

集中式饮用水源地水环境质量变化及健康风险评估

——以湘潭市某水厂为例

袁宇^{1,2}, 谭璐³, 舒倩³, 陈丹丹³, 杨海君²

1. 湘潭中环水务有限公司, 湖南 湘潭 411100;
2. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南 长沙 410128;
3. 湖南农业大学植物保护学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为探究湘潭市某水厂饮用水源地水环境质量及其变化, 选取该水厂取水口 2013 年 1 月~2019 年 12 月水质月监测数据, 对该水厂取水口水体中铬(Cr⁶⁺)、砷(As)、镉(Cd)、三氯甲烷、四氯化碳、铅(Pb)、汞(Hg)、铜(Cu)、锌(Zn)、氟化物(F)、挥发酚、氰化物(CN)、氨氮(NH₃-N)、铁(Fe)、锰(Mn)、硝酸盐(NO₃⁻)、硒(Se)和石油类 18 种指标进行评价。结果表明: 该水厂水环境质量受粪大肠菌群、挥发酚、TP 和 Hg 污染, 其月均值分别超 II 类水标准为 100.00%、82.14%、44.05% 和 27.38%; 粪大肠菌群、重金属、无机污染物、氧平衡和有机污染物的年分担率依次为 32.93%、17.97%、16.92%、16.75% 和 15.43%; 水环境随时间变化方面, 粪大肠菌群、Hg、挥发酚、NH₃-N 和 TP 在各水期均出现超过 II 类水标准现象, 综合污染指数表明, 2013~2019 年处于重污染及严重污染的比例分别为 8.33%、16.67%、25.00%、0%、0%、8.33% 和 41.67%, 集中在 4~7 月; 健康风险方面, 2013~2019 年该水厂水环境要受化学致癌物影响, 以 Cr⁶⁺ 和 As 为主。

关键词: 集中式饮用水源地; 水环境; 致癌物质; 风险评估; 湘潭市

中图分类号: X824

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.03.021

Water environmental quality analysis and health risk assessment of centralized drinking water sources

——Taking a waterworks in Xiangtan City as an example

YUAN Yu^{1,2}, TAN Lu³, SHU Qian³, CHEN Dandan³, YANG Haijun²

1. Xiangtan Water Service Company Limited, Xiangtan 411100, China;
2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
3. College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to explore the water environment quality and its change of centralized drinking water sources of a waterworks in Xiangtan City, based on the monthly water quality monitoring data from January 2013 to December 2019, the 18 indexes of Cr⁶⁺, As, Cd, chloroform, carbon tetrachloride, Pb, Hg, Cu, Zn, F, volatile phenol, CN, NH₃-N, Fe, Mn, NO₃⁻, Se and petroleum were evaluated. Results showed that this waterworks was mainly polluted by volatile phenols, fecal coliform bacteria, Hg and TP. Their monthly average values exceed the water standard of Class II with a rate of 100.00%, 82.14%, 44.05%, 27.38% respectively. The annual sharing rate of fecal coliform bacteria, heavy metals, inorganic pollutants, oxygen balance, and organic pollutants were 32.93%, 17.97%, 16.92%, 16.75%, and 15.43%, respectively. As for the changes of the water environment over time, fecal coliform bacteria, Hg, volatile phenols, NH₃-N, and TP exceeded the water standards of Class II in each water period. The comprehensive pollution index showed that the proportions of heavy pollution and serious pollution from 2013 to 2019 were 8.33%, 16.67%, 25.00%, 0%, 0%, 8.33%, 41.67%, respectively, especially in the period from April to July. The health risk assessment indicated that the water environment was mainly affected by chemical carcinogens, especially Cr⁶⁺ and As.

Keywords: centralized drinking water sources; water environment; carcinogen; risk assessment; Xiangtan

CLC number: X824

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 湖南省县级以上集中式饮用水源地周边土壤环境质量调查(湘政函〔2016〕176号)

作者简介: 袁宇(1989-),男,硕士研究生。研究方向: 环境污染治理。E-mail: 415741054@qq.com

通信作者: 杨海君(1972-),男,教授。研究方向: 环境污染治理。E-mail: 1227677453@qq.com

引用格式: 袁宇,谭璐,舒倩,等.集中式饮用水源地水环境质量变化及健康风险评估——以湘潭市某水厂为例[J].环境保护科学,2022,48(3):132-139.

据世界卫生组织统计, 饮用水因卫生不达标引起疾病的占 80%, 尤其是 20% 的癌症疾病与饮用水不良相关^[1]。受工业和农业生产等影响, 大量的污染物进入饮用水核心区水体、土壤及区域内水生动植物中, 致使我国饮用水水源受到不同程度污染, 严重影响到水源地水环境质量和人体健康^[2]。所以, 水环境的健康风险研究受到社会的日益关注和重视。近几年, 国内外学者多见采用风险评价模型简单计算水体中污染物对人体健康状况的影响, 而未考虑评价过程中不确定性以及结果的可靠性^[3]。随着社会对饮用水水质的注意力转向于人体健康, 对饮用水水环境进行健康风险评价成为当前的热点。目前国内常采用美国环境保护署推荐的健康风险评价模型进行饮用水水环境健康风险评价^[4-6]。模型综合考虑了水环境中污染物危害程度、暴露水平和暴露时间等因子, 通过建立特定的污染物质计量与健康效应定量关系, 来定量评价污染物对健康存在的危害性, 使评价指标与人体健康紧密联系。同时还可确定研究地主要污染物及治理的优先顺序, 由此, 评价结果更具现实意义。

位于湘江边的湘潭市某水厂是湖南省 163 个主要的饮用水水源地之一, 其水环境质量直接影响到当地群众的人体健康。文献 [7-11] 对流经该水源地的上、下游其他断面水环境质量进行了安全性等研究, 但对该水源地水环境的各项监测仅限于污染物浓度是否符合国家饮用水水质标准, 重点放在污染物是否超标上, 而忽视了与人体健康密切相关的未超标低浓度有毒物质的危害。根据湘江断面水质监测数据显示, 该水源地水体中除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 存在超《地表水环境质量标准: GB3838—2002》标准限值Ⅲ类外, 其他毒性物质浓度均符合《地表水环境质量标准》饮用水要求^[12], 但水体对供应区域人群的身体是否存在潜在危害却不能直观反映出来。由于该水厂取水口处于湘江底泥重金属含量高风险区域, 底泥中的重金属威胁到水质安全^[13-14]。此外, 该取水口水环境质量除受周围土壤重金属污染影响外, 还受到上游水质等影响。毒性物质会在该水源地核心区累积, 毒性加倍, 水环境的危害性也更为严重。因此, 对该水厂饮用水水环境健康风险进行研究具有重要的现实意义。

本研究依据湘潭市某水厂取水口 2013 年 1 月~2019 年 12 月每月的水质监测数据, 采用美国环境保护署推荐的水环境健康风险评价模型, 对该水厂取水口水环境进行健康风险评价, 探究该水厂的水环境健康风险情况, 研究其时间变化特征, 以期对湘潭河地区水环境风险管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

该水厂位于湘潭市河东五里堆, 纬度 $27^{\circ}51'53.57''$, 经度 $112^{\circ}56'18.36''$, 原取水口位于长株潭城际铁路湘江特大桥下游约 50 m 处, 为确保取水口水质不受湘潭三桥交通干线穿越影响, 现取水口移至湘潭三桥上游 230 m 处, 水厂一期、二期工程分别始于 1978 年、1988 年, 自 1978 年建成投入使用以来, 为湘潭河地区数十万居民提供生活用水。为缓解河东地区用水压力和有效改善取水口水质, 该水厂分别于 2015 和 2018 年进行提质改造, 目前供水覆盖人口约 50 万。

1.2 水质检测指标及方法

水质监测参数及测定项目分别为: 生物参数(粪大肠菌群)、氧平衡参数(溶解氧、化学需氧量和生化需氧量)、常规参数(pH)、重金属参数(Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、Hg、 Cr^{6+} 、Pb、As 和 Se)、有机污染物参数(挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂、三氯甲烷和四氯化碳)和无机污染物参数(氨氮、总磷、高锰酸盐指数、氟化物、氰化物、氯化物、硫化物、硫酸盐和硝酸盐)。

按照《生活饮用水标准检验方法 感官性状和物理指标: GB/T 5750.4—2006》《生活饮用水标准检验方法 金属指标: GB/T 5750.6—2006》《生活饮用水标准检验方法 有机物指标: GB/T 5750.8—2006》的要求, 于 2013 年 1 月~2019 年 12 月每月分别采集湘潭某水厂取水口水样, 测定样品中的化学致癌物和非化学致癌物。野外采样及样品处理等参照《水域生态系统观测规范》^[15], 水样过 $0.45\ \mu\text{m}$ 膜, 按照《地表水环境质量标准: GB3838—2002》《水和废水监测分析方法(第四版)》^[16] 中规定的方法检测, 严格执行空白样、平行样、加标样和密码样等质控措施。

1.3 研究方法

综合污染指数法见文献 [17-18]; 污染物分担率见文献 [19]; 健康风险评价见文献 [20]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 和 Excel 2010 统计软件进行数据处理与统计分析, Graphpad Prime 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 湘潭市某水厂饮用水源地一级保护区水环境参数年度变化

湘潭市某水厂饮用水水源地一级保护区 2013~2019 年水环境参数年度变化, 见表 1。

表 1 湘潭市某水厂饮用水水源地水质参数年度变化

mg·L⁻¹

水质参数		2013 a	2014 a	2015 a	2016 a	2017 a	2018 a	2019 a	GB 3838—2002 (II)
常规参数	pH	7.68	7.64	7.84	7.83	7.87	7.92	7.78	6~9
氧平衡参数	DO	7.81	7.23	7.60	8.00	8.03	7.97	8.42	6
	COD	10.27	10.48	10.78	10.20	10.20	10.95	13.33	15
	BOD	2.29	2.08	2.01	2.12	ND	ND	2.02	3
重金属参数	Fe	0.19	0.14	0.20	0.19	0.17	0.17	0.20	0.3
	Mn($\times 10^{-2}$)	3.73	3.64	4.53	4.03	5.39	4.43	3.90	0.1
	Cu($\times 10^{-2}$)	0.33	0.35	0.28	0.33	1.73	ND	ND	1.0
	Zn($\times 10^{-2}$)	0.93	1.93	1.54	1.40	2.22	2.23	2.10	1.0
	Cd($\times 10^{-4}$)	7.21	4.68	6.22	3.52	4.92	5.34	3.91	0.005
	Hg($\times 10^{-5}$)	4.00	5.19	5.52	3.88	7.06	5.42	3.65	0.000 05
	Cr ⁶⁺ ($\times 10^{-2}$)	1.79	1.53	1.64	2.63	2.27	2.25	1.72	0.05
	Pb($\times 10^{-3}$)	0.58	1.29	2.29	1.82	2.45	2.00	1.65	0.01
	As($\times 10^{-3}$)	7.21	7.74	7.62	7.55	6.78	7.11	5.41	0.05
	Se($\times 10^{-4}$)	5.63	6.39	6.22	5.96	5.02	6.03	5.05	0.01
有机污染物参数	挥发酚($\times 10^{-3}$)	2.53	2.5	2.34	3.13	2.12	ND	ND	0.002
	石油类($\times 10^{-2}$)	2.20	3.50	ND	ND	ND	ND	3.64	0.05
	阴离子表面活性剂(LAS)	ND	0.10	ND	ND	ND	ND	ND	0.2
	三氯甲烷($\times 10^{-4}$)	17.60	1.38	2.74	1.71	1.11	7.34	19.60	0.06
	四氯化碳($\times 10^{-4}$)	0.85	1.70	0.25	2.40	0.96	0.79	0.95	0.002
无机污染物参数	NH ₃ -N	0.39	0.31	0.16	0.17	0.22	0.31	0.23	0.5
	TP	0.11	0.06	0.07	0.07	0.09	0.09	0.09	0.1
	高锰酸盐指数	2.07	2.20	2.19	2.13	2.09	2.17	1.89	4
	氟化物(以F计)	0.31	0.33	0.31	0.30	0.28	0.278	0.23	1.0
	氰化物($\times 10^{-3}$)	4.50	ND	ND	ND	ND	2.16	ND	0.05
	氯化物	14.18	15.30	11.95	8.49	9.50	10.24	9.08	250
	硫酸盐	26.60	30.74	27.08	22.72	25.19	25.89	26.4	250
	硝酸盐	2.26	2.26	1.85	1.64	1.47	1.65	1.42	10
硫化物($\times 10^{-2}$)	1.02	1.46	2.63	1.74	1.12	2.93	2.86	0.1	
生物参数	粪大肠菌群(CFU/L)	10 367	12 363	17 800	5 528	3 423	7 575	27 767	2 000

注：参考《地表水环境质量标准：GB 3838—2002》Ⅱ类集中式生活饮用水标准；ND为未检出。

表 1 可知，与《地表水环境质量标准：GB 3838—2002》Ⅱ类集中式生活饮用水标准的污染物限值相比，取水口水环境监测的 29 个指标中，除粪大肠菌群、挥发酚、Hg 和 TP 外，其他监测指标年均值均低于Ⅱ类集中式生活饮用水标准。其中超标年数最多的是粪大肠菌群，其次是挥发酚、Hg，最后是 TP，而在月均值超过Ⅱ类水标准的月份数上表现为挥发酚最多，其次是粪大肠菌群、Hg，最后是 TP，此外，NH₃-N 和 Fe 也是该水厂取水口水质的次要污染指标。有研究显示^[21]，在株洲、衡阳、湘潭和长沙 4 个城市中，位于湘潭市上游的株洲地区年平均污染指数最高，是湖南省最重要的工业城市，集中了大型的化工厂、冶炼厂，大量污水排入湘

江导致其水质严重恶化。由于重金属迁移性能强，对下游湘潭的水质造成了严重影响。2013~2019 年 NH₃-N 浓度总体下降，变化趋势比较平稳，含量得到了有效的控制。而 TP 除在 2013 年超Ⅱ类水标准外，其余年份变化平缓，这与 2013 年湖南省将湘江保护与治理工作确定为省政府“一号重点工程”，并开始实施“三年行动计划”密切相关^[22]。

2.2 湘潭市某水厂饮用水源地一级保护区水质参数的水期变化

根据湘江流域近 30 年的径流量与水位的变化规律，上一年度 11~12 月至当年度 1~2 月为枯水期、当年度 5~8 月为丰水期、当年度 3~4 月与 9~10 月为平水期^[23]，以此对该水厂饮用水源地一

级保护区各水期水质污染水平进行分析,见表2。

表2可知,在不同水期污染物的含量不一样,Cu、Cr⁶⁺和BOD₅的大小顺序为:丰水期>平水期>枯水期;As、Pb和四氯化碳的大小顺序为:丰水期>枯水期>平水期;Zn、Cd的大小顺序为:枯水期>丰水期>平水期;DO、NH₃-N的大小顺序为:枯水期>平水期>丰水期;三氯化碳的大小顺序为:平水期>丰水期>枯水期;pH值总体变化不大,处于7.53~7.97之间;DO值表现为丰水期值最低,这是因为丰水期在夏季,水温越高,水中盐度越大,DO越低^[24]。另外,丰水期也是区域内农业活动最频繁时期,取水口上游及周边大量有机污染物进入水体,而有机污染物降解需要耗费一定溶解氧,这也是造成水体中氧含量偏低的主要原因之一^[25];BOD₅

在各水期较稳定,稳定在2 mg/L左右;COD在2019年丰水期出现超过Ⅱ类水标准情况;挥发酚和阴离子表面活性剂浓度较稳定;硝酸盐、氯化物等无机污染物在枯水期含量最高,水体中丰水期TP含量比其他水期高,这主要是强降雨对土壤的淋滤作用所致^[25]。水体中枯水期NH₃-N浓度相比其他水期有所升高,这是因为枯水期水流动性较差,NH₃-N降解也趋缓,受上游来水污染影响大,这与刘文珺^[25]的研究结果一致。

从各水期水质参数超标情况看,该水厂取水口水体中仅粪大肠菌群、Hg、挥发酚、NH₃-N和TP出现超Ⅱ类水标准情况,所以着重分析这5个指标在2013~2019年枯水期、平水期和丰水期的变化特征,见图1。

表2 湘潭市某水厂饮用水水源地水环境参数水期变化

水质参数	mg·L ⁻¹																							
	2013 a			2014 a			2015 a			2016 a			2017 a			2018 a			2019 a					
	枯	平	丰	枯	平	丰	枯	平	丰	枯	平	丰	枯	平	丰	枯	平	丰	枯	平	丰			
常规参数																								
pH	7.57	7.70	7.77	7.69	7.69	7.53	7.84	7.85	7.84	7.85	7.85	7.78	7.88	7.90	7.83	7.89	7.89	7.97	7.81	7.69	7.84			
氧平衡参数																								
DO	9.30	7.90	6.24	8.59	7.13	5.95	8.97	7.42	6.41	9.71	7.68	6.62	9.37	7.95	6.77	9.70	8.07	6.14	9.61	8.36	7.28			
BOD	2.49	2.38	2.00	2.00	2.23	2.00	2.03	2.01	2.00	2.18	2.00	2.17	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.05	2.00			
COD	10.00	10.80	10.00	10.13	11.30	10.00	10.60	11.48	10.28	10.00	10.00	10.60	10.48	10.00	10.13	11.83	10.88	10.15	12.00	12.00	16.00			
重金属参数																								
Fe	0.101	0.275	0.202	0.097	0.100	0.212	0.197	0.138	0.263	0.209	0.150	0.220	0.110	0.217	0.157	0.204	0.152	0.147	0.089	0.242	0.255			
Mn	0.042	0.035	0.036	0.039	0.021	0.050	0.054	0.036	0.046	0.047	0.035	0.039	0.055	0.058	0.050	0.053	0.046	0.034	0.030	0.057	0.030			
Cu	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002	0.005	0.003	0.002	0.003	0.004	0.003	0.004	0.012	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020			
Zn	0.007	0.010	0.011	0.032	0.011	0.015	0.016	0.013	0.018	0.017	0.013	0.012	0.022	0.024	0.021	0.024	0.020	0.023	0.020	0.020	0.023			
As(×10 ⁻³)	6.04	7.91	7.68	7.68	8.15	7.40	6.86	7.71	8.27	9.98	6.36	6.32	7.03	6.90	6.41	6.20	6.98	8.15	5.69	5.11	5.43			
Se(×10 ⁻⁴)	7.80	4.38	4.73	8.25	5.38	5.55	7.40	5.73	5.53	6.30	5.78	5.80	5.03	5.05	4.98	5.65	6.35	6.08	5.65	4.43	5.08			
Hg(×10 ⁻⁵)	5.10	4.20	2.70	5.00	5.10	5.48	3.33	5.45	4.78	3.30	5.20	3.13	7.23	5.83	8.13	5.95	5.30	5.00	3.68	3.55	3.73			
Cd(×10 ⁻⁴)	8.10	5.73	7.80	4.43	4.58	5.05	8.08	4.63	5.95	4.95	3.05	2.55	5.50	4.28	4.98	6.40	4.55	5.08	4.60	4.43	2.70			
Cr ⁶⁺	0.013	0.027	0.015	0.012	0.018	0.015	0.018	0.010	0.022	0.023	0.015	0.041	0.017	0.028	0.024	0.021	0.020	0.026	0.018	0.019	0.015			
Pb(×10 ⁻³)	0.27	0.95	0.51	0.8	1.41	1.66	3.02	1.13	2.72	2.28	1.33	1.84	9.25	1.72	4.70	2.15	1.18	2.68	1.62	2.13	1.22			
有机污染物																								
挥发酚	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002			
阴离子表面活性剂	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1			
三氯甲烷(×10 ⁻⁴)	18.7	31.8	2.25	2.18	0.30	1.65	2.33	5.60	0.30	4.53	0.30	0.30	0.30	2.73	0.30	6.20	9.98	5.85	2.95	17.6	38.2			
四氯化碳	1.30	0.90	0.35	0.68	1.93	2.50	0.20	0.20	0.35	1.50	0.23	5.48	0.50	0.20	2.18	0.73	0.65	1.00	0.60	0.80	1.45			
石油类	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04			
无机污染物																								
硫酸盐	34.96	22.48	22.36	41.49	27.38	23.37	30.54	28.27	22.45	25.20	22.95	20.02	30.91	25.32	19.33	29.86	22.73	25.07	32.99	25.16	21.25			
氯化物	19.27	10.43	12.85	19.94	12.49	13.48	14.05	11.72	10.08	8.84	9.43	7.19	11.72	9.62	7.18	10.68	9.42	10.62	13.37	8.53	5.35			
氟化物	0.36	0.25	0.30	0.40	0.30	0.29	0.36	0.29	0.27	0.33	0.32	0.25	0.33	0.28	0.24	0.29	0.26	0.28	0.27	0.21	0.20			
氰化物	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002			
硝酸盐	2.86	1.80	2.11	2.66	2.00	2.12	1.85	1.89	1.81	1.68	1.67	1.56	1.76	1.36	1.30	1.61	1.40	1.95	1.61	1.32	1.34			
高锰酸盐指数	2.23	2.16	1.84	2.04	2.32	2.26	1.86	2.28	2.44	2.11	2.14	2.15	2.01	1.87	2.39	2.06	2.14	2.30	1.78	1.91	1.98			
氨氮	0.65	0.39	0.14	0.47	0.28	0.18	0.11	0.18	0.20	0.24	0.10	0.17	0.23	0.24	0.18	0.26	0.44	0.25	0.30	0.12	0.27			
硫化物	0.014	0.008	0.009	0.011	0.017	0.016	0.018	0.010	0.051	0.012	0.011	0.030	0.007	0.015	0.012	0.017	0.019	0.052	0.025	0.029	0.032			
总磷	0.060	0.170	0.110	0.059	0.064	0.065	0.060	0.058	0.098	0.083	0.058	0.073	0.086	0.087	0.106	0.089	0.072	0.119	0.096	0.089	0.091			
生物参数																								
粪大肠菌群	9100	12250	9750	6863	6725	23500	22075	14075	17250	3925	3835	8825	1170	4975	4125	4700	7250	10775	5800	14750	62750			

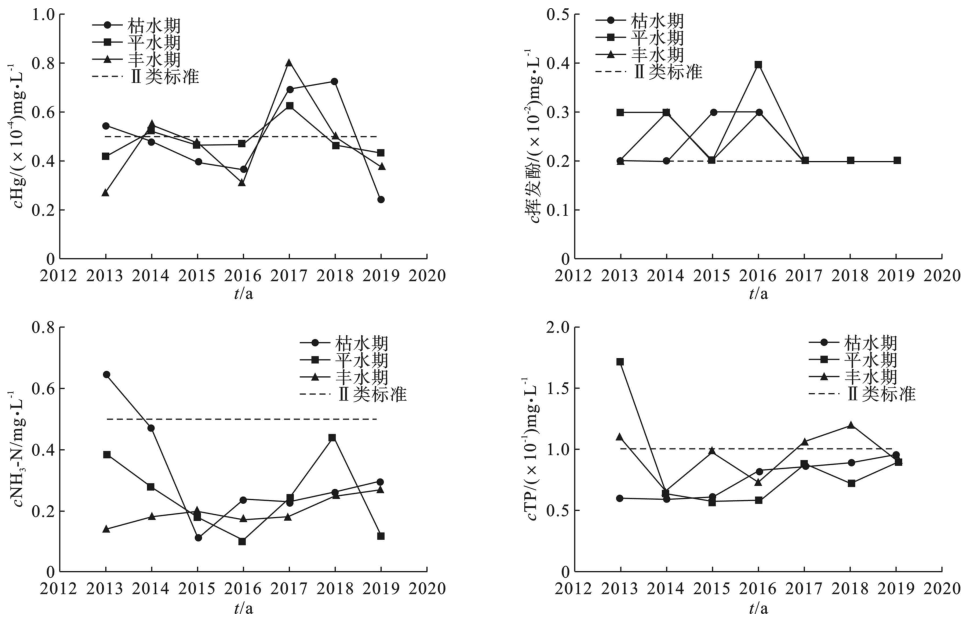


图 1 Hg、挥发酚、NH₃-N 和 TP 浓度年度水期变化特征

图 1 可知, 2013 年 Hg 浓度在枯水期出现超标, 为 II 类水标准的 1.09 倍; 2014 年 Hg 浓度在平水期和丰水期出现超标情况; 2015 年和 2016 年各水期 Hg 浓度均未超标; 2017 年 Hg 在 3 个水期的浓度均超标; 2018 年枯水期和丰水期 Hg 浓度超标, 且 3 个水期的 Hg 浓度波动较大; 2019 年 3 个水期的 Hg 浓度均未超 II 类水标准。各水期挥发酚浓度变化表现较平稳, 在 2013 ~ 2019 年均出现超 II 类水标准情况。NH₃-N 浓度仅在 2013 年枯水期出现超标, 其余年份各水期 NH₃-N 浓度均未超 II 类水标准。在 2013 年 TP 浓度在平水期和丰水期出现超 II 类水标准; 2014 年和 2015 年 TP 浓度在 3 个水期均未超标; 2017 年和 2018 年的丰水期 TP 浓度超

标; 2019 年 3 个水期的 TP 浓度均未超标。粪大肠菌群除在 2017 年枯水期未超 II 类水标准外, 其余年份各水期均出现超标情况, 丰水期尤为严重。这主要是受降雨冲刷的影响, 降雨导致大量生活污水进入自然水体, 增大了水体中粪大肠菌群含量。

2.3 湘潭市某水厂饮用水源地水环境污染水平变化

2.3.1 水环境单因子污染指数变化 湘潭市某水厂饮用水水源地 2013 ~ 2019 年水环境中躯体毒物质 (Fe、Mn、Cu、Zn、挥发酚、氟化物、氰化物、Se、Hg、Pb、硝酸盐、NH₃-N 和石油类) 和基因毒物质 (Se、Cd、Cr⁶⁺、三氯甲烷和四氯化碳) 单因子污染指数, 见图 2。

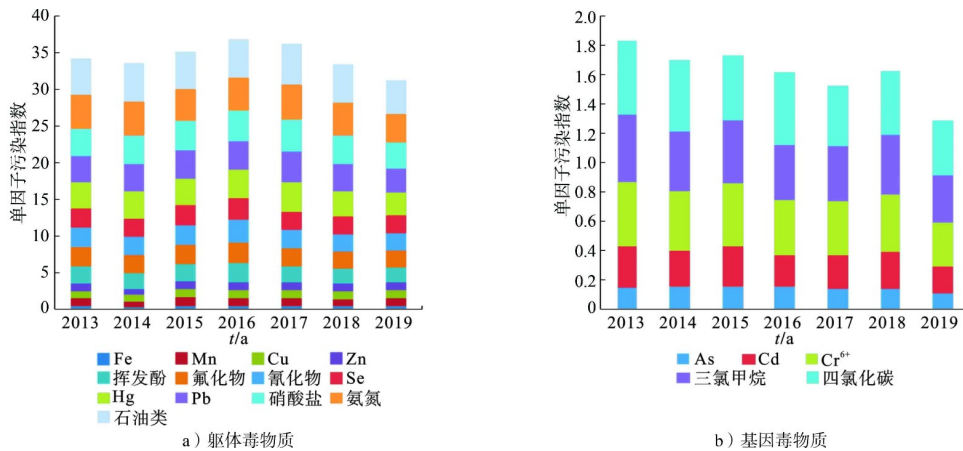


图 2 湘潭市某水厂饮用水水源地水环境单因子污染指数年度变化

图 2 可知, 基因毒物质中, As 呈上升-下降-上升-下降变化趋势, 而三氯甲烷则与之相反; 四氯化碳的单因子污染指数在 2014 ~ 2018 年呈现逐年下

降趋势, 但在 2019 年出现反弹; Cr⁶⁺ 的单因子污染指数呈下降-上升-下降变化趋势, 且 Cr⁶⁺ 在所有基因毒物质中污染指数最高; Cd 的污染指数变化趋

势不明显,处于波动状态。躯体毒物质中,Zn、Se、Hg和Pb单因子污染指数呈上升-下降-上升-下降变化趋势;挥发酚和氯化物的污染指数在2013~2014年小幅上升,而在2014~2019年呈逐年下降趋势,且挥发酚的单因子污染指数下降明显;氰化物单因子污染指数无明显变化;硝酸盐和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的污染指数呈下降-上升-下降趋势;石油类的污染指数在2013~2018年呈逐年上升趋势,而在2019年有所下降。

2.3.2 水环境综合污染指数变化 湘潭市某水厂水体中2013~2019年5种基因毒物质、13种躯体毒物质及粪大肠菌群的综合污染指数,见图3。

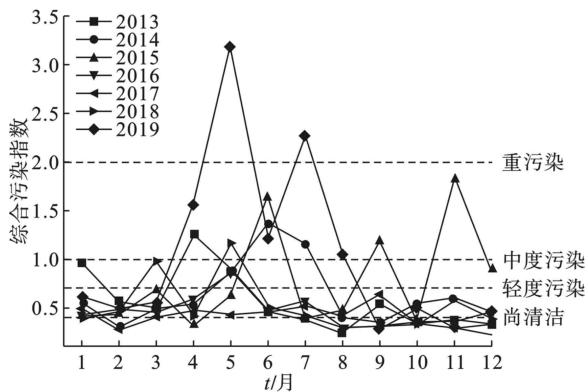


图3 湘潭市某水厂饮用水源地水环境综合污染指数变化

图3可知,除2016和2017年外,其余年份均出现重污染情况,其中2019年5月和7月最为严重。从月综合污染指数等级的分布情况来看,处于重污染和严重污染的月份数所占比例为11.90%和2.38%。

2013~2019年该水厂饮用水源地水环境综合污染指数月均值分别为0.57、0.64、0.77、0.47、0.42、0.52和1.02,呈上升-下降-上升的趋势。从每年每月水环境综合污染指数等级频次看,2013~2019年水环境综合污染指数处于重污染和严重污染等级月份数分别为1、2、3、0、0、1和5个,集中于4~7月。另外,2019年5月和7月的水环境综合污染指数明显偏大,这主要受2019年5月和7月降雨量明显偏大影响所致。

2.4 饮用水源地水环境污染物年分担率变化

2013~2019年湘潭市某水厂饮用水源地水环境污染物的年分担率,见图4。

图4可知,该水厂饮用水源地水环境中氧平衡与重金属分担率在2013~2015年呈下降趋势,

在2015~2017年呈上升趋势,在2017~2019年又呈下降趋势,而微生物年分担率与之相反,在2017~2019年呈上升趋势;有机污染物年分担率在2016~2019年呈逐年下降趋势,说明取水口水体中的有机污染物危害在降低。综合7年的年均分担率来看,粪大肠菌群的分担率最高,为32.93%,其次为重金属,分担率为17.97%,有机污染物分担率最低,为15.43%。由此可见,该水厂水体污染属于病原微生物污染。总体来看,水环境中氧平衡参数、重金属参数、无机污染物参数与有机污染物参数年分担率都下降,而粪大肠菌群年分担率高,说明取水口水体受到了较严重的生活污水污染^[10]。粪大肠菌群分担率高,除与当地气温高、湿度大和环境粪大肠菌群本底偏高外,还与当地的污染源分布有关。取水口周边及上游的农田径流污染源及部分未用于农灌的居民生活污水、畜禽养殖废水随地表径流汇入水源地,导致粪大肠菌群分担率高。

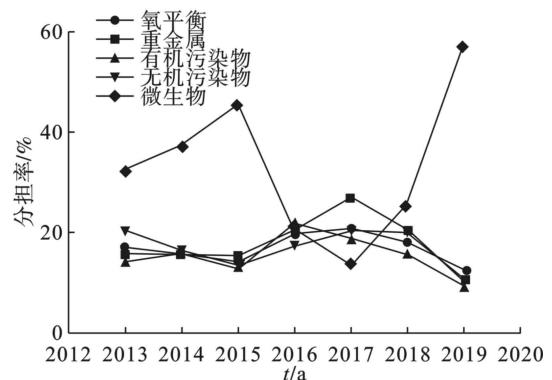


图4 湘潭市某水厂饮用水源地水环境污染物的年分担率随时间变化

2.5 湘潭市某水厂饮用水源地水环境健康风险评估

湘潭市某水厂饮用水源地水环境通过饮水途径所引起的平均个人年致癌健康风险、非致癌健康风险和总健康风险,见表3。

选取了具有代表性的化学致癌物和非致癌物进行分析得出,2013~2019年水环境中化学致癌物的健康风险按大小顺序排列为 Cr^{6+} >As>Cd。根据ICRP推荐的化学致癌物经饮水途径的最大可接受风险水平为 5.0×10^{-5} ,2013~2019年化学致癌物质健康风险(R^c)均已超过最大可接受风险水平。2013~2019年水环境中非致癌物的健康风险按大小顺序排列为氟化物>Cu>Pb> $\text{NH}_3\text{-N}$ >挥发酚>Zn>氰化物>挥发酚。Cu等8个非致癌物质经饮

水途径的健康风险(R^a)均超过 ICRP 推荐的化学非致癌物经饮水途径的最大可接受风险水平。表 3 还可知, 2013 ~ 2019 年该水厂饮用水水源地水环境总健康风险(R^T)呈先升后降趋势, 均超出 ICRP 的最大可接受风险水平。结果表明, 化学致癌物个人年风险严重超标, 当地政府应加以重视, 减少水源

地周边化学致癌物质的进入, 确保饮水安全。另外, 本研究的饮用水健康风险评价未涉及到微生物和放射性水质指标的影响^[26-28], 存在一定的局限性, 同时, 本文重金属暴露途径只考虑了通过饮水途径, 而未涉及通过皮肤接触、空气吸入和食物摄入等其他途径^[29]。

表 3 湘潭市某水厂水环境经饮水途径的健康危害的平均个人年风险

化学物质		2013 a	2014 a	2015 a	2016 a	2017 a	2018 a	2019 a
化学致癌物质	Cd($\times 10^{-6}$)	1.97	1.28	1.7	0.96	1.35	1.46	1.07
	Cr ⁶⁺ ($\times 10^{-4}$)	3.26	2.78	2.99	4.77	4.11	4.08	3.13
	As($\times 10^{-5}$)	4.85	5.21	5.12	5.08	4.56	4.78	3.64
	R ^c ($\times 10^{-4}$)	3.76	3.31	3.52	5.28	4.58	4.58	3.5
非致癌物质	Cu($\times 10^{-5}$)	1.47	1.54	1.25	1.47	7.59	8.8	8.8
	Zn($\times 10^{-6}$)	0.68	1.42	1.13	1.03	1.63	1.63	1.54
	Pb($\times 10^{-5}$)	0.9	2.03	3.59	2.85	3.85	3.15	2.6
	Hg($\times 10^{-6}$)	2.93	3.81	3.31	2.84	5.18	3.97	2.68
	NH ₃ -N($\times 10^{-6}$)	8.88	6.97	3.69	3.84	5.28	7.13	5.61
	氟化物($\times 10^{-4}$)	1.13	1.21	1.13	1.1	1.03	1.02	0.84
	氰化物($\times 10^{-6}$)	1.44	1.19	1.19	1.19	1.19	1.28	1.19
	挥发酚($\times 10^{-7}$)	5.57	5.67	5.15	6.88	4.66	4.4	4.4
	R ^a ($\times 10^{-4}$)	1.51	1.71	1.71	1.62	2.32	2.36	2.1
	R ^T ($\times 10^{-4}$)	5.27	5.02	5.23	6.91	6.9	6.93	5.6

注: R^c , 化学致癌物经饮水途径的平均个人致癌年风险; R^a , 非致癌物经饮水途径的平均个人致癌年风险; R^T , 总健康风险。

3 结论

(1) 2013 ~ 2019 年该水厂饮用水源地水环境质量整体有所改善, 水环境污染水平呈无规律性变化, 主要污染物为粪大肠菌群, 其次是挥发酚、Hg 和 TP。因流域自 2004 年开始, 生活废水排放量超过工业废水排放量, 且其占废水排放总量的比重加大, 所以必须强化生活污水治理。

(2) 该水厂取水口监测的 28 个指标中, Hg、挥发酚、NH₃-N、TP 和粪大肠菌群在 3 个水期超 II 类水标准, Hg 浓度水期变化由大到小顺序为: 枯水期 > 平水期 > 丰水期, Hg 浓度的年际变化由大到小顺序为: 2017 > 2018 > 2014 > 2015 > 2013 > 2016 > 2019; 挥发酚浓度水期变化由大到小顺序为: 平水期 > 丰水期 = 枯水期; NH₃-N 仅在 2013 年的枯水期出现超标, 其水期变化由大到小顺序为: 枯水期 > 平水期 > 丰水期, 年际污染程度由大到小顺序为: 2013 > 2014 = 2018 > 2019 > 2017 > 2016 > 2015; TP 浓度的水期

变化由大到小顺序为: 丰水期 > 平水期 > 枯水期, 而年际变化由大到小顺序为: 2013 > 2017 = 2018 > 2019 > 2015 > 2016 > 2014; 粪大肠菌群的水期污染由大到小顺序为: 丰水期 > 平水期 > 枯水期, 年际变化由大到小顺序为: 2019 > 2015 > 2014 > 2013 > 2018 > 2016 > 2017。

(3) 该水厂饮用水源地水环境中粪大肠菌群、重金属、无机污染物、氧平衡、有机污染物的年分担率依次降低, 分别为 32.93%、17.97%、16.92%、16.75% 和 15.43%。

(4) 2013 ~ 2019 年该水厂饮用水源地水环境总健康风险分别为 5.27×10^{-4} 、 5.02×10^{-4} 、 5.23×10^{-4} 、 6.91×10^{-4} 、 6.90×10^{-4} 、 6.93×10^{-4} 和 5.60×10^{-4} , 均高于 ICRP 的最大可接受风险水平。水环境总健康风险主要来源于化学致癌物质。湘江流域属于产粮重要区域, 化学肥料的使用必然带来湘江水体的污染, 所以必须加强农业非点源污染治理。

参考文献

- [1] 张光贵, 张屹. 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*, 2017, 36(8): 1812–1820.
- [2] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 发达地区城市空间水环境效应与影响机理研究——以浙江省宁波市区为例[J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 776–785.
- [3] 赵锋霞. 基于不确定性参数的水环境健康风险评价方法及应用[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2013.
- [4] 高文琪, 丁文广, 吴守霞, 等. 天水市 2013—2017 年饮用水源地水质分析及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(7): 1821–1831.
- [5] 鲁冬梅, 张翠萍, 王玉芬, 等. 玉溪市红塔区飞井海水库饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(2): 345–352.
- [6] 赵宇中, 郭云, 杨成, 等. 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[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(3): 115–122.
- [7] 李菊红. 湘江湘潭段水源地水质安全性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [8] 刘韵琴. 湘江长株潭段水资源重金属污染修复及开发潜力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [9] 刘叶叶, 毛德华, 杨家亮, 等. 1990—2016 年湘江干流水质变化特征及影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(4): 820–827.
- [10] 陈明霞, 熊贵耀, 张佳鹏, 等. 湘江流域水质综合评价及其时空演变分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 83–90+104.
- [11] 刘叶叶. 湘江流域水质特征及水生态补偿标准研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020.
- [12] 湖南省生态环境厅. 湖南省 2012 年 9 月地表水水质状况[EB/OL]. [2020-12-10]. http://sthjt.hunan.gov.cn/sthjt/xxgk/zdly/hjjc/hjzl/shjz/db/201211/t20121116_4663579.html.
- [13] 刘锦军. 湘江底泥重金属污染特征研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- [14] 赵宏英. 湘江株洲至长沙段底泥重金属的分布与水质预测模型[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [15] 中国生态系统网络科学委员会. 水域生态系统观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 210–213.
- [17] 王国重, 李中原, 张继宇, 等. 小浪底水库水环境质量评估[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 2013–2020.
- [18] 郑灿, 杨子超, 邱小琼, 等. 宁夏引黄灌区排水沟水环境质量及其影响因素[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 74–79.
- [19] 帅红, 李景保, 蒋聪, 等. 湘江长沙综合枢纽蓄水初期长沙段水环境参数的变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(12): 2085–2093.
- [20] 吴佳, 纪雄辉, 朱坚, 等. 长株潭地区水环境重金属污染健康风险评价[J]. *湖南农业科学*, 2018(1): 64–68.
- [21] 张棋. 湖南省水环境时空变化及其影响因素研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [22] 胡东滨, 蔡洪鹏, 陈晓红, 等. 基于证据推理的流域水质综合评价法——以湘江水质评价为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(11): 2020–2031.
- [23] 唐敬如. 湘江湘潭段水环境容量的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [24] 武力, 刘慧莹, 朱文杰, 等. 湘江流域永州段水质和水文气象因素变化规律及其相关分析[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(4): 96–105.
- [25] 刘文珺. 湘江流域水量水质特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [26] BURNET J B, PENNY C, OGORZALY L, et al. Spatial and temporal distribution of *Cryptosporidium* and *Giardia* in a drinking water resource: Implications for monitoring and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 1023–1035.
- [27] BALDERRAMA-CARMONA A P, GORTÁRES-MOROYOQUI P, ALVAREZ-VALENCIA L H, et al. Quantitative microbial risk assessment of *Cryptosporidium* and *Giardia* in well water from a native community of Mexico[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2015, 25(5): 570–582.
- [28] 李莹莹, 张永江, 邓茂, 等. 武陵山区典型生态保护城市饮用水源地水质人体健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(2): 282–290.
- [29] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 156–165.