

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.006

紫外/氯胺消毒对供水系统中微生物数量分布的影响

孙坚伟

(上海浦东威立雅自来水有限公司, 上海 200127)

摘要: 针对上海临江水厂紫外/氯胺组合消毒供水系统,研究了紫外关闭前后,紫外/氯胺组合消毒和单氯胺消毒对供水系统中微生物数量分布的影响。结果表明:紫外/氯胺组合消毒对出厂水微生物的消毒效率比氯胺消毒更高。目前工艺条件下,组合消毒可做到对可培养细菌的100%灭活,单氯胺消毒只能达到97.71%~99.98%。单氯胺消毒下,管网异养菌平板计数均值相对紫外/氯胺组合消毒增加128.78%,二次供水异养菌平板计数均值相对增加8.94%,紫外/氯胺组合消毒相对单氯胺消毒可改善管网微生物生长水平,但不能改变管网微生物生长变化规律。二次供水的微生物水平仍明显高于供水管网。二次供水模式中,直供水模式的水质相对最好,水池+水箱供水模式的水质相对最差。相同供水模式下,组合消毒比单氯胺消毒对二次供水微生物的控制效果更好。

关键词: 饮用水; 紫外/氯胺组合消毒; 供水系统; 微生物生长

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0039-05

Effects of the Combined Ultraviolet and Chloramine Disinfection on Microbial Growth in a Full-scale Water Supply System

SUN Jian-wei

(Shanghai Pudong Veolia Water Corporation Limited, Shanghai 200127, China)

Abstract: Linjiang Waterworks of Shanghai and its water supply system were targeted to investigate the influence of the combined UV/chloramine disinfection and chloramine disinfection on the quantity distribution of microorganisms. The results showed that the efficiency of the combined UV/chloramine disinfection was higher than that of the single chloramine disinfection. Under the current process conditions, the combined UV/chloramine disinfection could inactivate all culturable bacteria. However, chloramine disinfection could not inactivate all culturable bacteria (97.71%~99.98%). The average HPC in the chloramine disinfection pipe system increased 128.78% more than that in the combined UV/chloramine disinfection. It increased 8.94% in the secondary water supply system. Compared with the chloramine disinfection, the combined UV/chloramine disinfection could reduce the microbial growth level in pipe network to a certain extent, but could not change the law of microbial growth in pipe network. The microbial level in the secondary water supply system was still significantly higher than that in the main pipes. In the secondary water supply modes, the direct water supply mode had the best water quality, and the pool-tank water supply mode had the worst water quality. Under the same water supply mode, the combined disinfection in waterworks had better control effect on

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(19DZ1204400); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207-004)

microorganisms in secondary water supply than the chloramine disinfection.

Key words: drinking water; combined ultraviolet and chloramine disinfection; water supply system; microbial growth

世界卫生组织的《饮水水质准则》明确指出,无论在发展中国家还是在发达国家,微生物指标安全性都是威胁饮水安全的首要问题,必须确保饮水的微生物安全性^[1]。饮用水微生物安全性也是我国饮用水标准对水质卫生安全要求的首要内容,是实现市政自来水直饮的重要保障,而消毒是保障饮用水微生物安全性的重要技术途径。

在供水管网中控制微生物的常用方法(如保持余氯)在控制微生物生长方面常常效率低下。一些灭活试验发现病原微生物之间的共生关系可能导致需要单独消毒时所需一氯胺100倍的剂量来维持正常的消毒效果,而消毒剂在管网中的衰减可使一些病原菌再次生长。由此可见,一般的加氯消毒方法有时不足以控制饮用水中微生物生长^[2-3]。

紫外线的C波段杀菌最有效,当水中的细菌、病毒等受到一定剂量的紫外光照射时,紫外线能穿透微生物的细胞膜和细胞核,破坏核酸(DNA或RNA)的分子键,导致细胞的复制、转录等受阻,从而引起其内部蛋白质和酶的合成障碍,细胞再生无法进行,从而达到消毒和净化的目的^[4-8]。紫外线消毒具有效率高、时间短、操作简便、无二次污染特点,但也存在无剩余消毒能力、光复活等缺点^[9-10]。

氯胺消毒具有持续性强的特点,紫外/氯胺组合消毒可以实现功能互补。已有紫外/氯胺组合消毒工艺建设目标主要针对耐氯“两虫”控制^[8]。随着水源水中的“两虫”得到有效控制,紫外/氯胺组合消毒工艺相对单氯胺消毒工艺对管网末端水质微生物安全保障效能的影响和经济性正成为供水企业的关注目标,但相关研究还十分有限。针对上海临江水厂紫外/氯胺组合消毒供水系统,研究了紫外关闭前后,紫外/氯胺组合消毒和单氯胺消毒对供水系统中微生物数量分布的影响,以期为全流程饮用水水质微生物安全保障提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

水样来自上海临江水厂及其供水管网和不同模式二次供水设施,即:多层住宅市政直供模式(直

供水)、多层住宅市政直供联合屋顶水箱供水模式(水箱出水)、高层水池水泵供水模式(水池出水)和高层水池水泵水箱供水模式(水池水箱水)。采样点分布如图1所示。采样点包括:臭氧/生物活性炭深度处理出水、紫外消毒处理出水、氯胺消毒处理出水、管网水和四种二次供水模式出水,共计15个采样点,每月采样一次。采样期为2019年4月—2020年8月。其中,紫外/氯胺组合消毒工艺采样期为2019年4月—11月。2019年11月水厂关闭紫外反应器,采用单氯胺消毒工艺。单独氯胺消毒采样期为2019年11月—2020年1月和2020年6月—8月。采样时,对管网和二次供水样本应先放水3~5 min,排出沉淀物或管中静置水,水厂常流水可直接采样,水样采用50 mL整支灭菌旋口离心管采集,当天完成样本处理和微生物指标检测。



图1 水厂、管网及二次供水采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in waterworks, pipeline networks and secondary water supply

1.2 水质指标检测

① 菌落总数(TB)检测方法

按GB 5750—2006标准方法配制NA培养基,将预处理后的样品逐级稀释 10^3 、 10^4 、 10^5 倍等3个浓度梯度,以无菌操作方法用无菌吸管吸取1 mL充分

混匀的水样,注入灭菌平皿中,倾注约 15 mL 已融化并冷却到 45 ℃左右的营养琼脂培养基,使水样与培养基充分混匀。每个梯度设 3 个平行,并使用无菌水做空白对照。待冷却凝固后,置于(36±1) ℃培养箱内倒置暗培养 48 h,进行菌落计数。

② 异养菌平板计数(HPC)方法

按标准方法配制 R2A 培养基,每个平皿加入适量 R2A 培养基。将水样进行梯度稀释,即稀释 10³、10⁴、10⁵ 倍,分别取 100 μL 稀释后的水样加入已倾倒入 R2A 培养基的灭菌平皿内,每个稀释浓度同时做 3 个平行检测,同时做空白对照。涂布后的培养皿倒置于 28 ℃的恒温培养箱中保存 7 d 进行计数。

③ 活细胞浓度(ICC)测定方法

染液配制:将 SYBR Green I 原液用 0.22 μm 滤膜过滤后的二甲亚砜(DMSO)稀释 100 倍配制成 SYBR Green I 标准液,称取 10 mg 碘化吡啶(PI)溶解于 DMSO (0.22 μm 滤膜过滤后),按 1:50 与 SYBR Green I 标准液混合为 SYPI 标准液。

样品染色:将样品稀释至合适浓度(10²~10⁵ CFU/mL),取 1 mL 于 37 ℃金属浴 5 min 后,加入 10 μL、0.5mol/L 的 EDTA-2Na,混匀后加入 10 μL SYBR Green I 标准液和 10 μL SYPI 标准液,37 ℃避光孵育 10 min 后,混匀上样。

荧光检测:用流式细胞仪检测样品中的活菌。

2 结果与讨论

2.1 不同消毒工艺对出厂水中微生物的灭活效能

表 1 展示了紫外/氯胺组合消毒和单氯胺消毒

对出厂水中不同微生物指标的消毒效率。采样期间,临江水厂出水总氯维持在 1.05~1.13 mg/L 之间。组合消毒工艺中,以 HPC 和 TB 计算的出厂水氯胺消毒效率均为 100%。在紫外消毒效率没有达到 100% 时,氯胺消毒可起到保障效能,即组合消毒工艺对可培养细菌可以 100% 灭活。在单氯胺消毒工艺中,以 HPC 和 TB 计算的消毒效率均值分别为 99.98%、97.71%,以 ICC 计算的消毒效率低于组合消毒效率。研究中采用了三种饮用水中细菌的检测方法用于评价消毒效率,其中 HPC 采用贫营养的 R2A 培养基,常温和 7 d 的培养时间,更适合饮用水中细菌的生长;流式细胞仪活菌 ICC 检测方法通过荧光双染色方法可以检测水中包括非培养的活细胞数,比采用国标培养法检测的菌落总数和 HPC 可检出更多的细菌数。通过三种细菌检测方法对消毒效率的评价可以发现,异养菌平板计数和流式细胞检测法相较国标菌落总数方法更灵敏,也更有利于保障出厂水的微生物安全性。吕东明^[11]考察了紫外和氯胺消毒对病原体的灭活效果,当紫外剂量为 40 mJ/cm²、氯胺消毒的 CT 值取 5 mg·min/L 时,对所有病原体的去除率可达 99.99% 以上,而单一氯胺消毒在常规剂量 60 mg·min/L 时,无法实现对水中所有病原体的有效去除,存在隐孢子虫、贾第鞭毛虫和军团菌等耐氯病原体^[12]。本研究证明紫外/氯胺组合消毒比单一氯胺消毒对出厂水中微生物的消毒效率更高,且在目前工艺条件下,仅靠单氯胺消毒无法做到对可培养细菌的全部灭活。

表 1 临江水厂不同消毒工艺的消毒效率均值比较

Tab.1 Comparison of mean disinfection efficiency for different disinfection processes in Linjiang Waterworks

| 消毒工艺 | 紫外剂量/ (mJ·cm ⁻²) | HPC | | TB | | ICC | |
|-------|---------------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | | 紫外消毒效率/% | 总消毒效率/% | 紫外消毒效率/% | 总消毒效率/% | 紫外消毒效率/% | 总消毒效率/% |
| 紫外/氯胺 | 66.05 | 100 | 100 | 100 | 100 | 99.65 | 98.75 |
| | 45.40 | 100 | | 100 | | 99.47 | |
| | 34.77 | 100 | | 100 | | 99.16 | |
| | 21.17 | 100 | | 100 | | 98.77 | |
| | 10.97 | 99.25 | | 100 | | 98.34 | |
| 单氯胺 | | | 99.98 | | 97.71 | | 98.12 |

2.2 不同消毒工艺对管网水中微生物的灭活效能

对管网和二次供水中的微生物(HPC)与总氯进行 Spearman 相关性分析,结果表明,在组合消毒和单氯胺消毒条件下 HPC 与总氯之间均呈现显著负相关(分别为-0.79 和-0.81)。因此,在饮用水供水

系统中常用总氯表征微生物的稳定性。图 2 反映了临江水厂两种消毒方式下供水管网和二次供水中 HPC 和总氯的变化。管网采样点顺序是按照水力停留时间排列,水力停留时间在 3.4~14.5 h 之间。管网中 HPC 均值在紫外关闭后较之前增加了

128.78%,且管网同一位置的HPC数量,单氯胺消毒工艺均高于组合消毒工艺。二次供水中的HPC均值在紫外关闭后增加了8.94%,紫外/氯胺组合消毒相对单氯胺消毒可以一定程度改善管网微生物生长水平,但不能改变管网微生物生长变化规律,二次供水的微生物水平仍明显高于管网,二次供水是管网输配系统微生物风险的主要控制环节。临江水厂UV关闭前后,供水管网和二次供水的总氯衰减趋势基本一致,没有表现出明显的规律差异。

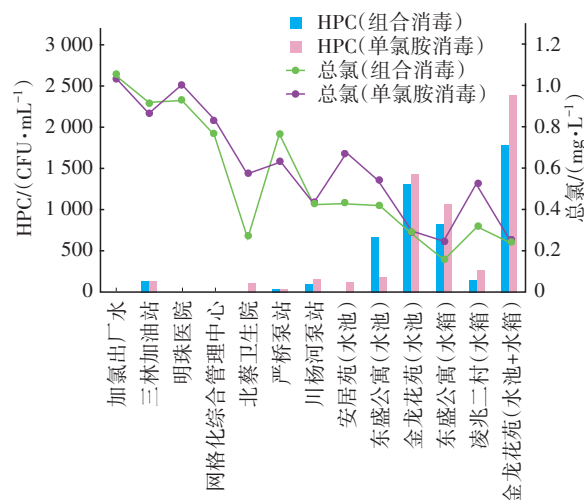


图2 两种消毒方式下供水管网和二次供水采样点HPC和总氯变化

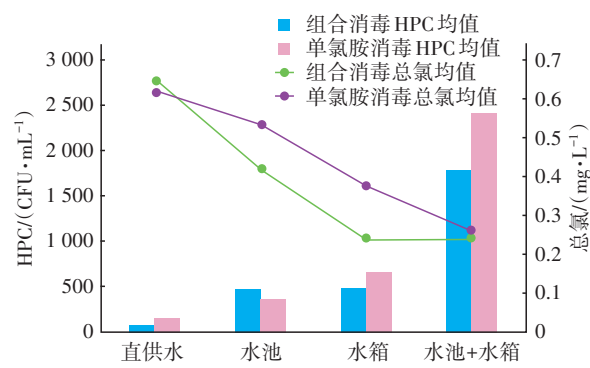
Fig.2 Variations of HPC and total chlorine in water distribution systems using two different disinfection processes

2.3 消毒方式、供水模式对微生物生长的影响

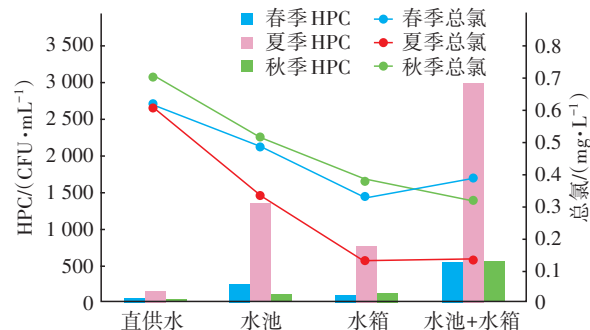
直供、水池、水箱、水池+水箱四种二次供水模式下,不同消毒方式和季节对二次供水微生物数量的影响见图3。相同消毒工艺条件下,直供水的总氯最高(0.62~0.64 mg/L),HPC最低(61~148 CFU/mL),且一年四季的HPC均符合上海市地方标准,微生物安全性相对最好。水池+水箱模式的总氯最低(0.24~0.26 mg/L),HPC最高(1 778~2 399 CFU/mL),且在春季、夏季和秋季HPC均超过上海市地方标准,即水池+水箱供水模式下的微生物质量相对最差。水池和水箱两种供水模式的HPC基本保持一致,水箱的余氯衰减要比水池快。为保证用户末端的饮用水微生物安全性,建议减少“水池+水箱”供水模式。

比较水力停留时间对二次供水的微生物生长的影响。直供水、水池、水箱、水池+水箱四种二次

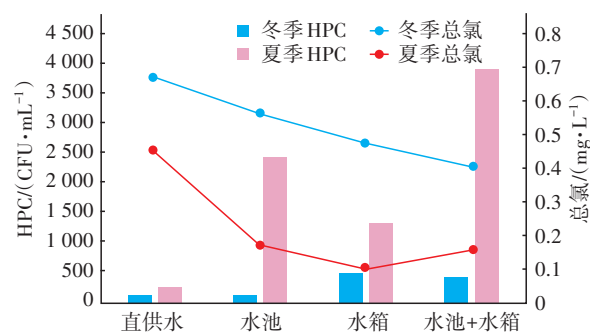
供水模式对应的水力停留时间分别是3.36~14.5、3.65~36.41、4.57~16.45、36.41 h。直供水的水龄相对最短,余氯衰减最慢;水池+水箱模式的水力停留时间最长,余氯衰减最多,微生物生长水平最高。因此,为保证用户末端的饮用水微生物安全性,建议有效控制二次供水的水力停留时间。



a. 均值



b. 组合消毒季节分布



c. 单氯胺消毒季节分布

图3 二次供水模式下两种消毒工艺的HPC和总氯变化
Fig.3 Variations of HPC and total chlorine in the different secondary water supply systems using two different disinfection processes

比较相同供水模式下,两种消毒工艺对二次供水微生物生长的影响。在直供水、水箱、水池+水箱模式下,单氯胺消毒的HPC均高于组合消毒;在水池模式下,组合消毒的HPC略高于单氯胺消毒。整

体来看,相同供水模式下,水厂组合消毒要比单氯胺消毒对二次供水的微生物有更好的控制效果,但是不能改变二次供水微生物变化规律。二次供水中夏季的余氯衰减明显高于春季、秋季和冬季。

3 结论

紫外/氯胺组合消毒比单一氯胺消毒对出厂水中微生物的消毒效率更高。目前工艺条件下,仅靠单氯胺消毒无法做到对可培养细菌的全部灭活。

紫外/氯胺组合消毒相对单氯胺消毒可以一定程度改善管网微生物生长水平,但不能改变管网微生物生长变化规律,二次供水的微生物水平仍明显高于管网,二次供水是管网输配系统微生物风险的主要控制环节。应根据水质变化情况在二次供水设施后增设紫外消毒以控制微生物风险,同时加强二次供水设施改造及其运行管理。

四种二次供水模式中,直供水模式的水质最好,水池+水箱供水模式的水质最差。建议减少“水池+水箱”供水模式或有效控制二次供水的水力停留时间。在相同供水模式下,水厂组合消毒要比单氯胺消毒对二次供水微生物有更好的控制效果,但是不能改变二次供水的微生物变化规律。二次供水中,夏季的余氯衰减明显高于春季、秋季和冬季。

参考文献:

- [1] VIKTOR B, ANDREAS L, EKATERINA S, *et al.* Risk-based cost-benefit analysis for evaluating microbial risk mitigation in a drinking water system [J]. *Water Research*, 2018, 132: 111-123.
- [2] HIJNEN W A M, BEERENDONK E F, MEDEMA G J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review [J]. *Water Research*, 2006, 40(1): 3-22.
- [3] SUN X, CHEN M, WEI D, *et al.* Research progress of disinfection and disinfection by-products in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 81: 52-67.
- [4] 高雪,杨唯艺,雷培树. 饮用水紫外线组合消毒技术发展现状[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(18): 52-55.
GAO Xue, YANG Weiyi, LEI Peishu. Development status of the combined ultraviolet disinfection technology in drinking water [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 52-55 (in Chinese).
- [5] 吴艳华,张明,镇祥华,等. 珠海某绿色高品质饮用水厂工程设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(18): 88-92.
WU Yanhua, ZHANG Ming, ZHEN Xianghua, *et al.* Design of a green and high-quality waterworks in Zhuhai [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(18): 88-92 (in Chinese).
- [6] 潘晓,王祥勇,陈洪斌. 紫外线和化合氯联合消毒在水厂的应用研究[J]. *水处理技术*, 2012, 38(7): 71-74.
PAN Xiao, WANG Xiangyong, CHEN Hongbin. Application of the combined UV and chlorine disinfection in water plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(7): 71-74 (in Chinese).
- [7] DONG F, LIN Q, LI C, *et al.* UV/chlorination process of algal-laden water: algal inactivation and disinfection byproducts attenuation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 257: 117896.
- [8] ADEYEMO F E, SINGH G, REDDY P, *et al.* Efficiency of chlorine and UV in the inactivation of *Cryptosporidium* and *Giardia* in wastewater [J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0216040.
- [9] JIANG B, TIAN Y, ZHANG Z, *et al.* Degradation behaviors of isopropylphenazone and aminopyrine and their genetic toxicity variations during UV/chloramine treatment [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115339.
- [10] MURPHY H M, PAYNE S J, GAGNON G A. Sequential UV- and chlorine-based disinfection to mitigate *Escherichia coli* in drinking water biofilms [J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 2083-2092.
- [11] 吕东明. 饮用水多屏障消毒策略及紫外消毒技术的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(1): 1-6.
LÜ Dongming. Application of multi-barrier disinfection strategy and UV disinfection technology in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(1): 1-6 (in Chinese).
- [12] LUO L W, WU Y H, YU T, *et al.* Evaluating method and potential risks of chlorine-resistant bacteria (CRB): a review [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116474.

作者简介:孙坚伟(1975-),女,上海人,硕士,高级工程师,主要从事制水生产运行管理工作。

E-mail:sunjianwei@pudongwater.com

收稿日期:2021-09-20

修回日期:2021-10-22

(编辑:李德强)