

黄慧婷, 骆鹏, 张山风, 等. 不同消毒方式下的微生物群落组成及对管段腐蚀的影响[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 76-82.

HUANG H T, LUO P, ZHANG S F, et al. Effect of microbial communities composition on water supply pipelines corrosion under different disinfection methods[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 76-82.

不同消毒方式下的微生物群落组成及对管段腐蚀的影响

黄慧婷*, 骆鹏, 张山风, 杨艳兵, 王敏, 顾军农

(北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100192)

摘要 因腐蚀引起的管网问题和多元化的消毒方式选择越发受到关注。文中针对不同消毒方式下生物膜中的优势菌群在腐蚀过程中发挥着的作用展开了试验研究,通过高通量测序对中试管网系统各管段中生物膜细菌群落特征进行表征,并进行深入分析。研究表明,在紫外消毒方式下,生丝微菌属(*Hyphomicrobium*)是其优势菌属,属于反硝化菌,对管段的腐蚀有抑制作用。氯消毒方式下,丙酸弧菌属(*Propionivibrio*)是主要优势菌属,在一定程度上会促进金属点蚀的形成。在紫外-氯消毒方式下,管段运行初期,多数菌属与紫外消毒方式下初期的微生物群落组成相近,反硝化菌属作用明显,但随着管段运行的时长增加,*Propionivibrio*变为主要优势菌属。由此,认为采用紫外或紫外-氯消毒方式对管段腐蚀起到一定的抑制作用。

关键词 饮用水管网 紫外消毒 紫外-氯消毒 氯消毒 生物膜

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)07-0076-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.009

Effect of Microbial Communities Composition on Water Supply Pipelines Corrosion under Different Disinfection Methods

HUANG Huiting*, LUO Peng, ZHANG Shanfeng, YANG Yanbing, WANG Min, GU Junnong

(Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract Corrosion-induced problems in the water network and the choice of disinfection methods are of increasing concern. The role of the dominant flora in the biofilm in the corrosion process under different disinfection methods was studied in this paper. High-throughput sequencing was used to characterise and characterise the biofilm bacterial community in each tube section of the pilot network system. The results showed that *Hyphomicrobium*, a denitrifying bacterium, was the dominant genus in the UV disinfection mode and inhibited corrosion in the tube sections. In chlorine disinfection, *Propionivibrio* is the dominant genus, which to a certain extent promotes the formation of metal pitting. In the UV-chlorine disinfection method, most of the genera were similar in composition to the initial UV disinfection method, with denitrifying bacteria being the dominant genus, but as the length of operation increased, *Propionivibrio* became the dominant genus. Thus, the use of UV or UV-chlorine as a disinfection method has an inhibitory effect on the corrosion of the pipe section.

Keywords water supply network UV disinfection UV-chlorine disinfection chlorine disinfection biofilm

当前,含氯消毒是水厂处理工艺中的主流消毒方法,在经济发达国家美国、英国等,绝大多数的水厂均采用氯消毒技术,比例高达95%。在我国,水厂应用氯消毒技术的比例高达99%^[1]。而紫外消毒技术作为近几年新兴的消毒方式,以其高效、无消

毒副产物等优势逐渐作为物理消毒技术的代表在水处理中逐渐受到业界人士的青睐。在国内,紫外消毒技术应用于水厂还处在起步阶段。

供水管网连接水厂和用户,是供水系统中至关重要的环节。供水管网的安全性直接影响用户用水的安全。目前,铸铁管是我国给水管网中使用最广泛的管材,这种管材短期内并不能被聚氯乙烯(PVC)管或不锈钢管替代^[2-3]。然而,金属管材在长期的输配水过程中会受到严重的腐蚀进而产生一

[收稿日期] 2022-06-14

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2021YFC3200904)

[通信作者] 黄慧婷(1984—),女,硕士,高级工程师,研究方向为饮用水安全技术,E-mail:angel8026@aliyun.com。

系列的问题,对居民的日常生活造成影响。一般的金属的腐蚀包括电化学腐蚀和微生物腐蚀。微生物腐蚀由于在腐蚀过程所起的复杂作用(加速或抑制腐蚀),越来越引起业内人士的关注。研究^[4]表明生物膜中的某些细菌可以促进管网腐蚀,而有些生物膜中的细菌可以对管网的腐蚀起到抑制作用,当细菌通过异化铁还原作用将 Fe(III) 还原成 Fe(II),氧化消耗掉环境中的氧气,从而阻断了氧气与金属表面的接触,可以阻碍腐蚀的进行^[5]。细菌合成并分泌对 Fe(III) 具有高亲和力的小分子化合物作为铁载体,与 Fe(III) 形成紧密稳定的螯合物,可以抑制腐蚀^[6]。

因此,了解不同消毒方式下生物膜中微生物群落结构,分析优势菌群在腐蚀过程中的作用对研究因腐蚀引起的管网问题显得非常重要。本研究以在某水厂内搭建的一套中试消毒管网试验装置作为研

究对象,利用高通量测序的方法,探究不同消毒方式下的管段中生物膜的微生物群落,以及在不同消毒方式下的优势菌群对管网腐蚀的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

紫外-氯联合消毒管网试验装置采用手动方式控制系统开关、进水蠕动泵流量、加药泵的泵速调节及紫外设备的开启。该套试验装置搭建于某水厂的中试基地内,其中紫外设备连接在中试基地的水箱后。水箱的水为水厂的炭池出水。紫外设备选用特洁安 PRO10(低压汞灯),紫外剂量为 40 mJ/cm²。管网试验装置的进水流量为 0.7 m³/h,管段均为无内防腐的 1 m 长 DN50 铸铁管段,所加的消毒剂为次氯酸钠溶液质量浓度为 0.3~0.7 mg/L。试验期间原水水温处于 4.4~26.8 °C, pH 值在 7.2~8.1,浊浊度不高于 0.2 NTU,试验装置的工艺流程如图 1 所示。

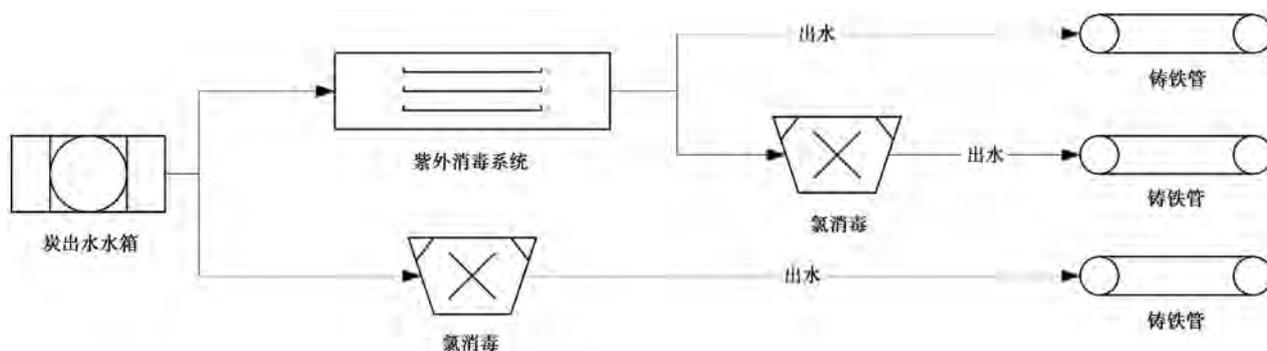


图 1 中试系统的工艺流程

Fig. 1 Process Flow of the Pilot System

1.2 管壁微生物样品的采集及处理

在试验系统稳定运行 4、10 个月和 15 个月时,将管段拆卸下来进行管壁微生物样品的采集。管内壁微生物使用无菌棉签蘸取后直接放入无菌容器内并做好标记。所有管内壁微生物样品立即冷冻保存,并在 24 h 内将样品送往上海美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序。

1.3 试验样品的测定方法-高通量测序

管壁微生物样品在 -80 °C 条件下进行高通量测序。本测试选用 16S RNA 功能基因的 V3-V4 双可变区段产物进行聚合酶链式反应(PCR)扩增测序,所选引物为分别是 338F (5'-ACTCCTACGGAG GCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTC TAAT-3'),而后通过 QIIME、Mothur 等软件对测序

数据进行分析。

1.4 测序结果的分析方法

经过 Mothur 软件去除低质量序列等一系列处理后,而后利用 Mothur 软件中的 make_group 命令生成 groups 格式文件;dist_seqs 命令生成距离矩阵;cluster 命令进行聚类分析;bin_seqs 命令输出分类操作单元(OTU);get_oturep 命令得到代表性 OTU,并计算 OTU 个数及 OTU 所属水样;make_shared 命令生成 OTU table;classify_seqs 命令将序列与 sliva 数据库的高质量序列比对,得出分类结果。序列比对同源性大于 97% 的认为属于同一 OTU;相似性小于 97% 可认为属于不同的种,相似性小于 93%,可认为属于不同的属。根据分类学分析结果,可以得知样品中有何种微生物和它们各自含有的序列数,

并计算微生物分别在门、纲、目、科、属水平上所占的相对百分含量。

微生物群落 α 多样性指数分析, 主要是针对菌属丰度指数和菌属多样性指数两方面进行分析。菌属丰度指数常用基于丰度的覆盖估计值 (ACE) 和 Chao 来表征, 数值越大代表 OTU 数目越多, 说明样本中包括的物种数目越多。菌属多样性指数常用辛普森多样性指数 (Simpson's diversity index) 和香农多样性指数 (Shannon's diversity index) 表征。Simpson 指数越大, 说明群落微生物多样性越低, 每个菌分布的均匀度越低; Shannon 指数越大, 说明群落微生物多样性越高, 每个菌分布的均匀度越高。

2 试验结果与分析

2.1 不同消毒方式下供水管段管壁微生物样品丰度及多样性的变化

本试验采用以上所提及的指数来描述生物膜中的微生物群落 α 多样性, 根据表 1~表 3 对比分析不同消毒方式下的管壁微生物群落丰度及多样性的变化。

表 1 紫外消毒方式下微生物群落丰度及多样性指数

Tab. 1 Microbial Community Abundance and Diversity Index under UV Disinfection

时间	Shannon	Simpson	ACE	Chao
运行 4 个月(夏)	3.2	0.08	144.8	143.5
运行 10 个月(冬)	4.2	0.03	223.0	225.0
运行 15 个月(夏)	4.1	0.03	209.2	218.0

表 2 紫外-氯消毒方式下微生物群落丰度及多样性指数

Tab. 2 Microbial Community Abundance and Diversity Index under UV-Chlorine Disinfection

时间	Shannon	Simpson	ACE	Chao
运行 4 个月(夏)	3.5	0.05	133.5	133.5
运行 10 个月(冬)	2.8	0.13	139.3	139.0
运行 15 个月(夏)	3.0	0.09	117.4	116.7

表 3 氯消毒方式下微生物群落丰度及多样性指数

Tab. 3 Microbial Community Abundance and Diversity Index under Chlorine Disinfection

时间	Shannon	Simpson	ACE	Chao
运行 4 个月(夏)	1.7	0.32	53.5	53.5
运行 10 个月(冬)	2.7	0.17	166.5	180.0
运行 15 个月(夏)	1.8	0.32	156.1	120.3

由表 1 紫外消毒方式下管壁微生物群落的丰度及多样性指数在不同的运行阶段可知, 运行 15 个月

后, Shannon 指数约为 4.1, 菌群丰度指数 Chao 约为 218.0。管段运行的前 10 个月中, 管段中的管壁微生物菌群丰度指数升高明显, 同时表征生物多样性的 Shannon 指数也有明显的变化。

由表 2 紫外-氯消毒方式下管壁微生物群落的丰度及多样性指数在不同的运行阶段可知, 运行 15 个月后, Shannon 指数约为 3.0, 菌群丰度指数 Chao 约为 116.7, 与紫外消毒方式下的管壁微生物菌群丰度指数与多样性指数相比明显较低。

由表 3 氯消毒方式下管壁微生物群落的丰度及多样性指数在不同的运行阶段可知, 运行 15 个月后, Shannon 指数约为 1.8, 菌群丰度指数 Chao 约为 120.3。管段运行的前 10 个月中, 管段中的管壁微生物菌群丰度指数升高明显, 同时表征生物多样性的 Shannon 指数也明显升高, 与紫外-氯消毒方式相比, 后者具有更高的生物多样性指数, 但菌群丰度指数相差不明显。

对比 3 种消毒方式下管壁微生物群落的丰度及多样性指数, 紫外消毒方式下的管壁微生物群落的菌属数目更多且每一菌属的均匀度更高。

2.2 不同消毒方式下供水管段管壁微生物的群落组成

在中试试验运行过程中, 在中试系统运行 4、10、15 个月时, 分别对不同消毒方式下运行的管段的管壁生物膜在属水平的群落结构组成情况进行对比分析, 如图 2~图 4 所示。

图 2 在属水平上比较了紫外消毒方式下在不同运行阶段中生物膜的细菌丰度, 在管段运行的不同阶段, 生物膜上的微生物在属水平的差异很大。在管段运行的不同阶段, 生丝微菌属 (*Hyphomicrobium*) 的相对丰度较高, 运行 4 个月时相对丰度为 20.59%, 运行 10 个月时相对丰度为 5.14%, 运行 15 个月时相对丰度为 9.16%, 是紫外消毒方式下的主要优势菌属。 *Hyphomicrobium* 属于反硝化细菌, 参与管段中的铁循环。研究^[7]表明, 反硝化菌参与 Fe-N 循环抑制腐蚀。在管段运行 4 个月时, 生物膜中的主要菌属中鞘脂单胞菌 (*Sphingopyxis*) 为 9.71%、*Sphingomonadaceae* 为 6.02%、慢生根瘤菌属 (*Bradyrhizobium*) 为 4.71% 和红杆菌属 (*Rhodobacter*) 为 3.45%。其中, *Bradyrhizobium* 均具有分泌铁载体的功能, 参与管段中的铁循环^[7]。同时, *Rhodobacter* 属于铁还原

菌^[8]。一般认为,管段中的铁还原菌对管段腐蚀有抑制作用,而管段中的铁氧化菌对管段腐蚀则有促进作用^[9]。由此看出,在管段最初运行阶段,紫外消毒方式下生物膜中的主要菌属基本都与管段中的铁循环反应有关,说明微生物对管段的腐蚀具有重要的影响。待管段继续稳定运行半年后,生物膜中的主要菌属博斯氏菌属(*Bosea*)为6.28%、浮霉菌属(*norank_f_Planctomycetaceae*)为5.32%、盖勒氏菌属(*norank_o_Gaiellales*)为5.22%、厌氧绳菌属(*norank_*

f_Anaerolineaceae)为5.05%、*Haliscomenobacter*为3.83%、土微菌属(*Pedomicrobium*)为3.81%以及赖文氏菌属(*Lewinella*)为3.32%。其中*Pedomicrobium*和*Bradyrhizobium*的作用基本相同,具有分泌铁载体的功能。研究^[10]表明,*Anaero-lineaceae*是一种典型的反硝化细菌,该菌属多与微生物死亡后细胞残体降解相关,同时,对有机物有一定的降解作用,*Planctomycetaceae*是一类厌氧氨氧化菌,具有硝化反应的特征,也具有反硝化反应的特征。待管段运行

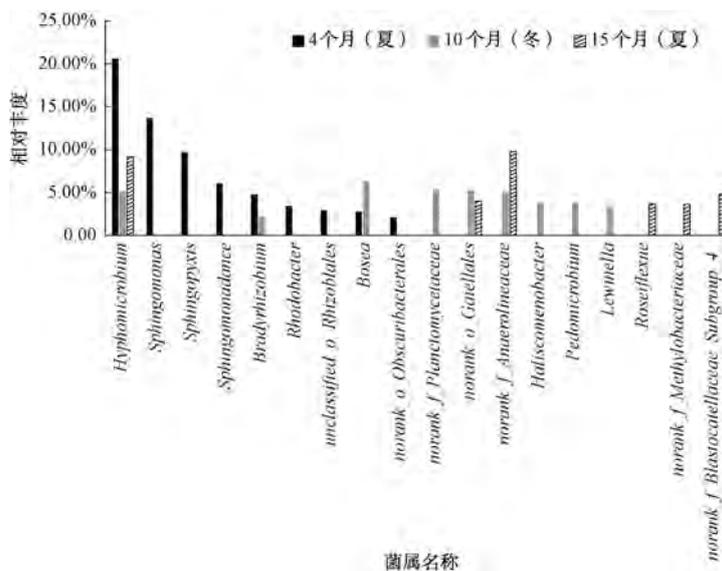


图2 紫外消毒方式下的生物膜中的微生物在属水平上的微生物群落分布

Fig. 2 Microbial Community Distribution of Microorganisms in the Genus Level in Biofilms under UV Disinfection

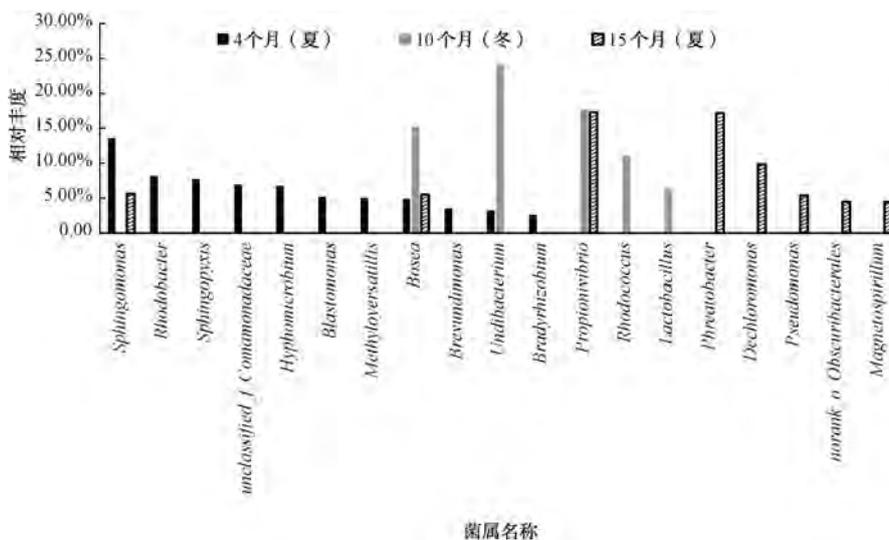


图3 紫外-氯消毒方式下的生物膜中的微生物在属水平上的微生物群落分布

Fig. 3 Microbial Community Distribution of Microorganisms in the Genus Level in Biofilms under UV-Chlorine Disinfection

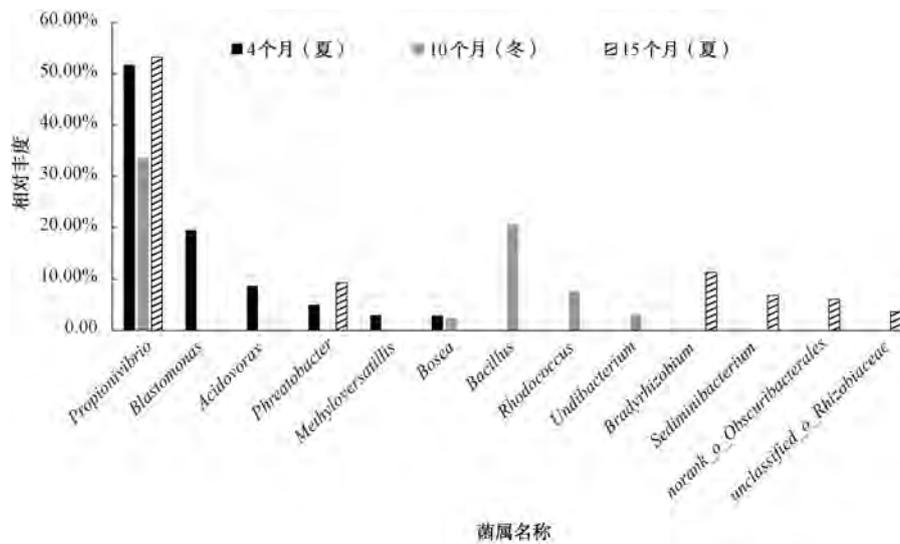


图4 氯消毒方式下的生物膜中的微生物在属水平上的微生物群落分布

Fig. 4 Microbial Community Distribution in the Genus Level of Microorganisms in Biofilms under Chlorine Disinfection

周期达到 15 个月时,玫瑰弯菌属 (*Roseiflexus*) 为 3.67%、*norank_o_Gaiellales* 为 3.99%、甲基杆菌属 (*norank_f_Methylobacteriaceae*) 为 3.65%、*norank_f_Blastocatellaceae_Subgroup* 为 4.83%、*norank_f_Anaerolineaceae* 为 9.75%。由此看出,管段运行的不同阶段中,具有反硝化功能的菌属为紫外消毒方式下的主要优势菌属。

图3在属水平上比较了紫外-氯消毒方式下在不同运行阶段中生物膜的细菌丰度,在管段运行的不同阶段,生物膜上的微生物在属水平上存在很大的差异。在管段运行的最初4个月,生物膜中的主要优势菌属鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*) 为 13.55%、*Rhodobacter* 为 8.13%、鞘脂单胞菌属 (*Sphingopyxis*) 为 7.73%、*unclassified_f_Comamonadaceae* 为 6.92%、*Hyphomicrobium* 为 6.73%、芽单胞菌属 (*Blastomonas*) 为 5.19%、*Methyloversatilis* 为 4.98%、*Bosea* 为 4.88%、短波单胞菌 (*Brevundimonas*) 为 3.48% 和 *Undibacterium* 为 3.24%,其中 *unclassified_f_Comamonadaceae* 是一种典型的反硝化细菌。*Sphingomonas* 和 *Sphingopyxis* 均具有分泌铁载体的功能,可以与铁离子形成稳定的螯合物^[7],在腐蚀产物表面形成保护层抑制铁释放。同时,*Rhodobacter* 属于铁还原菌,与铁之间作用可以促进铁氧化物的沉积形成 Fe_3O_4 ,进而更好地抑制腐蚀。随着管段运行时间的变化,生物膜中的

菌属变化极其明显。当管段运行 10 个月时,生物膜中的主要优势菌属 *Bosea* 为 15.22%、*Undibacterium* 为 24.18%、丙酸弧菌属 (*Propionivibrio*) 为 17.73%、红球菌属 (*Rhodococcus*) 为 11.06% 和乳杆菌属 (*Lactobacillus*) 为 6.29%。其中 *Rhodococcus* 是一种好氧反硝化菌,*Propionivibrio* 及 *Lactobacillus* 属于产酸菌,产酸细菌在生长过程中会分泌有机酸,这种有机酸会促进金属的点蚀^[11]。当管段运行达 15 个月时,*Propionivibrio* 为 17.31%、*Phreatobacter* 为 17.16%、脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*) 为 9.87%、*Pseudomonas* 为 5.4%、*norank_o_Obscuribacterales* 为 4.48% 和超磁细菌 (*Magnetospirillum*) 为 4.46%。其中,*Magnetospirillum* 在铁氧化物转化中起到很重要的作用,与形成 Fe_3O_4 有关^[9]。由此看出,管段运行的不同阶段中,具有反硝化功能的菌属成为优势菌属,主要与紫外参与消毒有关。同时,产酸菌在运行时期相对较长时,逐渐成为另一优势菌属,这与氯消毒剂参与反应有关。

图3、图4在属水平上比较了氯消毒方式下在不同运行阶段中生物膜的细菌丰度,在管段运行的不同阶段,生物膜上的微生物在属水平上存在很大的差异。在管段运行的不同阶段,*Propionivibrio* 的相对丰度较高,运行 4 个月时相对丰度为 51.73%,运行 10 个月时相对丰度为 33.64%,运行 15 个月时相对丰度为 53.29%,是氯消毒方式下的主要优势

菌属。该菌种是一种产酸菌,会促进金属的点蚀,因而在管段中形成的管垢基本是点状为主。管段运行4个月时,主要的菌属 *Blastomonas* 为 19.5%、食酸菌属 (*Acidovorax*) 为 8.6% 和 *Phreatobacter* 为 4.93%,其中,*Acidovorax* 的生长能够产生羟基醋酸,导致酸性环境的形成从而对腐蚀产生促进作用。同时,该菌属也属于铁氧化菌,在氧化二价铁的过程中直接产生 α -FeOOH^[11]。因而,在管段运行的初始阶段,较大比例的产酸菌出现在管段中,会促进金属的点蚀。管段运行10个月时,主要的菌属芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 为 20.69%、*Rhodococcus* 为 7.57%、*Undibacterium* 为 3.01%。其中,*Bacillus* 不仅含有可以产生孢子的微生物,还能够影响管道的电化学腐蚀过程,继而影响腐蚀产物的形成^[12]。待管段稳定运行达到15个月时,主要菌属 *Bradyrhizobium* 为 11.29%、沉积小杆菌属 (*Sediminibacterium*) 为 6.78%、*norank_o_Obscuribacterales* 为 6.03% 和 *Unclassified_o_Rhizobiaceae* 为 3.62%。其中,*Sediminibacterium* 是一种铁氧化菌,它通常对管段腐蚀有促进作用。由此看出,氯消毒方式下管段中的主要菌属对管垢的形成起到促进作用。

对比3种消毒方式下的管壁微生物群落的组成可看出:紫外消毒方式下,*Hypomicrobium* 的相对丰度在不同的运行阶段均保持较高的丰度,它可参与 Fe-N 循环,起到抑制腐蚀的作用;氯消毒方式下,*Propionivibrio* 的相对丰度在不同的运行阶段均保持较高的丰度,它可以促进金属的点蚀,起到促进腐蚀的作用;而紫外-氯消毒方式下,在管段运行初期,多数菌属与紫外消毒方式下初期的微生物群落组成相近,但随着管段运行的时长增加,*Propionivibrio* 占据较高的丰度,主要是氯消毒剂的作用逐渐突显导致。由此可认为,采用紫外和紫外-氯消毒方式可以对管网的腐蚀起到一定的抑制作用。

3 结论

(1)紫外消毒方式下,在管段运行的不同阶段,*Hypomicrobium* 的相对丰度较高,是紫外消毒方式下的主要优势菌属,属于反硝化细菌,参与管段中的铁循环,反硝化菌参与 Fe-N 循环抑制腐蚀。

(2)紫外-氯消毒方式下,管段运行的最初阶段,具有反硝化功能的菌属为优势菌属,随着管段运行时间的变化,生物膜中的菌属变化极其明显,产酸

菌逐渐成为另一优势菌属,这与氯消毒剂参与反应有关。产酸细菌在生长过程中会分泌有机酸,这种有机酸会促进金属的点蚀。

(3)氯消毒方式下,在管段运行的不同阶段,*Propionivibrio* 的相对丰度较高,是氯消毒方式下的主要优势菌属。该菌种是一种产酸菌,会促进金属的点蚀,因而在管段中形成的管垢基本是点状为主。而且,在管段运行初期较大比例的产酸菌出现在管段中,对管垢的形成起到促进作用。

参考文献

- [1] 杨泞琿. 饮用水消毒技术在自来水厂的应用与发展[J]. 水工业市场, 2016(3): 93-96.
YANG N H. Application and development of drinking water disinfection technology in waterworks [J]. Water-Industry Market, 2016(3): 93-96.
- [2] 蒋境, 辛卓航, 邹苏红, 等. pH、碱度和缓蚀剂对抑制给水管网铁释放的效果研究[J]. 给水排水, 2021, 47(s1): 422-427.
JIANG J, XIN Z H, ZOU S H, et al. Study on the control of iron release in water distribution systems by pH, alkalinity and corrosion inhibitor[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(s1): 422-427.
- [3] 姜文超, 蒋晖, 吴津津, 等. 腐蚀铸铁管中饮用水水质变化规律试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 117-121.
JIANG W C, JIANG H, WU J J, et al. Experimental study on quality variation of drinking water in corroded unlined iron pipes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 117-121.
- [4] 陈璐. 济南市铸铁管材给水管网中附着菌群的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
CHEN L. Bacteria community attached to iron pipe wall in drinking water distribution system of Jinan[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [5] 黄焯, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699-1713.
HUANG Y, LIU S J, JIANG C Y. Microbiologically influenced corrosion and mechanisms [J]. Microbiology China, 2017, 44(7): 1699-1713.
- [6] DUBIEL M, HSU C H, CHIEN C C, et al. Microbial iron respiration can protect steel from corrosion [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1440-1445.
- [7] ZHU Y, WANG H B, LI X X, et al. Characterization of biofilm and corrosion of cast iron pipes in drinking water distribution system with UV/Cl₂ disinfection [J]. Water Research, 2014, 60: 174-181. DOI: 10.1016/j.watres.2014.04.035.

- [8] 陈钰, 郑毅, 王晓彤, 等. 互花米草入侵对河口湿地还原菌群落结构及多样性影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4570-4580.
CHEN Y, ZHENG Y, WANG X T, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on iron-reducing bacteria community structure and diversity in estuarine wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12): 4570-4580.
- [9] 尹朗. 给水管网管垢与生物膜群落结构分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
YIN L. Analysis of community structure of corrosion scale and biofilm in water distribution system [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [10] MCILROY S J, KIRKEGAARD R H, DUEHOLM M S, et al. Culture-independent analyses reveal novel anaerolineaceae as abundant primary fermenters in anaerobic digesters treating waste activated sludge[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1134. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01134.
- [11] KLUEGLEIN N, KAPPLER A. Abiotic oxidation of Fe(II) by reactive nitrogen species in cultures of the nitrate-reducing Fe(II) oxidizer *Acidovorax* sp BoFeN1-questioning the existence of enzymatic Fe(II) oxidation[J]. Geobiology, 2013, 11(2): 180-190.
- [12] KOSTKA J E, DALTON D D, SKELTON H, et al. Growth of iron(III)-reducing bacteria on clay minerals as the sole electron acceptor and comparison of growth yields on a variety of oxidized iron forms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(12): 6256-6262.

(上接第 75 页)

- [5] 孙佳楠, 陈可可, 薛立波, 等. 一种高性能盐湖提锂纳滤膜的制备及研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(11): 120-125.
SUN J N, CHEN K K, XUE L B, et al. Preparation and research of a high performance nanofiltration membrane for lithium extraction from salt lake[J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(11): 120-125.
- [6] DU Y, PRAMANIK B K, ZHANG Y, et al. Recent advances in the theory and application of nanofiltration: A review [J]. Current Pollution Reports, 2022, 8: 51-80. DOI: 10.1007/s40726-021-00208-1.
- [7] KANG D D, SHAO H J, CHEN G J, et al. Fabrication of highly permeable PVDF loose nanofiltration composite membranes for the effective separation of dye/salt mixtures [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 621: 118951. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118951.
- [8] DOMENECH N G, PURCELL-MILTON, F, GUN'KO Y K. Recent progress and future prospects in development of advanced materials for nanofiltration [J]. Materialstoday Communication, 2020, 23: 100888. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100888.
- [9] LIN Y C, CHAU C M, WANG D K, et al. Enhancing the antifouling properties of a PVDF membrane for protein separation by grafting branch-like zwitterions via a novel amphiphilic SMA-HEA linker [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 624: 119126. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119126.
- [10] PARK S, YANG E, PARK H, et al. Fabrication of functionalized halloysite nanotube blended ultrafiltration membranes for high flux and fouling resistance [J]. Environmental Engineering Research, 2020, 25(5): 771-778.
- [11] MA C, HU J, SUN W, et al. Graphene oxide-polyethylene glycol incorporated PVDF nanocomposite ultrafiltration membrane with enhanced hydrophilicity, permeability, and antifouling performance [J]. Chemosphere, 2020, 253: 126649. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126649.
- [12] ZHANG L, ZHANG R, JI M, et al. Polyamide nanofiltration membrane with high mono/divalent salt selectivity via pre-diffusion interfacial polymerization [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 636: 119478. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119478.
- [13] ZHANG Y, WAN Y, PAN G Y, et al. Preparation of high performance polyamide membrane by surface modification method for desalination [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 573: 11-20. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.11.068.
- [14] GUO C, SHI H, WANG W, et al. Improvement of PVDF nanofiltration membrane potential, separation and anti-fouling performance by electret treatment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 722: 137816. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137816.
- [15] TEOW Y H, SUM J Y, HO K C, et al. 3 - Principles of nanofiltration membrane processes [J]. Osmosis Engineering, 2021: 53-95. DOI: 10.1016/B978-0-12-821016-1.00014-0.