

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.008

# 南水北调东线供水有机物含量对出厂水水质的影响

王晓芳<sup>1</sup>, 毕学军<sup>2</sup>, 潘慧慧<sup>1</sup>, 沈朕<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>

(1. 青岛水务集团有限公司, 山东 青岛 266034; 2. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266031)

**摘要:** 针对南水北调东线水引入胶东供水后水源水中有机碳的变化进行了分析,发现2016年以来水源水中有机碳含量显著升高,平均值在5 mg/L以上,有机碳含量的升高造成水中存在异臭味、消毒副产物浓度升高、水质生物稳定性变差等问题。为了解目前水厂工艺对生物可同化有机碳(AOC)的去除作用和管网水质的生物稳定性状况,以某水厂为研究对象,分析了2019年2月水厂处理工艺各单元出水中TOC含量、有机碳的分子质量分布和AOC含量。结果表明,水厂处理工艺对TOC的去除率为23.9%,出厂水中TOC含量较高。水厂原水主要以分子质量<0.5 ku和3~5 ku的有机碳为主,各工艺段出水中不同分子质量有机碳对总溶解性有机碳的相对贡献变化不大。水厂原水AOC含量为322.36 μg/L,AOC-P17占总AOC的66.1%,水处理工艺对AOC的总去除率为46.1%,AOC-P17的去除率高于AOC-NOX的去除率。

**关键词:** 南水北调东线水; 水处理工艺; 有机碳; 生物可同化有机碳; 生物稳定性

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0042-05

## Influence of Organic Matters Content in Eastern Line of South-to-North Water Diversion on Finished Water Quality

WANG Xiao-fang<sup>1</sup>, BI Xue-jun<sup>2</sup>, PAN Hui-hui<sup>1</sup>, SHEN Zhen<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>

(1. Qingdao Water Group Co. Ltd., Qingdao 266034, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266031, China)

**Abstract:** The change of organic carbon in the source water since the introduction of the eastern line of the South-to-North Water Diversion in Jiaodong water supply was analyzed. The results showed that the content of organic carbon in the source water had increased significantly with an average of 5 mg/L or more since 2016. The increase of organic carbon in water led to the problems of an unusual odour in finished water, increase of disinfection byproducts concentration and poor biological stability of water quality. In order to understand the removal of assimilable organic carbon (AOC) and the biological stability of water quality of the pipe network, the TOC content, distribution of organic carbon molecular weight and AOC content of different units in a waterworks were analyzed in February 2019. The removal efficiency of TOC by the treatment process of the waterworks was 23.9%, indicating that the TOC content in the finished water was high. The source water of the waterworks was mainly organic carbon with molecular weight less than 0.5 ku and between 3 ku and 5 ku, and the relative contribution of organic carbon with different molecular weight to the total dissolved organic carbon in the effluent of each unit was not significant. The AOC content in source water was 322.36 μg/L, and AOC-P17 accounted for 66.1% of the total AOC. The total removal efficiency of AOC was 46.1%, and the removal efficiency of AOC-P17 was higher than that of AOC-NOX.

**Key words:** eastern line of South-to-North Water Diversion; water treatment process; organic carbon; assimilable organic carbon; biological stability

近年来,山东东部地区供水资源处于严重短缺状态,南水北调东线向山东胶东地区供水已3年有余。以青岛地区为例,近年供水的70%以上来自于南水北调东线水。向胶东地区供水的南水北调水除了硫酸盐、氯化物等无机盐类指标偏高外,总有机碳(TOC)含量也明显上升,其平均值在5.14~5.67 mg/L之间,最高值可达到8.5 mg/L。原水中有机物含量偏高给水厂生产工艺带来巨大挑战,尤其是有机碳含量升高对出厂水水质的生物稳定性和消毒副产物的生成造成较大影响<sup>[1]</sup>。如何控制出厂水中的营养基质,提高饮用水水质的生物稳定性,是饮用水水质安全研究和关注的重点<sup>[2]</sup>。目前,国内外一般以生物可同化有机碳(AOC)作为饮用水生物稳定性的评价指标<sup>[3]</sup>,即饮用水中能直接被细菌利用、同化成细菌体的部分有机物,其与管网中细菌生长有着较好的相关性。AOC越低,饮用水的生物稳定越好,微生物越不易生长繁殖,反之则越容易造成微生物增长。

笔者统计了2016年以来南水北调东线工程向胶东供水后,水源水中总有机碳含量变化,分析了南水北调水的引入对受水地区饮用水中有机物含量及生物稳定性的影响;选择采用臭氧/生物活性炭深度处理工艺的某水厂为研究对象,采集水厂的工艺过程水(各工艺单元出水),检测AOC、TOC指标及有机物分子质量分布情况,分析现有水处理工艺对TOC和AOC的去除效果,以预测南水北调水引入可能给出厂水带来的生物稳定性风险,旨在为出厂水AOC含量变化的优化控制提供数据支撑。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 水厂处理工艺

某水厂设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,在常规处理工艺基础上增加臭氧/生物活性炭深度处理工艺,工艺流程为原水→混凝池→沉淀池→砂滤池→后臭氧接触池→生物活性炭滤池→出厂水,该水厂深度处理工艺已运行1年。

### 1.2 采样点和采样时间

于2019年2月采集水厂原水、工艺过程水和出厂水,测定AOC和TOC等水质参数,并分析各工艺段出水的有机物分子质量分布。具体采样点包括水

厂原水、沉淀池出水、砂滤池出水、后臭氧接触池出水、生物活性炭滤池出水和出厂水。

### 1.3 AOC 检测方法

#### 1.3.1 产率系数测定

AOC测定方法参考《水中生物可同化有机碳(AOC)的检测方法》<sup>[4]</sup>。以饮用水中普遍存在的荧光假单胞菌P17和螺旋菌NOX为测试菌株,以乙酸钠为标准营养基质。将P17和NOX分别接种在标准乙酸钠溶液中,25℃下避光培养,P17培养3 d、NOX培养4 d,再对培养液进行平板计数,得出不同乙酸钠浓度下两种菌在稳定生长期的菌落数,从而计算出P17与NOX的产率系数及生长曲线。

#### 1.3.2 水样采集及测定

AOC取样瓶为500 mL经无碳化和灭菌处理的磨口玻璃瓶,加入硫代硫酸钠去除水中余氯。水样经0.45 μm滤膜过滤后,取40 mL滤后水加入到50 mL三角瓶中,于高压、121℃下灭菌20 min。每个水样中加入 $10^4$  CFU的P17接种液,将培养皿在25℃下避光培养3 d;取100 μL培养的水样平板计数,余下水样巴氏灭菌(70℃、30 min)后加入 $10^4$  CFU的NOX接种液,25℃下避光倒置培养4 d并平板计数。根据两种菌种的菌落数和产率系数,计算出水样中AOC的含量,并转化为乙酸碳浓度。

### 1.4 其他指标的检测方法

TOC测定方法参照《生活饮用水标准检验方法有机物综合指标》(GB/T 5750.7—2006)中的4.1仪器分析法,采用耶拿multi N/C 3100总有机碳分析仪测定。

有机物分子质量分布采用超滤膜法测定。采用上海摩速科学器材有限公司生产的MSC超滤杯,有效容积为300 mL,最高承受压力为0.22 MPa,内有磁力搅拌装置,采用高纯氮气加压过滤。

0.45 μm微孔滤膜采用国产的直径为40 mm的微孔滤膜;超滤膜采用上海摩速科学器材有限公司生产的截留分子质量分别为10、5、3、1、0.5 ku的直径为80 mm的聚醚砜(PES)超滤膜。

微孔膜预处理方法:纯水煮沸3次(每次30 min),放在冰箱中保存待用。超滤膜的预处理方法:纯水浸泡漂洗3次(光滑面向下,每次60 min),

放于冰箱待用。

膜过滤采用平行过滤法,水样先通过  $0.45\ \mu\text{m}$  微孔滤膜(此时测定结果为水中 DOC 含量),再分别通过截留分子质量为 10、5、3、1、0.5 ku 的超滤膜,测定滤液的 DOC,各分子质量区间的有机物含量用差减法得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 引入南水北调东线水后原水中 TOC 含量变化

根据历年检测数据,发现南水北调水进入当地水库后,水源水中有机碳含量逐年升高。2016 年,水库进水 TOC 平均值为  $5.31\ \text{mg/L}$ ,出水 TOC 平均值为  $3.91\ \text{mg/L}$ ;2017 年水库进水 TOC 平均值为  $5.14\ \text{mg/L}$ ,出水 TOC 平均值为  $4.34\ \text{mg/L}$ ;2018 年水库进水 TOC 平均值为  $5.67\ \text{mg/L}$ ,出水 TOC 平均值为  $5.13\ \text{mg/L}$ 。进入水厂的水库出水 TOC 值升高约 50%。从以上数据可以看出,水库进水 TOC 含量要高于出水 TOC 含量,这可能是由于水库原有水源的稀释作用和水生生物对水体有机物吸收降解的自净作用<sup>[5]</sup>。

统计 2016 年—2018 年进水和出水 TOC 含量,结果显示:2016 年—2018 年,不论是水库进水还是出水,TOC 含量都有逐年升高的趋势,且夏季含量明显高于冬季。水源水有机碳含量升高导致水中存在异臭味,并影响混凝、沉淀、过滤、消毒等单元的处理效果,增加了混凝剂和消毒剂用量,消毒副产物增多等;同时有机物作为管网中微生物繁殖的营养物质,容易引起管网水中生物稳定性下降<sup>[6]</sup>。

### 2.2 净水处理过程对 TOC 的去除

水厂净水处理过程各工艺段出水 TOC 变化如图 1 所示,可以看出 TOC 含量沿程呈降低趋势。

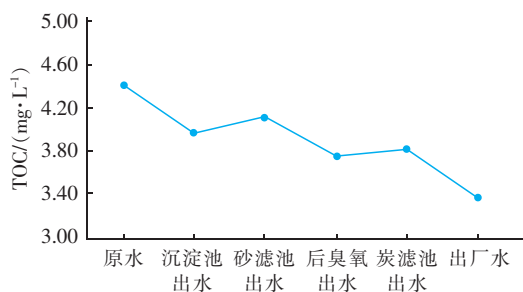


图1 TOC 浓度的沿程变化

Fig.1 Change of TOC along water treatment process

在整个净水过程中,TOC 由原水的  $4.43\ \text{mg/L}$  降至出厂水的  $3.37\ \text{mg/L}$ ,总去除率为 23.9%。从

各工艺段来看,常规净水过程——混凝/沉淀/过滤工艺段对 TOC 的去除率在 7.0% 左右;深度处理过程的臭氧/生物活性炭滤池对 TOC 的去除率在 17% 左右。相关文献表明,臭氧/生物活性炭深度处理工艺对有机碳的去除率一般在 35% ~ 50%<sup>[7-9]</sup>。蔡云龙等人<sup>[9]</sup>对镇江市某水厂的有机碳去除效果进行评价,得到常规净水工艺对有机碳的去除率可以达到 26%。

### 2.3 水厂各工艺段出水的有机碳分子质量分布

有机物分子质量分布可以表征水中不同类型有机物的特性,有助于增强对水处理过程中有机物去除规律的认识。有机物分子质量与活性炭孔径的匹配性会影响活性炭对有机碳的吸附效果<sup>[10]</sup>,因而有必要对有机碳分子质量的分布进行研究。试验结果表明,水厂原水主要以分子质量  $<0.5\ \text{ku}$  和  $3\sim5\ \text{ku}$  的有机碳为主,分别占总 DOC 的 31% 和 32%,且分子质量  $<5\ \text{ku}$  的有机物占总溶解性有机碳的 84%。各工艺段出水中不同分子质量有机碳对总溶解性有机碳的相对贡献基本相似,没有明显变化。

水厂各工艺段出水中不同分子质量有机碳含量的变化如图 2 所示。

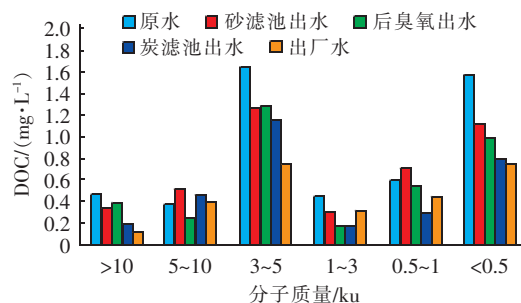


图2 水厂各工艺段出水不同分子质量有机碳含量的变化

Fig.2 Change of DOC content with different molecular weight from different treatment units

经过混凝/沉淀/砂滤常规工艺处理后,分子质量  $>10$ 、 $3\sim5$ 、 $1\sim3$ 、 $<0.5\ \text{ku}$  的有机碳含量均降低了 25% 左右,但分子质量为  $5\sim10\ \text{ku}$  和  $0.5\sim1\ \text{ku}$  的有机碳含量反而有所增加。加入  $1.0\ \text{mg/L}$  臭氧氧化后,有机碳的分子质量分布与砂滤池出水的有机碳分子质量分布相比没有明显变化,即相对贡献没有变化。经过活性炭吸附后,分子质量为  $0.5\sim1\ \text{ku}$  的有机碳含量降低了 70% 左右,其次是对分子质量  $>10$ 、 $1\sim3$  和  $<0.5\ \text{ku}$  的有机碳去除率均在 25% 左右,说明活性炭去除的对象主要是分子质量  $<3$



ku 范围的有机碳。经过整个净水处理过程,对不同分子质量有机碳的去除率从大到小依次为  $>10$ 、 $3 \sim 5$ 、 $<0.5$ 、 $1 \sim 3$ 、 $0.5 \sim 1$ 、 $5 \sim 10$  ku。

#### 2.4 净水过程对AOC的去除作用

为了深入了解原水中有机碳浓度的升高对出厂水和管网水质生物稳定性的影响,分析水厂各工艺段对AOC的去除作用,利用出厂水AOC水质指标分析其生物稳定性。AOC由AOC-P17和AOC-NOX组成,分别代表水中两类可同化有机碳。其中,AOC-P17代表水中能被P17利用的大部分氨基酸、多种羧酸盐、碳水化合物(糖类)和芳香族等有机物;AOC-NOX代表能被NOX转移性利用的羧基酸,其中包括不能被P17利用的甲醛酸、草酸盐、羧酸乙酸盐和乙醛酸等有机物质。van der Kooij<sup>[11]</sup>在调查了20个水厂后认为当AOC  $<10 \mu\text{g/L}$  时,异养菌几乎不能生长,饮用水的生物稳定性较好;LeChevallier等<sup>[12]</sup>提出当AOC  $<100 \mu\text{g/L}$  时,大肠杆菌生长受限制,并提出在有氯的条件下AOC为  $50 \sim 100 \mu\text{g/L}$  时水质能达到生物稳定。

水厂各工艺段出水水质如表1所示。总体来看,水厂原水AOC为  $322.36 \mu\text{g/L}$ ,AOC-P17占总AOC的66.1%,而AOC-NOX仅占33.9%。水厂出厂水的AOC为  $173.78 \mu\text{g/L}$ ,总去除率为46.1%,其中AOC-P17去除率为57.5%,AOC-NOX去除率为23.8%,AOC-P17去除率高于AOC-NOX去除率。水厂深度处理单元去除的AOC主要是AOC-P17。经过整个净水处理过程后,AOC-P17与AOC-NOX的比值从2左右降至1左右,能够被生物利用的有机物种类发生了显著变化。

表1 水厂各工艺段出水水质

Tab. 1 Effluent quality of each water treatment unit

项 目	TOC/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	AOC/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	AOC - P17/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	AOC - NOX/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	AOC - P17/ AOC - NOX 值
原水	4.43	322.36	213.24	109.12	1.95
沉淀池出水	4.07	293.48	213.24	80.24	2.66
砂滤池出水	4.12	267.18	184.05	83.13	2.21
后臭氧出水	3.77	470.68	309.56	161.12	1.92
炭滤池出水	3.84	130.08	55.62	74.46	0.75
出厂水	3.37	173.78	90.65	83.13	1.09

不难看出,水厂常规工艺段均对AOC有一定的去除作用,经混凝/沉淀/砂滤常规处理后AOC含量降至  $267.18 \mu\text{g/L}$ ,去除率为17.1%;经过  $0.5 \text{ mg/L}$

臭氧氧化后,AOC含量大幅度升高,其原因在于臭氧能够氧化多种有机物,将水中难生物降解的大分子有机物氧化成小分子有机物,使得后续生物活性炭能够利用物理吸附和生物降解去除水中有机物<sup>[7]</sup>。该水厂通过臭氧/生物活性炭深度处理后,AOC含量下降至  $130.08 \mu\text{g/L}$ ,总AOC去除率达到46.1%,说明臭氧/生物活性炭深度处理过程对AOC的去除效果较好。

通过进一步研究,经加氯消毒后,管网水中AOC含量升至  $200 \mu\text{g/L}$  以上,表明水中仍存在可被氧化的大分子有机物,这些大分子有机物在氯的作用下被氧化成了易被微生物利用的小分子有机物,进而影响管网水的生物稳定性。

#### 3 结论

① 2016年—2018年,南水北调水引入胶东本地水库后,不论是水库进水还是出水,TOC含量都有逐年升高的趋势,且夏季含量明显高于冬季。水厂处理工艺对TOC的总去除率在23.9%左右。

② 该水厂原水主要以分子质量  $<0.5 \text{ ku}$  和  $3 \sim 5 \text{ ku}$  的有机物为主。水厂净水处理过程各单元对不同分子质量有机碳均有一定的去除作用,各工艺段出水中不同分子质量有机碳对总溶解性有机碳的相对贡献没有明显变化。

③ 水厂原水中AOC-P17占比较大,水厂处理工艺对AOC-P17的去除率高于AOC-NOX的去除率。

④ 作为原水的南水北调东线水,较高的AOC含量给水厂净水工艺以及管网水的生物稳定性均带来了较大挑战。

#### 参考文献:

- [1] 鲁巍,唐峰,张晓健,等. 净水工艺对饮用水生物稳定性控制的研究[J]. 环境科学,2005,26(6):71-74.  
Lu Wei, Tang Feng, Zhang Xiaojian, et al. Controlling of biological stability in drinking water by purification processes [J]. Environmental Science, 2005, 26(6): 71-74 (in Chinese).
- [2] 张领国,张克峰,李梅,等. 饮用水水质生物稳定性研究进展[J]. 净水技术,2013,32(6):1-5.  
Zhang Lingguo, Zhang Kefeng, Li Mei, et al. Advances in research of biological stability for drinking water quality [J]. Water Purification Technology, 2013, 32(6): 1-5 (in Chinese).

- [3] 王丽花,周鸿,张晓健,等. 供水管网中 AOC、消毒副产物的变化规律[J]. 中国给水排水,2001,17(6): 1-3.  
Wang Lihua, Zhou Hong, Zhang Xiaojian, *et al.* Study on variability in AOC and disinfection byproduct in water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 1-3 (in Chinese).
- [4] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 20th ed. Washington: American Public Health Association (APHA), 1998.
- [5] 黄晓琛. 陈行水库有机污染物自净机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
Huang Xiaochen. Study on Self-purification Mechanism of Organic Pollutants in Chenhang Reservoir [D]. Shanghai: Tongji University, 2004 (in Chinese).
- [6] 吴舜泽, 王宝贞. 水中有机物和水处理工艺相关性分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(6): 53-58.  
Wu Shunze, Wang Baozhen. Correlation analysis between characteristics of organics in water and water treatment processes [J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 1999, 32(6): 53-58 (in Chinese).
- [7] 朱晓燕, 吕锡武, 刘武平, 等. 生物活性炭工艺去除长江原水中有机成分的研究[J]. 净水技术, 2009, 28(6): 35-38.  
Zhu Xiaoyan, Lü Xiwu, Liu Wuping, *et al.* Biological activated carbon process for organic matters removal in Yangtze River raw water [J]. Water Purification Technology, 2009, 28(6): 35-38 (in Chinese).
- [8] 王继萍, 华伟, 蒋福春, 等. 臭氧-生物活性炭工艺去除 AOC 和有机物的效果研究[J]. 给水排水, 2014, 40(2): 11-15.  
Wang Jiping, Hua Wei, Jiang Fuchun, *et al.* Removal performance of assimilable organic carbon and organics by  $O_3$  - BAC [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(2): 11-15 (in Chinese).
- [9] 蔡云龙, 高乃云, 谭章荣, 等. 常规处理工艺对可同化有机碳去除特性的研究[J]. 给水排水, 2006, 32(8): 12-16.  
Cai Yunlong, Gao Naiyun, Tan Zhangrong, *et al.* Study on the removal performance of assimilable organic carbon by conventional water treatment process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(8): 12-16 (in Chinese).
- [10] 陈国强, 王剑. 粉末活性炭投加量对原水中有机物的去除及其分子量分布的影响[J]. 净水技术, 2017, 36(s1): 45-49.  
Chen Guoqiang, Wang Jian. Effect of PAC dosage on removal of organic matter and molecular weight distribution in raw water [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(s1): 45-49 (in Chinese).
- [11] van der Kooij D. Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth [J]. J AWWA, 1992, 84(2): 57-65.
- [12] LeChevallier M W, Babcock T M, Lee R G. Examination and characterization of distribution system biofilms [J]. Appl Environ Microbiol, 1987, 53(12): 2714-2724.



**作者简介:** 王晓芳 (1969 - ), 女, 山东青岛人, 硕士, 高级工程师, 青岛水务海润自来水集团总工程师兼国家城市供水水质监测网青岛监测站站长, 主要从事供水水质监测、供水生产工艺管理、水质预警、海水淡化处理等工作, 具有丰富的生产及管理经验。

**E-mail:** qdwx0532@126.com

**收稿日期:** 2019-09-28