

柳江水体重金属污染健康风险评估

周玉春, 支崇远*, 王路, 油秋萍 (贵州师范大学, 贵州贵阳 550001)

摘要 对柳江水环境重金属的浓度进行跟踪测定, 并应用美国环境保护署(US EPA)推荐的健康风险评估模型进行了初步评价。结果表明, 柳江重金属平均浓度为 Cd 0.100 0~2.400 0 $\mu\text{g/L}$ 、As 0~0.004 0 $\mu\text{g/L}$ 、Cr 0.208 0~1.703 0 $\mu\text{g/L}$ 、Cu 0.882 0~10.702 0 $\mu\text{g/L}$ 、Hg 0~0.001 4 $\mu\text{g/L}$ 、Pb 0.035 0~20.609 0 $\mu\text{g/L}$ 。柳江水体中引起致癌风险最大的重金属为 Cd, 致癌风险值最高在柳州市段, 达 $110.16 \times 10^{-6}/\text{a}$, 超出了国际辐射防护委员会(ICRP)和 US EPA 的推荐值(5×10^{-5} 和 $1 \times 10^{-6}/\text{a}$)。重金属 Hg、Pb、Cu 的健康风险平均值集中在 $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10}/\text{a}$, 达到 US EPA 可接受的风险水平($1 \times 10^{-6}/\text{a}$)。

关键词 重金属; 健康风险评估; 柳江

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)10-04370-03

Health Risk Assessment of Heavy Metals Pollution in Liujiang River

ZHOU Yu-chun et al (Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001)

Abstract The heavy metal concentration in Liujiang River was detected. The health risk assessment model recommended by US EPA was adopted to evaluate. The results showed that, the average concentration of heavy metals in Liujiang is: Cd 0.100 0-2.400 0 $\mu\text{g/L}$, As 0-0.004 0 $\mu\text{g/L}$, Cr 0.208 0-1.703 0 $\mu\text{g/L}$, Cu 0.882 0-10.702 0 $\mu\text{g/L}$, Hg 0-0.001 4 $\mu\text{g/L}$, Pb 0.035 0-20.609 0 $\mu\text{g/L}$. The most dangerous heavy metal to cause cancer in Liujiang River is Cd, the highest cancer-causing value is in Liuzhou section, up to $110.16 \times 10^{-6}/\text{a}$, beyond the member of the International Radiation Protection (ICRP) and the American Environmental Protection (US EPA) recommended value (5×10^{-5} and $1 \times 10^{-6}/\text{a}$). Heavy metal Pb, Cu, Hg health risk average concentration are in $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10}/\text{a}$, reached the US EPA acceptable risk level ($1 \times 10^{-6}/\text{a}$).

Key words Heavy metal; Health risk assessment; Liujiang River

水环境污染问题日益严重, 尤其是饮用水安全受到严重威胁。我国首个“十二五”规划中就提出水体重金属污染防治的问题^[1], 表明我国水体重金属污染问题的严重性和水体重金属污染治理的紧迫性。日常生活中重金属污染物通过工农业及生活废水的排放、降水径流、受污染底泥的释放及大气沉降等途径进入水体, 且具有持久性、不被微生物降解的特征。重金属污染物在水体中累积到一定程度会对水生植物-水生动物系统产生严重危害, 通过食物链等途径直接和间接地影响到人类健康^[2]。近年来, 水体重金属污染问题更加严重。据统计, 恶性肿瘤、脑血管病和心脏病成为城市居民前3位的死因, 其中90%的癌症是由化学致癌物引起, 而饮水是重要途径之一^[3]。

水环境污染健康风险评估是20世纪80年代以后在我国发展起来的一项新型研究领域, 主要特点是把污染物与人体健康联系起来, 定量描述污染物对人体健康危害的程度。目前, 国内学者采用健康风险评估模型对区域水环境进行健康风险评估进行了大量研究^[4-6]。水体健康风险评估主要是针对水环境中对人体有害的物质, 该种物质一般分为基因毒物质和躯体毒物质2类, 前者包括放射性污染物和化学致癌物, 后者则指非致癌物。因此, 对水源地水中重金属污染状况及潜在健康风险进行评价具有重要意义。为此, 笔者对主要饮用水源地柳江的 Hg、Cd、Pb、As、Cu、Cr 6种重金属的

分布进行了研究, 并采用 US EPA 推荐的健康风险评估模型对水中的重金属进行了健康风险评估, 以期对环境风险管理提供理论依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况 柳江是珠江流域西江水系第二大支流, 西江的一级支流, 发源于贵州独山县南部, 东流入广西统称融江, 南流到柳城改称柳江。其较大支流有古宜河(寻江)、龙江、洛清江等。该江流域面积 5.717 3 万 km^2 , 干流全长 773.3 km, 属雨源型河流, 流域年均温达 $18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 水量丰富, 年降水量 1 400~1 800 mm, 4~8 月为雨季, 占全年的 72%。同时柳江围绕着西江经济带龙头城市、西江经济带最大的工业流通城市——柳州, 柳州市是广西最大的工业城市, 是广西工业重镇, 也是广西“三废”排放的重点城市。柳江直接流经的 9 县(市)生产、生活用水的 92% 取自于柳江, 而生产、生活用水形成的废水又大多数直接或间接地排入柳江^[7]。每年通过排污口流入柳江的废水量多达 3.5 亿 t 以上, 工业废水量占 83%, 直接威胁着柳江水环境^[8]。

1.2 方法

1.2.1 样品采集。对主要饮用水源地柳江水体进行采样, 按照《生活饮用水标准检验方法》采样原则采样, 共布设 34 个采样点(图 1), 在实验室根据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2006)^[1]进行检测, 进行柳江重金属污染情况的调查。其中龙江设置 9 个位样点(编号 1~9), 融江设置 7 个样点(编号 10~16), 柳江设置 8 个样点(编号 17~24), 洛清江设置 4 个样点(编号 25~28), 寻江设置 3 个样点(编号 29~31), 都柳江设置 3 个样点(编号 32~34)现场测定水温、pH、电导率及溶解氧等数据后, 使用聚乙烯采水器采集水样, 密封, 放于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存。

基金项目 国家自然科学基金项目(41062005, 30560011); 贵州省科技基金项目[黔科合外 G 字(2012)800107]; 贵州省科技厅科技支撑计划项目[黔科合 SY 字(2012)3178]; 贵州师范大学研究生专项创新基金项目[研(2012)15]。

作者简介 周玉春(1985-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向: 植物生理生态, E-mail: bai.meng.zhu@163.com。* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事硅藻及重金属的关系研究, E-mail: zhiyey@126.com。

收稿日期 2013-03-07

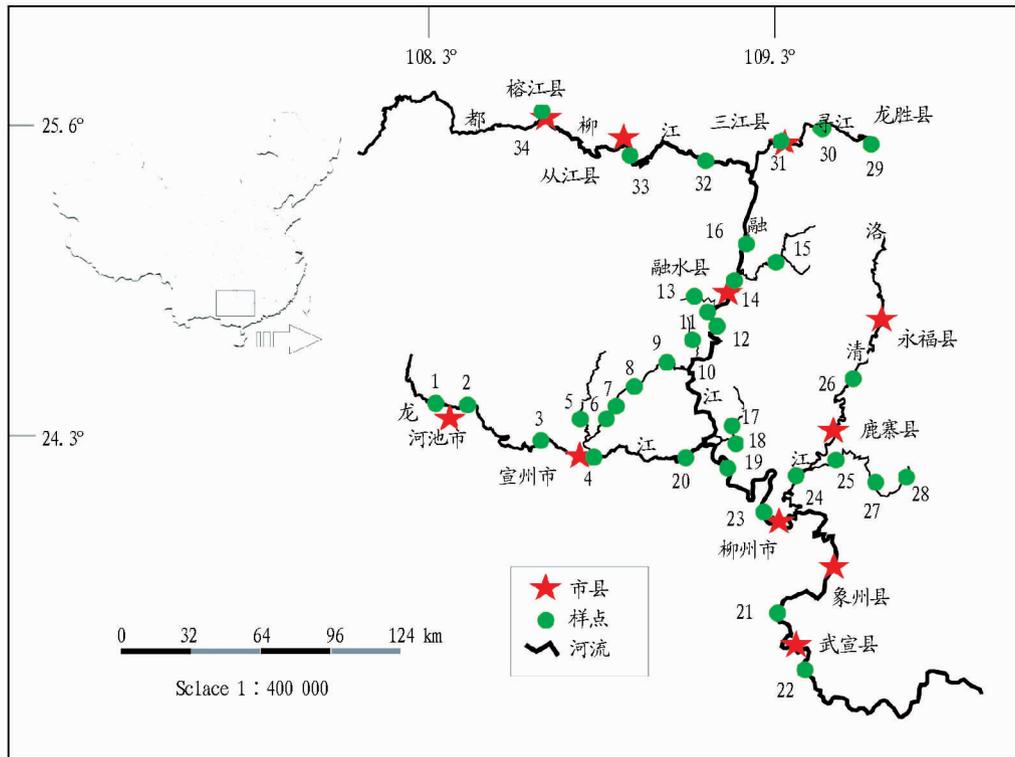


图1 取样点

1.2.2 样品测定。利用磺化棉富集痕量 Cd、Pb、Cu、Cr、As 和 Hg,其中 Cd、Pb、Cu、Cr 采用 WFX-210 原子吸收分光光度计进行测定;样品加入 H_2SO_4 - $KBrO_3$ - KBr 消解后测定 Hg 的浓度,加入抗坏血酸、硫脲后测定 As 的浓度,两者均采用北京普析 AF-640 型原子荧光分光光度计测定;所有器皿均用硝酸-盐酸=(3:1, V/V) 浸泡过夜,用超纯水冲洗 3~5 次,晾干备用。

1.2.3 评价模型。重金属通过饮用途径进入人体主要会引起基因毒性物质和躯体毒性物质,前者包括放射性污染物和化学致癌物,后者则指非致癌物。

1.2.3.1 健康风险评价模型。根据污染物对人体产生的危害效应不同,建立不同类型污染物对人体健康危害影响的风险评价模型。计算公式如下^[1]:

$$Rc = \sum Rci = \sum [1 - \exp(-Di \cdot qi)] / 70 \quad (1)$$

$$Rn = \sum Rni = \sum (Di/RfDi) \times 10^{-6} / 70 \quad (2)$$

式中, Rci 为致癌物质 i 通过食入途径产生的年平均致癌风险(a^{-1}); Rni 为躯干毒性物质 i 经食入途径产生的年平均健康风险(a^{-1}); Di 为致癌物质(躯干毒性物质) i 的单位体重日均暴露剂量 [$mg/(kg \cdot d)$]; qi 为致癌物质 i 通过食入途径产生的致癌强度系数 [$mg/(kg \cdot d)$]; $RfDi$ 为躯干毒性物质 i 通过食入途径摄入的参考剂量 [$mg/(kg \cdot d)$];70 为人类平均寿命(a)^[1]。

重金属通过饮用水途径对人体的日均暴露剂量(Di)按下式计算^[1]:

$$Di = 2.2 \times Ci / 70 \quad (3)$$

式中,2.2 为成人每日平均饮水量(L); Ci 为饮用水体中各金属的实测浓度(mg/L)^[1]。

假设各有毒物质对人体健康危害的毒性作用呈相加关系,而不是协同或拮抗关系,则水环境总的健康危害的风险 $R_{总}$ 为^[1]:

$$R_{总} = Rc + Rn$$

1.2.3.2 评价污染因子和参数的确定。根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)通过全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统,Cd、As 和 Cr 属于 1 组和 2A 组化学物质,归纳为化学致癌物,其致癌强度系数(饮水途径)分别为 6.1、15.0、41.0 $mg/(kg \cdot d)$;Hg、Pb、Cu 为非致癌物质,其参考剂量(饮水途径)分别为 3.0×10^{-4} 、 1.4×10^{-3} 、 5.0×10^{-3} $mg/(kg \cdot d)$ ^[1]。

2 结果与分析

2.1 柳江重金属含量分布特征 由表 1 可知,上游都柳江水体中,Cd、As、Cr、Cu、Hg、Pb 的平均浓度均达到 I 类水标准(GB3838-2002),各重金属含量高低依次为 Cu、Pb、Cr、Cd、Hg 和 As。龙江水体中,As、Cr、Cu、Hg、Pb 的平均浓度均达到 I 类水标准,Cd 的平均值可达到 II 类水标准;个别河段 Cu 的监测值超过 I 类水标准,达到 II 类水标准,Pb 的监测值超过 II 类水标准,达到 III 类水标准。寻江水体中,As、Hg、Cr、Cu、Pb、Cd 的平均浓度均达 I 类水标准,个别时段监测值超过 II 类水标准。洛清江水体中,As、Hg 的平均浓度均达 I 类水标准;Cr 的平均浓度均达 I 类水标准,与其他河段相比偏高;Cu、Cd 平均浓度均达 I 类水标准,个别时段监测值超过 I 类水标准;Pb 平均浓度超过 II 类水标准,个别时段监测值达 III 类水标准,与其他河段相比其相对浓度较高。融江水体中,As、Hg、Cu、Cr 的平均浓度均达 I 类水标准,与其他河段相比 As、Hg 浓度都偏高;Cd、Pb 平均浓度均达 I

类水标准,其中 10#、15#监测点所得值超过 I 类水标准。柳江水体中,As、Hg、Cu、Cr 的平均浓度达 I 类水标准;Cd 的平均浓度均超过 I 类水标准,个别河段监测值达到 II 类水标准;Pb 的平均浓度超过 I 类水标准,个别河段监测值超过 II 类水标准。柳州(广州主要饮用水源地)水体中,Pb、Cu、Cd 浓度相对较高;柳州市区柳江上下游段总 Cr、总 Pb 等指标超标较严重,其原因可能是柳江上游是柳州地区、河池地区重要的有色金属矿区,同时矿业开采和有色冶炼的兴起加重了水土流失,直接威胁着柳江水环境^[8]。

表 1 饮用水源柳江水体中重金属浓度 $\mu\text{g/L}$

采样点	数据 类型	重金属					
		Cd	As	Cr	Hg	Pb	Cu
上游都柳江	最大值	0.204	0	0.406	0	4.007	5.087
	最小值	0.100	0	0.208	0	3.068	4.028
	平均值	0.135	0	0.314	0	3.554	4.628
龙江	最大值	1.544	0.002	0.734	0	18.565	14.209
	最小值	0	0	0.392	0	3.51E-02	0.889
	平均值	1.170	2.22E-04	0.546	0	9.755	6.213
寻江	最大值	0.475	0	0.427	0	10.258	5.678
	最小值	0.100	0	0.406	0	4.143	2.214
	平均值	0.226	0	0.414	0	6.328	4.416
洛清江	最大值	0.979	0.001	1.060	0	20.054	9.729
	最小值	0.466	0	0.888	0	11.503	0.853
	平均值	0.719	2.50E-04	0.971	0	14.190	5.013
融江	最大值	1.967	0.004	1.703	0.001	17.965	9.328
	最小值	0.492	0	0.382	0	3.955	1.108
	平均值	0.939	0.001	0.885	1.43E-04	9.411	4.924
柳江	最大值	2.400	0.001	1.136	0	20.609	10.702
	最小值	0.407	0	0.293	0	7.7871	0.882
	平均值	1.269	1.25E-04	0.672	0	14.167	3.969
地表水环境 质量标准	I类	1.000	50.000	10.000	0.050	10.000	10.000
	II类	5.000	50.000	50.000	0.050	10.000	1 000.000
GB3838-2002	III类	5.000	50.000	50.000	0.100	50.000	1 000.000
	IV类	5.000	100.000	50.000	1.000	50.000	1 000.000
	V类	10.000	100.000	100.000	1.000	100.000	1 000.000

2.2 致癌物质风险评价结果 由表 2 可知,都柳江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 11.76×10^{-6} 、 $0.578 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级从高到低依次为 Cd、Cr、As;龙江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 101.59×10^{-6} 、 0.15×10^{-8} 、 $10.00 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级从高到低依次为 Cd、Cr、As;寻江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 19.68×10^{-6} 、 0 、 $7.62 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级顺序与都柳江、龙江类似;洛清江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 62.52×10^{-6} 、 1.68×10^{-9} 、 $17.86 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级从高到低依次为 Cd、Cr、As;融江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 81.59×10^{-6} 、 6.73×10^{-8} 、 $16.28 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级从高到低依次为 Cd、Cr、As;柳江水中 Cd、As、Cr 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 110.16×10^{-6} 、 0.84×10^{-9} 、 $12.36 \times 10^{-6}/\text{a}$,风险等级从高到低顺序与融江类似。柳江水体中 Cd 的健康风险都达到 $1 \times 10^{-4}/\text{a}$,远远高于后两者的健康风险值,说明 Cd 已成为柳江水体的主要化学致癌因子。龙江和柳江致癌总风险值相近且偏高,洛清江和融江次之,都柳江和寻江最低。

表 2 致癌物质通过饮用水途径产生的致癌风险

采样点	数据 类型	致癌总风险// $10^{-6}/\text{a}$			致癌总风险 $10^{-6}/\text{a}$
		Cd	As	Cr	
上游都柳江	最大值	17.78	0	7.47	25.25
	最小值	8.71	0	3.83	12.54
	平均值	11.76	0	5.78	17.54
龙江	最大值	133.91	1.35E-02	13.51	147.43
	最小值	0	0	7.21	7.21
	平均值	101.59	0.15E-02	10.00	111.59
寻江	最大值	41.33	0	7.86	49.19
	最小值	8.71	0	7.47	16.18
	平均值	19.68	0	7.62	27.30
洛清江	最大值	85.06	6.73E-03	19.50	104.57
	最小值	40.55	0	16.34	56.89
	平均值	62.52	1.68E-03	17.86	80.38
融江	最大值	170.39	2.69E-02	31.31	201.73
	最小值	42.81	0	7.03	49.84
	平均值	81.59	6.73E-03	16.28	97.88
柳江	最大值	207.61	6.73E-03	20.90	228.52
	最小值	35.42	0	5.39	40.81
	平均值	110.16	8.42E-04	12.36	122.52

表 3 非致癌物质通过饮用水途径产生的致癌风险

采样点	数据 类型	致癌总风险// $10^{-10}/\text{a}$			致癌总风险 $10^{-10}/\text{a}$
		Hg	Pb	Cu	
上游都柳江	最大值	0	12.85	4.57	17.42
	最小值	0	9.84	3.62	13.46
	平均值	0	11.40	4.16	15.56
龙江	最大值	0	59.54	12.76	72.30
	最小值	0	0.11	0.80	0.91
	平均值	0	31.28	5.58	36.86
寻江	最大值	0	32.90	5.10	38.00
	最小值	0	13.29	1.99	15.28
	平均值	0	20.29	3.97	24.26
洛清江	最大值	0	64.31	8.74	73.05
	最小值	0	36.89	0.77	37.66
	平均值	0	45.51	4.50	50.01
融江	最大值	1.49E-02	57.61	8.38	66.00
	最小值	0	12.68	1.00	13.68
	平均值	0.21E-02	30.18	4.42	34.60
柳江	最大值	0	66.09	9.61	75.70
	最小值	0	24.97	0.79	25.76
	平均值	0	45.43	3.56	48.99

2.3 非致癌物质的评价结果 从表 3 可知,非致癌有毒化学物质(Hg、Pb、Cu)引起的个人健康风险以 Pb 最大,Cu 次之,Hg 最低。其中,柳江、洛清江水体各重金属对人体健康产生的风险平均值接近且最高,龙江、融江次之,寻江较低,上游都柳江最低。柳江水系(都柳江、龙江、融江、寻江、柳江)水体中非致癌有毒化学物质通过饮用水途径产生的健康风险大小顺序为 Pb、Cu、Hg,Pb、Cu 重金属的健康风险平均值集中在 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-10}/\text{a}$,达到可接受的风险水平,对人身危害甚微;Hg 重金属的健康风险平均值集中在 $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-13}/\text{a}$,即 1 千万人口中通过饮用水途径摄入非

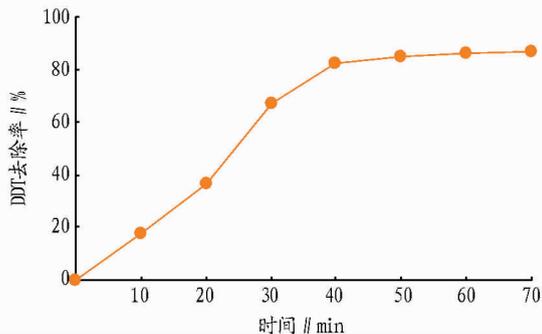


图5 超声/紫外与 O₃/H₂O₂ 联合处理去除北江水样中 DDT 的效果

32%; 超声/紫外/O₃/H₂O₂ 处理水中 DDT 去除率达到 91%。可见, 超声/紫外/O₃/H₂O₂ 联合处理具有产生协同提高 DDT 去除率的效果, 可有效去除水中 DDT。超声/紫外/O₃/H₂O₂ 联合处理北江水样可有效去除其中 DDT, 去除率达到 85%。

参考文献

[1] WANIA F, MACKAY D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, 30(9): 390-396.

[2] 安大成, 陈嘉鑫, 傅家谟, 等. 珠三角地区 POPs 农药的污染现状及控制对策[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 981-986.

[3] 乔梦, 安大成, 曾祥英, 等. 广东西江流域饮用水源中典型持久性有机污染物的含量与来源[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 556-561.

[4] YU M, LUO X J, CHEN S J, et al. Organochlorine pesticides in the surface water and sediments of the Pearl River Estuary, South China[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, 27(1): 10-17.

[5] 岳强, 管玉峰, 涂秀云, 等. 广东北江上游流域农田土壤有机氯农药残留及其分布特征[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(2): 321-326.

[6] KELLY B C, IKONOMOU M G, BLAIR J D, et al. Food web-specific bio-magnification of persistent organic pollutants[J]. *Science*, 2007, 317: 236-239.

[7] TUSSCHER G W, KOPPE J G. Perinatal dioxin exposure and later effects—a review[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(9): 1329-1336.

[8] 张金良, 王舜钦. 中国 DDT 污染及对人群健康影响的研究现状[J]. *预防医学情报杂志*, 2004, 22(4): 416-421.

[9] ROCHE P, PRADOS M. Removal of pesticides by use of ozone or hydrogen peroxide ozone[J]. *Ozone Sci Eng*, 1995, 17(6): 657-672.

[10] ORMAD M P, MIGUEL N, CLAVER A, et al. Pesticides removal in the process of drinking water production[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(1): 97-106.

[11] 刘超, 强志民, 田芳, 等. 多类农药与紫外光、臭氧和高锰酸钾的反应活性研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 127-133.

[12] REYNOLDS G, GRAHAM N, PERRY R, et al. Aqueous ozonation of pesticides—a review[J]. *Ozone Sci Eng*, 1989, 11(4): 339-382.

[13] ORMAD P, PUIG A, SARASA J, et al. Ozonation of waste-water resulting from the production of organochlorine plaguicides derived from DDT and trichlorobenzene[J]. *Ozone Sci Eng*, 1994, 16(6): 487-503.

[14] KRUIUS P, BURK R C, ENTEZARI M H, et al. Sonication of aqueous solutions of chlorobenzene[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1997, 4: 229-233.

[15] MURUGANANDHAM M, SWAMINATHAN M. Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H₂O₂ oxidation[J]. *Dyes Pigments*, 2004, 62: 269-277.

[16] 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): 11-15.

[17] JIANG Y. Kinetics and mechanisms of ultrasonic degradation of volatile chlorinated aromatics in aqueous solution[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2002, 9: 313-323.

[18] BURROWS H D, CANLE L M, SANTABALLA J A, et al. Reaction pathways and mechanisms of photodegradation of pesticides[J]. *J Photoch Photobio B*, 2002, 67: 71-108.

[19] 李永峰. 超声波降解废水中氯苯的研究[D]. 郑州: 郑州工业大学化工学院, 2000: 12-14.

[20] 任国宾, 陈宜良, 李永峰. 超声波及其联用技术降解废水中的氯苯[J]. *环境污染与防治*, 2003, 25(3): 167-169.

(上接第 4372 页)

致癌污染物而受到健康危害(死亡)的人数不到 1 人。这表明非致癌化学物质(Hg、Pb、Cu)所引起的健康风险可接受, 柳江中 Hg、Pb、Cu 重金属暴露对人群构成的危害可以忽略。

3 结论与讨论

该研究表明, 柳江重金属平均浓度为 Cd 0.100 0 ~ 2.400 0 μg/L, As 0 ~ 0.004 0 μg/L, Cr 0.208 0 ~ 1.703 0 μg/L, Cu 0.882 0 ~ 10.702 0 μg/L, Hg 0 ~ 0.001 4 μg/L, Pb 0.035 0 ~ 20.609 0 μg/L。都柳江、龙江、寻江、洛清江、融江和柳江的重金属浓度平均值均能达到地表水环境质量标准(GB3838-2002)Ⅰ类或Ⅱ类标准, 但龙江和柳江个别河段 Cd 超出Ⅱ类标准, 对人群健康产生的危害不容忽视。经健康风险评价, 柳江水体中引起致癌风险最大的为 Cd, 致癌风险值最高在柳州市段, 达 $110.16 \times 10^{-6}/a$, 超出 ICRP 和 US EPA 的推荐值(5×10^{-5} 和 $1 \times 10^{-6}/a$)。重金属 Pb、Cu、Hg 的健康风险平均值集中在 $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10}/a$, 达到 US EPA 可接受的风险水平($1 \times 10^{-6}/a$)。总体上柳江 Cd 污染较严重, 需要加强对水源地保护区及水源地上游区域集水地区污染企业的管理。

该研究仅计算了重金属通过饮用暴露途径对人体健康的风险, 未把持久性有机物、放射性污染物等有害污染物的健康风险计算在内, 低估了水体对人群的健康风险; 而且只

研究了通过水体的健康风险, 未把大气污染经口摄入、水体污染皮肤接触等途径计算在内, 明显低估了重金属的暴露风险。另外, 实际风险人群接触污染物的平均暴露剂量与人的工作、生活习惯有关, 而且健康风险对于不同的人可能风险值是不同的, 目前数据多为动物试验数据, 差异性还有待进一步验证。因此, 水体环境暴露风险对人群健康受损的研究仍需进一步研究和探索。

参考文献

[1] 周晓蔚. 河口生态系统健康与水环境风险评价理论方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008: 85.

[2] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 60-65.

[3] 倪彬, 王洪波, 李旭东. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(1): 74-79.

[4] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水源地水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 47-50.

[5] 黄奕龙, 王仰麟, 谭启宇, 等. 城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理[J]. *地学前缘*, 2006, 13(3): 162-167.

[6] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源地中重金属健康风险的初步评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 547-553.

[7] 周明耀. 柳江走廊开发初探[J]. *改革与战略*, 1992, 63(4): 17-20.

[8] 曾光明, 卓利, 钟政林. 水环境健康风险评价模型[J]. *水科学进展*, 1998, 9(3): 212-212.

[9] 邱小香, 朱海燕. 水体重金属的污染及其处理方法[J]. *湖南农业科学*, 2011(14): 34-35.

[10] 刘静, 刘强. 重金属污染对生态环境的影响及防治对策[J]. *农业灾害研究*, 2012, 2(1): 65-67.