

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.001

寒区湖库型水源供水系统中耐氯菌的生长

祝泽兵^{1,2,3}, 吴晨光^{1,2}, 钟丹^{1,2}, 袁一星^{1,2}, 单莉莉^{1,2}, 袁媛^{1,2}, 魏星际⁴, 张杰^{1,2}

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 3. 华东交通大学 土木建筑学院, 330013 南昌; 4. 哈尔滨供水工程有限责任公司, 150060 哈尔滨)

摘要: 研究供水系统中耐氯菌的生长对饮用水中微生物安全的评估、预防和控制至关重要, 为此, 以寒区湖库型水源供水系统的主体水及生物膜为研究对象, 对其中的异养菌和耐氯菌进行了检测, 并利用扫描电子显微镜观察了生物膜的生物相。结果表明: 自来水在管网输送过程中, 余氯质量浓度大于 0.2 mg/L 的主体水中仍然存在细菌再生长现象。耐氯菌在所研究的供水系统中普遍存在, 经水厂消毒和管网输送后主体水中的耐氯菌数量小于 350 CFU/mL, 而生物膜中耐氯菌数目一般高于主体水的耐氯菌数目 2 个数量级。未经消毒处理的滤后水和生物膜中耐氯菌数目均最多, 而在清水池中生长的细菌大多比较耐氯。供水系统生物膜中的微生物能见杆菌和球菌, 以杆菌居多。

关键词: 耐氯菌; 生长; 湖库型水源; 供水系统; 主体水; 生物膜

中图分类号: TU991.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)08-0001-06

The growth of chlorine resistant bacteria in water supply sourced from lakes and reservoirs in cold region

ZHU Zebing^{1,2,3}, WU Chenguang^{1,2}, ZHONG Dan^{1,2}, YUAN Yixing^{1,2}, SHAN Lili^{1,2},
YUAN Yuan^{1,2}, WEI Xingji⁴, ZHANG Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China;
2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013 Nanchang, China;
4. Harbin Water Supply Engineering Co. Ltd., 150060 Harbin, China)

Abstract: The study on the growth of chlorine resistant bacteria in water supply systems is critical for the assessment, control, and prevention of microbiological safety associated with drinking water. In this study, bulk water and biofilms in water supply system sourced from lakes and reservoirs in cold region were investigated by the detection of heterotrophic bacteria and chlorine resistant bacteria, and the biota in the biofilm were observed by scanning electron microscope. Results showed that the bacteria regrowth still existed in the bulk water even within more than 0.20 mg/L free chlorine in the distribution systems. Chlorine-resistant bacteria survived pervasively in the studied water supply system. The chlorine-resistant bacteria in post-chlorination and distributed water were less than 350 CFU/mL. The number of chlorine-resistant bacteria in the biofilm was two orders of magnitude higher than that of the bulk water in general. The chlorine resistant bacteria presented most in pre-chlorination of sand filter water and biofilm, while almost all viable bacteria in the clearwell were chlorine-resistant bacteria. Microbial morphologies in the biofilms of water supply systems were composed of cocci and rod, with the latter especially predominated in the biofilms.

Keywords: chlorine-resistant bacteria; growth; lake and reservoir water resource; water supply system; bulk water; biofilm

收稿日期: 2014-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金(51308149); 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2014TS08); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07408-002-004-002).

作者简介: 祝泽兵(1984—), 男, 博士研究生;
袁一星(1957—), 男, 教授, 博士生导师;
张杰(1938—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

通信作者: 钟丹, zhongdan2001@163.com.

由于氯的消毒效率高、稳定性好、易于使用、成本低廉等优势, 仍然是使用最广泛的消毒剂^[1]. 研究发现在保持一定余氯浓度的条件下, 仍然有细菌能够存活, 甚至有一部分细菌能够在含有较高余氯浓度的自来水厂、管网等供水系统中生存. 这些对氯具有较高耐受性的细菌被称作“耐氯菌”(chlorine-resistant bacteria, 也译为“抗氯菌”)^[2-4]. 然而, 由于

消毒效率跟测试的条件、方法密切相关,在科学的范畴上,耐氯菌的耐受性只是一个相对的概念,并不是一个准确的术语^[5-6].

加氯消毒的过程本身就是对耐氯菌选择的过程^[5],也会使耐氯菌成为优势菌^[7].这些存在于供水系统中的耐氯菌会对饮用水的安全性造成巨大危害.一方面有些耐氯菌本身就是病原菌或者条件致病菌,如分枝杆菌(*Mycobacterium* spp.)、军团菌(*Legionella* spp.)、铜绿色假单胞杆菌(*Pseudomonas aeruginosa*)、金黄葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)等^[8-10];另一方面,由耐氯菌导致氯消毒的失效,并由此引发供水管网中的细菌再生长,进一步增加了细菌的耐氯性,使得供水管网中的细菌状况进一步加剧,进而引起用户龙头水细菌总数、色度、浊度等水质指标超标^[11-13].由于耐氯菌处于一个贫营养条件下并维持较高浓度余氯的极端环境体系下,大大限制了对供水管网中耐氯菌的研究.为此,对东北某市寒区湖库型水源净水厂加氯前后和供水管网中不

同水龄、管道材质、管龄的主体水和生物膜中耐氯菌的变化规律进行研究,以期为供水微生物安全的评价、预防和控制提供理论基础.

1 实 验

1.1 寒区湖库型水源供水系统描述

该供水系统由典型的寒区湖库型水源净水厂供水^[14],原水浊度为 0.34~14 NTU,pH 6.10~7.49,碱度(CaCO_3)8~48 mg/L,氨氮为 0.04~0.20 mg/L.检测数据均值中除大肠菌群为Ⅱ~Ⅲ类外,其他项目均满足Ⅱ类水质.净水厂建于 2006—2009 年,常规处理工艺为机械混合+水平轴机械絮凝+斜管沉淀+双层滤料翻板滤池过滤+液氯消毒,设计总供水能力 $90\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,目前实际最高日供水量约为 $79\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均日供水量 $67\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$.

根据该市的区域供水管网特征和水质特点,选取具有代表性的供水管网开展对比分析,该供水系统取样点基础信息见表 1.

表 1 供水系统取样点基础信息

编号	取样点	水力停留时间/h	距水厂(二泵站)距离/km	材质(管材)和建设时间	规格
H1	滤池			无烟煤和石英砂,建于 2006—2009 年	单格滤池面积 116 m ² ,滤池高度 4.20 m
H2	清水池	0	0	水泥砂浆,建于 2006—2009 年	121 m×90 m×4.6 m,死库容为深 0.5 m
H3	水厂食堂	0.1	0.3	PPR 管,建于 2012 年	
H4	西直小区	9.5	11.5	进水管材(铸铁和镀锌铁),水箱材质为玻璃钢,建于 20 世纪 90 年代初	4.5 m×3.0 m×2.25 m,死库容为深 0.1 m
H5	A10 公寓	12.0	15.0	进水管材(铸铁和镀锌铁),水箱材质为镀锌铁,建于 20 世纪 80 年代初	6.0 m×4.0 m×2.45 m,死库容为深 0.1 m
H6	二区水池	17.0	22.0	进水管材(铸铁),水箱材质为水泥瓷砖,建于 20 世纪 80 年代末	8.0 m×6.0 m×3.2 m,死库容为深 0.15 m

1.2 分析测定方法

在该市某净水厂清水池和供水系统(二次供水水箱)清洗期间(一般 1 年清洗 1 次,清洗时间为 4 月末—6 月初或 9—10 月),于净水厂滤池生物膜直接采集滤池反冲洗前期废水颗粒(干样约为 10 g),采集清水池出水端下部高 0.5 m 处面积约 50 cm×50 cm 的池壁生物膜,水厂食堂连接水龙头 PPR 管面积约 100 cm² 的管内壁生物膜,二次供水水箱进水端下部高 0.15 m 处面积约 30 cm×30 cm 池壁生物膜.在清洗前,开展供水系统的主体水水质测定,为期 1 a,每月采集水样一次,包括水厂滤后水、清水池出水、食堂龙头水和各二次供水水箱市政进水 5 L.所取得的生物膜和主体水水样及时运回实验室,并保存于 4 ℃ 冰箱,在 8 h 内进行相关项目的分析.其中耐氯性细菌检测的水样与生物膜在同一时期内采集.

1.2.1 生物膜和进出水异养菌平板计数(HPC)测定

将待计数的生物膜悬浮液置于超声波振荡器中冰浴超声振荡 1 min,间歇 1 min,如此重复 3 次,然后

再涡流振荡 30 s,使生物膜中的细菌能够均匀分布在悬浮液中,之后将悬浮液稀释适宜质量浓度在 R2A 固体培养基上进行异养菌总数平板计数(HPC-R2A)^[15].R2A 固体培养基主要成分:酵母 0.5 g,酪蛋白酸水解物 0.5 g,可溶性淀粉 0.5 g,MgSO₄·7H₂O 0.05 g,胰蛋白胍 0.25 g,蛋白胍 0.25 g,葡萄糖 0.5 g,丙酮酸钠 0.3 g,K₂HPO₄ 0.3 g,琼脂 15 g,蒸馏水 1 L;并用磷酸氢二钠和磷酸二氢钠调节 pH 为 7.2~7.4.主体水、滤后水和供水末端水样直接倍比稀释,涂布于 R2A 固体培养基上;清水池和供水前端水样用 0.22 μm 滤膜过滤 10~100 mL 的水样,然后将滤膜截滤微生物的一面向上贴于 R2A 固体培养基上进行 HPC 计数.将处理好的 R2A 培养基平板放于 20 ℃ 倒置恒温培养 10 d,即可获得异养菌平板计数.

1.2.2 耐氯性细菌检测

耐氯性细菌检测参考陆品品^[16]和 Mathieu 等^[17]的方法,并做适当修改.对于生物膜样品,在加氯前,引入超声波和漩涡振荡法分散细胞群体生物

膜,使生物膜中的个体细胞释放出来,尽量减少消毒剂在生物膜基质中扩散限制和反应抑制作用^[4, 18],使得氯能渗透到更多细菌个体细胞表面,耐氯的细菌得以检出.检测方法如图 1 所示,将混匀的生物膜悬浮液(经 1.2.1 方法处理)和主体水样品,置于经过灭菌处理的取样瓶(1 L 棕色细口瓶,密封).其中 1 份样品保持一定质量浓度的 Cl₂ 消毒剂(根据出厂水的平均余氯质量浓度,加入 NaClO 溶液使 pH 调至近中性.由于生物膜悬浮液会消耗更多的余氯,在生物膜悬浮液中比主体水中多加 20%~50% 的余氯溶液^[19],混匀,待余氯稳定后再测余氯质量浓度,使主体水和生物膜悬浮液的余氯终质量浓度均保持在 0.60 mg/L),常温过夜静置 12 h(根据该市的区域供水管网特征和水质特点,选取处于该市供水管网中间位置的 H5 采样点的水力停留时间,具有代表性);另 1 份样品加入 Na₂S₂O₃,中止消毒,冷藏保存.12 h 后,依据 1.2.1 的检测方法取样测定这 2 瓶水样中的 HPC-R2A 值,重复 3 次以中止消毒样品中 HPC-R2A 值作为管网出水细菌本底值,另一份样品为维持消毒剂作用 12 h 后 HPC-R2A 值,作为管网出水可能的耐氯菌检测值.

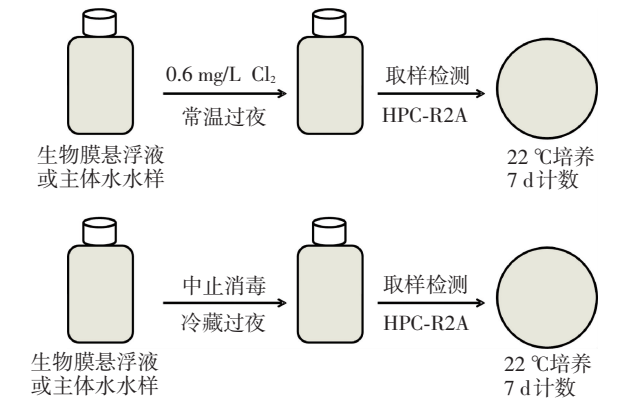


图 1 耐氯性细菌检测方法示意

1.2.3 主体水其他水质测定方法

试验中温度、浊度、pH、NH₄⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、TOC、总铁、总溶解性固体、总硬度、总碱度等常规指标分析均按国家标准方法测定^[20],余氯的测定采用DPD

(N,N-二甲基-1,4-二苯胺)比色法.

1.2.4 扫描电镜观察

采用扫描电镜观察上述生物膜的形态,扫描电镜样品前处理方法:样品在 2.5% 的戊二酸溶液中 4 ℃ 固定过夜,倒掉固定液,用 0.1 mol/L、pH 7.0 的磷酸盐缓冲液漂洗样品 3 次,每次 15 min;冷冻干燥;样品黏附在样品台上,喷金,在 Quanta 200 环境扫描电子显微镜(美国 FEI 公司)上观察.

1.3 数据处理方法

耐氯性细菌检测时加入 0.60 mg/L 的 Cl₂,经 12 h 的灭活率为 $D = \log_{10}(N_0/N_c)$,其中 N_0 为不加氯 12 h 后的 HPC-R2A 值, N_c 为加氯 12 h 后的 HPC-R2A 值.运用 SPSS 13.0 统计分析软件对常规指标和细菌总数等进行方差分析和相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 供水系统主体水细菌再生长

表 2 为供水系统不同取样点主体水水质,可以看出,该供水系统的出厂水(清水池水样)均优于《生活饮用水卫生标准 GB 5749—2006》规定的相应水质指标,出水水质较好.如表 1,2 所示,本研究所选择的供水系统在一个完整的监测周期内,细菌再生长现象随着供水管线的延长有增大的趋势,但相关不显著.供水管网中细菌数目与管材、管龄相关度不明显,在新管网(管龄 1~4 a)中细菌再生长现象仍然很普遍,很严重.供水管网中细菌数目与消毒剂质量浓度呈一定的负相关($r = -0.51$, $p = 0.04$),由于消毒剂的存在细菌再生长现象在管网中受到一定程度的抑制,但这种抑制很有限,在余氯质量浓度大于 0.2 mg/L 时仍然存在大量的细菌.Zhang 等^[21]在美国北卡罗莱纳州 Durham 县的两座加氯供水系统也发现了细菌再生长现象,并且认为消毒剂质量浓度是决定 HPC 水平的最重要因子,管网中的细菌再生长是管网中水质化学、物理及运行参数等复杂交互作用的结果,而不是简单的统计学关系.因此,需要重点开展供水管网主体水和生物膜细菌再生长及耐氯性细菌的研究.

表 2 供水系统不同取样点主体水水质

取样点	水温/ ℃	浊度/ NTU	pH	$\rho(\text{余氯})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TOC})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{总铁})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总溶解 性固体/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总硬度(以 CaCO ₃ 计, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总碱度 (以 CaCO ₃ 计, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	HPC (R2A, CFU·mL ⁻¹)
滤后水	9.1	0.51	6.83	—	0.170	8.36	3.49	2.12	0.16	39.3	25.6	22.3	20 311
清水池	9.5	0.32	6.91	0.62	0.110	12.54	4.80	1.87	0.11	37.8	29.3	21.1	43
水厂食堂	9.7	0.42	6.93	0.41	0.130	13.36	6.34	1.98	0.10	39.4	31.5	20.2	138
西直小区	10.3	0.35	6.92	0.39	0.092	13.19	5.52	2.01	0.15	39.5	25.7	22.3	145
A10 公寓	10.4	0.31	6.96	0.31	0.120	13.64	6.18	2.09	0.16	39.7	25.3	23.5	191
工大二区	10.5	0.43	6.95	0.24	0.069	14.02	6.51	1.93	0.19	43.1	23.8	25.5	362

2.2 供水系统主体水和生物膜中耐氯性细菌

2.2.1 主体水中耐氯性细菌的存在性分析

如图 2 所示,所选取的 6 个取样点中,主体水中总细菌和耐氯细菌的存在差别很大.该供水系统中异养菌总数在 $50 \sim 22\,000$ CFU/mL,滤后水在清水池消毒后达近 3-log 灭活率,加氯消毒去除了大部分微生物.在不同水样中继续加入 0.6 mg/L 的 Cl_2 ,发现各采样点仍存在一定数目的细菌($130 \sim 830$ CFU/mL),可以认为这部分细菌具有较高的抗氯性,为耐氯菌^[3, 6].滤后水中的耐氯菌数目最多(830 CFU/mL),显著大于其他加氯后主体水的耐氯菌数目($P > 0.01$).在出厂水 0.6 mg/L 余氯水平下,自来水经管网输送,耐氯菌的数量随着管线的延长逐渐增加,但差异无统计学意义($P > 0.05$),其中存在的耐氯菌在管网中一般小于 350 CFU/mL,各管网采样点的耐氯性检测的氯灭活率均不到 35% .研究表明,在出厂水水质较好的管网中,管网生物膜是主体水微生物的主要来源^[22],因此,可以推测该部分细菌可能主要来源于管壁生物膜的脱落,而脱落的管壁生物膜的微生物在氯的存在下仍然可以再生长^[21, 23],这些脱落的管壁生物膜中的微生物势必会对饮用水安全性造成危害.生物膜的存在对部分细菌起到了保护作用,使其免于消毒剂的灭活,从而在高质量浓度余氯的供水管网中存活^[1, 4],而且悬浮颗粒上的细菌与悬浮菌相比抗氯性至少增加 44% ^[24].因此,管壁生物膜的冲刷脱落是该供水管网出水细菌耐氯的重要来源之一.

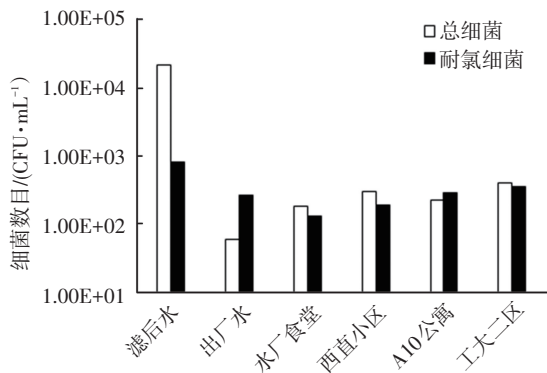


图 2 供水系统主体水中总细菌和耐氯细菌数目

2.2.2 生物膜中耐氯性细菌的存在性分析

图 3 是该供水系统生物膜中总细菌和耐氯细菌的分布.在水厂反冲洗废水颗粒中存在 10^9 CFU/g 的细菌,经耐氯菌检测后还存在 10^4 CFU/g,显著大于其他加氯后的生物膜耐氯菌数目($P < 0.05$).在清水池壁上的总细菌和耐氯菌数目只有 10^3 CFU/cm²,这说明经水厂过滤后截留了大量的细菌,而耐氯菌相对不容易被截留.研究表明,在经过滤处理的加氯(约为 0.5 mg/L Cl_2)自来水中发现了大量的极微细菌($< 0.20\text{ }\mu\text{m}$)^[25].经消毒输送至管网后,管网生物膜

的总细菌数超过 10^6 CFU/cm²,耐氯菌数目也维持在 10^3 CFU/cm² 水平.结果表明,随着管网延伸,管网生物膜的耐氯细菌数目也呈增长趋势.随着消毒剂质量浓度的下降,管网生物膜中的细菌数目也在逐步上升,其中耐氯细菌也会进一步增加.

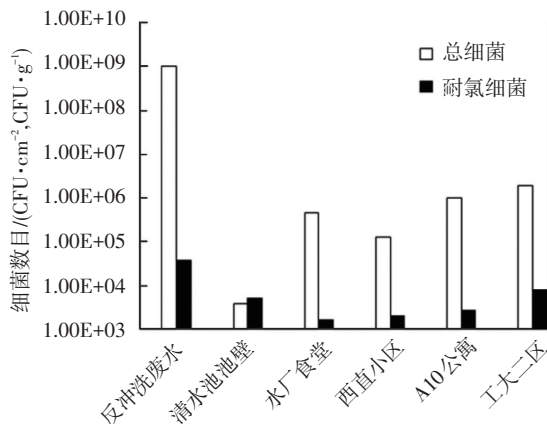


图 3 供水系统生物膜总细菌和耐氯细菌数目

2.2.3 主体水和生物膜中耐氯性细菌的对比

图 4 为该供水系统主体水和生物膜悬浮液中细菌灭活率的对比.与主体水相比,生物膜悬浮液中的细菌灭活率均较大.一般认为细菌的抗氯机制可以分为细菌的个体原因和群体原因^[18],即可以分为浮游生物的抗氯性和细菌群体生物膜的抗氯性,实际供水系统中细菌群体生物膜抗氯性占大多数^[4, 18].由于消毒剂在细菌群体生物膜基质中的扩散限制和反应抑制,消毒剂不能深入生物膜底层;同时,细菌长期在亚致死质量浓度的消毒剂中生长也会导致部分个体细菌的抗氯性增加^[4, 18].在生物膜中细菌对消毒剂的抗性,很多时候并不是该细菌的真正抗性,当生物膜基质的保护作用得以消除,这部分细菌将会被消毒剂杀死^[1, 4].而本研究主要检测的是个体细菌的耐氯性,因此,生物膜悬浮液中的大部分细菌会被氯杀灭.清水池水样中,在 0.6 mg/L 的余氯条件下,细菌数目还会继续增加,这说明在高质量浓度余氯生长的细菌大多比较耐氯.虽然主体水中的细菌灭活率要小于生物膜中的细菌灭活率,但生物膜中细菌数目高于主体水中细菌数目 $3 \sim 5$ 个数量级,生物膜中耐氯菌数目也一般高于主体水的耐氯菌数目 2 个数量级,因此,在生物膜中更容易发现耐氯菌.由于生物膜中存在诸如胞外聚合物(EPS)等复杂的组分和更多的群体细菌数目,减少了消毒剂在生物膜基质中的扩散限制和反应抑制作用,使得生物膜中细菌具有更强的抗氯性^[18].本研究在检测生物膜中的耐氯菌时,首先通过超声波和漩涡振荡法分散细胞群体生物膜,使生物膜中的个体细胞释放出来,尽量减少消毒剂在生物膜基质中的扩散限制和反应抑制作用,也尽量使“真正”的耐氯细菌能得以检出.

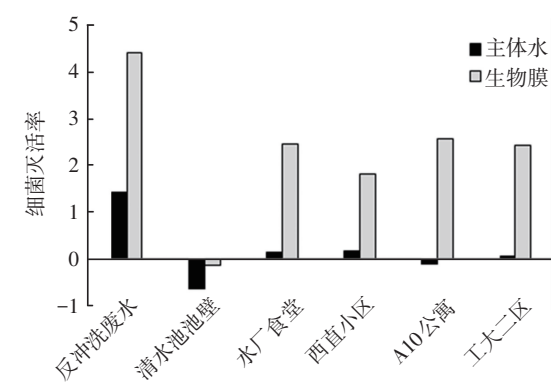


图 4 供水系统主体水和生物膜悬浮液中细菌灭活率的对比

管网生物膜是主体水微生物的主要来源,是导致水质恶化的主要原因^[9,22].然而从供水系统中完全去除生物膜几乎是不可能的^[9],可以从以下几个方面来控制和减少生物膜的生长:采用深度处理工艺降低出厂水的营养物质,采用 UV+液氯联合消毒降低出厂水的微生物数量,提高余氯质量浓度,管网中二次加氯,增大管网内的水流速,在用户入管尽量采用不锈钢和 PE 材质的管道材料;对于已经产生较多管网生物膜的区域,可以定期进行消毒剂+冲洗联合清洗方式去除大部分生物膜,在用户终端采用一些水净化和消毒(UV 或 O₃)装置^[4,9,15,26].

2.3 供水系统生物膜扫描电镜观察

供水系统 6 个样品生物膜的扫描电镜观察结果见图 5.可以看出,在水厂滤池反冲洗前期废水的颗粒中能明显看到微生物,能见杆菌和球菌,以杆菌居多,经加氯消毒后在清水池池壁上未观察到微生物.出厂水在管网输送过程中,生物膜中的微生物细胞数目随着输送距离的增加有增多的趋势.在管网的中末端,镀锌铁和水泥瓷砖材料上的生物膜中微生物数量较多,且能见细菌团聚的形式存在,并形成了明显的腐蚀瘤.电镜照片显示腐蚀瘤内部是丰富的微生物,亦能见杆菌和球菌,以杆菌居多.玻璃钢材料上的生物膜中微生物数量也较多,而 PPR 管材上的生物膜中微生物数量相对较少,这可能是由于只经过了很短的管网输送(300 m).上述观察结果与细菌总数趋势完全一致.而在微生物种类上,这几种材料上生物膜中的微生物均能见杆菌和球菌,以杆菌居多.王薇等^[27]和张向谊^[28]等研究给水管网管壁微生物生长特性时发现,给水管网管壁中的微生物以球菌和杆菌为主,与本文研究结果基本一致.从电镜照片上看,不同材料上附着的生物膜的微生物形态相对比较接近,能见杆菌和球菌,以杆菌居多,差异不明显.

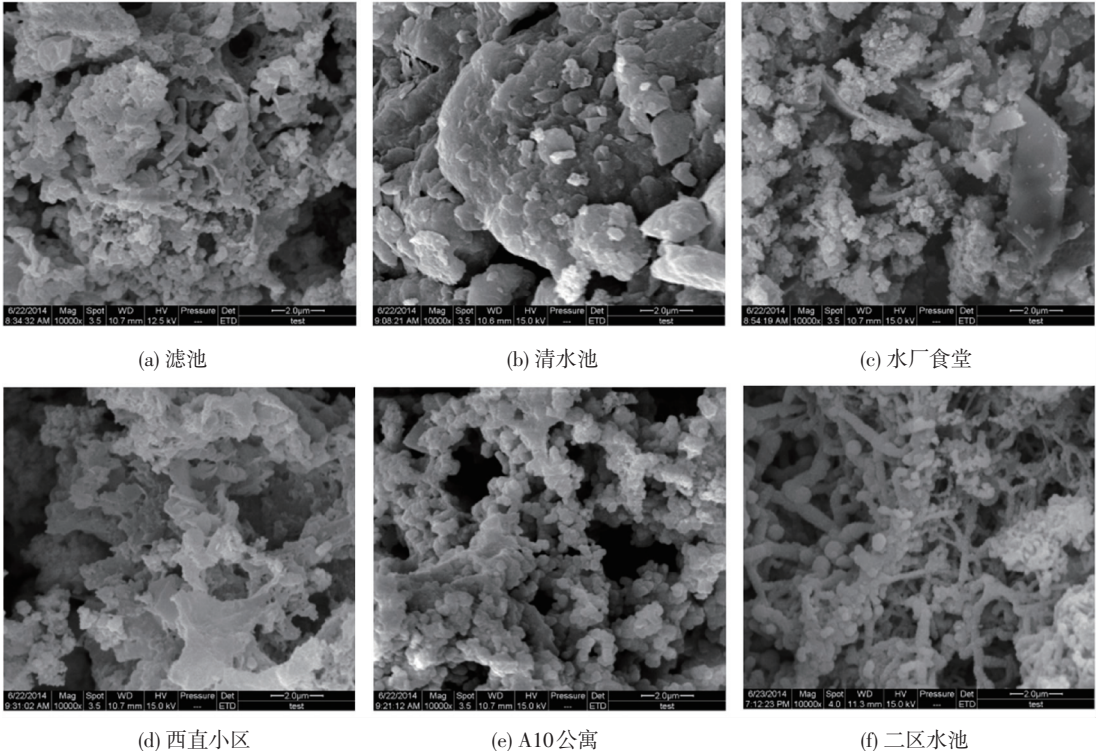


图 5 供水系统生物膜扫描电镜观察结果

3 结 论

1) 细菌再生长现象随着供水管线的延长有增大的趋势,但相关不显著.供水管网中细菌数目与管材、管龄相关度不明显,在新管网(管龄 1~4 a)中细

菌再生长现象仍然很普遍,很严重.供水管网中细菌数目与消毒剂质量浓度呈一定的负相关.

2) 耐氯菌在该供水系统中普遍存在,生物膜中耐氯菌数目一般高于主体水中 2 个数量级.在清水池高质量浓度余氯环境下生长的细菌大多比较耐氯.

3)不同供水材料上生物膜的微生物形态能见杆菌和球菌,以杆菌居多。

参考文献

- [1] SIMOES L C, SIMOES M, VIEIRA M J. Influence of the diversity of bacterial isolates from drinking water on resistance of biofilms to disinfection [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(19): 6673-6679.
- [2] RIDGWAY H, OLSON B. Chlorine resistance patterns of bacteria from two drinking water distribution systems [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 44(4): 972-987.
- [3] SUN Wenjun, LIU Wenjun, CUI Lifeng, et al. Characterization and identification of a chlorine-resistant bacterium, *Sphingomonas* TS001, from a model drinking water distribution system [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 169-175.
- [4] BRIDIER A, BRIANDET R, THOMAS V, et al. Resistance of bacterial biofilms to disinfectants: a review [J]. *Biofouling*, 2011, 27(9): 1017-1032.
- [5] LANGSRUD S, SIDHU M S, HEIR E, et al. Bacterial disinfectant resistance-a challenge for the food industry [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 51(4): 283-290.
- [6] ZHANG Minglu, LIU Wenjun, NIE Xuebiao, et al. Molecular analysis of bacterial communities in biofilms of a drinking water clearwell [J]. *Microbes and Environments*, 2012, 27(4): 443-448.
- [7] LI Dan, ZENG Siyu, GU A Z, et al. Inactivation, reactivation and regrowth of indigenous bacteria in reclaimed water after chlorine disinfection of a municipal wastewater treatment plant [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2013, 25(7): 1319-1325.
- [8] [日]金子光美,著.供水系统病原微生物对策[M].刘云俊,译.北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [9] SIMOES L C, SIMOES M. Biofilms in drinking water: problems and solutions [J]. *Rsc Advances*, 2013, 3(8): 2520-2533.
- [10] BOLTON K J, DODD C E R, MEAD G C, et al. Chlorine resistance of strains of *staphylococcus aureus* isolated from poultry-processing plants [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1988, 6(2): 31-34.
- [11] LIU G, BAKKER G L, LI S, et al. Pyrosequencing reveals bacterial communities in unchlorinated drinking water distribution system: an integral study of bulk water, suspended solids, loose deposits, and pipe wall biofilm [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5467-5476.
- [12] MANUEL C M, NUNES O C, MELO L F. Unsteady state flow and stagnation in distribution systems affect the biological stability of drinking water [J]. *Biofouling*, 2010, 26(2): 129-139.
- [13] GINIGE M P, WYLIE J, PLUMB J. Influence of biofilms on iron and manganese deposition in drinking water distribution systems [J]. *Biofouling*, 2011, 27(2): 151-163.
- [14] 张成,刘胜利,崔崇威,等.严寒地区湖库型水源净水厂运行管理[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.
- [15] ZHU Zebing, WU Chenguang, ZHONG Dan, et al. Effects of pipe materials on chlorine-resistant biofilm formation under long-term high chlorine level [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 173(6): 1564-1578.
- [16] 陆品品.南方某市氯胺消毒管网生物稳定特性及控制技术[D].北京:清华大学,2013.
- [17] MATHIEU L, BOUTELEUX C, FASS S, et al. Reversible shift in the alpha-, beta- and gamma-proteobacteria populations of drinking water biofilms during discontinuous chlorination [J]. *Water Research*, 2009, 43(14): 3375-3386.
- [18] CHAPMAN J S. Disinfectant resistance mechanisms, cross-resistance, and co-resistance [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 51(4): 271-276.
- [19] XUE Z, SENDAMANGALAM V R, GRUDEN C L, et al. Multiple roles of extracellular polymeric substances on resistance of biofilm and detached clusters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(24): 13212-13219.
- [20] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [21] ZHANG W, DIGIANO F A. Comparison of bacterial regrowth in distribution systems using free chlorine and chloramine: a statistical study of causative factors [J]. *Water Research*, 2002, 36(6): 1469-1482.
- [22] BERRY D, XI C, RASKIN L. Microbial ecology of drinking water distribution systems [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, 17(3): 297-302.
- [23] XUE Z, SEO Y. Impact of chlorine disinfection on redistribution of cell clusters from biofilms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(3): 1365-1372.
- [24] LYNCH F, TOMLINSON S, PALOMBO E A, et al. An epifluorescence-based evaluation of the effects of short-term particle association on the chlorination of surface water bacteria [J]. *Water Research*, 2014, 63: 199-208.
- [25] SILBAQ F S. Viable ultramicrocells in drinking water [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 106(1): 106-117.
- [26] MATHIEU L, BERTRAND I, ABE Y, et al. Drinking water biofilm cohesiveness changes under chlorination or hydrodynamic stress [J]. *Water Research*, 2014, 55: 175-184.
- [27] 王薇,任红星,胡震超,等.管材对供水管网生物膜微生物种群多样性的影响研究[J].*环境科学学报*, 2015, 35(3): 699-704.
- [28] 张向道,刘文君,潘虹,等.某市给水管网管壁中微生物生长特性研究[J].*给水排水*, 2005(10): 1-6.