

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要:为了研究北京官厅水库中有机氯农药(OCPs)对人体产生的潜在健康危害风险,从位于官厅水库、洋河和奶水河的9个采样点采集了水样和沉积物样品,采用气相色谱法对其中的有机氯农药残留状况进行了测定。结果表明,水样中,17种有机氯化化合物的总浓度范围为10.06~87.37 ng·L⁻¹,其中六六六(HCHs,即:α-HCH、β-HCH、γ-HCH和δ-HCH)和滴滴涕(DDTs,即:o,p'-DDT、p,p'-DDT、p,p'-DDE和p,p'-DDD)的含量范围分别为3.93~38.94 ng·L⁻¹和3.71~16.03 ng·L⁻¹,官厅水库及其支流水体受到有机氯农药轻度污染,其周边地区农田排水是水库中农药的重要来源。沉积物中有机氯农药总含量范围为8.48~24.40 ng·g⁻¹,其中HCHs和DDTs的含量高于其他OCPs的含量,其含量范围分别为1.11~7.73 ng·g⁻¹和2.97~10.52 ng·g⁻¹,沉积物中六六六异构体和滴滴涕类似物的含量组成表明这些农药来自环境中的早期残留。利用健康风险评价模型对官厅水库表层水体中的OCPs所致健康风险的评价结果表明,目前官厅水库中有机氯农药类污染物对人体健康的风险处于较低水平。

关键词:有机氯农药;气相色谱法;健康风险评价;官厅水库

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0803-05

Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Beijing Guanting Reservoir

WAN Yi-wen, KANG Tian-fang, ZHOU Zhong-liang, ZHANG Yan

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to investigate the risk of healthy hazards to human beings caused by organochlorine pesticides(OCPs) in the water of Guanting Reservoir, water samples and sediment samples were obtained from 9 sampling sites which are located in Guanting Reservoir, Yang River and Guishui River. The concentrations of OCPs in the surface water and in the sediment samples were determined by gas chromatography. The results showed that the total concentrations of the 17 kinds of organochlorinated compounds in the water samples were in the range of 10.06~87.37 ng·L⁻¹, the concentrations of HCHs(i.e. the total concentrations of α-HCH, β-HCH, γ-HCH and δ-HCH)and the concentrations of DDTs (i.e. the total concentrations of o,p'-DDT, p,p'-DDT, p,p'-DDE and p,p'-DDD)in the water samples were in the range of 3.93~38.94 ng·L⁻¹ and 3.71~16.03 ng·L⁻¹, respectively. The OCPs in the water samples were mainly originated from the surrounding agricultural drain. In sediment samples, the total concentrations of OCPs were in the range of 8.48~24.40 ng·g⁻¹. The concentrations of HCHs and DDTs were higher than those of other OCPs and varied over the range of 1.11~7.73 ng·g⁻¹ and 2.97~10.52 ng·g⁻¹, respectively. The compositions of the isomers of HCHs and the analogues of DDTs in the sediment samples indicated that the pesticides came from the early residues in the environment. Based on the model of water environmental health risk assessment, the results of health risk assessment indicated that the health risk caused by the OCPs was low in the drinking water sources of Guanting Reservoir.

Keywords: organochlorine pesticides; gas chromatography; health risk assessment; Guanting Reservoir

有机氯农药(OCPs)由于具有持久性、生物累积性和生态毒性而受到环境科学界的广泛关注^[1],并被列入《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。已有研究表明,一些农药是内

分泌干扰物或潜在的内分泌干扰物,可能存在致畸、致癌等作用^[2],同时OCPs具有很强的亲脂性^[3],疏水性强,大部分污染物经过物理化学作用容易吸附在沉积物的有机质和生物体中,生物体死亡后最终蓄积于沉积物中,因此沉积物被认为是OCPs最终归宿之一^[4]。OCPs可以通过水生生物的摄取和富集放大,经由食物链传递而危害人体健康,此外,污染物还可以从沉积物中不断解吸出来,重新进入水体造成二次污染。因此对沉积物中OCPs的研究具有特别重要的意义。

收稿日期:2008-07-21

基金项目:国家自然科学基金(No.20247002);北京市自然科学基金(No.8062010);北京市教育委员会科技发展基金(No.Km200310005008)

作者简介:万译文(1984—),男,湖南张家界市人,硕士研究生,主要从事环境分析化学工作。

通讯作者:康天放 E-mail:kangtf@bjut.edu.cn

官厅水库位于北京西北部,是北京市重要的水源地,共有 3 条入库河流,包括洋河、桑干河和妫水河。目前库区水质已经受到多种污染物污染,恢复官厅水库水质是北京市的一个重要战略目标^[5-6]。官厅水库承担着北京市 1/4 人口的生活用水以及京西工农业用水,由于水质逐年恶化,自 1997 年起停止向北京市提供饮用水。据调查,在水库的上游水系有数十家造纸厂、化工厂、酒厂等企业未能达标排放废水,张家口、下花园和沙城等城镇生活污水的直接排放也对官厅水库水质造成污染,同时官厅水库与永定河流域,大片农田中的农药残留随径流而流失,雨季土壤中残留的大量农药随径流进入水库上游水系,最终进入了官厅水库。

本文对官厅水库水体和沉积物中的六六六(HCHs)和滴滴涕(DDTs)等有机氯农药的污染现状开展了监测调查,并且对这些污染物所造成的健康风险进行了评价,以便为官厅水库水源地环境保护和环境管理措施的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验仪器与试剂

Agilent 6890 气相色谱仪:配以 ^{63}Ni 电子捕获检测器(ECD),惠普 Hp-413 毛细管柱(30 m×0.32 mm i.d.×0.25 μm);RE-52AA 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);循环水式多用真空泵 SHB-Ⅲ型(郑州长城科工贸有限公司);整套的过滤抽滤装置(天津奥特赛恩斯仪器有限公司);固相萃取(SPE)装置(Supelco 公司);HLB 固相萃取柱(Waters 公司);FD-1C 型冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司)。

实验中所用有机溶剂正己烷、二氯甲烷、甲醇均为色谱纯(天津市福晨化学试剂厂);硅胶(80~100 目,青岛硅胶精细有限公司)和中性氧化铝(100~200 目,天津市福晨化学试剂厂)为层析用,经二氯甲烷索氏提取后,硅胶在(180±2)℃活化 12 h,氧化铝则在(250±2)℃活化 12 h,待冷却后再加入质量分数为 3% 的去离子水降活性,平衡过夜,加入正己烷淹没,储存备用。

有机氯农药标准物质包括: α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH、 δ -HCH、p,p'-DDD、p,p'-DDE、p,p'-DDT、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、硫丹 I、硫丹 II、硫丹硫酸脂、异狄氏剂醛、七氯、七氯环氧、甲氧滴滴涕共 17 种组成的混合标样(美国 Supelco Co. Cat No. 47913);o,p'-DDT 购自中国国家标准物质研究中心(GS-

BG203008—1992)。

有机氯农药定量分析所用内标化合物为:五氯硝基苯(PCNB,美国 Supelco Co. Cat No. 40156);回收率指示物(Surrogate standard)标样:2,4,5,6-四氯间二甲苯(TMX)和十氯联苯(PCB209,美国 Supelco Co. Cat No. 48460)。

1.2 样品采集

2008 年 4 月下旬,在官厅水库水域周边以及入库河流洋河和妫水河进行了调查,并确定 9 个关键的采样点位(如图 1 所示),利用采泥器采集表层沉积物样品(约表层 10 cm),除去石头和树枝等杂质,混匀后装入洁净的玻璃瓶中密封,送回实验室冰箱中冷冻(-20℃)保存。各取样点水深 1.5~5 m,采集的水样用干净的棕色玻璃容器盛装,加入少量 0.5% 的甲醇(抑止微生物活性,保持目标化合物呈溶解状态)。



(图中 1~9 表示 9 个采样点)

图 1 官厅水库采样点

Figure 1 Sampling sites in Guanting Reservoir

1.3 样品处理

1.3.1 水样处理

将水样用 0.45 μm 微孔滤膜过滤去除悬浮颗粒物,取过滤的水样 1 L 进行固相萃取。HLB 柱在使用前依次用二氯甲烷、甲醇、蒸馏水各 5 mL 清洗。调节好真空度使水样过柱的流速恒定在 5 mL·min⁻¹。富集完毕后,以 15 mL 二氯甲烷为淋洗剂洗脱到离心管中,高纯氮气吹蒸至 1 mL 后转移到装有硅胶、氧化铝以及无水硫酸钠的净化柱中,对所研究的目标化合物进行分级净化,分别以正己烷和正己烷/二氯甲烷混合溶液淋洗硅胶净化柱,得到 2 个级分,将洗脱下来的含有机氯农药的组分转入旋转蒸发器中,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,在柔和的高纯氮气流中吹蒸定容至 0.5 mL,立即转移至样品瓶中密封,放置冰箱中保存,待测。在

仪器分析前加入一定量的内标化合物,对目标化合物定量。

1.3.2 沉积物样品处理

先将沉积物品冷冻干燥后,研磨过 60 目不锈钢筛。准确称取 20 g 沉积物样品,加入回收率指示物后用滤纸包裹,放入索氏提取器中索氏抽提 48 h(提取瓶加入 2 g 铜片脱铜)。将提取液在旋转蒸发仪上($\leq 39\text{ }^{\circ}\text{C}$)浓缩至约 2~5 mL,然后分 2 次加入 10 mL 正己烷,再次浓缩至 1 mL,完成溶剂置换。将浓缩液转移至硅胶/氧化铝复合柱中净化,用 70 mL 正己烷/二氯甲烷(7:3)的混合液淋洗净化柱,将有机氯农药组分洗脱下来后继续浓缩至 2~5 mL,在柔和的高纯氮气流中吹蒸定容至 1 mL,立即转移至 2 mL 样品瓶中密封,放置冰箱中保存,待测。在仪器分析前加入一定量的内标化合物(PCNB),对目标化合物定量。

1.4 样品分析

色谱条件为:进样口温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;ECD 检测器温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$;柱温为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 15 min,再以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。进样量:1 μL ,不分流进样,载气为高纯氮,柱头压为 20 psi。

每个工作日在分析有机氯农药之前,应该先用滴滴涕降解标样检查 GC 进样口是否引起了滴滴涕的降解,只有降解率小于 15%时,仪器方能用于样品的测定。该方法对加入到水样中的两种有机氯农药回收率指示物的回收率分别为 87%和 94%(沉积物中为 90%和 93%),该方法对水样和沉积物中目标化合物的回收率分别为 67%~109%和 58%~109%,方法的检出限(MDL)分别为 $0.12\sim 0.27\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.27\sim 0.46\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 有机氯农药在表层水体中的浓度及分布

9 个采样点水样中农药残留水平如表 1 所示。所检测的 18 种 OCPs 除异狄氏剂醛在研究区域全都未检出外,其余 17 种农药均得到不同程度的检出,检出率为 94%,这 17 种有机氯农药在整个区域的残留浓度为 $10.06\sim 87.37\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 HCHs、DDTs、硫丹 II 存在比较普遍。由于该地区在农业生产中曾大量使用该类农药,有机氯农药仍长期残留在环境中,而土地的开发利用加剧了残留于农田土壤中农药的流失^[7]。6 号采样点(八号桥)处于洋河和桑干河两条河流汇合后的入库口附近,该处的有机氯农药浓度远高于其余几个样点,这说明库区的农药残留主要来源于上游汇

入的河水。而 2 号采样点所在的区域历史上曾经是老的怀来县城,可能由于以前 DDTs 的大量使用造成其含量较高。从有机氯污染物的浓度来看,奶水河的污染程度比较低,对水库污染的贡献比较小。官厅水库中 HCHs 含量为 $3.93\sim 38.94\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,HCHs 4 个异构体均有不同程度的检出,其中 β -HCH 在 9 个采样点中均得到检出。水库水体中 DDTs 含量为 $3.71\sim 16.03\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,在官厅水库各采样点中,p,p'-DDE 的检出率比较高,而 p,p'-DDD 只有一个点位检出,检出率仅为 11%。

表 1 官厅水库水体中有机氯农药的浓度($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 1 Concentrations of organochlorinated pesticides in Guanting Reservoir($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α -HCH	1.62	1.03	1.17	0.83	7.39	12.80	1.32	ND	2.16
β -HCH	1.73	8.27	11.60	9.45	9.14	8.31	1.06	2.28	3.58
γ -HCH	ND	1.06	0.84	1.47	6.97	16.50	ND	0.24	ND
δ -HCH	1.34	0.92	ND	0.43	ND	1.33	2.13	1.41	0.70
o,p'-DDT	2.39	10.60	8.20	4.62	1.76	1.89	1.02	3.59	5.90
p,p'-DDT	1.32	4.70	ND	1.09	ND	3.30	2.81	ND	3.55
p,p'-DDE	ND	0.73	1.37	1.96	3.67	9.04	ND	ND	5.14
p,p'-DDD	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.80	ND
七氯	2.42	1.63	ND	ND	1.89	2.63	ND	0.41	ND
艾氏剂	3.28	ND	3.13	2.69	3.76	2.34	0.37	ND	3.35
七氯环氧	ND	2.32	ND	ND	0.11	0.37	ND	ND	ND
狄氏剂	0.85	ND	0.76	0.64	ND	0.08	ND	ND	ND
异狄氏剂	ND	ND	2.35	1.48	0.25	ND	ND	ND	0.91
硫丹 I	ND	0.40	ND	ND	2.16	ND	1.09	ND	0.66
硫丹 II	4.57	29.60	0.06	ND	1.37	28.70	2.41	1.33	ND
硫丹硫酸脂	ND	ND	ND	ND	0.75	0.08	ND	ND	ND
甲氧滴滴涕	0.17	ND	1.84	2.02	0.97	ND	11.30	ND	0.26
Σ OCPs	19.69	61.26	31.32	26.68	40.19	87.37	23.51	10.06	26.21

注:ND 表示低于检出限,未检出。

2.2 有机氯农药在沉积物中的含量及分布

官厅水库底泥样品中农药残留水平如表 2。所检测的 18 种 OCPs 除七氯、异狄氏剂醛、硫丹硫酸脂、异狄氏剂未检出以外,其余的农药均得到不同程度的检出。在官厅水库底泥样品中有机氯农药的总含量范围为 $8.48\sim 24.40\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,底泥样品中 HCHs 和 DDTs 的残留量分别为 $1.11\sim 7.73\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.97\sim 10.52\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值分别为 $3.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $5.79\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。同 HCHs 含量相比,样品中 DDTs 的含量较高,这很有可能与 HCHs 的物理化学性质有关。与 DDTs 相比,HCHs 具有更好的水溶性和更高的蒸气压,从而导致 HCHs 更多地分散到大气和水体中,因此,沉积物中 HCHs 的

表 2 官厅水库沉积物中有机氯农药污染浓度($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)
Table 2 Concentrations of organochlorinated pesticides in
Guanting Reservoir($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)

采样点	1	2	3	4	6	7	平均值
α -HCH	0.17	0.11	ND	0.66	0.29	0.09	0.22
β -HCH	1.73	2.64	0.97	1.25	3.58	2.99	2.19
γ -HCH	0.09	ND	0.14	0.57	ND	0.11	0.15
δ -HCH	0.61	1.52	ND	1.95	3.86	0.35	1.79
o,p' -DDT	2.62	3.61	1.92	2.14	3.79	1.22	2.55
p,p' -DDT	ND	0.45	1.38	1.16	1.27	0.81	0.85
p,p' -DDE	2.16	3.86	1.73	ND	5.37	0.94	2.34
p,p' -DDD	0.05	0.12	ND	0.07	0.04	ND	0.05
艾氏剂	ND	ND	ND	1.30	0.99	ND	0.38
七氯环氧	0.02	0.18	ND	ND	0.24	ND	0.07
狄氏剂	2.34	ND	1.21	2.19	4.72	1.34	1.97
硫丹 I	ND	ND	0.04	ND	0.06	ND	0.02
硫丹 II	ND	0.05	0.25	0.18	ND	0.38	0.14
甲氧滴滴涕	0.10	ND	0.23	0.32	0.19	0.25	0.18
ΣOCPs	9.89	12.54	7.87	11.79	24.40	8.48	12.90

注:ND 表示低于检出限,未检出。

浓度偏低^[8]。沉积物中 HCHs 含量较高的 2 种异构体是 β -HCH 和 δ -HCH,而 DDTs 含量较高的化合物是 o,p' -DDT 和 p,p' -DDE,这和 DDT 的分解有关。

2.3 有机氯农药来源特征分析

由表 1 可知,官厅水库库区从上游至下游,水体中 α -HCH 浓度逐渐降低,大多数采样点最高浓度不是 α -HCH,而是 β -HCH,这显示了 β -HCH 作为最稳定的和最难为微生物降解的异构体而残留,其他异构体在环境中也会逐渐转化为 β -HCH 达到最稳定状态。在官厅水库各采样点水样中,DDTs 的异构体(o,p' -DDT 和 p,p' -DDT)及类似物(p,p' -DDE 和 p,p' -DDD) 的浓度大小分别为 o,p' -DDT> p,p' -DDE> p,p' -DDT> p,p' -DDD。且 $(\text{DDE}+\text{DDD})/\text{DDT}$ 的比值在 0.05~2.09 之间,均值之比为 0.57,这说明了 DDT 的大范围污染是过去形成的,因此 DDE 的含量较高。在大部分样品中检测到了 p,p' -DDT,这可能是由于除了原来土壤中残留的农药外,近期仍有新的污染源造成进一步的污染。笔者分析可能是位于水库上游的农药厂生产的 DDT 替代品——三氯杀螨醇的使用所致^[9],三氯杀螨醇的化学结构与 DDT 类似,而且商品三氯杀螨醇中还含有一定数量的 p,p' -DDT、 o,p' -DDT 以及 DDD 等。

在沉积物中 HCHs 也是主要以 β -HCH 为主,这是因为 β -HCH 在环境介质中的稳定性高,水溶性和

挥发性较低,不易被生物降解。随着工业 HCHs 禁用时间的延长, β -HCH 在环境中相对含量逐渐增高。一般认为若 HCH 的 α/γ 值在 4~7 之间,是源于工业品;若比值接近于 1,则说明环境中存在林丹(γ -HCH)的使用。由图 2 可知,在所有采样点中, β -HCH 均被检出,其含量范围为 $0.97\sim3.58\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,并且 β -HCH 占 HCHs 总量的 28%~87%,在所有采样点中, α/γ 值在 0~1.89 之间,这很可能是由于附近农田 HCHs 类农药蓄积残留,也可能存在新的林丹工业品的输入。现存的 DDTs 主要为环境中的残留^[9],同时官厅水库周边有广阔的农田,农药的大量使用仍然导致 HCHs 和 DDTs 的输入。

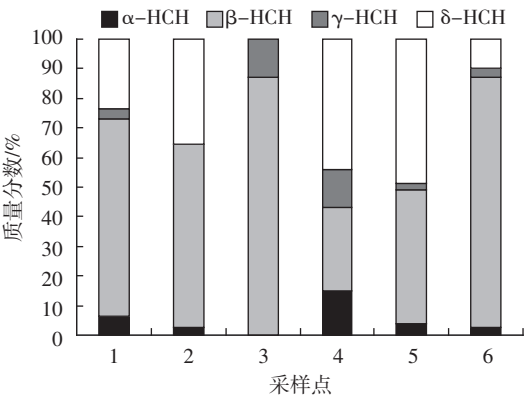


图 2 官厅水库表层沉积物中 HCHs 的组成

Figure 2 Composition of the HCHs in the surface sediments of Guanting Reservoir

2.4 健康风险评价

水环境健康风险评价主要是针对水环境中对人体有害的物质,这些物质可分为 2 类:基因毒物质和躯体毒物质。前者包括放射性污染物和化学致癌物;后者则指化学非致癌物。在一般水体中放射性污染物污染程度很轻,因此基因毒物质仅考虑化学致癌物。由于目前尚缺乏致癌斜率因子,因此本文选取化学非致癌物质对人体健康危害风险度计算模型^[10]:

$$R^n=\sum_{i=1}^nR_{ig}^n \tag{1}$$

$$R_{ig}^n=(D_{ig}\times10^{-6}/RfD_{ig})/70 \tag{2}$$

$$D_{ig}=2.2C_i/70 \tag{3}$$

式中: R_{ig}^n 为化学非致癌物 i 经饮水途径所致个人健康年风险, a^{-1} ; R^n 为总的风险, a^{-1} ; D_{ig} 为化学非致癌物 i 经饮水途径的单位体重暴露剂量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; RfD_{ig} 为非致癌物 i 通过食入途径的参考剂量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$;式(2)中的 70 为人平均寿命,a;式(3)中的 2.2 为成人每

表 3 有机氯农药的参考剂量及非致癌风险评价
Table 3 Non-carcinogenic risk of organochlorinated pesticides

化学物质	γ -HCH	DDT	七氯	艾氏剂	狄氏剂	异狄氏剂	硫丹
$Rf/D_{ig}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	3.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	3.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	3.0×10^{-4}	6.0×10^{-3}
平均浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	1.76	6.40	0.66	1.66	0.23	0.68	6.40
健康风险值/ a^{-1}	2.63×10^{-12}	5.75×10^{-12}	5.93×10^{-13}	2.48×10^{-11}	2.07×10^{-12}	1.02×10^{-12}	4.79×10^{-13}

注:DDT 的平均浓度仅指 o,p'-DDT 和 p,p'-DDT 的平均浓度之和;硫丹的平均浓度则是指硫丹 I 和硫丹 II 的平均浓度之和。

日平均饮水量, L ; C_i 为化学非致癌物 i 的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 式 (3) 中的 70 为成人平均体重, kg 。本文评价过程中所用的参考剂量 Rf/D_{ig} 值由美国环保局网站查得^[11], 见表 3。根据健康风险评价模型和评价参数, 化学非致癌物浓度 C_i 取从位于官厅水库库区的 6 个采样点采集的水样中有机氯农药浓度的平均值, 计算所得健康风险值见表 3。表 3 中 7 种有机氯农药对人体的非致癌风险值范围为 $4.79\times 10^{-13}\sim 2.48\times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, 按健康风险值大小排列为艾氏剂>DDT> γ -HCH>狄氏剂>异狄氏剂>七氯>硫丹。水中 OCPs 污染物对人体健康危害的年总风险仅为 $3.73\times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, 远低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受值^[12] $5.0\times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$, 由此可知, 官厅水库饮用水源地中有机氯农药所致人体健康风险仍较低。

3 结论

(1) 官厅水库的水样中, 17 种有机氯农药的浓度为 $10.06\sim 87.37 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中 HCH 和 DDT 的含量分别为 $3.93\sim 38.94 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.71\sim 16.03 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉积物中有机氯农药总含量范围为 $8.48\sim 24.40 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中 HCHs 和 DDTs 的含量较高, 分别为 $1.11\sim 7.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.97\sim 10.52 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

(2) HCHs 和 DDTs 为检出的主要 OCPs 污染物主要来自于早期的农药残留。其来源主要是由于历史上的农药残留和附近农田中农药的使用。其中官厅水库上游(桑干河、洋河)由于化工厂污染物的排放对官厅水库水质影响较大, 奶水河对官厅水库 OCPs 污染的贡献较少。

(3) 利用健康风险评价模型计算得出的结果表明, 官厅水库饮用水源地中 OCPs 对人体健康风险仍处较低水平。

参考文献:

[1] Patlak M. Estrogens may link pesticides, breast cancer[J]. *Environ Sci Technol*, 1996, 30(5):210A-211A.

[2] 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.

[3] Goedkoop W, Peterson M. The fate, distribution, and toxicity of lindane in tests with chironomus riparius; effects of bioturbation and sediment organic matter content[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2003, 22(1):67-76.

[4] 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):1031-1039.

[5] 康跃惠, 刘培斌, 王子健, 等. 北京官厅水库-永定河水系水体中持久性有机氯农药污染[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2):125-132.

KANG Yue-hui, LIU Pei-bin, WANG Zi-jian, et al. Persistent organochlorinated pesticides in water from Guanting Reservoir and Yongdinghe River, Beijing[J]. *Journal of Lake Science*, 2003, 15(2):125-132.

[6] 张红, 王铁宇, 吕永龙, 等. 官厅水库周边土壤中有机氯农药残留的统计分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3):550-554.

ZHANG Hong, WANG Tie-yu, LV Yong-long, et al. Distribution of organochlorine pesticide in soils in Guanting Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3):550-554.

[7] Munn M D, Gruber S J. The relationship between land use and organochlorine compounds in streambed sediment and fish in the central Columbia Plateau, Washington and Idaho, USA[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1997, 16(9):1877-1887.

[8] 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.

[9] Zhang G, Parker A, House A, et al. Sedimentary records of DDT and HCH in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36(17):3671-3677.

[10] 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.

HU Er-bang, Practical technology and measure of environmental risk assessment[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2000:467-482.

[11] U. S. EPA. Risk-Based concentration table[R]. U. S. EPA Region III, Philadelphia, Pennsylvania, 2004.

[12] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: human health evaluation manual, EPA/540/R92/003[R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, USEPA, 1991.