

原水水质对输水管道生物膜中异养菌生长情况的影响

杨艳玲, 张 达, 李 星, 相 坤, 陈 楠, 黄 柳, 许美玲, 刘扬阳
(北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了研究原水水质对输水管道生物膜中异养菌(heterotrophic, HPC)生长情况的影响, 采用配制水样来模拟Ⅱ、Ⅲ和劣Ⅴ类地表水, 利用管道模拟反应器对其进行分析. 结果表明: 反应器运行45 d后, 分别采用Ⅱ、Ⅲ和劣Ⅴ类地表水作为进水的各模拟反应器生物膜中 HPC 数量均高于出水 HPC 数量, 且其生物膜中 HPC 数量分别稳定在 1.1×10^5 、 2.8×10^5 和 5.9×10^5 CFU/cm²; 原水 UV₂₅₄、正磷酸盐(PO₄³⁻)质量浓度和浊度均与生物膜中 HPC 数量呈正相关关系, 其相关性系数 r 分别为 0.506、0.552 和 0.272.

关键词: 原水水质; 输水管道; 生物膜; 异养菌(HPC)

中图分类号: TU 991

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)09-1384-05

Effect of Raw Water on Biofilm Heterotrophic Growth in Water Distribution Pipes

YANG Yan-ling, ZHANG Da, LI Xing, XIANG Kun, CHEN Nan, HUANG Liu, XU Mei-ling, LIU Yang-yang
(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The growth of heterotrophic (HPC) in water distribution pipes was studied, simulation pipeline reactors were used to simulate the water situation. Water samples were prepared in a laboratory to simulate Class II, III and V or worse of the surface water standard. Results show that the quantities of HPC in the biofilm are significantly higher than those in the bulk water, and are stabled at 1.1×10^5 , 2.8×10^5 , and 5.9×10^5 CFU/cm², respectively, after 45 days. UV₂₅₄ concentration and orthophosphate (PO₄³⁻) concentration and turbidity in raw water are all positively correlated with the quantity of HPC in the biofilm, and the correlated coefficient are $r=0.506, 0.552$, and 0.272 , respectively.

Key words: raw water quality; water distribution pipes; biofilm; heterotrophic (HPC)

长距离输水工程作为缓解城市供水紧缺问题的有效措施在中国发展很快, 迄今为止, 中国已经设计实施了多项长距离输水工程^[1]. 长距离输水管道在长期运行中不可避免附着生长生物膜. 研究发现^[2], 生物膜的生物作用可使输送水的水质得到一定的净化, 特别是异养菌(heterotrophic, HPC)具有对有机物的去除作用.

目前国内外对管道生物膜中 HPC 生长情况的

研究主要集中在供水管道中, 有关原水输水管道相关的研究则鲜有报道. 赵锐^[3]对供水管道出水 HPC 与生物膜中 HPC 的生长情况进行了对比研究, 结果表明管网出水中的微生物主要来源于管壁生物膜. 赵锐的研究结果还表明在供水管道中, 水中 UV₂₅₄ 的增加会导致生物膜中 HPC 数量的增加^[2-3]. 白晓慧等^[4]的研究结果表明供水管道中磷质量浓度的增加对 HPC 的生长具有一定的促进作用. W. Mark

收稿日期: 2013-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178003); 北京市自然科学基金资助项目(8122013)

作者简介: 杨艳玲(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事饮用水安全保障技术方面的研究, E-mail: yangyanling@bjut.edu.cn

等^[5]的研究结果说明浊质颗粒可附着营养物质而支持细菌生长,浊度越高其附着的细菌数相应越多,而且 R. L. Wolfe 等^[6]证明了供水管道中 HPC 和浊度之间存在正相关关系。鉴于原水水质直接影响输水管道内生物膜的生长,而与供水管网水质相比,实际长距离管道输送的原水水质极为复杂,为此,本文在实验室条件下模拟 II、III 以及劣 V 类地表水,通过连续监测管道模拟反应器内生物膜中 HPC 数量的变化情况,研究原水水质对输送管道生物膜中 HPC 生长的影响,以期对长距离输水管道生物膜净化的调控及优化提供理论及技术支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置及方法

采用 3 台管道模拟反应器并联运行,每个反应器内安装 20 个 PE 材质挂片,挂片绕反应器中心轴以 80 r/min 转速旋转,以模拟实际管道中水流对管壁生物膜的剪切作用。反应器有效容积为 1 L,进水流量为 0.48 L/h,水力停留时间为 2.08 h。反应器运行后定期检测进出水水质及挂片生物膜上微生物量。

生物膜的提取方法:用 2、3 根灭过菌的棉签从

上到下擦拭挂片挂膜面 5、6 次,将擦拭完的棉签放入盛有 10 mL 灭菌缓冲液的试管中,将试管置于超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司生产的 KQ-500B 型,超声电功率 500 W,工作频率 40 kHz)作用 20 min。

1.2 分析方法

浊度采用浊度仪(HACH, 2100N)测定,氨氮(NH_4^+-N)采用《水质 氨的测定 纳氏试剂比色法》(GB7479—87)测定,亚硝酸氮(NO_2^--N)采用《水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB7493—87)测定,硝酸氮(NO_3^--N)采用《水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法》(GB7480—87)测定,溶解氧(dissolved oxygen, DO)采用在线溶解氧仪测定,UV₂₅₄采用紫外分光光度计测定,正磷酸盐(PO_4^{3-})采用《水质 磷的测定 钼锑抗分光光度法》(GB11893—89)测定,HPC 采用 R₂A 培养基 22 ℃ 黑暗培养 7 d 后计数。

1.3 原水水质

实验室配制水样,分别模拟地表水环境质量标准(GB 3838—2002)中 II、III 和劣 V 类地表水,水样编号分别为 II、III 及 V,实验期间原水水温为 18 ℃,主要原水水质指标如表 1 所示。

表 1 实验期间原水水质

Table 1 Raw water quality during the test

水样	浊度/ NTU	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{UV}_{254})/(\text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{PO}_4^{3-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
II	1.18 ± 0.13	0.460 ± 0.087	0.015 ± 0.004	1.518 ± 0.036	7.48 ± 0.20	0.014 ± 0.002	0.072 ± 0.024
III	1.92 ± 0.21	1.018 ± 0.102	0.042 ± 0.008	2.061 ± 0.127	5.78 ± 0.47	0.020 ± 0.002	0.251 ± 0.036
V	2.52 ± 0.23	1.863 ± 0.067	0.085 ± 0.007	3.019 ± 0.121	3.29 ± 0.33	0.025 ± 0.003	0.368 ± 0.034

2 结果与讨论

2.1 管道模拟反应器生物膜中 HPC 数量的变化

运行期间各模拟反应器生物膜中 HPC 的数量

变化情况如表 2 所示。

由表 2 可看出,高活性、快速的繁殖速度以及较弱的附着生长性能使得运行初期各模拟反应器内生物膜中 HPC 数量均低于出水 HPC 数量。随着运行

表 2 模拟反应器出水及生物膜中 HPC 数量

Table 2 Quantity of HPC in the bulk water and in the biofilm

时间 t/d	模拟管道出水 HPC 数量/(CFU·mL ⁻¹)			生物膜 HPC 数量/(CFU·cm ⁻²)		
	II	III	V	II	III	V
8	5.2 × 10 ⁴	1.1 × 10 ⁵	1.3 × 10 ⁵	2.9 × 10 ⁴	3.3 × 10 ⁴	4.2 × 10 ⁴
15	1.2 × 10 ⁵	1.1 × 10 ⁶	1.7 × 10 ⁶	5.7 × 10 ⁴	4.1 × 10 ⁴	4.9 × 10 ⁴
25	6.7 × 10 ⁴	6.8 × 10 ⁴	1.6 × 10 ⁵	1.6 × 10 ⁵	1.7 × 10 ⁵	8.6 × 10 ⁵
35	1.5 × 10 ⁵	1.1 × 10 ⁵	2.2 × 10 ⁶	8.0 × 10 ⁴	7.4 × 10 ⁵	1.7 × 10 ⁶
45	2.2 × 10 ⁴	6.1 × 10 ⁴	1.2 × 10 ⁵	1.1 × 10 ⁵	2.8 × 10 ⁵	5.9 × 10 ⁵
57	2.2 × 10 ⁴	7.5 × 10 ⁴	1.5 × 10 ⁵	9.9 × 10 ⁴	2.7 × 10 ⁵	5.6 × 10 ⁵

时间的延长、附着态微生物的增加,各模拟反应器生物膜中 HPC 数量逐渐升高,水样 II 对应的模拟反应器运行至第 25 d 生物膜中 HPC 数量达最大值 1.6×10^5 CFU/cm²,水样 III 和 V 对应的模拟反应器运行至 35 d 后生物膜中 HPC 数量达最大值,分别为 7.4×10^5 和 1.7×10^6 CFU/cm². 但种群更替使得生物膜内微生物的总量无法进一步增加,并且还会逐步降低,大量生长周期更长而更适应于附着生长的微生物成为生物膜的主要组成部分,故各模拟反应器内生物膜中 HPC 数量均逐渐降低. 随着微生物种群的进一步更替,直至稳定,生物膜内的微生物数量最终达到最适于附着生长的微生物所能形成的稳定状态,采用水样 II、III 和 V 作为进水的各模拟反应器内生物膜中 HPC 数量均在反应器运行 45 d 后达到稳定,分别稳定在 1.1×10^5 、 2.8×10^5 和 5.9×10^5 CFU/cm²,且至生物膜稳定,各模拟反应器内生物膜中 HPC 数量均明显高于出水 HPC 数量,这与赵锐^[3]在供水管网中的研究结果一致.

2.2 UV₂₅₄对生物膜中 HPC 数量的影响

国内外许多文献资料^[7-8]表明水中 UV₂₅₄ 和水中色度、总有机碳 (total organic carbon, TOC)、溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 等具有一定的相关性,已经广泛认可将 UV₂₅₄ 作为水质监测中反映水中有机物质质量浓度的指标. 因此,本实验采用 UV₂₅₄ 来反映有机物对生物膜中 HPC 生长情况的影响,运行期间各模拟反应器出水 UV₂₅₄ 与生物膜中 HPC 数量的变化情况如图 1 所示.

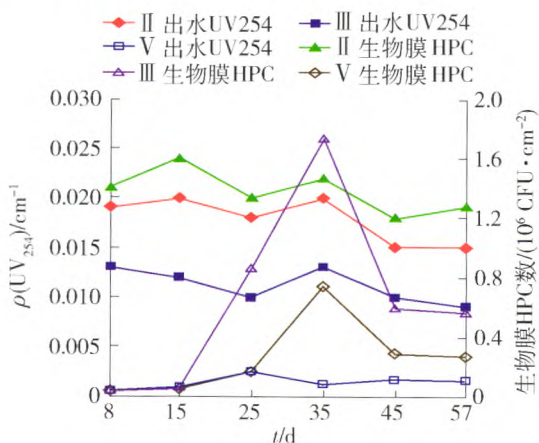


图 1 UV₂₅₄对生物膜中 HPC 数量的影响

Fig. 1 Effect of UV₂₅₄ on the quantity of biofilm HPC in reactors

由图 1 可看出,水样 II、III、V 对应的模拟反应

器出水 UV₂₅₄ 依次增加,相应的生物膜中 HPC 数量也依次增加,即模拟反应器生物膜中 HPC 数量随着原水中 UV₂₅₄ 的升高而升高,说明原水 UV₂₅₄ 与生物膜中 HPC 数量之间存在正相关关系,利用 SPSS 18.0 软件得出生物膜中 HPC 数量与 UV₂₅₄ 之间的相关性系数 $r = 0.506$,说明原水中 UV₂₅₄ 与生物膜中 HPC 数量之间具有较好的相关性.

到目前为止,国内外也做了很多 HPC 与有机物之间的相关性分析,但都主要集中在供水管道中 HPC 与可生物降解溶解性有机碳 (biodegradable dissolved organic carbon, BDOC)、生物可同化有机碳 (assimilable organic carbon, AOC) 和 TOC 的相关性研究上. C. I. Escobar 等^[9]的研究结果表明供水管道中 HPC 和 AOC 之间呈正相关关系,相关性系数 $r = 0.85 \sim 0.95$,HPC 和 BDOC 之间呈正相关关系,相关性系数 $r = 0.33 \sim 0.35$;J. T. Carter 等^[10]也证明了供水管道中 HPC 和 AOC、TOC 之间的正相关关系. 周斌辉^[11]利用 SPSS 13.0 软件分析了供水管道中 HPC 与 DOC 之间的相关性,得出其相关性系数 $r = 0.509$. 结合本实验结果可知,输水管道中有机物对 HPC 生长情况的影响与供水管道中研究结果一致.

2.3 PO₄³⁻对生物膜中 HPC 数量的影响

水中总磷 (total phosphorus, TP) 是水中以各种形态存在的磷的总和,而其中正磷酸盐 (PO₄³⁻) 是容易被细菌直接吸收利用的磷源^[12]. 因此,本实验首次采用 PO₄³⁻ 来反映磷对生物膜中 HPC 生长情况的影响,各模拟反应器出水 PO₄³⁻ 质量浓度对生物膜中 HPC 数量的影响情况如图 2 所示.

由图 2 可看出,水样 II、III、V 对应的模拟反应器出水 PO₄³⁻ 质量浓度依次增加,相应的生物膜中 HPC 数量也依次增加,即模拟反应器生物膜中 HPC 数量随着原水中 PO₄³⁻ 质量浓度的升高而升高,这说明原水中 PO₄³⁻ 质量浓度与生物膜中 HPC 数量之间存在正相关关系,利用 SPSS 18.0 软件得出生物膜 HPC 数量与 PO₄³⁻ 质量浓度之间的相关性系数 $r = 0.552$,说明原水中 PO₄³⁻ 质量浓度与生物膜中 HPC 数量之间具有较好的相关性.

姜登岭^[13]以天津市芥园自来水厂和配水管网为研究对象,研究磷对 HPC 生长的影响,结果表明供水管道中总磷和微生物可利用磷 (microbially available phosphorus, MAP) 对管网中 HPC 的生长影响较小,其相关性系数 r 分别为 0.137、-0.114,说明 MAP 不是限制管网中 HPC 生长的主要因素,而

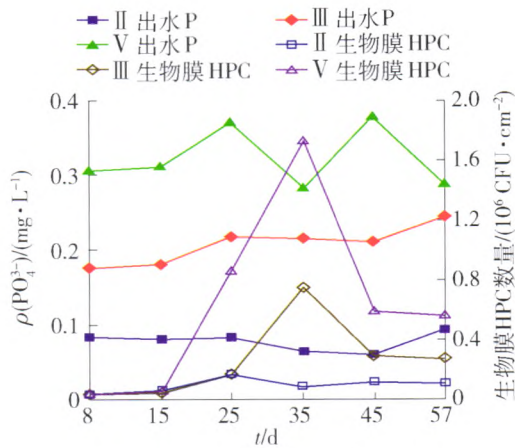


图 2 PO_4^{3-} 质量浓度对生物膜中 HPC 数量的影响

Fig. 2 Effect of $\rho(PO_4^{3-})$ on the quantity of biofilm HPC in reactors

管网水中最大 AOC 与最大 HPC 的相关性系数 $r = 0.704$, 说明 AOC 是影响管网水中 HPC 生长的主要因素. 结合 2.2 小节中 UV_{254} 对生物膜 HPC 数量的影响研究可知, 在输水管道中有机物和磷的质量浓度均是影响 HPC 生长的重要因素, 这一结论与供水管道不同.

2.4 浊度对生物膜中 HPC 数量的影响

国外相关研究证明, 水中浊度可间接反映微生物数量, 通过控制水中浊度, 可有效控制水中微生物的数量^[4], 各模拟管道出水浊度与生物膜中 HPC 数量的变化情况如图 3 所示.

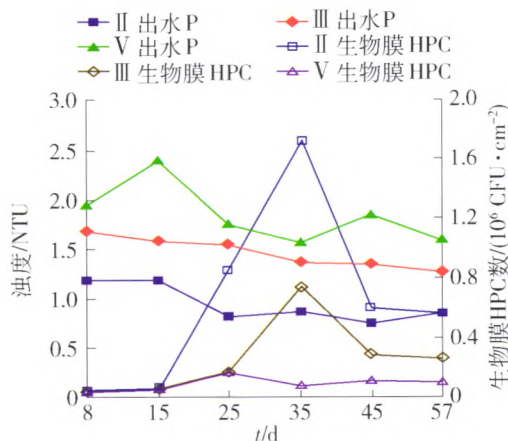


图 3 浊度对生物膜中 HPC 数量的影响

Fig. 3 Effect of turbidity on the quantity of biofilm HPC in reactors

由图 3 可看出, 水样 II、III、V 对应的模拟反应器出水浊度依次增加, 相应的生物膜中 HPC 数量也依次增加, 即模拟反应器生物膜中 HPC 数量随着原

水浊度的升高而升高, 故浊度与生物膜中 HPC 数量之间存在正相关关系, 利用 SPSS 18.0 软件得出生物膜中 HPC 数量与浊度之间的相关性系数 $r = 0.272$, 说明原水浊度与生物膜中 HPC 数量之间相关性较差.

白晓慧等^[4]以上海市某水厂实际供水管网为研究对象, 进行了供水管网中浊度与 HPC 生长水平的相关性分析, 结果表明在管网沿程, 随供水距离延长, 管网水中浊度和 HPC 数量都呈增高趋势, 两者之间具有很好的相关性. 姜登岭^[13]以天津市芥园自来水厂和配水管网为研究对象, 进行管网水浊度与管网水 HPC 的相关性分析, 结果得出其相关性系数 $r = 0.011$, 说明管网水中 HPC 数量不是造成管网水浊度升高的主要因素, 这一点与输水管道相同.

3 结论

1) 至生物膜稳定, 不同原水水质的各模拟反应器生物膜中 HPC 数量均明显高于出水 HPC 数量.

2) 采用 II、III 和劣 V 类地表水作为进水的各模拟反应器生物膜中 HPC 数量均在反应器运行 45 d 后稳定, 分别稳定在 1.1×10^5 、 2.8×10^5 、 5.9×10^5 CFU/cm².

3) 原水中有有机物和磷的质量浓度是影响输水管道生物膜中 HPC 数量的主要因素, 生物膜中 HPC 数量与 UV_{254} 和 PO_4^{3-} 质量浓度之间均具有较好的正相关关系, 其相关性系数 r 分别为 0.506、0.552; 而原水浊度不是影响生物膜中 HPC 数量的主要因素, 生物膜中 HPC 数量与浊度之间的正相关性较差, 其相关性系数 $r = 0.272$.

参考文献:

[1] 陈涌城, 张洪岩. 长距离输水工程有关技术问题的探讨[J]. 给水排水, 2002, 28(12): 1-4.
CHEN Yong-cheng, ZHANG Hong-yan. Long distance water conveyance project of discussion about technical issues [J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(12): 1-4. (in Chinese)

[2] 朱永娟, 杨艳玲, 李星, 等. 长距离输水管道微生物存在水平及水质变化规律[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 34-36.
ZHU Yong-juan, YANG Yan-ling, LI Xing, et al. Occurrence of microorganism and variation of water quality in long distance water delivery pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 34-36. (in Chinese)

- [3] 赵锐. 管壁生物膜生长特性及其对水质影响的研究 [D]. 唐山: 河北理工大学建筑工程学院, 2009.
ZHAO Rui. Study on biofilm growth conditions and its impact on water quality [D]. Tangshan: College of Structural and Civil Engineering, Hebei Polytechnic University, 2009. (in Chinese)
- [4] 白晓慧, 张晓红, 张玲, 等. 上海市供水管网中异养菌生长水平及相关指标变化 [J]. 环境科学, 2006, 27 (11): 2350-2352.
BAI Xiao-hui, ZHANG Xiao-hong, ZHANG Ling, et al. Growth of heterotrophic bacteria and variation of related parameters in water distribution system in Shanghai [J]. Environmental Science, 2006, 27 (11): 2350-2352. (in Chinese)
- [5] MARK W, LECHEBALLIER T M. Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water [J]. Applied Environmental Microbiology, 1981, 42 (1): 159-167.
- [6] WOLFE R L, LIEU N I, IZAGUIRRE G, et al. Ammonia-oxidizing bacteria in a chloraminated distribution system: seasonal occurrence, distribution, and disinfection resistance [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56: 451-462.
- [7] 林星志, 杨慧芬, 宋存义. UV₂₅₄在水质监测中应用的研究 [J]. 能源与环境, 2006(1): 22-24.
LIN Xing-zhi, YANG Hui-fen, SONG Cun-yi. Study on the application of UV₂₅₄ in water quality monitoring [J]. Energy and Environment, 2006(1): 22-24. (in Chinese)
- [8] 蒋绍阶, 刘宗源. UV₂₅₄作为水处理中有机物控制指标的意义 [J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(2): 61-65.
JIANG Shao-jie, LIU Zong-yuan. UV₂₅₄ as control index of organic matter in water treatment [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(2): 61-65. (in Chinese)
- [9] ESCOBAR C I, RANDALL A A, TAYLOR J. Bacterial growth in distribution systems: effect of assimilable organic carbon and biodegradable dissolved organic carbon [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35 (17): 3442-3447.
- [10] CARTER J T, RICE E W, BUCHBERGER S G, et al. Relationships between levels of heterotrophic bacteria and water quality parameters in a drinking water distribution system [J]. Water Research, 2000, 34: 1495-1502.
- [11] 周斌辉. 氯胺消毒供水管网生物膜中的硝化菌群特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学生命科学技术学院, 2008.
ZHOU Bin-hui. Characteristics of the nitrifying bacteria population in biofilm of chloraminated drinking water distribution system [D]. Shanghai: School of Life Sciences and Biotechnology, Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [12] 桑军强, 余国忠, 王占生. 磷与饮用水生物稳定性的关系 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 534-536.
SANG Jun-qiang, YU Guo-zhong, WANG Zhan-sheng. Relation between phosphorus content and drinking water biological stability [J]. China Environmental Science, 2002, 22(6): 534-536. (in Chinese)
- [13] 姜登岭. 营养基质对管网水悬浮菌再生长的影响研究 [D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2004.
JIANG Deng-ling. Effects of nutrients on suspended bacteria regrowth in drinking water distribution systems [D]. Beijing: Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, 2004. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)