

# 氯、亚氯酸盐控制氯胺消毒管网硝化作用效果

赵乐乐<sup>1</sup>, 李 星<sup>1</sup>, 杨艳玲<sup>1</sup>, 李圭白<sup>2</sup>

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

**摘要:** 采用2台串联环状生物膜培养反应器(biofilm annular reactor, BAR)模拟氯胺消毒给水管网系统, 通过对余氯、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、DO、异养菌(heterotrophic, HPC)及亚硝化菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)等指标进行检测, 共同评价氯和亚氯酸盐2种消毒剂对氯胺消毒管网中硝化作用的控制效果。试验结果表明, 出厂水再投氯消毒可造成 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 降解, 使得 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 产生积累; 再投亚氯酸盐更易提高管网中余氯和DO的质量浓度, 使得 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 质量浓度降低, 可有效地控制硝化作用; 与投加氯消毒时相比, 投加0.6 mg/L亚氯酸盐时, 第1台BAR中悬浮和生物膜中HPC分别平均降低了2.58 log和2.86 log, 悬浮及生物膜中AOB降低约1 log, 亚氯酸盐能对AOB起到控制灭活效果而等量氯对其几乎没有灭活效果。因此, 在控制管网硝化作用方面, 亚氯酸盐与氯胺联用的消毒效果优于氯与氯胺。

**关键词:** 氯胺; 亚氯酸盐; 亚硝化菌; 硝化作用; 生物膜; 饮用水配水管网

中图分类号: TU 991

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)11-1710-06

## Disinfectant Efficacy of Chlorine and Chlorite in Nitrification Control in Water Distribution Systems

ZHAO Le-le<sup>1</sup>, LI Xing<sup>1</sup>, YANG Yan-ling<sup>1</sup>, LI Gui-bai<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

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

**Abstract:** Two biofilm annular reactors (BAR) in series were investigated to compare the relative efficacy of chlorine and chlorite in nitrification by analyzing residue chlorine,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_2^--\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ , DO, HPC and AOB. The results showed that the concentration of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  was dropped and those of  $\text{NO}_2^--\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  were increased during the stage of adding chlorine. However, that was not happened by adding chlorite because of enhancing the effluent concentration of residue chlorine and DO. Consequently, the chlorite was more effective than chlorine in mitigating nitrification. Compared with equivalent chlorine (0.6 mg/L), the suspended and attached HPC of the first BAR reduced 2.58 log and 2.86 log, respectively, both suspended and attached AOB declined 1 log using the chlorite. Therefore, the effect of chlorite is better than chlorine combined with chloramine in mitigating nitrification in distribution systems.

**Key words:** chloramine; chlorite; AOB; nitrification; biofilm; water distribution systems

收稿日期: 2011-05-14.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2008ZX07422-005).

作者简介: 赵乐乐(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事饮用水供水安全性保障技术方面的研究, E-mail: zhaolele\_2008@126.com.

通信作者: 李 星(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事饮用水水质安全保障与集成处理技术方面的研究, E-mail: lixing@bjut.edu.cn.

水源水污染日趋严重,采用传统的氯消毒方式会产生较多副产物。氯胺消毒产生的三氯甲烷和卤代醋酸等消毒副产物浓度低,管道中消毒持续时间长,具有穿透生物膜能力强等优点而成为氯的替代消毒剂。然而,氯胺消毒管网中容易发生硝化作用,这会加速氯胺的衰减,释放氨氮为亚硝化菌(AOB)提供营养<sup>[1]</sup>,在此情况下,即使增加氯胺投加量(8 mg/L)仍不能对其有效控制<sup>[2]</sup>。因此,管网硝化作用产生的危害已成为管网饮用水安全保障的隐患,控制管网硝化作用对保障饮用水安全具有重要研究意义。传统硝化控制方法(提高氯胺浓度、折点加氯等)耗时长,消毒副产物增加,工艺控制困难<sup>[3]</sup>,而亚氯酸盐为制造消毒剂二氧化氯的原料之一,其投加方式简便,对 AOB 具有特殊的灭活效果<sup>[3-7]</sup>。

本研究在氯胺消毒的基础上投加氯、亚氯酸盐对比硝化作用控制效果。试验以某氯胺消毒出厂水为对象,由 2 台 BAR 串联组成模拟管网,向已发生硝化作用的氯胺消毒模拟管网中投加氯与亚氯酸盐,分析余氯、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 DO 等化学指标及 BAR 水中悬浮异养菌(HPC)、AOB 及 BAR 管壁生物膜中 AOB 和 HPC 等微生物指标,综合对比投加氯和亚氯酸盐对硝化作用的控制效果,

以期发生硝化作用的管网提供控制方案。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置及材料

由 2 台 BAR 串联组成模拟管网模拟氯胺消毒管网,装置流程如图 1 所示。挂片材料为 304 不锈钢。

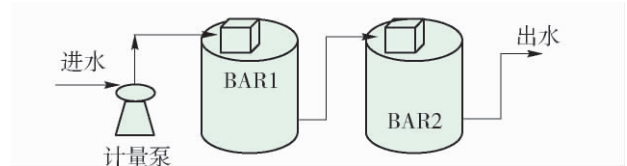


图 1 BAR 串联工艺流程

Fig. 1 Schematic representation of BAR process

### 1.2 试验条件及过程

试验按 1:5 的比例向反应器中投加 AOB 培养液与自来水,用来富集培养 BAR 管网中 AOB 和 HPC 等细菌,每隔 3~4 d 换 1 次培养液, BAR 转速为 50 r/min,在此条件下稳定运行 60 d。之后,采用某氯胺消毒的给水厂出厂水作为 BAR 连续进水,试验进水具体水质见表 1。每台 BAR 水力停留时间为 3 h,稳定运行 7 d 后,开始检测反应器中各个指标的变化。

表 1 BAR 工艺进水水质

Table 1 Influent composition of BAR process

| 参数 | $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N}) /$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{NO}_2^--\text{N}) /$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{NO}_3^--\text{N}) /$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | pH        | $T /$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $\rho(\text{DO}) /$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{余氯}) /$<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |
|----|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 数值 | 2.07~3.92                                                             | 0.09~0.26                                                             | 2.07~2.68                                                             | 7.14~8.57 | 20~26                       | 4.38~5.0                                                 | 2.2~2.6                                                  |

试验分 2 个阶段进行,第 1 阶段考察余氯对氯胺消毒管网中硝化作用的控制效果。维持出厂水氯胺 2.2 mg/L 的基础上稳定运行 11 d,之后投加次氯酸(HClO)使得进水余氯维持在 2.8 mg/L,运行 9 d。第 2 阶段,投加亚氯酸盐考察亚氯酸盐对硝化作用的控制效果。每天投加亚氯酸盐,初始投加量为 0.2 mg/L,以 0.2 mg/L 为 1 个亚氯酸盐质量浓度梯度,每 4 d 增加 1 个,直到亚氯酸盐投加量达到 0.6 mg/L 时,此阶段共运行 14 d。对比考察上述 2 个过程中采用不同消毒剂与氯胺联用对管网硝化作用控制效果。

### 1.3 试验方法与分析项目

采用化学指标和微生物指标共同反映氯胺消毒管网中投加氯、亚氯酸盐对硝化作用的控制效果。化学指标包括余氯、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 DO 等,微生物指标包括 BAR 水中悬浮 HPC、AOB 及 BAR 管壁生物膜中 AOB 和 HPC。

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  均采用国家生活饮用水标准检验方法<sup>[8]</sup>进行检测;亚氯酸盐首先采用碘量法标定其浓度,其次与总余氯一起采用深圳 S-CL501 便携式余氯-二氧化氯五参数快速测定仪;DO 采用 YSI-550A 便携式检测仪监测;水温直接用水银温度计检测;生物膜上 AOB、HPC 取样采用鲁巍等<sup>[9]</sup>研究的生物膜取样方法,AOB 的培养采用 Soriano and Walker 培养基<sup>[10]</sup>,采用 3 管 MPN 稀释培养计数方法测定,28  $^{\circ}\text{C}$  黑暗培养 21 d 后计数;HPC 采用 R2A 培养基,22  $^{\circ}\text{C}$  黑暗培养 7 d 后计数。

## 2 试验结果与讨论

配水管网中如果发生硝化作用则会在宏观层次上表现为  $\rho(\text{余氯})$  和  $\rho(\text{DO})$  下降,  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  降低的同时  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  积累等化学现象,而在微观层面上表现为 HPC 和 AOB 数量的升高,这些指

标可以直接反映饮用水水质生物稳定性及硝化作用强弱. 因此, 对这些化学指标和微生物检测显得十分必要.

## 2.1 化学指标的变化

### 2.1.1 余氯变化

按照 2 个阶段分别投加氯和亚氯酸盐, 结果如图 2 所示. 第 12 天时进水  $\rho(\text{余氯})$  提高到  $(2.6 \pm 0.2) \text{ mg/L}$ , BAR1 出水  $\rho(\text{余氯})$  开始下降, 第 20 天时 BAR1 出水  $\rho(\text{余氯})$  下降到  $0.55 \text{ mg/L}$ . 第 21 天开始投加亚氯酸盐, 初期并未有效提高出水余氯质量浓度, 而投加量为  $0.6 \text{ mg/L}$  时 (第 28 天), BAR1 出水  $\rho(\text{余氯})$  在  $1.3 \text{ mg/L}$  左右. 可见, 对于已经发生硝化作用的氯胺消毒出厂水, 投加亚氯酸盐可有效提高管网中余氯质量浓度.

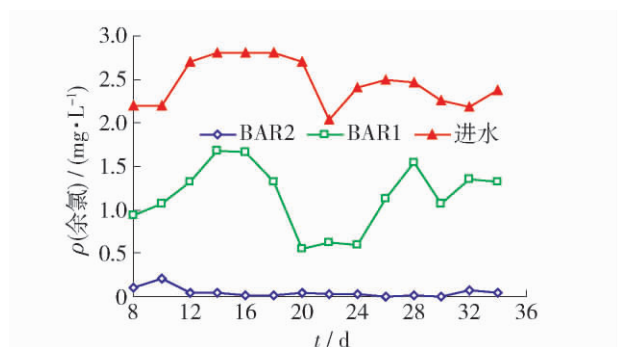


图 2 不同消毒阶段余氯质量浓度的变化

Fig. 2 Variation of residue chlorine in different disinfecting stages

### 2.1.2 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 变化

图 3、4 和 5 分别显示  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  变化趋势.

从图 3、4 和 5 看出, 投加氯后期 (第 20 天), BAR1 出水  $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$  升高到  $0.70 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$  没有明显升高, 表明 BAR1 已经发生严重的  $\text{NO}_2^--\text{N}$  积累, 而此阶段 BAR2 出水  $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$  平均降低  $1.3 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$  从  $0.9 \text{ mg/L}$  降低到  $0.18 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$  明显升高, 说明 BAR2 已发生完全硝化作用. 投加亚氯酸盐后期 (第 24 天后) BAR2 出水平均  $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$  ( $0.087 \text{ mg/L}$ ) 低于 BAR1 出水平均  $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$  ( $0.300 \text{ mg/L}$ ), 尽管如此, BAR1 和 BAR2 的  $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$  并没有明显增加, 分别维持在  $2.59 \text{ mg/L}$  和  $3.07 \text{ mg/L}$ . 因此, 投加亚氯酸盐过程中硝化作用可被有效控制.

### 2.1.3 DO 变化

饮用水管网中 DO 检测结果如图 6 所示. 从图 6 所示结果看出, 尽管提高了进水  $\rho(\text{余氯})$ , 但

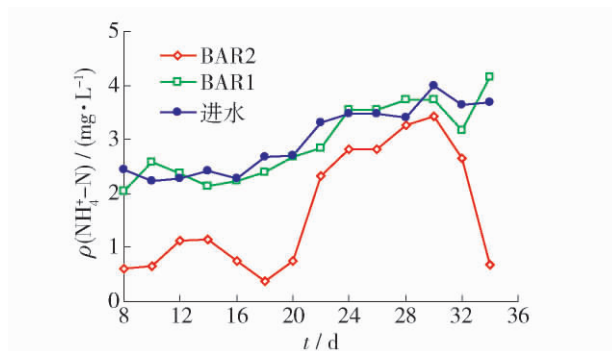


图 3 不同消毒阶段氨氮质量浓度的变化

Fig. 3 Variation of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in different disinfecting stages

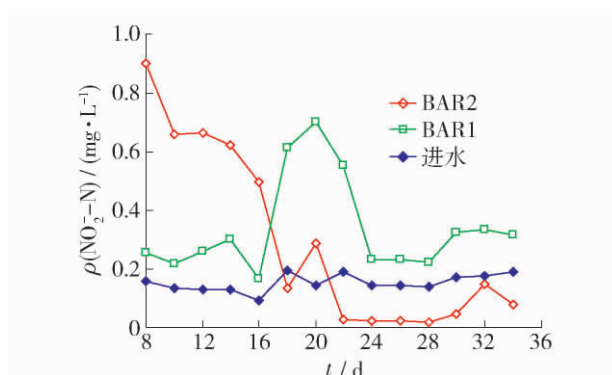


图 4 不同消毒阶段亚硝酸盐氮质量浓度的变化

Fig. 4 Variation of  $\text{NO}_2^--\text{N}$  in different disinfecting stages

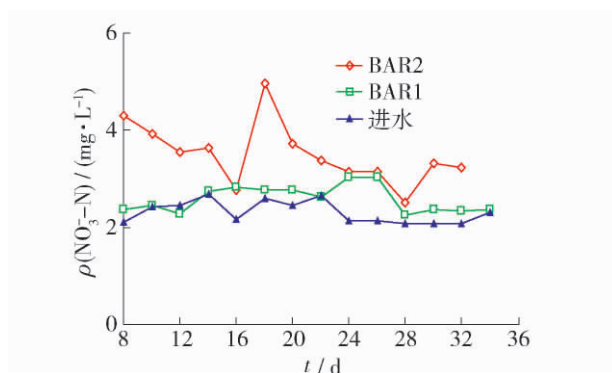


图 5 不同消毒阶段硝酸盐氮质量浓度的变化

Fig. 5 Variation of  $\text{NO}_3^--\text{N}$  in different disinfecting stages

BAR2 中  $\rho(\text{DO})$  明显下降, 至第 20 天时, BAR2 出水  $\rho(\text{DO})$  由进水  $2.7 \text{ mg/L}$  降低到  $1.07 \text{ mg/L}$ , 亚氯酸盐投加过程中, BAR2 出水  $\rho(\text{DO})$  逐渐升高, 第 32 天为  $3.8 \text{ mg/L}$ , 接近进水  $\rho(\text{DO})$  ( $4 \text{ mg/L}$ ), 表明耗氧量减少. O'Connor 等<sup>[11]</sup>向 William 出厂水中直接投加亚氯酸钠时, 得出同样结论. 从耗氧量角度再次验证了投加亚氯酸盐可有效抑制硝化作用.

## 2.2 对管网不同细菌的控制情况

饮用水生物稳定性是评价水质安全的重要指

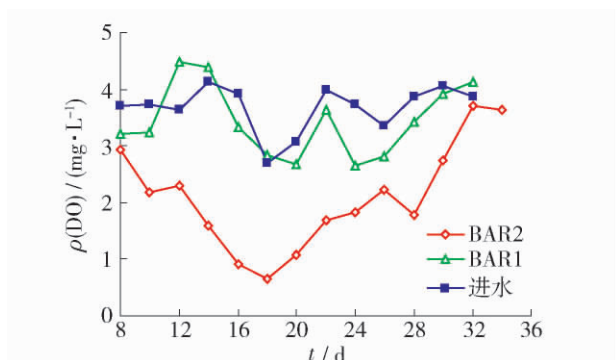


图 6 不同消毒阶段 DO 质量浓度的变化

Fig. 6 Variation of DO in different disinfecting stages

标 通过测量水中 HPC 和 AOB 的数量反映对其灭活效果,从而评价氯和亚氯酸盐对硝化作用的控制效果。

### 2.2.1 对 HPC 的控制效果

图 7、8 分别显示不同消毒阶段对悬浮 HPC 和生物膜 HPC 灭活控制效果。从图 7、8 中看出,自第 12 天进水余氯质量浓度提高运行至第 14 天时, BAR1 中悬浮及生物膜 HPC 数量由  $1.9 \times 10^4$  CFU/mL 和  $9.2 \times 10^3$  CFU/cm<sup>2</sup> 分别降到 50 CFU/mL 和 30 CFU/cm<sup>2</sup> 相对降低了 2.57 log 和 2.49 log, HPC 灭活效果显著。在第 16 天以后随着硝化现象的明显发生, BAR1 出水  $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$  由 0.17 mg/L 左右增至 0.67 mg/L 左右,水中余氯消耗程度迅速增加,由 1.32 mg/L 左右降低到 0.55 mg/L 左右,导致 BAR1 二者数量呈增长的趋势。整个过程中 BAR2 出水余氯质量浓度变化不大,悬浮菌和生物膜中 HPC 量变化不大,维持在  $10^5$  CFU/mL 和  $10^5$  CFU/cm<sup>2</sup>。

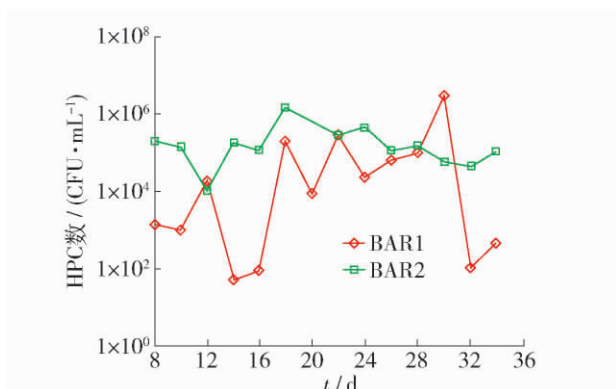


图 7 不同消毒阶段对悬浮 HPC 的控制效果

Fig. 7 Control of suspended HPC in different disinfecting stages

投加亚氯酸盐后, BAR1 中生物膜中 HPC 明显下降,亚氯酸盐投加量达到 0.6 mg/L 时,悬浮菌平

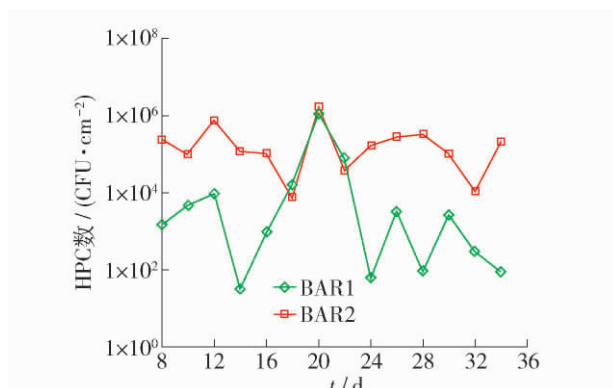


图 8 不同消毒阶段对生物膜中 HPC 的控制效果

Fig. 8 Control of biofilm HPC in different disinfecting stages

均降低到  $2.80 \times 10^2$  CFU/mL,生物膜 HPC 平均降低到  $1.86 \times 10^2$  CFU/cm<sup>2</sup> 与投加氯相比(运行 18 ~ 20 d),悬浮态和生物膜中 HPC 分别平均降低了 2.58 log 和 2.86 log。亚氯酸盐和氯的投加似乎不能对 HPC 产生长时间的灭活效果,后续的 BAR2 中悬浮及生物膜中 HPC 分别维持在  $10^5$  CFU/mL 和  $10^5$  CFU/cm<sup>2</sup> 左右。

在第 24 天 ~ 第 34 天运行期间,进水水质开始恶化,水中  $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$  由原来的 2.68 mg/L 上升到了 3.37 mg/L 耗氧量由 3.86 mg/L 上升到 4.68 mg/L,进水  $\rho(\text{余氯})$  由  $(2.6 \pm 0.2)$  mg/L 降低到  $(2.36 \pm 0.2)$  mg/L,而在这种水质变差的情况下,投加 0.6 mg/L 亚氯酸盐能达到比初始投加 0.6 mg/L 氯对细菌略高的灭活效果,间接说明亚氯酸盐与氯胺联合消毒比氯与氯胺联用效果好。

试验结果表明,采用氯胺消毒的 BAR 反应器中,投加 0.6 mg/L 氯和亚氯酸盐都能对悬浮态和生物膜中的 HPC 进行有效灭活。根据 Gagnon 等<sup>[7]</sup> 研究结果,单独投加亚氯酸盐对 HPC 没有灭活效果,可见,亚氯酸盐和氯与氯胺联用均能强化氯胺对 HPC 的灭活效果。亚氯酸盐受水质波动的影响相对更小些,而且亚氯酸盐和氯的投加似乎不能产生长时间的效应。

### 2.2.2 对 AOB 的控制效果

图 9、10 分别显示不同消毒阶段对悬浮 AOB 和生物膜中的 AOB 灭活控制效果。对 AOB 灭活所需要的氯量非常高,在高浓度氨氮水中加氯后,氯消毒变成了氯胺消毒,消毒效果将大大减弱,而且氨氮为 AOB 提供了生长机制,所以,氯对高浓度氨氮饮用水进行消毒时对 AOB 灭活效果有限。图 9、10 显示,投加氯后对 BAR1、BAR2 悬浮及生物膜中 AOB 没有抑制效果, AOB 总量分别维持在  $10^4$  MPN/mL

和  $10^4$  MPN/cm<sup>2</sup>.

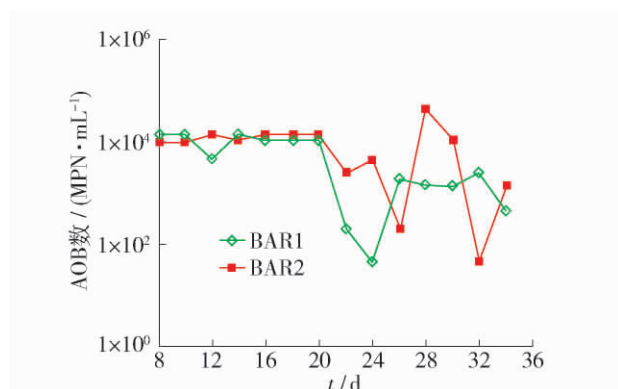


图9 不同消毒阶段对悬浮 AOB 的控制效果

Fig. 9 Control of suspended AOB in different disinfecting stages

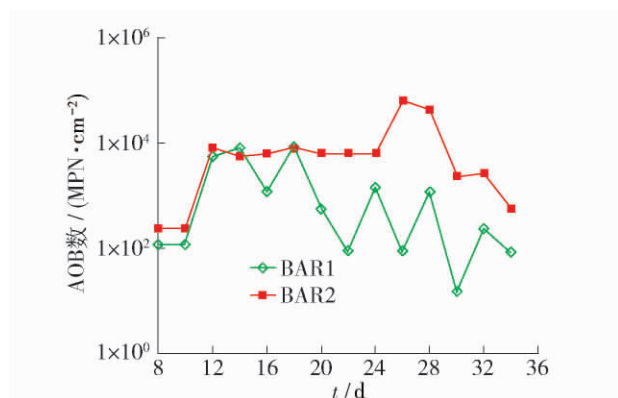
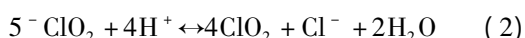
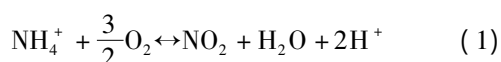


图10 不同消毒阶段对生物膜中 AOB 的控制效果

Fig. 10 Control of biofilm AOB in different disinfecting stages

当 AOB 氧化氨氮时会释放出氢离子,如式(1)所示, $\text{ClO}_2^-$  进入细菌内部与氢离子发生式(2)所示反应形成二氧化氯,二氧化氯具有强氧化性,少量二氧化氯就可以改变细胞膜的渗透性,损害合成细胞酶和蛋白质的功能,最终破坏核酸。从图9、10看出,投加亚氯酸盐后,能对 AOB 起到控制作用,运行至第32天时 BAR1、BAR2 悬浮及生物膜中 AOB 数量控制在  $10^2$  MPN/mL 和  $10^2$  MPN/cm<sup>2</sup> 左右,相比投加氯时降低了约 1 log。这种结果与 McGuire 等<sup>[12]</sup>研究亚氯酸根对 AOB 的灭活机制一致。



综上所述,氯胺消毒的水中,投加 0.6 mg/L 氯对悬浮及生物膜中 AOB 几乎没有灭活效果,而投加等量亚氯酸盐能对 AOB 起到一定的控制效果。

### 3 结论

1) 出厂水再投氯消毒可造成  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  降解,使得  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  产生积累;再投亚氯酸盐更易提高管网中  $\rho$  (余氯) 和  $\rho$  (DO),使得  $\rho$  ( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ) 和  $\rho$  ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) 降低,可有效地控制硝化作用;

2) 投加 0.6 mg/L 氯和亚氯酸盐都能有效控制悬浮态和生物膜中 HPC 的灭活效果,亚氯酸盐受水质波动的影响相对更小;亚氯酸盐和氯的投加似乎不能对 HPC 产生长时间的灭活效果,后续的 BAR2 反应器的悬浮态和生物膜中 HPC 始终维持在  $10^5$  CFU/mL 和  $10^5$  CFU/cm<sup>2</sup> 左右;

3) 投加 0.6 mg/L 氯对 AOB 几乎没有灭活作用,悬浮态及生物膜中的 AOB 总量始终维持在  $10^4$  MPN/mL 和  $10^4$  MPN/cm<sup>2</sup>;而投加等量的亚氯酸盐能有效控制 AOB 的灭活效果,悬浮态及生物膜中的 AOB 数量可控制在  $10^2$  MPN/mL 和  $10^2$  MPN/cm<sup>2</sup> 左右。可见,在控制管网硝化作用方面,亚氯酸盐与氯胺联用的消毒效果更佳。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Y, EDWARDS M. Accelerated chloramine decay and microbial growth by nitrification in premise plumbing [J]. American Water Works Association, 2009, 101 (11): 51-62.
- [2] 张永吉,周玲玲,李伟英. 氯胺消毒给水管网中的硝化作用及其控制[J]. 中国给水排水, 2008, 24(2): 6-9. ZHANG Yong-ji, ZHOU Ling-ling, LI Wei-ying. Nitrification in chloraminated drinking water distributionsystem and its control [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(2): 6-9. (in Chinese)
- [3] SPEITEL Jr G E, KANNAPPAN R, BENJAMIN M B. The nitrification index: a unified concept for quantifying the risk of distribution [J]. American Water Works Association, 2011, 103(1): 69-80.
- [4] 孙伟,章诗芳,梁伟杰,等. 亚氯酸盐控制滤池亚硝化现象研究[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 98-101. SUN Wei, ZHANG Shi-fang, LIANG Wei-jie, et al. Nitrification control using chlorite in the filtration tank [J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 98-101. (in Chinese)
- [5] MCGUIRE M J, PEARTHREE M S, BLUTE N K, et al. Nitrification control by chlorite ion at pilot scale [J]. American Water Works Association, 2006, 98(1): 95-105.
- [6] MCGUIRE M J, WU X Y, BLUTE N K, et al. Prevention

- of nitrification using chlorite ion: results of a demonstration project in Glendale , Calif[J]. AWWA , 2009 , 101( 10) : 47-59.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T5750—2006 生活饮用水标准检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社,2006.
- [9] 鲁巍,王云,张晓健. BAR 反应器中生物膜的分离及定量[J]. 中国给水排水,2005,21(2): 91-94.  
LU Wei , WANG Yun , ZHANG Xiao-jian. Biofilm separation and biomass quantification method in biological annular reactor[J]. China Water & Wastewater , 2005 , 21 ( 2) : 91-94. ( in Chinese)
- [10] 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工程环境学院,2010.  
ZHOU Ling-ling. Controlling on the biofilm and nitrification in drinking water distribution system [D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering , Harbin Institute of Technology , 2010. ( in Chinese)
- [11] O'CONNOR T , MURPHY B , O' CONNOR J T. Controlling nitrification in a water distribution system using sodium chlorite [J]. Water Engineering & Management , 2001 , 148( 9) : 14-15.
- [12] MCGUIRE M J , LIEU N I , PEARTHREE M S. Using the chlorite ion to control nitrification [J]. American Water Works Association , 1999 , 91( 10) : 52-61.  
(责任编辑 张 蕾)

(上接第1697页)

- [9] CHOU Chun-hsien , LIU Kuo-cheng. A perceptually tuned watermarking scheme for color images [J]. IEEE Transactions on Image Processing , 2010 , 19( 11) : 2966-2982.
- [10] KUTTER M , BHATTACHARJEE S K , EBRAHIMI T. Towards second generation watermarking schemes [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. Kobe: IEEE Press , 1999: 320-323.
- [11] WANG Xiang-yang , WU Jun , NIU Pan-pan. A new digital image watermarking algorithm resilient to desynchronization attacks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security , 2007 , 2( 4) : 655-663.
- [12] 王向阳,侯丽敏,邬俊. 基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案[J]. 自动化学报,2008,34(1): 1-6.  
WANG Xiang-yang , HOU Li-min , WU Jun. Feature-based digital image watermarking scheme robust to geometric attacks [J]. Acta Automatica Sinica , 2008 , 34( 1) : 1-6. ( in Chinese)
- [13] KANG Xian-gui , HUANG Ji-wu , ZENG Wen-jun. Efficient general print-scanning resilient data hiding based on uniform log-polar mapping[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security , 2010 , 5( 1) : 1-12.
- [14] 楼偶俊. 基于 Contourlet 域特征点的抗几何攻击水印方法[J]. 计算机研究与发展,2010,47(1): 113-120.  
LOU Ou-jun. Feature point based image watermarking scheme in Contourlet domain against geometrical attacks [J]. Journal of Computer Research and Development , 2010 , 47( 1) : 113-120. ( in Chinese)
- (责任编辑 梁 洁)