

城镇水系统研究与应用

范晶璟, 白晓慧. 二次供水系统不锈钢改造对水质微生物安全性的成效[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 136-141.

FAN J J, BAI X H. Effect of stainless steel reconstruction on microbial safety of water quality in secondary water supply system[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 136-141.

二次供水系统不锈钢改造对水质微生物安全性的成效

范晶璟^{1,*}, 白晓慧²

(1. 上海临港供排水发展有限公司, 上海 201305; 2. 上海交通大学生命科学技术学院, 上海 200240)

摘要 二次供水系统材质对输配水质有重要影响。为了研究二次供水系统更新不锈钢材质对管网微生物水质改善成效, 采用基于 R2A 贫营养培养基的异养菌平板计数(HPC)检测方法和基于 16S rRNA 基因高通量测序的微生物组学技术对上海市直饮水示范区不锈钢材质改造前后的微生物质量进行了评估。结果表明, 不锈钢管道改造可以有效降低二次供水系统中的微生物数量。在夏季对供水末端实施不锈钢材质改造后, 供水水质中 HPC 数量明显下降。其中, 高层泵后从改造前的平均 968 CFU/mL 降至 178 CFU/mL, 降幅约达 82%; 6 楼立管从改造前的平均 1 383 CFU/mL 降至 88 CFU/mL 降幅约达 93.7%。未改造小区 B 的 HPC 整体水平高于改造小区 A, 改造后的小区 B 的 HPC 数量低于改造前。温度对二次供水末端微生物数量影响明显, 10 月数量明显高于 11 月和 12 月。从原水、出厂水到泵房水池进水, 优势菌属由不动杆菌属转变为假单胞菌属, 入户后 *Phreatobacter* 菌属逐渐占据优势。改造前的小区 B 相比改造后小区 A 拥有潜在致病表型和生物膜形成能力表型的微生物相对丰度更高, 并主要由高丰度的不动杆菌属组成。二次供水不锈钢管材更换可以通过降低有关生物膜形成功能相关和致病相关的细菌丰度来控制饮用水中的部分微生物风险。

关键词 饮用水 不锈钢管材 异养菌平板计数 微生物组高通量测序 管网水质

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)09-0136-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.09.017

Effect of Stainless Steel Reconstruction on Microbial Safety of Water Quality in Secondary Water Supply System

FAN Jingjing^{1,*}, BAI Xiaohui²

(1. Shanghai Lingang Water & Wastewater Development Co., Ltd., Shanghai 201305, China;

2. School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The material in secondary water supply system has a significant impact on the supplied water quality. In order to study the effect of stainless steel material renewal on the improvement of microbial water quality in the secondary water supply system, the microbiological quality of drinking water in the Shanghai Direct Drinking Water Demonstration Zone before and after stainless steel materials renovation was evaluated using the heterotrophic bacteria plate count (HPC) detection method based on R2A medium and the microbiome technology based on 16S rRNA gene high-throughput sequencing. The results showed that the renovation of stainless steel pipes can effectively decrease the microbiological number in the secondary water supply system. After the implementation of stainless steel material reconstruction at the secondary water supply system in summer, the quantity of HPC decreased greatly. Among them, the average of the high-rise pump decreased from 968 CFU/mL before the renovation to 178 CFU/mL, a decrease of about 82%. The 6th floor riser had decreased by about 93.7% from an average of 1 383 CFU/mL before the renovation to 88 CFU/mL. The overall level of

[收稿日期] 2024-07-07

[基金项目] 高品质饮用水智慧管理关键技术研究(沪水科 2023-04)

[通信作者] 范晶璟(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为市政管网及二次供水安全运行管理, E-mail: daniel_fan@126.com。

HPC in unmodified community B was higher than that in modified community A, and the number of HPCs in renovated community B was lower than before the renovation. Temperature could significantly influence the HPC number in the secondary water supply system. The number in October was higher than that in November and December. From the raw water, treated water to the water inlet of the pump station, the dominant bacteria changed from *Acinetobacter* to *Pseudomonas*, and after entering the house, *Phreatobacter* gradually dominated. Compared with modified community A, community B before reconstruction has higher relative abundance of microorganisms with potential pathogenic phenotype and biofilm forming ability phenotype, and was mainly provided by *Acinetobacter* with high abundance. The replacement of stainless steel pipes in the community can control some microbial risks in drinking water by reducing the abundance of bacteria related to biofilm formation and pathogenicity.

Keywords drinking water stainless steel pipes heterotrophic bacteria plate count (HPC) high-through put sequencing for microbiome water quality of pipelines

2018年1月4日,上海市政府发布了《上海市城市总体规划(2017—2035年)》,提出到2035年上海市基本建成卓越的全球城市的规划要求。其中,明确提出要“加大二次供水设施改造力度,减少老旧供水管网二次污染,提高入户水质,满足直饮需求”^[1]。目前,上海市水厂出厂水水质全面达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,有力保障了供水安全^[2]。然而,随着人们对健康的认知与追求的不断增长,其对生活饮用水水质的要求也越来越高。在达标的基础上,进一步提升城市供水水质,达到世界先进水平,正成为上海市政府和供水行业新的目标^[3]。

饮用水中对公共健康风险最大的是微生物。《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)关于生活饮用水水质要求第一条即是生活饮用水中不应含有病原微生物,水质常规指标及限值第一项即是微生物指标^[4];世界卫生组织《饮用水水质准则》(第四版)关于饮用水水质优先关注项,提出应首先确保供应微生物质量安全的饮用水,以阻止消费者饮用在微生物方面有潜在不安全因素的水,应当给出相应的优先控制以改善饮用水供应中产生的最大公共健康风险^[5-6]。

《生活饮用水标准检验方法 第12部分:微生物指标》(GB/T 5750.12—2023)中的平皿计数法采用营养琼脂培养基、37℃、48h培养计数^[7],其培养条件与实际饮用水贫营养、常温环境完全不同,计数结果不能客观反映饮用水中微生物数量,常常低估了饮用水中异养菌的真实数量。美国、德国等国家采用贫营养的R2A培养基、降低培养温度、延长培养时间等方法检测饮用水中的HPC,明显提高了检测技术的灵敏度。但HPC也只能检测水中存活的一

小部分微生物,饮用水中更多是受抑制不能培养的和不可培养的微生物。由于自然界中的微生物仅0.01%~10.00%是可以培养的,大部分微生物处于非可培养状态。目前常用的基于培养检测技术的指示生物不能科学评价饮用水水质的卫生安全性,以此指导的消毒技术也不能完全保障饮水安全的可靠性。

供水系统中采用的管道材质多种多样,不同材质的管道具有不同的材料特性,在实际使用中对水质产生的影响也不同,尤其是不同材质管道内壁生物膜的形成能力不同,对管网水中微生物特性产生的影响也不同^[8-11]。大量文献^[12-17]表明,不同饮用水输配系统中所使用的管道材质对管壁生物膜存在影响。这些研究包括市政干管中常用的球墨铸铁管和水泥管以及聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)等二次供水使用的塑料管。这些研究表明,相比于球墨铸铁和塑料管材,不锈钢管材在抑制管壁生物膜生长和改善供水口感方面具有明显优势,但目前数据主要来自实验室研究,缺乏实际规模应用和深入比较研究。

本研究针对直饮水卫生学首要关注目标,通过建立基于R2A贫营养培养基的异养菌平皿计数(HPC)检测方法和基于16S rRNA基因的高通量测序技术非培养检测方法,观察实际规模的二次供水不锈钢改造对管网水中微生物质量的改善效果。

1 材料与方法

1.1 研究对象及改造方式

本研究以上海市同一水厂供水范围内相邻居民小区为研究对象。改造方式为:示范小区从市政供水干管进入小区开始至用水户水表前,采用不锈钢管和不锈钢水箱及不锈钢泵阀替换之前的球墨铸铁

管、PE管、混凝土水箱和铸铁泵阀等。2021年夏季7月、8月完成A小区改造,2022年夏季7月、8月进行B小区改造。A小区改造完成后,与未改造B小区进行了近一年的微生物检测对比。此后,又对改造前后的B小区进行了对比。

1.2 HPC 检测方法

按标准方法配制R2A培养基,每个平皿加入适量R2A培养基。将水样进行梯度稀释,分别取500 μL 稀释后的水样加入已倾倒入R2A培养基的灭菌平皿内,每个稀释浓度同时做3个平行检测,同时做空白对照。涂布后的培养皿倒置于28 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱中保存7 d进行计数^[13]。

1.3 高通量测序方法

(1) DNA 的提取过程

本研究中,为了从水样中高效且精确地提取DNA,采用了0.22 μm 微孔滤膜过滤技术来富集水样中的微生物。随后,将滤膜进行无菌操作,剪成条状或片状,放入预先灭过菌的2 mL离心管中。为了裂解细胞并释放DNA,向离心管中加入了800 μL 的2 \times CTAB细胞裂解液,并添加了约0.3 g的玻璃珠。这一步骤有助于打破细胞壁,释放细胞内的DNA。使用振荡器振荡离心管后,将混合物放入研磨仪中,以45 Hz的频率研磨30 s,并重复此步骤1次,每次间隔120 s。研磨结束后,迅速向混合物中加入20 μL 的蛋白酶K和2 μL 的 β -巯基乙醇,并将离心管放入65 $^{\circ}\text{C}$ 的金属浴中加热1 h。期间,每10 min轻轻颠倒离心管以混匀混合物。待混合物冷却至室温后,加入了特定比例的酚、氯仿和异戊醇(25:24:1, pH值>7.8)以去除蛋白质和其他杂质。经过轻轻颠混合12 000 r/min离心15 min后,小心吸取上清液,并重复上述步骤以进一步纯化DNA。为了沉淀DNA,向离心管中加入了1/10体积的醋酸钠(pH值=5.2)和预冷过的等体积异丙醇。轻轻混合后,将离心管置于-20 $^{\circ}\text{C}$ 环境中2 h。随后,在4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下以12 000 r/min离心10 min,并弃去上清液。使用500 μL 的70%酒精洗涤沉淀3次,并在室温下风干。最后,加入了50 μL 在65 $^{\circ}\text{C}$ 下灭菌过的超纯水,以溶解和收集纯化的DNA。

(2) 引物设计至 Illumina 测序

基于16S rRNA基因的V3~V4高变区,利用生物信息学工具和算法设计了特异性引物。这些引物能够高效且准确地扩增目标区域的DNA序列。通

过PCR扩增试验,获得了各样品的扩增产物,并利用切胶回收技术收集了这些产物。为了进一步提高测序的准确性和可靠性,对PCR产物进行了混合和洗脱处理。随后,利用2%琼脂糖凝胶电泳对纯化效果进行了检测,并测定了产物的浓度。基于电泳的初步定量结果,利用QuantiFluorTM-ST系统对产物进行了精确的定量。最后,按照测序要求将样品进行混合,并委托上海美吉生物医药科技有限公司利用Illumina测序平台进行了高通量测序。

数据处理及图形绘制使用R语言中的Venn Diagram、ggplot2、vegan、psych等包以及Gephi、Excel等完成。

2 结果与讨论

2.1 二次供水管网不锈钢改造对水中微生物数量的影响分析

选择上海同一水厂供水的两个相邻居民小区作为研究对象,其末端余氯水平相近,观察不锈钢管材改造后示范小区与改造前同一小区及另一未改造小区的水中微生物数量对比。如图1、图2所示,示范小区A的HPC数量均低于非示范小区B。在10月的2楼立管处两个小区的HPC相差较为明显($p < 0.001$),而两个位点的总氯水平(0.6、0.51 mg/L)并无显著差异。由于示范小区A和非示范小区B高层楼栋的供水模式不同,小区A供水流程为泵房输送至2楼再输送至6楼。数据表明,随着楼层的升高,HPC数值逐步升高;而非示范小区B高层楼栋的供水模式为泵房输送至屋顶水箱再沿楼层降低进行输送。从数值上来看,低层和高层HPC无明显差异,非示范小区B的2楼立管处经过屋顶水箱的输送相比于示范小区A直接泵送流程更长,所以HPC数值更高,但都低于上海市地方标准(500 CFU/mL)。同时,示范区和非示范区的HPC数值显示出一定的季节性变化,在冬季的差异较小。从秋季至冬季(10月—12月),10月两个小区的HPC数值整体高于11月、12月。冬季两个小区的相近位点HPC差异在10%~20%,差别较不显著,但总体上示范小区A的HPC数值低于非示范小区B。

进一步对改造前后的非示范小区B部分采样点的HPC进行对比,发现在夏季7月、8月更换不锈钢管道后有效降低了二次供水过程中的HPC数值。其中,高层泵后从改造前的平均968 CFU/mL

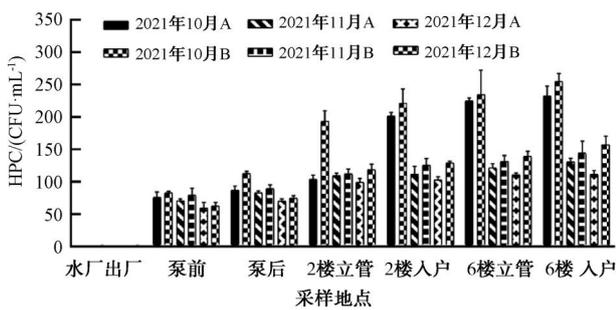


图1 示范小区 A 和非示范小区 B 的 HPC 数量对比

Fig. 1 Comparison of HPC Quantity between Demonstration Community A and Non-Demonstration Community B

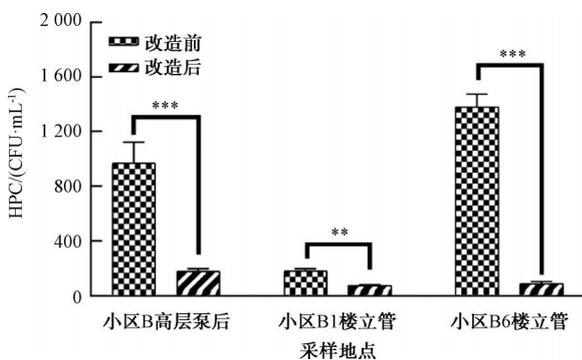


图2 非示范小区 B 不锈钢管道改造前后 HPC 变化

Fig. 2 Changes in HPC before and after Construction of Stainless Steel Pipelines in Non-Demonstration Community B

降至 178 CFU/mL,降幅约达 82%;6 楼立管从改造前的平均 1 383 CFU/mL 降至 88 CFU/mL 降幅约达 93.7%。因此,管道材料对于二次供水系统中的 HPC 数量的影响较大,更换不锈钢管道能够明显降低二次供水系统中的异养微生物数量,进而控制部分微生物风险。

通过对该供水系统示范小区 A 和非示范小区 B 进行为期 1 年的 HPC 跟踪调查,发现示范小区 A 经过二次供水系统中不锈钢管材的更换,示范小区 A 各位点的 HPC 数值低于非示范小区 B,而这种现象在夏季尤为明显。而在对非示范小区 B 进行不锈钢管道更换后,二次供水系统中 HPC 相较未改造前数值显著降低。这些现象表明,更换不锈钢管道可以有效改善供水末端的微生物质量,减少微生物再生。

2.2 直饮水示范区和非示范区微生物高通量测序结果对比

如图 3 所示,在 2021 年 9 月、10 月在示范小区 A 和非示范小区 B 采集了 8 个样本进行 16S rRNA

高通量测序,位置为泵前和 6 楼入户。对比发现,非示范小区 B 代表微生物 α 多样性的 Shannon 指数始终低于示范小区 A,说明示范小区 A 水样中的微生物多样性更高。观察示范小区 A 和非示范小区 B 的 Venn 图,示范小区 A 水样中的物种更多。从物种数目上看,龙头水相比泵房进水物种数目减少,并且非示范小区 B 的减少幅度大于示范小区 A,这说明非示范小区 B 的物种多样性低于示范小区 A。

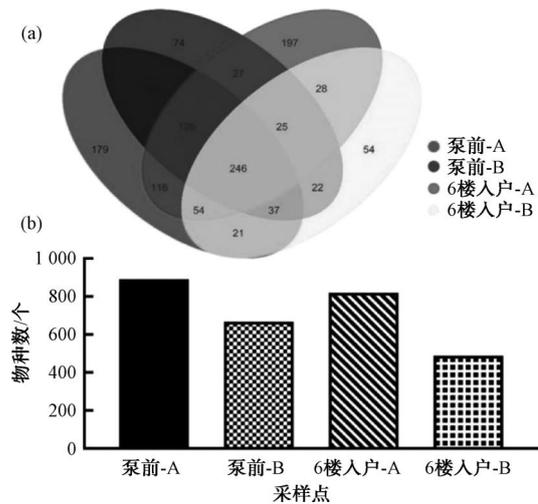


图3 示范小区 A 和非示范小区 B 的 Venn 图及物种数

Fig. 3 Venn and Plots of Species in Demonstration Community A and Non-Demonstration Community B

如图 4 所示,将示范小区 A 和非示范小区 B 的 2021 年 9 月、10 月样本的群落结构信息进行对比发现,两个小区泵房进水和龙头水中相对丰度排名前 5 的物种均为 *Phreatobacter*、不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)、分枝杆菌属 (*Mycobacterium*) 和假单胞菌属 (*Pseudomonas*),说明两者群落结构的部分相似性。非示范小区 B 相比示范小区 A,泵房进水和龙头水中的 *Acinetobacter* 的相对丰度更高,而 *Acinetobacter* 中含有部分条件致病微生物,如鲍曼不动杆菌。除此之外,非示范小区 B 水样中的 *Pseudomonas* 的相对丰度较高,而 *Mycobacterium* 作为重要的耐氯细菌,在两个小区的水样中的丰度没有显著差异。

通过对水样中微生物进行功能注释对比后发现,在非示范小区 B 的 9 月、10 月水样中,有关生物膜形成和致病相关的微生物的相对丰度更高,相比于示范小区 A 的同位点相关细菌的相对丰度增加了近一倍。无论是生物膜还是致病功能,很大程度

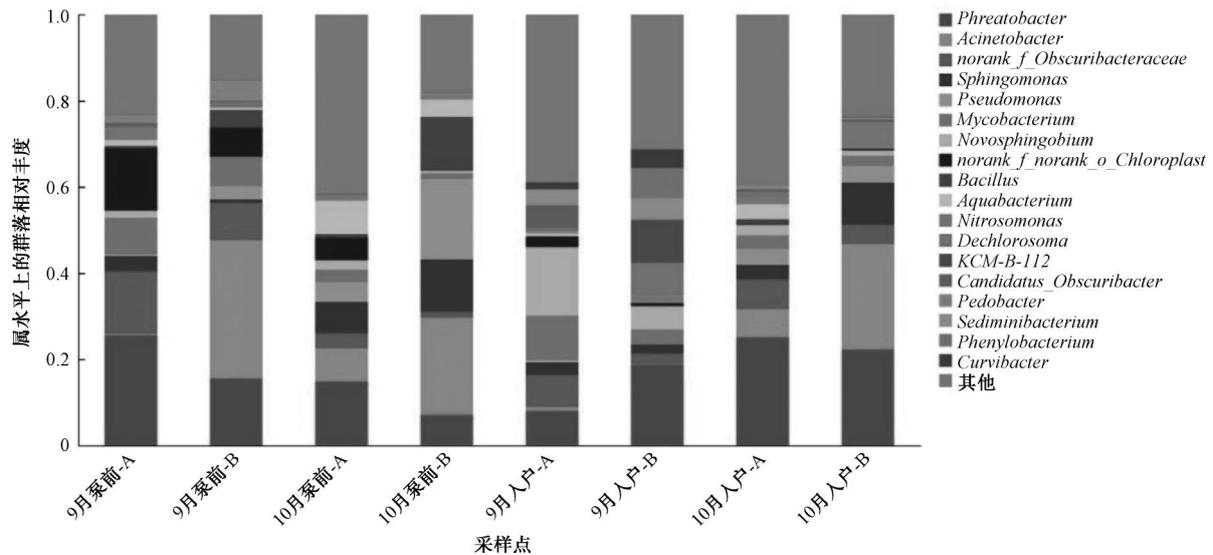


图4 示范小区 A 和非示范小区 B 属水平群落组成

Fig. 4 Horizontal Community Composition of Demonstration Community A and Non-Demonstration Community B

上都是由不动杆菌属和假单胞菌的细菌贡献,而非示范小区 B 的两种细菌占比较示范小区 A 更高。研究表明,不锈钢管材的更换能使水中微生物风险降低,对于管网中较为突出的两个安全隐患:生物膜和致病细菌,都有较好的控制效果。

3 结论

(1)供水末端实施不锈钢材质改造后,供水水质中 HPC 数量水平下降。未改造小区 B 的 HPC 整体水平高于改造后小区 A,小区 B 改造后的 HPC 数量水平也明显低于改造前。

(2)从原水、出厂水到泵房水池进水,优势菌属由不动杆菌属转变为假单胞菌属,入户后 *Phreatobacter* 菌属逐渐占据优势。龙头水中的微生物相比立管有着更强的生物膜形成潜力。不锈钢管道的改造有效降低了有关生物膜形成和病原微生物的占比。

(3)根据本次研究结果,二次供水管道及设施更新为不锈钢材质后在 1 年内可以有效降低二次供水系统中的微生物数量,改善供水水质,但长期效果如何,还需进一步持续观察。另外,采用基于高通量测序的非培养检测方法时,在末端仍可发现各类微生物的存在,相关微生物风险也需进一步深入研究。

参考文献

[1] 上海市人民政府. 上海市城市总体规划(2017—2035 年) [R/OL]. (2018-01-04) [2024-07-07]. <https://ghzjy.sh.gov.cn/cmsres/00/0060109cf6774f47b41a134c741c4491/1bc3674ead17e0e475c5f1a3b5982ead.pdf>.

gov.cn/cmsres/00/0060109cf6774f47b41a134c741c4491/1bc3674ead17e0e475c5f1a3b5982ead.pdf.

Shanghai Municipal People's Government. Shanghai master plan (2017—2035) [R/OL]. (2018-01-04) [2024-07-07]. <https://ghzjy.sh.gov.cn/cmsres/00/0060109cf6774f47b41a134c741c4491/1bc3674ead17e0e475c5f1a3b5982ead.pdf>.

[2] 王雪峰,李辰晨,张骏鹏. 基于水质提升的二次供水改造及效果评估[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 931-935, 941.

WANG X F, LI C C, ZHANG J P. Effect evaluation of secondary water supply renovation aiming at water quality improvement[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 931-935, 941.

[3] 李仿. 江阴市二次供水水质影响因素分析及改造优化策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

LI F. Research on affecting factors of the secondary water supply quality and the optimization strategy in Jiangyin City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

National Health Commission of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Presss of China, 2022.

[5] 世界卫生组织. 饮用水水质准则[M]. 4 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.

World Health Organization. Guidelines for drinking water quality [M]. 4th ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.

[6] LEE D, CALENDO G, KOPEC K, et al. The impact of pipe material on the diversity of microbial communities in drinking water distribution systems[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 779016. DOI: 10.3389/fmicb.2021.779016.

[7] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国

家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法 第 12 部分: 微生物指标: GB/T 5750.12—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water—Part 12: Microbiological indices: GB/T 5750.12—2023[S]. Beijing: Standards Presss of China, 2023.

- [8] TANG W, LI Q Y, CHEN L, et al. Biofilm community structures and opportunistic pathogen gene markers in drinking water mains and the role of pipe materials [J]. ACS ES&T Water, 2021, 1(3): 630–640.
- [9] GORAJ W, PYTLAK A, KOWALSKA B, et al. Influence of pipe material on biofilm microbial communities found in drinking water supply system [J]. Environmental Research, 2021, 196: 110433. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110433.
- [10] LEARBUCH K L G, SMIDT H, WIELEN P W J J. Water and biofilm in drinking water distribution systems in the Netherlands [J]. Science of the Total Environment, 2022, 831: 154940. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154940.
- [11] 张永吉, 周玲玲, 李伟英, 等. 氯对模拟管壁生物膜的氧化特性研究[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1381–1385.
ZHANG Y J, ZHOU L L, LI W Y, et al. Oxidization characteristic of chlorine on the biofilm in simulated drinking water distribution system [J]. Environmental Science, 2009, 30(5): 1381–1385.
- [12] ZHANG X Y, LIN T, JIANG F C, et al. Impact of pipe material and chlorination on the biofilm structure and microbial communities [J]. Chemosphere, 2022, 289: 133218. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133218.
- [13] 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 Y, ZHU B, TONG J, et al. Growth features of water supply pipeline biofilms based on active microorganisms [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 853–858.
- [14] LI Q, YU S, LI L, et al. Microbial communities shaped by treatment processes in a drinking water treatment plant and their contribution and threat to drinking water safety[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 2465. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02465.
- [15] CHEN J, SHI Y, CHENG D Q, et al. Survey of pathogenic bacteria of biofilms in a metropolitan drinking water distribution system[J]. FEMS Microbiology Letters, 2019, 366(20): 225. DOI: 10.1093/femsle/fnz225.
- [16] WANG H, EDWARDS M, FALKINHAM J O, et al. Molecular survey of the occurrence of *Legionella* spp., *Mycobacterium* spp., *Pseudomonas aeruginosa*, and amoeba hosts in two chloraminated drinking water distribution systems [J], Applied Environmental Microbiology, 2012, 78(17): 6285–6294.
- [17] ZLATANOVIĆ L, HOEK J P, VREEBURG J H G. An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system [J]. Water Research, 2017, 123: 761–772. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.019.
- (上接第 24 页)
- [90] FATHI S, HAJIZADEH Y, NIKAEEN M, et al. Assessment of microbial aerosol emissions in an urban wastewater treatment plant operated with activated sludge process [J]. Aerobiologia, 2017, 33(4): 507–515.
- [91] MALAKOOTIAN M, RADHAKRISHNA N, MAZANDARANY M P, et al. Bacterial-aerosol emission from wastewater treatment plant [J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(22/23/24): 4478–4488. DOI: 10.1080/19443994.2013.769668.
- [92] MASCLAUX F G, HOTZ P, GASHI D, et al. Assessment of airborne virus contamination in wastewater treatment plants [J]. Environmental Research, 2014, 133: 260 – 265. DOI: 10.1016/j.envres.2014.06.002.
- [93] CHEN Y H, YAN C, YANG Y F, et al. Quantitative microbial risk assessment and sensitivity analysis for workers exposed to pathogenic bacterial bioaerosols under various aeration modes in two wastewater treatment plants [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142615. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142615.
- [94] BOONE S A, GERBA C P. Significance of fomites in the spread of respiratory and enteric viral disease [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(6): 1687–1696.
- [95] GHOSH B, LAL H, SRIVASTAVA A. Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms [J]. Environment International, 2015, 85: 254–272. DOI: 10.1016/j.envint.2015.09.018.
- [96] GUO X S, WU P P, DING W J, et al. Reduction and characterization of bioaerosols in a wastewater treatment station via ventilation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(8): 1575–1583.
- [97] BRANDI G, SISTI M, AMAGLIANI G. Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems [J]. Journal of Applied Microbiology, 2000, 88(5): 845–852.
- [98] HAN Y P, YANG T, CHEN T Z, et al. Characteristics of submicron aerosols produced during aeration in wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 134019. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134019.
- [99] AHMED W, BERTSCH P M, BIVINS A, et al. Comparison of virus concentration methods for the RT-qPCR-based recovery of murine hepatitis virus, a surrogate for SARS-CoV-2 from untreated wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139960. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139960.