

工程实例

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.020

应对高藻原水的水厂多点加氯技术原理与应用

周子翀¹, 杨旭¹, 肖融¹, 张瑞华¹, 袁君², 楚文海¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 无锡市水务集团有限公司, 江苏 无锡 214031)

摘要: 在经济高速发展和人口高度密集的太湖流域, 部分区域水源依然面临着水体富营养化、蓝藻水华季节性暴发的水质问题。梳理了太湖流域高藻水源水质特征以及净水工艺面临的挑战, 从消毒副产物控制角度介绍了水厂多点加氯技术原理, 从取水口预加氯、混凝池前加氯、砂滤池前加氯、炭滤池后加氯、出厂水补加氯各环节阐释了多点加氯技术在水厂各工艺环节的净水技术内涵。通过近10年长尺度的连续监测评估, 验证了多点加氯技术对含碳和含氮消毒副产物的协同控制效果, 为采用太湖等湖库型水源的水厂提供了可复制可参考的工艺方案。

关键词: 太湖流域; 饮用水; 高藻; 多点加氯; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0109-07

Technical Principle and Application of Multi-point Chlorination in High Algae Water Treatment

ZHOU Zi-chong¹, YANG Xu¹, XIAO Rong¹, ZHANG Rui-hua¹, YUAN Jun²,
CHU Wen-hai¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Wuxi Water Group General Company, Wuxi 214031, China)

Abstract: In the Taihu Lake basin, with rapid economic development and high population density, some regional water sources are still facing water quality problems such as eutrophication of water bodies and seasonal outbreaks of cyanobacteria blooms. This article summarizes the water quality characteristics of high algae water sources in the Taihu Lake basin and the challenges faced by the water purification process. From the perspective of disinfection by-products control, the principle of multi-point chlorination technology in waterworks is introduced. This paper also explains the water purification connotation of multi-point chlorination technology in which chlorine is dosed at water intake (pre-chlorination), before coagulation tank, before sand filter, after activated carbon filter as well as into finished water. Through the long-scale continuous monitoring and evaluation in the past ten years, the multi-point chlorination process has demonstrated the synergistic control effect of carbonaceous and nitrogenous disinfection by-products, and provided a reproducible and referenceable process plan for waterworks using lake reservoir-type water sources such as Taihu Lake.

Key words: Taihu Lake basin; drinking water; high algae; multi-point chlorination; disinfection by-products

“十一五”期间国家开始启动实施水体污染控制与治理科技重大专项(以下简称“水专项”),在太湖流域开展了从源头到龙头的饮用水安全保障关键技术与工程示范应用,形成了以“预处理—常规处理—深度处理”为代表的饮用水安全多级屏障净水成套技术与工艺。太湖流域典型水厂净水工艺

流程如图1所示。

在正常高效运行的情况下,以臭氧—生物活性炭为核心的饮用水安全多级屏障工艺在实现水质全面达标的同时,还能实现消毒副产物(DBPs)的协同削减^[1],有效保障了出厂水质,支撑了太湖流域的饮用水安全保障能力整体提升。

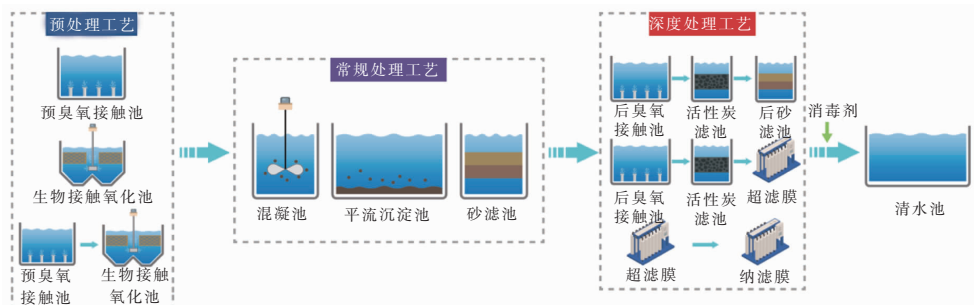


图1 太湖流域典型净水工艺流程

Fig. 1 Typical drinking water treatment process in Taihu Lake basin

1 高藻水质特征与水厂工艺挑战

由于太湖流域外源营养盐负荷居高不下、内源营养盐负荷日益加重及气象水文条件的变化,水体富营养化、蓝藻水华频繁暴发仍是现阶段太湖流域最突出的水质问题之一^[2]。根据2011年—2018年太湖健康报告(www.tha.gov.cn/slbthlyglj/sj/sj.html),太湖蓝藻密度及总氮、总磷浓度变化趋势如图2所示。太湖总磷年平均浓度为0.066~0.084 mg/L,总氮年平均浓度为1.55~2.04 mg/L,蓝藻年平均密度为 $(1\,277 \sim 11\,766) \times 10^4$ 个/L。每年的6月—10月是太湖的高藻期,常出现蓝藻水华暴发的现象,2017年太湖最大水华面积达到1 403 km²。

太湖流域藻类密度高,由藻类代谢产物导致的臭味问题也频繁出现^[3],如藻类生长代谢过程中产生的萜类臭味物质2-甲基异茨醇(2-MIB)、土臭素(GSM)是引起无锡、苏州饮用水土霉味的重要原因;藻类暴发后的腐烂期会产生浓度高达62 331.8 ng/L的二甲基硫醚、12 413.3 ng/L的二甲基三硫醚^[4]等硫醚类臭味物质,这类臭味物质的腥臭味是导致2007年无锡饮用水突发臭味事件中的主要原因之一;上海金泽水库每年5月—7月的腐败味和土霉味则是萜类和硫醚类臭味物质共同产生的复合型臭味所致。

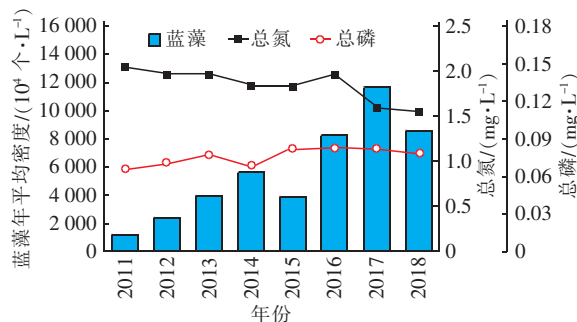


图2 2011年—2018年太湖蓝藻密度及总氮、总磷浓度变化趋势

Fig. 2 Change trend of cyanobacteria density and total nitrogen and total phosphorus concentration in Taihu Lake from 2011 to 2018

此外,太湖、青草沙水库及金泽水库等湖库型水源中溶解性小分子有机物占比较高,在水厂消毒环节中消毒副产物的生成潜能也较高。面对上述水质问题,采用多级屏障工艺流程的水厂现阶段仍面临着以下挑战:

① 高藻期(藻类暴发)预氯化所需剂量过高

预氯化强化混凝除藻是目前太湖流域应用最广泛的除藻技术。预氯化可以氧化破坏藻细胞结构,但同时也会与水中的有机物发生反应,生成卤代副产物,这些物质具有致癌、致畸、致突变作用。未经

处理的原水有机物浓度相对较高,耗氯量也较大,相比于后氯化,高负荷预氯化对水质造成的负面影响更大。特别是应对高藻期藻类暴发的情况,采用预氯化时要求一次投加的剂量更高,会导致较高浓度的卤代副产物生成。

② 水处理工艺单元藻类滋生

高藻原水中有机物含量较高,预氯化后可能出现余氯不足的现象,导致部分藻类进入后续水处理工艺单元。而水处理构筑物大多是半封闭式,为藻类的生长繁殖提供了充足的光照和适宜的温度条件,因此沉淀池和砂滤池常出现浮藻滋生的问题。砂滤池滋生的藻类还会加快滤层的堵塞,缩短过滤周期,影响水厂工艺单元的处理效能。

③ 出厂水消毒副产物浓度水平波动

臭氧-生物活性炭深度处理工艺在实际生产运行中,由于臭氧氧化并不能完全矿化大分子的消毒副产物前体物,水中部分大分子有机物($>100\text{ ku}$)被氧化分解成小分子有机物($<10\text{ ku}$),部分小分子有机物可穿透活性炭滤池,进而与后续含氯消毒剂反应,造成部分消毒副产物产率升高。针对南方高温环境,生物活性炭滤池存在微型动物增殖和泄漏的风险^[5],同时在生物活性炭滤池运行过程中产生的溶解性微生物代谢产物(SMPs)是一类重要的消毒副产物前体物^[1],在工艺运行不稳定情况下SMPs释放明显^[6]。

通常情况下,水厂采取一次加氯消毒的方式,即在清水池一次性投加较大剂量的氯,使出厂水维持 $0.5\sim 1.5\text{ mg/L}$ 的余氯来保证生物安全性。但在水中消毒副产物前体物(如臭氧氧化产生的小分子有机物、生物活性炭不稳定运行产生的SMPs等)含量依然较高的情况下,一次性投加较大剂量的氯会导致消毒副产物浓度迅速升高,进而造成出厂水中消毒副产物浓度水平的波动。

2 多点加氯技术原理

2.1 技术简介

太湖流域水厂皆采用氯消毒方式,包括氯气、液氯、次氯酸钠等氯系消毒剂,特别是近些年,许多水厂采用次氯酸钠替换氯气或液氯消毒,如购买商用次氯酸钠和使用次氯酸钠发生器现场制备的方式,总之水厂的氯源充足且可实现自动投加。无论投加哪种氯系消毒剂,此处统称“加氯”。

在水专项科技支撑下,针对臭氧-生物活性炭净水工艺在高藻水处理中面临的挑战并充分利用水厂氯消毒的既有条件,提出了应对高藻湖库型原水的多点协同加氯技术,以下简称“多点加氯”。多点加氯是指在保证出厂水微生物安全性的前提下,减少预氯化 and 后氯化的氯投加量,将氯进行分散多点投加,从而实现藻类和消毒副产物协同削减的处理工艺。

工艺原理见图3。

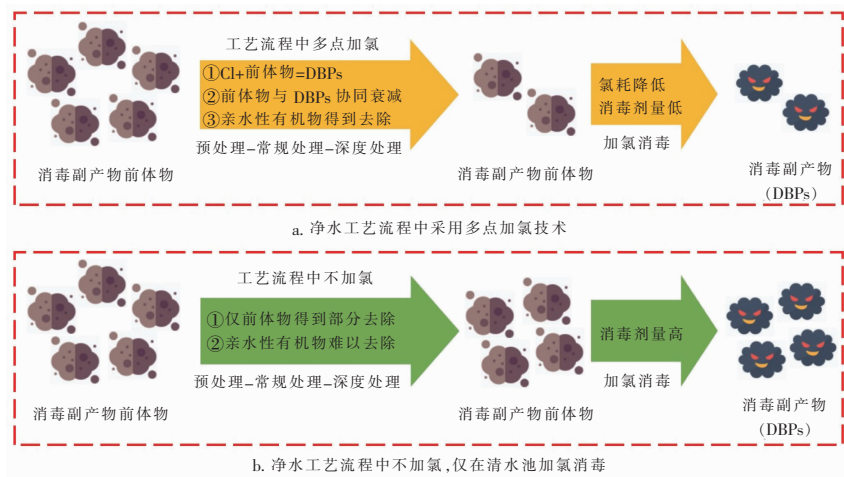


图3 多点加氯削减消毒副产物的原理

Fig. 3 Principle of reducing disinfection by-products by multi-point chlorination

在藻类及其他微生物的控制层面,多点加氯根据水厂实际运行情况,在藻类滋生的各工艺段精准加氯来同步控藻及其他微生物,避免藻类生长旺盛

引起藻源性嗅味,同时还可减轻各工艺单元的处理负荷。

在消毒副产物的控制层面,多点加氯能充分发

挥常规/深度处理效能,实现消毒副产物前体物与消毒副产物的协同衰减,同时由于将氯分散在多点投加,清水池中的氯耗得以降低,低剂量消毒剂的投加也减少了消毒副产物的生成,进一步实现了消毒副产物的削减。

如图3(b)所示,在净水工艺流程中不加氯,仅在清水池一次加氯消毒的方式仅能去除部分消毒副产物前体物,一些亲水性有机前体物则难以去除;而如图3(a)所示,在净水工艺流程中辅以多点加氯技术,一方面可以强化常规/深度工艺去除消毒副产物前体物,另一方面将原水中部分消毒副产物前体物(包括工艺流程中难以去除的亲水性有机物)转化为卤代有机物,这些卤代有机物与消毒副产物往往具有相似的结构和性质,此处统称消毒副产物(DBPs),多点加氯环节中已生成的消毒副产物在水厂净水工艺流程中也能得到一定的去除^[7-8]。

2.2 技术内涵

在综合考虑高藻水源水质特征和水厂多级屏障净水工艺不足的基础上,结合高藻水源水厂实际生产运行工艺,归纳多点加氯技术工艺流程,如图4所示。

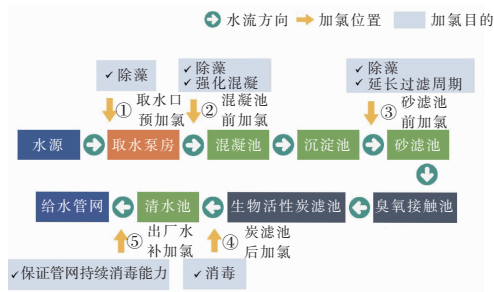


图4 多点加氯技术工艺流程

Fig.4 Process flow of multi-point chlorination

对多点加氯的技术内涵阐述如下:

① 取水口预加氯

取水口预加氯即预氯化,在取水泵房预加氯破坏藻细胞结构,降低原水中藻类密度,预氯化后的余氯也可在长距离输水管道中与原水充分混合而削减部分藻类。特别是在高藻期,水厂各工艺段在较高负荷下运转时,通过预氯化除藻后可以减轻混凝及后续处理工艺的负荷。此外,预氯化过程中生成的消毒副产物也可在混凝、沉淀等工艺中得到一定的去除^[7-8]。

② 混凝池前加氯

夏季原水中藻类数量增加、浊度明显上升,通过在混凝池前少量加氯可以起到助凝和除藻的作用,降低沉淀池出水中藻类数量与浊度,保证砂滤池在较长周期下平稳运行,从而减轻对炭滤池的负荷冲击、延长活性炭的使用寿命,有效降低水厂的生产运行成本。

③ 砂滤池前加氯

由于高藻水的浊度具有堵塞和穿透砂滤池的特点,滤池内藻类的滋生会导致滤层水头损失急剧增加、过滤周期明显缩短。因此,在高藻期可根据砂滤池的运行效果,对砂滤池短时间、低浓度地加氯除藻,提高过滤效率,延长过滤周期,从而充分发挥砂滤池去除浊度的效能。

④ 炭滤池后加氯

炭滤池后加氯即水厂末端加氯消毒。在传统的水处理工艺流程中,水厂末端耗氯量较高,需要一次性投加较大剂量的氯进行消毒。在多点加氯工艺中,因在各水处理工艺段实施了氯的分散投加,水中的耗氯量已大幅降低,此时后加氯消毒的投氯量大大减少,在保证饮用水微生物指标合格的前提下,减少了消毒副产物的生成。

⑤ 出厂水补加氯

为了保证管网水质余氯达标,当出厂水余氯不足时需在出厂前的吸水井补加氯,控制出厂水的余氯为0.7~1.0 mg/L,保障水厂出水的生物安全性。

总的来说,多点加氯的加氯点可设置在取水泵房(即预氯化)、混凝池前(低藻时可不加)、砂滤池前(低藻时可不加)、炭滤池后和出厂补加。多点加氯技术通过各工艺段出水的余氯量来确定加氯量,预氯化后余氯控制在约0.05 mg/L,沉淀池、砂滤池出水余氯控制在0.05 mg/L以下,出厂水余氯控制在0.7~1.0 mg/L,加氯量需严格控制,避免过量加氯引起消毒副产物浓度升高。上述加氯参数为经验参考值,具体水厂可根据各自工艺特点、原水和出水水质监测来更精准地调控加氯量。

3 多点加氯技术应用

3.1 应用背景

W 水厂原水取自太湖流域,原水藻类常年较高,属于太湖流域典型的高藻湖库型原水。在水专项科技支撑下,W 水厂于2013年完成以臭氧-生物活性炭深度处理为核心的二期改造,处理规模为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为提高应对高藻期藻类暴发的处理

能力,2014年应用了多点加氯技术。W水厂工艺流程如图5所示。

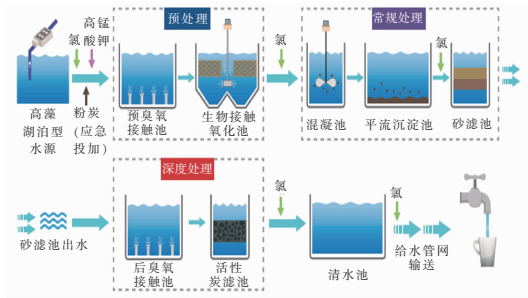


图5 W水厂处理工艺流程

Fig.5 Flow chart of W waterworks treatment process

3.2 工艺参数

W水厂采用的多点加氯工艺参数:取水泵房预加氯 $0.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ 进行除藻;混凝-沉淀前通过少量加氯($0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$)助凝和除藻(低藻时可不加);砂滤前加氯约 0.3 mg/L 用于保护滤池免受污染(低藻时可不加);清水池加氯 $1.5 \sim 1.8 \text{ mg/L}$ 进行消毒,如余氯不足需在出厂前补加氯,使出厂水余氯维持在 1.0 mg/L 左右,保证出厂水进入给水管网具有持续消毒作用。

W水厂在采用多点加氯技术前、后各工艺段加氯量和余氯量的情况见表1。

表1 多点加氯应用前、后水厂各工艺段氯耗对比

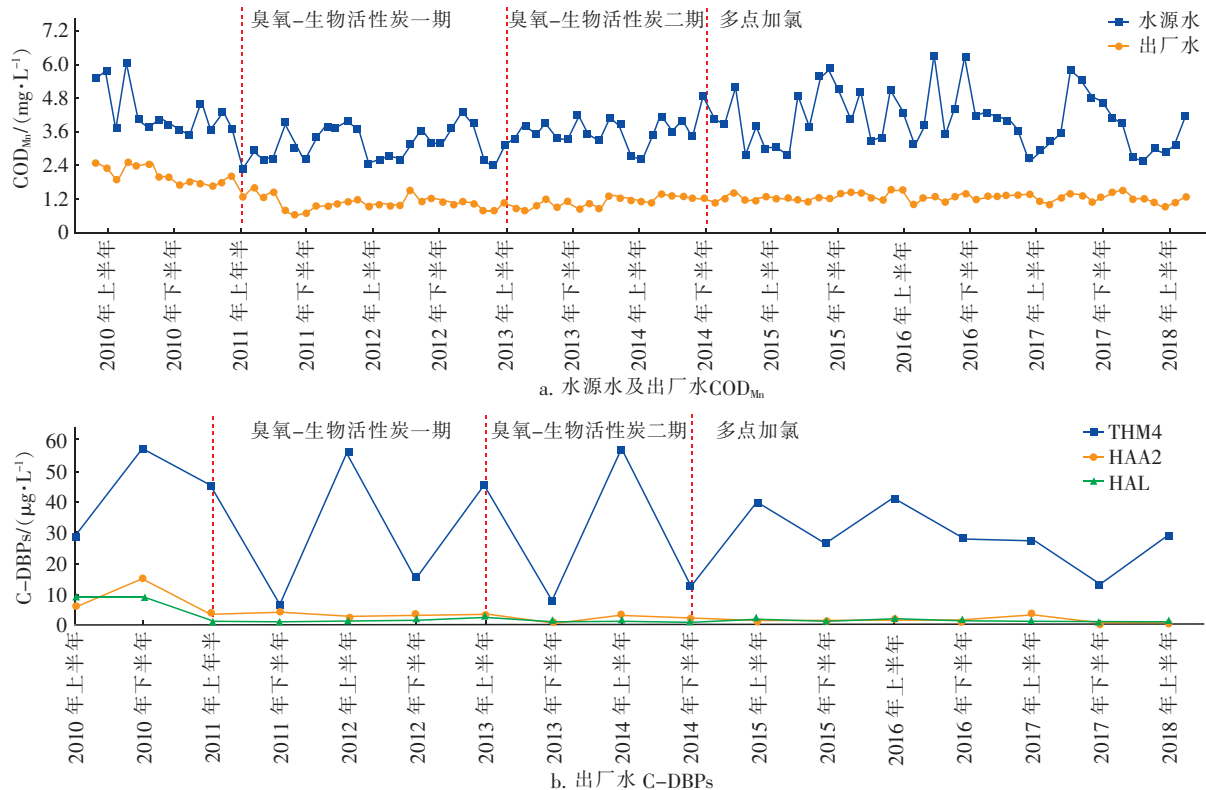
Tab.1 Comparison of chlorine consumption in each process section of waterworks before and after multi-point chlorination

项目	2011年 (预氯化+后加氯)		2015年 (多点加氯)	
	加氯量	余氯量	加氯量	余氯量
取水泵房	2.85		1.52	0.06
混凝池前			0.45	0.03
砂滤池前			0.21	0.03
炭滤池后	1.90		1.22	0.36
出水补加		0.87	0.49	0.84
全流程	4.75	0.87	3.89	0.84

2015年W水厂的总耗氯量较2011年下降约20%,多点加氯的应用使得水厂氯耗大幅下降,有效降低了水厂生产运行成本。

3.3 应用效果

在W水厂实际生产运行中,多点加氯技术发挥着助凝、除藻、去嗅、消毒的效果,有力提高了净水效果。在水专项科技支撑下,自2010年起连续多年对W水厂的耗氧量(COD_{Mn})、溶解性有机物氮(DON)、含碳消毒副产物(C-DBPs)和含氮消毒副产物(N-DBPs)的浓度水平进行了监测。近10年来各项指标的变化趋势如图6所示。



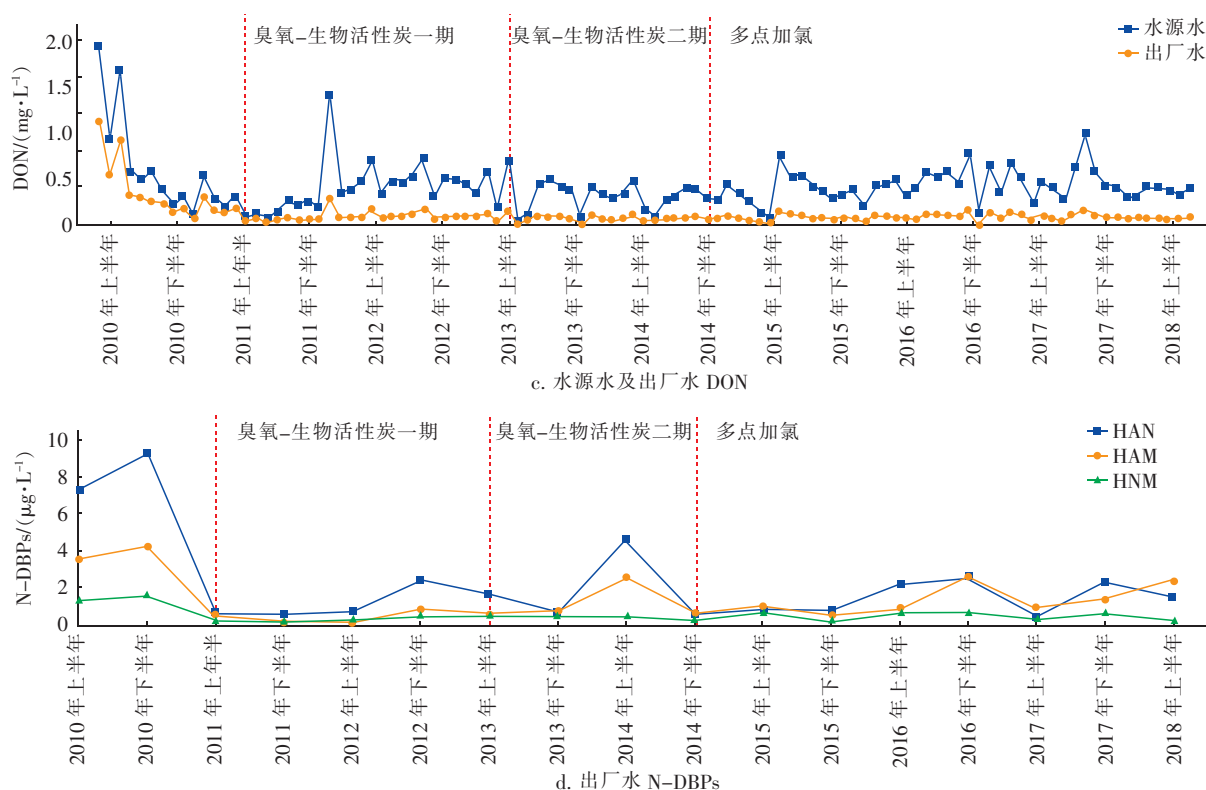


图6 2010年—2018年W水厂水源水及出厂水 COD_{Mn} 、出厂水C-DBPs、水源水及出厂水DON、出厂水N-DBPs的浓度变化趋势

Fig. 6 Concentration changes of COD_{Mn} of source water and effluent, C-DBPs of effluent, DON of source water and effluent, and N-DBPs of effluent in W waterworks from 2010 to 2018

自2013年W水厂改造完成的以臭氧-生物活性炭为核心的多级屏障工艺,能有效应对原水中有有机物浓度波动的情况,降低水中有有机物和消毒副产物前体物含量,从而使得消毒后的出厂水中卤乙酸(HAA)和卤乙醛(HAL)的含量显著下降。受水质波动及消毒剂量变化的影响,三卤甲烷(THM)和卤乙腈(HAN)的浓度水平波动较大,这可能因为臭氧将大分子有机物氧化成小分子有机物,这些小分子有机物在后续一次加氯消毒的过程中更倾向于生成化学势较低的THM和HAN。

2014年末W水厂采用了多点加氯技术,在除藻的同时消耗了部分含碳、含氮消毒副产物前体物以及耗氯物质,有效减少了后续消毒的氯投加量。同时,由于多点加氯技术将原水中的部分有机前体物转化为卤代有机物,而水厂的处理工艺对已生成的消毒副产物有去除作用,从而进一步降低了出厂水消毒副产物浓度水平。最新研究也发现,在美国一些采用预氯化的饮用水厂中,预氯化产生消毒副产物和总有机卤素(TOX)可在后续的水处理工艺

(如活性炭滤池)得到去除,其中部分消毒副产物的去除率可达100%^[9]。因此,多点加氯技术通过充分发挥常规/深度处理工艺效能,减少了消毒副产物的生成并去除部分已生成的消毒副产物,从而有效削减了出厂水中消毒副产物的浓度,实现了含碳和含氮消毒副产物的协同控制。

总体而言,W水厂采用多点加氯技术以后,出厂水中4种三卤甲烷(THM4)的总浓度水平下降38%,基本稳定控制在20 $\mu\text{g/L}$ 左右,两种卤乙酸(HAA2)的总浓度水平浓度下降26%,基本控制在8 $\mu\text{g/L}$ 以下,三氯乙醛(TCAL)的浓度水平稳定在2 $\mu\text{g/L}$ 以下,皆远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)以及《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》(DB 32/T 3701—2019)和上海市《生活饮用水水质标准》(DB 31/T 1091—2018)中消毒副产物浓度限值。此外,HAN等含氮消毒副产物浓度水平也控制在3 $\mu\text{g/L}$ 以下,低于上海净水技术学会最新团体标准《饮用水中N-二甲基亚硝胺、二氯乙腈、二溴乙腈水质标准》(T/SAWP 0001—

2020)的限值要求。以上数据表明,多点加氯技术对THM、HAA等C-DBPs以及HAN等N-DBPs的控制效果稳定,避免了出厂水中部分消毒副产物浓度波动较大的问题,从而有效保障了出厂水中含碳和含氮消毒副产物的稳定达标。

4 结论

自水专项实施以来形成的“预处理—常规处理—深度处理”多级屏障协同净化工艺有效应对了原水有机复合污染问题,多点加氯技术的耦合使用进一步保障了高藻期出厂水的水质稳定达标。多点加氯技术具有以下特点:

① 水质提升的有效性

从水厂处理效能的角度,多点加氯技术相较于传统的一次加氯消毒工艺而言,强化了水厂在高藻期的应对能力,有效解决了藻类与微生物在后续各水处理单元滋生的问题,同时降低了在预氧化及消毒工艺中的氯剂量,削减了次生污染物(如消毒副产物)的生成,减少了出厂水消毒副产物的浓度波动,有效提升了出厂水质。

② 工艺改造的简捷性

从水厂工艺提质改造的角度,多点加氯技术可以充分利用现阶段水厂大都采用氯消毒的既有条件,无需改变水厂现有工艺流程和增设水处理构筑物与大型设备,具有改造简捷的优势。同时加氯系统运行管理比较成熟,水处理人员操作熟练,多点加氯工艺还具有便于操作和实现自动化管理的优势。

③ 面向未来的承接性

从未来水处理工艺发展的角度,多点加氯技术以较少的氯耗和简捷的操作有效处理高藻水的同时,满足了水厂化学药剂减量化发展需求,迎合了未来水处理工艺往简单、绿色、自然方向发展的趋势,在水厂实现从现状工艺到未来工艺的转变过程中可起到关键性的承接作用。

参考文献:

- [1] CHU W H, GAO N Y, YIN D Q, *et al.* Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products [J]. *Chemosphere*, 2012, 86 (11): 1087 - 1091.
- [2] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229 - 1243.
- [3] 郭庆园, 王春苗, 于建伟, 等. 饮用水中典型嗅味问题及其研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 82 - 88.
- [4] CHU W H, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Precursors of dichloroacetamide, an emerging nitrogenous DBP formed during chlorination or chloramination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(10): 3908 - 3912.
- [5] 张怀宇. 饮用水系统安全保障建设与实践 [J]. *给水排水*, 2020, 46(7): 32 - 40, 53.
- [6] CHU W H, LI C J, GAO N Y, *et al.* Terminating pre-ozonation prior to biological activated carbon filtration results in increased formation of nitrogenous disinfection by-products upon subsequent chlorination [J]. *Chemosphere*, 2015, 121: 33 - 38.
- [7] CHU W H, GAO N Y, TEMPLETON M R, *et al.* Comparison of inclined plate sedimentation and dissolved air flotation for the minimisation of subsequent nitrogenous disinfection by-product formation [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(5): 647 - 651.
- [8] ZHANG Y M, CHU W H, YAO D C, *et al.* Control of aliphatic halogenated DBP precursors with multiple drinking water treatment processes: formation potential and integrated toxicity [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 58: 322 - 330.
- [9] CUTHBERTSON A A, KIMURA S Y, LIBERATORE H K, *et al.* Does granular activated carbon with chlorination produce safer drinking water? From disinfection byproducts and total organic halogen to calculated toxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10): 5987 - 5999.

作者简介:周子翀(1996 -),男,湖北武汉人,在读硕士研究生,主要研究方向为饮用水中消毒副产物的分析识别和控制技术。

E-mail: zichong_zhou@163.com

收稿日期: 2021-03-02

修回日期: 2021-03-19

(编辑:衣春敏)