

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.007

二供管材对管网余氯衰减及管壁生物膜的影响

陈礼洪^{1,2}, 白欢龙¹, 魏忠庆^{2,3}, 黄文忠⁴, 张智^{1,2}, 牛佳^{1,2},
裴义山^{1,2}

(1. 福建理工大学 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省水污染阻控与系统智能技术工程研究中心, 福建 福州 350118; 3. 福州市水务投资发展有限公司, 福建 福州 350001; 4. 福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 余氯不足是城镇供水末端水质不合格的主要原因,研究管材对二次供水余氯衰减的影响对保障饮水安全具有重要意义。基于此,创建了包含不锈钢管(SSP)、聚乙烯内衬钢管(PE-SP)、聚氨酯内衬球墨铸铁管(PU-DIP)、水泥砂浆内衬球墨铸铁管(CM-DIP)、水泥砂浆环氧密封层内衬球墨铸铁管(EPOXY-CM-DIP)5种管材的二次供水模拟系统,并且运行了三年,模拟了低余氯静态和动态工况下的余氯衰减情况,并通过16S rRNA基因高通量测序和实时荧光定量PCR(qPCR)技术对管壁生物膜进行微生物群落结构和生物量分析。结果表明,管材对余氯衰减系数 k 影响显著,5种不同管材静态和动态 k 的范围为 $0.032\sim 1.908\text{ h}^{-1}$,并且不同管材 k 的排序为EPOXY-CM-DIP>CM-DIP>PU-DIP>PE-SP>SSP;基于16S rRNA基因拷贝数测定管壁生物量,其排序为PU-DIP($7.77\times 10^3\text{ copies/cm}^2$)>EPOXY-CM-DIP($4.95\times 10^3\text{ copies/cm}^2$)>PE-SP($2.14\times 10^3\text{ copies/cm}^2$)>CM-DIP($0.52\times 10^3\text{ copies/cm}^2$)>SSP($0.46\times 10^3\text{ copies/cm}^2$),PU-DIP是SSP管壁生物量的16.9倍;管材可以影响管壁生物膜群落,PE-SP和EPOXY-CM-DIP管壁的优势菌属为*Sphingomonas*,PU-DIP管壁的优势菌属为*Phreatobacter*,这两种菌均为耐氯菌。综合考虑余氯衰减及生物膜特性,SSP最适合作为二次供水管材,PE-SP次之。

关键词: 二次供水; 管材; 余氯衰减; 微生物群落; 生物量

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0047-09

Impact of Secondary Water Supply Pipe Materials on Residual Chlorine Decline and Biofilm Formation on Pipe Walls in Pipe Networks

CHEN Li-hong^{1,2}, BAI Huan-long¹, WEI Zhong-qing^{2,3}, HUANG Wen-zhong⁴,
ZHANG Zhi^{1,2}, NIU Jia^{1,2}, PEI Yi-shan^{1,2}

(1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. Fujian Engineering Research Center of Water Pollution Control and System Intelligence Technology, Fuzhou 350118, China; 3. Fuzhou Water Affairs Investment and Development Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 4. Fujian Provincial Institute of Architectural Design and Research Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Insufficient residual chlorine is the primary cause of substandard water quality at the

基金项目: 福建省科技厅高校产学研合作项目(2022Y4018); 福州市自来水有限公司科研项目(GY-H-22194)

通信作者: 陈礼洪 E-mail: fjceclh@163.com

terminus of urban water supply systems. Investigating the impact of pipe materials on residual chlorine decline in secondary water supply networks is crucial for ensuring drinking water safety. A secondary water supply simulation system incorporating five types of pipes, namely stainless steel pipe (SSP), polyethylene-lined steel pipe (PE-SP), polyurethane-lined ductile iron pipe (PU-DIP), cement mortar-lined ductile iron pipe (CM-DIP), and cement mortar epoxy sealing layer-lined ductile iron pipe (EPOXY-CM-DIP), was established and operated for a period of three years. The system simulated the decline of residual chlorine under both static and dynamic conditions with low residual chlorine. Additionally, the microbial community and biomass were analyzed using 16S rRNA gene high-throughput sequencing and real-time fluorescence quantitative PCR (qPCR). Pipe materials significantly influenced the residual chlorine decline coefficient k . The static and dynamic values of k ranged from $0.032\ 2\ \text{h}^{-1}$ to $1.908\ 3\ \text{h}^{-1}$. Among different pipe materials, the k values were ranked as follows: EPOXY-CM-DIP > CM-DIP > PU-DIP > PE-SP > SSP. The biomass on the pipe walls was quantified based on the copy numbers of the 16S rRNA gene. The values in descending order were as follows: PU-DIP (7.77×10^3 copies/cm²), EPOXY-CM-DIP (4.95×10^3 copies/cm²), PE-SP (2.14×10^3 copies/cm²), CM-DIP (0.52×10^3 copies/cm²), and SSP (0.46×10^3 copies/cm²). Notably, the biomass of PU-DIP was 16.9 times greater than that of SSP. The pipe material significantly influenced the microbial community of the biofilm on the pipe walls. The predominant bacterial strains identified on the walls of PE-SP and EPOXY-CM-DIP were *Sphingomonas*, while *Phreatobacter* was found to be dominant on the pipe walls of PU-DIP. Notably, both *Sphingomonas* and *Phreatobacter* exhibited resistance to chlorine. Considering residual chlorine decline and biofilm characteristics, SSP is the most suitable material for secondary water supply pipeline, followed by PE-SP.

Key words: secondary water supply; pipe material; residual chlorine decline; microbial community; biomass

二次供水是城镇供水系统的重要组成部分。相较于市政供水管网,二次供水管网有以下特征:①二次供水管网输送水的余氯浓度低于市政供水管网,特别是城镇供水系统边缘区域或具有水箱调蓄导致水龄长的二次供水系统,管网“低余氯”问题更加突显;②二次供水的用水量变化波动较大,存在明显的用水高峰和低峰,特别是夜间低峰期用水时,管道内的水停留时间较长,流动性较差,容易出现余氯过量衰减导致水质不合格;③二次供水可以选用的管材种类较多,不同材质对余氯衰减的影响会有差异。目前,对于市政供水管网余氯衰减的相关研究较多,但针对低余氯、长水龄、材质种类多的二次供水管网余氯衰减的研究相对较少。基于二次供水管网水力工况及水质边界条件与市政供水管网存在显著的差异,分析不同管材对二次供水管网余氯衰减的影响及管壁生物膜的特性,可为保障龙头水水质安全提出管材优选等指导性工程化建

议,这对保障城镇供水末端二次供水水质安全具有重要意义。

此外,管壁生物膜也受到管道材质的影响,如王杨等^[1]采用生物膜环形反应器(BAR)对聚氯乙烯管、无规共聚聚丙烯管、不锈钢管三种典型室内常见管材进行管壁生物膜培养,结果发现管材介质对管壁生物膜上微生物群落结构存在一定的影响;张心悦等^[2]通过改进式生物膜环形反应器培养聚乙烯(PE)管、钢管和球墨铸铁管三种不同管材管壁生物膜,也发现管材对微生物群落组成特征存在显著的影响。

结合当前二次供水管材使用情况及行业发展趋势,笔者选用了传统管材包括不锈钢管(SSP)、聚乙烯内衬钢管(PE-SP)、水泥砂浆内衬球墨铸铁管(CM-DIP),以及新型内衬管包括聚氨酯内衬球墨铸铁管(PU-DIP)、水泥砂浆环氧密封层内衬球墨铸铁管(EPOXY-CM-DIP),模拟低余氯浓度下二次供

水管网静态和动态工况,对比管材对余氯衰减的影响及不同管材内壁生物量的差异性,尤其是PU-DIP及EPOXY-CM-DIP应用于供水管网时余氯衰减情况未见报道,旨在为二次供水系统建设或改造时管材的选用提供依据,并为我国高品质饮用水项目建设时管材的选用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

二次供水模拟系统如图1所示。该系统包括2个2 m³的生活水箱、1套恒压变频供水泵组、2个电磁流量计、1套管网循环泵组、16个电磁阀控水龙头和并联的5种管道,每种管道的长度为54 m,管径均为DN100。系统可通过设置末端电磁阀水龙头不同时段开启个数及时长,模拟二次供水高低峰用水情况,龙头日用水量大于5种管材管网的总容积,确保24 h内管网水得到更新。系统可开展静态工况5种管材相同条件下的余氯衰减并列实验,也可通过管网循环泵辅助及阀门启闭实现单种管材和不同输水距离动态工况余氯衰减实验。

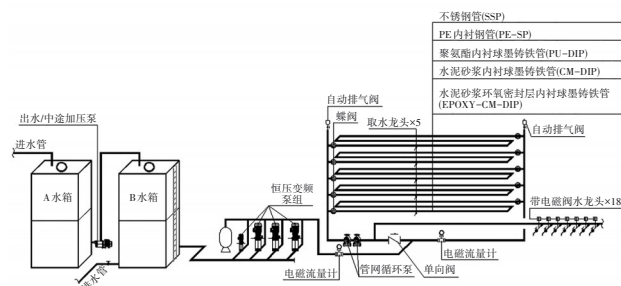


图1 二次供水模拟系统示意

Fig.1 Schematic diagram of secondary water supply simulation system

系统建成后,先通过模拟二次供水运行工况对管网内壁挂膜。有研究表明,贫营养源的供水管网管壁生物膜在4个月内可以达到成熟稳定状态^[2],本实验二次供水模拟平台经过3年的连续运行,已形成稳定的管内壁生物膜环境,为开展后续实验创造了条件。

1.2 实验原水水质及测定方法

实验原水为福州某大学二次调蓄加压自来水,主要对二次供水管网中水的余氯衰减情况进行监测。采用便携式余氯测定仪和SWAN余氯在线测定仪测定余氯,采用投入式温度传感器测定水温,采用便携式浊度仪测定浊度,采用总有机碳分析仪

测定TOC。有研究表明,温度越高余氯衰减越快^[3],因此实验在2023年7月—10月之间全年水温最高时期进行。实验用自来水水质稳定,水温维持在24.8~26.4℃,余氯浓度在0.05 mg/L左右,浊度为0.32~0.45 NTU, TOC为0.98~1.05 mg/L, pH为6.85~7.05。

1.3 实验方法

由于实验用水为末端龙头水,余氯浓度(0.05 mg/L左右)不满足二次供水要求,为贴近真实二次供水工况,在A水箱中进行二次加氯以提高实验用水余氯浓度,余氯浓度值为0.21~0.63 mg/L(该值为福州城区不同区域二次供水的余氯浓度范围)。在A水箱注满水后加入次氯酸钠并搅拌均匀,静置30 min后用泵输送至B水箱(二供水箱),再经恒压变频泵组输送至二次供水管网。

1.3.1 静态余氯衰减实验

二次供水夜间流量很小,甚至可能出现长时间零流量的工况,因此研究二次供水管网静态工况不同浓度余氯衰减情况很有必要。实验参照福州市二次供水小区余氯浓度范围调配初始余氯浓度,模拟二次供水管网静态余氯衰减实验。静态实验过程中,将B水箱内配制好的水样泵入管道后立即关闭各种管道端头阀门,使5种管道均为独立闭合系统,记录初始余氯浓度后每隔1 h对管网水取样并测定余氯浓度 C_t ,取样前将龙头打开放水10 s,连续测定24 h。

1.3.2 动态余氯衰减实验

参考调研的福州二次供水余氯范围,且低余氯二次供水水质不达标风险高,动态实验选定较低初始余氯浓度 C_0 为0.2 mg/L。进行实验时,只打开其中1种管材两端阀门,其余4种管材两端阀门关闭,启动循环泵模拟不同输水距离的供水管网,循环泵输水过程中管网不进出水。通过调节循环泵出口阀门开启度和电磁流量计控制管网内水的流速,采用在线余氯监测仪实时监测管网水余氯,并记录不同流速(0.075~1.000 m/s)下输送100、200、500、1 000、1 500、2 000 m等距离时管网中水的余氯浓度 C_t 。

1.3.3 管壁生物膜微生物群落和生物量分析

对相同运行条件下的5种管材管壁生物膜进行取样,取样之前将管道内的水缓慢排空,卸掉系统管道上取样预留的法兰连接短管,用灭菌的医用长

柄棉签均匀刷取每种管材管道相同位置处4 cm长度内壁四周,直至管壁内没有肉眼可见的管垢,再将棉签用灭菌剪刀剪下,转移至准备好的装有30 mL灭菌去离子水的无菌离心管中,共采集5个生物膜样本,将样品迅速转移并暂存于4℃冰箱中,样本送至上海生工公司进行16S rRNA基因高通量测序及实时荧光定量PCR(qPCR)分析,研究管材对管壁生物膜微生物群落的影响。

使用E. Z. N. A™ Mag-Bind Soil DNA Kit抽提5个生物膜样本的DNA,并对提取DNA的完整性进行琼脂糖凝胶电泳检测。高通量测序的方法如下:对目标基因组16S rRNA的V3-V4区域进行扩增,扩增引物为341F(CCCTACACGACGCTCTTCCGATCT-GCCTACGGGNGGCWGCAG)和805R(GACTGGAG-TTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGACTACHVGGG-TATCTAATCC)。经过第一轮通用引物和第二轮引入Illumina桥式PCR兼容引物进行PCR扩增,PCR产物通过2%琼脂糖凝胶筛选,使用Qubit3.0荧光定量仪测定DNA浓度。利用Mothur软件进行Alpha多样性指数分析,估计每个样本的覆盖率并计算Chao1指数、Shannon指数等。

采用SYBR荧光染料法对目标基因V3-V4区进行实时荧光定量PCR(qPCR)分析,目的基因引物序列分别为Nobar_341F(CCTACGGGNGGCWGCAG)以及Nobar_805R(GACTACHVGGGTATCTAATCC)。PCR反应条件如下:95℃(3 min)→95℃(30 s)→57℃(30 s)→72℃(30 s)→72℃(8 min),循环35次。将16S rRNA基因V3-V4区的质粒进行10倍梯度稀释,建立qPCR标准曲线,比较样本基因CT值与标准曲线,计算样本中目标基因的拷贝数。

1.3.4 余氯衰减规律分析方法

管网余氯衰减规律一般符合一级动力学方程^[4-5],采用一级动力学方程对余氯衰减情况进行拟合,见式(1)。

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

式中: C_t 为 t 时刻余氯浓度,mg/L; C_0 为初始余氯浓度,mg/L; k 为余氯衰减系数, h^{-1} ; t 为反应时间,h。

2 结果与讨论

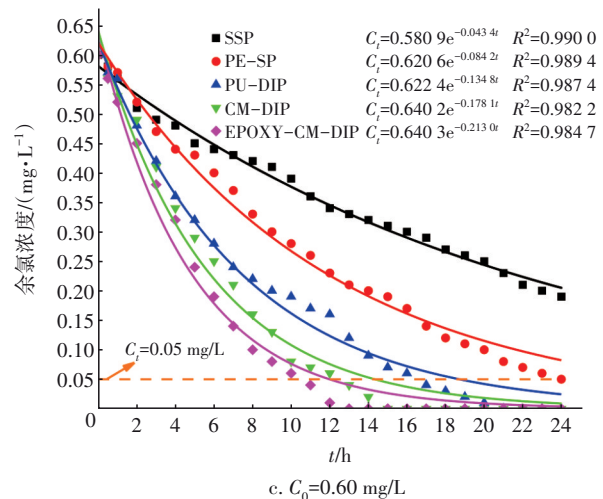
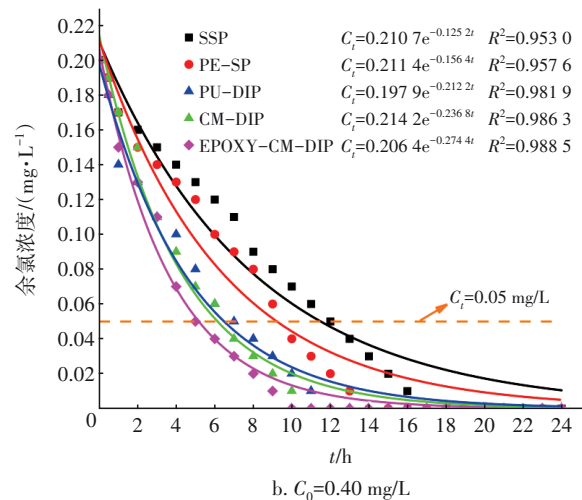
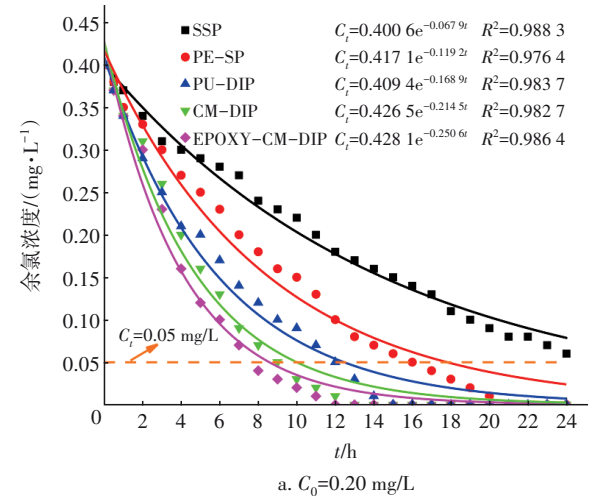
2.1 静态工况分析

通过研究不同管材静态余氯衰减规律,推导不同初始余氯浓度对应的水龄计算公式,计算结果可

用于比较不同管材静态工况余氯衰减的影响程度。

2.1.1 不同管材静态余氯衰减情况

采用一级动力学方程推算静态管网随时间延长的余氯值,相关系数均大于0.95,说明5种管材在不同初始余氯浓度下均符合一级动力学模型,二次供水管网内静态余氯衰减情况如图2所示。



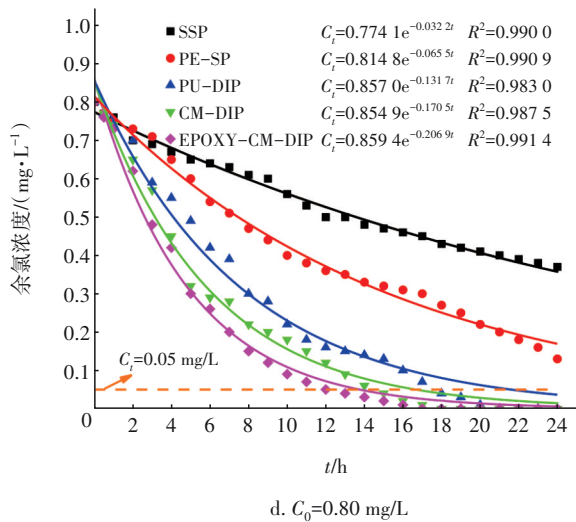


图2 不同初始余氯下二次供水管网内静态余氯衰减情况
Fig.2 Static residual chlorine decline in secondary water supply pipe networks under different initial residual chlorine

由图2可知,当静态初始余氯浓度基本相同时,管材对余氯衰减影响程度的排序为EPOXY-CM-DIP>CM-DIP>PU-DIP>PE-SP>SSP。通过 Origin 最佳模型拟合,发现5种管材静态余氯衰减系数 k 与初始余氯浓度 C_0 的倒数存在较好的线性关系,相关系数大于0.87,且 k 随 C_0 的增大呈减小趋势,原因是 C_0 较低时,余氯在水中主要与快速反应物质发生反应,生成简单的化合物,导致 k 较大;当 C_0 较高时,余氯则与水中快速反应物质及慢速反应物质同时反应,延缓了整体余氯衰减速率,导致 k 减小。

2.1.2 静态工况下管材对水龄的影响

根据式(1)计算水龄,得到如下关系式:

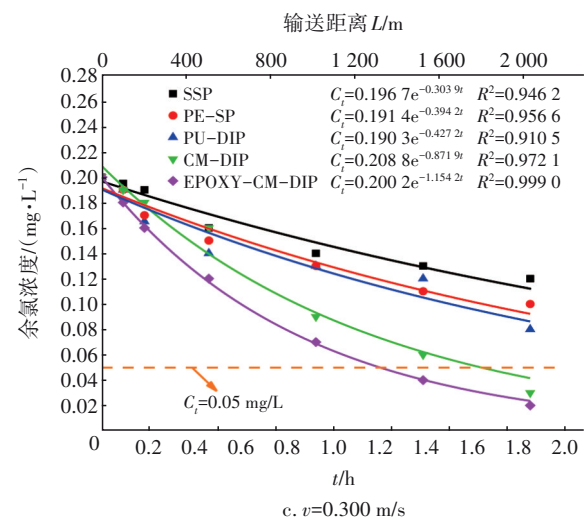
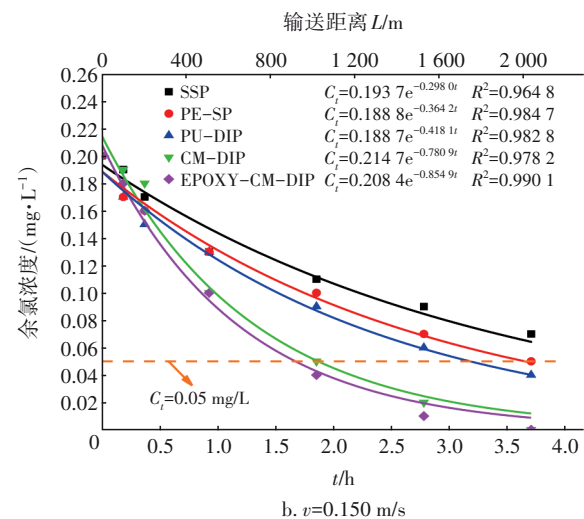
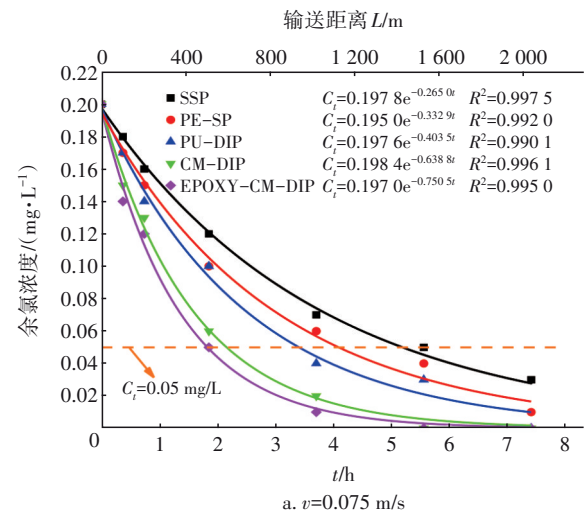
$$t = \frac{-\ln(C_t/C_0)}{k} \quad (2)$$

若将实验的初始余氯浓度衰减至0.05 mg/L的时长定义为“允许水龄”,将不同管材 k 代入式(2),当 $C_t=0.05$ mg/L时,可得到不同管材在实验水质及水温下的允许水龄。通过计算可知,当初始余氯浓度为0.2 mg/L时,SSP静态允许水龄为12 h,分别是PE-SP的1.28倍、PU-DIP的1.70倍、CM-DIP的1.92倍、EPOXY-CM-DIP的2.22倍;且倍数关系随初始余氯浓度的增加而增大。允许水龄可作为二次供水管网内余氯是否达标的判断依据,即当二次供水管网内水龄 \leq 允许水龄时,管内余氯达标,反之,余氯有不达标的风险。

2.2 动态工况分析

2.2.1 不同管材动态余氯衰减情况

5种管材在初始余氯浓度为0.2 mg/L条件下,不同流速时的余氯衰减情况如图3所示。



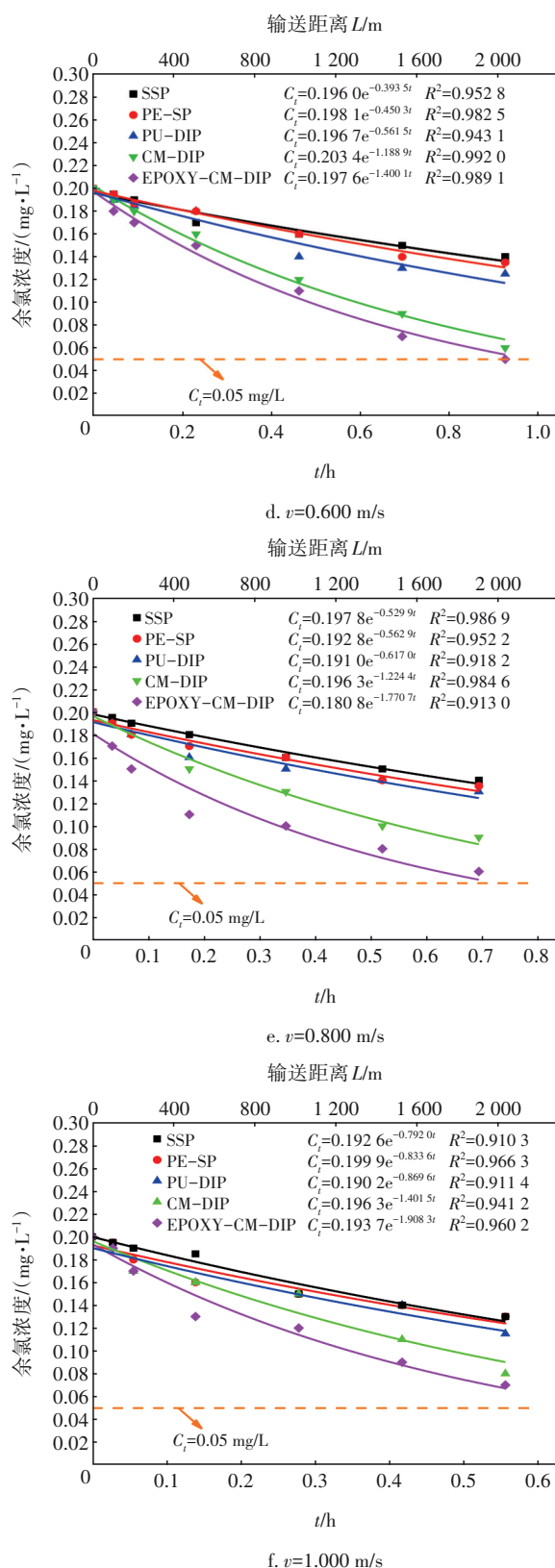


图3 不同流速下余氯衰减情况

Fig.3 Residual chlorine decline under different flow rates

从图3可以看出,采用一级动力学方程来拟合

二次供水管网动态余氯衰减规律,各拟合曲线的相关系数均大于0.91,符合一级动力学模型。5种管材动态余氯衰减系数 k 均随流速的增加而增大,允许水龄随管网流速增大而减小。分析原因:一是因为流速越高导致紊动越激烈,质点相互掺混的程度越大,更有利于余氯与水体中的物质充分接触并发生反应,余氯消耗量越大;二是流速增大会增强水流对管壁的剪切作用,使管壁上的沉积物和微生物脱落,脱落物与水中余氯接触更充分,从而加快管内余氯衰减速率。相同流速下不同管材 k 的排序为EPOXY-CM-DIP>CM-DIP>PU-DIP>PE-SP>SSP。

2.2.2 动态工况下管材对余氯保障的影响

根据上述分析,SSP在控制余氯衰减方面有明显优势,PE-SP和PU-DIP次之,CM-DIP和EPOXY-CM-DIP最差。

在动态工况条件下,管网流速及水龄共同影响余氯衰减及龙头末端余氯是否满足要求:流速越大,余氯衰减系数越大,允许水龄越小,由于流速大则可安全输水距离更大;流速越小,余氯衰减系数越小,允许水龄越大,由于流速小则可安全输水距离更小,特别是在0.075 m/s的低流速长水龄状态下,5种管材均无法保障输水2 km后余氯大于0.05 mg/L;当流速大于0.6 m/s时,虽余氯衰减快、水龄短,但5种管材都能确保输水2 km后的余氯大于0.05 mg/L。尽管低流速余氯衰减系数小,但低峰用水时水龄长,水龄增加对余氯衰减的影响程度大于余氯衰减系数减小的影响程度,二者综合影响的结果依旧是低流速、长水龄的余氯衰减量大。所以,从二次供水龙头末端余氯安全保障角度考虑,夜间低峰用水期余氯不达标风险最高。

2.3 管壁生物膜微生物群落分析

管壁生物膜微生物群落结构和生物量是管道内壁理化性质的体现,对比相同供水条件下管道内壁生物膜情况,可评估不同管材二次供水管网水质的微生物风险。

2.3.1 管壁生物膜属水平上的微生物群落分布

在97%的相似度下将每个样品的有效序列聚类成操作分类单位(OTUs),选择丰度最高的序列作为OTUs的代表性序列,计算Alpha多样性指数。Chao1及Ace指数在生态学中常用来反映物种的丰富度;Shannon和Simpson指数则可代表微生物的多样性,Shannon指数越大,微生物群落多样性越高;

所有样本的覆盖率 Coverage 均大于 0.999,表明所有微生物信息已经基本被覆盖完全,测序数据见表 1。可知,相同工况下 PU-DIP 管壁微生物物种数量最多,其生物膜群落结构最为复杂、生物多样性程度最高,而 CM-DIP 管壁微生物物种数量最少,PE-SP、SSP 及 EPOXY-CM-DIP 之间差异不显著。

表 1 二次供水管网不同管材管壁中微生物 Alpha 多样性

Tab.1 Microbial Alpha diversity in the pipe walls of different pipes in secondary water supply networks

管材	序列数	OTUs	Shannon	Chao1	Ace	Simpson
SSP	117 319	208	1.99	210.00	211.01	0.31
PE-SP	120 638	222	2.54	229.58	228.05	0.14
PU-DIP	115 735	502	4.14	505.67	511.86	0.03
CM-DIP	103 243	82	1.02	84.50	85.51	0.58
EPOXY-CM-DIP	120 339	238	3.17	242.23	241.85	0.08

不同管材管壁属水平上的微生物相对丰度如图 4 所示。可知,SSP 管壁优势菌属为罗尔斯通菌属 (*Ralstonia*, 51.94%)、柄杆菌属 (*Caulobacteraceae*, 17.45%)、葡萄球菌属 (*Staphylococcus*, 10.33%); PE-SP 管壁上的优势菌属包括鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*, 28.59%)、*Phreatobacter* (16.81%)、*Ralstonia* (13.27%); PU-DIP 管壁上的优势菌属为 *Phreatobacter*(9.14%)、*Ralstonia*(6.45%)、*Sphingomonas* (4.57%); CM-DIP 管壁上的优势菌属包括 *Ralstonia* (74.51%)、*Caulobacteraceae*(15.77%)、*Sphingomonas* (1.71%); EPOXY-CM-DIP 管壁上的优势菌属为 *Sphingomonas*(17.56%)、*Ralstonia*(13.31%)、*Phreatobacter* (10.64%)。*Ralstonia* 在生活饮用水的贫营养环境中具有较强的生存和繁殖能力,其可以利用多种化合物作为能源和碳源,普遍存在于土壤和天然水体中;变形菌门中的 *Phreatobacter* 和 *Sphingomonas* 为供水管网中的优势菌,且均为耐氯菌。研究发现,当供水管网贫营养环境同时受到氯消毒的环境时会加剧耐氯菌的筛选^[6];5 种管材管壁生物膜均检测到芽孢杆菌属 (*Bacillus*),除 SSP 外其余四种管材管壁生物膜均检测到的类芽孢杆菌属 (*Paenibacillus*) 也属于耐氯菌^[7]。由于耐氯菌会导致介水疾病的暴发、色度和浊度升高等水质安全问题,因此考虑将对耐氯菌的控制作为评估生物膜风险的指标。

采用主成分分析法 (PCA) 对运行三年的 5 种不

同管材管壁生物膜在属水平上进行解析,进一步探究不同管材管壁生物膜的微生物群落结构差异,结果如图 5 所示。

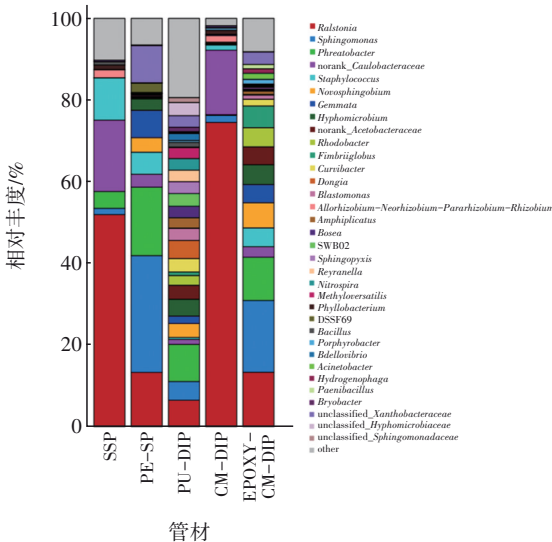


图 4 不同管材管壁属水平上的微生物相对丰度

Fig.4 Relative abundance of microorganisms on genus level of different pipe materials

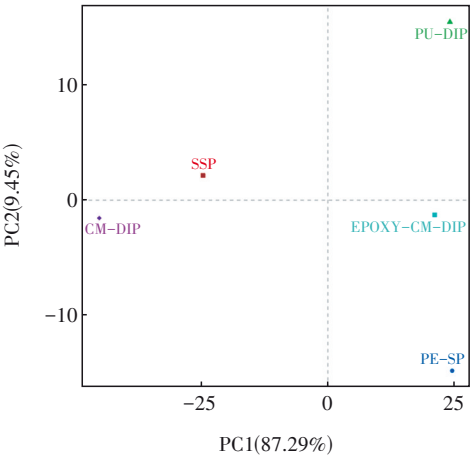


图 5 不同管材管壁生物膜微生物群落属水平的 PCA 图

Fig.5 PCA plots of microbial community at genus level on biofilm of different pipe materials

由图 5 可知,主成分 1 和主成分 2 分别占总变异的 87.29% 和 9.45%,可以共同描述微生物群落结构 96.74% 的信息。PCA 结果表明不同管材的生物膜微生物群落组成差异显著,仅 SSP 与 CM-DIP 管壁生物膜样本相距较近,表明其微生物群落组成有一定的相似性;而 PU-DIP、PE-SP 及 EPOXY-CM-DIP 不仅相互之间管壁生物膜样本相距较远,且与 SSP 及 CM-DIP 之间相距较远,说明不同管材二次供

水管网管壁生物膜微生物群落的分布存在明显差异,其原因有待进一步分析。

2.3.2 管壁生物膜生物量分析

对生物膜样本进行 qPCR 定量分析,不同管材管壁的生物量如图6所示。可知,管壁上的生物量排序为 PU-DIP>EPOXY-CM-DIP>PE-SP>CM-DIP≈SSP,对5个生物膜样本的生物量进行单因素方差分析,结果显示 $P<0.01$,说明不同管材管壁的生物量存在显著差异。

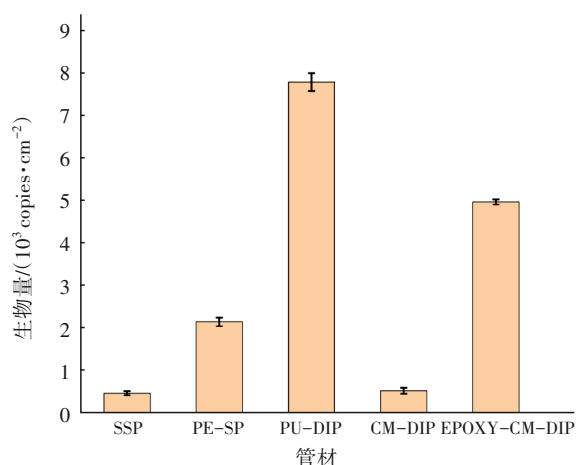


图6 不同管材管壁上的生物量

Fig.6 Biomass on pipe walls of different pipe materials

采用扫描电子显微镜(SEM)分别观察5种管材新管未挂膜管壁微观形貌并进行表面粗糙度(Ra)

分析,结果见图7。可知,PE-SP内壁光滑且不易发生腐蚀,微生物不易黏附于管壁,管道内壁在间歇水力工况运行下附着物主要集中于管道下部1/3处;与PE-SP相比,SSP内壁更加平整光滑,更不利于微生物的黏附生长,内壁存在由 Cr_2O_3 形成的致密钝化膜,不易造成微生物诱导的管壁腐蚀,斑点状可能是不锈钢表面钝化膜形成不均匀或破损所致;CM-DIP内壁最为粗糙,静态实验中龙头出水pH始终维持在10.4~11.2之间,是由于其内壁表层白色浮浆属于水泥成分,水泥中的氢氧化钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙会溶解到管内水体中,长水力停留时间会引起水体pH上升,而对于供水管网中的异养菌,生长繁殖最适宜的pH为7.0^[8],高pH环境导致管壁生物量最少;EPOXY-CM-DIP管壁的粗糙度仅次于CM-DIP,环氧密封材料(EPOXY)涂层隔绝了水泥砂浆内衬与水体的直接接触,管内pH无上升趋势,表面涂层明显的凹凸状有利于细菌附着生长,生物量较多;PU-DIP内壁结构相对平整,但有一些裂痕及微突起,粗糙度略大于PE-SP。相关研究表明,PU材质会被葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)降解^[9-10],这证明贫营养环境下PU-DIP管壁上检测到上述菌属会利用PU材料作为代谢营养物,是导致PU-DIP内壁生物量最大的原因。

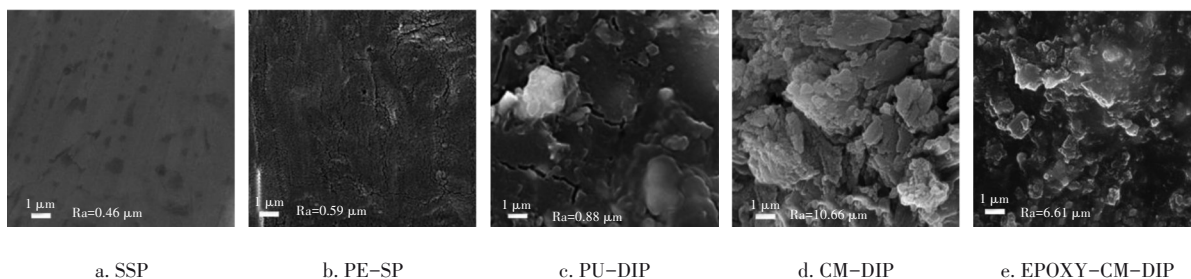


图7 不同管材新管未挂膜管壁SEM图像及Ra

Fig.7 SEM pictures and Ra of new unfilmed pipe wall of different pipes

综上所述,不同管材在相同进水水质下余氯衰减情况存在明显差异,余氯消耗的差异性主要是由管材自身消耗、管壁生物膜消耗、黏附于管壁的有机物及还原性无机物消耗造成的,对不同种类管材而言,这三部分对余氯衰减的影响程度不同。SSP表面粗糙度最小且管壁生物量最少,表面钝化膜稳定不易生锈,余氯衰减系数最小;PE-SP次之;PU-DIP虽然表面生物膜物种丰度及生物量最多,但其

粗糙度较小,余氯衰减系数略大于PE-SP,间接说明微生物会正向促进余氯衰减但不是主要影响因素;CM-DIP因其内部高pH水环境抑制微生物生长,但其粗糙的表面容易附着水体中消耗余氯的各种悬浮有机物及还原性无机物,造成其余氯衰减系数较大,这也进一步说明了微生物不是影响余氯衰减的决定性因素;EPOXY-CM-DIP兼具表面粗糙度大及附壁生物量多的特性,导致其余氯衰减系数最大。

3 结论

① 管材对二次供水管网余氯衰减影响显著,静态和动态工况下余氯衰减系数的排序为EPOXY-CM-DIP>CM-DIP>PU-DIP>PE-SP>SSP。随流速的增加,PE-SP及PU-DIP的余氯衰减系数与SSP之间的差异逐渐减小,CM-DIP及EPOXY-CM-DIP的余氯衰减系数始终远大于SSP。

② 动态工况下,5种管材余氯衰减系数均随流速的增加而增大,尽管用水低峰期低流速时余氯衰减系数小,但在相同输送距离下低峰用水时水龄长,水龄增长对余氯衰减的影响程度大于余氯衰减系数减小的影响程度,二者综合影响的结果依旧是低流速、长水龄的余氯衰减量大,对于二次供水管网余氯保障的重点是夜间低峰用水期。

③ 在相同运行工况下,二次供水不同管材管壁生物膜菌群结构存在较大差异,PU-DIP管壁微生物物种数量最多,CM-DIP管壁微生物物种数量最少,PE-SP、SSP及EPOXY-CM-DIP管壁微生物物种数量较接近;管材对管壁生物量影响显著,PU-DIP管壁生物量最多,SSP管壁生物量最少。

④ 综合余氯衰减情况及管壁生物膜特性,在相同工况下,SSP余氯衰减系数最小且附壁微生物风险最低;尽管随着流速增加PE-SP及PU-DIP的余氯衰减系数接近SSP,但PE-SP附壁生物膜中耐氯菌 *Sphingomona* 占比较大,而PU-DIP附壁生物膜的微生物数量及生物量最大且优势菌属为耐氯菌 *Phreatobacter*,两者管壁微生物风险较高。因此,在条件允许的情况下,建议优选SSP作为二次供水管材。

参考文献:

- [1] 王杨,朱斌,童俊,等. 基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 853-858.
WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, *et al.* Growth features of water supply pipeline biofilms based on active microorganisms[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 853-858(in Chinese).
- [2] 张心悦,周克梅,刘煜,等. 供水管材对管壁生物膜特性和水质稳定性的影响[J]. 中国给水排水, 2022, 38(9): 44-51.
ZHANG Xinyue, ZHOU Kemei, LIU Yu, *et al.* Effect

of water supply pipe material on biofilm characteristics and water quality stability [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(9): 44-51(in Chinese).

- [3] GENG B, FAN J J, SHI M H, *et al.* Control of maximum water age based on total chlorine decay in secondary water supply system [J]. Chemosphere, 2022, 287: 132198.
- [4] 侍路梦,吴慧芳,王玉敏,等. 供水管网余氯衰减变化规律及模型研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 52-57, 62.
SHI Lumeng, WU Huifang, WANG Yumin, *et al.* Decay pattern and model of residual chlorine in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 52-57, 62(in Chinese).
- [5] ZHONG D, FENG W N, MA W C, *et al.* A variable parabolic reaction coefficient model for chlorine decay in bulk water[J]. Water Research, 2021, 201: 117302.
- [6] 景自博. 紫外线对给水管网中典型耐氯菌灭活特性和机理[D]. 北京:北京化工大学, 2022.
JING Zibo. Inactivation Characteristics and Mechanism of Typical Chlorine-resistant Bacteria by Ultraviolet in Drinking Water Distribution Systems [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022 (in Chinese).
- [7] 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.
- [8] SCHULTZE L B, MALDONADO A, LUSSI A, *et al.* The impact of the pH value on biofilm formation [J]. Monographs in Oral Science, 2021, 29: 19-29.
- [9] BHAVSAR P, BHAVE M, WEBB H K. Solving the plastic dilemma: the fungal and bacterial biodegradability of polyurethanes [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 39(5): 122.
- [10] SU T Y, ZHANG T, LIU P, *et al.* Biodegradation of polyurethane by the microbial consortia enriched from landfill [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023, 107(5/6): 1983-1995.

作者简介:陈礼洪(1969—),男,福建南平人,硕士,教授,主要研究方向为城镇及建筑给排水系统安全与节能技术。

E-mail: fjceclh@163.com

收稿日期:2024-10-14

修回日期:2024-11-19

(编辑:任莹莹)