

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018102805

龙睿, 许云海, 刘亚宾, 等. 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水质变化及其评价[J]. 环境化学, 2019, 38(8): 1882-1890.

LONG Rui, XU Yunhai, LIU Yabin, et al. Change of water quality and evaluation of Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha Integrated Hub[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(8): 1882-1890.

长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水质变化及其评价*

龙睿¹ 许云海² 刘亚宾² 肖金^{1**}

(1. 湖南省环境监测中心站, 长沙, 410014; 2. 湖南农业大学植物保护学院, 长沙, 410128)

摘要 为了解长沙综合枢纽蓄水后对望城饮用水源地水环境的影响,于2014年1月—2017年12月测定了望城饮用水源地监测断面水体中化学需氧量等23个指标,运用综合指数法、污染物分担率、营养状态综合指数法分析了长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境中6类水环境参数的变化,结果表明,长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境质量整体呈下降趋势,水环境污染水平呈逐年上升的趋势,主要受NH₃-N、TP、生化需氧量、As、Pb和粪大肠菌群影响;无机污染物中TN、TP、COD_{Mn}营养物质的综合营养状态指数在2015—2017年呈上升趋势,与污染物超标状态、综合污染指数和污染物分担率变化趋势一致。健康风险评估发现,望城饮用水源地2014—2017年水体总健康风险分别为 7.93×10^{-5} 、 4.89×10^{-5} 、 3.80×10^{-5} 、 3.63×10^{-5} ,呈逐年下降趋势,仅2014年高于国际辐射防护委员会(ICRP)的最大可接受风险水平。总体上讲,降低饮用水源地水环境中致癌物质Cr⁶⁺与As以及非致癌物质中NH₃-N与氟化物能有效地控制饮水途径的总健康风险。研究结果对促进长沙综合枢纽库区水环境安全进一步提升提供了科学指导。

关键词 望城饮用水源地, 水环境质量, 长沙综合枢纽工程库区, 健康风险。

Change of water quality and evaluation of Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha Integrated Hub

LONG Rui¹ XU Yunhai² LIU Yabin² XIAO Jin^{1**}

(1. Environmental Monitoring Station of Hunan Province, Changsha, 410014, China;

2. College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China)

Abstract: In order to assess the impact of water storage in Changsha Integrated Hub on the water environment of Wangcheng drinking water source, 23 indicators including chemical oxygen demand (COD) in the water body of Wangcheng drinking water source were monitored from January 2014 to December 2017. The changes of six types of water environmental parameters in Wangcheng drinking water source after water storage in Changsha Integrated Hub were analyzed by comprehensive index method, pollutant sharing rate and comprehensive index of nutritional situation. Results showed that the water environmental quality of Wangcheng drinking water source was declining, and the water environmental pollution was increasing year by year, mainly owing to the pollutants of NH₃-N, TP, biochemical oxygen demand, As, Pb and fecal coliforms. The comprehensive nutritional index of TN, TP and COD_{Mn} showed an upward trend during 2015—2017, which was consistent with the trends of contaminant exceeding the standard, comprehensive pollution index and pollutant sharing

2018年10月28日收稿(Received: October 28, 2018).

* 湘江水环境重金属水质目标管理与检测技术研究资助。

Supported by Study on Target Management and Detection Technology of Heavy Metals in Water Environment of Xiangjiang River.

** 通讯联系人, E-mail: 33235487@qq.com

Corresponding author, E-mail: 33235487@qq.com

rate. The health risk assessment indicated that total health risks of Wangcheng drinking water source were 7.93×10^{-5} , 4.89×10^{-5} , 3.80×10^{-5} , 3.63×10^{-5} in 2014—2017, showing a decreasing trend. And only in the year 2014 the risk was higher than the maximum acceptable level for the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Generally, it is effective to control the overall health risks of the drinking water by reducing the carcinogenic substances such as Cr^{6+} and As and the non-carcinogenic $\text{NH}_3\text{-N}$ and fluoride in the drinking water source. The results achieved in this study could provide scientific guidance for promoting water environmental security in Changsha Integrated Hub.

Keywords: drinking water source, water environment quality, Changsha integrated water hub, health risk.

堤坝在蓄水、调水方面起着非常重要的作用,但水利大坝筑成后,会拦腰截断河流,其运行后巨大的调度功能改变了上下游河道天然水文循环和泥沙输移过程,同时也触发了水环境及水文情势的变化^[1-3].因而关于水利工程运行对江河的综合影响,一直受到国内外学者的高度关注^[4-6],尤其是修建水利大坝后的饮用水安全问题.长沙综合枢纽工程作为湘江 8 个梯级枢纽工程之一,类似于三峡工程建设^[7-8].蓄水后也会对上游湘江流域内生态环境和水环境产生相应影响.基于此,汪仁^[9]从维护库区生态安全保护角度开展了湘江长沙综合枢纽库区生态安全警情变化研究,指出了 2006—2015 年,库区生态安全警情等级呈上升趋势,好转趋势明显.而李晓鹏^[10]则以保护湘江长沙综合枢纽库区水环境安全为目的,研究了库区水环境承载力.综合评价发现长沙综合枢纽的运行促使库区水生态系统更为健康,水环境承载力稳步提升.基于长沙综合枢纽蓄水后改变了河水动力学特征,胡旷成等^[11]、张蕊琪等^[12]开展了长沙综合枢纽工程蓄水后湘江长沙段水质的现状研究,发现长沙段水体中溶解氧含量变化不大,总氮、化学需氧量和氨氮浓度不同程度上升,而总磷含量下降.为进一步了解长沙综合枢纽工程蓄水后湘江水环境的污染程度变化,帅红等^[13]分析发现湘江长沙综合枢纽蓄水初期,长沙段水量的剧增对水体污染物起到了一定的稀释、降解与输移作用,导致长沙段 5 个监测断面 9 个检测项目的综合污染指数等级、污染物分担率,以及营养物含量等级在时空尺度上均呈不同程度的下降趋势.但未见长沙综合枢纽蓄水对具体某个饮用水水源地水环境影响的研究报道.

为查明长沙综合枢纽全蓄水后水环境变化状况,以距离长沙综合枢纽工程最近的望城饮用水水源地 2014—2017 年水体为研究对象,每月定期进行水质监测,开展了长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水水源地水质变化及其评价研究,对比分析了蓄水前后水质变化情况,以期找出水质变化的规律,为长沙综合枢纽上游饮用水取水与治污相结合提供科学指导.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

长沙市位于湖南省东部偏北,湘江下游和长浏盆地西缘,属亚热带季风湿润气候.长沙市地区经济发展迅速,2011 年长沙市地区生产总值仅 5619.33 亿元,而到 2014 年与 2017 年,长沙市地区生产总值分别达到 7824.81 亿元、10535.51 亿元.湘江是湖南省最大的河流,全长 817 km,流域面积 92300 km²,其中流经长沙全境为 75 km,长沙市区内约 25 km,河宽为 500 m 至 1000 m,湘江流域长沙段枯水期为上一年的 11—12 月至本年度 2 月,丰水期为 5—8 月,平水期为 3—4 月与 9—10 月,丰水期平均流量为 3414 m³·s⁻¹,枯水期为 819.8 m³·s⁻¹,其年平均降水量 1400.6 mm,流域水系覆盖 614.74 万人.

长沙水利枢纽 2012 年 10 月二期工程完工,2013 年 12 月正式蓄水,2014 年 1 月工程全蓄水后湘江水位长期保持 29 m 以上.其主要功能是保障长株潭城市的生产生活用水和改善长沙至株洲段航道通航条件,以及兼水力发电等功能.处于长沙水利枢纽工程库区的望城饮用水水源地,位于长沙市望城区旺旺东路附近,距离水利枢纽工程仅 2.9 km.供水服务区约 30 km²,服务人口 20 余万,取水口(N:28.357160°;E:112.854731°)位于湘江长沙段下游,属湘江一级饮用水水源保护区.望城饮用水水源地

一、二级水域、陆域保护区均以非点源污染为主,无点源污染.区域内以红壤为主,同时也分布有黄壤、黄棕壤、山地草甸土三类,土壤多为弱酸性的地带性红壤,覆盖流域土地总面积的 70% 左右.

1.2 数据来源及监测指标

数据来源于湖南省生态环境厅、长沙市环境监测中心站.选择最能反映望城饮用水水源地水质基本特性参数和主要污染参数.水质监测参数及测定项目分别为:常规参数(pH)、氧平衡参数(溶解氧、化学需氧量、生化需氧量)、重金属参数(Cd、Hg、Cr⁶⁺、Ni、Pb、As、Cu、Zn)、有机污染物参数(苯、挥发酚、滴滴涕、石油类)、无机污染物参数(氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐、氟化物、氰化物)、生物参数(粪大肠菌群).

1.3 研究方法

1.3.1 综合污染指数法

用均值型综合污染指数法对饮用水源地监测断面的主要污染项目作为水体污染评价指数均值 P , 其计算式为^[14]:

$$P_i = \frac{c_i}{s_i} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中, P 为综合污染指数均值; n 为评价参数数量; P_i 为单项污染指数; c_i 为 i 项污染物的监测值; s_i 为第 i 项污染物的水质标准值(Ⅱ类集中式生活饮用水标准).

综合水质分级判定标准如表 1 所示.

表 1 综合水质分级判定标准

Table 1 Criteria for comprehensive classification of water quality

综合污染指数 P 值范围 Comprehensive pollution index P value range	水质状况 Water quality status	分级依据 ^[15] Classification standard
$P \leq 0.20$	清洁	多数项目未检出,个别项目检出,但在标准内
$0.20 < P \leq 0.40$	尚清洁	检出值在标准内,个别项目接近或超标
$0.40 < P \leq 0.70$	轻度污染	个别项目检出,且超标
$0.70 < P \leq 1.0$	中度污染	有两项指标检出值超标
$1.0 < P \leq 2.0$	重污染	相当部分指标检出值超标
$2.0 < P$	严重污染	相当部分指标检出值超标数倍或几十倍

1.3.2 污染物分担率

污染物分担率计算公式为^[13]:

$$k_i = \frac{P_i}{P} \times 100\% \quad (3)$$

式中, k_i 为 i 项污染物在诸污染物中的污染分担率.

1.3.3 营养状态评价

营养状态评价采用指数法,评价项目为总磷、高锰酸盐与总氮 3 项,计算式为^[16]:

$$TLI = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (4)$$

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (5)$$

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.6241 \ln TP) \quad (6)$$

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (7)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln COD_{Mn}) \quad (8)$$

式中, TLI 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的

营养状态指数. r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数的相关系数, TP、TN、COD_{Mn} 的相关系数分别为 0.84、0.82、0.83; m 为评价参数的个数. 营养状态等级分别^[17-18]为: TLI ≤ 30, 贫营养; 30 < TLI ≤ 50, 中营养; 50 < TLI ≤ 60, 轻度富营养; 60 < TLI ≤ 70, 中度富营养; 70 < TLI, 重度富营养.

1.3.4 健康风险评价

(1) 化学致癌物所致健康危害的风险

化学致癌物所致健康危害的计算式为^[19]:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c \quad (9)$$

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig}q_{ig})]/70 \quad (10)$$

式中, R_{ig}^c 为化学致癌物(共 k 种化学致癌物)经饮水途径的平均个人致癌年风险(a^{-1}); D_{ig} 为化学致癌物 i 经饮水途径的单位体重日均暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; q_{ig} 为化学致癌物经饮水途径的致癌强度系数 ($kg \cdot d \cdot mg^{-1}$), Cr⁶⁺、As、Cd、苯的致癌强度系数 41、15、6.1、0.055 $kg \cdot d \cdot mg^{-1}$; 70 为人类平均寿命(a).

饮水途径的单位体重日均暴露剂量 D_{ig} 为:

$$D_{ig} = 2.2 \times c_i / 70 \quad (11)$$

式中, 2.2 为成人平均每日饮水量(L); c_i 为化学致癌物或躯体毒物的浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); 70 为人体重量(kg).

(2) 非致癌污染物所致健康危害的风险

非致癌污染物所致健康危害的计算式为:

$$R_n = \sum_{i=1}^k R_{ig}^n \quad (12)$$

$$R_{ig}^n = D_{ig} / RfD_{ig} \times 70 \times 10^{-6} \quad (13)$$

式中, R_{ig}^n 为非致癌物 i 经饮水途径的平均个人致癌年风险(a^{-1}), RfD_{ig} 为非致癌物经饮水途径的参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], Pb、Hg、Cu、Zn、Ni、氟化物、挥发酚、氰化物、氨氮的参考剂量分别为 0.0014、0.0003、0.005、0.3、0.02、0.06、0.1、0.037、0.97 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$.

(3) 总健康危害的风险

$$R^T = R^c + R^n \quad (14)$$

式中, R^T 为总健康风险.

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.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 望城饮用水源地水环境参数年度变化趋势

望城饮用水源地 2014—2017 年水环境参数年度变化见表 2. 从表 2 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^[20] 规定的污染物浓度限值相比, 各年水体监测的 23 个指标中, 2014—2015 年监测水体中只有粪大肠菌群超标, 分别超标 4.55、16.9 倍, 其它监测指标均未超标; 2016 年除 NH₃-N、TN 与粪大肠菌群分别超标 1.11、3.75、30.9 倍外, 其它监测指标均未超标; 2017 年 NH₃-N、TN、TP 与粪大肠菌群含量分别超标 1.29、5.13、1.41、40.2 倍, 水体中其它指标均未超标. 从 2014—2017 年水体监测单项指标变化趋势看, NH₃-N、TP、生化需氧量、As、Pb 与粪大肠菌群呈现逐年上升的趋势, 而 pH、化学需氧量、Cd、TN 与 COD_{Mn} 在 2014—2015 年呈下降的趋势, 在 2015—2017 则呈上升趋势; 水体中 Cu 与氟化物在 2014—2017 年呈现逐年下降的趋势, Cr⁶⁺、氰化物与挥发酚在 2014—2015 年呈上升的趋势, 而在 2015—2017 则呈下降趋势; 水体中溶解氧、Hg、Ni、Zn、滴滴涕、苯、石油类含量变化在 2014—2017 年无明显规律. 综上所述, 2014 年长沙综合枢纽工程全面建成使用后, 望城饮用水源地整体水环境质量有所下降, 主要污染物为 NH₃-N、TP、生化需氧量、As、Pb 和粪大肠菌群, 这也反映了湘江长沙段的主要污染物为生活废水的形势并未改变^[21]. 蓄水后水环境质量下降的原因可

能与长沙综合枢纽蓄水与调度运行有关,工程全蓄水后,水面扩大,水流速降低,流态趋于稳定,比降减小,对水环境的影响程度相对较大一些.但监测水体中 pH 值、生化需氧量、NH₃-N、TP、TN、COD_{Mn}、As、Pb、Cd 与粪大肠菌群在 2015—2017 年呈现上升趋势,需引起相关部门高度重视,这与胡矿成等^[11]的研究结果一致.

表 2 望城饮用水水源地水环境参数年度变化

Table 2 Annual variations of water environment parameters in Wangcheng drinking water sources

水质参数 Water quality parameters		2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	国家标准 ^[11] National standard
常规参数 Convention	pH	7.23±0.40	6.88±0.19	6.90±0.56	7.00±0.32	6—9
氧平衡参数	DO	7.55±1.14	7.18±0.74	7.63±1.01	7.37±1.21	6
Oxygen balance/(mg·L ⁻¹)	COD	12.75±1.42	12.33±2.24	12.52±3.61	14.38±2.51	15
	BOD	1.73±0.97	1.73±0.70	1.74±0.99	2.21±0.72	3
重金属参数	Cd	(0.788±1.33)×10 ⁻³	(7.80±5.90)×10 ⁻⁵	(1.30±1.77)×10 ⁻⁴	(4.75±4.17)×10 ⁻⁴	0.005
Heavy metal/(mg·L ⁻¹)	Hg	(1.90±1.50)×10 ⁻⁵	(1.90±1.70)×10 ⁻⁵	(1.30±0.700)×10 ⁻⁵	(3.30±2.40)×10 ⁻⁵	0.00005
	Cr ⁶⁺	(1.12±1.16)×10 ⁻²	(1.18±1.03)×10 ⁻²	(6.92±7.42)×10 ⁻³	(4.25±2.01)×10 ⁻³	0.05
	Ni	(1.67±2.46)×10 ⁻³	(1.67±2.46)×10 ⁻³	(1.00±1.95)×10 ⁻³	(1.17±1.85)×10 ⁻³	0.02
	Pb	(1.00±0.00)×10 ⁻³	(1.00±0.00)×10 ⁻³	(1.67±1.56)×10 ⁻³	(2.27±2.16)×10 ⁻³	0.01
	As	(4.58±7.70)×10 ⁻⁴	(1.43±1.01)×10 ⁻³	(3.22±2.93)×10 ⁻³	(3.41±2.47)×10 ⁻³	0.05
	Cu	(2.89±4.16)×10 ⁻²	(1.05±2.02)×10 ⁻²	(0.879±1.22)×10 ⁻²	(6.46±8.96)×10 ⁻³	1
	Zn	(3.67±5.94)×10 ⁻²	(2.33±2.46)×10 ⁻²	(1.55±1.56)×10 ⁻²	(2.28±2.40)×10 ⁻²	1
	有机污染物参数	苯 Benzene	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵	(1.70±5.76)×10 ⁻⁴	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵
Organic pollutant/ (mg·L ⁻¹)	挥发酚 Volatile phenol	(5.50±5.79)×10 ⁻⁴	(1.08±0.289)×10 ⁻³	(0.833±1.08)×10 ⁻³	(1.67±0.250)×10 ⁻⁴	0.002
	滴滴涕 DDT	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵	(5.00±9.00)×10 ⁻⁶	(0.700±1.00)×10 ⁻⁵	0.001
	石油类 Petroleum	(3.42±0.996)×10 ⁻²	(2.17±1.59)×10 ⁻²	(2.46±1.44)×10 ⁻²	(1.79±1.27)×10 ⁻²	0.05
无机污染物参数	NH ₃ -N	0.27±0.18	0.35±0.21	0.56±0.25	0.64±0.16	0.5
Inorganic pollutant/(mg·L ⁻¹)	TN	0.49±0.12	0.44±0.06	1.87±1.11	2.56±0.77	0.5
	TP	0.07±0.02	0.07±0.02	0.09±0.05	0.14±0.05	0.1
	COD _{Mn}	2.38±0.73	2.13±0.51	2.93±1.34	2.99±1.10	4
	氟化物 (以 F ⁻ 计) Fluoride	0.60±0.15	0.39±0.17	0.28±0.18	0.27±0.14	1
	氰化物 Cyanide	(2.00±0.00)×10 ⁻³	(2.17±0.577)×10 ⁻³	(2.00±0.00)×10 ⁻³	(1.08±0.702)×10 ⁻³	0.05
生物参数 Biology	粪大肠菌群 Fecal coliforms	9108±5391	33883±45231	61917±75506	80492±151517	2000

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.

Note: Refer to the surface water environment quality standard (GB 3838—2002) II class centralized drinking water standards.

2.2 望城饮用水水源地水环境污染水平变化

2.2.1 水环境污染水平年度变化

望城饮用水水源地 2014—2017 年水环境 22 项监测指标的单因子污染指数如图 1 所示,水环境单因子污染指数累积值呈明显上升趋势,受粪大肠菌群与 TN 单因子污染指数的影响,长沙综合枢纽全蓄水后水环境污染程度逐年恶化.这与袁啸^[22]在 2016 年分析长沙综合枢纽蓄水后长沙段坪塘、黑石铺大桥、杜浦江阁、三汉矶、霞凝港、丁字镇断面水环境时,也发现断面水体中长沙段上游 TN 也上升明显一致.究其原因,主要受监测断面水体上游城市人口剧增影响.上游生活污水排放量增加,部分生活污水没有得到有效处理而进入湘江,导致上游排入湘江的 NH₃-N 和粪大肠菌群总量增加,加之长沙综合枢纽工程改变了湘江水体的动力学特征,水流速降低,望城水厂的状态介于河流与湖泊之间,水中营养物质不断富集,加速了粪大肠菌群的生长,符合湖泊水流动性差、富营养化的特征.所以造成了望城饮用水水源地水体中 NH₃-N 和粪大肠菌群污染严重.

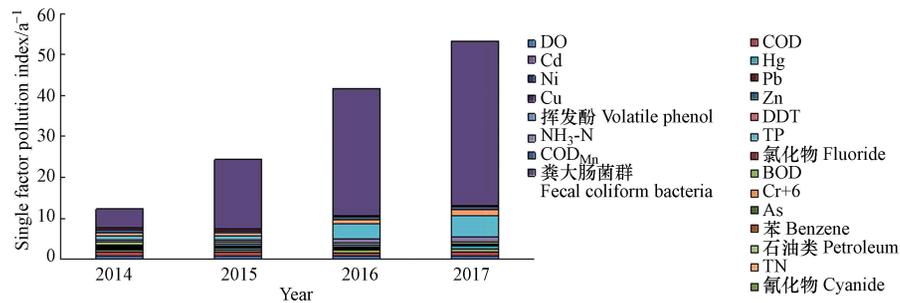


图1 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境单因子污染指数的变化

Fig.1 Change of single factor pollution index of Wangcheng drinking water sources after water storage of in Changsha hub

2.2.2 水环境污染水平月度变化

2014—2017年长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境综合污染指数随月度变化如图2所示。从图2中可知,2014年除12月水环境污染等级为中度污染以外,其余月份均为轻度污染;2015年8月水环境综合污染指数为0.28,污染等级为尚清洁,有4个月均为轻度污染,3个月均为中度污染,3个月为重污染,且8—12月水环境综合污染指数持续上升,到12月已达到严重污染等级;2016年有4个月均为中污染,5个月均为重污染,3个月均为严重污染;2017年有5个月为中污染,4个月为重污染,3个月为严重污染。整体来看,2014—2017年望城饮用水源地水环境综合污染指数每年月均值分别为0.56、1.11、1.89、2.42,呈逐年上升的趋势。从各年每月水环境综合污染指数等级频次分布数看,2014—2017年月度水环境综合污染指数等级处于重污染及以上的数量分别为0、5、9、8个。望城饮用水源地各年月水环境综合污染等级为轻度污染的频次从11次减少到0,而严重污染的频次则呈上升的趋势,表明望城水厂环境综合污染程度越来越严重,这主要是受无机污染与粪大肠菌群的影响。根据湘江水期划分可知,重污染与严重污染等级主要集中在枯水期,表明望城水厂水环境质量上游水量变化影响较大。另外,2016年1—3月与2017年6—8月的水环境综合污染指数明显偏大,均值大于2,是由于当时水质监测期间恰好遇到强降雨,受地表径流的影响,大量生活废水未经处理直接排入望城饮用水源地上游流域。

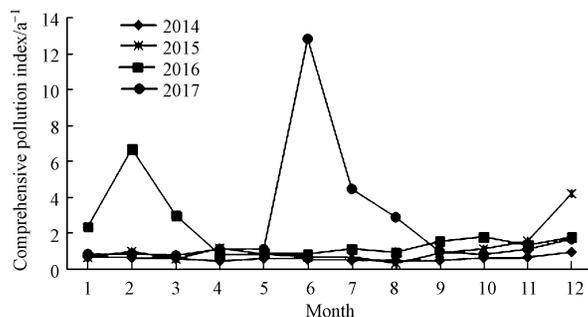


图2 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境综合污染指数变化

Fig.2 Variation of comprehensive pollution index of Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha hub

2.3 饮用水源地水环境污染物质分担率变化

水环境污染物质分担率可以判断出哪些是水质污染中相对主要的污染物,为了解长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境污染物质分担率的变化状况,除pH值外,将其余22项监测指标分成5大类,通过计算得出2014—2017年望城饮用水源地水环境污染物质的分担率如表3所示。从表3可知,长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境中氧平衡与有机污染物分担率在2014—2017年呈下降趋势,而微生物分担率与之相反;重金属分担率在2014—2016年呈下降趋势,但在2017年又有反弹倾向;无机污染物在2014—2015年呈下降趋势,而在2015—2017年持续上升。总体来看,水环境中氧平衡参数、重金属参数与有机污染物参数都呈下降的趋势,而无机污染物参数与粪大肠菌群参数则呈上升趋势,表明长沙综合枢纽蓄水后水环境主要污染类型发生改变,无机物和粪大肠杆菌群含量显著增加,水环境质量整

体退化.这可能是长沙综合枢纽蓄水工程建立后,水流速减缓,大坝拦截使望城水厂变成湖泊型,造成了望城饮用水水源地营养物质与微生物的富集.

表 3 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水源地水环境污染物质分担率随时间变化(%)

Table 3 The sharing rate of water environmental pollutants in Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha hub (%)

年度 Year	氧平衡 Oxygen balance	重金属 Heavy metal	有机污染物 Organic pollutant	无机污染物 Inorganic pollutant	微生物 Microorganism
2014 年	18.13	8.31	7.88	28.52	37.16
2015 年	9.19	3.61	4.04	13.47	69.69
2016 年	5.28	1.75	2.23	16.43	74.30
2017 年	4.71	2.30	0.84	16.63	75.52

2.4 饮用水源地水环境营养状态变化

为进一步了解望城饮用水水源地水体无机污染物中营养物质的年度变化与营养等级,以总氮、总磷和高锰酸盐作为水体营养物质的代表,通过计算得出 2014—2017 年望城饮用水水源地水环境中营养状态指数(表 4).从表 4 中可知, TN、TP、COD_{Mn} 的营养指数在 2014—2015 年均小幅度下降,而在 2015—2017 年均呈上升趋势.从水环境综合营养状态指数来看,2014—2015 年综合营养状态指数分别为 39.34、37.64,营养状态均为中营养;2016—2017 年综合营养状态指数分别为 49.77、49.77,营养状态均为轻度富营养.整体来看,2014—2015 年水环境综合营养状态指数小幅度下降,可能是刚开始蓄水,水中营养状态指数的生态平衡尚未稳定,而在 2015—2017 年呈上升趋势,表明望城水厂已经由河流型转变为湖泊型,且营养状态变化与污染物超标状态、综合污染指数和污染物分担率变化基本一致,上述结果进一步表明长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水水源地水环境质量下降与无机污染物中的营养物质贡献有关,受生活污水的影响较大.因此,工程建设后,湘江长沙段更需要加强对磷类、氮类污染物排放的控制,防止水体富营养化的发生.

表 4 长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水水源地水环境营养等级

Table 4 Trophic level of Wangcheng drinking water sources after water storage in Changsha hub

年份	TN	TP	COD _{Mn}	综合指数 Comprehensive index	营养状态 Nutritional status
2014 年	13.85	17.77	7.73	39.34	中营养 Medium nutrition
2015 年	13.24	17.66	6.74	37.64	中营养 Medium nutrition
2016 年	21.20	19.01	9.56	49.77	轻度富营养 Mild eutrophication
2017 年	22.93	21.35	9.76	49.77	轻度富营养 Mild eutrophication

2.5 饮用水源地水环境健康风险评价

望城饮用水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 5.从表 5 可知,2014 年水环境中化学致癌物的健康风险顺序为 Cr⁶⁺>Cd>As>苯,而 2015—2017 年化学致癌物的健康风险顺序均为 Cr⁶⁺>As>Cd>苯.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 5.0×10⁻⁵,2014—2017 年化学致癌物健康风险(R^c)分别为 5.06×10⁻⁶、5.70×10⁻⁶、2.09×10⁻⁶、9.05×10⁻⁷,均未超过最大可接受风险水平,且 2015—2017 年 R^c呈下降趋势,表明长沙综合枢纽蓄水后经饮水途径对人体化学致癌健康风险逐年下降,且在 2017 年 R^c小于 10⁻⁶,化学致癌健康风险可忽略,但化学致癌物质中 As 的健康风险呈逐年上升的趋势,且 Cr⁶⁺构成了望城饮用水水源地水环境的主要化学致癌物质,水环境中化学致癌物质 As 与 Cr⁶⁺污染需引起注意.2014—2017 年水环境中 Ni 等 9 种非致癌物质经饮水途径的健康风险分别为 3.74×10⁻⁵、2.20×10⁻⁵、1.86×10⁻⁵、1.84×10⁻⁵,均未超过 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(5.0×10⁻⁵),且 2014—2017 年非致癌物健康风险呈下降趋势,说明长沙综合枢纽蓄水后经饮水途径对人体非致癌健康风险逐渐下降,但非致癌物质中 NH₃-N 的健康风险呈逐年上升趋势,氟化物为主要非致癌物质,水环境非致癌物质中 NH₃-N 与

氟化物污染需采取防控措施.从表 5 中还可知,2014—2017 年望城饮用水水源地水环境总健康风险 (R^T) 呈逐年下降趋势.除 2014 年水环境中 R^T 高于 ICRP 的最大可接受风险水平 (5.0×10^{-5}) 外,2015—2017 年水环境中 R^T 均在最大可接受风险水平以内.结果表明,长沙综合枢纽蓄水后对望城饮用水水源地水环境经饮水途径引起的人体健康风险有所改善.从望城饮用水水源地水体总健康风险来源分析看,水环境健康风险主要来源于非致癌物质.

表 5 望城饮用水水源地水环境经饮水途径的健康危害的平均个人年风险 R^c (a^{-1})

Table 5 Average personal health risk caused by the chemical carcinogens by drinking water (a^{-1})

年份 Year	化学致癌物质 Chemical carcinogen				R^c	非致癌物质 Non-carcinogenic substance										R^n	R^T
	Cd	Cr ⁺⁶	As	苯		Ni	Hg	Pb	Cu	Zn	氟化物	挥发酚	氰化物	NH ₃ -N			
2014	3.74×10^{-9}	5.05×10^{-6}	3.11×10^{-9}	2.66×10^{-15}	5.06×10^{-6}	1.83×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.57×10^{-6}	1.27×10^{-5}	2.69×10^{-7}	2.18×10^{-5}	1.21×10^{-8}	1.19×10^{-7}	6.13×10^{-7}	3.74×10^{-5}	7.93×10^{-5}	
2015	3.67×10^{-11}	5.67×10^{-6}	3.04×10^{-8}	2.66×10^{-15}	5.70×10^{-6}	1.83×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.57×10^{-6}	4.60×10^{-6}	1.71×10^{-7}	1.44×10^{-5}	2.38×10^{-8}	1.29×10^{-7}	7.93×10^{-7}	2.20×10^{-5}	4.89×10^{-5}	
2016	1.02×10^{-10}	1.94×10^{-6}	1.53×10^{-7}	1.57×10^{-12}	2.09×10^{-6}	1.10×10^{-7}	9.53×10^{-8}	2.62×10^{-6}	3.87×10^{-6}	1.14×10^{-7}	1.04×10^{-5}	1.83×10^{-8}	1.19×10^{-7}	1.27×10^{-6}	1.86×10^{-5}	3.80×10^{-5}	
2017	1.36×10^{-9}	7.31×10^{-7}	1.72×10^{-7}	2.66×10^{-15}	9.05×10^{-7}	1.29×10^{-7}	2.42×10^{-7}	3.57×10^{-6}	2.84×10^{-6}	1.67×10^{-7}	9.96×10^{-6}	3.67×10^{-9}	6.44×10^{-8}	1.46×10^{-6}	1.84×10^{-5}	3.63×10^{-5}	

3 结论 (Conclusion)

(1) 2014—2017 年长沙综合枢纽蓄水后望城饮用水水源地水环境质量整体有所下降,水环境污染水平呈逐年上升趋势,主要污染物为生化需氧量、化学需氧量、NH₃-N、TP、TN、COD_{Mn}、As、Pb、Cd 及粪大肠菌群.

(2) 望城饮用水水源地水环境中氧平衡、重金属、有机污染物分担率呈下降趋势,而无机污染物、粪大肠菌群分担率呈上升趋势;无机污染物中营养物质的水环境综合营养状态指数在 2015—2017 年呈上升趋势,与污染物超标状态、综合污染指数和污染物分担率变化基本趋于一致.

(3) 2014—2017 年望城饮用水水源地水环境总健康风险分别为 7.93×10^{-5} 、 4.89×10^{-5} 、 3.80×10^{-5} 、 3.63×10^{-5} ,总健康风险年度变化呈下降趋势,但 2014 年高于 ICRP 的最大可接受风险水平.水环境总健康风险主要来源于非致癌物质,所以,降低饮用水水源地水环境中致癌物质 Cr⁶⁺ 与 As 和非致癌物质 NH₃-N 与氟化物能有效控制经饮水途径引起的总健康风险.

参考文献 (References)

- [1] 薛兴华,常胜,宋鄂平.三峡水库蓄水后荆江洲滩变化特征[J].地理学报,2018,73(9):1714-1727.
XUE X H, CHANG S, SONG E P. Variation characteristics of Jingjiang shoal after impoundment of the Three Gorges Reservoir[J].Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9):1714-1727(in Chinese).
- [2] 杨振冰,刘园园,何蕊廷,等.三峡库区不同水文类型支流大型底栖动物对蓄水的响应[J].生态学报,2018(20):1-10.
YANG Z B, LIU Y Y, HE X T, et al. Responses of benthic macroinvertebrates in tributaries of different hydrological regimes in Three Gorges Reservoir region to reservoir impoundment[J].Acta Ecologica Sinica, 2018(20):1-10(in Chinese).
- [3] 杨丹,谢宗强,樊大勇,等.三峡水库蓄水对消落带土壤 Cu、Zn、Cr、Cd 含量的影响[J].自然资源学报,2018,33(7):1283-1290.
YANG D, XIE Z Q, FAN D Y, et al. The effect of water fluctuation on the contents of soil Cu, Zn, Cr and Cd at the riparian area of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7):1283-1290(in Chinese).
- [4] YANG F, WANG Y, CHAN Z. Review of environmental conditions in the water level fluctuation zone: Perspectives on riparian vegetation engineering in the Three Gorges Reservoir [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2015, 18(2): 240-249.
- [5] BAO Y, GAO P, HE X. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—A unique geomorphological unit [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 14-24.
- [6] BALDWIN D S, WILSON J, UIUNEY H, et al. Influence of extreme drawdown on water quality downstream of a large water storage reservoir [J].River Research and Applications, 2010,26(2):194-206.
- [7] 陈亚林,罗兴建,汪新丽,等.1997-2002 年三峡库区重庆段痢疾流行特征分析[J].预防医学情报杂志,2004(3):316-317.
CHEN Y L, LUO X J, WANG X L, et al. Analysis of dysentery epidemic characteristics in Chongqing section of Three Gorges Reservoir area from 1997 to 2002[J].Journal of Preventive Medicine Information, 2004(3):316-317(in Chinese).
- [8] 何军,夏明.三峡水库四期试验性蓄水前后嘉陵江饮用水源地水质变化规律分析[J].三峡环境与生态,2010,32(2):14-18.
HE J, XIA M. Drinking water quality analysis of the Jialing river during the fourth test of water storage in the Three Gorges Reservoir[J].

- Environment and Ecology in the Three Gorges, 2010, 32(2):14-18(in Chinese).
- [9] 汪仁. 湘江长沙综合枢纽库区水生态系统服务功能价值评价[D]. 长沙:湖南师范大学,2017.
WANG R. Comprehensive evaluation of Changsha Xiangjiang integrated reservoir area water ecosystem service function[D]. Changsha: Hunan Normal University,2017(in Chinese).
- [10] 李晓鹏. 湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力研究[D]. 长沙:湖南师范大学, 2017.
LI X P. Research on water environment carrying capacity of Changsha multipurpose hydraulic project reservoir area in Xiang River[D]. Changsha: Hunan Normal University,2017(in Chinese).
- [11] 胡旷成,铁柏清,张蕊琪,等. 长沙水利枢纽工程蓄水后的湘江长沙段重金属污染评价[J]. 四川环境, 2016, 35(4):42-48.
HU K C, TIE B Q, ZHANG X Q, et al. Assessment of heavy metal pollution of Changsha section of Xiangjiang River ater water storage of the water hub project[J].Sichuan Environment, 2016, 35(4):42-48(in Chinese).
- [12] 张蕊琪. 湘江水利枢纽工程对湘江(长沙段)水体富营养化的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2016.
ZHANG X Q. Effects of the Changsha hydropower project on eutrophication of Xiangjiang River in Changsha. [D]. Changsha: Hunan Agricultural University,2016(in Chinese).
- [13] 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.
SHUAI H, LI J B, JIANG C, et al. Water environment parameter changing of Changsha section after the preliminary stage water retaining of multipurpose hydraulic project in Xiangjiang river.[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(12):2085-2093(in Chinese).
- [14] 陈妮. 2006—2015年南四湖水质综合评价及改善效果分析[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
CHEN N. Evaluation of comprehensive water quality and analysis of the improvement effect in Nansi lake during the year 2006—2015[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology, 2018(in Chinese).
- [15] 关伯仁,司志中.水质系统规划研究——以伊洛河洛阳段为例[J].地理研究,1986(1):106-107.
GUAN B R, SI Z Z. Water quality system planning—a case study on oryanic pollution control planning for a river system[J].Geographical Research,1986(1):106-107(in Chinese).
- [16] 国家环境保护总局,中国环境监测总站. 湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration, China Environmental Monitoring Headquarters. Methods for eutrophication evaluation of lakes (reservoirs) and technical provisions for their classification[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001(in Chinese).
- [17] 联合国环境规划署(UNEP).水体富营养化[J]. 世界环境,1994,2(1):23-26.
United Nations Environment Programme (UNEP). Eutrophication of water[J].World Environment,1994,2(1):23-26(in Chinese).
- [18] 杨梅玲,胡忠军,刘其根,等.利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化(2007年-2011年)[J].上海海洋大学学报,2013,22(2):240-245.
YANG M L, HU Z J, LIU Q G, et al. Evaluation of water quality by two trophic state indices in Lake Qiandaohu during 2007-2011[J]. Journal of Shanghai Ocean University,2013,22(2):240-245(in Chinese).
- [19] 符刚,曾强,赵亮,等.基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价[J].环境科学,2015,36(12):4553-4560.
FU G, ZENG L, ZHAO L, et al. Health risk assessment of drinking water quality in Tianjin based on GIS[J]. Environmental Science, 2015, 36(12):4553-4560(in Chinese).
- [20] 国家环境保护总局和国家质量监督检验检疫总局联合发布.地表水环境质量标准;GB 3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社, 2012.
Environmental quality standards for surface water: GB 3838-2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012(in Chinese).
- [21] 袁啸,铁柏清,陈喆,等.长沙水利枢纽工程蓄水前湘江长沙段水质评价[J].水环境保护,2012,28(3):59-63.
YUAN X, TIE B Q, CHEN Z, et al. Water quality monitoring of Changsha section of Xiangjiang River before impoundment of Changsha Water Conservancy Project[J].Water Resources Protection, 2012, 28(3):59-63(in Chinese).
- [22] 袁啸.湘江水利枢纽工程对湘江(长沙段)水质影响与预警研究湘江水利枢纽工程对湘江(长沙段)水质影响与预警研究[D].长沙:湖南农业大学,2016.
YUAN X. The study on the water quality influence and pre-alarm of the Changsha hydropower project for Xiangjiang river in Changsha[D]. Changsha: Hunan Agricultural University,2016(in Chinese).