

水源与饮用水保障

王远, 陆纳新, 汪鹏, 等. 供水管网系统中 DOM 解析与 DBPs 生成特征[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 63-70.

WANG Y, LU N X, WANG P, et al. Analysis of DOM and formation characteristics of DBPs in water supply pipelines network system[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 63-70.

供水管网系统中 DOM 解析与 DBPs 生成特征

王远^{1,2}, 陆纳新^{3,*}, 汪鹏⁴, 唐玉霖¹, 王慕³

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 无锡市锡山区应急管理局, 江苏无锡 214100; 3. 无锡市政公用环境检测研究院有限公司, 江苏无锡 214100; 4. 长江南京航道工程局, 江苏南京 210000)

摘要 为保障城市供水安全, 实现南方某市优质饮用水入户, 通过对目前供水管网水质情况进行调查分析, 明确供水管网系统中溶解性有机物(DOM)在不同季节、余氯及停留时间等参数条件下对消毒副产物(DBPs)生成情况的影响。研究表明: 供水管网系统中常规水质指标如浑浊度、余氯和溶解性有机物主要取决于出厂水的浓度, 供水管网中余氯变化较大, 在管道中进行补氯有利于提升供水管网中不利点的居民饮用水安全。紫外和荧光光谱分析方法在供水管道中检测方便、检测限较低且不受其他工艺影响且检测浓度较低, 可有效指示供水管道中存在的异常风险。三氯甲烷与卤乙酸是供水管网系统中主要存在的 DBPs, 其生成受到出厂水水质、管道、管道距离及季节性等多因素的影响, 在供水管线中的含量变为随管线距离增长而增大; 在温度较高的季节 DBPs 生成浓度高、反应速度快, 应受到重点关注。

关键词 供水管网 溶解性有机物 消毒副产物 余氯 荧光光谱

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0063-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.007

Analysis of DOM and Formation Characteristics of DBPs in Water Supply Pipelines Network System

WANG Yuan^{1,2}, LU Naxin^{3,*}, WANG Peng⁴, TANG Yulin¹, WANG Mu³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Wuxi Xishan District Emergency Management Bureau, Wuxi 214100, China;

3. Wuxi Public Utilities Environment Testing Research Institute Co., Ltd., Wuxi 214100, China;

4. Nanjing Waterway Engineering Bureau of the Yangtze River, Nanjing 210000, China)

Abstract In order to ensure the safety of urban water supply and realize the entry of high-quality drinking water in a southern city, the current water quality of the water supply pipelines network was investigated and analyzed. The influence of dissolved organic matter (DOM) in the water supply pipelines network system on the formation of disinfection by-products (DBPs) under different seasons, residual chlorine and residence time was clarified in this study. The conventional indices of DOM in the water supply pipelines network system, such as turbidity, residual chlorine and DOM mainly depended on the concentration of water production. After chlorine supplementation, it was conducive to improving the safety of drinking water for residents at unfavorable points of the pipelines network. Fluorescence spectroscopy and UV was convenient to test in water supply pipelines, which was not affected by other processes with low concentrations and indicated the risk of abnormalities in water supply pipelines. THMs and HAAs were the main DBPs in the water supply pipelines network system, and their formation was affected by many factors such as effluent quality, pipelines, pipelines

[收稿日期] 2023-07-31

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201002)

[作者简介] 王远(1996—), 男, 硕士, 研究方向为消毒副产物在原水输送管道中的迁移机制, E-mail: 2080919493@qq.com。

[通信作者] 陆纳新(1968—), 男, 正高级工程师, 研究方向为供水保障, E-mail: lunx01@sina.com。

distance and seasonality, and the content in the water supply pipelines increases with the increase of pipelines distance. In the season of higher temperature, the concentration was high and the reaction speed was fast, So changes in the content of disinfection by-products should be widely concerned.

Keywords water supply pipelines network dissolved organic matter (DOM) disinfection by-products (DBPs) residual chlorine fluorescence spectrum

城市供水系统包含水源、水厂、管网及二次供水。二次供水是城市供水的主要形式,二次供水水质安全是城市饮用水安全保障体系的重要组成部分。设计、建设质量、设施管理维护及管网水质情况等都是二次供水水质的重要影响因素。以往,某市居民二次供水设施建设都采用了“开发商建设、物业代管”的“二元供水模式”,由此带来的建设质量不过关、管理不到位等问题严重影响城市供水的“龙头水质”。此外,管道设备老化、管线迁改施工等因素也给用水安全带来一定程度的困扰。解决好城市二次供水中的问题,作为城市供水设施完善、供水水质提升的重要一环,关系到城市饮用水“最后一公里”的安全。

目前,全国各地的水厂出厂水绝大部分都符合国家饮用水卫生标准,甚至在一定程度上比国家标准所规定的标准更高^[1]。但在供水管线的末端经常出现水质投诉的问题,考虑到长距离运输中余氯的衰减以及老旧管内的饮用水在传输和储存时,水会与管壁微生物发生反应^[2],用户龙头水的水质比起出厂水和管网水都有不同程度下降,对于用户而言,最主要的水质问题是感官嗅味和生物性指标^[3]。因此,在国家范围内正在推行二次供水改造计划,保障供水管网系统中的“最后一公里”^[4]。2015年3月2日,住建部、国家发改委、公安部、国家卫生计生委联合印发《关于各地加强和改进城镇居民二次供水设施建设与管理确保水质安全的通知》(建城〔2015〕31号),推动形成权责明晰、管理专业、监管到位的二次供水设施建设与管理工作的新格局。2022年,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—

2022)的颁布,进一步提升城市供水水质标准。

南方某城市为保障城市供水安全,提供优质饮用水入户,在城市供水管网改造中,对管网水中的常规水质指标浑浊度、余氯、溶解性有机物(DOM),以及常见的水质紫外(UV)和荧光光谱指标展开研究,重点研究了改造管网中消毒副产物(DBPs)的生成情况,以期能为供水管网改造提供技术和理论支持。

1 研究对象

本研究以南方某市 XD 水厂为出厂水的某供水管网系统水质及水压等变化情况为研究对象,从2020年6月—2021年3月进行近一年的跟踪研究。为全面了解供水管网的水质情况,选择具有代表性的8处采样点进行水样采集及水质分析。本文以 XD 水厂为出厂水的 A 小区、B 小区以及 C 小区作为研究对象,在 B 小区和 C 小区之间设有增压站,用来提升水压,并投加次氯酸钠进行补氯。A 小区距离 XD 水厂直线距离较近,距离小于 2 km;B 小区距离 XD 水厂为 8~9 km;增压站的位置位于出厂水的直线距离约为 15 km;输配水管线最长的 C 小区距离 XD 水厂的直线距离大于 30 km,相关取样点如图 1 所示。供水管网系统管材管龄、供水模式具体情况如表 1 所示。



图 1 供水管网系统中的取样点

Fig. 1 Water Sampling Points in Water Supply Pipelines System

表 1 供水管网系统管材管龄、供水模式

Tab. 1 Pipe Material Age and Water Supply Mode in Water Supply Network System

小区	建成年份	室外管网情况	泵房	给水立管
A 小区	2015 年	室外埋地市政给水管为球墨铸铁管;低区加压给水管为球墨铸铁管;中区加压给水管为钢管	供水方式采用变频泵和水池;泵房内管道采用镀锌钢管	衬塑钢管和无规共聚聚丙烯 (PPR)管

(续表1)

小区	建成年份	室外管网情况	泵房	给水立管
B 小区	2008 年—2009 年	室外埋地市政给水管为球墨铸铁管和聚乙烯 (PE) 塑料管; 加压给水管为钢管	供水方式采用无负压变频供水方式	多层住宅生活给水管道井内立管为 PPR 管; 小高层住宅生活给水管道井内立管为衬塑镀锌钢管
C 小区	2000 年	室外埋地市政给水管为铸铁管; 加压给水管为铸铁管	供水方式采用 1 座不锈钢水箱+1 套变频加压给水泵组; 泵组吸水母管及出水总管均为镀锌钢管, 焊接或沟槽连接, 管径为 DN100~DN150, 其中部分管道锈蚀较严重	PPR 管

2 结果与讨论

2.1 常规水质指标

2.1.1 浑浊度

浑浊度是指溶液对光线通过时所产生的阻碍程度,包括悬浮物对光的散射和溶质分子对光的吸收。水的浑浊度可以反映水中悬浮物质的含量。水中的悬浮物大部分是土壤、沙子、细小的有机物和无机物、浮游生物、微生物和胶体物质等。图 2 为在不同季节下,供水管网与用户龙头处浑浊度的变化情况。由图 2 可知,浑浊度在进入供水管网及用户处中的变化集中在 0.07~0.14 NTU,总体变化不大,均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值(1 NTU)^[5]。在增压站出水口处浑浊度较高,为 0.21~0.23 NTU,可能是此处采样点为消火栓,为管道的末端。另外,在冬季 XD 水厂的出厂水浑浊度较高,发现冬季管网中的浑浊度比其他几个季节高。

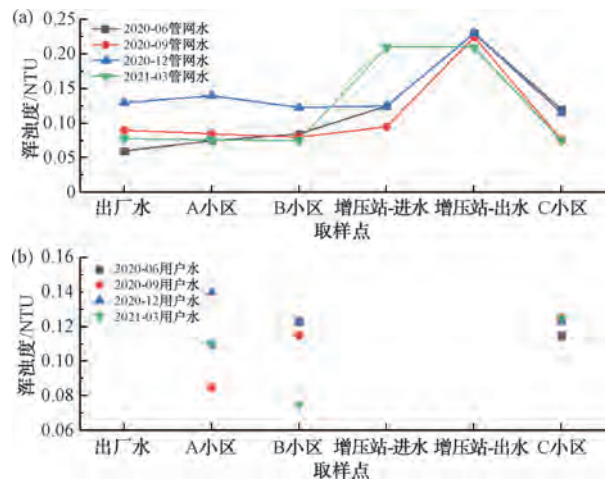


图 2 供水管网与用户水浑浊度变化

Fig. 2 Variation of Turbidity of Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

2.1.2 余氯

水厂经过次氯酸钠消毒之后进入供水管网,在输配水运输中水中的余氯与水中的有机物会发生反应。图 3 为 XD 出厂水在管网中不同位置、时期的余氯的变化情况。出厂水的余氯质量浓度为 0.68~0.99 mg/L, 满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)对出厂水规定的限值(0.3~2.0 mg/L)^[5]。2020 年 6 月和 9 月检测的水温分别为 26.6℃和 30.1℃,2020 年 12 月和 2021 年 3 月检测的水温分别为 14.5℃和 10.9℃。温度较高的季节,出厂水的余氯要比温度较低的季节高,且在管网中的衰减速率较快。这可能主要是因为温度较高下,氯与水中有机物反应加快导致水中的余氯消耗的速率加快,使得管网中余氯含量快速降低。龙头水的余氯在 A 小区与 B 小区均高于 0.05 mg/L,满足饮用水的安全需求。增压站进水在 2020 年 6 月、9 月、12 月检测的余氯值分别为 0.01、0.03、0.05

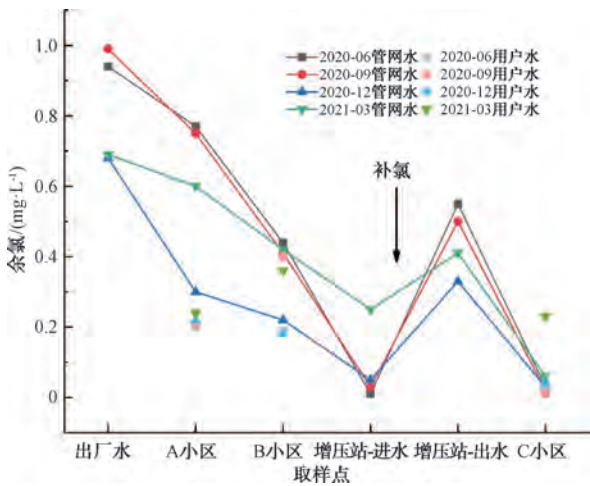


图 3 供水管网与用户水余氯变化

Fig. 3 Variation of Residual Chlorine in Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

mg/L,均低于或等于标准限值。经过增压站补氯后,增压站出水余氯的质量浓度分别为 0.55、0.50、0.33 mg/L,达到卫生标准要求。但经过长距离供水管网输水,在管网末端的 C 小区,用户龙头水在前 3 次的测量中都是低于安全标准。在 2021 年 3 月完成改造后,C 小区内部重建二次供水泵房,供水方式改为无负压供水,并进行加氯,泵房出水的余氯质量浓度为 0.23 mg/L,达到了安全饮用的标准。另外,在用户采样时,居民用户体验感也明显上升。供水方式的改变减少了水在水箱的停留时间,进而降低了余氯在水箱的衰减程度。

2.1.3 DOM

在供水管网中溶解性有机碳(DOC)的含量变化反映水中 DOM 的总量及其迁移规律,在一定程度上会对后续 DBPs 的形成产生影响^[6]。由图 4 可知,出厂水中 DOC 的质量浓度为 1.4~2.8 mg/L,比较明显的是在冬季出厂水中的 DOC 较高,可能和水厂生物活性炭在冬季效果较差有关,在沿程不受外来因素的影响下,冬季取样整个供水管网中 DOC 均处于比其他季节高的情况。在温度较高的季节下,各取样点的 DOC 浓度相差不大且变化趋势类似。用户龙头水的 DOC 浓度与入区管网水接近,说明在泵房及水箱的储存过程中 DOC 指标没有受到太多影响。DOC 衰减的速率较低,在长距离的供水管网中,二次加压补氯后 DOC 的含量呈现先下降后稍有上升的趋势。

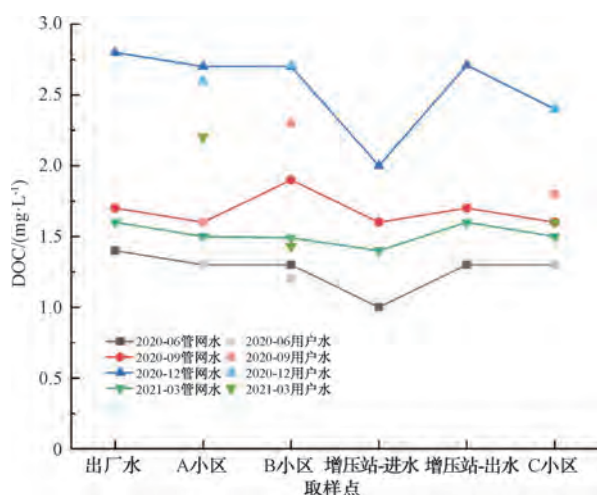


图 4 供水管网与用户水 DOC 变化

Fig. 4 Variation of DOC in Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

2.1.4 高锰酸盐指数(COD_{Mn},以 O₂ 计)

在调查水质期间,以 XD 水厂为出厂水的沿程管网及用户龙头处的 COD_{Mn} 变化指标如图 5 所示。COD_{Mn} 主要表示水中还原性物质的含量,其中最为主要的是有机物质,被用来评估水中有机污染的水平。COD_{Mn} 在整个供水处理系统中质量浓度为 0.93~1.79 mg/L,其中 2020 年 12 月为调查期间的最大值,此现象与浑浊度和 DOC 在季节性差异上的变化相似,可能是在此月份水中余氯浓度较低所导致,在用户处的浓度与对应的管网中的浓度接近。在取样检测期间,所有 COD_{Mn} 的含量都在国标规定的限值以内。

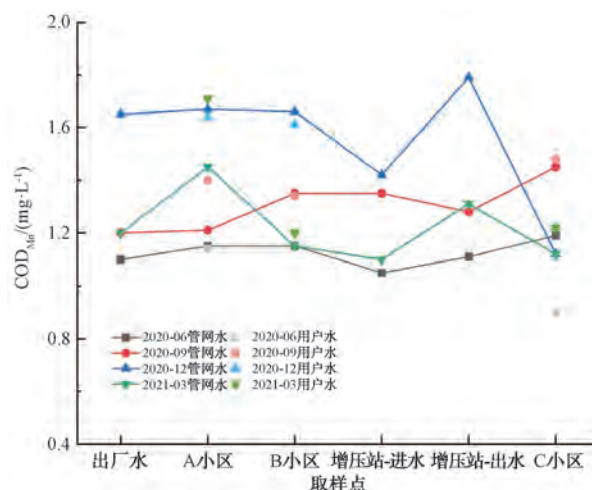


图 5 供水管网与用户水 COD_{Mn} 变化

Fig. 5 Variation of COD_{Mn} in Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

2.2 水质的光谱指标

2.2.1 UV₂₅₄

UV₂₅₄ 是水中一些有机物在 254 nm 波长 UV 下的吸光度,反映水中大分子有机物以及含 C=C 双键和 C=O 双键的芳香族化合物的含量。图 6 为供水管网中 UV₂₅₄ 沿程的变化,一定程度反映了供水管网中有机物的变化。出厂水中 UV₂₅₄ 主要在 0.010~0.025 cm⁻¹,且在管网沿程的变化不明显。利用皮尔逊相关系数,UV₂₅₄ 和 DOC 的 r 为 0.76,具有较高的相关性,说明了在不同取样时间下的变化与 DOC 相似,在温度较低的 2020 年 12 月处于一个较高的位置。UV₂₅₄ 在管网中的变化主要受到出厂水的影响,各月管网中 UV₂₅₄ 的变化幅度不大,用户龙头处与管网水的差异也比较小。该指标的变化还

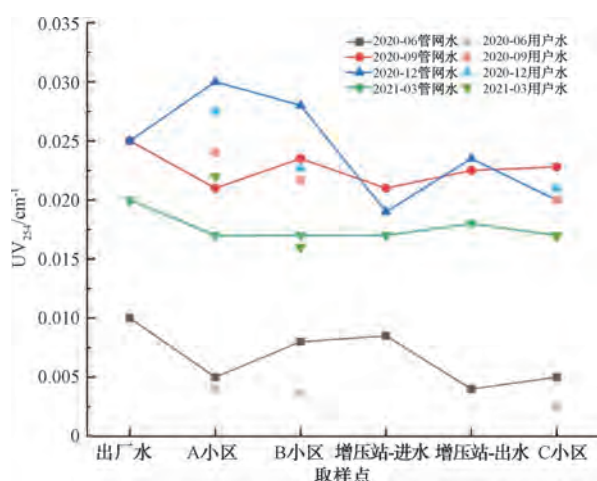


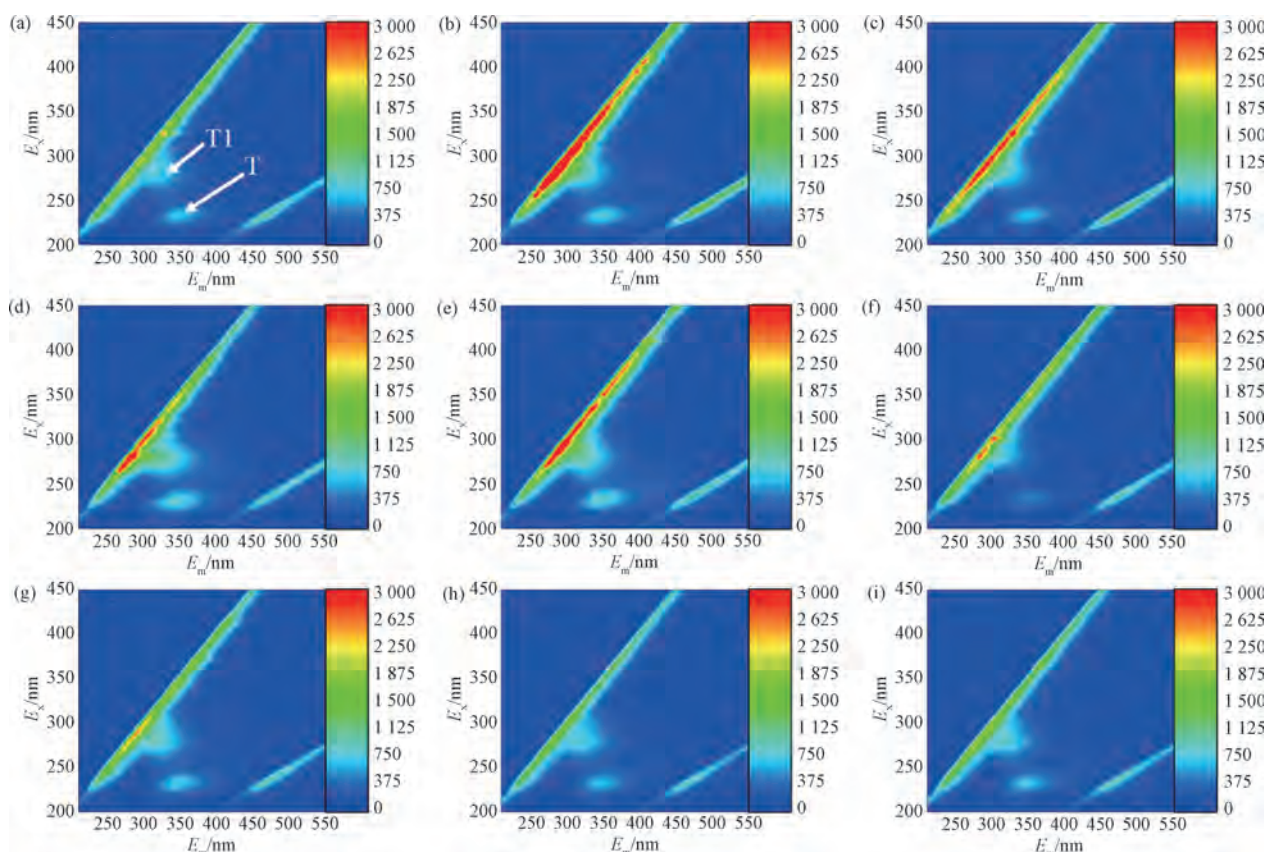
图6 供水管网与用户水 UV_{254} 变化

Fig. 6 Variation of UV_{254} in Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

与小区内部供水管道的材质相关,可用于水质中有机物的监测。

2.2.2 荧光光谱图

流程内检测数据各管网及用户取样点的典型荧光峰位置如图7所示,可以看出水中的荧光峰的位置主要集中在T峰 $E_x = 225 \text{ nm}/E_m = 340 \text{ nm}$ 以及T1峰 $E_x = 275 \text{ nm}/E_m = 340 \text{ nm}$ 处,两者均为类蛋白(类色氨酸)成分,在沿程的变化含量较低且变化趋势不明显,其在余氯浓度较高的同一小区内,随停留时间增加有下降趋势,在这段反应过程中荧光成分会有一定的下降。比较明显的变化发生在增压站进行二次补氯之后,有机物的荧光强度进一步进行上升,之后到达D小区,当水中含氯量基本为0的情况下,有机物的荧光强度明显增强,说明管道内存在微生物超标风险。在某些特定情形下可用荧光光谱来指示管线中出现的异常风险^[7],如荧光强度不符合逻辑的增强或者荧光峰数量的增加或偏移等,可结合三维荧光光谱检测饮用水在供水管网中的荧光数据,利用平行因子(parallel factors, PARAFAC)以及



注:(a)~(i)分别表示出厂水;A小区-管网;A小区-用户;B小区-管网;B小区-用户;增压站-进水;增压站-出水;C小区-管网;C小区-用户。

图7 管网水及用户水典型荧光光谱

Fig. 7 Typical Fluorescence Spectra of Network Water and Household Tap Water

支持向量机分类模型方法^[8-9]进行分类识别,对饮用水中的特征污染物进行分类检测,得到水质相关污染物性质及含量。因此,荧光技术在表征供水管网饮用水安全上具有可行性。

2.3 供水管网中 DBPs 的分布

分别对南方某市 XD 水厂出水及供水管网中最常见的 DBPs 进行了检测,重点检测三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs),共检出 5 种 DBPs,分别为三氯甲烷 (TCM)、一溴二氯甲烷 (BDCM)、二溴一氯甲烷 (DBCM)、二氯乙酸 (DCAA) 和三氯乙酸 (TCAA)。由图 8 可知,供水管网中经过 4 次取样之后,管线中质量浓度分别为 15.4~18.6、12.1~23.2、11.7~31.4、8.9~24.2 $\mu\text{g/L}$ 。THMs 总量在

8.9~31.4 $\mu\text{g/L}$,均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。TCM、BDCM 和 DBCM 的变化趋势主要体现为随供水管线与时间延长大致呈逐渐升高趋势,在不同季节的情况下表现得更为明显。DCAA 与 TCAA 是南方某小区供水管网及用户管道中检出的主要 HAAs,在 4 次取样的过程中管线中 HAAs 质量浓度在 0.89~4.2、2.2~6.88、0.66~2.14、1.98~3.5 $\mu\text{g/L}$,总质量浓度为 0.66~6.88 $\mu\text{g/L}$ 。在供水管网运输过程中以及在增压站进行补氯之后 TCAA 含量要远高于 DCAA,这是余氯浓度较高的情况下更加速氯的取代反应,使得 HAAs 向高氯代 TCAA 的生成速率加快。

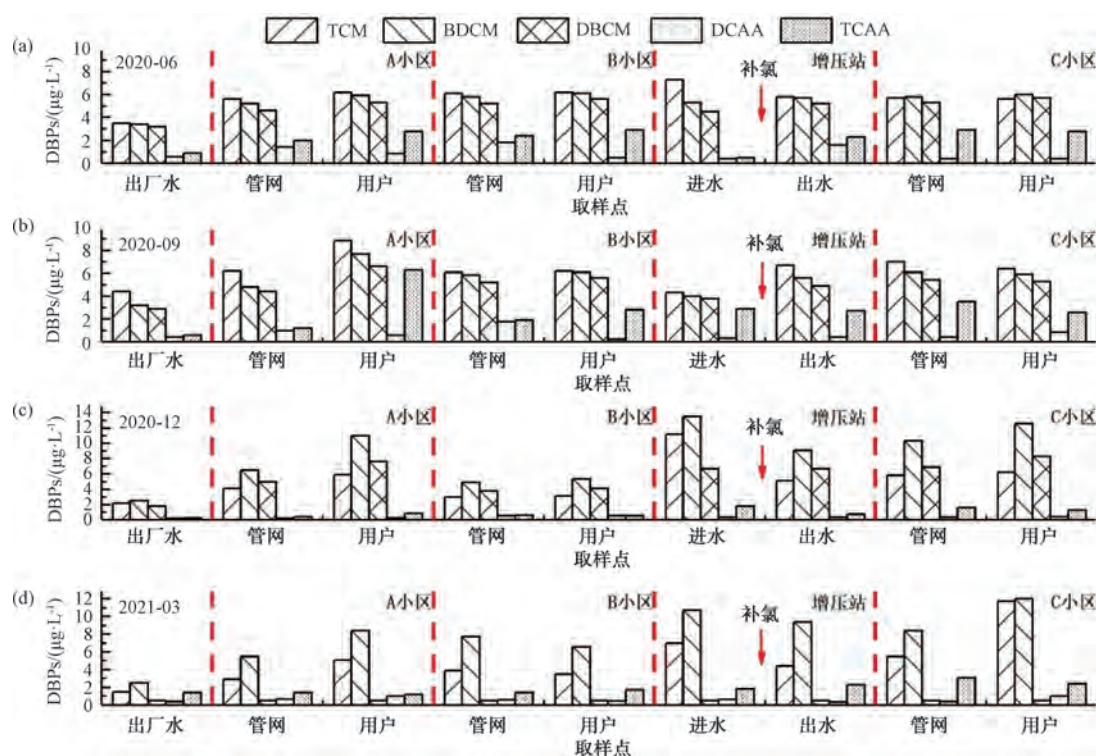


图 8 供水管网与用户水 DBPs 变化

Fig. 8 Variation of DBPs in Water Supply Pipelines Network and Household Tap Water

在温度较高的季节如 2020 年 6 月与 2020 年 9 月,出厂水中所测出的 DBPs 浓度较温度较低的季节高,且各 DBPs 在温度较高季节与氯的反应速度加快,水中各产物的浓度可在总管线前段就处于较高的稳定水平。对于温度较低的季节,受到温度对取代反应的抑制,管线中 DBPs 需要较长的反应周期,因此,在管线中表现为递升的趋势^[10]。在进行补氯之后,管线中的 THMs 与 HAAs 又进一步得到

了提升,是因为管线中存在的 DBPs 前体物与余氯进一步反应导致浓度再次升高。对于同一小区内部,在用户的水龙头处所检测出的 DBPs 浓度较进入小区管网处的小区有一定的升高,可能在小区内部存在加压泵房与水箱以及老旧的输水管道上存在的微生物代谢产物作为 DBPs 的前体物质,水中的余氯与 DBPs 的前体物反应时间的增长会导致 DBPs 进一步提升。同时,出管线中的 DBPs 与季节

的变化存在较强的关系,主要体现在温度对氯化反应的影响^[11]。在供水管网系统中,DBPs的形态分布特性会受到更多的因素影响^[12-13],在此次研究过程中进行小区内部的研究时,还发现了管道内部的生物指标能直观地反映水质情况,这些指标也是影响DOM生成DBPs的一个重要因素。因此,梳理供水管网中水质的化学特性及生物特性之间的平衡关系应在供水管网改造中受到重视。

2.4 相关性分析

THMs类与DOM荧光光谱测定的类蛋白组分的相关性如图9所示,类蛋白组分与THMs类相关性线性回归方程式得到其中类蛋白组分与THMs的相

关性最高为 $R^2=0.830$;与其组成成分TCM、BDCM、DBCM的相关性依次降低,为 $R^2=0.814$ 、 0.691 、 0.653 ,均低于类蛋白组分与总THMs的相关性。蛋白类物质是THMs主要的前体物,考虑其相关性均处于较高的水平上,尤其是与总THMs具有显著相关性,类蛋白组分适用于供水管网系统中THMs前体物含量的预测。利用皮尔逊相关系数,HAAAs中DCAA、TCAA与类蛋白组分的相关性分别为 $r=0.660^{**}$ ($p<0.01$)、 $R^2=0.440$,与DCAA具有相对较高的相关性,与TCAA的相关性处于较低水平,故在HAAAs方面,荧光组分的表征效果仍需继续研究。

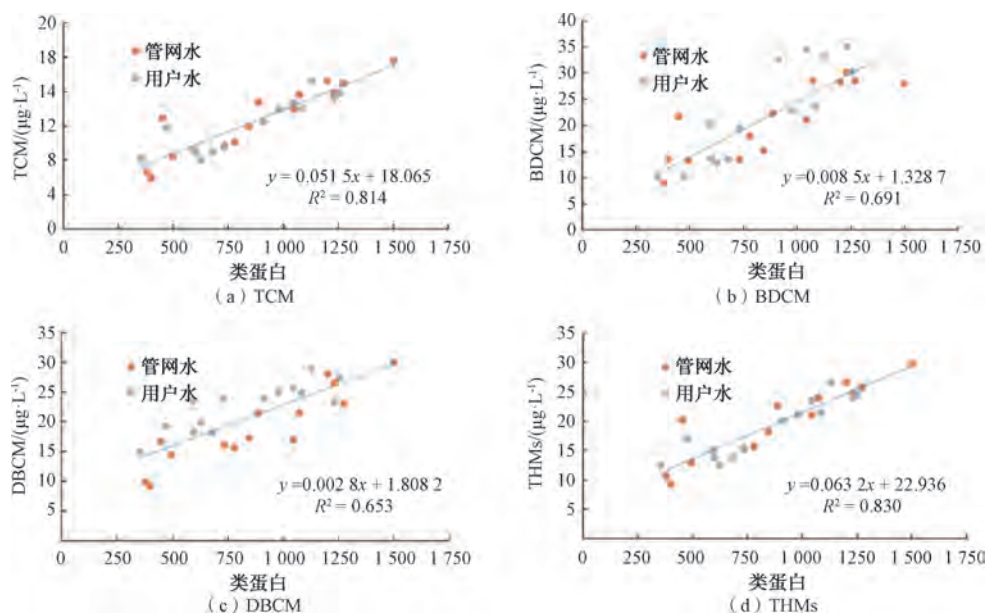


图9 类蛋白组分与各THMs的相关线性回归方程

Fig. 9 Correlated Linear Regression Equation for Each THMs and Proteinoid Component

3 结论

随着国家饮用水水质标准的提升,对供水管网进行改造及水质监管受到更多关注。本文对南方某供水管网水质进行研究,得到主要结论如下。

(1)南方某供水管网系统中主要的常规水质指标如浑浊度、余氯、DOC和 COD_{Mn} 主要取决于饮用水厂出水的水质,其中余氯和供水管网的距离有关,合适的地方进行二次补氯非常必要,补氯之后有利于提升管网不利点的居民饮用水安全。

(2)采用 UV_{254} 光谱分析法,可以快速反映管网水质有机物的变化,三维荧光在供水管网中测试也非常方便,能进一步通过有机物特征峰的变化,显示供水管道中存在的生物安全风险。

(3)供水管网中主要存在的DBPs为THMs、HAAAs,其生成量受原水水质、管道、管道距离及季节性等多因素的影响,在供水管线中的含量随管线距离增长而增大。在温度较高的季节生成浓度高、反应速度快,在中间泵站补氯时,应考虑DBPs的生成。

参考文献

- [1] 董秉直,肖健,华建良,等. 高品质饮用水的思考以及苏州实践[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 19-27.
DONG B Z, XIAO J, HUA J L, et al. View of high quality drinking water and its practice in Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 19-27.
- [2] LI T, ZHANG Y L, GUI B, et al. Application of coagulation-

- ultrafiltration-nanofiltration in a pilot study for Tai Lake water treatment[J]. *Water Environment Research*, 2019, 92: 579–587. DOI: 10.1002/wer.1247.
- [3] XU H C, CAI H Y, YU G H, et al. Insights into extracellular polymeric substances of cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* using fractionation procedure and parallel factor analysis [J]. *Water Research*, 2013, 47(6): 19. DOI: 10.1016/j.watres.2013.01.019.
- [4] 梁思宸. 南方某市某区二次供水系统现状特征解析及水质优化措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LIANG S C. Analysis of the current situation and characteristics of secondary water supply system in a district of a city in the south of China study on water quality optimization measures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [6] 陈方, 张晓燕, 黄平捷, 等. 饮用水有机污染物的三维荧光光谱检测与分析方法[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(3): 368–377.
CHEN F, ZHANG X Y, HUANG P J, et al. Detection and analysis of organic contaminant in potable water based on three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2016, 42(3): 368–377.
- [7] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 等. 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2056–2066.
LÜ W W, YAO X, ZHANG B H, et al. Fluorescent characteristics and environmental significance of particulate organic matter in Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2056–2066.
- [8] 韩芸, 周学瑾, 彭党聪, 等. 氯消毒对城市污水中 DOM 的三维荧光特性影响[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(7): 2226–2230.
HAN Y, ZHOU X J, PENG D C, et al. Effect of chlorination disinfection on three-dimension fluorescence characteristic of DOM in secondary effluent[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(7): 2226–2230.
- [9] ZHANG D, CHU W H, YU Y, et al. Occurrence and stability of chlorophenylacetoneitriles: A new class of nitrogenous aromatic DBPs in chlorinated and chloraminated drinking waters [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, 5(6): 394–399.
- [10] HUA L C, LIN J L, SYUE M Y, et al. Optical properties of algogenic organic matter within the growth period of *Chlorella* sp. and predicting their disinfection by-product formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1467–1474. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.082.
- [11] HUR J, LEE B M, LEE S, et al. Characterization of chromophoric dissolved organic matter and trihalomethane formation potential in a recently constructed reservoir and the surrounding areas – Impoundment effects [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 515: 71–80. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.035.
- [12] 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 M, HU C Y, ZHANG J, et al. Advances in research of disinfection by-products in drinking water distribution system [J]. *Water Purification Technology*, 2014, 33(2): 17–21.
- [13] YANG L Y, KIM D, UZUN H, et al. Assessing trihalomethanes (THMs) and N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potentials in drinking water treatment plants using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis[J]. *Chemosphere*, 2015, 121: 84–91. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.11.033.

(上接第 51 页)

- LU H X, LI M, LUO H Y, et al. Performance of phosphate adsorption on hydrous zirconium oxide-modified biochars derived from sewage sludge[J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(4): 65–70.
- [51] 刘凌言, 陈双荣, 宋雪燕, 等. 生物炭吸附水中磷酸盐的研究进展[J]. *环境工程*, 2020, 38(11): 91–97.
LIU L Y, CHEN S R, SONG X Y, et al. Research progress in removal of phosphate from water by biochar [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11): 91–97.
- [52] ALMANASSRA I W, MCKAY G, KOCHKODAN V, et al. A state of the art review on phosphate removal from water by biochars [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 409: 128211. DOI:10.1016/j.cej.2020.128211.
- [53] HE Q, LUO Y, FENG Y, et al. Biochar produced from tobacco stalks, eggshells, and Mg for phosphate adsorption from a wide range of pH aqueous solutions[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(11): 115603. DOI:10.1088/2053-1591/abcb3d.