

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.007

# 管网输配系统中消毒副产物生成及控制技术研究

苏乐<sup>1</sup>, 朱延平<sup>1</sup>, 舒诗湖<sup>1</sup>, 闻劼慧<sup>2</sup>, 方芳<sup>2</sup>, 黄强<sup>2</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201600; 2. 上海市自来水奉贤有限公司, 上海 201400)

**摘要:** 针对近年来管网消毒技术产生的消毒副产物(DBPs)日益突出进而影响饮用水水质的问题,研究了管网DBPs的生成原理、常见消毒技术的特点以及对应生成DBPs的情况,并从管材和生物膜两方面总结了管网中影响DBPs生成和迁移转化的典型因素,从源头水厂消毒、管网维护、精准补氯、改进消毒技术等方面提出了控制管网DBPs生成和转化的运行管理建议,以及构建完善的管网饮用水去除DBPs体系,以期为提高二次供水水质提供借鉴。

**关键词:** 供水管网; 消毒副产物; 迁移转化; 精准补氯

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0042-05

## Research on Generation and Control Technology of Disinfection By-products in Pipeline Distribution System

SU Le<sup>1</sup>, ZHU Yan-ping<sup>1</sup>, SHU Shi-hu<sup>1</sup>, WEN Jie-hui<sup>2</sup>, FANG Fang<sup>2</sup>, HUANG Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201600, China; 2. Shanghai Fengxian Water Supply Co. Ltd., Shanghai 201400, China)

**Abstract:** The disinfection by-products (DBPs) generated by the pipe network disinfection technology have become increasingly prominent in recent years, which seriously affect the quality of drinking water. To solve the above problem, the principle of generating DBPs in pipe networks, the current application status of common disinfection technologies, technical characteristics, and the corresponding situation of generating DBPs are studied. The typical factors affecting the generation and migration of DBPs in the pipe network are summarized from the aspects of pipes materials and biofilms. The control method of the generation and transformation of DBPs in the pipe network is proposed from the source water plant disinfection, pipe network maintenance, precision chlorine supplement, and improved disinfection technologies. It is recommended to build a complete pipe network to remove DBPs in drinking water management, which can provide a reference for improving the quality of secondary water supply.

**Key words:** water supply network; disinfection by-products; migration and transformation; precision chlorine supplement

基金项目: 上海市科委社会发展重点项目(19DZ1204400)

通信作者: 舒诗湖 E-mail: shushihu@dhu.edu.cn; 朱延平 E-mail: yanpingzhu@dhu.edu.cn

近年来,随着科技的发展和工业现代化<sup>[1]</sup>进程的加快,我国人民生活水平不断提升,社会对城市及乡镇供水质量提出了更高的要求。水厂消毒和管网输配水系统消毒分别是保证出厂水和龙头水水质微生物安全性的最后屏障,但消毒剂的投加也往往伴随着消毒副产物(DBPs)的生成,从而对动物和人体产生致癌风险。由于消毒剂与管网水体接触时间较长,DBPs在管网中的生成量可能高于水厂消毒阶段的生成量。但目前供水管网中去除DBPs技术还不完备,如何通过控制管网输配系统中DBPs的生成,进一步优化饮用水水质,已成为现今供水管网技术改进与提升的重中之重。

1 供水管网中消毒副产物的生成与转化

在管网消毒技术中,管网中的DBPs主要是由二级消毒技术中剩余的余氯物质与供水管网中的前体物发生反应生成,以及部分从水厂中生成DBPs

沿着管道到达管网中,这些前体物主要有三类腐殖质:腐殖酸、富里酸和胡敏酸,这三类物质主要是死亡生物体经微生物分解而形成的有机物质,此外由于目前源水微污染问题日益突出,可能导致滤后水和出厂水的需氯量增加,从而生成更多的DBPs。同时,出厂水的有机物还可能通过吸附而附着在配水系统的管壁上,在管网中会产生一定量的DBPs。卤代DBPs主要有三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)、卤乙腈(HANs)、卤代酮(HKs)和致诱变化合物(MX)等有机卤代副产物和氯酸盐、溴酸盐等无机卤代副产物。

1.1 消毒技术产生消毒副产物现状

1.1.1 管网消毒技术

现今水厂及管网饮用水消毒方式主要有氯化消毒、氯胺消毒、二氧化氯消毒以及臭氧和紫外线(UV)消毒,主要消毒方式的技术特点见表1。

表1 管网主要消毒技术特点比较

Tab.1 Comparison of characteristics of main disinfection technologies in pipe network

项 目	消毒效果	消毒持续性	主要缺点	实际应用
氯化消毒	迅速,广谱	持续作用时间长	产生大量不同种类的DBPs,同时THMs、HAAs、HANs的浓度高于其他消毒方式	经济低廉,广泛应用于大型管网
氯胺消毒	杀菌能力较弱	氯胺稳定性好,持续性最强	产生具有更大危害性的氮类亚硝酸类消毒副产物,同时会产生异味物质	稳定性强,广泛应用于管网
二氧化氯消毒	氧化性最强,效果最好	持续性较强	需现场制备,存在爆炸风险,使用受限,成本较高,同时也会产生无机DBPs	危险性高,主要应用于中小型管网
臭氧消毒	消毒效果最佳	持续性较差	成本较高,并可能生成非卤代DBPs(主要为甲醇),若水中含Br <sup>-</sup> 会生成溴酸盐污染物	主要联合工艺消毒
紫外线消毒	迅速,不产生DBPs	无持续性	成本较高,不具备持续性	主要联合工艺消毒

从表1可以看出,多种消毒方式均可应用于管网二次消毒,为此应结合实际情况对DBPs的控制进行分类讨论。朱有长等<sup>[2]</sup>分析了一定剂量的4种消毒剂(液氯、二氧化氯、氯胺、次氯酸钠)DBPs的平均生成量,从整体来看次氯酸钠消毒生成的DBPs含量最少,可以有效控制DBPs。原因是次氯酸钠水解次氯酸程度不如液氯,因而起重要消毒效果的次氯酸较少,液氯氧化有机物生成消毒副产物能力大于次氯酸钠;同时氯胺和二氧化氯的效果也较好,在现实中应结合实际情况并考虑各类消毒方式的技术特点。

1.1.2 管网中消毒副产物的生成情况

DBPs的生成影响因素主要有消毒剂的种类、投加量、水质有机介质浓度、pH、温度、反应时间等,不

同的反应条件下生成的DBPs浓度可能不同。Wang等<sup>[3]</sup>、Huang等<sup>[4]</sup>通过实验取样得到深圳部分地区管网水部分消毒副产物在四季的变化情况,Yu等<sup>[5]</sup>对上海地区农村管网水消毒副产物情况进行了取样研究,相关数据如表2所示。

表2 管网水检出的部分DBPs浓度

Tab.2 Concentration of partial DBPs detected in the pipe network water  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目		消毒副产物浓度			
		THMs	HANs	HAAs	HKs
深圳	夏季	36.2	3.3	38.3	2.7
	冬季	23.5	2.2	22.4	0.7
上海	夏季	29.7	6.5	24.4	1.8
	冬季	17.2	2.1	16.8	0.7
注: 浓度为取样结果平均值。					

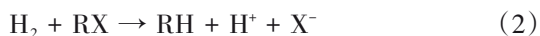
从表2可以看出,在管网水中,常见的DBPs均被检出,THMs和HAAs含量较高;从季节上来看,夏季DBPs浓度较高,冬季较低,可能是由于夏季的水质环境(如高温、有机物浓度可能相对冬季较高、消毒剂投加量可能有所增加等)更利于反应的发生;上海采用氯胺(化合氯)消毒的比重较大,故较深圳而言,其THMs和HAAs浓度较低,HANs浓度较高。

## 1.2 管网中消毒副产物迁移转化影响因素

### 1.2.1 管材对管网消毒副产物的影响

在现今城市和乡镇供水管网中,管材主要分为金属和塑料两种,金属管主要有球墨铸铁管、铸铁管、不锈钢管等,塑料管主要包括聚烯烃管和氯乙烯管。

铸铁管在城市供水管网中的利用率达到80%以上,铸铁管易生锈,管壁易形成金属氧化物,这类氧化物能吸附水中的天然有机物(NOM),被吸附的NOM会改变管壁的活性部位,促进余氯的消耗,同时这类金属氧化物能与NOM反应生成THMs的前体物,从而延长DBPs前体物与消毒剂在管道中的接触时间,增加THMs的含量,同时管道腐蚀过程中生成的 $\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{H}_2$ 可以还原卤代物,并且 $\text{Fe}^{2+}$ 的释放可以催化生成 $\text{OH}^-$ ,而它是促进HAAs生成的重要因素。这些因素都会加剧管网中DBPs的迁移转化<sup>[6-7]</sup>,还原机理可用如下化学方程式表示:



此外,塑料管深埋地下,可能会发生聚合反应,也可能存在土壤的部分污染物渗入,改变管网中DBPs的形态。

陈停等<sup>[8]</sup>研究了不同管材对DBPs生成势的影响,其中不锈钢管材中THMs和HAAs生成势最小,PE管(聚乙烯塑料)次之,铸铁管最大。

### 1.2.2 生物膜对管网消毒副产物的影响

长距离的输送管道会使管网水停留时间增加、余氯浓度减少,降低对细菌的杀灭作用,造成管道内壁中细菌繁殖生长并形成生物膜。生物膜中的微生物可能会降解管网水体中的有机物,降解后的产物会与DBPs发生物理化学作用,导致DBPs的迁移转化,其种类和浓度发生变化。此外,生物膜的存在也加剧了管网腐蚀,严重恶化供水水质。Ding等<sup>[9]</sup>模拟了饮用水分配系统,结果表明,生物膜对THMs形成贡献在很大程度上依赖于系统中的水力

学模式、季节变化等。此外,水体的硝化作用也会促进硝化生物膜的生成,这类硝化有机物可以作为DBPs的前体。同时水质因素(pH、溶解氧、温度、水龄等)和运行工况(流量、压力等)都会对管道中的生物膜造成影响,进而导致DBPs的迁移转化。

## 2 管网消毒副产物控制研究进展

### 2.1 水厂源头控制

在一级消毒过程中,控制出厂水的DBPs含量,即可降低其进入管网输配系统的DBPs浓度,可采用的措施如下:①根据源水水质的特性选择合适的消毒剂;②在水厂一级消毒过程中,采取消毒剂分段投加方式,如先对源水进行预氯化等,同时也可采用强化混凝、颗粒活性炭吸附和膜分离三种方法,从源头抑制前体物的产生;③在一级消毒中,通过预处理或深度处理工艺,如高锰酸钾预氧化、臭氧-生物活性炭深度处理、超滤膜、曝气法、超滤法、臭氧高级氧化技术等方法,有效去除消毒副产物<sup>[10]</sup>。

### 2.2 管网控制

#### 2.2.1 管网维护控制消毒副产物

供水管道是输送饮用水的生命线,长期作业使其表面附着滋生大量生物膜和被腐蚀,因此,应定期对管道进行清洗,有条件的,可涂防腐材料。可采取如下措施通过管网维护控制消毒副产物:①开启消火栓冲出管道中的沉积物,结垢严重时用刮管器清除,防止管网水因生物膜或管道腐蚀发生水质恶化;②适当改变管网水的运行工况,缩短水龄,提高运行效率,减少消毒剂与水体中的前体物长时间接触可能发生的DBPs生成与转化。

#### 2.2.2 管网精准补氯控制消毒副产物

管网庞大且密布复杂,深埋地下,长距离的输配管道不适宜像水厂一样采用大型深度处理工艺对前体物进行去除,适宜方式是在管网二级消毒中实现对管网水质的精准补氯,除去附着在管道中的菌落。在管网中,冗长的输配管道使得管网水余氯浓度不断下降,参考国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的规定,应根据供水管网输配距离、总氯衰减情况、管网末梢微生物指标检测结果等调整总氯控制目标,余氯在管网末梢(用户端)的含量不应低于0.05 mg/L。传统投加模式已不利于管网各处的余氯浓度调节稳定,因此通过优化管网



二级补氯模式,构建管网水质模型,合理布局管网中途补氯点,科学控制加氯量,保证管网末梢余氯浓度达到要求,与水厂一级消毒和管网末梢终端消毒一并形成供水管网多级消毒模式<sup>[11-12]</sup>,保证管网末端水质达标,既能够缓解出厂水对 DBPs 的消毒压力,还能够解决一次投加模式存在的消毒剂投加成本较高的问题,同时保证了水中游离氯的浓度,提高 DBPs 的去除效果。

### 2.2.3 改进管网消毒工艺控制消毒副产物

通常在氯化消毒中会有一个预先处理的消毒模式,但这会导致 DBPs 的浓度大大提高,因此应在可能的条件下取消预加氯,在保证消毒效果的前提下控制好加氯量,避免余氯浓度过高,同时投加氯后应与水快速混合。在现今管网的实际应用中,开始采用二次补氯的方式,即在水厂出厂水至供水管网的开始点加入少量的氯,使水中余氯保持较低浓度,在管网末梢二次投加适宜浓度的氯,保证管网末梢水的余氯达到要求,可以有效减少 DBPs 的产生量<sup>[13-14]</sup>。

在氯胺消毒中,马蓉等<sup>[15]</sup>的研究表明,DBPs 的生成受 pH 和  $\text{Cl}_2/\text{N}$  比值的影响较大,氯胺消毒副产物 THMs 的生成量小于限值,但 HAAs(主要是二卤乙酸)的生成量成为新的限值,可以有效指导用于管网控制 DBPs 生产量。此外,氯胺消毒会产生一定量的 N-DBPs,这部分也不可忽视,但对该类 DBPs 的控制还在实验研究中。

同时利用二氧化氯、紫外线、臭氧等消毒方式能有效减少 DBPs 的生成浓度。Linden 等<sup>[16]</sup>将新兴的杀菌紫外线发光二极管作为载体用于配水系统的二次消毒,可以非常有效地去除管道内滋生的菌落,破坏生物膜,同时经济实用,无需使用化学二级消毒剂,为公众提供安全饮用水,这是未来消毒技术发展的一个方向。另外,近年来国内外学者研究了不同组合的消毒工艺,如  $\text{UV}/\text{Cl}_2$ 、 $\text{O}_3/\text{Cl}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3$  等,不但可以减少消毒剂的投加量,同时具有较好的协同效果,产生更低浓度的 DBPs。

## 3 结语

管网是饮用水输配最重要的场所,在此区域实现 DBPs 的有效控制对整个水系统来说至关重要。近年来,专家学者对管网系统中 DBPs 的生成控制做了很细致的工作,越来越多的改良技术以及

新型实用技术被应用于实验和实际中。如何统筹城市管网扩建与管网消毒方式之间的关系,在保证供水微生物安全性和经济性的同时进一步提升龙头水的化学安全性,是未来的重要研究课题。

## 参考文献:

- [1] 林英姿,刘雪瑶. 饮用水中氯化消毒副产物的研究进展[J]. 中国资源综合利用,2017,35(8):128-130.  
LIN Yingzi, LIU Xueyao. Research progress of chlorination and disinfection by-products in drinking water[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017,35(8):128-130(in Chinese).
- [2] 朱有长,刘敬雅,赵尔格,等. 饮用水消毒副产物比较分析与健康风险评估[J]. 净水技术,2019,38(5):45-50.  
ZHU Youchang, LIU Jingya, ZHAO Erge, et al. Comparative analysis and health risk assessment of disinfection by-products (DBPs) in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 45-50(in Chinese).
- [3] WANG L, CHEN Y, CHEN S W, et al. A one-year long survey of temporal disinfection byproducts variations in a consumer's tap and their removals by a point-of-use facility[J]. Water Research, 2019, 159:203-213.
- [4] HUANG H, ZHU H H, GAN W H, et al. Occurrence of nitrogenous and carbonaceous disinfection byproducts in drinking water distributed in Shenzhen, China [J]. Chemosphere, 2017, 188:257-264.
- [5] YU Y, MA X, CHEN R Y, et al. The occurrence and transformation behaviors of disinfection byproducts in drinking water distribution systems in rural areas of eastern China[J]. Chemosphere, 2019, 228:101-109.
- [6] 程明,胡晨燕,章靖,等. 管网中的饮用水消毒副产物研究进展[J]. 净水技术,2014,33(2):17-21.  
CHENG Ming, HU Chenyan, ZHANG Jing, et al. Advances in research of disinfection by-products in drinking water distribution system[J]. Water Purification Technology, 2014,33(2):17-21(in Chinese).
- [7] 叶卿萍,桂芳. 配水管网对消毒副产物形成及转化的影响[J]. 甘肃科技,2011,27(5):46-48.  
YE Qingping, GUI Fang. Effect of water distribution pipeline on the formation and transformation of disinfection by-products [J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27(5):46-48(in Chinese).
- [8] 陈婷,徐叶琴,李冬平,等. 供水管网生物膜特征及对

- 消毒副产物生成势的影响[J]. 供水技术, 2019, 13(1): 1-5.
- CHEN Ting, XU Yeqin, LI Dongping, *et al.* Characteristics of biofilm and influence on the potential of disinfection by-products in pipe wall of water supply network [J]. Water Technology, 2019, 13(1): 1-5 (in Chinese).
- [9] DING S K, DENG Y, BOND T, *et al.* Disinfection byproduct formation during drinking water treatment and distribution: a review of unintended effects of engineering agents and materials [J]. Water Research, 2019, 160(12): 313-329.
- [10] 范宁伟, 翦英红, 辛丙靖, 等. 饮用水中消毒副产物及其消除技术研究进展[J]. 科技创新与应用, 2017, 35(7): 171, 173.
- FAN Ningwei, JIAN Yinghong, XIN Bingjing, *et al.* Research progress on disinfection by-products in drinking water and its elimination technology [J]. Technology Innovation and Application, 2017, 35(7): 171, 173 (in Chinese).
- [11] 赵欣, 魏雨晴. 城市供水管网消毒副产物及多级加氯消毒[J]. 净水技术, 2018, 37(增刊): 73-75.
- ZHAO Xin, WEI Yuqing. Disinfection by-products in municipal water supply pipe and multistage chlorination [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(S): 73-75 (in Chinese).
- [12] 胡玲, 戚雷强, 舒诗湖, 等. 供水管网加氯模式的现状与多级消毒发展[J]. 中国给水排水, 2015, 31(2): 18-21.
- HU Ling, QI Leiqiang, SHU Shihu, *et al.* Status quo of drinking water system disinfection and development of multi-stage disinfection [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(2): 18-21 (in Chinese).
- [13] 黄涛, 刘硕. 饮用水处理消毒副产物产生及控制研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(7): 88-90.
- HUANG Tao, LIU Shuo. Research progress on production and control of disinfection by-products in drinking water treatment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(7): 88-90 (in Chinese).
- [14] 温凯茵, 樊建军. 饮用水消毒副产物控制研究进展[J]. 广东化工, 2019, 46(1): 78-79.
- WEN Kaiyin, FAN Jianjun. Research progress in the control of disinfection by-products in drinking water [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(1): 78-79 (in Chinese).
- [15] 马蓉, 吕锡武, 窦月芹. 氯胺消毒对管网中消毒副产物的控制[J]. 水处理技术, 2006, 32(7): 67-69.
- MA Rong, LÜ Xiwu, DOU Yueqin. Trihalomethanes and haloacetic acids control in water system upon chloramination [J]. Water Treatment Technology, 2006, 32(7): 67-69 (in Chinese).
- [16] LINDEN K G, NATALIE H, VANESSA S. Thinking outside the treatment plant: UV for water distribution system disinfection [J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(5): 1226-1233.
- 作者简介: 苏乐(1997-), 男, 浙江苍南人, 硕士研究生, 研究方向为管网建模技术、漏损控制、饮用水处理工艺等。
- E-mail: sule970107@163.com
- 收稿日期: 2020-03-27
- 修回日期: 2020-04-09

(编辑: 丁彩娟)

贯彻《中华人民共和国水法》, 依法治水管水