

长距离原水输水管道管壁生物膜特征分析

赵乐乐¹, 李 星¹, 杨艳玲¹, 朱永娟¹, 雒江菡², 李圭白²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 100124 北京; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

摘 要: 研究长距离原水输水管道管壁生物膜特征有利于分析原水水质变化原因, 对保障长距离原水水质安全性具有重要意义. 采用8台环状膜生物反应器(BAR)串联运行以模拟长距离原水输水管道, 研究不同水质条件下, 管道生物膜的形态特征、结构、生物量空间分布、微型生物种群组成. 结果表明: 不同水质条件下生物膜形态明显不同, 管壁上黏附颗粒物的颜色是表征生物膜形态特征的重要标志; 管道微生物膜结构沿程变化较大, 其粗糙生物膜结构增大了生物膜比表面积, 有利于生物膜的生长发育, 从而有效氧化去除水中的污染物质; A江模拟管道运行75 d在BAR3处生物量达最大值(以P计) $1.11 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$, 后端因缺乏营养物质明显降低, 而B江模拟管道生物膜生长受进水DO ($0.3 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 抑制, 生物量沿程变化较小; 原水水质是影响生物膜微型生物组成的重要因素, 微型生物组成反映管道水质状况及净水效果.

关键词: 长距离输水管道; 生物膜; 种群结构; 生物量; 空间分布; 微生物种群

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0118-05

Characteristics of biofilms in long-distance raw water diversion pipes

ZHAO Le-le¹, LI Xing¹, YANG Yan-ling¹, ZHU Yong-juan¹, LUO Jiang-han², LI Gui-bai²

(1. Institute of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, 100124 Beijing, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Studying biofilms in long-distance raw water diversion pipe is beneficial to the analysis of water quality and the security of raw water quality. Therefore, the characters of morphology, microstructure, spatial and temporal distribution of biomass and microbiota community of bio-films in long-distance raw water diversion pipes were investigated using the simulated process of 8 bio-film annulus reactors (BAR) in series with different raw water. The results showed that the bio-film structure was significant different in water quality, and the particle color attached in pipe bio-film was an important influencing factor in the characters of morphology. Secondly, the structure of the rough bio-film changing with water flow increased the specific surface area of the bio-film which led to the growth and development of bio-film and pollutant removal. Thirdly, the biomass of A raw water reached the peak ($1.11 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$) in BAR3 running 75 d, and then became lower due to the less nutrient. However, the biomass along simulated pipes of B water changed subtly because of the limited DO ($0.3 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). Finally, the microbiota composition is highly correlated with the water quality, reacting water quality and purification effect.

Key words: long distance water diversion pipe; bio-films; microbial construction; biomass; space distribution; microbial population

收稿日期: 2012-04-20.

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: 赵乐乐(1986—), 女, 博士研究生;

李 星(1963—)男, 教授, 博士生导师;

李圭白(1931—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

通信作者: 李 星, lixing@bjut.edu.cn.

长距离原水输水管道不可避免地滋生生物膜, 管道生物膜内部时刻存在微生物向载体表面进行物质和能量运输的过程, 在生物吸附(可逆吸附、不可逆吸附)和降解作用下, 生物膜固着生长并发展. 此生物膜生长代谢过程与原水水质^[1]、水温^[2]、流态^[3]等因素有密切关系^[4-6].

在长距离输水管道中,微生物种群是由多个生物群落组成的一个完整食物链,微生物种群的组成因管道位置、水质和运行时间不同而各有差异.为此,通过对比两种水质条件下管道生物膜结构、生物量时空分布和微生物种群差异,研究长距离原水输水管道生物膜功能、内部传质和微生物分布状况,为分析原水输水水质变化提供理论依据.

1 实 验

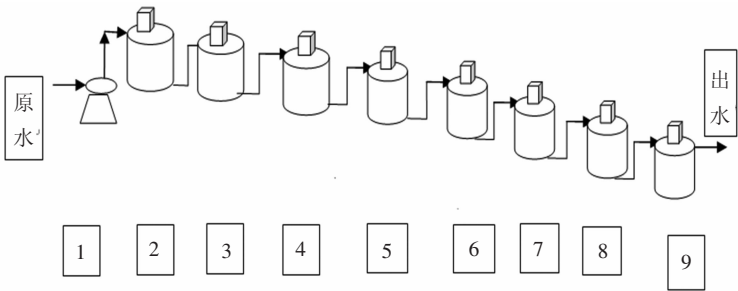
1.1 实验装置及运行方式

为充分模拟长距离原水输水管道的推流式水流状态,采用 8 台 BAR 串联运行方式模拟长距离输水管道原水水质变化及生物膜生长规律,反应器

内安装不锈钢(304)挂片,安装运行方法如图 1 所示.在广州(GZ)市 A、B 两个水源地分别安装一套相同工艺设备,用蠕动泵将原水连续打入第 1 个反应器(BAR1),原水在压力及重力双重作用下依次流过各反应器(BAR2~BAR8),每台反应器水力停留时间(HRT)约为 1.5 h,整套系统 HRT 为 12 h.

1.2 原水水质

试验原水为 GZ 市两条不同水源地实际江水,试验期间 A 江模拟管道进水溶解氧质量浓度为 3.56~6.80 mg·L⁻¹,B 江模拟管道进水溶解氧质量浓度为 0.3~3.0 mg·L⁻¹,其他水质指标见表 1.原水经过简单静止沉淀进入反应器,反应器沿程水质变化见表 1.



1—蠕动泵;2—BAR1;3—BAR2;4—BAR3;5—BAR4;6—BAR5;7—BAR6;8—BAR7;9—BAR8.

图 1 工艺流程

表 1 模拟管道水质特性

指标	A 江模拟管道			B 江模拟管道		
	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{TP})$	COD_{Mn}	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{TP})$	COD_{Mn}
原水	0.102~0.644	0.045~0.068	1.20~4.50	0.243~1.704	0.078~0.124	3.25~4.50
BAR1	0.147~0.441	0.053~0.116	1.80~3.30	0.243~0.798	0.032~0.117	2.94~5.50
BAR 2	0.040~0.492	0.039~0.070	1.60~3.20	0.221~1.715	0.032~0.121	3.65~6.00
BAR 3	0.060~0.452	0.031~0.062	1.40~3.06	0.103~4.303	0.038~0.107	3.43~4.25
BAR 4	0.033~0.446	0.030~0.094	1.80~4.20	0.085~4.203	0.010~0.098	3.95~4.50
BAR 5	0.030~0.469	0.026~0.064	1.60~4.50	0.137~4.117	0.013~0.087	3.43~5.10
BAR 6	0.001~0.487	0.029~0.056	1.50~3.50	0.144~6.241	0.022~0.090	4.90~5.15
BAR 7	0.001~0.514	0.028~0.056	1.53~2.40	0.120~2.400	0.044~0.109	3.60~5.60
BAR 8	0.048~0.526	0.028~0.078	1.71~4.00	0.119~1.482	0.064~0.244	5.40~7.35

1.3 检测项目与分析方法

每隔一段时间从各个模拟管段处取挂片进行生物量、生物种属、生物膜结构和颜色检测,同时观察原生动物和后生动物.模拟管道稳定运行至 50 d 时,分别取不同模拟管段挂片的生物膜进行种群及结构分析.

用 2~3 根已灭菌的棉签从上到下擦拭挂片膜面 5~6 次,将擦拭完的棉签放入盛有 10 mL 灭菌纯水试管中,将试管置于超声波清洗器处理 30 min.随后,取一定量水样采用脂磷法^[7]进行生物量测定,测定水样中的磷酸盐浓度(以 P 计),结果以 nmol·cm⁻²挂片表示,1 nmol 约相当于 10⁸ 个大肠杆菌(*E. coli*)大小的细胞.原生动物、后生动物使用 OlympusBH-2 型光学显微镜照相

镜检,各生物种属参考相关方法^[8-9]鉴定.挂片生物膜取样后经预处理^[10],结构采用扫描电镜(型号 HITACHI S-3000N)进行观察.

2 结果与讨论

2.1 生物膜形态特征

图 2、3 为不同水质条件下,模拟管道生物膜外观沿程变化.可以看出,在不同水质条件下,生物膜的厚度、颜色不同.A 江水质条件下,生物膜较厚,为黄褐色,沿水流方向颜色变浅.而 B 江水质条件下生物膜较薄,颜色较浅,几乎透明.在不同水质条件下,两者相似之处表现在进水端至中间的生物膜较厚,而末端的生物膜逐渐变薄,颜色变浅.

综上,不同水质条件下生物膜形态明显不同,

管壁上黏附颗粒物的颜色是表征生物膜形态特征的重要标志.



图 2 A 江模拟管道生物膜挂片



图 3 B 江模拟管道生物膜挂片

2.2 生物膜结构

为了解管段中生物膜结构变化,选取 A 江模

拟管道中不同管段处的生物膜进行电镜扫描,结果见图 4. 可以看出, BAR1 和 BAR2 中生物膜较密实、平滑,而 BAR3 处生物膜表面起伏较大,且存在较多线虫,依靠其自身活动促使生物膜松动(脱落),导致生物膜较粗糙. 此外,表 1 水质数据显示, BAR3 中 COD_{Mn} 、TP 质量浓度降低幅度较 BAR2 大,由此可知,生物膜中线虫对 DO 及营养物质的传质和降解具有重大贡献^[6]. BAR5 和 BAR6 管道生物膜又呈现较密实状态,到 BAR8 时生物膜结构疏松、起伏较大,出现较多的原生动物及藻类. 管道微生物膜结构沿程变化较大.

不同管段处生物膜表面都存在如孔洞或沟渠的结构,流体在生物膜内空隙通道形成对流,从而增大了局部传质系数. 粗糙生物膜结构增大了生物膜比表面积,深层生物膜除依靠扩散作用得到基质外还从液相直接获得营养^[11],这种结构有利于生物膜的生长发育,从而有效氧化去除水中的污染物质.

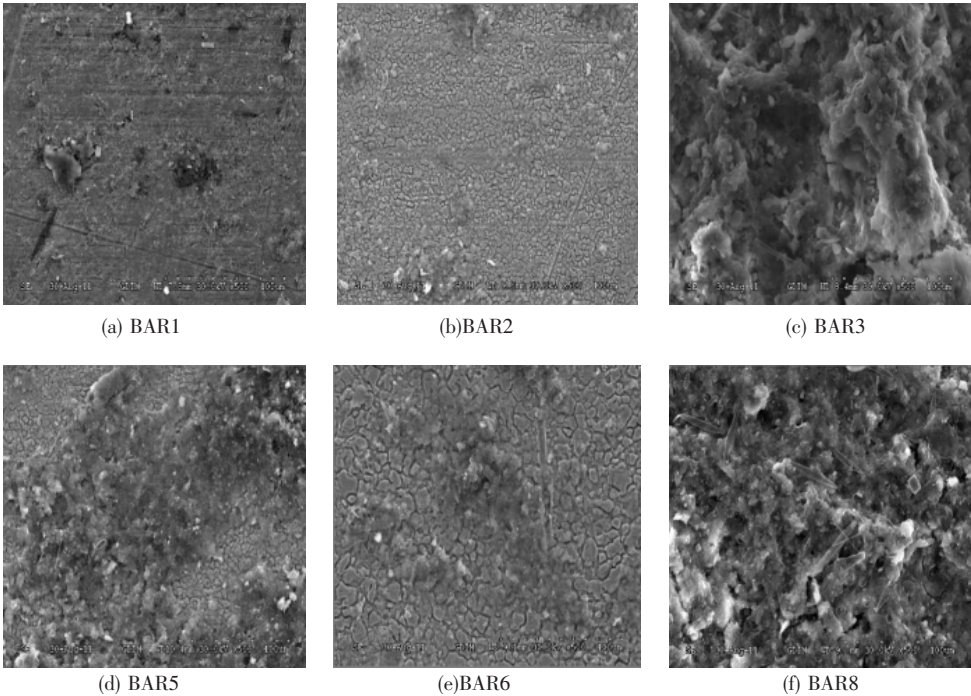


图 4 生物膜结构沿程变化(×500)

2.3 生物量时空变化

管壁生物膜生物量是微生物活性的物质基础,一定环境条件下,管壁生物膜生物量随时间和位置而变化,沿程分布规律也会由于基质浓度及微生物生长速度不同而不同.

图 5 为各模拟反应器沿水流方向管壁生物膜生物量的变化趋势. 可以看出,生物量沿水流方向呈先升高后降低的趋势. A 江模拟管道运行至 75 d 时, BAR3 处生物量达峰值($1.11\text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$). 生物量飙升导致管道中营养物质降低,后端因缺

乏营养生物量明显降低, BAR7 处生物量降至 $0.59\text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$.

与 A 江模拟管道形成鲜明对比, B 江模拟管道生物膜生长受进水 DO ($0.3 \sim 3.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 抑制,对营养物质去除效果不明显,生物量变化也不明显. 运行 90 d 时, BAR1、BAR3、BAR7 处各管壁生物量分别为 0.58 、 0.83 和 $0.54\text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右.

2.4 生物膜微生物组成

图 6 和 7 为不同水质条件下管道生物膜微生物组成. 可以看出, A 江管壁生物膜存在大量尾草

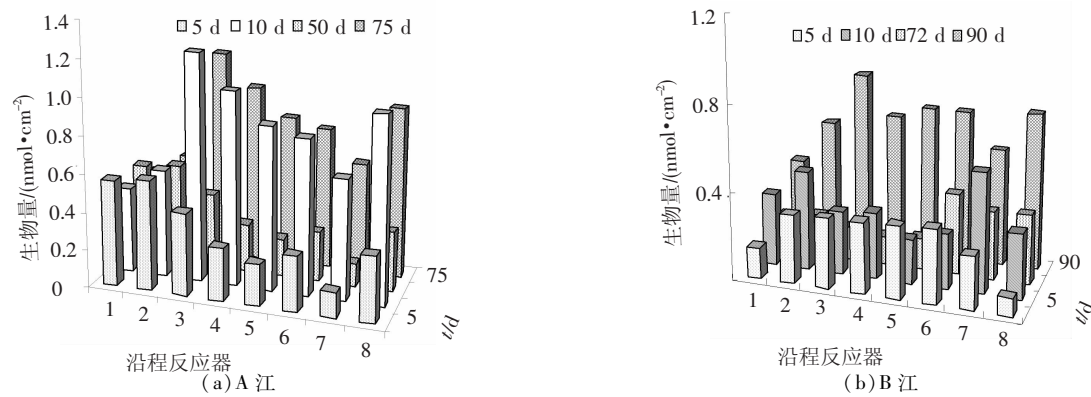


图 5 模拟管道中生物量的变化

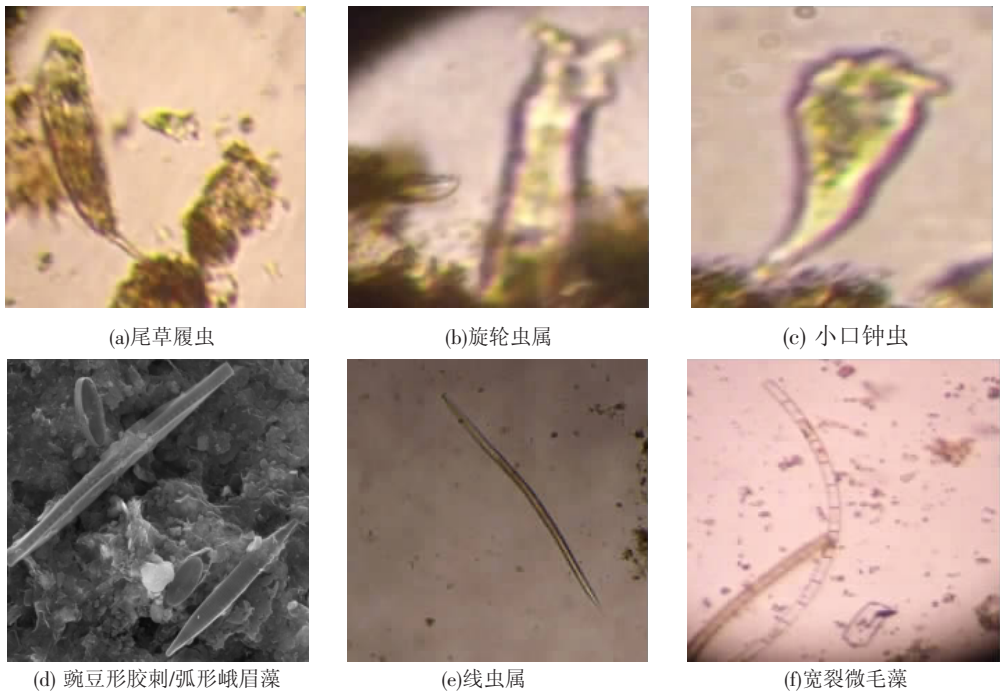


图 6 A 江模拟管道中微生物种群组成

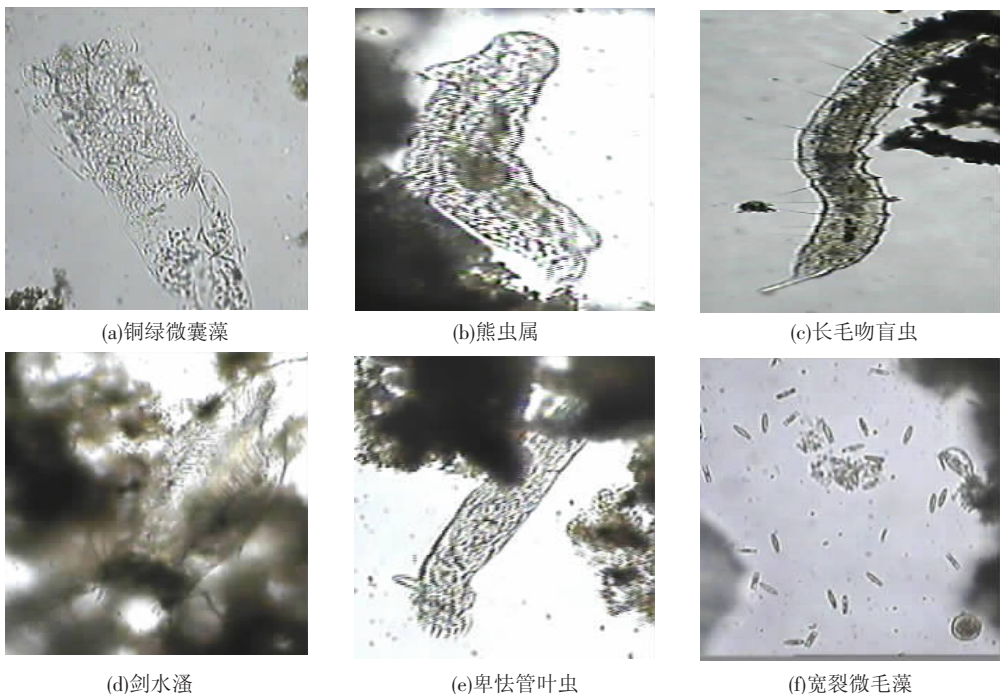


图 7 B 江模拟管道生物膜中微型动物组成

履虫、钟虫、线虫和肾形虫等原生后生动物及少量宽裂微毛藻、硅藻等藻类。B 江管壁生物膜存在较多熊虫属、长毛吻盲虫、卑怯管页虫、剑水蚤和铜绿微囊藻等微型生物。两种水质条件下管壁生物膜原生动物、后生动物和藻类存在明显不同。与 A 江模拟管道生物组成不同, B 江模拟管道生物膜出现的浮游动物熊虫属^[6,8-9]、卑怯管叶虫^[6,8-9]和剑水蚤^[6,9,12]具有较强的生态适应性和耐有机污染能力。微型生物组成间接反映 B 江模拟管道水质远远差于 A 江。

结合进水水质分析可知, B 江原水中 DO 质量浓度低, 氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度高, 而 A 江 DO 质量浓度高, 氨氮和 COD_{Mn} 质量浓度较低, A 江原水水质明显好于 B 江, 且 A 江模拟管道对氨氮、 COD_{Mn} 的去除效果较好, 使得 A 江模拟管道中营养物质更少。而 B 江模拟管道中对氨氮、COD 的去除效果较差, 且出现氨氮、 COD_{Mn} 比进水高的情况, B 江模拟管道中营养物质浓度明显高于 A 江模拟管道。

综上, 原水水质是影响生物膜微型生物组成的重要因素, 微型生物组成结构反映管道水质状况及净水效果。

3 结 论

1) 不同水质条件下生物膜形态明显不同, 管壁上黏附颗粒物的颜色是表征生物膜形态特征的重要标志。

2) 管道微生物膜结构沿程变化较大, 粗糙结构增大了生物膜比表面积, 有利于其生长发育, 从而有效氧化去除水中污染物质。

3) A 江模拟管道运行 75 d 在 BAR3 处生物量达最大值($1.11 \text{ nmol} \cdot \text{cm}^{-2}$), 后段因缺乏营养生物量明显降低。而 B 江模拟管道生物膜生长受进水 $\text{DO}(0.3 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 抑制, 生物量变化较小。

4) 原水水质是影响生物膜微型生物组成的重要因素, 微型生物组成结构反映管道水质状况及净水效果。

参考文献:

- [1] TSAI Y P, PAI T Y, QIU J M. The impacts of the AOC concentration on biofilm formation under higher shear force condition [J]. *Biotechnology*, 2004 (111): 155 - 167.
- [2] DIAZ V, FONT J, SCHWARTZ T, *et al.* Biofilm formation at warming temperature: acceleration of microbial colonization and microbial interactive effects [J]. *Biofouling*, 2011, 27: 59 - 71.
- [3] LEÓN OHL A, HORN H, HEMPEL D C. Behaviour of biofilm systems under varying hydrodynamic conditions [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49 (11): 345 - 351.
- [4] HUANG Z, GEDALANGA P B, ASVAPATHANAGUL P, *et al.* Influence of physicochemical and operational parameters on *Nitrobacter* and *Nitrospira* communities in an aerobic activated sludge bioreactor [J]. *Water Research*, 2010, 44 (15): 4351 - 4358.
- [5] DEINES P, SEKAR R, HUSBAND P S, *et al.* A new coupon design for simultaneous analysis of in situ microbial biofilm formation and community structure in drinking water distribution systems [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010, 87: 749 - 756.
- [6] 刘雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [7] 于鑫, 张晓键, 王占生. 饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定 [J]. *给水排水*, 2002, 28(5): 1 - 5.
- [8] 沈韞芬. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [9] 须藤隆一. 水环境净化及废水处理微生物学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [10] 白晓慧, 蔡云龙, 支兴华, 等. 供水管网不同管材内壁微生物分布的显微观察 [J]. *环境科学*, 2009, 30 (9): 2555 - 2559.
- [11] 于鑫, 李旭东, 杨俊仕, 等. 微污染原水生物预处理工艺中生物膜的形态和活性 [J]. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(1): 37 - 39.
- [12] 王新华, 吕昀, 秦保平, 等. 引滦入津输水工程流域浮游动物和水质评价 [J]. *南开大学学报*, 2002, 35 (1): 16 - 22.

(编辑 刘 彤)