

银离子-紫外线联合消毒的生活热水微生物灭活效能

尚思宏¹,李星^{1*},杨艳玲¹,刘永旺^{1,2},赵锂²,张惠瑾¹(1.北京工业大学,北京 100124; 2.中国建筑设计研究院,北京 100044)

摘要: 采用建筑生活热水管道模拟实验系统,研究了银离子、银离子-紫外线联合消毒对微生物的灭活效能.结果表明,银离子投量对微生物灭活效能有显著影响,0.05mg/L 银离子消毒 60min 时可达到极佳的微生物灭活效果.银离子投量较低时,增加消毒时间仍可达到相同的消毒效能.银离子的总大肠菌群灭活速率较低,需要保证足够的浓度和消毒时间(CT)值.银离子浓度的衰减速率慢,对生活热水生物膜微生物的高效持续消毒作用可保持 48h 以上.紫外线消毒、银离子消毒和银离子-紫外线联合消毒均可在很短的时间内对生物膜结构造成显著破坏,使生物膜出现脱落现象,其中紫外线消毒对生物膜结构的影响最小,银离子-紫外线联合消毒的影响最大.生物膜的 16s rDNA 测序分析表明,银离子消毒对病原微生物的灭活程度相对较低,紫外线消毒、银离子-紫外线联合消毒对病原微生物的灭活程度较高.银离子-紫外线联合消毒技术可充分发挥紫外线原位消毒和银离子持续消毒的特点,全面提高生活热水生物膜微生物消毒效能,是一种有应用价值的生活热水消毒和水质保障技术.

关键词: 生活热水; 生物安全性; 银离子; 紫外线; 联合消毒

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)08-2955-08

Inactivation efficiency of silver ions-UV combined disinfection on domestic hot water microorganisms. SHANG Si-hong¹, LI Xing^{1*}, YANG Yan-ling¹, LIU Yong-wang^{1,2}, ZHAO Li², ZHANG Hui-jin¹ (1.Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China). *China Environmental Science*, 2017,37(8): 2955~2962

Abstract: Effect of silver ions, silver ions-UV combined disinfection on microbes was investigated by using a domestic hot water biofilm annular reactor. The results showed that silver ion dosage had a significant effect on the inactivation of microbes. The disinfection by 0.05mg/L silver ion achieved excellent microbial inactivation effect in 60min. Low dosage of silver ion had the same disinfection efficiency when the sterilization time was increased. The inactivation rate of *Escherichia Coli* by silver ion was low. Hence, adequate concentration and disinfection (CT) value need to be ensured. The concentration of silver ions attenuated slowly, resulting in high-efficiency inactivation ratio above 48h. Moreover, the significant damage to the biofilm structure was caused by all three disinfection method in a very short period. Among them, UV disinfection had the least effect on biofilm structure, while silver ion-UV combined disinfection had the greatest effect on biofilm structure. It was demonstrated by 16s rDNA approaches that the sterilization ratio of silver ions to pathogenic microorganism was relatively low and the sterilization ratio of UV and silver ion-UV combined disinfection was relatively high on the contrary. Therefore, silver ion-UV combined disinfection possessing the advantages of both UV disinfection and silver ion disinfection, comprehensively improves the domestic hot water biofilm microbial disinfection efficiency, which is a valuable technology for domestic hot water disinfection.

Key words: domestic hot water; biological safety; silver ion; UV; synergistic disinfection

生活热水是二次供水系统的重要组成部分,但生活热水存在很多二次污染问题,至今仍未得到足够重视^[1].生活热水系统大多采用生活给水进行补充,受到生活给水水质的直接影响.自来水经过市政管网长距离输送后,易出现余氯、浊度、有机物、微生物等水质指标超标的问题^[2],直接用于生活热水补水时会存在一定的安全性风险.生

活热水在管道系统中的水力停留时间很长,只有用户使用热水时才会有生活给水补充至热水系统中,因此普遍存在余氯过低甚至无余氯的问题^[3],现阶段生活热水系统尚未设置消毒剂补充

收稿日期: 2017-01-17

基金项目: 国家科技重大专项课题(2014ZX07406002)

* 责任作者, 研究员, lixing@bjut.edu.cn

投加设施,也未考虑消毒剂余量保障,生物安全性无法得到保障.已有的研究表明^[4-5],生活热水的温度可以造成余氯衰减加快,也适合一些病原微生物生长,使得生活热水水质存在严重的安全性问题.住宅建筑的生活热水供水系统主要采用集中供水方式,热水在加热器和输水管道中的水力停留时间长,有利于细菌在加热器壁和管道内壁上附着和生长^[6-7].李雨婷对某市 14 个建筑单位的调查数据表明^[8],生活热水合格率为 71.43%,主要为 pH 值、高锰酸盐指数、游离性余氯和异养菌(HPC)不达标.于世明对某市 2 个生活小区内 8 个用户电热水器淋浴用水的检测结果表明^[9],细菌总数为 350~920cfu/mL,总大肠菌群为 3.3~47cfu/100mL,均严重超标.因此需要对生活热水系统的微生物进行有效控制,有必要采用二次消毒技术.

现阶段我国建筑给水排水设计规范中尚未要求对生活热水进行二次消毒,亟需对生活热水的水质安全性进行控制.近年来银离子消毒技术得到了重视,并在日本、美国、德国等国家应用于实际工程中.银离子在所有的重金属中具有最好的灭菌效果^[10],对很多病原微生物表现出很强的抗菌活性,包括绿脓假单胞菌、总大肠菌群、金黄色葡萄球菌和白色念珠菌^[11],且有持续消毒作用^[12].研究表明,硝酸银对细菌和真菌均有较强的抑制作用^[13].在 43℃热水中,0.10mg/L 银离子消毒 30min 可将金黄色葡萄球菌、绿脓菌、大肠杆菌、痢疾杆菌和伤寒杆菌完全灭活,0.08mg/L 银离子可完全杀灭霍乱弧菌^[12].在热水循环系统中,0.10mg/L 银离子消毒 210min 时军团菌的灭活率为 99.92%^[14].可见,银离子能高效杀灭多种病原微生物.美国环境保护局对银离子限值是 0.1mg/L,我国《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)中银离子限值是 0.05mg/L,因此亟需在生活热水系统中研究低剂量银离子消毒技术的可行性和适用性.

本试验采用低剂量银离子与紫外线联合消毒方式,以改善和提高由于银离子投量过低造成的消毒效果不佳的问题,为生活热水系统的安全消毒提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置和方法

试验采用环状生物膜反应器(BAR)来模拟实际生活热水管道,试验系统如图 1 所示.BAR 反应器的转子上放置可拆卸 PVC 挂片,挂片有效挂膜面积为 17.04cm²,反应器有效容积为 800mL,水力停留时间为 4h.培养生物膜前用 NaOCl 溶液对 BAR 反应器、挂片、进出水管等进行消毒和清洗.挂片上的生物膜采用自然挂膜方式进行培养,BAR 反应器进水为二次供水加热后的生活热水,水温约 45℃.生物膜生长稳定后,取生物膜挂片放于 45℃纯水的烧杯中进行消毒试验.银离子消毒时的银离子投量分别为 0.02mg/L 和 0.05mg/L.银离子-紫外线消毒中紫外线消毒的紫外灯功率为 10W;银离子消毒的银离子投量为 0.02mg/L;联合消毒的紫外灯功率为 10W、照射时间为 1min,银离子投量为 0.02mg/L.

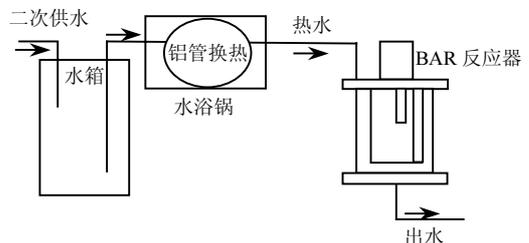


图 1 试验系统

Fig.1 Experimental system

1.2 分析方法

1.2.1 银离子消毒液配制 使用分析纯硝酸银在超纯水配制银离子消毒液,稀释成 0.2mg/L 溶液,放于 4℃冰箱,试验时根据投量进行定量投加.

1.2.2 微生物检测方法 (1)细菌总数采用平板菌落计数方法测定,使用营养琼脂培养基,在 37℃恒温培养箱内黑暗培养 24h 计数,以单位面积的细菌数表示(cfu/cm²). (2)HPC 采用平板菌落计数方法测定,使用 R₂A 固体培养基,采用涂布平板法,在 22℃恒温培养箱内黑暗培养 7d 计数,以单位面积的细菌数表示(cfu/cm²). (3)总大肠菌群采用滤膜法测定,使用品红亚硫酸钠培养基,在

37℃恒温培养箱内黑暗培养 24h 计数,以单位面积的总大肠菌群数表示(cfu/cm²).

微生物灭活率采用公式(1)计算

$$\text{灭活率} = -\lg(N_t/N_0) \quad (1)$$

式中: N_t 为消毒后微生物数量; N_0 为消毒前微生物数量,cfu/cm².

1.2.3 生物膜形态检测 将消毒前后的生物膜挂片进行固定、喷金制样处理后,利用扫描电子显微镜(SEM) (FEI nova nano450,荷兰)对挂片的生物膜表面结构进行检测.

1.2.4 16s rDNA 测序 (1)样品预处理、提取DNA.取消毒前后生物膜挂片上的生物膜置于水中,取得的生物膜液体经富集后取 4ml 液体样本进行离心,而后提取 DNA.(2)PCR 扩增.采用 PCR 引物 341F 引物 CCCTACACGACGCTCTTCC-GATCTG 和 805R 引物 GACTGGAGTTCCTTG-GCACCCGAGAATTCCA 进行扩增,而后对扩增产物进行纯化.(3)定量混合后测序.

2 结果与讨论

2.1 银离子消毒效能

2.1.1 银离子消毒特性 采用 0.02mg/L 和 0.05mg/L 的银离子投量对生活热水的生物膜微生物进行消毒效能研究,结果如图 2 所示.消毒前生物膜的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 分别为 2.4×10^5 、 2.3×10^4 和 5.9×10^6 cfu/cm²,完全灭活的灭活率分别为 5.38lg、4.36lg 和 6.77lg.可以看出,银离子投量对生物膜微生物灭活效果有显著影响,在消毒 0~60min 时,0.05mg/L 银离子的微生物灭活率好于 0.02mg/L 的.在消毒 30~60min 时,0.05mg/L 银离子的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 灭活率平均达 2.95lg、3.11lg 和 1.89lg,比 0.02mg/L 银离子的分别高出 0.69lg、1.89lg 和 0.43lg.

由图 2 还可以看出,0.02mg/L 和 0.05mg/L 银离子的总大肠菌群灭活率变化幅度更大,相差了 2.13lg,比细菌总数和 HPC 的 0.57lg 和 0.52lg 大了约 4 倍;随着消毒时间的增加,总大肠菌群灭活率的增长趋势明显更缓慢,在消毒 60min 后灭活率仍有明显增长趋势,说明总大肠菌群需要更长的消毒时间才能达到较稳定的灭活效果.这表明

生活热水中的总大肠菌群对银离子有一定的耐受性,这可能是因为总大肠菌群对水温有更强的适应性,或者水温变化造成了大肠菌群的优势菌属发生了变化,出现了耐银离子耐热性更好的大肠菌属^[15].这说明生活热水中的总大肠菌群不易灭活,因此为提高生活热水中总大肠菌群的灭活率,可尽量保持较高的水温^[4,16]、较长的消毒时间和较大的银离子投量.

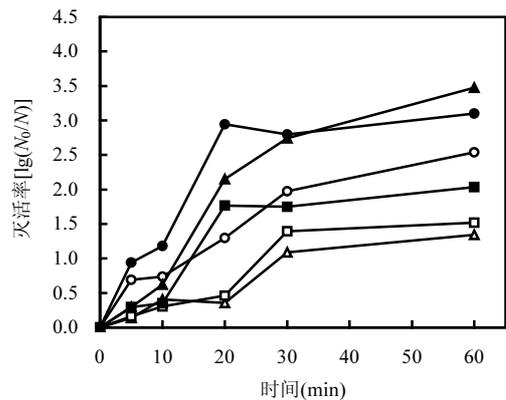


图 2 银离子投量对生物膜微生物灭活率影响

Fig.2 Effect of silver ion dosage on biofilm bacteria inactivation

Legend for Figure 2:
 ○ 0.02mg/L 细菌总数 ● 0.05mg/L 细菌总数
 △ 0.02mg/L 总大肠菌群 ▲ 0.05mg/L 总大肠菌群
 □ 0.02mg/L HPC ■ 0.05mg/L HPC

由图 2 的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 灭活率变化趋势可以看出,在消毒 0~10min 时,微生物灭活率均在较低的 0.2~1.2lg 范围;0.05mg/L 银离子消毒 10min 后,微生物灭活率开始显著增加,消毒 20min 后灭活率出现较平缓增长的趋势;而 0.02mg/L 银离子消毒 20min 后灭活率才开始显著增加,在消毒 30min 后灭活率才出现较平缓增长的趋势;可见较低投量银离子需要更长的消毒时间,保证足够的消毒时间和 CT 值是非常必要的.

2.1.2 银离子持续消毒作用 投加银离子消毒前生物膜上细菌总数、总大肠菌群和 HPC 分别为 2.7×10^5 、 3.3×10^4 和 5.8×10^6 cfu/cm²,完全灭活的灭活率分别为 5.43lg、4.52lg 和 6.76lg.由图 3 可以看出,在消毒 0~12h 时,微生物灭活率均呈持续增

加趋势,并且 0.05mg/L 银离子的微生物灭活率始终好于 0.02mg/L 的;在消毒 12h 时,0.02mg/L 和 0.05mg/L 银离子的微生物灭活率均达到了最高水平,细菌总数和总大肠菌群均完全灭活,HPC 灭活率分别为 2.92lg 和 3.03lg.在消毒 12~48h 时,微生物的灭活率基本处于平稳或稍有下降的趋势,可见银离子具有很好的持续消毒效果,银离子的衰减速率很低^[4].在消毒 72h 时 0.02mg/L 银离子的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 的灭活率分别为 0.27lg、0.22lg 和 1.38lg,微生物灭活率呈现较显著的降低趋势,而 0.05mg/L 银离子的灭活率分别为 3.83lg、4.52lg 和 3.34lg,仍可保持较高效的微生物灭活率,可见高投量银离子的持续消毒效能更佳.

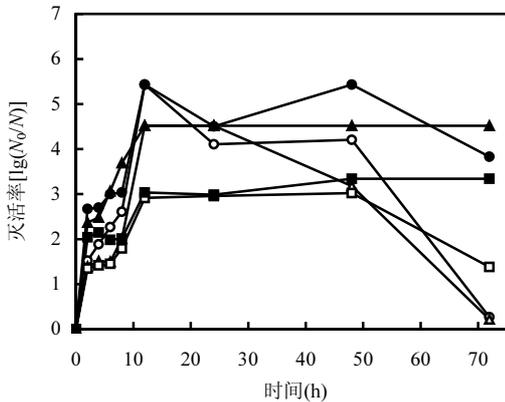


图3 银离子投量对生物膜持续灭活效果影响
Fig.3 Effect of silver ion concentration on sustained inactivation of biofilm bacteria

从上述结果可以看出,银离子对生活热水生物膜微生物的消毒作用可持续增加至 12h,银离子的衰减速率很低,可长时间维持消毒作用,并且在消毒时间足够长的条件下,不同银离子投量可以达到相近的微生物灭活效果,基本不受银离子浓度影响.生活热水系统具有水力停留时间长特点,有助于低投量银离子达到较高投量的灭活效果,充分发挥银离子的持续消毒作用,可以有效保障生活热水系统的生物安全性.

2.2 银离子-紫外线联合消毒效能

紫外线消毒、银离子消毒和银离子-紫外线联合消毒对生物膜微生物的灭活效果由图 4 所示,消毒前生物膜上细菌总数、总大肠菌群和 HPC 分别为 7.50×10^4 、 1.06×10^4 和 1.12×10^6 cfu/ cm^2 ,完全灭活的灭活率分别为 4.88lg、4.03lg 和 6.05lg.

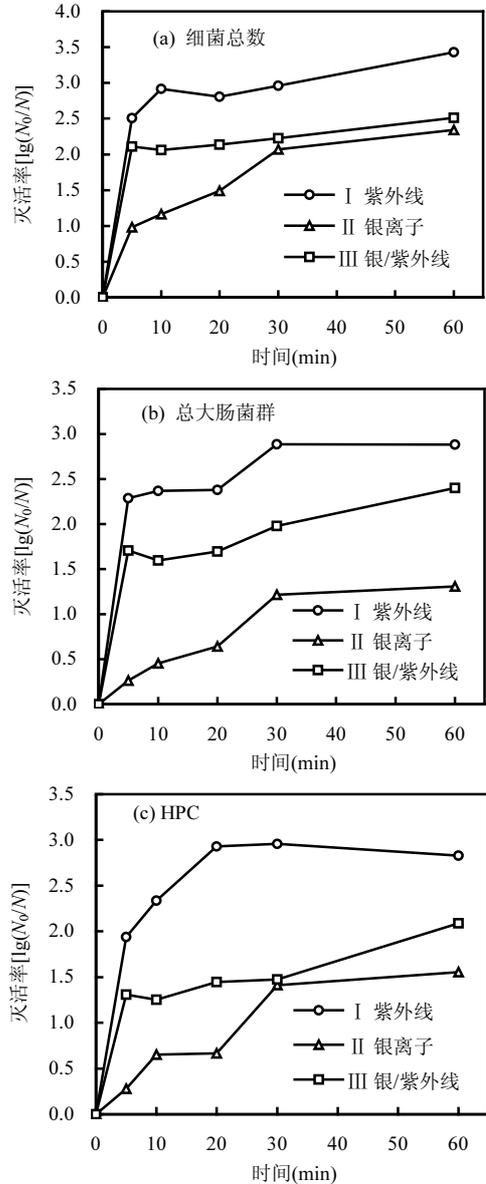


图4 生物膜微生物灭活效能
Fig.4 Inactivation efficiency of biofilm bacteria

从图 4(a)~(c)紫外线消毒的灭活率中可以看到,在消毒 0~5min 时紫外线消毒的灭活率增加

较快,均在 1.9~2.5lg 范围;在消毒 5~60min 时灭活率明显减缓,在消毒 60min 时紫外线的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 灭活率分别达到 3.43lg、2.88lg 和 2.83lg。可见,紫外线消毒的作用快速,在较短时间内即可产生显著的灭活效果。

由图 4 可看出,在 3 种消毒方式中,0.02mg/L 银离子在消毒 0~5min 时的微生物灭活率最低,在消毒 5~30min 时银离子的灭活率的变化最大,在消毒 30~60min 时灭活率呈现平缓增加的趋势,此时细菌总数、总大肠菌群和 HPC 灭活率平均达 2.20lg、1.26lg 和 1.48lg。

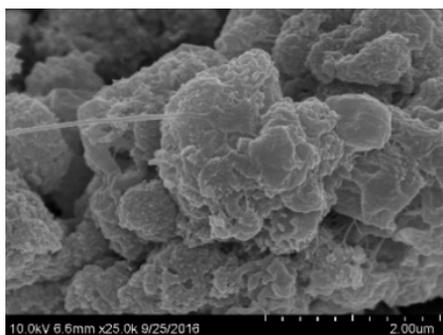
在实际生活热水系统中,紫外线消毒装置一般安装在固定位置,对生活热水的消毒时间较短,因此在银离子-紫外线联合消毒中采用紫外线消毒时间为 1min。在消毒 0~5min 时银离子-紫外线联合消毒的微生物灭活率增加较快,在消毒 5~60min 时灭活率明显减缓,在消毒 60min 时细菌总数、总大肠菌群和 HPC 的灭活率分别为 2.51lg、2.40lg 和 2.09lg,比银离子消毒灭活率分别高出 0.17lg、1.09lg 和 0.53lg。可见,银离子-紫外线联合消毒的总大肠菌群灭活率比银离子消毒的有了显著提高,细菌总数和 HPC 灭活率比银离子消毒提高幅度较小,因此银离子-紫外线联合消毒能有效改善低剂量银离子消毒对总大肠菌群灭活效能。

2.3 生物膜表面形态变化特征

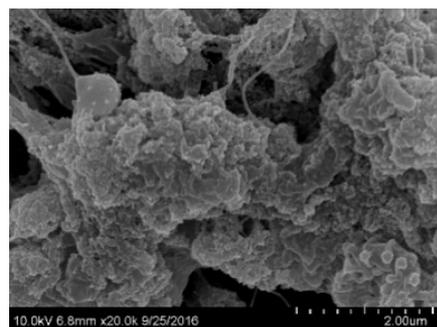
生物膜表面形态对微生物的附着过程和营养物质的传递过程会产生重要影响^[17]。消毒剂可造成生物膜结构破坏,改变生物膜表面官能团的种类,影响生物膜的表面形态,使得生物膜出现脱落现象。图 5 所示为消毒前和紫外线消毒、银离子

消毒和银离子-紫外线联合消毒后挂片的生物膜表面形态。可以看出,消毒前的生物膜由较厚实和致密的块状结构组成,块状结构表面圆滑饱满。经紫外线消毒后,生物膜萎缩变成小块状结构,生物膜表面粗糙,结构较乱但仍比较密实,只有局部出现孔洞,可见紫外线对生物膜的破坏程度较小,生物膜脱落现象不明显。银离子消毒后造成了较显著的生物膜脱落现象,挂片表面已有部分裸露,生物膜呈离散的小块状结构,并出现较多丝网状结构,尽管生物膜已经较为疏松,但表面仍较平滑,萎缩现象不明显。银离子-紫外线联合消毒对生物膜结构的破坏程度最大,造成更严重的生物膜脱落现象,挂片表面已大量裸露,生物膜呈显著离散的小块状结构,出现部分网状结构,生物膜更为疏松,但块状表面更显平滑、边缘更明晰,生物膜深层也出现了萎缩现象。

从生物膜的表现形态看,紫外线消毒更多的是对生物膜表面的微生物灭活,没有对生物膜深层产生显著的破坏,生物膜仍呈现较为完整的形态。银离子消毒对生物膜的深层产生了显著破坏,生物膜整体出现了明显的裂痕和脱落现象。银离子-紫外线联合消毒时,紫外线可以照射到生物膜深层,则对生物膜整体造成了更大程度的破坏,生物膜脱落程度更大。紫外线消毒是直接破坏微生物的 DNA,阻止蛋白质合成而使细菌不能繁殖^[18],对微生物细胞膜基本没有破坏,这可能是紫外线消毒生物膜不易脱落的原因,而银离子消毒可破坏微生物的表面结构,易造成生物膜脱落。可见,银离子-紫外线联合消毒对管壁生物膜的破坏和去除是最有效的。



未消毒



紫外线消毒

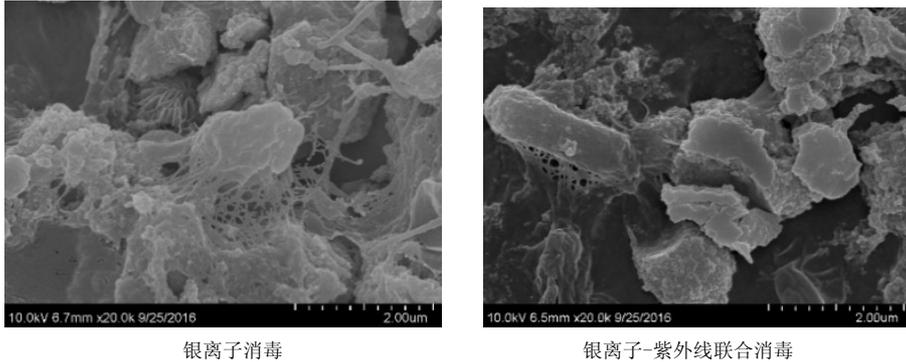


图5 消毒前后生物膜表面形态(×20000)

Fig.5 SEM of biofilm (×20000)

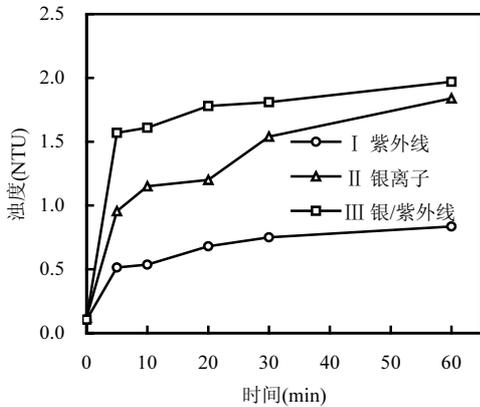


图6 消毒对生物膜脱落的影响

Fig.6 Effect of disinfection on biofilm abscission

生物膜脱落会造成水中浊度的增加,生物膜脱落程度也可以通过水的浊度变化看出来,图6为3种消毒方式的水中浊度变化情况.可以看出,在消毒0~5min时紫外线消毒、银离子消毒和银离子-紫外线联合消毒的水中浊度均迅速增加,在消毒5min时浊度分别由0.102NTU、0.120NTU和0.105NTU增加至0.514NTU、0.955NTU和1.57NTU,表明有大量生物脱落;在消毒5~60min时浊度增加趋势明显减缓,消毒60min时浊度可分别达到0.836NTU、1.84NTU和1.97NTU,与消毒5min时的浊度相比增加幅度很小.可见紫外线消毒、银离子消毒和银离子-紫外线联合消毒对生物膜结构的破坏以及生物膜的脱落主要出现在消毒的0~5min内,其中紫外消毒的生物膜脱落程度最小,银离子-紫外线联合消毒的生物膜

脱落程度相对最大,浊度变化程度与图5的生物膜表面形态变化程度的结果是一致的.

2.4 生物膜细菌菌群变化特征

对消毒前后生物膜细菌菌群进行了16s rDNA测序分析,结果如图7所示.可以看出,消毒前生物膜中的变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、酸杆菌门(Acidobacteria)和浮霉菌门(Planctomycetes)所占比例较高,分别为30.73%、28.66%、14.28%和11.78%,芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、装甲菌门(Armatimonadetes)、硝化螺菌属(Nitrospirae)和疣微菌门(verrucomicrobia)所占比例较少,分别为3.06%、2.78%、2.25%、2.2%、1.44%和1.34%,其余各种菌门所占的比例均小于1.0%;可知变形菌门和厚壁菌门所占比例远高于其他菌门,为主要优势菌群.与相同条件下二次供水生物膜的微生物种群的对比可以看出^[9],生活热水生物膜中变形菌门数量要多9.13个百分点,酸杆菌门、芽单胞菌门、绿弯菌门、装甲菌门、硝化螺菌属和疣微菌门的数量也较多,而二次供水中几乎没有;生活热水中古菌门和泉古菌门含量极少,二次供水中所占比例较高,为6.84%和1.10%;生活热水中拟杆菌门数量较少,比二次供水的低15.41个百分点.

生活热水生物膜中的变形菌门主要为 α 变形菌、 β 变形菌、 γ 变形菌和 δ 变形菌,所占比例分别为13.4%、7.26%、5.39%和4.54%;其中 α 变形菌和 β 变形菌可利用自身胞外酶,将大分子

有机污染物降解为水溶性低分子的氨基酸、单糖及无机酸等^[20-21]; γ 变形菌主要为大肠杆菌、沙氏门菌等可致病的病原菌. 厚壁菌门是一类肠道菌, 会影响人体健康^[22]. 硝化螺菌属属于亚硝酸盐氧

化菌(NO₂), 具有脱氮功能^[23]. 可见, 生活热水管壁生物膜中具有多种菌类, 其中病原菌可对人体健康产生威胁, 其它种属细菌也存在致病风险, 尤其是对敏感人群.

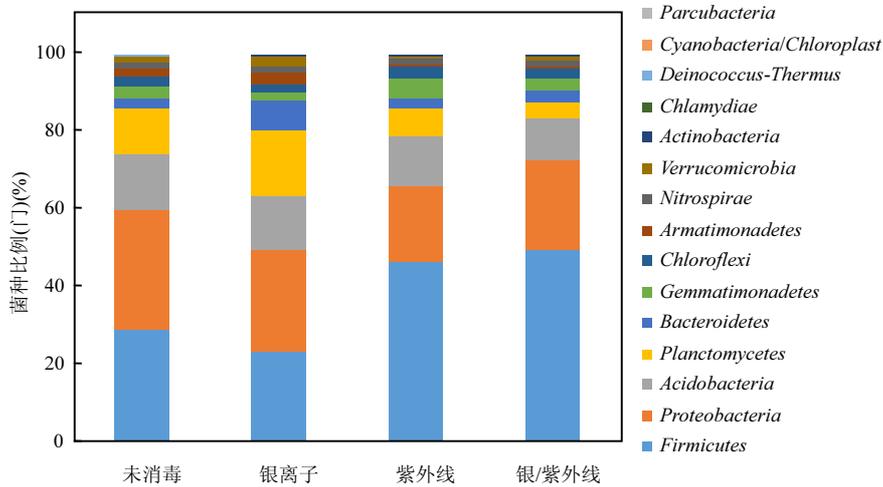


图 7 生物膜菌种组成

Fig.7 Barplot of Bacterial Phylum on biofilm

消毒后的生活热水生物膜细菌种群比例发生了较大程度变化. 银离子消毒后生物膜中的厚壁菌门和变形菌门所占比例分别减少至 23.26% 和 26.11%, 其中变形菌门中 α 变形菌、 β 变形菌和 δ 变形菌分别减少至 10.45%、5.99% 和 4.01%, 而 γ 变形菌由 5.39% 增加至 5.49%, 说明变形菌门中主要灭活的是 α 变形菌和 β 变形菌, 病原菌 γ 变形菌的灭活程度相对较低. 紫外线消毒后生物膜的变形菌门和浮霉菌门所占比例分别减少至 19.57% 和 7.01%, 厚壁菌门比例增加至 45.91%, 成为优势菌群. 紫外线消毒中 α 变形菌、 β 变形菌、 γ 变形菌和 δ 变形菌分别减少至 8.76%、4.01%、4.33% 和 2.37%, 说明紫外线灭活 γ 变形菌的效果相对更好一些. 银离子-紫外线联合消毒后生物膜的变形菌门、浮霉菌门和酸杆菌门所占比例分别减少至 22.97%、4.15% 和 10.65%, 厚壁菌门比例增加至 49.16%, 成为优势菌群. 银离子-紫外线联合消毒后 α 变形菌、 β 变形菌、 γ 变形菌和 δ 变形菌分别减少至 9.35%、5.73%、4.45% 和 3.34%, γ 变形菌比例也相对有所降低.

从上述检测结果可看出, 生活热水生物膜的微生物种群具有生物多样性, 存在一定数量的病原微生物; 消毒可以在不同程度上杀灭多种微生物, 但对病原微生物的灭活程度有所差异; 银离子对病原微生物的灭活程度相对较低, 紫外线消毒和银离子-紫外线联合消毒对病原微生物的灭活程度相对较高.

3 结论

3.1 银离子投量对微生物灭活效能有显著影响, 0.05mg/L 银离子消毒 60min 时的细菌总数、总大肠菌群和 HPC 灭活率可分别达到 3.10lg、3.47lg 和 2.04lg, 具有极佳的微生物灭活效果. 银离子的总大肠菌群灭活速率较低, 需要适度提高银离子投量或延长消毒时间, 保证充分的 CT 值.

3.2 银离子对生活热水生物膜的灭活作用可持续增加达 12h, 而且银离子浓度的衰减速率很低, 在 48h 内均可保持高效的微生物灭活效能. 生活热水系统的水力停留时间长, 有助于充分发挥银离子持续消毒作用; 在消毒时间足够长

的条件下,不同银离子浓度可以达到相近的微生物灭活效果.

3.3 紫外线、银离子和银离子-紫外线 3 种消毒方式均可在消毒 0~5min 内对生物膜结构造成显著破坏,出现生物膜脱落现象;紫外线消毒时生物膜表面仍较为完整但明显发生萎缩,银离子消毒时生物膜出现较明显的裂痕和脱落现象,银离子-紫外线联合消毒时生物膜出现深层裂痕、破碎现象,管壁部分裸露,对生物膜的破坏和脱落影响最显著、最有效.

3.4 生活热水管壁生物膜中的微生物种群具有生物多样性,其中的病原菌可对人体健康产生威胁,其他菌属也有潜在的致病风险.3 种消毒方式可以在不同程度上杀灭多种微生物,但对病原微生物的灭活程度有所差异,银离子消毒的病原微生物灭活程度相对较低,紫外线消毒、银离子-紫外线消毒的病原微生物灭活程度相对较高.银离子-紫外线联合消毒可以显著改善总大肠菌群灭活率,全面提高生物膜微生物的消毒效能,是一种有应用价值的高效的生活热水消毒技术.

参考文献:

- [1] 姜文源.建筑给排水技术现状及发展趋向 [J]. 给水排水, 2007,33(z2):5-17.
- [2] 刘成,曾德才,高育明,等.二次供水突发水污染事件案例分析 [J]. 环境卫生学杂志, 2014,4(5):461-463.
- [3] 邓光蔚,燕达,安晶晶,等.住宅集中生活热水系统现状调研及能耗模型研究 [J]. 给水排水, 2014,40(7):149-157.
- [4] 李雨婷.建筑生活热水安全消毒技术研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2016.
- [5] Chemuliti J K, Gathura P B, Kyule M M, et al. Bacteriological qualities of indoor and out-door drinking water in Kibera sub-location of Nairobi, Kenya [J]. East Afr Med J, 2002,79(5): 271-273.
- [6] 马颖,龙腾锐,方振东.饮用水生物稳定性的评价体系 [J]. 中国给水排水, 2004,20(12):96-98.
- [7] 周玲玲,刘文君,张永吉.模拟给水管网中管壁生物膜生成特性 [J]. 中国环境科学, 2008,28(1):83-86.
- [8] 李雨婷,李星,赵铨,等.北京地区建筑二次供水水质检测 [C]//中国建筑学会建筑给水排水研究分会第二届第二次全体会员大会暨学术交流会,无锡, 2014:219-224.
- [9] 于世明,金玲,高一凡,等.沈阳市生活饮用水细菌学指标检测分析 [J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2010,(1):72-74.
- [10] Silvestry-Rodríguez N, Bright K R, Slack D C, et al. Silver as a Residual Disinfectant To Prevent Biofilm Formation in Water Distribution Systems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008,74(5):1639-1641.
- [11] Birla S S, Tiwari V V, Gade A K, et al. Fabrication of silver nanoparticles by *Phoma glomerata* and its combined effect against *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* [J]. Letters in Applied Microbiology, 2009,48(2):173-179.
- [12] 沈晨,赵铨,傅文华,等.公共场所沐浴水中军团菌杀灭技术的研究与进展 [J]. 给水排水, 2012,38(8):121-125.
- [13] 潘立博,胡日新,王靖宇,等.硝酸银与传统抗生素对常见细菌和真菌的杀菌能力比较 [J]. 实验动物科学, 2014,31(4):41-45.
- [14] 沈晨.生活热水银离子消毒技术研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [15] 李宗军.大肠杆菌生长温度、膜脂肪酸组成和压力抗性之间的关系 [J]. 微生物学报, 2005,45(3):426-430.
- [16] 王书杰,张宇.银离子消毒剂的杀菌作用、机制、影响因素及应用 [J]. 中国感染控制杂志, 2007,6(3):214-216.
- [17] 相坤.氧化剂对原水输水管道生物作用的影响研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2015.
- [18] 孙雯.紫外线消毒对水中微生物灭活及生物稳定性研究 [D]. 青岛:青岛理工大学, 2009.
- [19] 王帅,杨艳玲,李星,等.氯和氯胺冲击消毒对二次供水管道生物膜的控制作用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017,49(8):1-7.
- [20] 张斌,孙宝盛,刘慧娜,等.处理不同废水 MBR 系统中微生物群落结构的比较 [J]. 环境科学, 2008,29(10):2944-2949.
- [21] 祝泽兵.供水管网中的耐氯菌群及其耐氯机制研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [22] 韩岗,马婧,陶士珩,等.厚壁菌门细菌及其祖先蛋白的氨基酸偏好性研究 [J]. 安徽农业科学, 2011,39(30):18408-18410.
- [23] Lee H, Lee S, Lee J, et al. Molecular characterization of microbial community in nitrate-removing activated sludge [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002,41(2):85-94.

作者简介: 尚思宏(1992-),女,山东烟台人,北京工业大学建筑工程学院硕士研究生,主要从事饮用水安全研究.