



文章栏目:水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201810033

中图分类号 X832

文献标识码 A

刘炫圻, 宋春刚, 冯萃敏, 等. 紫外线-茶多酚/次氯酸钠联合消毒管网微生物特性分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 616-623.

LIU Xuanqi, SONG Chungang, FENG Cuimin, et al. Analysis of microbial characteristics in pipe network with ultraviolet & tea polyphenols or ultraviolet & sodium hypochlorite combined disinfection[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3): 616-623.

紫外线-茶多酚/次氯酸钠联合消毒管网微生物特性分析

刘炫圻^{1,2}, 宋春刚³, 冯萃敏^{1,2,*}, 田萌⁴, 纪海霞⁴, 张欣蕊⁴, 丁梓沁^{1,2}

1. 北京建筑大学, 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044

2. 北京建筑大学, 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044

3. 北京城建房地产开发有限公司, 北京 100081

4. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082

第一作者: 刘炫圻(1995—), 女, 硕士研究生。研究方向: 饮用水消毒技术。E-mail: liuxuanqi814@126.com

*通信作者: 冯萃敏(1968—), 女, 硕士, 教授。研究方向: 水处理理论与技术。E-mail: feng-cuimin@sohu.com

摘要 紫外线对微生物的杀灭效果较好, 但持续性差, 引入茶多酚作为辅助消毒剂, 采用管网动态模拟系统, 对比了紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒后管网微生物的总量、群落分布和有机物荧光特性变化。结果表明, 紫外线-茶多酚联合消毒对微生物的灭活效果比紫外线-次氯酸钠联合消毒更好, 并且对致病菌和耐氯性细菌也有很强的杀灭能力。紫外线-茶多酚联合消毒后, 酪氨酸类物质荧光和类腐殖酸物质荧光特性产生变化, 说明这2类物质含量大量减少, 可能会影响微生物的生长; 此外, 管壁生物膜中出现了儿茶素、表儿茶素类物质, 这说明茶多酚与管壁微生物发生了相互作用; 紫外线-次氯酸钠联合消毒后酪氨酸类的荧光特征峰发生蓝移, 这说明次氯酸进入微生物内发挥氧化作用。

关键词 紫外线-茶多酚联合消毒; 紫外线-次氯酸钠联合消毒; 管网动态模拟系统; 微生物; 饮用水处理

紫外线消毒具有广谱杀菌性, 可以杀灭细菌、真菌、病毒和芽孢, 但是没有持续性的杀菌效果^[1]。紫外线辐射以后, 针对其对微生物体造成的损伤, 部分微生物能够利用体内酶来进行修复。修复机制一般分为光复活以及暗修复^[2]。但是, 对于实际饮用水处理, 自我修复机制对消毒效果的影响并不大。据研究, 饮用水经紫外线消毒后, 在避光条件下贮存2 h便可防止微生物的光复活^[3]。除此之外, 部分水厂采用紫外线与辅助化学消毒剂联用来杀灭微生物^[4-5]。辅助消毒剂能够有效防止微生物出现光复活。例如, 在紫外线消毒后, 投加 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯可以有效抑制该细菌的光复活; 投加 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 可以在10 min内全部灭活^[6]。

次氯酸钠是一种高效、安全的消毒剂, 操作简单, 可以与水以任意比例互溶, 与氯的消毒效果相

收稿日期: 2018-10-09; 录用日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678026); 北京建筑大学研究生创新项目(PG2018046); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助(X18279)

当。但其稳定性差易分解,且会产生三氯甲烷等消毒副产物^[7-8]。故可以应用紫外线-次氯酸钠联合消毒来延长杀菌时效和降低次氯酸钠的投加量^[9]。

茶多酚是一种绿色、环保植物制剂。有研究表明,茶多酚对细菌杀灭效果很强^[10]。谢寒等^[11]研究证明,针对不同水源投加茶多酚消毒,其消毒效果佳、消毒持续时间久,能够满足水体细菌总数低于100 CFU · mL⁻¹。然而,茶多酚作为唯一消毒剂时投加量较大。其常与臭氧或紫外线消毒相结合,作为辅助消毒剂^[12]。紫外线-茶多酚联合消毒后管网中微生物的变化特性目前尚不明确。本研究采用管网动态模拟系统,探究紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒对管网微生物生长的影响,为紫外线-茶多酚联合消毒工艺的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用国家I试片作为模拟管壁挂片。挂片材质选用球墨铸铁(ductile iron, DI)和硬聚氯乙烯(unplasticized polyvinyl chloride, UPVC),规格为50.0 mm×25.0 mm×2.0 mm、表面积为28.00 cm²、挂孔直径4.0 mm、光洁度为7级。

茶多酚来自绿茶提取物,为粉末状固体,气味微有茶香,颜色呈淡黄色,纯度99.0%。

从城市自来水管网取水,在水箱中放置2~3 d,余氯降至0.01 mg · L⁻¹后作为实验原水。原水水质指标见表1。

表1 原水水质
Table 1 Water quality of raw water

pH	浊度/NTU	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	TOC/(mg · L ⁻¹)	细菌总数/(CFU · mL ⁻¹)	余氯/(mg · L ⁻¹)
7.81	0.49	0.015	2.144	600	0.01

1.2 实验装置

管网动态模拟系统实验装置由原位水箱、紫外灯及水箱、环状生物反应器(biological annular reactor, BAR)、多通道蠕动泵构成,如图1所示。系统采用非循环运行方式。

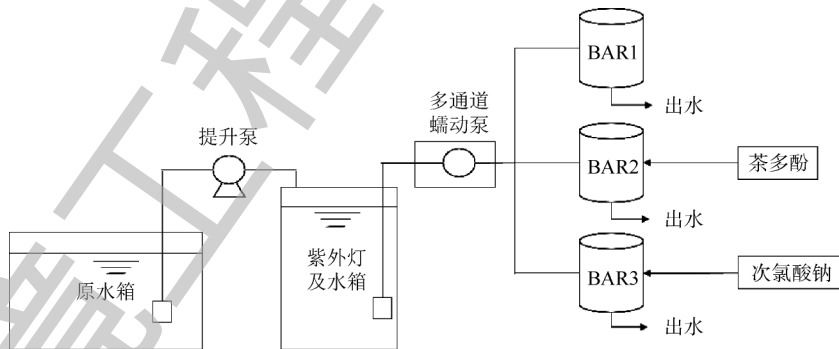


图1 管网动态模拟系统示意图
Fig.1 Dynamic simulation of the pipe network system

BAR罐体由有机玻璃制成,有效容积是6 L,每个反应器内加24个挂片。将反应器罐体用锡纸包裹以避光保温,利用温度感应器和加热棒将水体温度控制在(25±1)℃。实验前对BAR进行灭菌清洗:首先,用10 mg · L⁻¹次氯酸钠溶液将其浸泡1 d;随后,用灭菌纯水来冲洗BAR。装置运行时,原水首先进入装有紫外灯的水箱,经紫外线消毒后,出水通过多通道蠕动泵同时进入6个BAR(3个加球墨铸铁挂片,3个加UPVC挂片)。茶多酚的投加量为75 mg · L⁻¹、次氯酸钠的投加量为2.0 mg · L⁻¹、模拟水力停留时间为6 h时,控制进水流量为1 L · h⁻¹。

1.3 检测方法

模拟管网运行时间共30 d, 每隔3 d, 分别从每个BAR中的相同部位摘取挂片。挂片经超声波(功率为250 W)振荡1 min、停歇1 min, 重复3次, 分离挂片生物膜, 用以表征管壁微生物; 之后, 依照《生活饮用水标准检验方法 微生物指标》(GB/T 5750.12-2006)^[13]中的平皿计数法, 测定挂片生物膜和水中的细菌总数。

提取运行30 d后管网水中的微生物DNA, 检验合格后通过PCR扩增16S rRNA的V3~V4区, 采用Illumina HiSeq2500 PE250高通量测序平台测序, 根据测序结果进行微生物群落结构分析; 挂片上的生物膜分离后, 水样经0.45 μm 滤膜抽滤, 采用Hitachi F-4600荧光光度计进行三维荧光测定。

2 结果与讨论

2.1 管壁与水中微生物总量分析

在紫外线照射剂量 $40 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、茶多酚和次氯酸钠投加量分别为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 管壁微生物量和水中细菌数检测结果分别如图2和图3所示。对模拟球墨铸铁管网和UPVC管网的BAR进行挂片生物量分析表明, 紫外线消毒作为唯一消毒方式时, 球墨铸铁挂片上生物膜单位面积最大生物量随运行时间的延长在增大。运行30 d时高达4.25(单位面积菌落数的对数值, 用来表示绝对生物量); 与其相比, 紫外线-茶多酚联合消毒与紫外线-次氯酸钠联合消毒时, 单位面积最大生物量在运行30 d时分别降低了23%和11%。这说明紫外线-茶多酚在球墨铸铁管网中对微生物的灭活效果和对微生物生长的干扰作用更强。与球墨铸铁管网相比, UPVC管网中, 管壁微生物量变化呈现类似的规律, 但因UP-

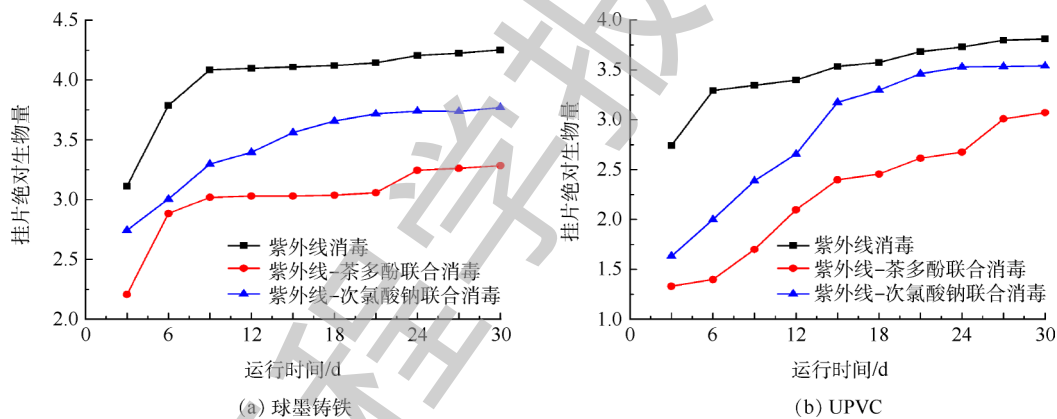


图2 不同消毒方式下模拟球墨铸铁和UPVC管网中管壁微生物量

Fig.2 Microbial biomass on the pipe wall of the simulated DI and UPVC pipe networks under different disinfection methods

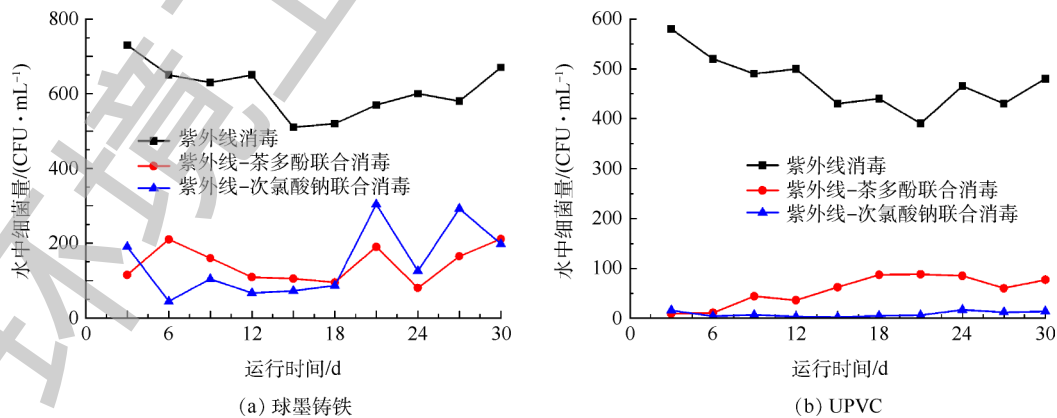


图3 不同消毒方式下模拟球墨铸铁和UPVC管网水中细菌量

Fig.3 Bacteria in water flowing in the simulated DI and UPVC pipe networks under different disinfection methods

VC管道内壁粗糙系数较小,生物附着性较差,管壁微生物量绝对数值低于球墨铸铁管网。

对模拟球墨铸铁管网和UPVC管网的BAR进行水中细菌数分析。结果表明,紫外线作为唯一消毒方式时,水中细菌量在运行30 d内的平均值为 $611\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$,均超过了 $100\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$;球墨铸铁管网水中的细菌数,经紫外线-茶多酚联合消毒后,高于 $100\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的频率为80%,经紫外线-次氯酸钠联合消毒后则为60%。原水进入UPVC模拟管网,经联合消毒后水中细菌数在运行30 d内均未高于 $100\text{ CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。由此可见,紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒对控制水中微生物量均有较好的效果;然而与UPVC管网相比,在球墨铸铁管网中紫外线-茶多酚联合消毒效果略差。这主要是由于球墨铸铁管网内壁粗糙度大以及铁离子释放与酚羟基发生络合的影响^[4]。

综上所述,在球墨铸铁管网和UPVC管网中,紫外线-茶多酚和紫外线-次氯酸钠联合消毒均有较好的消毒效果;紫外线-茶多酚联合消毒对于管壁微生物的灭活效果更好,但是对于球墨铸铁管网水中的细菌灭活效果略差于紫外线-次氯酸钠联合消毒。

2.2 水中微生物群落分析

以UPVC管材为例,紫外线消毒、紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒后管网水中菌群在门、纲和属水平上的种类分布分别见表2、表3和表4。由表2可见,在门水平上,水中菌群均以变形菌为主,均高达75%以上;紫外线-茶多酚联合消毒时拟杆菌门仅占总菌的0.73%;与紫外线-茶多酚联合消毒相比,紫外线-次氯酸钠联合消毒时拟杆菌门略高;但紫外线作为唯一消毒方式时,拟杆菌门占总菌比重的10.91%,是仅次于变形菌门的第2大类菌类。这说明,联合消毒时外加的化学消毒剂对控制水中拟杆菌门有重要意义,茶多酚的作用尤为明显。紫外线-茶多酚联合消毒时,硝化螺旋菌门占总菌的0.70%,低于紫外线消毒时硝化螺旋菌门的比重;与其相比,紫外线-次氯酸钠联合消毒时,硝化螺旋菌门占总菌的6.68%,比重反而有所上升,是仅次于变形菌门的第2大菌类。这是因为,硝化螺旋菌门中部分细菌有耐氯性^[5]。由此可见,在门水平上,紫外线消毒、紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒后,水中优势菌群均是变形菌门;而紫外线-茶多酚联合消毒对门水平上其他菌群的杀灭效果(剩余菌群的占比分别不足1%)则优于紫外线-次氯酸钠联合消毒。

由表3可见,在纲水平上,水中菌群虽然均以变形菌为主,但优势种群并不相同。紫外线-茶多酚联合消毒时, α -变形菌纲明显成为绝对优势菌群,占总菌的90.80%;与其相比,紫外线-次氯酸钠联合消毒时, α -变形菌纲、 β -变形菌纲均为优势种群,分别占总菌的34.51%与30.32%。这表明,紫外线-茶多酚联合消毒对 β -变形菌纲的杀灭效果更强。紫外线-茶多酚联合消毒时对放线菌纲、鞘脂杆菌纲等均有较强杀灭作用,与紫外线作为唯一消毒剂时相比剩余比重均有所降低;而紫外线-次

表2 不同消毒方式下门水平主要菌群种类所占比重
Table 2 Proportion of the main species in samples at phylum level under different disinfection methods %

菌群种类	紫外线消毒	紫外线-茶多酚联合消毒	紫外线-次氯酸钠联合消毒
变形菌门	78.51	96.70	88.69
拟杆菌门	10.91	0.73	1.52
硝化螺旋菌门	4.44	0.70	6.68
蓝藻菌门	2.47	0.27	0.95
绿弯菌门	0.38	0.78	0.46
浮霉菌门	1.52	0.02	0.65

表3 不同消毒方式下纲水平主要菌群种类所占比重
Table 3 Proportion of the main species in samples at class level under different disinfection methods %

菌群种类	紫外线消毒	紫外线-茶多酚联合消毒	紫外线-次氯酸钠联合消毒
α -变形菌纲	60.15	90.80	34.51
β -变形菌纲	15.38	2.56	30.32
γ -变形菌纲	2.49	2.92	22.35
放线菌纲	4.18	0.29	6.35
鞘脂杆菌纲	8.65	0.52	0.48
纤维粘网菌纲	0.48	0.06	0.70
黄杆菌纲	1.72	0.08	0.31
酸杆菌纲	0.22	0.04	0.11

氯酸钠联合消毒后水中 β -变形菌纲、 γ -变形菌纲、放线菌纲所占比重分别为30.32%、22.35%、6.35%，均高于另外2种消毒方式，可见这3类菌对氯有较强的抵抗作用。这可能与细菌的细胞膜和细胞壁结构有关。有研究表明，细菌细胞膜上的脂多糖层高度疏水性，可以抵抗亲水性的消毒剂^[16]。综上分析可知，在纲水平上紫外线-茶多酚联合消毒对大多数环境常见的微生物有独特的杀灭效果；对部分耐氯菌的杀灭能力更是明显优于紫外线-次氯酸钠联合消毒。

由表3可见，在属水平上不同消毒方式下水中的优势种群出现较大差别。紫外线消毒、紫外线-茶多酚联合消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒时，水中的优势种群分别为慢性根瘤菌属、黄色杆菌属和假单胞菌属；紫外线-次氯酸钠联合消毒下假单胞菌属、食酸菌属和分枝杆菌属的所占比重分别为20.62%、5.29%、5.04%，均高于另两种消毒方式下的比重，而这3种菌既是耐氯菌也是致病菌，有可能对饮用水安全造成威胁^[17]；与此相比，紫外线-茶多酚联合消毒后，这3种菌的占比均不足1%。这说明紫外线-茶多酚联合消毒对致病菌及耐氯菌有较强的杀灭效果^[18]。

在门、纲和属水平上，虽然不同的消毒方式下微生物的种群分布有较大差异；但是紫外线-茶多酚联合消毒对大多数微生物的杀灭效果均明显优于紫外线-次氯酸钠联合消毒；并且对耐氯性细菌、粪便中主要的微生物拟杆菌门和致病菌等有很强的杀灭作用。

2.3 管壁生物膜内有机物荧光特性分析

运用荧光光谱能够表征有机物的物理化学性质。三维荧光光谱(3DEEM)选择性高、灵敏度强、信息大，并且不破坏样品结构^[17]，能给出激发波长与发射波长一起变化的荧光强度，揭示出水中有机物分类。有研究表明，紫外线与其他消毒剂联用消毒后管网中主要的荧光类有机物有5类^[19]，这5类有机物的激发/发射($\lambda_{ex}/\lambda_{em}$)荧光区域划分归纳见表5。

生物膜是管壁微生物复合体，主要由4部分组成：菌体、菌体分泌物、菌体自溶物和源自周围环境的有机物^[20]。管网系统经过消毒剂攻击后，生物膜内微生物及有机物种类有所改变。采用三维荧光光谱技术，对比分析管壁生物膜内有机物的组成和含量的变化，探究紫外线-茶多酚联合消毒与紫外线-次氯酸钠联合消毒对管壁微生物生长的影响。不同消毒方式下管壁生物膜的荧光变化如图4所示。对比图4中的3张光谱图可发现，管壁生物膜中均含有酪氨酸类物质(特征峰A)、类富里酸物质(特征峰C)和微生物代谢产物(特征峰T)。但是，不同消毒方式下特征峰的荧光强度不同，即有机物的含量发生了变化。紫外线-茶多酚联合消毒时特征峰A的荧光强度与紫外线消毒时相比降低了82.36%。这说明生物膜中酪氨酸类物质的含量减少，这很可能是因为茶多酚的酚羟基、苯环结构与酪氨酸类的蛋白质通过氢键或疏水性结合^[21]，破坏了这类蛋白质的结构。NI等^[22]研究发现，酪氨酸类蛋白质的荧光特性可作为表征生物量的指标。因此，紫外线-茶多酚联合消毒时，酪氨酸类物质荧光减弱可能说明管壁的微生物量也减少了。紫外线-茶多酚联合消毒的光谱中出现了2个特征峰C₁和C₂。这说

表4 不同消毒方式下属水平主要菌群种类所占比重
Table 4 Proportion of the main species in samples at genus level under different disinfection methods %

菌群种类	紫外线消毒	紫外线-茶多酚联合消毒	紫外线-次氯酸钠联合消毒
根瘤菌属	1.90	28.47	2.60
黄色杆菌属	1.51	35.27	1.44
慢性根瘤菌属	17.07	1.03	0.81
假单胞菌属	0.65	0.86	20.62
食酸菌属	1.11	0.16	5.29
分枝杆菌属	1.62	0.14	5.04
鞘脂菌属	0.20	0.04	1.93

表5 三维荧光光谱区域划分
Table 5 Regional division of three dimensional fluorescence spectra

区域	($\lambda_{ex}/\lambda_{em}$)/nm	有机物种类
I	(220~250)/(280~330)	酪氨酸类荧光基团
II	(220~250)/(330~380)	色氨酸类荧光基团
III	(230~280)/(380~500)	类富里酸
IV	(250~370)/(300~380)	溶解性微生物产物
V	(280~400)/(380~500)	类腐殖酸

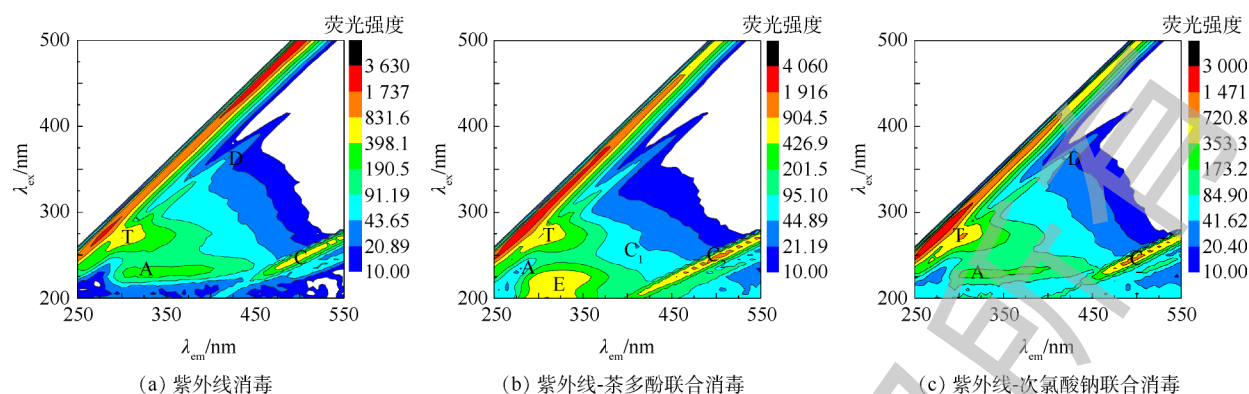


图4 不同消毒方式下管壁生物膜的三维荧光光谱等高线图

Fig.4 Contour map of three dimensional fluorescence spectra of biofilm on the pipe wall under different disinfection methods

明生物膜存在丰富的类富里酸物质,与紫外线消毒相比,荧光强度有所增大,很可能是因为部分类蛋白质在降解过程中被转化为类富里酸^[23]。

与紫外线消毒相比,紫外线-次氯酸钠联合消毒时特征峰A和C均发生蓝移。据研究表明,蓝移和氧化作用与结构发生改变有紧密联系^[24]。例如,稠环芳烃分解成小分子,共轭基团、芳香环等数目变少,氨基、羰基与羟基等官能团消失^[25]。这与次氯酸进入微生物内发挥其氧化性相吻合。但由于有些微生物能抵抗消毒剂侵入,导致进入管壁生物膜的消毒剂有限,故而荧光强度并未发生很大变化。

紫外线消毒和紫外线-次氯酸钠联合消毒后的管壁生物膜中均含有类腐殖酸物质(特征峰D)。这类物质为天然水体中有机物的主要组分^[26]。生物膜中之所以存在腐殖质,有可能吸附了周围水体中的有机物。然而,紫外线-茶多酚联合消毒后没有类腐殖酸的荧光特征峰。这有可能是茶多酚分解了类腐殖酸。而且,紫外线-茶多酚联合消毒后出现了一个新的荧光特征峰E,表明有机物的组成发生了变化。特征峰E的 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 为220 nm/325 nm,荧光强度为818.4,该峰位代表的是儿茶素、表儿茶素类物质^[27]。这说明管壁生物膜内含有茶多酚,茶多酚与微生物发生了相互作用。

综上所述,与紫外线作为唯一消毒剂时相比,紫外线-茶多酚联合消毒时生物膜内有机物的含量和组成均发生变化;茶多酚很可能破坏了酪氨酸类蛋白质和降解类腐殖酸,进而影响管壁微生物的生长;此外,紫外线-茶多酚消毒后生物膜含有儿茶素、表儿茶素类,这说明茶多酚与管壁微生物发生了相互作用;紫外线-次氯酸钠联合消毒时有机物的含量变化不大,但是特征峰发生蓝移,这说明次氯酸改变了酪氨酸类和类富里酸物质的结构。

3 结论

1) 紫外线-茶多酚联合消毒对管壁微生物的灭活效果优于紫外线-氯联合消毒,并且可以明显干扰微生物的生长。这2种不同联合消毒方式对控制UPVC管网水中的微生物均有良好的效果,30 d内细菌总数超过 $100 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 出现的频率均为0。

2) 在门、纲和属水平上,2种联合消毒方式下水中微生物的优势种群大致相同,但其他种群分布差别极大。紫外线-茶多酚联合消毒对大多数环境常见的微生物种群的杀灭效果明显优于紫外线-次氯酸钠联合消毒,且对致病菌和耐氯性细菌也有很强的杀灭能力。

3) 管壁生物膜中出现了儿茶素、表儿茶素类物质,这说明茶多酚与管壁微生物发生了相互作用;紫外线-次氯酸钠联合消毒后酪氨酸类的荧光特征峰发生蓝移,这说明次氯酸进入微生物内发挥氧化作用。

参考文献

- [1] TRAN T, RACZ L A, GRIMAILA M R, et al. Comparison of continuous versus pulsed ultraviolet light emitting diode use for the inactivation of *Bacillus globigii* spores[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(9): 1473-1480.
- [2] KNUDSON G B. Photoreactivation of UV-irradiated *Legionella pneumophila* and other *Legionella* species[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1985, 49(4): 975-980.
- [3] 徐丽梅, 许鹏程, 张崇森, 等. 紫外线消毒对大肠杆菌的损伤及复苏的研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2639-2645.
- [4] 王昊, 沈小红. 高原地区某净水厂紫外线/氯消毒联用系统设计探讨[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 32-36.
- [5] 朱昱, 陈卫国. “紫外线+氯”联合消毒技术用于十堰市第三水厂工程[J]. 中国给水排水, 2013, 29(18): 56-59.
- [6] 刘喜坤, 王晓, 陈红娟, 等. 再生水紫外线/二氧化氯联合消毒效果实验研究[J]. 环境工程, 2017, 35(5): 40-43.
- [7] 陈丽珠. 次氯酸钠消毒控制微生物的效果评价[J]. 工业用水与废水, 2015, 46(5): 18-20.
- [8] 郑晓英, 王靖宇, 李魁晓, 等. 次氯酸钠、臭氧及其组合再生水消毒技术研究[J]. 环境工程, 2017, 35(11): 23-27.
- [9] WANG X, HU X, WANG H, et al. Synergistic effect of the sequential use of UV irradiation and chlorine to disinfect reclaimed water[J]. Water Research, 2012, 46(4): 1225-1232.
- [10] ARAGHIZADEH A, KOHANTEB J, FANI M M. Inhibitory activity of green tea (*Camellia sinensis*) extract on some clinically isolated cariogenic and periodontopathic bacteria[J]. Medical Principles and Practice, 2013, 22(4): 368-372.
- [11] 谢寒, 冯萃敏, 黄华, 等. 3种植物多酚消毒效果与消毒持续性研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(8): 72-75.
- [12] 冯萃敏, 李莹, 张刃, 等. 茶多酚作为饮用水辅助消毒剂的实验研究[J]. 城镇供水, 2010(1): 35-37.
- [13] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法 微生物指标: GB/T 5750. 12-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] LIAO C L, ZHOU Y W, ZHOU K, et al. Inhibitory effect of tea polyphenols and metal ions on spoilage organisms and pathogens of meat origin[J]. Food Science & Technology, 2015, 40(1): 292-295.
- [15] MA Z, YANG Y, LIAN X, et al. Identification of nitrate sources in groundwater using a stable isotope and 3DEEM in a landfill in Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 563-564: 593-599.
- [16] CLOETE T E. Resistance mechanisms of bacteria to antimicrobial compounds[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2003, 51(4): 277-282.
- [17] 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.
- [18] 冯萃敏, 杨童童, 王晓彤, 等. 饮用水消毒中茶多酚抑菌机理的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(4): 6-11.
- [19] 池年平. UV-氯基消毒剂联合消毒管网水质生物稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- [20] 周玲玲. 给水管中细菌生长及生物膜特性实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2006.
- [21] SHI C, TANG H, XIAO J, et al. Small-angle X-ray scattering study of protein complexes with tea polyphenols[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2017, 65(3): 656-665.
- [22] NI B J, FANG F, XIE W M, et al. Characterization of extracellular polymeric substances produced by mixed microorganisms in activated sludge with gel-permeating chromatography, excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy measurement and kinetic modeling[J]. Water Research, 2009, 43(5): 1350-1358.
- [23] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 475-482.
- [24] 穆永杰, 叶杰旭, 孙德智. 臭氧深度处理垃圾焚烧厂沥滤液时溶解性有机质(DOM)特性分析[J]. 环境化学, 2012, 31

(11): 1711-1716.

[25] 蔡伟娜, 何磊. 污泥龄对膜生物反应器中溶解性荧光物质特性的影响[J]. 净水技术, 2012, 31(2): 52-57.

[26] 王亚军, 马军. 水体环境中天然有机质腐殖酸研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1155-1165.

[27] 贾明, 张丽霞, 张元湖. 茶多酚的三维荧光光谱特征[J]. 分析测试学报, 2013, 32(3): 302-307.

(本文编辑:金曙光, 郑晓梅, 张利田)

Analysis of microbial characteristics in pipe network with ultraviolet & tea polyphenols or ultraviolet & sodium hypochlorite combined disinfection

LIU Xuanqi^{1,2}, SONG Chungang³, FENG Cuimin^{1,2,*}, TIAN Meng⁴, JI Haixia⁴, ZHANG Xinrui⁴, DING Ziqin^{1,2}

1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

2. National Demonstration Center for Experimental Water Environment Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

3. Beijing Urban Construction Real Estate Exploitation Co. Ltd., Beijing 100081, China

4. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China

* Corresponding author, E-mail: feng-cuimin@sohu.com

Abstract Ultraviolet (UV) has a good disinfection performance on microorganisms but with a weak durative. Tea polyphenols (TP) or sodium hypochlorite was used as an adjunct disinfectant for UV disinfection. In the dynamic simulation system of pipe network, the variations of microbial biomass, microbial community structure and organic matter fluorescence were compared between UV-TP and UV-NaClO combined disinfections. Results showed that the former had a better inactivation effect on microorganisms than the later, and a stronger cell-killing ability against pathogenic bacteria and chlorine-resistant bacteria. The change in fluorescence characteristics of tyrosine and humic acid after UV-TP combined disinfection indicated that the contents of these two substances were greatly reduced, which may affect the growth of microorganisms. In addition, the appearance of catechins and epicatechins in the biofilm on the pipe wall indicated that the occurrence of interaction between tea polyphenols and microorganisms. After UV-NaClO combined disinfection, a blue shift happened on the fluorescence characteristic peaks of tyrosines, which indicated that hypochlorous acid entered the cell of microorganisms and played an oxidation role accordingly.

Keywords ultraviolet-tea polyphenols combined disinfection; ultraviolet-sodium hypochlorite combined disinfection; dynamic simulation system of pipe network; microorganisms; drinking water treatment