

预氯化对输水管道净水效能影响及恢复研究

赵乐乐¹, 李星¹, 杨艳玲¹, 朱永娟¹, 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: 为保障原水输水过程中水质安全性, 采用生物膜环状反应器(BAR, Biofilms Annular Reactor)考察预氯化对管道生物膜净水效能的影响及其性能恢复过程. 结果表明, 管道预氯化后, 对管道生物膜损伤较大, 影响 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 、TP 去除效果; 出水出现短暂的 COD_{Mn} 和 TP 质量浓度上升、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累现象, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 最大积累量可达 7 倍. 冲击实验后稳定运行阶段, 生物膜对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效能恢复时间较 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 快 2 d, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 分别在第 8 天和第 10 天完成恢复; 稳定运行至第 8 天, 管壁生物膜完成对 COD_{Mn} 和 TP 去除效能的恢复.

关键词: 原水输水管道; 生物膜; 净水效能; 效能恢复; 预氯化; 生物膜环状反应器

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0106-05

Destruction and restorative of purification efficiency in diversion pipe by prechlorination

ZHAO Lele¹, LI Xing¹, YANG Yanling¹, ZHU Yongjuan¹, LI Guibai²

(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: To ensure the safety of water in the process of translation in long distance raw water diversion pipe, the damagemant and recovery of purification by added chlorine to Biofilms Annular Reactor (BAR) which simulated the pipe was investigated. The results showed that the prechlorination can damage the pipe bioflim, lower the removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, COD_{Mn} , TP, and the effluent of concentration of COD_{Mn} and TP was elevated in short term and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentration was rised in long term after prechlorination. The effluent concentration of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ can be reached 7 times of the influent. The recovery of removal of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was earlier 2 days than that of $\text{NO}_2^- - \text{N}$, and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ could be completely repaired on 8 dsys and 10 days, respectively. The removal of COD_{Mn} and TP can be completely repaired on 8 days.

Key words: long distance raw water diversion pipe; bioflim; purification efficiency; recovery efficiency; prechlorination; biofilms annular reactor

为抑制原水在输送过程中贝类过度繁殖, 保障管道的输水能力^[1], 净水厂一般在原水取水口处间歇投加氯来控制管道中贝类的生长. 同样, 在南水北调输水工程北京段渠采用间歇性加氯方式去除微生物, 控制管壁微生物对封闭条件下管道

溶解氧的消耗^[2]. 间歇投加氯在对上述问题起到有效作用的同时也会对管壁生物膜起到杀灭作用, 导致生物膜内菌体大量死亡, 进而影响其生物净水效果, 对水质产生一定的影响. 当微生物死亡、生物膜大量脱落时, 将导致水质恶化, 出现浊度、色度增加, 出现异臭和异味^[3-5].

目前, 关于投加氯后对管道水质产生何种影响, 管道生物膜需要多长时间可恢复到原先净水水平的研究未见报道. 本文采用 5 台生物膜环状反应器(BAR, Biofilms Annular Reactor)用于模拟管网各种水质和水力条件对管壁生物膜影响, 考

收稿日期: 2012-08-01.

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.

察投氯量和接触时间对原水输水管道生物膜净水效能影响及恢复过程, 以期为水厂加氯期间应对水质变化提供参考。

1 实验

1.1 实验过程

本实验中, BAR 转速为 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 水力停留时间为 2 h, 挂片材料为不锈钢 304。期间不断检测水中氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、 COD_{Mn} 的变化, 稳定运行 50 d 左右时, BAR 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 的去除效果稳定, 分别为 84%、90% 和 9.6%, 说明该套模拟反应器能充分反映原水管道对水质的净化能力, 随后进行冲击性实验。

5 台 BAR 达到上述稳定状态后, 进行不同投氯方式实验, 采用 1 台 BAR 为对照实验, 1 台进行氯冲击性实验, 维持出水 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 余氯条件下, 与反应器接触反应时间为 2 h。另外 3 台投加一定量的氯, 维持出水 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 余氯条件下, 改变各个反应器与氯接触时间分别为 3、6、12 h。停止投加氯后通入原水, 检测水质指标的变化。

1.2 分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 均采用国家生活饮用水标准检验方法进行检验^[6]; TP 采用孔雀绿-磷钼杂多酸分光光度法^[7]; 余氯采用深圳五参数测氯仪; 水温直接用水银温度计检测。

2 结果与分析

2.1 冲击性加氯实验结果

冲击性加氯是指向反应系统中以某一次性投加相应剂量的有效氯^[8]后, 观察管道生物净水受到的影响。在实验中投加一定的氯, 使模拟管道反应器出水余氯达 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 接触反应 2 h。放掉 BAR 中带氯的原水, 重新通入原水。连续监测 BAR 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 和 TP 的变化。与相同运行条件下未加氯的 BAR 作对比, 考察氯冲击对净水效能的影响及恢复所需时间。

图 1 为氯投加对管道去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 效果的影响。对照组 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在 75%~95%, 平均去除率为 84%。通入原水 2 h 后, 投加氯的 BAR 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果明显降至 5%。随着不断通入原水, 管道对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果开始恢复, 运行至第 4 天时, 去除率升高到 68%, 运行至第 8 天时, 去除率达 84%。随后几天对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果稳定在 80% 以上, 并且与对照组去除效果相当, 至此认为, 余氯冲击后, 管道生物膜

在第 8 天时可恢复对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果。

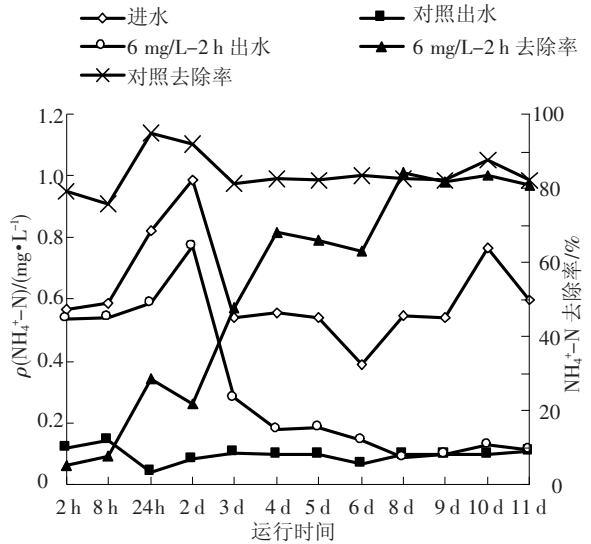


图 1 加氯 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化

图 2 为氯投加对管道去除 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 效果的影响。投加氯后 BAR 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 明显高于进水, 与出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化不同, 管道对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除并没有马上得到恢复, 而是不断积累。运行至第 2 天时, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积到最大值 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。运行至第 6 天时, 管道开始对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 有去除效能; 运行至第 10 天时, 对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除效果达 84%, 与对照组去除效果相当。因此认为, 余氯冲击后管道生物膜在第 10 天时可恢复对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除效能。

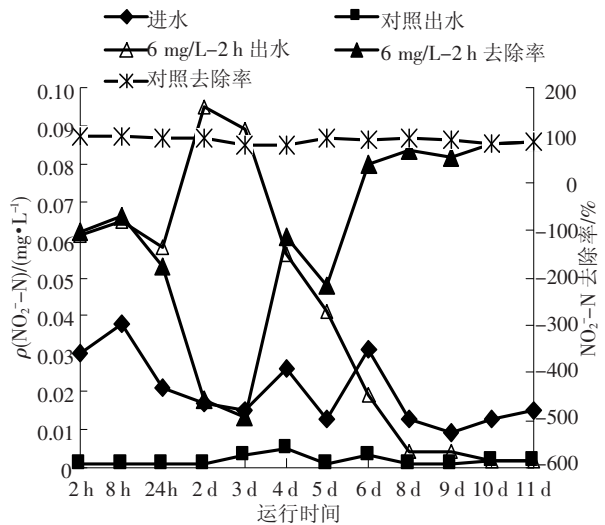


图 2 加氯 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的变化

图 3、4 可以看出, 氯消毒剂破坏管道稳定性后, 导致管道出水 COD_{Mn} 和 TP 质量浓度明显升高, 恢复通水 2 h 时, 进水 COD_{Mn} 和 TP 质量浓度分别为 1.88 和 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 和 TP 则达 2.5 和 $0.095 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。运行至第 5 天时, 管道开始恢复对 COD_{Mn} 和 TP 去除作用。运行至第 8

天时,达到与对照组相当的去除效率.

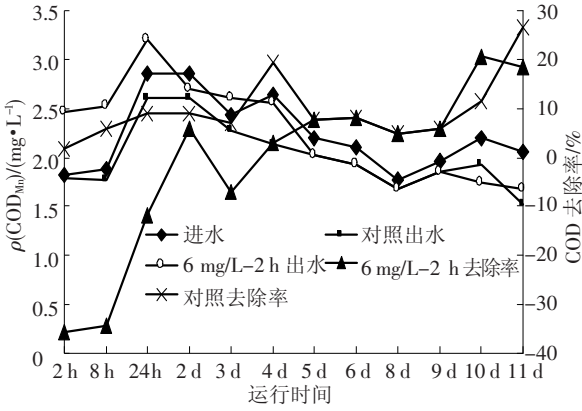


图3 加氯 6 mg · L⁻¹后出水 COD_{Mn}的变化

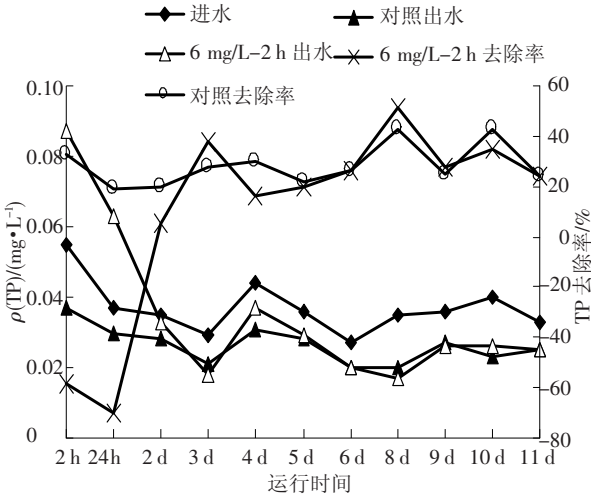


图4 加氯 6 mg · L⁻¹后出水 TP 的变化

2.2 不同投氯方式

考察冲击性加氯实验的同时,考察了相同余氯条件下,与管道不同接触时间下,预氯化对管道生物膜的破坏及其自身修复实验.

2.2.1 恢复阶段中 NH₄⁺ - N 的变化

图5、6为投氯后不同接触时间下,对管道去除 NH₄⁺ - N 效能破坏及恢复的情况. 进水 NH₄⁺ - N 为 0.386 ~ 0.988 mg · L⁻¹, 对照组 BAR 出水 NH₄⁺ - N 稳定在 0.1 mg · L⁻¹ 以下, 去除率在 75% ~ 95%, 平均去除率为 84%. 从图5、6可以看出, 投加氯后, 明显降低了管道对 NH₄⁺ - N 的去除效果. ρt (余氯 × 接触时间) 值不同, 对其去除效果影响不同. 接触时间为 3、6、12 h 的 BAR 对 NH₄⁺ - N 去除率分别降至 9%、4%、2%. 恢复运行 8 h 时, 接触 3 h BAR 对 NH₄⁺ - N 去除率升高至 54%, 而接触时间为 6 和 12 h 的去除率仅为 23% 和 7%. 恢复运行至第 8 天时, 各反应器对 NH₄⁺ - N 的去除效果与对照组接近. 之后几天对 NH₄⁺ - N 的去除效果稳定, 至此认为在第 8 天时各反应器即可恢复对 NH₄⁺ - N 的去除效果.

从恢复阶段初期可以看出, ρt 值不同恢复速

度不同, 前 2 d 内, ρt 值越小, 对 NH₄⁺ - N 去除效果恢复得越快. 运行至第 5 天时, 投加氯接触时间为 12 h 的反应器对 NH₄⁺ - N 的去除效果明显高于接触 3 h 和 6 h 的. 到达第 8 天时, 不同接触时间的反应器都能够恢复到未加氯时对 NH₄⁺ - N 的去除水平.

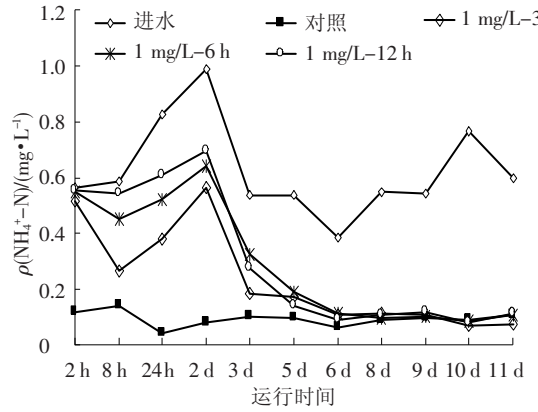


图5 各个反应器出水 NH₄⁺ - N 的变化

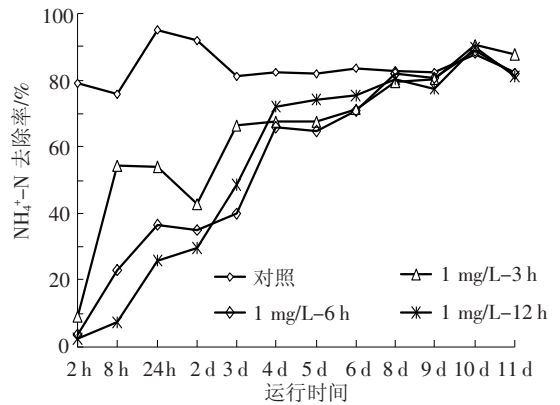


图6 各个反应器出水 NH₄⁺ - N 去除效能恢复

2.2.2 恢复阶段中 NO₂⁻ - N 的变化

图7、8为投氯后接触不同时间下,对管道去除 NO₂⁻ - N 效能破坏及恢复的情况. 进水 NO₂⁻ - N 为 0.008 ~ 0.038 mg · L⁻¹, 对照组出水 NO₂⁻ - N 稳定在 0.006 ~ 0.001 mg · L⁻¹, 对 NO₂⁻ - N 去除率为 80% ~ 97%, 平均去除率为 90%. 投加氯后, NO₂⁻ - N 氧化能力受到严重抑制, 出现出水 NO₂⁻ - N 明显积累现象.

投加氯接触时间越长, 出水 NO₂⁻ - N 积累量越高. 在恢复运行至 24 h 时, 与氯接触 3 和 6 h 的 BAR 出水 NO₂⁻ - N 达最高值, 分别为 0.78 和 0.94 mg · L⁻¹, 而与氯接触 12 h 的 BAR 在运行至第 3 天时, NO₂⁻ - N 达最高值 0.12 mg · L⁻¹, 较进水 NO₂⁻ - N 升高 7 倍. 运行至第 6 天时, 各反应器对 NO₂⁻ - N 开始有去除效果; 运行至第 10 天时, 不同接触时间的反应器都能够恢复到未加氯时对 NO₂⁻ - N 的去除水平.

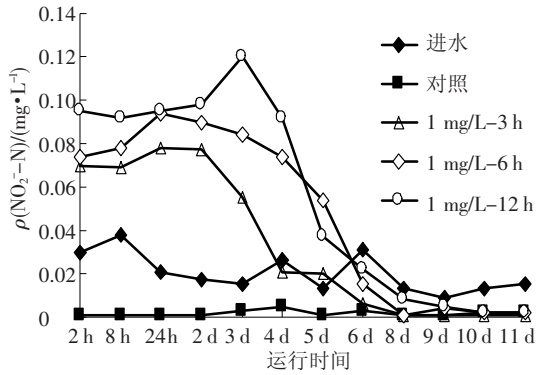


图 7 各个反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的变化

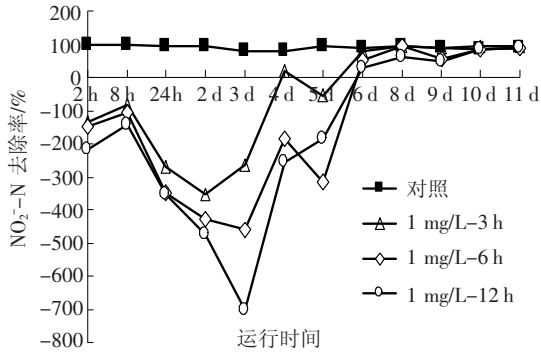


图 8 各个反应器出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除效能恢复

从不同预氯化方式下模拟管道对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 净水效能的恢复实验过程可以看出, 管道生物膜中硝酸菌相比亚硝酸菌对环境敏感, 并且硝酸菌的生长速率低于亚硝酸菌^[9], 因此, 管道对去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 性能的恢复较 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 提前 2 d.

2.2.3 恢复阶段中 COD_{Mn} 的变化

图 9、10 可以看出, 管道投加氯后, 管道出水 COD_{Mn} 质量浓度变化. 管道进水 COD_{Mn} $1.82 \sim 2.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对照组 COD 出水为 $1.52 \sim 2.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率在 2% ~ 26%, 平均去除率为 9.6%. 投加氯后, 短时间内可导致管道出水 COD_{Mn} 明显升高. 运行至 8 h 时, 进水 COD_{Mn} 为 $1.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 接触 3、6、12 h 的 BAR 出水分别可达 2.65 、 2.65 、 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 运行至第 24 小时时, 管道对 COD_{Mn} 开始有去除效果. 运行至第 8 天时, 不同接触时间的反应器都能够恢复到未加氯时对 COD_{Mn} 的去除水平, 并且高于对照组.

2.2.4 恢复阶段中 TP 的变化

图 11、12 可以看出, 投加氯后, 各反应器对 TP 的影响与对 COD_{Mn} 的影响相似, 投加氯后出水 TP 质量浓度上升. ρ_t 值越高, 出水 TP 质量浓度越高. 运行至 24 h 时, 进水 TP 为 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与氯接触时间为 3、6、12 h 反应器出水分别达到 0.63 、 0.074 、 $0.080 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 运行至第 2 天, 开始对 TP 有去除效果, 运行至第 8 天时, 不同接触

时间的反应器都能够恢复到未加氯时对 TP 的去除水平, 并且高于对照组.

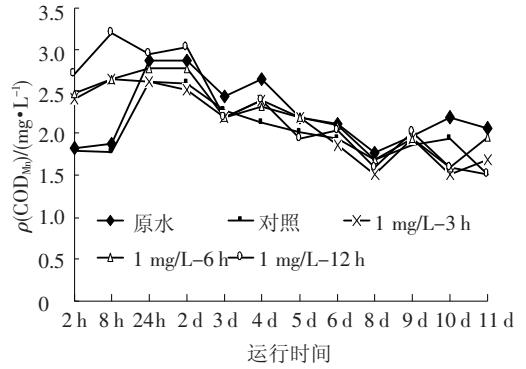


图 9 各个反应器出水 COD_{Mn} 的变化

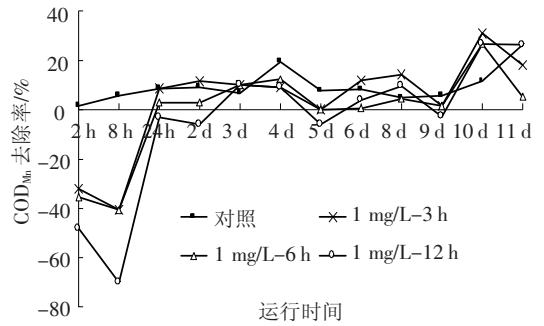


图 10 各个反应器出水 COD_{Mn} 去除效能恢复

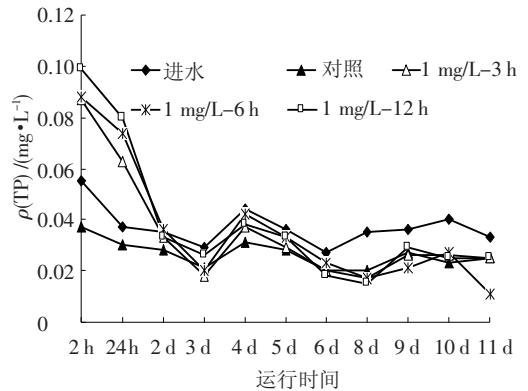


图 11 各个反应器出水 TP 的变化

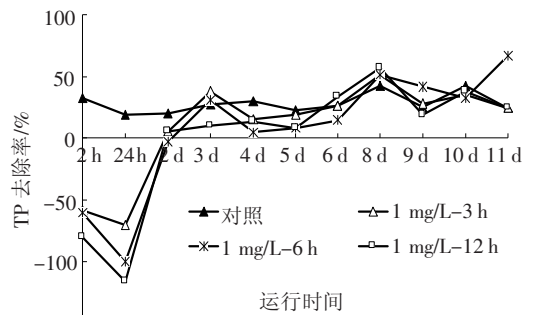


图 12 各个反应器出水 TP 去除效能恢复

投加氯后短期内会导致管道出水 COD_{Mn} 、TP 上升的原因是: 模拟管道运行期间管壁生物膜上不仅生长细菌, 还有原生动物和藻类. 投加氯后, 部分细菌、原生动物和藻类死亡, 并随生物膜脱落到水中, 使得水体 COD_{Mn} 和 TP 质量浓度升高^[10].

周玲玲、Miettinen 等^[11-12]研究氯氧化生物膜性能时同样发现,氯的氧化作用可以使生物膜溶出有机物,导致可同化有机碳(AOC)、可生物利用磷(MAP)质量浓度升高,AOC和MAP是 COD_{Mn} 和TP的组成部分.同样,Lehtola 等^[13]认为氧化剂氧化生物膜导致水中AOC和MAP升高的原因是氧化剂的氧化作用使得AOC和MAP从有机物或微生物中释放出来.

对于稳定运行一定时间的管道,管壁生物膜积累了大量的惰性物质,抑制细菌的活性^[14],导致生物膜净水效果不再升高.而投加氯使这部分物质脱落,管壁生物膜上重新繁殖的新细菌使得生物膜处于稳定增长期,细菌活性高,因此,运行一定时间后, COD_{Mn} 和TP高的去除效果恢复.

3 结 论

1)管道预氯化后对管道生物膜损伤较大,对 $NH_4^+ - N$ 、 $NO_2^- - N$ 、 COD_{Mn} 、TP去除效果影响较大.

2)管道预氯化后,出水出现短暂的 COD_{Mn} 和TP质量浓度上升、较长时间的 $NO_2^- - N$ 积累现象.

3)管道预氯化后,生物膜对 $NH_4^+ - N$ 去除效能的恢复较 $NO_2^- - N$ 快2d, $NH_4^+ - N$ 、 $NO_2^- - N$ 分别在第8天和第10天完成恢复.

4)管道预氯化后,恢复运行至第8天,管壁生物膜完成对 COD_{Mn} 和TP去除效能的恢复.

参 考 文 献

- [1] 刘冬梅,王睿,洪洁,等.高锰酸钾对淡水壳菜的杀灭实验[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(4):46-49.
- [2] 赵蓉,李振海,祝秋梅.南水北调中线北京段应急工程的输水水质预测及保护对策[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(4):311-315.
- [3] LEHTOLA M J, LAXANDER M, MIETTINEN I T,

et al. The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes[J]. Water Research, 2006, 40: 2151-2160.

- [4] LEHTOLA M J, JUHNA T, MIETTINEN I T, *et al.* Formation of biofilms in drinking water distribution networks, a case study in two cities in Finland and Latvia [J]. Microbiol Biotechnol, 2004, 31 (11): 489-494.
- [5] ZAITLIN B, WATSON S B. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths[J]. Water Research, 2006, 40: 1741-1753.
- [6] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T5750.1~5750.13生活饮用水标准检验方法[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [7] 杨艳玲,李星,孙丽欣,等.饮用水中痕量磷的检测[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(2):322-325.
- [8] 宋学起,彭永臻.以氯化方法实现生物膜法短程硝化反应[J].中国给水排水,2005,21(12):10-14.
- [9] 郝晓地.可持续污水-废物处理技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [10] 王锦旗,宋玉芝,王国祥.溢流堰基质及生物膜对水体复氧及水质的影响[J].水利水电技术,2009(40):37-43.
- [11] 周玲玲.给水管网中生物膜及硝化作用控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学市政环境工程学院,2010.
- [12] MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, MARTIKAINEN P J. Microbial growth in drinking waters treated with ozone, ozone/hydrogen peroxide or chlorine[J]. Ozone Science Engineering, 1998, 20: 303-315.
- [13] LEHTOLA M J, MIETTINEN I T, VARTIAINEN T, *et al.* Microbially available organic carbon, phosphorus, and microbial growth in ozonated drinking water[J]. Water Research, 2001, 35(7): 1635-1640.
- [14] 李红岩,杨敏,张昱,等.失稳硝化生物反应器的性能恢复研究[J].环境科学学报,2012,32(2):276-281.

(编辑 刘 彤)