DOI:10.16016/j.1000-5404.201912256

某市主城自来水中多环芳烃和邻苯二甲酸酯的健康风险评价

曾 惠[1],罗教华[1],张卫东[2],罗财红[3],舒为群[1],邱志群[1] 400038 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)军事预防医学系军队环境卫生学教研室[1];400020 重庆,重庆市环境科学研究院[2];400020 重庆,重庆市生态环境监测中心[3]

[摘要] **目的** 评估某市主城自来水厂出厂水中持久性有机污染物的人群健康风险。**方法** 采集以嘉陵江水、两江汇合前和两江汇合后长江水为水源的3家自来水厂出厂水300 L,浓缩后检测16种优控多环芳烃和17种邻苯二甲酸酯含量,并根据国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection,ICRP)推荐的水环境健康风险评价模型计算致癌风险和非致癌风险。**结果** 共检出7种多环芳烃(总量0.605~0.947 μg/L)和9种邻苯二甲酸酯类物质,其中苯并(a)芘(BaP)为0.011~0.014 μg/L,邻苯二甲酸二乙基己基酯(DEHP)为3.047~3.608 μg/L。总的健康风险男性介于1.82×10^{-5}~$2.13\times10^{-5}a^{-1}$,女性介于2.42×10^{-5}~$2.83\times10^{-5}a^{-1}$。**结论** 3家水厂的出厂水都有持久性有机污染物检出,多环芳烃总量符合国家城市供水水质标准(CJ/T206-2005),BaP含量比国家生活饮用水卫生标准0.01 μg/L(GB5749-2006)略高;DEHP符合国家生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)。人群总健康风险(包括致癌和非致癌健康风险)均低于ICRP可接受水平$5.0\times10^{-5}a^{-1}$。

[关键词] 出厂水;多环芳烃;邻苯二甲酸酯;健康风险评价

[中图法分类号] R123.1 [文献标志码] A

Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalates in finished water from waterworks in a metropolis

ZENG Hui[1], LUO Jiaohua[1], ZHANG Weidong[2], LUO Caihong[3], SHU Weiqun[1], QIU Zhiqun[1] [1]Department of Environmental Hygiene, Faculty of Military Preventive Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038; [2]Chongqing Institute of Ecological Environment Science, Chongqing, 400020; [3]Chongqing Ecological Environment Monitoring Center, Chongqing, 400020, China

[**Abstract**] **Objectives** To evaluate the potential hazards of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and phthalates (PAEs) in the finished water from waterworks in a big city. **Methods** A total of 300 L finished water were collected from 3 waterworks with water intakes at Jialing river and Yangtze river before and after the confluence of 2 rivers, respectively. After enrichment, 16 kinds of optimal control PAHs and 17 kinds of PAEs were detected. Carcinogenic risk and non-carcinogenic risk were calculated according to the test results by using the water environmental health risk assessment model recommended by International Commission on Radiological Protection (ICRP). **Results** There were 7 PAHs and 9 PAEs detected. The total amount of PAHs was 0.605~0.947 μg/L, and benzoa (a) pyrene (BaP) ranged from 0.011 to 0.014 μg/L, and diethylhexyl phthalate (DEHP) from 3.047 to 3.608 μg/L. The total health risk was 1.82×10^{-5}~2.13×10^{-5} a^{-1} for men and 2.42×10^{-5}~2.83×10^{-5} a^{-1} for women. **Conclusion** Persistent organic pollutants (POPs) are detected in the finished water of 3 water plants in the main urban area of a metropolis. The contents of PAHs are lower than the limiting levels of the Water Quality Standards for Urban Water Supply (CJ/T206-2005); but that of BaP is slightly larger than 0.01 μg/L, the limiting value of the Standards for Drinking Water

[基金项目] 重庆市自然科学基金(CSTC2012jjA20007);国家自然科学基金面上项目(81273029)

[通信作者] 邱志群,E-mail:qiuzhiqun@tmmu.edu.cn

Quality (GB5749-2006). The level of DEHP is lower than the limiting value of the above standard. The health risks caused by it are still under the acceptable level of ICRP (5.0×10^{-5} a^{-1}).

[**Key words**] finished water; polycyclic aromatic hydrocarbons; phthalates; health risk assessment

Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC2012jjA20007) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (81273029). Corresponding author: QIU Zhiqun, E-mail: qiuzhiqun@tmmu.edu.cn

持久性有毒化学污染物(persistent organic pollutants, POPs)是一类在环境中难以降解、可远距离迁移、并具有生物积蓄效应和内分泌干扰特性的痕量有毒污染物。在我国七大河中均检出多种 POPs,其中松花江、淮河、海河和珠江流域较为严重[1-4]。某市位于三峡库区的上游,人口密集,既往研究表明三峡库区在成库的不同阶段水源水和出厂水中 POPs 均有不同程度的检出[5-11]。蓄水前(2000-2001 年)该市主城区的嘉陵江水源水中非挥发性有机污染物主要包括:酯类、酮类、酚类、杂环和苯及其衍生物等,其中邻苯二甲酸酯类含量最大。蓄水中(2004-2006 年)该市水域有机污染物主要为烷烃类、醇类、酮类和酯类,但这些物质的浓度均小于国家环境相关标准限值。水体中检出频率最高的 6 种 POPs 由饮水途径所致个人健康年风险也介于 $4.44\times10^{-13}\sim2.79\times10^{-10}a^{-1}$ 之间,均在可接受水平内[12]。2008 年后三峡库区蓄水已达 175 m,库区生态环境等已发生变化。因此,本课题组于 2013 年采集某市主城区以长江及嘉陵江为水源水的 3 个水厂的出厂水,对前期研究显示的 POPs 类重点污染物多环芳烃、邻苯二甲酸酯类进行检测分析,并进行健康风险评价。

1 材料与方法

1.1 水样采集与预处理

2013 年 6 月采集了某市以嘉陵江水、长江水(两江汇合前)、长江水(两江汇合后)3 家水厂的出厂水。每个采样点采集量为 300 L,盛于预先洗干净的不锈钢桶,随后送往实验室,立即处理。水样 300 L,应用固相萃取技术富集水中有机物,萃取剂为 XAD-2 树脂(美国 Amberlite 公司),过柱流速为 3 倍柱体积/min;以二氯烷∶丙酮(1∶1,分析纯,成都市科隆化工试剂厂)为洗脱液,洗脱液经氮气(重庆朝阳气体公司)吹干。将残渣用二氯甲烷(分析纯,成都市科隆化工试剂厂)溶解至 0.3 mL,用于定量分析。

1.2 POPs 含量分析

分别采用 16 种美国环境保护署(US Environmental Protection Agency, EPA)优控多环芳烃混合标样(美国,Supelco 公司)、17 种邻苯二甲酸酯组分标准溶液(德国 Dr. Ehrenstorfer 公司)作为标准物质外标法对污染物进行定性定量分析。

所有样品都在 Quattro Micro 气相色谱-质谱联用仪(美国 Waters 公司)上分析。分离柱为 0.25 mm×30 m×0.25 μm DB-5ms 石英毛细管色谱柱(美国 Agilent 公司)。不分流进样。载气为 99.999%的氦气(重庆朝阳气体公司),恒定载气流速 1.0 mL/min;EI 源,进样口温度 250 ℃,接口温度 300 ℃,离子源温度 230 ℃。

1.2.1 多环芳烃的分析方法 初始温度 60 ℃,保持 1 min;以 10 ℃/min 的速度升至 160 ℃,以 8 ℃/min 的速度升至 260 ℃;再以 6 ℃/min 的速度升至 300 ℃,保持 10 min。

1.2.2 邻苯二甲酸酯的分析方法 初始温度 60 ℃,保持 1 min;以 10 ℃/min 的速度升至 180 ℃,以 5 ℃/min 的速度升至 250 ℃;再以 5 ℃/min 的速度升至 280 ℃,保持 6 min。

1.3 健康风险评价

化学物质的健康风险评价使用最普遍的是 1983 年美国科学院(US National Academyof Sciences, NAS)公布的四步法[13]:即危害鉴定、暴露评价、剂量-反应分析以及风险表征。目前,多环芳烃的健康风险评价模型主要有 4 种,即暴露模型、毒性模型、风险模型、无阈模型。其中暴露模型和毒性模型主要考虑人体吸入空气的影响,风险模型主要侧重于饮用水对健康的影响。因此,本研究采用国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)推荐的水环境健康风险评价模型,计算饮水途径 POPs 暴露的健康风险。由于化学物质的致癌性是健康风险评价的重要终点,国际癌症研究所(International Agency for Research on Cancer, IARC)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)通过全面评价化学有毒物质,将其分为致癌物质和非致癌物质,相应的健康风险评价也分为致癌风险评价和非致癌风险评价。

1.3.1 水中 POPs 的致癌风险 致癌风险通常表示某种致癌物暴露导致人一生中超过正常水平的癌症发生率,常用风险值(risk,R)表示。

化学致癌物通过饮水途径所致的平均个人健康风险计算模型为

$$R^e=\sum_{i=1}^{k}R_{ig}^c$$

$$R_{ig}^c=[1-\exp(-D_{ig}Q_{ig})]/70$$

$$D_{ig}=(W\cdot C_i)/A$$

其中 R_{ig}^c 为化学致癌物 i 经饮水途径的个人平均致癌年风险值(a^{-1});D_{ig} 为化学致癌物 i 经饮水途径的单位体质量日均暴露剂量[mg/(kg·d)],W 为日平均饮水量,C_i 为饮用水环境中化学致癌物 i 的浓度,A 为人均体质量;Q_{ig} 为化学致癌物 i 经饮水途径的致癌强度系数[mg/(kg·d)],70 为人均寿命(a)。R^e 是所有化学致癌物所致健康危害的年风险(a^{-1})。

1.3.2 水中 POPs 的非致癌风险 水中 POPs 饮水途径的非致癌风险。

$$R^n=\sum_{i=1}^{l}R_{ig}^n$$

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

其中 R_{ig}^n 为非致癌物 i 经饮水途径所致健康危害的个人平均年风险值(a^{-1});D_{ig} 为非致癌物 i 经饮水途径的单位体质量日均暴露剂量[mg/(kg·d)],RfD_{ig} 为该污染物 i 经饮水途径的参考剂量[mg/(kg·d)],70 为人均寿命(a)。R^n 是所有非致癌物所致健康危害的年风险(a^{-1})。

因为出厂水中各种有机污染物浓度极低,根据 EPA 在 1986 年发布化学混合物健康风险评价中提出的假设化学混合物的交互作用在低剂量水平不会发生或足够小,得出水中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,则饮用水总的健康危害风险(R)为:

$$R_{总}=R_{ig}^c+R_{ig}^n$$

1.3.3 参数选择 根据《中国人群暴露参数手册》成人卷,某市主城区成人男性饮水量取 1.50 L/d、女性饮水量取 1.71 L/d;成年男性体质量取 64.0 kg,成年女性体质量取 54.9 kg。

化学致癌物致癌强度系数(Q_{ig})、非化学致癌物致健康风险的参考剂量(RfD_{ig})均根据 USEPA 公布的多种有毒物质有关暴露途径参考剂量值确定[14-15]。见表 1。

表 1 非化学致癌物的参考剂量(食入途径)及化学致癌物致癌强度系数

有机污染物		CASRN	IARC 化学毒物致癌性分组	RfD_{ig}/mg·kg^{-1}·d^{-1}	Q_{ig}/mg·kg^{-1}·d^{-1}
多环芳烃类					
蒽	ANA	83-32-9	3[a]	6.0×10^{-2}	/
芴	FLU	86-73-7	3	4.0×10^{-2}	/
菲	PHE	85-01-8	3	/	/
荧蒽	FLT	206-44-0	3	4.0×10^{-2}	/
芘	PYR	129-00-0	3	3.0×10^{-2}	/
屈	CHR	218-01-9	2B[b]	/	/
苯并(a)芘	BaP	50-32-8	1[c]	3.0×10^{-4}	1.0
邻苯二甲酸酯类					
邻苯二甲酸二甲酯	DMP	131-11-3	/	/	/
邻苯二甲酸二乙酯	DEP	84-66-2	/	8.0×10^{-1}	/
邻苯二甲酸二异丁酯	DIBP	84-69-5	/	1.0×10^{-1}	/
邻苯二甲酸二丁基酯	DBP	84-74-2	/	1.0×10^{-1}	/
邻苯二甲酸二甲基乙二醇酯	DMEP	117-82-8	/	/	
邻苯二甲酸二-4-甲基-2-戊基酯	BMPP	146-50-9	/	/	/
邻苯二甲酸二己酯	DnHP	84-75-3	/	/	/
邻苯二甲酸二丁氧基乙基酯	DNBEP	4130-42-1	/	/	/
邻苯二甲酸二乙基己基酯	DEHP	117-81-7	2B	2.0×10^{-2}	1.4×10^{-2}

a:该组化学品对人类可能没有致癌性;b:该组化学品可能对人体有致癌性,但动物证据充分而人体数据不充分;c:该组化学品对人体有致癌性;/:未查到相关研究资料

1.4 质量控制

水样采集、检测过程中避免使用任何可能含有多环芳烃和邻苯二甲酸酯的物品。实验用试剂均用分析纯。样品检测分析参照 USEPA 的 QA/QC 标准方法进行监控,设置空白样(现场空白、仪器空白、方法空白),控制其本底值;同时设置加标回收样,以保证分析的准确性。水样浓缩倍数为 10 000 倍,在此浓缩倍数情况下,未检出污染物即视为不存在;所有涉及实验玻璃器皿、样品盛装器皿等使用自来水洗涤,沥干再使用重铬酸钾溶液洗涤,然后使用自来水冲洗,重蒸馏水洗涤,在使用前再依次使用丙酮、正己烷和二氯甲烷淌洗。每个断面均带全程样品,使用超纯水作为空白,监测采样过程和运输过程污染情况。空白样品在最后检测结果中,检出相应值均未超过样品检出值的 10%。

1.5 统计学分析

采用 Excel 2016 进行数据整理。数据处理过程中,对于所有样品低于检出限的化合物,在评价致癌风险和非致癌风险时该化合物不纳入计算;对于部分样品低于检出限的化合物,在评价致癌风险和非致癌风险时,该化合物浓度按照 0 μg/L 进行计算;对于未查到斜率系数(slope factor, SF)与 RfD 的化合物,在评价致癌风险和非致癌风险时该化合物不纳入计算。

2 结果

2.1 水质监测结果

对 3 家水厂出厂水中常见的 16 种多环芳烃、17 种邻苯二甲酸酯类进行的检测结果显示,共检出 7 种多环芳烃、9 种邻苯二甲酸酯类物质。

多环芳烃的总浓度为 0.605~0.947 μg/L,平均值为 0.741 μg/L。致癌性多环芳烃主要是化学致癌物质苯并(a)芘(Benzo(a)pyrene,BaP)和对人可能致癌的物质屈。在出水中,致癌性多环芳烃总的含量为 0.011~0.031 μg/L,平均值为 0.019 μg/L,占多环芳烃总量比例的 1.4%~5.0%。其中,BaP 检出率为 100.0%,含量高达 0.011~0.014 μg/L。非致癌性多环芳烃中,菲、荧蒽、芘的检出率为 100%,含量较高,分别占总量的 34.8%、21.2%和 18.4%;蒀只在一个出厂水检出,但检出浓度高达 0.318 μg/L。从 16 种多环芳烃组成来看,主要以 3 环、4 环和 5 环芳烃为主,分别占总量的 57.9%、40.4%和 1.7%;二环和六环芳烃均未检出。

邻苯二甲酸酯的总浓度为 4.590~5.201 μg/L,平均值为 5.146 μg/L。致癌性邻苯二甲酸酯主要是指对人可能致癌的物质邻苯二甲酸二乙基己基酯,检出率为 100%,含量为 3.047~3.608 μg/L,平均值为 3.314 μg/L,占总量的 64.4%。非致癌性邻苯二甲酸酯中,邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二丁基酯、邻苯二甲酸乙二醇酯、邻苯二甲酸二-4-甲基-2-戊基酯、邻苯二甲酸二丁氧基乙基酯的检出率为 100%,但含量相对较低,分别占总量的 2.0%、1.5%、12.1%、2.6%、2.2%和 4.9%(表 2)。

2.2 重要代表性污染物质的健康风险

从图 1 可以看出,3 家水厂检出的持久性有机物由饮水途径所致致癌健康危害的男性个人年总风险总体介于 1.81×10^{-5}~$2.12\times10^{-5}a^{-1}$,女性个人年总风险总体介于 2.40×10^{-5}~$2.82\times10^{-5}a^{-1}$,女性略高于男性。多环芳烃在致癌风险中的比率介于 20.2%~22.9%。无论男女,出厂水按致癌年风险大小排列均为水厂 1(嘉陵江)>水厂 3(两江汇合)>水厂 2(长江)。

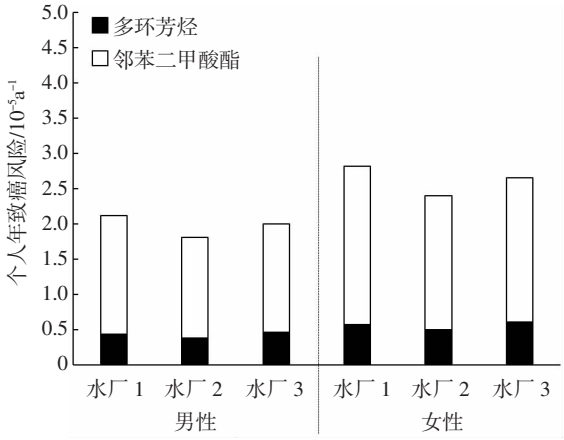


图 1 不同性别人群致癌健康风险

从图 2 可以看出,3 家水厂检出的持久性有机物由饮水途径所致非致癌健康危害的男性个人年总风险总体介于 7.11×10^{-8}~$8.28\times10^{-8}a^{-1}$,女性个人年总风险总体介于 9.45×10^{-8}~$10.01\times10^{-8}a^{-1}$,女性略高于男性。无论男女,出厂水按非致癌年风险大小排列均为水厂 1(嘉陵江)>水厂 3(两江汇合)>水厂 2(长江)。

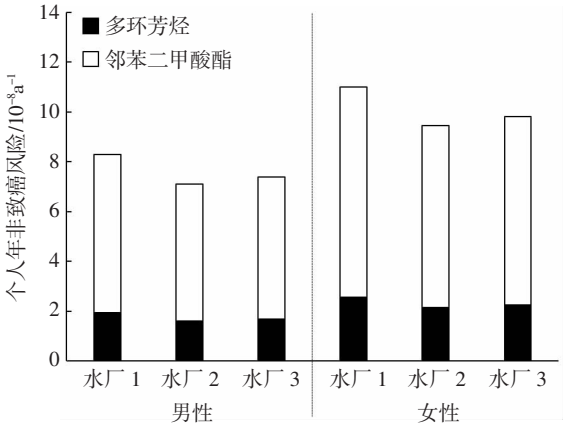


图 2 不同性别人群非致癌健康风险

表 2 某市 2013 年自来水厂出厂水持久性有机物污染监测数据(μg/L)

有机污染物	简称	水厂 1	水厂 2	水厂 3	平均值
多环芳烃类					
萘	NAP	ND	ND	ND	ND
苊	ANA	ND	ND	0.318	0.106
苊烯	ANY	ND	ND	ND	ND
芴	FLU	0.098	0.096	ND	0.065
菲	PHE	0.392	0.286	0.096	0.258
蒽	ANT	ND	ND	ND	ND
荧蒽	FLT	0.260	0.148	0.062	0.157
芘	PYR	0.184	0.126	0.098	0.136
苯并(a)蒽	BaA	ND	ND	ND	ND
屈	CHR	ND	ND	0.017	0.006
苯并(b)荧蒽	BbF	ND	ND	ND	ND
苯并(k)荧蒽	BkF	ND	ND	ND	ND
苯并(a)芘	BaP	0.013	0.011	0.014	0.013
二苯并(a,h)蒽	DBA	ND	ND	ND	ND
苯并(g,h,i)苝	BPE	ND	ND	ND	ND
茚并(1,2,3-cd)芘	IPY	ND	ND	ND	ND
$\sum_7$C-PAHs		0.013	0.011	0.031	0.019
$\sum_{16}$PAHs		0.947	0.667	0.605	0.741
邻苯二甲酸酯类					
邻苯二甲酸二甲酯	DMP	0.098	0.140	0.067	0.102
邻苯二甲酸二乙酯	DEP	0.083	0.091	0.063	0.079
邻苯二甲酸二异丁酯	DIBP	ND	0.549	0.241	0.395
邻苯二甲酸二丁基酯	DBP	0.909	0.641	0.331	0.627
邻苯二甲酸二甲基乙二醇酯	DMEP	0.132	0.131	0.131	0.131
邻苯二甲酸二-4-甲基-2-戊基酯	BMPP	0.117	0.112	0.107	0.112
邻苯二甲酸二己酯	DnHP	ND	0.136	0.131	0.133
邻苯二甲酸二乙氧基乙基酯	DEEP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二戊酯	DPP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二壬酯	DINP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸苯基丁基酯	BBP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸己基-2-乙基己酯	DHEHP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二丁氧基乙基酯	DBEP	0.254	0.271	0.230	0.252
邻苯二甲酸二乙基己基酯	DEHP	3.608	3.047	3.289	3.314
邻苯二甲酸二环己酯	DCHP	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二辛酯	DNOP	ND	ND	ND	ND
∑C-PAEs		3.608	3.047	3.289	3.314
$\sum_{16}$PAEs		5.201	5.118	4.590	5.146

ND:低于检出限;PAH:多环芳烃;PAEs:邻苯二甲酸酯类;∑16PAHs:每种 PAH 浓度总和但不考虑 ND 值;∑7C-PAHs:7 种致癌性 PAH 浓度总和但不考虑 ND 值

总体而言,无论男女,致癌风险较非致癌风险高3个数量级,男性总的健康危害风险(致癌风险和非致癌风险之和)介于$1.82\times10^{-5}\sim2.13\times10^{-5}a^{-1}$,女性总的健康危害风险介于$2.42\times10^{-5}\sim2.83\times10^{-5}a^{-1}$。

3 讨论

多环芳烃是环境中分布极为广泛的有毒有机污染物,主要来源于煤炭、石油、木材等有机物的热解和不完全燃烧。3家水厂出厂水检出的7种多环芳烃的总浓度为0.605~0.947 μg/L(平均值0.741 μg/L),符合国家城市供水水质标准(CJ/T206-2005)所规定的多环芳烃总量小于2 μg/L。检出的种类虽然少于潍坊城区生活饮用水(12种)种类,但总量和平均值均高于该地区(42.64~546.24 ng/L,平均值174.41 ng/L);也高于国内2017年31个省78个城市自来水中多环芳烃的均值56.25 ng/L。致癌性多环芳烃中,两家水厂只检出BaP,仅1家水厂检出屈(CHR),但仍以BaP为主(占80%)。3家出厂水BaP含量(0.011~0.014 μg/L)均高于国家城市供水水质标准(CJ/T206-2005)和国家生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)所规定的10 ng/L,稍低于刘新报道的2017年国内其他城市如西南地区出厂水最大值17.87 ng/L、华南地区出厂水最大值15.85 ng/L、华北地区出厂水最大值48.44 ng/L和西北地区出厂水最大值12.67 ng/L[16]。

多环芳烃引起的健康风险中,致癌风险为非致癌风险的200倍,致癌健康风险男性介于$1.81\times10^{-5}\sim2.12\times10^{-5}a^{-1}$,女性介于$2.40\times10^{-5}\sim2.82\times10^{-5}a^{-1}$,均低于ICRP可接受水平$5.0\times10^{-5}a^{-1}$。另据报道,4环及其以上的多环芳烃主要来自化石燃料高温燃烧,而低环(2、3环)则来源于石油类污染[17-18],本研究中多环芳烃3环最多,其含量水厂1(51.7%)<水厂2(57.3%)<水厂3(68.4%),可见两种污染方式均存在,在两江汇合以前比例相当;在两江汇合后,石油类污染为主要污染类型。虽然5环芳烃仅占总量的1.7%左右,但其成分为BaP,毒性大,在3家水厂中含量均超过国家标准,提示化石燃料高温燃烧应是相关部门进行污染治理的重点。

邻苯二甲酸酯是一类常用的增塑剂,在某市水域广泛存在,并在三峡库区蓄水前检出浓度相对较高[19]。本研究中,共检出7种邻苯二甲酸酯类,其中对人可能致癌的物质邻苯二甲酸二乙基己基酯的含量最高,但低于国家生活饮用水卫生标准(GB5749-2006)所规定的限值8.0 μg/L。同多环芳烃相似,其导致的健康风险中,致癌健康风险是非致癌风险的200倍,主要由邻苯二甲酸二乙基己基酯所导致,致癌健康风险男性介于$1.43\times10^{-5}\sim1.69\times10^{-5}a^{-1}$,女性介于$1.90\times10^{-5}\sim2.25\times10^{-5}a^{-1}$,低于ICRP可接受水平$5.0\times10^{-5}a^{-1}$。

尽管3家水厂的出厂水中BaP的含量超出国家标准值,但多环芳烃和邻苯二甲酸酯各自导致的健康风险以及两类污染物同时存在的总健康风险均低于ICRP可接受水平$5.0\times10^{-5}a^{-1}$,但高于2007年报道的6种代表性物质[萘(NA)、萤蒽(FLA)、芘(Pyr)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二乙基酯(DEP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)]的非致癌的人体健康年风险数值$3.70\times10^{-10}a^{-1}$[12]。原因可能是在本研究中3家水厂的出水中均未检出萘,但除其他5种物质外,还纳入了芴、菲、BaP、邻苯二甲酸二乙酯进行分析。

本研究存在以下不足:①本研究得出的健康风险值低于实际暴露的健康风险。因为多环芳烃类的菲和屈,在出厂水中均有检出,但由于缺乏风险评价相关数据RfD_{ig}和/或Q_{ig},未能计算其健康风险。同时尚有6种邻苯二甲酸酯类有机污染物暂未进行致癌物分类,其中3种缺乏风险评价相关数据Q_{ig}和/或RfD_{ig}。②本研究为一次采样结果,且取样点较少,不能较好的代表一年四季的水样,尤其是BaP的高剂量可能是偶发情况。③洗浴是机体皮肤暴露于污染物的重要途径之一,由于缺乏相应的致癌强度系数、参考剂量,健康风险计算时未考虑此暴露途径。④本研究虽然采用的《中国人群暴露参数手册》中本地区的相关数据(体质量及饮水量),但该数据也是抽样调查结果,因此本研究所推测的结论可能与实际情况有差异。

综上,某市主城区3家水厂(水源分别来自于嘉陵江、长江、两江汇合)的出厂水中常见POPs中有7种多环芳烃和9种邻苯二甲酸酯类检出,其中3家水厂出水中BaP含量略超过国家卫生标准;邻苯二甲酸酯以邻苯二甲酸二乙基己基酯为主,但未超过国家卫生标准。健康风险评价结果显示,各水厂多环芳烃导致的总健康风险和邻苯二甲酸酯导致的总健康风险均在ICRP可接受水平。建议相关部门加强对污染物的监测与治理,敦促水厂改进污染物尤其是BaP去除的技术,并加强对自来水中POPs类污染物质的监测。

参考文献:

[1] 员晓燕, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物(POPs)的污染现状与分布特征[J]. 环境化学, 2013, 32(11): 2072-2081. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2013.11.009.
YUN X Y, YANG Y Y, LI Q X, *et al*. Present situation and distribution characteristics of persistent organic pollutants in freshwater in China[J]. Environ Chem, 2013, 32(11): 2072-2081. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2013.11.009.

[2] 董继元, 王式功, 尚可政. 黄河兰州段多环芳烃类有机污染物健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1892-1897. DOI:10.3321/j.issn:1672-2043.2009.09.020.
DONG J Y, WANG S G, SHANG K Z. Water environmental health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lanzhou reach of the Yellow River[J]. J Agro-Environ Sci, 2009, 28(9): 1892-1897. DOI:10.3321/j.issn:1672-2043.2009.09.020.

[3] 郑曦, 韩宝平, 蒋欢, 等. 微山湖养殖湖区水体中多环芳烃的分布及来源[J]. 四川环境, 2010, 29(6): 21-24. DOI:10.3969/j.issn.1001-3644.2010.06.005.
ZHENG X, HAN B P, JIANG H, *et al*. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water of aquatic product cage culture area of Weishan lake[J]. Sichuan Environ, 2010, 29(6): 21-24. DOI:10.3969/j.issn.1001-3644.2010.06.005.

[4] QIN N, HE W, KONG X Z, *et al*. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the water from a large Chinese lake based on multiple indicators[J]. Ecol Indic, 2013, 24: 599-608. DOI:10.1016/j.ecolind.2012.08.019.

[5] 曹佳, 舒为群, 黄玉明, 等. 三峡库区及重庆主城区蓄水前后水中持久性有毒物质的污染及变化趋势[J]. 成都医学院学报, 2012, 7(1): 2-5, 14. DOI:10.3969/j.issn.1674-2257.2012.01.001.
CAO J, SHU W Q, HUANG Y M, *et al*. Pollution status and variation tendency of persistent toxic substances in the Three Gorges reservoir[J]. J Chengdu Med Coll, 2012, 7(1): 2-5, 14. DOI:10.3969/j.issn.1674-2257.2012.01.001.

[6] 田怀军, 舒为群, 邱志群, 等. 长江、嘉陵江(重庆段)水源水及出厂水有机物污染分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 24(4): 226-239. DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2003.02.004.
TIAN H J, SHU W Q, QIU Z Q, *et al*. Organic pollutants in source water and finished water in Jialing river and Yangtzi river (Chongqing section)[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2002, 24(4): 226-239. DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2003.02.004.

[7] 舒为群, 田怀军, 王幼民, 等. 重庆五座水厂水的有机物致突变活性比较[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 1-3. DOI:10.3321/j.issn:1000-4602.2003.03.001.
SHU W Q, TIAN H J, WANG Y M, *et al*. Comparison on the mutagenic activity of raw water and finished water of five waterworks in Chongqing City[J]. China Water Wastewater, 2003, 19(3): 1-3. DOI:10.3321/j.issn:1000-4602.2003.03.001.

[8] 曹波, 任谦, 崔志鸿, 等. 嘉陵江C市段源水中有机污染物定性研究[J]. 四川环境, 2006, 25(6): 78-80. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2006.06.021.
CAO B, REN Q, CUI Z H, *et al*. Qualitative analysis of organic pollutants in source water in C City by GC\MS[J]. Sichuan Environ, 2006, 25(6): 78-80. DOI:10.14034/j.cnki.schj.2006.06.021.

[9] 郭志顺, 罗财红, 张卫东, 等. 三峡库区重庆段江水中持久性有机污染物污染状况分析[J]. 中国环境监测, 2006, 22(4): 45-48. DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2006.04.015.
GUO Z S, LUO C H,ZHANG W D, *et al*. The analysis of the persistent organic pollution in the Three Gorges region in Chongqing[J]. Environ Monit China, 2006, 22(4): 45-48. DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2006.04.015.

[10] 郭志顺, 罗财红, 张卫东, 等. 三峡重庆库区PAHs污染研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(6): 1337-1340. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2006.06.033.
GUO Z S, LUO C H, ZHANG W D, *et al*. Research on PAHs pollution of the Three Gorges reservior in Chongqing[J]. J Sichuan Univ Nat Sci Ed, 2006, 43(6): 1337-1340. DOI:10.3969/j.issn.0490-6756.2006.06.033.

[11] 邱志群, 舒为群, 曹佳. 我国水中有机物及部分持久性有机物污染现状[J]. 癌变·畸变·突变, 2007, 19(3): 188-193. DOI:10.3969/j.issn.1004-616X.2007.03.007.
QIU Z Q, SHU W Q, CAO J. Present contamination status of water organic pollutants and parts of persistent organic pollutants in China[J]. Carcinog Teratog Mutagen, 2007, 19(3): 188-193. DOI: 10.3969/j.issn.1004-616X.2007.03.007.

[12] 许川, 舒为群, 罗财红, 等. 三峡库区水环境多环芳烃和邻苯二甲酸酯类有机污染物健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2007, 20(5): 57-60. DOI:10.13198/j.res.

2007.05.59.xuch.009.
XU C, SHU W Q, LUO C H, *et al*. Water environmental health risk assessment of PAHs and PAEs in the Three Gorges reservoir[J]. Res Environ Sci, 2007, 20(5): 57-60. DOI:10.13198/j.res.2007.05.59.xuch.009.

[13] National Research Council (US) Committee on the institutional Means for Assessment of Risks to Public Health. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington DC: National Academy Press (US), 1983: 2-206.

[14] IRAC. Agents Classified by the IARC Monographs[EB/OL]. [2020-01-17]. http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/List_of_Classifications.pdf.

[15] US Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System[EB/OL]. [2020-01-17]. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm.

[16] 刘新, 王东红, 马梅, 等. 中国饮用水中多环芳烃的分布和健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 207-214.
LIU X, WANG D H, MA M, *et al*. Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water of China[J]. Asian J Ecotoxicol, 2011, 6(2): 207-214.

[17] FERNANDES M B, SICRE M A, BOIREAU A, *et al*. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary[J]. Mar Pollut Bull, 1997, 34(11): 857-867. DOI:10.1016/s0025-326x(97)00063-5.

[18] 吴莹, 张经. 多环芳烃在渤海海峡柱状沉积物中的分布[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 74-77. DOI:10.3321/j.issn:0250-3301.2001.03.016.
WU Y, ZHANG J. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in core sediments of the bohai straight[J]. Chin J Environ Sci, 2001, 22(3): 74-77. DOI:10.3321/j.issn:0250-3301.2001.03.016.

[19] 郭志顺, 蹇川, 蔡素婷, 等. 重庆三峡库区蓄水后邻苯二甲酸酯污染研究[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2): 11-16. DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2019.02.004.
GUO Z S, JIAN C, CAI S T, *et al*. The research of the phthalate ester pollution in the Three Gorges region in Chongqing after the water storage period[J]. China Resour Compr Util, 2019, 37(2): 11-16. DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2019.02.004.

(**收稿**:2019-12-26;**修回**:2020-03-21)
(编辑 王 红)