

何建荣, 柳叶潇, 刘志刚, 等. 高层住宅二次供水消毒技术应用与优化[J]. 净水技术, 2022, 41(10):178-185.

HE J R, LIU Y X, LIU Z G, et al. Application and optimization of secondary water supply disinfection technology for high-rise residential buildings[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10):178-185.



扫我试试?

高层住宅二次供水消毒技术应用与优化

何建荣, 柳叶潇*, 刘志刚, 水 永, 徐 巧, 王亚超

(宁波市水务环境集团有限公司, 浙江宁波 315041)

摘 要 随着城市高层建筑的日益增多, 如何有效避免二次供水系统中的生活用水污染已成为业界密切关注的问题。在高层住宅二次供水系统中增加二次消毒环节可以降低生活用水的污染风险, 文章结合臭氧与紫外线消毒技术, 通过模拟测试与实际应用研究二次消毒措施对高层住宅生活用水水质的影响。研究发现, 二次消毒措施对水体的 pH 与浑浊度影响较小, 但会造成水体余氯瞬时衰减, 且二次消毒措施对水体余氯后续衰减存在抑制作用。据此, 文章建立并优化了二次消毒应用策略, 为泵房二次供水消毒技术应用提供理论依据与实践经验。

关键词 二次消毒 臭氧 紫外线 余氯衰减 抑制作用

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)10-0178-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.10.026

Application and Optimization of Secondary Water Supply Disinfection Technology for High-Rise Residential Buildings

HE Jianrong, LIU Yexiao*, LIU Zhigang, SHUI Yong, XU Qiao, WANG Yachao

(Ningbo Water Environment Group Co., Ltd., Ningbo 315041, China)

Abstract With the increasing number of high-rise buildings in cities, how to effectively avoid domestic water pollution in the secondary water supply system has become an issue that attracted the industry pays close attention. Adding secondary disinfection to the secondary water supply system of high-rise residential buildings could reduce the pollution risk of domestic water. This article had combined ozone and ultraviolet disinfection technology to study the impact of secondary disinfection measures on the quality of domestic water in high-rise residential buildings through simulation tests and practical applications. Studies had found that secondary disinfection measures had little effect on the pH and turbidity of the water body, but would cause the instantaneous attenuation of residual chlorine in the water body. And secondary disinfection measures had an inhibition effect on the subsequent attenuation of residual chlorine in the water body. Based on this, this article had established and optimized the secondary disinfection application strategy, and provided theoretical basis and practical experience for the application of secondary water supply disinfection technology in the pump room.

Keywords secondary disinfection ozone ultraviolet(UV) residual chlorine attenuation inhibition effect

随着社会经济的迅速发展与人民生活水平的提高, 城市高层住宅日益增多, 配建的二次供水设施也与居民的生活密不可分, 二次供水水质

的优劣已直接关系到居民的健康安全。如何有效避免生活用水在二次供水系统中发生污染, 规范二次供水设施的建设与管理, 已成为业界密切关注的问题。依照《二次供水设施卫生规范》(GB 17051—1997)的规定, 二次供水设施须有安装消毒器的位置, 有条件的单位设施应设有消毒器。在高层住宅二次供水系统中增加二次消毒环节可以降低生活用水的污染风险, 如何高效

[收稿日期] 2022-02-17

[作者简介] 何建荣(1973—), 男, 硕士, 研究方向为饮用水安全保障技术, E-mail: zcigmondliu@126.com。

[通信作者] 柳叶潇(1994—), 男, 硕士, 研究方向为二次供水安全保障技术, E-mail: liuyx1234@126.com。

经济地发挥二次供水消毒措施的应用效果尤为重要。

饮用水消毒技术主要包括物理法和化学法两大类^[1]。物理法是利用物理能破坏细菌或使菌体蛋白发生解体及变性,如紫外线消毒法^[2-3]、超声波消

毒法^[4]等;化学法则是利用液态或气态的化学药剂渗透到细菌体内,通过剧烈的氧化反应,使细菌发生破坏性的降解,如氯化消毒^[5]、臭氧消毒^[6]等。3种主流饮用水消毒技术,即氯化消毒、臭氧消毒以及紫外线消毒的优缺点对比如表1所示。

表1 3种饮用水消毒技术对比

Tab. 1 Comparison of Three Kinds of Drinking Water Disinfection Technology

技术指标	氯化消毒	臭氧消毒	紫外线消毒
运行时消耗药剂	二氧化氯、次氯酸钠等含氯消毒剂	无	无
消毒速率	较慢	较快	极快
持续消毒能力	较强	极弱	无
消毒区域	水箱、水池	水箱、水池	管道
消毒过程中的异味	较弱刺激性气味	较强刺激性气味	无

目前,国内已有不同研究选取臭氧、紫外线等方式进行二次供水消毒案例分析^[7-8],但均未考虑实际水箱水质变化规律,二次消毒应用策略模糊,实用性较低。因此,本文结合主流的饮用水消毒技术,通过模拟测试与实际应用研究了二次消毒技术对高层住宅生活用水水质的影响,建立并优化了二次消毒应用策略,为泵房二次供水消毒技术改造提供理论依据与实践经验。

1 二次供水消毒技术模拟效果分析

考虑到氯化消毒需定量投放含氯消毒剂,后期管理与运维难度大,不适用于泵房环境。相比之下,臭氧消毒与紫外线消毒无需投放消毒剂,后期管理与运维更为便捷,且消毒速率较快。因此,本文主要研究臭氧消毒与紫外线消毒两种消毒方式。

1.1 模拟试验平台

选取A小区泵房闲置水箱作为研究对象,水箱尺寸为3 m×2 m×2 m,总容积为12 m³。以该水箱为基础进行附属管路及消毒设备改造,增加了XN-WTS-20G型水箱臭氧消毒设备与XN-ZWX75-5型紫外线消毒设备,搭建了水箱模拟试验平台,整体系统框架如图1所示。

臭氧消毒设备与紫外线消毒设备基本参数如表2所示。

1.2 水箱静态水质变化规律

通过水箱模拟试验平台水箱进水取样口采集并确定进水水质,初始进水水质参数如表3所示。

取水箱高度的3/4作为水箱贮水高度,模拟水箱运行时的普遍贮水高度,即水箱贮水体积为

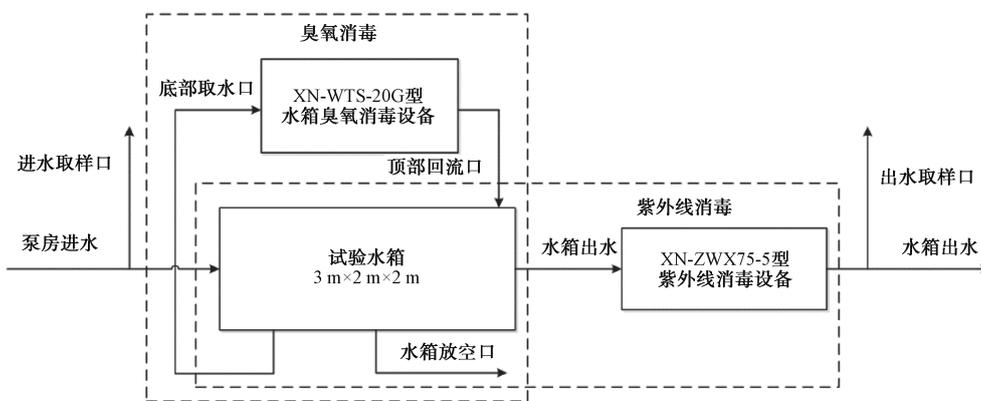


图1 水箱模拟试验平台系统框架

Fig. 1 System Framework of Water Tank Simulation Test Platform

表 2 消毒设备基本参数
Tab. 2 Basic Parameters of Disinfection Equipment

名称	XN-WTS-20G 型水箱臭氧消毒设备	XN-ZWX75-5 型紫外线消毒设备
设备功率/W	960	900
箱体管道材质	不锈钢	不锈钢
安装位置	外置于水箱	水箱出水口
控制方式	PLC 控制	PLC 控制
特性参数	臭氧最大质量浓度 < 0.5 mg/L 臭氧投加量为 10 g/h	照射剂量为 540~650 mJ·s/cm ² 处理水量为 50 m ³ /h

表 3 进水水质参数
Tab. 3 Parameters of Inflow Water Quality

项目	温度/°C	浑浊度/NTU	余氯/ (mg·L ⁻¹)	总大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	耐热大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)
数值	10	0.25	0.29	未检出	未检出	未检出

9 m³。水箱水质变化如图 2 所示。

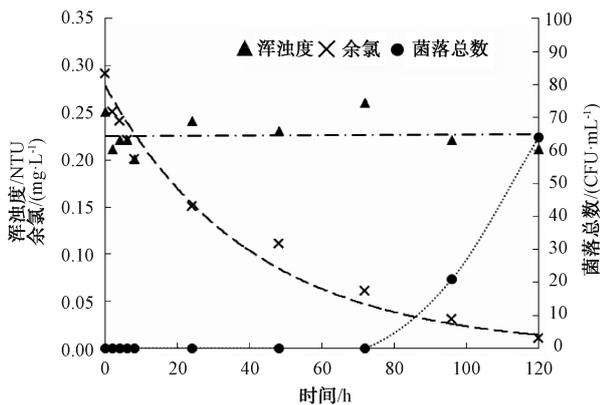


图 2 水箱水质变化

Fig. 2 Water Quality Changes of Water Tank

水箱贮水静置过程中,水箱水体中余氯逐渐降低,在最初的 72 h 里,微生物菌落均未检出;在约 80 h 时,余氯质量浓度降低至限值(0.05 mg/L),此时水体中的微生物逐步滋生繁殖,菌落总数逐渐增加;在 120 h 时,水体余氯无法检出,此时水体菌落总数达到最大值。水箱贮水静置过程中水体浑浊度变化不明显。

1.3 臭氧消毒与紫外线消毒模拟试验

水箱贮水静置 120 h 以后,水箱出水水质参数如表 4 所示。

针对该水质状况的水箱饮用水进行快速臭氧消毒与紫外线消毒,在每种处理条件下分别采集 3 次水样,取检测均值,测试应用效果。消毒后温度、浑

表 4 出水水质参数
Tab. 4 Parameters of Outflow Water Quality

项目	温度/°C	浑浊度/NTU	余氯/ (mg·L ⁻¹)	总大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	耐热大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)
数值	12	0.21	0.00	未检出	未检出	64

浊度与余氯参数均未发生变化,微生物变化结果如表 5 所示。其中,总大肠杆菌与耐热大肠杆菌的标准为不得检出,菌落总数的标准 ≤ 100 CFU/mL。

由表 5 可知,臭氧消毒与紫外线消毒措施均能较好地在水箱出水进行快速消毒,极大地降低了水箱出水的微生物菌落总数。其中,臭氧消毒方式能

够对水箱整体贮水进行快速消毒,并且随着臭氧投放量的增加与消毒时间的延长,灭菌效果更为显著;紫外线消毒直接对水箱出水进行快速消毒,极短时间内便能达到较好的消毒效果,消毒速率优于臭氧消毒方式,但由于其安装在水箱出水管位置,紫外线消毒后的生活用水将直接流向加压水泵,消毒装置无法对水箱整体贮水进行消毒。

表5 经处理水样的微生物测定结果
Tab. 5 Microbiological Determination Results of Treated Water Samples

序号	处理方式	处理参数	总大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	耐热大肠菌群/ [CFU·(100 mL) ⁻¹]	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)
1	无	-	未检出	未检出	64
2	臭氧消毒	消毒时间为 10 min	未检出	未检出	10
3	臭氧消毒	消毒时间为 20 min	未检出	未检出	6
4	紫外线消毒	出水流速约为 0.5 m/s	未检出	未检出	3
5	紫外线消毒	出水流速约为 1.0 m/s	未检出	未检出	4

注:在所有水样中均未检测出总大肠菌群与耐热大肠菌群,菌落总数为3次采样检测均值

2 二次消毒应用实际案例分析

选取 B 小区与 C 小区泵房,分别安装臭氧消毒装置与紫外线消毒装置,消毒设备的功能参数与水箱模拟试验平台使用的消毒设备相同,2 个小区的设备及其安装成本分别为 3.5 万元与 4.2 万元。B 小区涉及水箱供水用户约 600 户,水箱有效容积约为 80 m³,C 小区水箱供水用户约 700 户,水箱有效容积约为 95 m³,整体供水情况相近。

为避免管网水质的偶然性变化对水箱水质的影响,反映实际工况下水箱水质的常规状态,分别在 5:00、10:00、15:00、20:00 和 24:00 进行 5 次不同

间段的取样,样品包括水箱进水、开启消毒设备前的水箱出水及开启消毒设备后的水箱出水。选取浊度、pH、余氯及微生物这 4 个参数作为水质评定指标。

2.1 浊度度与 pH 变化分析

由图 3 可知,臭氧消毒设备启动与未启动时的水箱进出水浊度变化较小,5 次取样的浊度变化均在 0.1 NTU 以内;与之类似,紫外线设备启动与未启动时的水箱进出水浊度变化也较小,5 次取样的浊度变化也均在 0.1 NTU 以内。

另一方面,臭氧消毒设备启动与未启动时的水

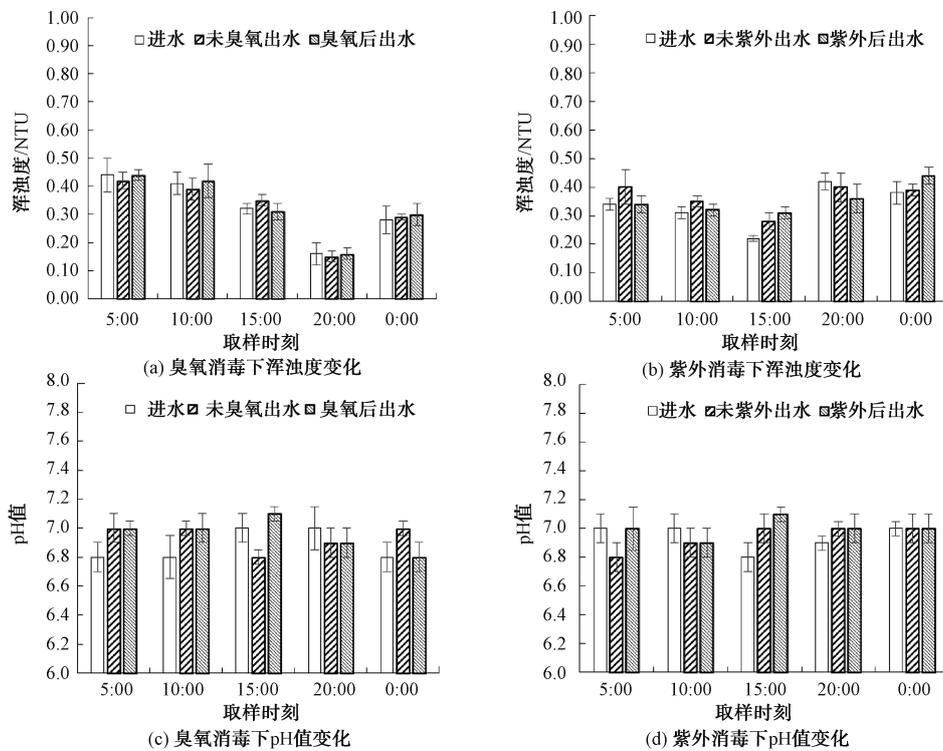


图3 浊度度与 pH 值测定结果

Fig. 3 Determination Results of Turbidity and pH Value

箱进出水 pH 变化较小,5 次取样的 pH 值均在 6.8~7.2;与之类似,紫外线设备启动与未启动时的水箱进出水 pH 变化也较小,5 次取样的 pH 值也均在 6.8~7.2。

以上分析结果可以说明,臭氧消毒和紫外线消毒对水箱出水浑浊度、pH 影响均较小。

2.2 余氯变化分析

由图 4 可知,在臭氧消毒设备未启动时,水箱出水相对于水箱进水的余氯衰减量在 0.07~0.10

mg/L,而在臭氧消毒设备启动后,水箱出水相对于水箱进水的余氯衰减量增加到了 0.15~0.19 mg/L,使用臭氧消毒设备会降低水箱贮水的余氯。在紫外线消毒设备未启动时,水箱出水相对于水箱进水的余氯衰减量在 0.08~0.12 mg/L,而紫外线消毒设备启动后,水箱出水相对于水箱进水的余氯衰减量增加到了 0.21~0.30 mg/L,使用紫外线消毒设备也会降低水箱出水的余氯(紫外线消毒装置仅在水箱出水管起到灭菌消毒作用,不影响水箱贮水水质)。

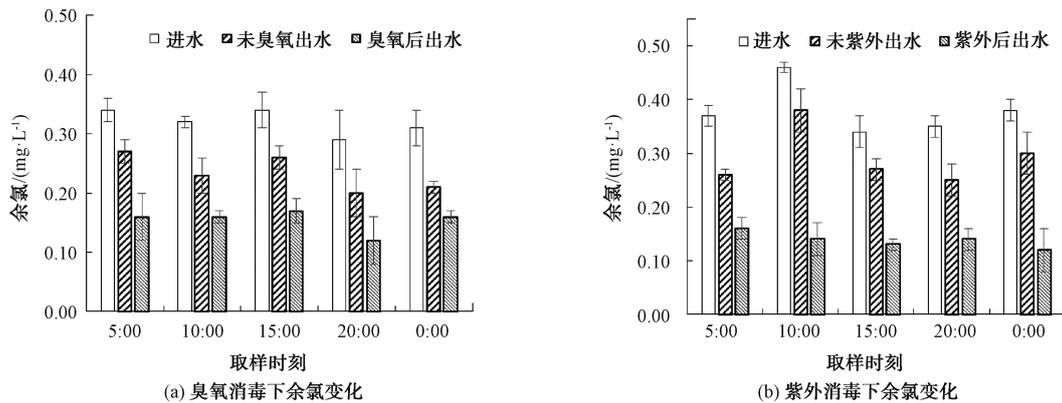


图 4 余氯测定结果

Fig. 4 Determination Results of Residual Chlorine

由此可见,臭氧可能与水中的部分游离氯发生了化学反应,导致出水余氯的衰减;而紫外线的光效应会加速水中游离氯的分解,使余氯衰减速度加快,降低出水余氯水平^[9]。由于紫外线消毒过程接触时间较短,仅发现部分游离氯被分解,但余氯衰减幅度要大于臭氧消毒方式。

由上述试验结果可知,臭氧消毒和紫外线消毒

过程均会加快二次供水水体中余氯衰减。为综合分析臭氧消毒和紫外线消毒过程对龙头水余氯衰减的影响,同步对 B 小区与 C 小区二次供水用户末端龙头水进行取样分析,分别在 8:00、14:00 和 20:00 这 3 个时间段对水箱进水、水箱出水 and 用户龙头水进行取样分析,记录每个时间段 3 次取样均值,结果如图 5 所示。

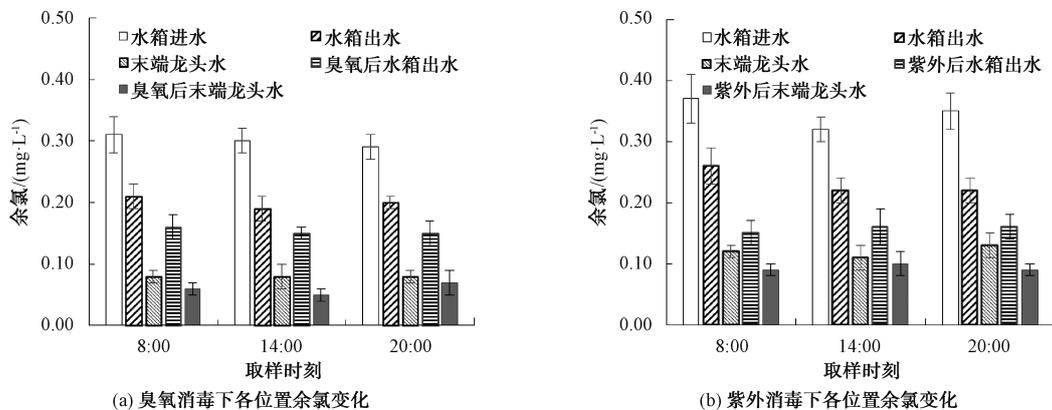


图 5 水箱进出水与龙头水水样余氯测定结果

Fig. 5 Determination Results of Residual Chlorine in Water Samples from Water Tank and Tap Water

由图 5 可知,未经臭氧消毒时的水箱出水到用户末端龙头水的余氯衰减量在 0.11~0.13 mg/L,经过臭氧消毒后的水箱出水到用户末端龙头水的余氯衰减量在 0.08~0.10 mg/L;未经紫外线消毒时的水箱出水到用户末端龙头水的余氯衰减量在 0.09~0.14 mg/L,经过紫外线消毒后的水箱出水到用户末端龙头水的余氯衰减量在 0.06~0.07 mg/L。这可

以一定程度上说明经过臭氧消毒或紫外线消毒后,在水箱与用户末端龙头之间的管道中,水中余氯的衰减速率有所降低。

2.3 微生物变化分析

对采集到的水箱进出水水样进行微生物测定,测定项目包括总大肠菌群、耐热大肠菌群及菌落总数 3 项,结果如表 6 所示。

表 6 水箱水样微生物测定结果

Tab. 6 Microbiological Determination Results of Water Samples from Water Tank

序号	水样类别	总大肠菌群/[CFU·(100 mL) ⁻¹]	耐热大肠菌群/[CFU·(100 mL) ⁻¹]	菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)
1	B 小区泵房进水	未检出	未检出	未检出
2	未臭氧消毒后出水	未检出	未检出	未检出
3	经臭氧消毒后出水	未检出	未检出	未检出
4	C 小区泵房进水	未检出	未检出	未检出
5	未紫外线消毒后出水	未检出	未检出	未检出
6	经紫外线消毒后出水	未检出	未检出	未检出

由表 6 可知,在水箱进水微生物未检出、水质情况较好的情况下,臭氧消毒与紫外线消毒无论启动与否,水箱出水均能保证微生物基本未检出的结果。

2.4 臭氧消毒与紫外线消毒应用优化

针对上述消毒过程对水体余氯衰减作用的不同规律,分别取未经臭氧消毒的水箱出水和经臭氧消毒后的水箱出水,在 DN100 水泥砂浆内衬管内进行余氯衰减试验。余氯在贮存饮用水中发生的衰减变化,是一个与反应速率和反应物浓度有关的单一组分的一级反应^[10],如式(1)。

$$P_A = P_{A0} e^{-k} \quad (1)$$

其中: P_A ——反应 t 时刻余氯的质量浓度, mg/L;
 P_{A0} ——初始余氯质量浓度, mg/L;
 k ——衰减系数。

与低入住率小区水箱贮水停留时间较长的情况不同,生活用水在小区内部供水管道的停留时间往往较短,实际运行中停留时间始终不会超过用水早高峰与晚高峰之间的 12.0 h。因此,采样间隔选取 1.0、1.0、2.0、2.0、4.0、6.0 h,即分别选取 0.0、1.0、2.0、4.0、6.0、10.0、16.0 h 停留时间,采集水样并测定余氯,并将数据代入式(1),求出衰减系数 k 。其中,未经臭氧消毒水样的余氯衰减系数为 0.182,经

过臭氧消毒后水样的余氯衰减系数为 0.130,得到衰减方程,绘制曲线如图 6 所示。同理,在紫外线消毒设备启动前后,分别采集 3 次水箱进水、水箱出水与二次供水用户末端龙头水水样,进行余氯衰减小试。可求得未经紫外线消毒水样的余氯衰减系数为 0.214,经过紫外线消毒后水样的余氯衰减系数为 0.130,得到衰减方程,绘制曲线如图 7 所示。

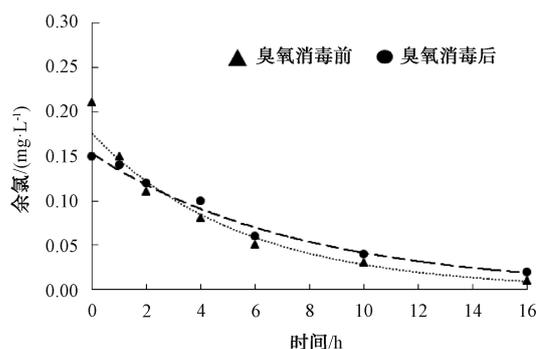


图 6 臭氧消毒前后余氯衰减曲线

Fig. 6 Residual Chlorine Attenuation Curve before and after Ozone Disinfection

由图 6、图 7 可知,虽然经过臭氧消毒与紫外线消毒后的水箱初始出水余氯要低于未经臭氧消毒与紫外线消毒的水箱初始出水余氯,但水样的后续余氯衰减速率有所降低。其中,经过臭氧消毒前后的水箱出水水样在约 2.5 h 停留时间后,两者余氯达

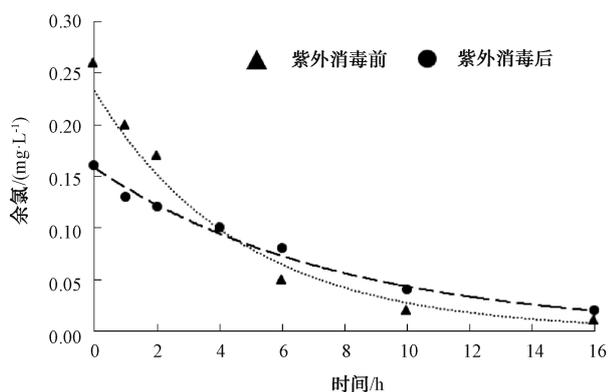


图7 紫外线消毒前后余氯衰减曲线

Fig. 7 Residual Chlorine Attenuation Curve before and after Ultraviolet Disinfection

到同一水平,此后经过臭氧消毒后的水样中余氯要高于未经臭氧消毒的水样余氯;经过紫外线消毒前后的水箱出水水样在约 4.0 h 停留时间后,两者余氯达到同一水平,此后经过紫外线消毒后的水样中余氯要高于未经紫外线消毒的水样余氯。

因此,针对小区生活用水在管道内停留时间较长的情况,臭氧消毒与紫外线消毒均可以应用于抑制生活用水在小区内管道中的余氯衰减速率,提高用户末端龙头水的余氯水平,优化与拓展臭氧消毒与紫外线消毒应用场景与策略。

3 结论与建议

高层住宅二次供水消毒的应用实践是一项综合性工作,臭氧消毒与紫外线消毒等二次消毒措施在模拟场景中确实能较好地发挥应急快速消毒灭菌的作用,但在实际工况中的应用效果与其运行策略密切相关,需要慎重考虑到高层住宅小区的入住率、周边管网水质、用户用水高峰低谷期等多方面因素,提出适合小区实际工况的应用策略,才能在保证高效经济的基础上,充分发挥二次消毒措施对二次供水系统水质的提升作用。

(1)臭氧消毒与紫外线消毒方式均能较好地起到水体应急快速消毒灭菌作用。臭氧消毒方式能够对水箱整体贮水进行消毒,随着水体臭氧浓度的提高,消毒效果有所提升,但消毒时间较长,且水体臭氧析出后对人体有刺激性;紫外线消毒方式消毒时间短,无异臭产生,但考虑成本与消毒效果,设备往往安装在水箱出水管位置,紫外线消毒后的生活用水将直接流向加压水泵,消毒装置无法对水箱整体贮水进行消毒。

(2)在实际工况下,二次供水水箱水质情况往往较好,水箱进水微生物未检出,臭氧消毒与紫外线消毒无论启动与否,水箱出水均能保证微生物基本未检出的结果,对浑浊度与 pH 影响极小。并且臭氧消毒与紫外线消毒均会在不同程度上降低水箱出水的余氯,影响短期内生活用水中余氯的持续性抑菌作用。

(3)臭氧消毒与紫外线消毒措施会对生活饮用水在管道中的余氯衰减产生抑制作用。针对臭氧消毒与紫外线消毒措施的长期使用,应选取泵房进水余氯较高,但末端龙头水余氯较低的小区进行,二次消毒措施可抑制生活用水在小区内管道中的余氯衰减速率,其中臭氧消毒比紫外线消毒的应用效果更为显著。针对末端龙头水余氯长期保持较高水平的小区,不适合采用臭氧消毒与紫外线消毒措施进行二次消毒。

(4)臭氧消毒与紫外线消毒措施的使用还可针对用户用水的不同时间段进行调节。如在用户用水低谷期时,如夜间 0:00 以后,生活用水在管道内停留时间相较用水高峰期较长,此时开启二次消毒措施可抑制生活用水在夜间管道中的余氯衰减速率,提高清晨用户“第一口水”的余氯水平,减少二次污染风险;而在用户用水高峰期时,生活用水在管道内停留时间较短,不建议开启二次消毒设备。

(5)目前,一整套臭氧消毒或紫外线消毒设备及其安装成本约为 4 万元,其中臭氧消毒设备成本相对较低,对存在中大型水箱的泵房而言,二次消毒设施成本可控制在二次供水设施总成本的 5% 以内,对整体泵房成本影响较小。臭氧消毒与紫外线消毒均无需额外加药,结合有效的启停控制策略,使用寿命长,维护成本低,整体二次供水消毒经济性得以保证。

参考文献

- [1] 邹华生,吕雪莹. 饮用水消毒技术的研究进展[J]. 工业水处理, 2016, 36(6): 17-21.
- [2] 文尚胜,左文财,周悦,等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势[J]. 光学技术, 2020, 46(6): 664-670.
- [3] 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.
- [4] 罗辉辉,余龙,翟娟,等. 超声波协同超滤技术处理油田污水的研究与应用[J]. 工业水处理, 2020, 40(6): 51-55.
- [5] 陈宏源,赵奇特,张凯风. 次氯酸钠用于饮用水消毒时副产

- 物风险和控制[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 34-40.
- [6] HU H W, SHI P H. Research of drinking water disinfection technology[C]. Henan: 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010: 1-3.
- [7] 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.
- [8] 曹文烽, 黄天寅, 孙文俊, 等. 紫外线消毒技术在二次供水中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(3): 60-64.
- [9] 王黛瑶, 李恩, 李刚, 等. 饮用水紫外-氯联合消毒工艺研究进展[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 94-101.
- [10] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2000: 1-23.

【编辑推荐】高层住宅由于二次供水设施的复杂性和多用户特征,水质管理存在不确定性,特别在微生物安全的保障方面存在难点,仅依靠水厂中余氯难以绝对保证终端用户的饮水安全。文章结合泵房环境,选择臭氧和紫外消毒作为二次消毒的方式开展试验和实证。研究从消毒效果和经济可行性进行了论证,提出了可行的二次消毒工艺方案,对高品质供水的提升具有参考价值。

(上接第 16 页)

- matter[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(6): 5667-5675.
- [51] ZHAO X T, HU Z Z, YANG X, et al. Noncovalent interactions between fluoroquinolone antibiotics with dissolved organic matter: A ^1H NMR binding site study and multi-spectroscopic methods [J]. Environmental Pollution, 2019, 248: 815-822. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.077.
- [52] XU H C, ZOU L, GUAN D X, et al. Molecular weight-dependent spectral and metal binding properties of sediment dissolved organic matter from different origins[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 828-835. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.186.
- [53] ZHAO C, GAO S J, ZHOU L, et al. Dissolved organic matter in urban forestland soil and its interactions with typical heavy metals: A case of Daxing District, Beijing[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 26(3): 2960-2973.
- [54] LIU S S, ZHU Y R, LIU L Z, et al. Cation-induced coagulation of aquatic plant-derived dissolved organic matter: Investigation by EEM-PARAFAC and FT-IR spectroscopy [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 726-734. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.11.076.
- [55] ZHANG Y Z, SUN X D, BIAN W, et al. The key role of persistent free radicals on the surface of hydrochar and pyrocarbon in the removal of heavy metal-organic combined pollutants[J]. Bioresource Technology, 2020, 318: 124046. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124046.
- [56] 王家元. 城市径流雨水溶解性有机质特征及其与典型重金属的作用机制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [57] POULIN B A, RYAN J N, AIKEN G R. Effects of iron on optical properties of dissolved organic matter[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(17): 10098-10106.
- [58] CHEN W B, SMITH D S, GUÉGUEN C. Influence of water chemistry and dissolved organic matter (DOM) molecular size on copper and mercury binding determined by multiresponse fluorescence quenching[J]. Chemosphere, 2013, 92(4): 351-359.
- [59] ZHANG Y, WANG Y F, ZHANG X Y, et al. Investigating the behavior of binding properties between dissolved organic matter (DOM) and Pb (II) during the soil sorption process using parallel factor analysis (PARAFAC) and two-dimensional correlation spectroscopy (2D-COS) [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(32): 25156-25265.
- [60] YAMASHITA Y, JAFFE R. Characterizing the interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis [J]. Environmental Science Technology, 2008, 42(19): 7374-7379.
- [61] LI X M, GUO H M, ZHANG H, et al. Roles of different molecular weights of dissolved organic matter in arsenic enrichment in groundwater: Evidences from ultrafiltration and EEM-PARAFAC[J]. Applied Geochemistry, 2019, 104: 124-134. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.03.024.
- [62] JING W, LU H, SONG J, et al. Evaluation of the interactions between water extractable soil organic matter and metal cations [Cu (II), Eu (III)] using excitation-emission matrix combined with parallel factor analysis [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(7): 14464-14476.