doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.004

# 溶解氧对输水管道生物膜微生物群落结构及出水水质影响

雒江菡<sup>1</sup>,贾瑞宝<sup>2</sup>,于瑞洪<sup>3</sup>,阎力君<sup>4</sup>,李圭白<sup>1</sup>,梁 恒<sup>1</sup>

(1. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090;2. 济南市供排水监测中心,济南 250000;3. 黑龙江生物科技职业学院,哈尔滨 150025;4. 哈尔滨商业大学 细胞与分子生物学研究所,哈尔滨 150076)

摘 要:为提高微污染原水输水安全性,采用生物膜环状反应器(biofilm annular reactor,BAR)模拟原水输水管网,研究溶解氧(DO)对出水水质及生物膜微生物的影响,运用 454-高通量测序技术对生物膜的微生物多样性和丰度进行分析.结果表明:随着溶解氧浓度的提高,反应器出水浊度、总铁、氨氮大幅度下降,该过程对总氮和 COD<sub>Mn</sub>去除的影响并不明显;生物膜中的铁细菌、硫酸盐还原菌的量均随溶解氧浓度的提高而降低,而微生物多样性和丰度(如硝化细菌)随溶解氧质量浓度的提高而升高.提高溶解氧能够缓解管道腐蚀,提高管壁生物膜的净水作用.

关键词:原水;溶解氧;生物膜;454-高通量测序技术;微生物群落结构

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)08-0024-07

# Effect of dissolved oxygen concentration on pipeline biofilm microbial community structure and effluent water quality

LUO Jianghan<sup>1</sup>, JIA Ruibao<sup>2</sup>, YU Ruihong<sup>3</sup>, YAN Lijun<sup>4</sup>, LI Guibai<sup>1</sup>, LIANG Heng<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China;
2. Jinan Water Supply and Drainage Monitoring Center, Jinan 250000, China;
3. Heilongjiang Vocational College of Biology Science and Technology, Harbin 150025, China;
4. Institute of Cell and Molecular Biology, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China;

University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: To improve the safety of distributing raw water, a BAR (Biofilm Annular Reactor) was constructed to simulate the distribution system and the effect of dissolved oxygen (DO) concentration on the effluent water quality and biofilm was studied. The 454-pyrosequencing technology was employed to analyze the diversity of biofilm in the reactor. Experimental results showed that the turbidity and the concentration of total iron, ammonia nitrogen decreased obviously with DO concentration increasing, while the concentrations of total nitrogen and  $COD_{Mn}$  changed slightly. The numbers of iron bacteria and sulfate-reducing bacteria reduced significantly, while the richness and diversity of the biofilm related bacteria (such as nitrifying bacteria) improved. So, increasing DO concentration can alleviate the pipeline corrosion and develop biofilm purifying water role.

Keywords: raw water; dissolved oxygen; biofilm; 454-pyrosequencing; microbial community structure

原水通过长距离输送,历经数百千米,历时四五 小时乃至数天,密闭管道溶解氧下降,管道腐蚀加 剧,消毒剂用量增加,出水浊度升高,水质恶化,增加 了水厂处理难度<sup>[1-2]</sup>;另外,原水中的微生物及微污 染物易附着于管壁形成生物膜,溶解氧也将会影响

作者简介: 維江菡(1980—),女,博士研究生; 李圭白(1931—),男,博士生导师,中国工程院院士; 梁 恒(1979—),男,教授,博士生导师

通信作者:梁 恒, hitliangheng@163.com

生物膜中某些微生物(如铁细菌、硫酸盐还原菌及 硝化细菌等)的生长及作用,从而导致生物膜微生 物群落结构的改变<sup>[3]</sup>.因此,溶解氧是评价和改善水 质的重要参数.

近年来,国内外关于管网水质以及生物膜的研究主要集中在给水管网水利条件、消毒剂及管材等因素对其的影响,关于溶解氧对生物膜及水质的影响研究甚少. Rochex 等<sup>[4]</sup>运用 Rotating annular reactors 研究了剪切力对生物膜微生物群落结构的影响,证实剪切力使老化生物膜不断脱落,管壁生物膜一直处于旺盛生长状态;Gagnon 等<sup>[5]</sup>的研究表明给水管网消毒剂氯和氧化氯能控制生物膜的生长;Markku 等<sup>[1]</sup>研究了流速对给水管网生物膜的影响.

收稿日期:2015-06-11

基金项目:国家自然科学基金(21301041);科技部科技惠民项目 (2013GS370202-003);"十二五"水专项(2012ZX07404-003-004);哈尔滨市科技局优秀学科带头人项目 (2013RFXXJ054)

证实增加水流速度能够促进生物膜的生长; 王磊 等<sup>[6]</sup>通过生物膜生物反应器研究了低溶解氧条件 下生物膜的特性, 证实溶解氧对生物膜外观、微生物 群落组成及除污(COD、SS)能力均有影响; Luo等<sup>[7]</sup> 在输水管网生物膜研究中发现, 生物膜中的微生物 在高溶解氧条件下对原水中的氨氮有较高的去除 率.近几年发展起来的 454 高通量测序技术被广泛 应用到环境微生物多样性分析中, Hong 等<sup>[8]</sup>采用高 通量测序方法对给水管网生物膜的微生物群落结构 进行分析, 发现在同一输水管网内不同取样点生物 膜微生物多样性差异较大.本文拟用 BAR 模拟原水 输水管网, 研究溶解氧对出水水质及生物膜微生物 的影响, 运用 454-高通量测序技术对生物膜的微生 物多样性和丰度进行分析, 以期为发挥管壁生物膜 净水作用和降低管道腐蚀提供参考.

1 实 验

#### 1.1 实验装置与运行

为真实地模拟实际管网,采用美国 BioSurface Technology 公司生产的 BAR 1320 LJ 在水厂取水泵站

搭建了小型模拟输水管网(见图 1).管道材料为铸铁. 管网进水为某江水,水质参数见表 1.水通过蠕动泵提 升进入模拟管网,依靠蠕动泵控制进水速度,从而控 制原水在管网内的停留时间(4 h).调节 BAR 反应器 转速(50 r/min)调整水流与管壁的剪切力 (0.25 N/m<sup>2</sup>).通过曝气泵调节水箱内的溶解氧(0.8, 1.9,2.9,4.1,4.9,5.9和7.1 mg/L).每个工况运行6个 月,管网生物膜趋于成熟,对应的生物膜编号为 B1—B7.为保证实验条件一致,7 台反应器并联操作.



**图 1** 模拟管网流程 Fig.1 Flow chart of simulated pipeline

	表	1	进水水质参数			
 1	т	CI.			1.	1

Tab.1 Influent water quality datas									
		溶解氧/	浊度/	总硬度/	化学需氧量	5 d 生化需氧量/			
水温/七	рН	$(mg \cdot L^{-1})$	NTU	$(mg \cdot L^{-1})$	$\text{COD}_{Mn}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$			
24.0~28.0	6.8~7.0	0.8~1.0	16.4~18.1	69.8~74.1	14~15	2.4~2.8			
氨氮(以N计)/	/ 总磷/	总氮/	铜/	锌/	氟化物/	硒/			
$(\mathrm{mg}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{L}^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$							
2.0~2.1	0.07~0.09	3.4	0~0.004	0.008~0.010	0.1~0.15	< 0.001			
砷/	汞/	镉/	铬(六价) /	铅/	氰化物/	挥发性酚类(以苯酚			
$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	计)/(mg・L <sup>-1</sup> )			
0~0.002	< 0.000 05	< 0.001	< 0.004	< 0.001	< 0.002	< 0.002			
石油类/	阴离子合成洗涤剂/	硫化物/	硫酸盐/	氯化物/	铁/	锰/			
$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$	$(mg \cdot L^{-1})$			
< 0.05	< 0.04	0~0.01	9.7	7.3~9.2	0.099~0.110	0.019~0.024			

1.2 分析方法

1.2.1 水质的测定

参照 文献 [9] 对 pH、浊 度、溶 解 氧 (DO)、 COD<sub>Mn</sub>、"三氮"、总氮以及总铁等指标进行检测.

1.2.2 生物膜微生物数量的测定

铁细菌和硫酸盐还原菌的检测采用文献[10]方法;氨氧化菌采用 MPN-Griess 法(最大可能数法-Griess 试剂检测法)<sup>[11]</sup>.

1.2.3 微生物多样性

采用 454-高通量测序的方法解析微生物种群 结构.通过 OMEGA E.Z.N.A DNA 试剂盒抽提生物膜

微生物基因组,采用细菌 16S rRNA 常用引物 (8F:5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'; 533R: 5'-TTACCGCGGCTGCTGGCAC-3')通过 PCR 反应 进行扩增实验(反应参数为:95 ℃ 2 min; 25 循环: 95 ℃ 30 s, 55 ℃ 30 s, 72 ℃ 30 s; 72 ℃ 5 min; 10 ℃保温).使用 1%琼脂糖电泳检测 PCR 产物并定 量,取适量 PCR 产物进一步油包水 PCR(EmPCR)扩 增,用 Roche Genome Sequencer FLX 系统测序.为后 续测序分析区分样品,需连接特定标签序列,所得原 始序列进一步优化和聚类,通过 mothur 软件分析样 品的多样性和群落结构. 2 结果与分析

#### 2.1 水质变化

#### 2.1.1 溶解氧对出水浊度的影响

管网水浊度的改变主要是由微污染物的降解、 生物膜脱落、管道腐蚀和铁释放引起的.溶解氧影响 生物膜的交联度、生物膜与管壁的结合能力、管壁的 腐蚀速率及铁的溶出,从而影响出水浊度.不同溶解 氧质量浓度下,出水浊度的变化如图2所示.可以看 出,随着溶解氧质量浓度的提高,出水浊度呈现先上 升后下降再上升的趋势.溶解氧为1.9 mg/L时,浊度 最高,为 27.7 NTU,溶解氧为 5.9 mg/L 时,浊度最 低,为18.4 NTU.这或许是因为高溶解氧条件下,生 物膜交联度高,阻碍了铁管进一步腐蚀和铁的释放, 出水浊度降低;而低溶解氧条件下,生物膜松动,管 壁腐蚀加剧,铁释放量大,导致出水浊度升高.另外, 随着溶解氧质量浓度的提高,微生物数量增加,代谢 能力增强,水中的微污染物被生物膜中微生物的生 长所消耗,出水的浊度降低;溶解氧达5.9 mg/L以上 时,出水浊度呈现上升趋势,这或许是因为随着溶解 氧的升高,外部微生物生长繁殖较快,生物膜厚度增 加,内部营养物质较少,生物膜会无规则地出现老化 现象,易脱落到水中而影响出水浊度.因此,即使溶 解氧质量浓度较高时,出水浊度也会突然升高.



Fig.2 Effect of dissolved oxygen on BAR effluent water turbidity2.1.2 溶解氧对管道腐蚀的影响

目前以铸铁和钢管为主的铁质管材在给水管网中仍普遍存在,这类管材与水接触不可避免地会发生腐蚀现象,大多数输水管网都会在管壁表面形成 铁腐蚀产物,腐蚀管垢的存在会限制输水能力,还会导致铁的溶出,恶化水质,溶解氧作为氧化剂参与管 道腐蚀,并对铁的溶出有重要影响.图3反映了溶解 氧对铁溶出的影响.可以看出,随着溶解氧质量浓度 的升高,出水总铁质量浓度下降,由1.28 mg/L下降 到0.37 mg/L,由此推断,水体中的溶解氧对管道腐 蚀、铁释放均有较大影响.水体中溶解氧质量浓度较 高时,氧分子作为电子受体参与管道腐蚀反应,其将 Fe(II)氧化为 Fe(III)、Fe(OH)<sub>3</sub>等三价铁的化合物 并附着沉积在管壁,新生成的三价铁的化合物会进 一步与水体及管垢反应,生成更为稳定的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、 FeOOH 等物质,从而形成稳定致密的氧化膜,防止 管道的进一步腐蚀,管垢内表层的腐蚀产物不易释 放<sup>[12]</sup>.管网内释放的铁主要是由金属铁的腐蚀产物 中亚铁离子(Fe<sup>2+</sup>)和亚铁组分的溶解造成的,当水 体中溶解氧质量浓度较低时,FeOOH 会代替氧气作 为电子受体,与管道中的铁发生反应,生成易溶的亚 铁物质<sup>[13]</sup>,增加出水总铁质量浓度.另外,生物膜的 存在也能减少传递到管壁的氧,从而抑制管壁的腐 蚀.鲁智礼等<sup>[14]</sup>通过管网中试模拟系统研究了溶解 氧对管网铁释放的影响,发现进水溶解氧质量浓度 由 8 mg /L 增加到 15 mg /L 时,实验系统的铁释放 均有明显的降低.



图 3 溶解氧对反应器出水总铁的影响

Fig.3 Effect of dissolved oxygen on BAR effluent total iron concentration

2.1.3 溶解氧对出水 COD<sub>Mp</sub>的影响

溶解氧能够氧化有机物而影响出水的 COD<sub>Mn</sub>. 不同溶解氧条件下,出水 COD<sub>Mn</sub>的变化见图 4 所示.



图 4 溶解氧对反应器出水 COD<sub>Mn</sub>的影响



由图 4 可以看出,随着溶解氧质量浓度的增加, 出水 COD<sub>Mn</sub>变化较小,基本保持在 10.1~13.8 mg/L. 这是因为出水 COD<sub>Mn</sub>的变化受生物膜中微生物的降 解以及老化生物膜脱落的影响,一方面增加溶解氧 质量浓度,挂片生物膜的微生物代谢能力增强, COD<sub>Mn</sub>不断被降解消耗导致质量浓度降低;另一方面 管壁生物膜是一个复杂的、动态变化的微生物生存 环境,它的形成包括"营养物质及微生物的吸附一生 物膜的形成—生物膜的生长—生物膜的老化—生物 膜的脱落"这样周而复始的循环<sup>[15]</sup>,当生物膜生长 到一定程度,膜深处的微生物由于营养物质及溶解 氧缺乏而死亡,生物膜交联度降低而引起脱落,导致 出水的 COD<sub>Mn</sub>略有增加,总体上看,当进水 COD<sub>Mn</sub>较 低时,溶解氧对 COD<sub>Mn</sub>的去除率影响较小.

2.1.4 溶解氧对出水氮素的影响

传统的生物脱氮主要是通过氨化/硝化反应和 反硝化反应实现.硝化反应是在好氧条件下,以氧作 为电子受体将氨氮转化为硝酸盐氮的过程,反硝化 反应是在厌氧条件下硝酸氮转化为氮气而去除.因 此,溶解氧是生物脱氮较受关注的指标之一.溶解氧 对出水氮素质量浓度的影响见图 5.可以看出,当溶 解氧在 0.8 mg/L 以下时,氨氮去除率较低,出水氨氮 质量浓度在 1.9 mg/L 左右,去除率仅为 7%,亚硝酸 盐氮质量浓度最高,硝酸盐氮和总氮质量浓度略有 下降.说明有反硝化作用产生,但不彻底,存在一定 量亚硝酸盐氮的积累,同时,较低的溶解氧抑制了管 道内的硝化作用:随着溶解氧质量浓度的升高,氨氮 去除率逐渐升高,当溶解氧超过4.1 mg/L时,氨氮去 除率达27%以上,亚硝酸盐氮低于进水质量浓度,为 0.16 mg/L,硝酸盐氮质量浓度逐渐升高,硝化作用 占较大优势,而总氮质量浓度忽高忽低.这或许是由 于微生物在溶解氧充足的条件下,为满足自身的生 长需要消耗一定量的氮源,导致出水总氮质量浓度 降低,而当微生物生长进入衰亡期,老化生物膜脱 落,反而增加了水中有机氮质量浓度,造成出水总氮 质量浓度升高.Helmer 等[16]的研究也证实,以氨氮 为唯一氮源,反应器厌氧时,氨氮几乎不会发生转 化;溶解氧超过5 mg/L 时,氨氮易转化为亚硝态氮 和硝态氮.另外,参与硝化作用的亚硝化菌与硝化菌 属于专性好氧自养菌,依靠氨氮和亚硝氮的氧化获 得能量才能生长,也需要氧分子作为呼吸链的最终 电子受体.李绍峰等[17]在研究溶解氧对膜生物反应 器同步硝化反硝化影响时获得了同样的规律,可以 通过提高溶解氧加快硝化效率.



图 5 溶解氧对反应器出水氮的影响

Fig.5 Effect of dissolved oxygen on BAR effluent nitrogen concentration

#### 2.2 生物膜微生物数量变化

#### 2.2.1 生物膜铁细菌数量的变化

铁细菌能将溶解于微污染原水中的氢氧化亚铁、碳酸铁氧化成高铁沉淀附着到管壁,形成锈层或锈瘤.有研究表明<sup>[18]</sup>,在溶解氧质量浓度较低(0.1~0.2 mg/L)时,铁细菌生长良好,当质量浓度较高(大于2.75 mg/L)时,铁细菌的生长受到抑制,从而抑制了管道的腐蚀.文献[19]指出,铁细菌是好

氧型自养菌,依靠铁和氧生长繁殖,溶解氧的存在能够为铁细菌的生长提供有利的条件.本实验考察了密闭生物反应器内溶解氧对生物膜铁细菌数量的影响,结果见图 6.可以看出,随着溶解氧质量浓度的升高,生物膜中的铁细菌数量呈下降趋势,当溶解氧超过 2.9 mg/L 时,铁细菌的数量低于 200 MPN/mL.本研究结果证实,溶解氧对铁细菌的生长有一定的抑制作用;一方面是高溶解氧降低了管壁铁的溶出,铁

细菌缺少营养基质,从而抑制了铁细菌的增殖;另一 方面是由于铁细菌分布在挂片表面,随着溶解氧质 量浓度的升高,生物膜厚度增加,阻碍了溶解氧的传 递,从而抑制了铁细菌的生长.



Fig.6 Effect of dissolved oxygen on iron bacteria in biofilm 2.2.2 生物膜硫酸盐还原菌(SRB)的变化

硫酸盐还原菌是一种生长在管壁锈垢和沉淀物 内部,能够利用有机物为碳源,利用生物膜内产生的 氢,将硫酸盐还原成硫化氢的厌氧菌<sup>[20]</sup>.在输水管 网微污染原水输送过程中,管道内溶解氧降低,水中 的微污染物及微生物也会在管壁形成粘泥及污垢, 为硫酸盐还原菌的生长繁殖创造有利条件.生物膜 硫酸盐还原菌随溶解氧的变化见图 7.可以看出,随 着溶解氧质量浓度的升高,生物膜中 SRB 的数量呈 下降趋势.特别是当溶解氧高于2.9 mg/L以后,硫酸 盐还原菌的数量低于20 MPN/mL.硫酸盐还原菌是 一类生长在在锈垢和沉淀物内部厌氧环境下,以有机 物作为电子供给体,以硫酸盐作为末端电子接受体, 将硫酸根还原成硫离子的细菌,当溶液中的溶解氧质 量浓度低于 2.5 mg/L 时, SRB 就能快速繁殖<sup>[21]</sup>.由此 推断,当溶解氧质量浓度超过3 mg/L时,溶解氧成了 挂片 SRB 生长的限制性因素,抑制硫酸还原菌的生 长,同时减缓管道腐蚀.



Fig.7 Effect of dissolved oxygen on SRB in biofilm 2.2.3 生物膜硝化细菌的变化

硝化细菌是一类能降解氨和亚硝酸盐的自养型 细菌,氨氮和亚硝酸盐是其生长的物质基础,它们通 过硝化作用将氨氮转化为亚硝酸盐,再进一步转化为 硝酸盐,每毫克氮素经过整个硝化作用途径后,最大 需要 4.5 mg 溶解氧来"清除"含氮物质释放的电子; 另外,硝化细菌均为专性好氧菌,其正常生长代谢都 需要氧的参与,O<sub>2</sub>是最终的电子受体.生物膜硝化细 菌随溶解氧的变化见图 8.可以看出,随着溶解氧质量 浓度的升高,生物膜中硝化细菌的数量呈上升趋势. 当溶解氧超过4.1 mg/L时,生物膜中硝化细菌数量大 幅度增加.有研究表明,为确保硝化作用进行彻底,反 应体系溶解氧尽量控制在 2.0 mg/L 以上,低于 0.5 mg/L硝化作用明显减弱<sup>[22]</sup>.因此,可以通过提高 管道内的溶解氧质量浓度,发挥管壁生物膜硝化细菌 硝化作用,降低密闭管道水质恶化风险.







#### 2.3 生物膜微生物群落结构变化

微生物在生物膜法处理污染物中起决定性作 用,其种群的多样性及丰度很大程度上影响处理效 果.同时,微生物群落结构分析能够揭示环境因素对 微生物生态分布的作用,从机制上分析生物膜对出 水水质的影响.

生物膜454 测序收获62904 个有效序列,优化 后得到 48 016 个序列.将这些序列进行聚类分析, 得到 2 240 OTUs (operational taxonomic units).在门 和科的水平上,对所有序列进行 OTU 划分,结果见 图 9. 由图 9(a) 可以看出, 不同溶解氧条件下 BAR 挂片生物膜中微生物多样性较为丰富,各样品微生 物的多样性及丰度存在较大差异.在门的水平,变形 菌门 (Proteobacteria) 是除样品 B1, B2 之外, 其他生 物膜的优势菌群,厚壁菌门(Firmicutes)是B1,B2的 优势菌群;变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteria)和拟杆菌门 (Bacteroidetes)以不同的丰度分散在各个样品中,硝 化螺旋菌门(Nitrospirae)的丰度增加.变形菌门 (Proteobacteria)是细菌中最大的一门,其丰度在各 个样品中相对较高:厚壁菌门(Firmicutes)多数为革 兰氏阳性菌,可以产生内生孢子,具有极强的抵抗极 端环境能力,营厌氧、兼性或好氧生活,因此,在较低 溶解氧条件具有较高丰度;硝化螺旋菌门(Nitrospirae)为好氧菌,随着溶解氧质量浓度的提高,其丰度 相对增加,而其他门类均是水中普遍存在的微生物, 丰度较高.如图9(b),在科的水平上,所有样品的优势菌群均为假单胞菌科(Pseudomonadaceae),随 着溶解氧质量浓度的提高,肠杆菌科(Enterobacteriaceae)的丰度降低,硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae) 和亚硝化单胞菌科(Nitrosomonadaceae)的丰度增



加.这主要是因为肠杆菌为兼性厌氧菌,在营养物质 一定的条件下,低溶解氧有利于其生长;硝化螺旋菌 科(Nitrospiraceae)和亚硝化单胞菌科(Nitrosomonadaceae)是好氧菌<sup>[21]</sup>,溶解氧成为其生长及进行硝 化作用的动力.由此可以推断,溶解氧对输水管壁生 物膜的微生物群落结构有重要影响.



(a) 在门的水平

图 9 溶解氧对生物膜中微生物丰度和多样性的影响

Fig.9 Effect of dissolved oxygen on biofilm microbial richness and diversity

## 3 结 论

1)溶解氧的改变,对出水浊度、总铁的溶出以 及氨氮去除均产生较大影响,对总氮和 COD<sub>Mn</sub>有一 定的去除效果,但随着溶解氧质量浓度升高,去除效 果并没大幅度升高;而溶解氧对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果 有很大影响,溶解氧在 3.0 mg/L 以下时,出水的去 除率低于 20%,随着溶解氧的提高,最高可达 43%. 溶解氧极大影响出水总铁的质量浓度及生物膜微生 物数量,随着溶解氧的提高,出水总铁质量浓度降 低;挂片生物膜的铁细菌、硫酸盐还原菌数量减少, 硝化细菌数量增加.

2)454-高通量测序对挂片生物膜微生物多样 性及丰度分析表明:在门的水平上,变形菌门菌群所 占比重最大,其次是厚壁菌门,随着溶解氧的提高, 硝化螺旋菌门丰度升高;在科的水平上,优势菌群均 为假单胞菌科(Pseudomonadaceae),随着溶解氧质 量浓度的提高,肠杆菌门(Enterobacteriaceae)的丰 度降低,硝化螺旋菌科(Nitrospiraceae)和亚硝化单 胞菌科(Nitrosomonadaceae)的丰度增加,这与反应 器较好的硝化作用相一致.

3)改变管道溶解氧能够提高管壁生物膜的净 水作用,同时减缓管道管壁腐蚀,大大提高了输水安 全性.

### 参考文献

- [1] LEHTOLA M J, NISSINEN T K, MIETTINEN I T, et al. Removal of soft deposits from the distribution system improves the drinking water quality [J]. Water Research, 2004, 38:601–610.
- United states environmental protection agency. health risks from microbial growth and biofilms in drinking water distribution systems
   [Z]. Distribution System White Paper, 2002.
- [3] 李爽,张晓健. 给水管壁生物膜的生长发育及其影响因素[J]. 中国给水排水, 2003, 19 (13):49-52.
  LI Shuang, ZHANG Xiaojian. Study of the influential factors on the growth of biofilm on distribution water pipe wall [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19 (13):49-52.
- [4] ROCHEX A, GODON J J, BERNET N, et al. Role of shear stress

on composition, diversity and dynamics of biofilm bacterial communities [J]. Water Research, 2008 (42):4915-4922.

- [5] GAGNON G A, RAND J L, O'LEARY K C, et al. Disinfectant efficacy of chlorite and chlorine dioxide in drinking water biofilms
   [J]. Water Research, 2005 (39):1809-1817.
- [6] 王磊,李海英,李雪娟,等. 低溶解氧对生物膜特性的影响研究
  [J]. 中国给水排水,2003,24 (15):15-19.
  WANG Lei, LI Haiying, LI Xuejuan. The study of low dissolved oxygen concentration on the biofilm characteristics [J]. China Water & Wastewater, 2003, 24 (15):15-19.
- [7] LUO Jianghan, LIANG Heng, YAN Lijun, et al. Microbial community structures in a closed raw water distribution system biofilm as revealed by 454-pyrosequencing analysis and the effect of microbial biofilm communities on raw water quality [J]. Bioresource Technology, 2013 (148):189-195.
- [8] HONG P Y, HWANG C, LING F, et al. Pyrosequencing analysis of bacterial biofilm communities in water meters of a drinking water distribution system [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76 (16): 5631-5635.
- [9] 中国国家标准化管理委员会.生活饮用水标准检验方法: GB/T5750.1-5750.13[S].北京:中国标准出版社, 2006. Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard examination methods for drinking water: GB/T5750.1-5750.13[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [10]中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法: GB/T14643.5-14643.6[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
  Standardization Administration of the People's Republic of China.
  Standard examination methods for drinking water: GB/T14643.5-14643.6[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [11]俞毓馨,吴国庆,孟宪庭,等.环境工程微生物检验手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:136-144.
  YU Yuxin, WU Guoqing, MENG Xianting. Environmental engineering microbiology test handbook [M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1990:136-144.
- [12] BENJAMI N. Internal corrosion of water distribution systems [M]. 2nd ed. Michigan, USA: American Water Works Association Research Foundation, 1996.
- [13] KUCH A. Investigations of the reduction and re-oxidation kinetics of iron (III) oxide scales formed in waters [J]. Corrosion Science, 1988, 28 (3):221-231.
- [14] 鲁智礼, 王刚亮, 石宝友, 等. 消毒剂和溶解氧对管网铁释放影

响的中试研究[J]. 环境工程学报, 2014,8(4): 1410-1416. LU Zhili, WANG Gangliang, SHI Baoyou. Pilot study on effects of disinfectant and dissolved oxygen on iron release in distribution system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4): 1410-1416.

[15]曲久辉. 饮用水安全保障技术原理[M]. 北京:科学出版社, 2007.

QU Jiuhui. Drinking water security technology principle [M]. Beijing: Science Press, 2007.

- [16] HELMER C, TROMM C, HIPPEN A, et al. Single stage biological nitrogen removal by nitrification and anaerobic ammonium oxiadation in biofilm systems [J]. Water Science Technology, 2001, 43 (1): 311-320.
- [17]李绍峰, 崔崇威, 黄君礼, 等.溶解氧和 HRT 对 MBR 同步硝化 反硝化影响研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 887-890.
  - LI Shaofeng, CUI Chongwei, HUANG Junli, et al. Influence of DO and HRT on simultaneous nitrification and denitrification in MBR [J]. Journal of Harbin institute of Technology, 2007, 39(6): 887-890.
- [18] BUSALMEN J P, VAZQUEZ M, DESANCHEZ S R, et al. New evidences on the catalase mechanism of mirobial corrosion [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47:1857-1865.
- [19]武素茹,段继周.硫酸盐还原细菌和铁还原细菌混合生物膜对 碳钢腐蚀的影响[J].材料开发与应用,2008,3(23):53-56.
   WU Suru, DUAN Jizhou. Effect of sulfate-reducing bacteria and iron-reducing bacteria mixed biofilm on carbon steel corrosion [J].
   Development and Application Materials, 2008, 3(23):53-56.
- [20]陈野,刘贵昌. 硫酸盐还原菌腐蚀的防治方法及其研究进展
  [J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(3): 211-217.
  CHEN Ye, LIU Guichang. Progress in control of corrosion caused by sulfate-reducing bacteria [J]. Corrosion & Protection, 2004, 25 (3): 211-217.
- [21] HAO O J, CHEN J M, HUANG L, et al. Sulfate-reducing bacteria[J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 1996 (26): 155-187.
- [22] BAE H S, RASH B A, RAINEY F A, et al. Description of azospira restricta sp nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from groundwater [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2007,57 (7):1521-1526.

(编辑 刘 形)