

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.009

紫外线消毒技术在二次供水中的应用研究

曹文峰^{1,2}, 黄天寅¹, 孙文俊^{2,3}, 石景东³

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 清华苏州环境创新研究院, 江苏 苏州 215163)

摘要: 介绍了紫外线消毒技术在二次供水中的应用情况,并进行了二次供水紫外线消毒实验。结果表明:①紫外线消毒会使二次供水中的余氯略有降低,但是仍满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值要求;②紫外线消毒在 80 mJ/cm² 辐射剂量内仅小幅改变水中部分有机物的官能团;③紫外线消毒对二次供水中消毒副产物(DBPs)的浓度和生成几乎没有影响。

关键词: 二次供水; 紫外线消毒技术; 消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0060-05

Application of Ultraviolet Disinfection Technology in Secondary Water Supply

CAO Wen-feng^{1,2}, HUANG Tian-yin¹, SUN Wen-jun^{2,3}, SHI Jing-dong³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Research Institute for Environmental Innovation < Suzhou > Tsinghua, Suzhou 215163, China)

Abstract: Application of ultraviolet disinfection technology in secondary water supply was introduced, and an ultraviolet disinfection experiment for secondary water supply was conducted. The results showed that, ultraviolet disinfection slightly reduced the residual chlorine in the secondary water supply, but the residual chlorine content still met the limit requirements of *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749 - 2006). When the ultraviolet radiation dose was within 80 mJ/cm², the functional groups of some organic compounds in the water only slightly changed. Ultraviolet disinfection had almost no effect on concentration and formation of disinfection by-products (DBPs) in the secondary water supply system.

Key words: secondary water supply; ultraviolet disinfection technology; disinfection by-products

目前二次供水污染物主要包括总大肠菌群和细菌总数等微生物安全指标、消毒副产物(DBPs)等化学安全性指标,以及过高的余氯引起的刺激性气味等感官性指标^[1-5]。二次供水系统通常采用 ClO₂、NaClO、O₃、微电解电化学法以及紫外线(UV)等方

式消毒^[6-7]。其中,紫外线是一种具备广谱杀菌性、无二次污染且设备运行可靠的物理消毒技术,其可以杀灭部分化学药剂无法有效去除的“两虫”等抗氯性微生物^[8],且系统运行维护和监控十分方便,是一种可行的二次供水安全保障措施。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778323、51761125-013); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404-002、2017ZX07108-002、2017ZX07502-003)

通信作者: 黄天寅 E-mail: huangtianyin111@163.com; 孙文俊 E-mail: wsun@tsinghua.edu.cn

朴芬淑等^[9]研究发现,紫外线消毒器辐照强度和辐照时间(1.5倍安全系数)分别为 $12\text{ mW}/\text{cm}^2$ 和 5 s 时,即能够保证消毒效果。查毅等^[10]研究发现,紫外线对管网水具有很好的消毒效果,当管网水的浊度 $<5\text{ NTU}$ 时,水质因素对紫外线杀菌效果影响很小。高炜等^[6]对比了紫外线、臭氧和微电解等3种二次供水系统消毒工艺,发现紫外线消毒设备若能有效去除细菌,需保证消毒剂量在 $40\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 以上,并且在进行紫外线消毒时可以不考虑消毒副产物的问题。安东等^[11]通过对上海市两处二次供水消毒示范点的水质进行长期跟踪,证明了紫外线对二次供水进一步消毒后,浊度并未发生显著变化,余氯也只是少量降低,仍可以满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。吴珊等^[12]通过模拟建筑内部的二次供水系统,对比研究了次氯酸钠消毒以及紫外线消毒,发现紫外线灭菌效果更好,细菌再繁殖数量也更低,且基本上是好氧菌。蒋福春等^[13]也指出,考虑二次供水水质保障技术的成熟度和消毒效果的不同,二次供水中通常采用紫外线消毒技术来确保龙头水水质安全。

经现场调研及查阅文献发现,紫外线消毒技术在我国多个城市(北京、上海、苏州、嘉兴、郑州等)的二次供水系统中运行情况良好。紫外线消毒系统在国外也被广泛应用于社区(POE)和住户(POU)的饮用水消毒中。

1 二次供水紫外线消毒实验

1.1 实验用水

实验用水取自北京某小区高层龙头水,采样时间为10月下旬,该小区采用无负压供水方式。水样均经冰袋低温避光保存送至实验室进行检测及后续实验。

1.2 实验方法

采集到水样后,使用低压紫外准平行光束仪进行不同剂量(10 、 20 、 40 、 60 和 $80\text{ mJ}/\text{cm}^2$)辐射。经测定和计算,本次实验紫外线平均强度为 $0.380\text{ mW}/\text{cm}^2$,即对应辐照时间分别为 26 、 53 、 105 、 158 和 210 s 。检测并分析余氯、总氯、异养菌总数(HPC)、DOC、 UV_{254} 、三维荧光以及消毒副产物等相关参数。余氯、总氯:哈希PC II便携式测定仪搭配相应试剂粉包;HPC:倾注平板法;DOC:Aurora 1030W总有机碳分析仪; UV_{254} :哈希DR6000型紫外及可见分光光度计;三维荧光:日立F-7000原子吸收分光光度

计;消毒副产物:安捷伦GC6890N气相色谱仪。

2 结果与讨论

2.1 余氯及总氯

不同紫外线辐射剂量下余氯及总氯浓度变化如图1所示。结果显示,实验水样经紫外线辐射后余氯及总氯含量均有所降低,且辐射剂量越大,余氯及总氯降幅越大, 40 、 $80\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 辐射剂量下,余氯分别降低 $0.01\sim 0.03\text{ mg}/\text{L}$ 和 $0.03\sim 0.05\text{ mg}/\text{L}$,降低的原因可能是紫外光效应分解了水样中部分余氯。对比发现,在相同条件下未经紫外线辐射水样的余氯及总氯基本保持不变。从图1还可以看出,二次供水采用紫外线消毒,尽管水中余氯及总氯有所降低但依然存在,且仍能满足国标限值要求($\geq 0.05\text{ mg}/\text{L}$)。

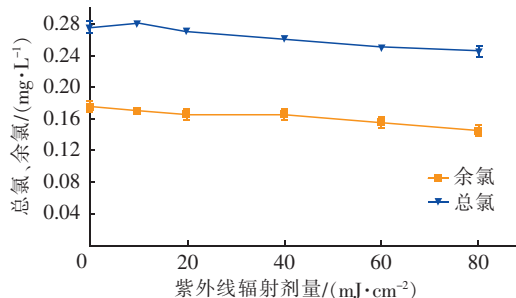


图1 不同紫外线辐射剂量下余氯及总氯变化

Fig. 1 Change of residual chlorine and total chlorine at different UV radiation doses

2.2 异养菌总数

实验结果显示,经紫外线消毒后异养菌总数逐渐下降, $80\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 辐射剂量下异养菌总数降至0(见图2)。二次供水采用紫外线消毒可以降低输水过程中二次污染带来的微生物风险,起到多级屏障消毒的作用。

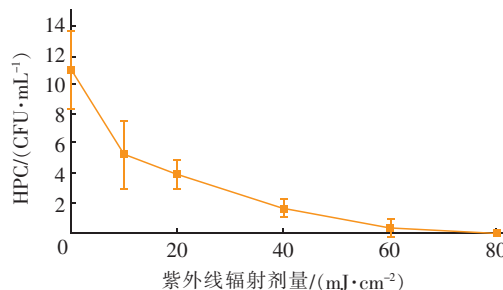


图2 不同紫外线辐射剂量下HPC的变化

Fig. 2 Change of HPC at different UV radiation doses

2.3 DOC、 UV_{254} 及三维荧光光谱

常用DOC和 UV_{254} 来反映饮用水中有机物浓度

的变化。因为芳香族化合物和共轭结构对 254 nm 处 UV 有强烈吸收,所以 UV_{254} 可以表示水中化合物的不饱和键含量。实验结果表明,DOC 和 UV_{254} 总体变化不大,即紫外线辐照没有破坏水样中芳香族化合物的共轭结构。

三维荧光光谱可用于识别和解析水样中有机成分。根据荧光区域积分方法(FRI),依照激发波长(E_x)、发射波长(E_m)的差别将荧光区域分为 5 大部分: I 区主要为简单芳香性蛋白类物质 I, E_x 为 220 ~ 250 nm、 E_m 为 280 ~ 330 nm; II 区主要为芳香性蛋白类物质 II, E_x 为 220 ~ 250 nm、 E_m 为 330 ~ 380 nm; III 区主要是富里酸类物质, E_x 为 220 ~ 250 nm、 E_m 为 380 ~ 500 nm; IV 区主要是溶解性微生物代谢产物, E_x 为 250 ~ 400 nm、 E_m 为 280 ~ 380 nm; V 区主要是腐殖酸类物质, E_x 为 250 ~ 400 nm、 E_m 为 380 ~ 500 nm。本实验中不同紫外辐射剂量下三维荧光光谱如图 3 所示。可以看出,荧光团主要在 III 区,少部分在 II 区和 V 区,即水样中主要有机成分是富里酸类物质以及部分腐殖酸类物质和芳香性蛋白类物质等。水样经过不同辐射剂量的紫外线照射后,荧光强度未发生变化,仅荧光峰位置有少许改变。结合 DOC 和 UV_{254} 变化情况,说明紫外线消毒仅小幅改变了水中部分有机物的官能团。

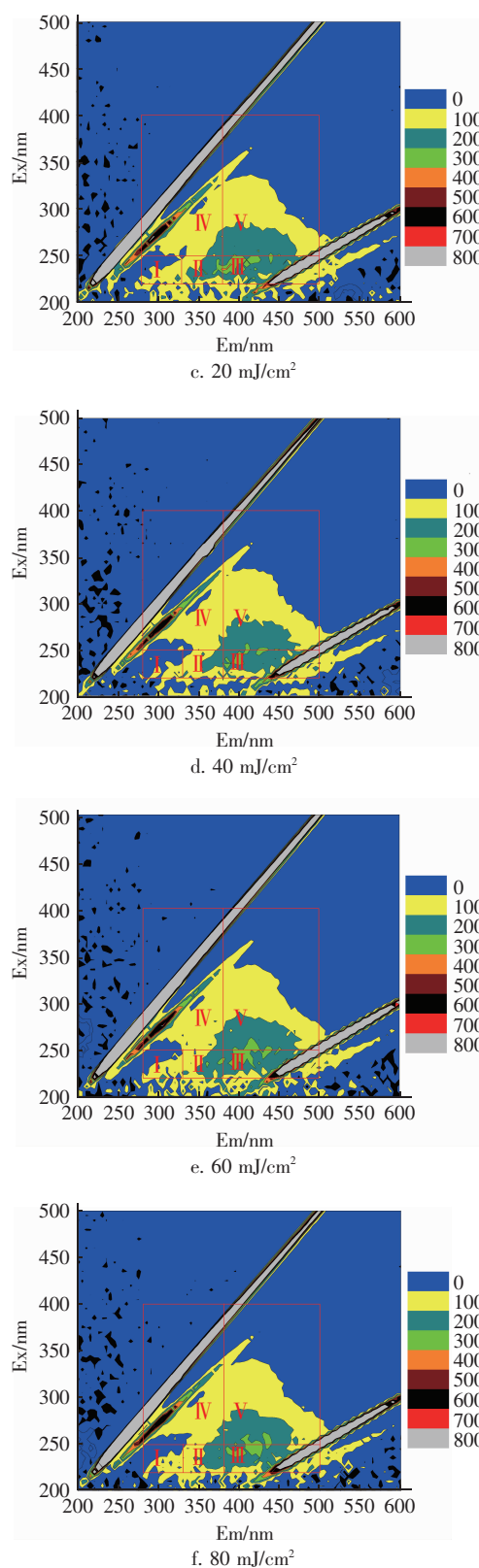
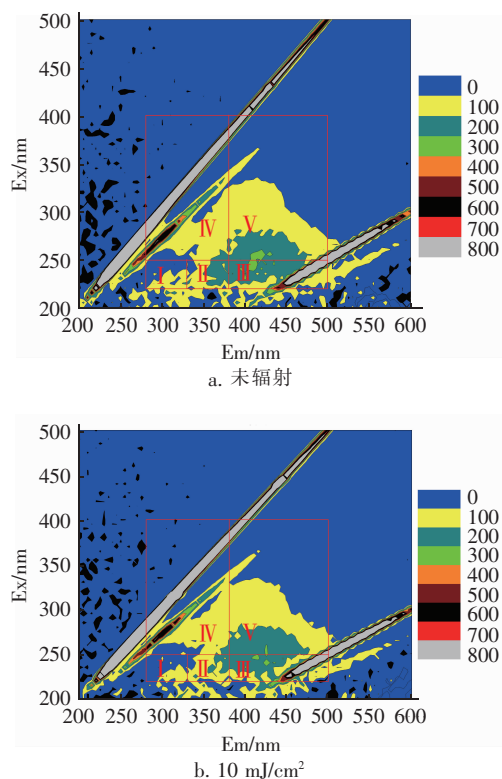


图3 不同紫外线辐射剂量下三维荧光光谱情况
Fig.3 Three-dimensional fluorescence spectrum at different UV radiation doses

2.4 消毒副产物

三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)以及含氮消毒副产物(N-DBPs)是3大类常见消毒副产物,其中N-DBPs毒性较THMs和HAAs毒性大。本次实验检测了4种THMs、9种HAAs和6种N-DBPs,结果见图4。

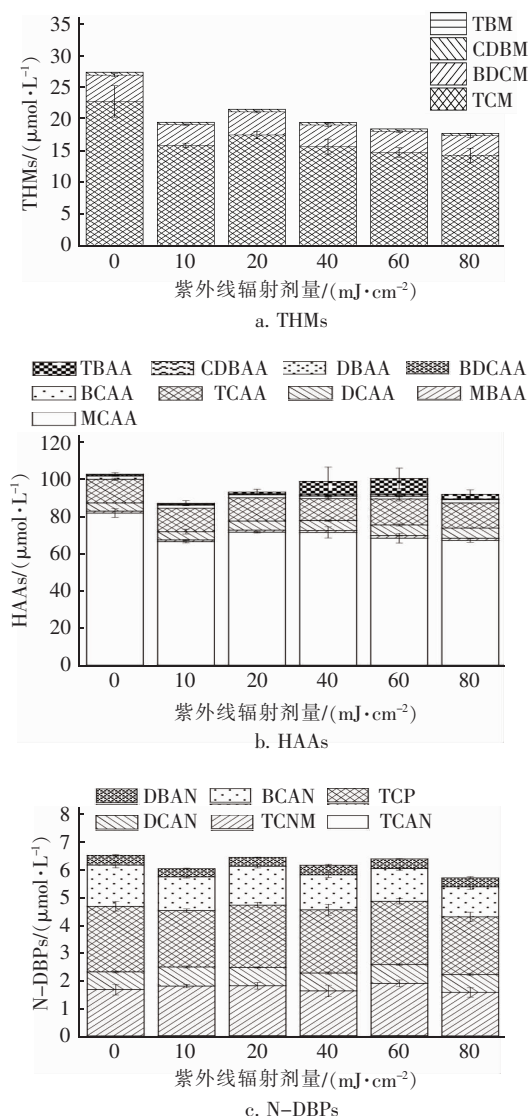


图4 不同紫外线辐射剂量下THMs、HAAs和N-DBPs的变化

Fig.4 Change of THMs, HAAs and N-DBPs at different UV radiation doses

由图4可以看出,原水中THMs主要为三氯甲烷(TCM)和二氯一溴甲烷(BDCM),其中TCM最高;经不同剂量的紫外线辐射后,TCM较原水略有下降,故而THMs总体略有下降。原水中HAAs主要为三氯乙酸(TCAA)和一氯乙酸(MCAA),其中

MCAA最高;经不同剂量的紫外线辐射后,三溴乙酸(TBAA)在40 mJ/cm²和60 mJ/cm²辐射剂量下略有波动,HAAs总体变化较小,无显著增加。原水中N-DBPs主要为三氯丙酮(TCP)、溴氯乙腈(BCAN)和三氯硝基甲烷(TCNM);经不同剂量的紫外线辐射后,N-DBPs略有波动,基本不变,有研究者发现低压紫外线处理对N-DBPs的生成没有明显影响^[14]。因此,二次供水系统采用紫外线消毒后并不会显著增加THMs、HAAs和N-DBPs生成量。

3 结论与展望

二次供水的紫外线消毒实验表明:①二次供水采用紫外线消毒会使余氯略有降低,但仍满足国标限值要求,因此可以和市政供水的消毒系统构成多级屏障,进一步控制龙头水的微生物风险。②紫外线消毒在80 mJ/cm²辐射剂量内仅小幅改变水中部分有机物的官能团。③紫外线消毒对二次供水中DBPs的浓度和生成几乎没有影响。

二次供水消毒技术的选用既要考虑去除水中病原微生物,又要兼顾不产生有害消毒副产物等物质,同时还需考虑设备运行成本、操作和使用安全性问题。紫外线消毒作为一种具有广谱杀菌性、无二次污染且安全可靠的物理性消毒技术,可以有效杀灭“两虫”,同时可以协同其他消毒技术构成多级屏障消毒策略,而且可以实现自动化控制,管理简单,易操作。伴随着对紫外线消毒技术的进一步研究和开发,其用于二次供水消毒的前景将越来越广阔。

参考文献:

- [1] 刘媿,何琳,兰亚佳. 2014—2016年成都市新都区生活饮用水监测结果分析[J]. 预防医学情报杂志, 2018,34(6):771-776.
LIU Ti, HE Lin, LAN Yajia. Surveillance results of drinking water in Xindu District of Chengdu from 2014 to 2016[J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2018,34(6):771-776(in Chinese).
- [2] 王松松,刘磊,徐建军,等. 烟台市2014年—2016年市政供水水质状况分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2018,28(9):1108-1110.
WANG Songsong, LIU Lei, XU Jianjun, et al. Analysis of municipal drinking water quality in Yantai during 2014-2016[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2018,28(9):1108-1110(in Chinese).
- [3] 黄哲敏,查建溪,吴捷,等. 漳州市区2015年二次供水

- 检测分析[J]. 海峡预防医学杂志,2017,23(2):70-71.
- HUANG Zheming, ZHA Jianxi, WU Jie, *et al.* Analysis of the secondary water supply in Zhangzhou City in 2015 [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2017, 23(2):70-71 (in Chinese).
- [4] 张桂华, 杨林飞, 陈媚, 等. 2014—2015 年株洲市生活饮用水检测结果分析[J]. 河南预防医学杂志, 2016, 27(11):867-869, 878.
- ZHANG Guihua, YANG Linfei, CHEN Mei, *et al.* Analysis on detection results of drinking water in Zhuzhou in 2014 - 2015 [J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2016, 27(11):867-869, 878 (in Chinese).
- [5] 龚赞, 罗信昌, 陈在耀, 等. 三明市区 2011—2014 年二次供水水质监测结果[J]. 海峡预防医学杂志, 2016, 22(1):63-64.
- GONG Yun, LUO Xinchang, CHEN Zaiyao, *et al.* Monitoring results of secondary water quality in Sanming City from 2011 to 2014 [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2016, 22(1):63-64 (in Chinese).
- [6] 高伟, 朱慧峰, 安东. 二次供水系统中三种补充消毒工艺的比较[J]. 净水技术, 2014, 33(4):63-66.
- GAO Wei, ZHU Huifeng, AN Dong. Comparison of three supplementary disinfection processes in secondary water supply system [J]. Water Purification Technology, 2014, 33(4):63-66 (in Chinese).
- [7] 刘波, 滕秀全, 高静, 等. 北京市通州区二次供水卫生现状[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(5):324-327.
- LIU Bo, TENG Xiuquan, GAO Jing, *et al.* Investigation on health safety status of secondary water supply in Tongzhou District [J]. Journal of Environment and Health, 2007, 24(5):324-327 (in Chinese).
- [8] 孙文俊, 吕东明, 贾瑞宝, 等. 紫外设备剂量标准化验证方法及必要性[J]. 净水技术, 2019, 38(5):1-6, 24.
- SUN Wenjun, LÜ Dongming, JIA Ruibao, *et al.* Verification method and necessity for dose standardization of UV equipment [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5):1-6, 24 (in Chinese).
- [9] 朴芬淑, 傅金祥. 民用建筑中生活饮用水二次消毒方法[J]. 低温建筑技术, 2005(1):98-99.
- PIAO Fenshu, FU Jinxiang. Secondary disinfection method of drinking water in civil buildings [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005(1):98-99 (in Chinese).
- [10] 查毅, 吴纯德, 陈芳, 等. 基于自动控制的紫外技术对二次供水的消毒效果[J]. 中国给水排水, 2011, 27(23):45-48.
- ZHA Yi, WU Chunde, CHEN Fang, *et al.* Disinfection efficiency of secondary water supply by UV technology based on automatic control [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(23):45-48 (in Chinese).
- [11] 安东, 黄潇逸, 高伟, 等. 上海居民小区二次供水紫外消毒示范应用效果[J]. 给水排水, 2016, 42(S1):141-144.
- AN Dong, HUANG Xiaoyi, GAO Wei, *et al.* Demonstration of UV disinfection for secondary water supply in Shanghai residential areas [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(S1):141-144 (in Chinese).
- [12] 吴珊, 左丹, 厉智成. 两种消毒方式下建筑给水管道内微生物生长及种属特点研究[J]. 给水排水, 2014, 40(9):158-161.
- WU Shan, ZUO Dan, LI Zhicheng. Study on microbial growth and species characteristics in building water supply pipe under two disinfection methods [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(9):158-161 (in Chinese).
- [13] 蒋福春, 孟庆彬. 苏州市城区二次供水安全的探索与实践[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24):14-18.
- JIANG Fuchun, MENG Qingbin. Exploration and practice on the safety of secondary water supply in Suzhou [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24):14-18 (in Chinese).
- [14] LIU W J, YE Z, SUN W J, *et al.* Role of ammonia on haloacetonitriles and halonitromethanes formation during Ultraviolet irradiation followed by chlorination/chloramination [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 337:275-281.

作者简介:曹文烽(1989-),男,江苏金湖人,硕士,助理工程师,研究方向为饮用水安全保障技术。

E-mail:caowf2018@163.com

收稿日期:2020-02-18

修回日期:2020-03-26

(编辑:刘贵春)