DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.03.015

喀斯特地区阿哈水库水环境中毒性物质潜在健康风险评价

赵宇中[1],郭 云[2],杨 成[2],王志康[2],谢太岭[3]

(1.贵州民族大学民族医药学院,贵阳 550025;
2.贵州民族大学生态环境工程学院,贵阳 550025;
3.贵阳市两湖一库环境保护监测站,贵阳 551400)

摘要:评价阿哈水库中化学致癌物与非致癌物通过饮水途径对成年人和儿童身体健康造成的潜在风险,为污染物治理和水环境风险管理提供科学参考。设置12个采样点,测定砷As、镉Cd、六价铬Cr^{6+}和汞Hg、铅pb、铜Cu、铁Fe、锰Mn、挥发酚、氰化物、氟化物、氨氮NH_3-N,采用美国环境保护署(USEPA)推荐的环境健康风险评价方法进行健康风险评价。结果表明:(1)该水库中毒性物质对成年男性、成年女性、儿童产生的健康总风险度在10^{-3}数量级,达到评价标准中最高危险级别,其中儿童受到的健康风险最高,其次是成年男性,再次是成年女性;(2)化学致癌物的健康总风险及单项风险远高于非致癌物,风险度高出5~6个数量级;(3)化学致癌物中的Cr^{6+}健康风险度最高,风险比重高达99.8%,是主要健康风险贡献源;(4)4个采样断面对3类饮水人群造成的健康危害风险顺序一致,均是入库口2>入库口1>水厂取水口>库中心。Cr^{6+}是首要管控因子;入库口2的健康风险最高,其次是入库口1。

关键词:化学致癌物;非致癌物;健康风险评价;喀斯特地区;阿哈水库

中图分类号:X503.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)03-0115-08

饮用水源地污染是关乎饮用水安全和公众健康的重大社会问题。经济快速发展中对环境污染问题的忽视,严重威胁饮用水安全。全世界80%的疾病是由不安全的饮用水和恶劣的环境卫生条件造成的(WHO,2018)。随着人们健康意识的增强,水源地的保护和饮用水的健康愈加受到重视。目前,常规的水环境评价方法虽然在一定程度上可以反映水环境质量现状、水质达标与否及其污染程度,但在解释对饮水人群身体健康是否存在近期和长期影响,即是否存在潜在健康风险方面,不能给予正确判断(倪彬等,2010)。水环境健康风险评价是基于水体中存在可能危害人体生命健康的污染物基础上,通过建立特定的污染物质计量与健康效应定量关系,来定性评价污染物对健康存在的危害性(邹滨等,2009)。因此,对饮用水源地进行水环境健康风险评价,将各项污染物的暴露剂量转换成可以比较、统计的风险值,并将风险度直接关联到人体健康上,不仅可以定量分析各种污染物对人体健康造成的危害及其发生的风险概率,还可确定主要污染物及治理的优先顺序(耿福明等,2006)。

位于我国西南喀斯特地区的阿哈水库是人工深水型水库,处于亚热带湿润、温和气候区,水域面积4.5 km^2,平均水深19 m;年均温度15.3℃,年均降雨量1 140~1 200 mm(徐中义等,2014),属于典型的山区雨源型河流,径流由降水补给,年均径流量1.04亿 m^3。该水库是当地重要的饮用水源地,高峰期供水量达16万 m^3/d,其水质安全对于周边地区经济发展和保障饮水市民的身心健康有着重要作用。目前,对该水库水质的各项监测仅限于污染物浓度是否符合国家水质标准,重点放在超标污染物上,而淡化了未超标低浓度的有毒物质指标。根据近几年环境监测站的数据显示,该水库水体中毒性物质浓度均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)饮用水要求,但水体对饮水人群身体健康是否存在潜在危害及危害程度却不能直观反映出来。相关研究显示,尽管毒性物质的浓度比较低,但长期的低剂量暴露也能对人体健康造成严重危害(孙树青等,2006)。由于喀斯特地区水库具有水流缓慢、储水量大、水力停留时间长等特点(郭云等,2015;

收稿日期:2019-01-10

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY[2017]134,KY[2016]158);贵州省教育厅本科教学内容和课程体系改革项目(2018520037);国家留学基金西部人才项目(留金法[2016]5112号);国家自然科学基金(41563013,41867048)。

作者简介:赵宇中,男,博士,主要从事环境生物学研究。E-mail:15473478@qq.com

通信作者:郭云,女,副教授,主要从事水质监测和生态修复研究。E-mail:50394207@qq.com

2018)，毒性物质会产生累积效应，毒性加倍，危害性也更严重。因此对水体中有毒物质造成的水环境健康风险进行研究具有重要的现实意义。本文首次对阿哈水库中化学致癌物与非致癌物这两大类毒性物质通过饮水途径分别对成年男性、成年女性和儿童身体健康造成的潜在风险进行评价，筛选提取健康危害风险污染源，为优先治理水体中污染物和水环境风险管理提供科学参考。

1　研究方法

1.1　采样点设置

根据调研，阿哈水库有5条入库支流。其中2条支流入库流量较小，仅占到支流总入库量的5%左右，有时还出现断流现象。由于该水库库容量较小，有时无法满足正常供水需求，因此还有1条支流是作为从另外一个饮用水源地一级保护区调水的补给渠道，流量虽然占25%左右，但入库水质较好。其余2条支流入库量约占70%，是最主要的入库支流，且这2条支流周边流域分布大量村寨、中小型工矿企业、废弃煤矿等，是该水库最主要的污染物来源地。因此在这2条主要支流入库口设置采样点，同时在与饮水最为相关的自来水水厂取水口以及水库库中心设置采样点。按照《水质 湖泊和水库采样技术指导》(GB/T 14581－1993)之规定，根据水库周边地形地貌及污染源分布、污染物入库情况，设置4个采样断面：主要支流入库口1(A)、水厂取水口(B)、库中心(C)、主要支流入库口2(D)(图1)。每个采样断面设置1条采样垂线，在上层、中层、下层分别设置1个采样点，共计12个采样点。

1.2　水质测定

Hg、As的测定采用原子荧光光度法(SL 327.1－2005)；Cd、Pb测定采用生活饮用水标准检测方法-金属指标(GB/T 5750.6－2006)；Gu测定采用原子吸收分光光度法(GB 7475－1987)；Fe、Mn测定采用原子吸收分光光度法(GB 11911－1989)；氟化物测定采用离子色谱分光光度法(GB/T 5749－2006)；NH_3-N测定采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535－2009)；Cr^{6+}测定采用二苯碳酰二肼分光光度法(GB 7467－1987)；挥发酚测定采用4-氨基安替比林分光光度法(HJ 503－2009)；氰化物测定采用吡啶-巴比妥酸分光光度法(HJ 484－2009)。

1.3　健康风险评价模型

目前，我国还没有比较科学完善的水环境健康风险评价模型。采用美国环境保护署(USEPA)推荐的水环境健康风险评价模型对化学致癌物和非致癌物存在的潜在健康风险进行评价研究。化学致癌物通过饮水途径所产生的个人致癌危害风险计算模型(USEPA，2005)：

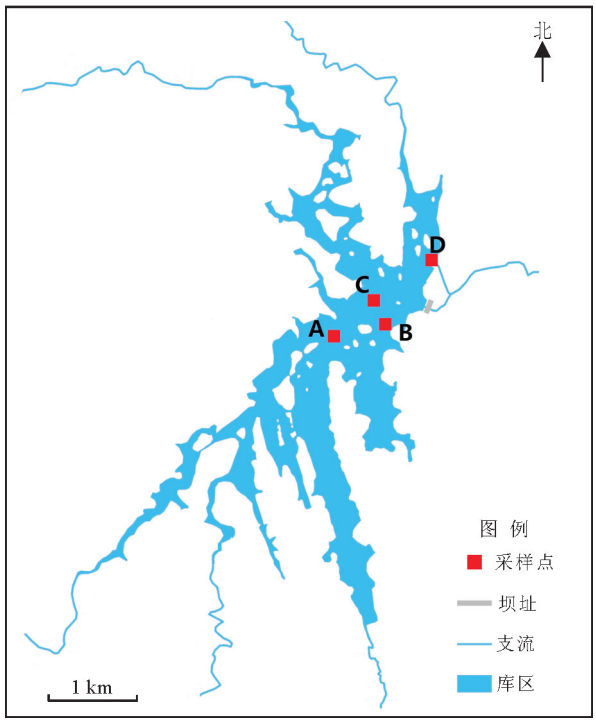


图1　阿哈水库采样断面示意

Fig.1　Location of sampling sites in Aha reservoir

$$R^c=\sum_{i=1}^{I}R_i^c \tag{1}$$

$$R^c=\frac{[1-\exp(-D_iq_i)]}{N} \tag{2}$$

$$D_i=\frac{P\times C_i}{W} \tag{3}$$

式中：R^c为化学致癌物通过饮水途径对个体产生的致癌风险值，a^{-1}；D_i为化学致癌物i经饮用水途径的单位体重日均暴露剂量，mg/(kg·d)；C_i为化学致癌物i的质量浓度，mg/L；R_i^c为化学致癌物i($i=1,2,3...,I$)经饮用水途径的个人平均致癌年风险值，a^{-1}；q_i为化学致癌物i经饮用水途径的致癌强度系数，$mg/(kg\cdot d)^{-1}$；P为人的日均饮水量，成人男性为1.68 L、成人女性为1.37 L、儿童为1.0 L；W为人的平均体重，成人男性为62.70 kg、成人女性为54.40 kg、儿童为10 kg(王宗爽等，2009；黄楠等，2012)；N为人的平均寿命，该地区第6次人口普查平均为75岁。

非致癌物通过饮水途径所产生的个人健康危害风险计算模型(USEPA，2000)：

$$R^n=\sum_{i=1}^{I}R_j^n \tag{4}$$

$$R_j^n=\frac{D_j\times10^{-6}}{RfD_j\times N} \tag{5}$$

$$R_j=\frac{P\times c_j}{W} \tag{6}$$

式中：R_n 为非致癌物通过饮水途径对个体产生的平均健康风险，a^{-1}；R_j^n 为非致癌物 j（$j=1,2,3\ldots,J$）通过饮水途径对个体产生的平均健康风险，a^{-1}；RfD_j 为非致癌物在饮用水中的参考剂量，mg/(kg·d)；D_j 为非致癌物 j 通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量，mg/(kg·d)；C_j 为饮用水中非致癌物 j 的质量浓度，mg/L。

假设所有的致毒物质都是相互独立地对人体产生毒害作用，则各有毒物质对人体健康产生的危害作用呈相加关系，产生累积效应。因此，水环境总健康危害风险（化学致癌物健康危害和非致癌物健康危害）$R_{总}$ 的计算公式：

$$R_{总}=R^c+R^n \tag{7}$$

1.4　评价参数选择

国际辐射防护委员会（ICRP）和世界卫生组织（WHO）的体系标准中指出化学致癌物 Cr^{6+}、As 和 Cd 的致癌强度系数分别是 41、15 和 6.1 mg/(kg·d)。非致癌物 Hg、Pb、Gu、Fe、Mn、挥发酚、氰化物、氟化物、NH_3-N 的参考剂量分别是 0.0003、0.0014、0.005、0.3、0.14、0.1、0.037、0.06 和 0.97 mg/(kg·d)（黄奕龙等，2006；苏伟等，2007）。

1.5　环境健康风险评价标准

国际上对于健康风险评价的最大可接受水平暂未有统一标准，各国推荐的风险限值也不一样（倪彬等，2010）。USEPA 推荐的最大可接受风险水平是 1×10^{-4}/a，ICRP 推荐的是 5×10^{-5}/a，瑞典、荷兰环境保护局和英国皇家协会推荐的是 1×10^{-6}/a。各种健康风险水平造成的危险性及可接受程度见表 1（倪彬等，2010）。

表 1　各种风险水平及其可接受程度

Tab.1　Risk value, risk level and acceptable level

风险值/a^{-1}	危险性	可接受水平
10^{-3}	危险性特别高，相当于人的的自然死亡率	不可接受，必须采取措施改进
10^{-4}	危险性中等	应采取改进措施
10^{-5}	与游泳事故和煤气中毒事故属同一数量级	人们对此关心，并愿采取措施预防
10^{-6}	相当于地震和天灾风险	人们并不关心该类事故的发生
$10^{-7}\sim10^{-8}$	相当于陨石坠落伤人	没人愿意为该类事故投资加以防范

2　结果与分析

2.1　化学致癌物和非致癌物含量

12 个采样点的化学致癌物和非致癌物含量见表 2。12 种毒性物质中，除 Cd 未检测出，其他物质均检测出，但含量都比较低，且上中下层含量变化不明显。各毒性物质含量范围为：NH_3-N 0.60～0.94 mg/L，氟化物 0.233～0.331 mg/L，Hg 0.1×10^{-4}～0.2×10^{-4} mg/L，挥发酚 0.001～0.006 mg/L，Pb 2.5×10^{-3}～4.3×10^{-3} mg/L，氰化物 0.002～0.004 mg/L，Fe 0.03～0.05 mg/L，Mn 0.03～0.08 mg/L，Cu 0.01～0.02 mg/L，Cr^{6+} 0.038～0.147 mg/L，As 0.0002～0.0006 mg/L。在各种毒性污染物均值含量中，NH_3-N 含量达到《地表水环境质量标准》（GB3838－2002）中规定的Ⅲ类水质标准；入库口 2 中的 Cr^{6+} 含量达到Ⅴ类水质标准，其他 3 个采样断面的 Cr^{6+} 含量达到Ⅳ类标准；其他 10 种污染物含量较低，均是达到Ⅰ类水质标准。整体上，入库口 2 的毒性污染物浓度是 4 个采样断面中最高的。

化学致癌物中，Cd 未检测出，Cr^{6+} 均值含量是 0.073 mg/L，远高于均值含量是 0.0004 mg/L 的 As；非致癌物的含量排序是 NH_3-N（0.72 mg/L）＞氟化物（0.272 mg/L）＞Mn（0.05 mg/L）＞Fe（0.03 mg/L）＞Cu（0.01 mg/L）＞挥发酚（0.003 mg/L）＞Pb（0.0031 mg/L）＞氰化物（0.003 mg/L）＞Hg（0.00002 mg/L）（图 2）。在 12 种毒性物质中，NH_3-N 含量最高，其次是氟化物和 Cr^{6+}。

2.2　水库水环境潜在健康风险评价

各采样断面上、中、下层采样点中各种毒性物质含量变化不大，各层健康风险度变化也不明显。因此，对 4 个采样断面的健康风险度均值进行整体分析，来研究水库中化学致癌物和非化学致癌物通过饮用水途径分别对成人、儿童健康所造成的单项健康风险和总风险。

表2　水库毒性物质监测值　　mg/L

Tab.2　Monitoring data for toxic substances in Aha reservoir

采样点		NH_3-N	氟化物	Hg	挥发酚	Pb	氰化物	Fe	Mn	Cu	Cd	Cr^{6+}	As
入库口1	上层	0.61	0.331	0.00002	0.004	0.0028	0.003	0.04	0.06	0.01	0.00025	0.075	0.0005
	中层	0.60	0.281	0.00002	0.003	0.0025	0.003	0.04	0.04	0.01	0.00025	0.056	0.0005
	下层	0.62	0.249	0.00002	0.003	0.0026	0.002	0.03	0.05	0.02	0.00025	0.093	0.0005
库中心	上层	0.59	0.233	0.00001	0.004	0.0027	0.002	0.03	0.06	0.01	0.00025	0.038	0.0003
	中层	0.67	0.261	0.00001	0.003	0.0025	0.003	0.03	0.05	0.02	0.00025	0.038	0.0003
	下层	0.64	0.295	0.00001	0.003	0.0030	0.002	0.03	0.03	0.02	0.00025	0.056	0.0003
取水口	上层	0.72	0.243	0.00001	0.003	0.0037	0.002	0.04	0.04	0.01	0.00025	0.068	0.0003
	中层	0.78	0.242	0.00002	0.001	0.0032	0.003	0.03	0.04	0.01	0.00025	0.067	0.0003
	下层	0.71	0.241	0.00001	0.001	0.0025	0.002	0.03	0.03	0.01	0.00025	0.069	0.0002
入库口2	上层	0.94	0.325	0.00002	0.006	0.0043	0.004	0.05	0.08	0.02	0.00025	0.147	0.0005
	中层	0.89	0.276	0.00002	0.006	0.0041	0.003	0.04	0.07	0.02	0.00025	0.093	0.0006
	下层	0.85	0.288	0.00002	0.003	0.0035	0.003	0.03	0.07	0.02	0.00025	0.075	0.0006

注：1.NH_3-N、氟化物、Hg、挥发酚、Pb、氰化物、Fe、Mn、Gu、Cd、Cr^{6+}、As 的检出限值分别是 0.01、0.006、0.00001、0.001、0.0025、0.001、0.03、0.01、0.01、0.0005、0.004、0.0002 mg/L；2.将低于检测限值的数据按 0.5 倍处理参与计算(洪鸿加等，2012)。

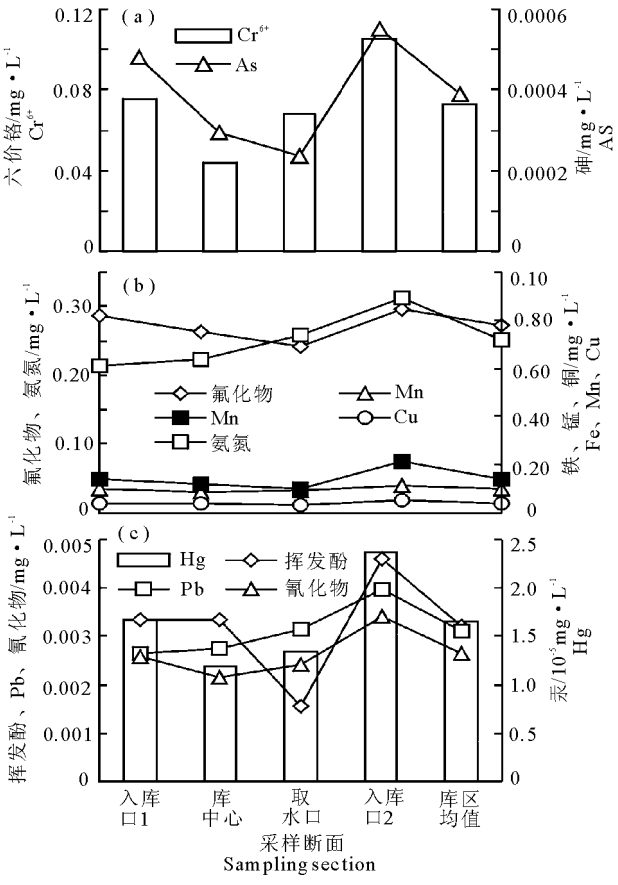


图2　采样断面和水库库区毒性物质均值含量

Fig.2　Mean concentration of toxic substances for each sampling section

2.2.1　化学致癌物风险评价　阿哈水库化学致癌物对成人、儿童所造成的健康风险结果见表3。化学致癌物对儿童造成的健康危害风险最高(3.42×10^{-3}/a)，分别是成年男性(1.03×10^{-3}/a)和成年女性健康风险度(9.67×10^{-4}/a)的3.32倍和3.54倍。

Cr^{6+}和As对3类饮水人群造成的健康风险数量级分别是10^{-3}(成年女性的风险度接近10^{-3}级别)和10^{-6}。Cr^{6+}的风险度最高，风险值的贡献率99.8%，是最主要的化学致癌风险贡献源。

2.2.2　非致癌物风险评价　阿哈水库中9种非致癌物通过饮水途径对3类人群造成的风险情况见表4。除库中心和水厂取水口这2个采样断面对儿童造成的总风险度是1.40×10^{-8}/a和1.33×10^{-8}/a外，其他断面3类饮水人群的健康总风险度均在10^{-9}/a数量级，相当于陨石坠落伤人的风险机率，可以忽略不考虑(倪彬等，2010)。这表明水库中该类污染物浓度对人体产生的非致癌慢性毒害效应很低，处于比较安全的范围。

水库中各种非致癌物单项健康风险度变化幅度不太明显，在10^{-12}/a或10^{-9}/a数量级。其中，氟化物和Cu对饮水人群产生的健康风险度均值稍高，是10^{-9}/a数量级或接近这个数量级别，其他7种污染物的单项健康分险度均值是10^{-10}/a或10^{-11}/a数量级。非致癌健康风险度均值大小排序依次是氟化物＞Cu＞Pb＞NH_3-N＞Mn＞汞＞氰化物＞Fe＞挥发酚。氟化物的健康风险贡献率占38.7%，Cu占24.8%，Pb占19.0%，NH_3-N占9.0%，Mn、Fe、Hg、氰化物这4种污染物的总比重不到10%(图3)。风险度和风险比例均表明，氟化物是最主要的非致癌物健康风险贡献源，其次是Cu。

两大类毒性污染物产生的健康风险结果，阿哈水库水体对饮水人群产生的最大健康危害风险源是化学致癌物中的Cr^{6+}和非致癌物中的氟化物，由于化学致癌物的风险度远高于非致癌物，高出4～6个数量级，因此水库的主要潜在健康危害风险源是化学致癌物中的Cr^{6+}。

表 3　化学致癌物饮用水途径造成的潜在致癌风险值　　a^{-1}

Tab.3　Carcinogenic risk caused by drinking water

化学致癌物	人群	致癌风险值				
		入库口 1	库中心	水厂取水口	入库口 2	均值
Cr^{6+}	成年男性	1.05×10^{-3}	6.29×10^{-4}	9.60×10^{-4}	1.45×10^{-3}	1.02×10^{-3}
	成年女性	9.94×10^{-4}	5.92×10^{-4}	9.04×10^{-4}	1.37×10^{-3}	9.65×10^{-4}
	儿童	3.53×10^{-3}	2.20×10^{-3}	3.24×10^{-3}	4.66×10^{-3}	3.41×10^{-3}
As	成年男性	2.58×10^{-6}	1.61×10^{-6}	1.27×10^{-6}	2.95×10^{-6}	2.10×10^{-6}
	成年女性	2.52×10^{-6}	1.51×10^{-6}	1.01×10^{-6}	2.52×10^{-6}	1.89×10^{-6}
	儿童	1.00×10^{-5}	6.00×10^{-6}	4.00×10^{-6}	1.00×10^{-5}	7.50×10^{-6}
R^c	成年男性	1.06×10^{-3}	6.31×10^{-4}	9.61×10^{-4}	1.46×10^{-3}	1.03×10^{-3}
	成年女性	9.96×10^{-4}	5.94×10^{-4}	9.05×10^{-4}	1.37×10^{-3}	9.67×10^{-4}
	儿童	3.54×10^{-3}	2.21×10^{-3}	3.25×10^{-3}	4.68×10^{-3}	3.42×10^{-3}

表 4　非致癌物饮水途径造成的健康危害风险　　a^{-1}

Tab.4　Non-carcinogenic health risk to individuals posed by drinking water

采样点	饮水人群	NH_3-N	氟化物	Hg	挥发酚	Pb	氰化物	Fe	Mn	Cu	Rn
入库口 1	男性	2.26×10^{-10}	1.71×10^{-9}	2.06×10^{-11}	1.19×10^{-11}	6.72×10^{-10}	2.48×10^{-11}	4.33×10^{-11}	1.25×10^{-10}	9.77×10^{-10}	3.81×10^{-9}
	女性	2.12×10^{-10}	1.61×10^{-9}	1.94×10^{-11}	1.12×10^{-11}	6.32×10^{-10}	2.34×10^{-11}	4.07×10^{-11}	1.18×10^{-10}	9.18×10^{-10}	3.58×10^{-9}
	儿童	8.43×10^{-10}	1.71×10^{-9}	2.06×10^{-11}	1.19×10^{-11}	6.72×10^{-10}	2.48×10^{-11}	4.33×10^{-11}	1.25×10^{-10}	9.77×10^{-10}	4.43×10^{-9}
库中心	男性	2.34×10^{-10}	1.57×10^{-9}	1.43×10^{-11}	1.20×10^{-11}	6.98×10^{-10}	2.09×10^{-11}	3.61×10^{-11}	1.11×10^{-10}	1.05×10^{-9}	3.74×10^{-9}
	女性	2.52×10^{-10}	2.20×10^{-9}	1.47×10^{-9}	1.34×10^{-11}	1.13×10^{-11}	6.56×10^{-10}	1.96×10^{-11}	3.40×10^{-11}	1.04×10^{-10}	2.78×10^{-9}
	儿童	8.74×10^{-10}	5.84×10^{-9}	5.33×10^{-11}	4.47×10^{-11}	2.60×10^{-9}	7.80×10^{-11}	1.35×10^{-10}	4.13×10^{-10}	3.91×10^{-9}	1.40×10^{-8}
水厂取水口	男性	2.72×10^{-10}	1.44×10^{-9}	1.59×10^{-11}	5.55×10^{-12}	8.00×10^{-10}	2.35×10^{-11}	3.81×10^{-11}	8.93×10^{-11}	8.81×10^{-10}	3.57×10^{-9}
	女性	2.55×10^{-10}	1.35×10^{-9}	1.49×10^{-11}	5.22×10^{-12}	7.52×10^{-10}	2.21×10^{-11}	3.58×10^{-11}	8.39×10^{-11}	8.28×10^{-10}	3.35×10^{-9}
	儿童	1.01×10^{-9}	5.38×10^{-9}	5.93×10^{-11}	2.07×10^{-11}	2.98×10^{-9}	8.77×10^{-11}	1.42×10^{-10}	3.33×10^{-10}	3.29×10^{-9}	1.33×10^{-8}
入库口 2	男性	3.30×10^{-10}	1.76×10^{-9}	2.82×10^{-11}	1.64×10^{-11}	1.01×10^{-9}	3.31×10^{-11}	4.80×10^{-11}	1.89×10^{-10}	1.29×10^{-9}	4.71×10^{-9}
	女性	3.10×10^{-10}	1.66×10^{-9}	2.65×10^{-11}	1.54×10^{-11}	9.51×10^{-10}	3.11×10^{-11}	4.51×10^{-11}	1.77×10^{-10}	1.21×10^{-9}	4.42×10^{-9}
	儿童	1.23×10^{-9}	1.76×10^{-9}	2.82×10^{-11}	1.64×10^{-11}	1.01×10^{-9}	3.31×10^{-11}	4.80×10^{-11}	1.89×10^{-10}	1.29×10^{-9}	5.61×10^{-9}
均值		5.04×10^{-10}	2.17×10^{-9}	1.48×10^{-10}	1.54×10^{-11}	1.07×10^{-10}	8.82×10^{-11}	5.63×10^{-11}	1.66×10^{-10}	1.39×10^{-9}	5.60×10^{-9}

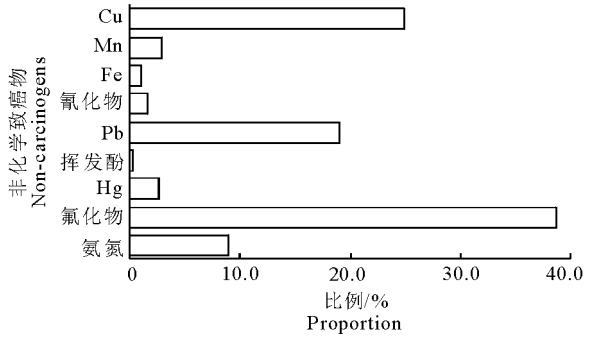


图 3　非致癌物单项健康风险贡献率

Fig.3　Contribution of non-carcinogens to individual health risk

2.2.3　水库毒性物质健康总风险　阿哈水库水体中化学致癌物和非致癌物分别对 3 类饮水人群造成潜在健康危害风险及总风险见图 4。儿童、成年男性和成年女性的个人健康总风险度分别是 3.42×10^{-3}/a、1.03×10^{-3}/a 和 9.67×10^{-4}/a，即每年每万个儿童、成年男性因饮用该水库的水而受到健康危害或死亡的人数是 35 人和 11 人，而每万个成年女性是 10 人。3 类人群中，儿童受到的健康危害最大，其健康危害总风险度最高，稍高于成年男性，成年女性健康危害总风险度低于儿童和成年男性 1 个数量级。在 2 类毒性污染物中，成年男性、女性、儿童的化学致癌物的健康总风险度分别是非致癌物风险度的 260495、273542、366856 倍，高于非致癌物 5～6 个数量级。这说明对阿哈水库饮水人群健康造成危害风险的主要污染物是化学致癌物，非致癌物的影响微乎其微。这并非是化学致癌物的污染更重，而是因其毒性更大所致。

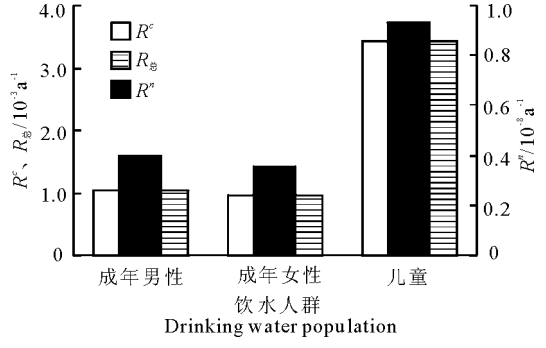


图 4　3 类人群致癌物和非致癌物健康风险度及总风险度

Fig.4　Risk degree of non-carcinogens (R^n), carcinogens (R^c) and the overall risk ($R_{总}$) to the three populations

2.2.4　各采样断面的潜在健康总风险　阿哈水库4个采样断面对3类不同饮水人群造成的健康危害总风险见图5。4个采样断面对成年男性、女性和儿童造成的健康风险顺序是一致的，均是入库口2＞入库口1＞水厂取水口＞库中心。入库口2的健康总风险最高，分别是1.46×10^{-3}/a、1.37×10^{-3}/a和4.68×10^{-3}/a，与USEPA推荐的最大可接受风险值在同一个数量级别上。这个级别危险性特别高，在各种评价标准中风险最高。

4个采样断面均是对儿童造成的健康总风险最高，风险度最大，在$2.21\times10^{-3}\sim4.68\times10^{-3}$/a，远高于USEPA的推荐值$1.0\times10^{-4}$/a。对成年男性造成的健康风险，2个入库口的风险度高出取水口和库中心1个数量级。对男性健康造成的风险，入库口属于危险性特别高级别，取水口和库中心属于中等危险性级别。对成年女性造成的健康风险整体上偏低，入库口2最高，其他3个断面的风险度要低1个数量级。

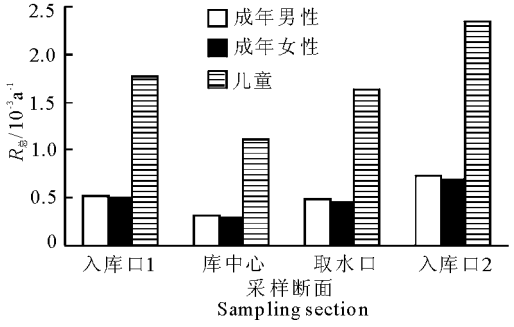


图5　采样断面饮用水途径健康危害总风险

Fig.5　Total health risk in each sampling section posed by drinking water

3　讨论

3.1　健康风险来源

阿哈水库Cr^{6+}的健康风险最高，是影响水库饮水人群健康的风险贡献源。这一研究结果和北京市、天津市、西安市黑河、乌鲁木齐和太湖饮水水源地等地区的研究结果类似(梁丽华等，2014；高继军等，2004；王秋莲等，2009；范清华等，2018；赵伟，2017)。该水库周边有铝合金厂、轮胎厂、药业公司等10多个重点污染源企业及几十个废弃的煤矿和容纳10万人左右的30多个村寨，工矿企业废水和城镇居民生活污水中含有Cr^{6+}毒性污染物。水库处于喀斯特特殊地质环境中，岩石风化过程中形成的铬也会进入水体。所以控制Cr^{6+}污染负荷的输入，对水库水质安全起到决定作用。

氟化物和Cu是2大非致癌物健康风险主要贡献源。这两者在健康方面对人体有着重要影响：氟对平衡人体机能具有重要作用，但过多摄入会导致机体慢性蓄积性中毒，损害人体肝脏、免疫和生殖系统(乔肖翠等，2019)；Cu是人体必需的微量元素，但过量摄入也会对人体许多器官产生不良影响(张迪等，2018)。该喀斯特地区土壤中氟含量较高(潘自平等，2018)，且属于燃煤型氟中毒病区(李岑等，2016)。水库重要补给水源之一的支流流域，曾为煤矿密集区，长期露天堆放的煤阡石受天然降水的淋溶作用，大量金属离子和氟离子进入水体。虽两者的风险度较低，基本在安全范围之内，但是应重视其带来的长期的慢性危害。

在空间上，4个采样断面对成年男性、女性和儿童3类饮水人群造成的健康危害风险都比较高，且危害风险顺序是一致的，均是入库口2＞入库口1＞水厂取水口＞库中心。主要因为入库口2是水库最主要的一条入库支流的汇合处，入库负荷大，入库流量占到总流量的50%左右。同时该支流流域内开发建设大量楼盘，众多居民产生大量生活污水，在流域中游虽然有座污水处理厂，但处理能力已达到满负荷状态，对于污水中重金属的处理能力有限；加上城市污水收集管网建设滞后，污水收集处理系统赶不上城镇的发展；部分河道被房开占用，河床硬化，大量未处理的污水直接排入支流，并随之进入库区，导致这一入库口的毒性物质含量较高，健康危害风险最大。入库口1是3条支流入库的汇合处，支流流域有10家煤矿重点污染源企业，大量煤矸石经过雨水淋溶及地表径流进入水库。取水口位于该水库的出口处，水体中的污染物经过上游的稀释、沉降及水体自净作用，到达该处时污染物的浓度理论上应当降低，但该断面的危害风险却不是最低的，可能与周边存在的大量农田和密集的居住区有关。该处是自来水厂取水口，潜在健康风险应引起高度重视。

本文是根据日饮水量、体重参数对成年男性、女性、儿童的健康风险分别进行研究。由于这3类人群体质、心理、行为方式、习惯等不同，分开研究更符合实际情况，更科学。研究结果表明，3类人群饮用该水库的水受到的健康风险都比较高，达到国际标准的最高危险级别，应注重该水库的饮水安全。其中，儿童的健康总风险最大，这可能与儿童年龄小、身体免疫力和耐受能力较低有关。成年男性的健康风险稍高于成年女性，这和梁丽华等(2014)对西安市黑河水源地的研究结果一致。有学者对印度6个

村庄因污水灌溉产生的致病风险进行研究，发现女性的致病风险高于男性(Srinivasan J T& Reddy V R，2009)。研究结果的不同，可能是由于男性、女性水环境健康风险是受到多种复杂因素的共同影响。

3.2　饮水暴露途径不确定因素

水环境健康暴露风险途径主要有饮水、皮肤接触、食用水中食物。由于阿哈水库是生活饮用水源地，只对饮水这一主要暴露途径进行风险评价，未考虑其他两个途径，且选取的评价指标是主要的含量较高的污染物，含量相对较低的化学、非化学、有机污染物未纳入评价。因此，评价所得的健康危害风险应小于实际风险。

饮水暴露途径健康风险评价需要利用不同的暴露参数计算结果。本文中只有人均寿命采用的是针对本地区调查研究的数据，而体重、人均日饮水量采用的是不同地区国人的平均值。不同地区人群生活习惯、行为活动模式、体质、摄入量存在差异，评价结果存在偏差。而评价公式中致癌强度系数和参考剂量采用的是美国的数据，因中国人和美国人体质差异、有毒物质的累积效应不同，评价结果带来偏差和不确定性。

参考文献

范清华，黎刚，王备新，等，2018. 太湖饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 中国环境监测，28(1)：6－9.

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

耿福明，薛联青，陆桂华，等，2006. 饮用水源水质健康危害的风险度评价[J]. 水利学报，37(10)：1242－1245.

郭云，赵宇中，龙胜兴，等，2015. 湖泊富营养化治理成效阶段水环境特征研究-以贵阳市饮水水源地红枫湖为例[J]. 环境污染与防治，37(6)：55－62.

郭云，赵宇中，王铭，等，2018. 阿哈水库沉积物中重金属分布特征及潜在生态风险评价[J]. 水生态学杂志，39(4)：24－29.

洪鸿加，彭晓春，胡习邦，等，2012. 饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 广东化工，37(12)：122－123.

胡国华，孙树青，郭飞燕，等，2006. 黄河干流水环境健康风险评价[J]. 应用基础与工程科学学报，14(6)：63－68.

黄楠，郑婵娟，段小丽，2012. 饮水暴露健康风险评估中的水摄入率[J]. 环境与健康杂志，29(2)：109－113.

黄奕龙，王仰麟，谭启宇，等，2006. 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，13(3)：162－167.

李岑，黄栋，吴亚东，等，2016. 贵阳地区燃煤型氟中毒病区儿童中毒与食物氟污染情况调查[J]. 中国地方病防治杂志，31(4)：361－363.

梁丽华，王新科，郑现明，等，2014. 西安市黑河水源地水环境健康分险评级[J]. 干旱区资源与环境，28(10)：140－144.

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

潘自平，刘新红，孟伟，等，2018. 贵阳中心区土壤氟的地球化学特征及其环境质量评价[J]. 环境科学研究，31(1)：87－94.

乔肖翠，赵兴茹，郭睿，等，2019. 典型岩溶区水环境中全氟化合物分布特征及风险评价[J]. 环境科学研究，32(12)：2148－2156.

苏伟，刘景双，王洋，2007. 第二松花江干流水环境健康风险评价[J]. 自然资源学报，22(1)：79－85.

孙树青，胡国华，王勇泽，等，2006. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. 安全与环境学报，6(2)：12－15.

徐中义，陈敬安，张阳，等，2014. 阿哈水库沉积物重金属形态分布及生态风险评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，39(3)：71－76.

王秋莲，张震，刘伟，2009. 天津市饮用水源地水环境健康分险评级[J]. 环境科学与技术，32(5)：187－190.

王宗爽，段小丽，刘平，2009. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究，22(10)：1164－1170.

张光贵，张屹，2017. 洞庭湖区城市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境化学，36(8)：1812－1820.

张迪，周明忠，熊康宁，等，2018. 遵义松林 Ni－Mo 矿区土壤 Cu、Zn 污染及农作物健康风险评价[J]. 地球与环境，46(6)：581－589.

赵伟，2017. 乌鲁木齐市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 中国环境监测，35(5)：63－66.

邹滨，曾永年，Benjamin F .Zhan，等，2009. 城市水环境健康风险评价[J]. 地理与地理信息科学，25(2)：94－98.

Srinivasan J T，Reddy V R，2009. Impact of irrigation water quality on human health：A case study in India[J]. Ecological Economics，68(11)：2800－2807.

USEPA，2000. Handbook for Non-cancer Health Effects Valuation[R]. Washington DC：U. S. Environmental Protection Agency.

USEPA，2005. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment [R]. Washington DC：Risk Assessment Forum.

WHO，2018. WATER，SANITATION AND HYGIENE STRATEGY 2018－2025

(责任编辑　张俊友)

Water Environment Health Risk Assessment of Aha Reservoir

ZHAO Yu-zhong[1], GUO Yun[2], YANG Cheng[2], WANG Zhi-kang[2], XIE Tai-ling[3]

(1.School of Ethnic-Minority Medicine, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, P.R.China;
2.College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, P.R.China;
3.Two Lakes and One Reservoir Environmental Protection Monitoring Station in Guiyang, Guiyang 551400, P.R.China)

Abstract: Aha reservoir, a typical reservoir in the karst area of southwestern China, is an important drinking water source. Good water quality supports the healthy development of local residents and is important to the local economy. In this study, we evaluated the potential health risks of chemical carcinogens and non-carcinogens in Aha reservoir (adult males, adult females and children) from drinking the water, aiming to provide a scientific reference for pollution control and water environment risk management. The levels of chemical carcinogens and non-carcinogens were determined at 12 sampling sites along 4 monitoring transects: (A) reservoir inlet 1; (B) water plant intake; (C) reservoir center; (D) reservoir inlet 2. Chemical pollutants measured included arsenic (As), cadmium (Cd), hexavalent chromium [Cr(VI)], mercury (Hg), lead (Pb), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), volatile phenol, cyanide, fluoride and ammonia nitrogen (NH_3-N). Health risks were evaluated using the environmental health risk assessment method recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA). Results show: (1) The total health risk of toxic substances in the reservoir to adult males, adult females and children was 10^{-3}, the highest risk level listed in the evaluation standard. Children had the highest health risk, followed by adult males and then adult females. (2) Both total and individual health risk posed by chemical carcinogens was five to six orders of magnitude higher than those of non-carcinogens. (3) The health risk of Cr(VI) was highest (99.8% proportion) and it was the primary contributor to health risk in the reservoir. (4) The degree of risk posed by health hazards at the four sampling sections was consistent for the three populations, following the order: reservoir inlet 2>reservoir inlet 1>water plant intake>reservoir center.

Key words: chemical carcinogens; non-carcinogens; health risk assessment; karst area; Aha reservoir