

氯胺在管网中水相衰减影响因素研究

张永吉¹, 曾 果¹, 周玲玲², 宋正国¹, 邓慧萍¹

(1. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以纯水和管网水为研究对象, 分别考察了氯氨比、氯胺质量浓度、总有机碳(total organic carbon, TOC) 浓度、 NO_2^- -N 质量浓度、温度 θ 和 pH 等水质参数对氯胺衰减的影响. 研究表明, 氯胺在纯水中存在自衰减现象, 氯氨比和初始氯胺质量浓度对其自衰减都有一定影响. 管网水中氯胺的衰减速率则明显大于同条件下纯水中氯胺的衰减速率. $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的氯氨比 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 的氯胺具有更好的稳定性. 氯胺初始质量浓度是氯胺衰减的重要因素, 初始质量浓度越大, 氯胺衰减的速率越快; 水中有机物和 NO_2^- -N 质量浓度的增加会提高氯胺衰减速率; 温度对氯胺的衰减有明显影响, 随温度升高, 氯胺在水相中消耗变快; 氯胺的衰减属于酸催化反应, pH 的降低会增加氯胺的衰减速率.

关键词: 氯胺衰减; 氯氨比; 总有机碳浓度; 亚硝酸氮

中图分类号: X 52; TU 991. 25

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)02-0282-06

Influence Factors of Chloramine Decay in Bulk Water

ZHANG Yong-ji¹, ZENG Guo¹, ZHOU Ling-ling², SONG Zheng-guo¹, DENG Hui-ping¹

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Water quality parameters including chlorine to ammonia nitrogen application ratio $w(\text{Cl}) : w(\text{N})$, initial chloramine concentration, organic compound level, nitrite concentration, temperature and pH, which affect chloramines decay, are investigated in pure water and the water of a distribution system. Results show that chloramine can autodecompose in pure water. $w(\text{Cl}) : w(\text{N})$ and initial chloramine concentration influence its decay rate. The rate of chloramine decay is higher in bulk water of the distribution system than that in pure water. Chloramine is more stable with $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ than that of $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$. Initial chloramine concentration is an important factor inducing the high rate of chloramines decay with high initial chloramine concentration. The rate of Chloramines decay increases with increasing organic compound and nitrite concentration. The temperature impacts on the rate of chloramines decay, which means high decay rate in bulk water with increasing temperature. In addition, the reaction of chloramines decay is a type of acid-catalysis, and lower pH elevates the rate of chloramines decay.

Key words: chloramine decay; $w(\text{Cl}) : w(\text{N})$; total organic carbon (TOC); nitrite

收稿日期: 2010-03-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878164); 长江水环境教育部重点实验室自主课题资助项目(YRWEY1001).

作者简介: 张永吉(1974—), 男, 副教授, 主要从事饮用水深度处理方面的研究, E-mail: zhangyongji@tongji.edu.cn.

自1974年Rook等发现饮用水中氯消毒会产生三氯甲烷、卤乙酸等消毒副产物(DBPs)以来,许多国家开始采用氯胺代替氯作为消毒剂来进行配水管网中的消毒^[1],随着中国生活饮用水卫生标准(GB5749—2009)对消毒副产物限值要求的提高,一些供水企业近些年也逐渐开始采用氯胺进行消毒^[2-6]。

研究表明,在水相消耗中,温度 θ 、pH、总有机碳(total organic carbon, TOC)浓度及相关的无机离子质量浓度对氯胺在管网中的变化会产生很大的影响^[7-12]。另外,氯胺消毒管网中由于发生硝化作用而产生的 NO_2^- 会与氯胺反应,降低氯胺余量,使管网中的消毒作用减弱,是造成氯胺衰减的另一个重要因素^[3,13-15]。因此,有必要研究不同条件下各水质

因素对氯胺衰减造成的影响,以更好地保证管网中氯胺余量。

本文以纯水及管网水为研究对象,研究了不同氯胺质量浓度下,氯氨比、 θ 、pH、 NO_2^- 质量浓度及不同有机物浓度对氯胺水相衰减的影响,从而为保障给水管网中的微生物安全性提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验用水

试验分别以纯水和实验室的城市管网出水作为试验水样,并在水样中加入一定量的磷酸盐缓冲溶液以使试验中pH维持在一定的范围。试验用水水质情况如表1所示。

表1 试验用水水质

Table 1 Water quality parameter of the experimental water

实验用水	$\rho(\text{TOC}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4\text{-N}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	UV_{254}	pH	$\rho(\text{NO}_2^-\text{-N}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氯胺}) / (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
纯水	0.480 ± 0.100	0.040 ± 0.002	0.000 ± 0.000	6.90 ± 0.01	0.002 ± 0.001	0.01 ± 0.01
管网末端水	2.580 ± 0.300	0.092 ± 0.002	0.069 ± 0.002	7.10 ± 0.02	0.015 ± 0.003	0.13 ± 0.02

1.2 试验方法

1.2.1 氯胺的配制

将市售的 NaClO 溶液用超纯水稀释成含一定质量浓度自由氯的 NaClO 溶液,用DPD法测定其有效氯含量。将分析纯 NH_4Cl 配制成含一定质量浓度 $\text{NH}_4\text{-N}$ (以N计)的 NH_4Cl 溶液,并用 NaOH 溶液调节至 $\text{pH}=8.0$,而后加入4倍(或3倍)质量浓度的 NaClO ,均匀搅拌15 min,即配制为 $w(\text{Cl}):w(\text{N})=4:1$ (或 $w(\text{Cl}):w(\text{N})=3:1$)的氯胺溶液,其中氯胺溶液采用DPD法测定的有效氯含量^[16]。

1.2.2 试验过程

试验前,将所有玻璃器皿用重铬酸钾洗液浸泡15 min后,用蒸馏水润洗数次,在 105°C 用烘箱烘干。分别向水中投加不同浓度的亚硝酸钾和腐殖酸以配制不同浓度的亚硝酸氮和有机物,用量筒分别量取200 mL水样于4个试剂瓶中,向试剂瓶中投加一定质量浓度的氯胺并震荡1 min使溶液充分混合,将水样置于恒温培养箱中,于不同时间取样测定氯胺余量。

1.3 检测方法

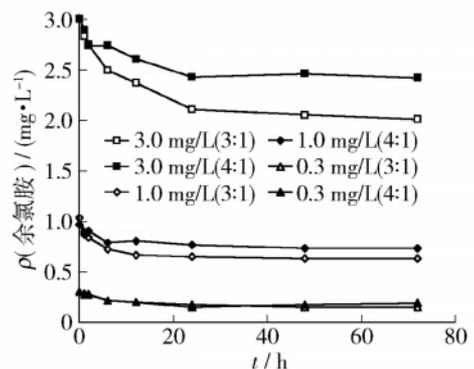
TOC采用TOC-VCPN型TOC仪(日本岛津公司)进行测定,余氯采用便携式余氯仪(美国HACH公司)测定,pH通过S20KpH计测定(德国梅特勒公

司),氯氮采用纳氏试剂光度法测定,亚硝酸盐采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定,紫外分光光度计为752N型(上海精密仪器公司)。

2 结果与讨论

2.1 氯胺在纯水中的自衰减研究

图1是氯氨比为3:1和4:1条件下,氯胺在纯水中的自衰减情况。可以看出,对于不同浓度的氯胺,在初始的24 h内有一个快速衰减的过程,而后水中氯胺浓度基本保持不变。并且氯胺的衰减速率与氯胺的初始质量浓度有关,随着氯胺初始质量浓度的



$\theta = 25^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 7.00$, $\rho(\text{TOC}) = 0.480 \text{ mg/L}$

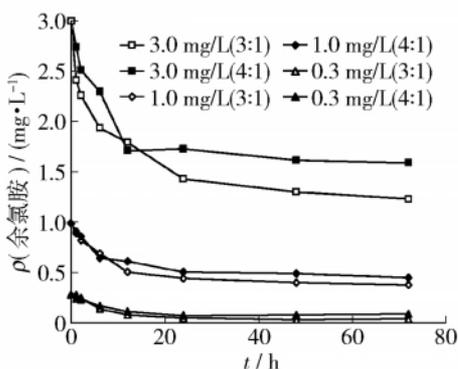
图1 纯水中氯胺的衰减

Fig. 1 Chloramine decay in pure water

逐渐增大,其衰减的幅度也相应变大.如氯胺质量浓度分别为0.3和3 mg/L时 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 的氯胺72 h内衰减速率分别为0.002 1和0.013 8 mg/(L·h),而 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的氯胺衰减速率分别为0.001 5和0.008 1 mg/(L·h).氯氨比对氯胺衰减也有一定的影响 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 的氯胺在各种浓度下衰减速率均大于 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的情况.如氯胺质量浓度为1 mg/L时 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 和 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 氯胺72 h内的衰减速率分别为0.005 1和0.003 8 mg/(L·h).

2.2 氯胺在管网水中的衰减研究

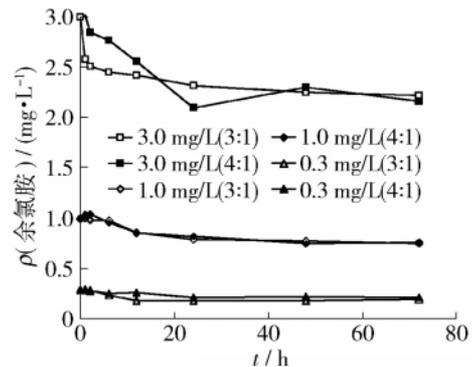
图2是氯胺在管网水中衰减情况.与图1比较可知,氯胺在管网水中的衰减幅度和速率都要高于纯水情况.在不同氯氨比下,管网水及纯水中氯氨比为4:1时氯胺的衰减速率都要小于氯氨比为3:1的情况.如氯胺投量为3 mg/L, $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 时,72 h内在纯水中总消耗量和单位时间消耗量分别为0.99 mg/L和0.013 8 mg/(L·h),在管网水中分别为1.77 mg/L和0.024 6 mg/(L·h);而 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 时,纯水中总消耗量和单位时间消耗量分别为0.58 mg/L和0.008 1 mg/(L·h),而在管网水中分别为1.41 mg/L和0.019 6 mg/(L·h).说明 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的氯胺在水相中相对比较稳定,其氯胺消耗速率比 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 的慢,一些研究认为氯胺消毒时,氯和氮的理想投加质量比为4:1^[17],与本研究的结果一致.图3是用氯胺在管网中衰减减去在纯水中衰减得到的氯胺在管网水中的净衰减情况.在不同氯氨比情况下,氯胺的衰减情况与图2基本一致,说明氯胺在实际管网水中的衰减除了受氯胺的自衰减影响外,水样中的本底物质对氯胺的衰减也有不同程度的影响.



$\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{pH} = 7.00$ $\rho(\text{TOC}) = 2.580\text{ mg/L}$

图2 氯胺在管网水中的衰减

Fig. 2 Chloramine decay in drinking water distribution system



$\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{pH} = 7.00$ $\rho(\text{TOC}) = 2.580\text{ mg/L}$

图3 氯胺在管网水中的净衰减

Fig. 3 Net decay of chloramine in drinking water distribution system

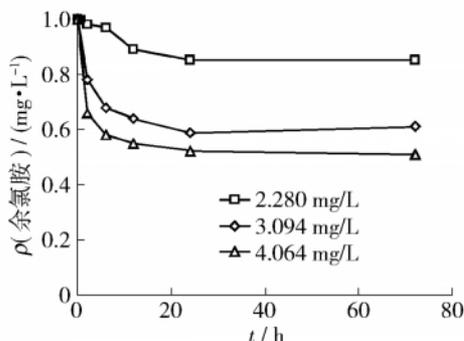
2.3 TOC对氯胺衰减的影响

由于在不同氯氨比下,氯胺的衰减具有相似的变化规律,本文以 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 为代表研究氯胺的衰减影响因素,氯胺投量为1 mg/L.向管网水中加入腐殖酸调节水中 $\rho(\text{TOC})$ 分别为 (2.0 ± 0.3) 、 (3.0 ± 0.1) 及 (4.0 ± 0.1) mg/L,氯胺的衰减情况如图4所示.可以看出,随着 $\rho(\text{TOC})$ 的增加,氯胺的衰减量也随着增加,在初始的24 h内其衰减量迅速增加,而后衰减量则呈平稳状态,如当 $\rho(\text{TOC}) = 2\text{ mg/L}$ 时 $0 \sim 24\text{ h}$ 的衰减量为0.15 mg/L,而 $24 \sim 72\text{ h}$ 其基本不再衰减;在 $\rho(\text{TOC}) = 4\text{ mg/L}$ 时 $0 \sim 24\text{ h}$ 的衰减量为0.48 mg/L,而 $24 \sim 72\text{ h}$ 其衰减量为0.01 mg/L.氯胺可以和有机物发生反应,从而导致自身的减少,并随着有机物质量浓度的增大,氯胺的消耗量也增多.这是由于在反应的初始阶段氯胺中存在着一一定量的游离氯,游离氯较氯胺与有机物具有更高的反应活性,因而表现为初始阶段的快速衰减,自由氯消耗完后,剩余的氯胺与有机物的反应较慢,因而后期氯胺的消耗速率降低.也有研究指出,水中的有机物分为易于与消毒剂反应的物质和不易与消毒剂反应的物质,因此,消毒剂在水相消耗的初始阶段体现出一定的快速消耗现象,而后消耗的速率相对变缓^[18-20].

根据反应动力学原理 $A + B \rightarrow C$ (A 为 NH_2Cl , B 为有机物, C 为反应产物),氯胺消耗速率可表示为 $dc/dt = k[A][B]$,而有机物与氯胺反应的过程中,氯胺质量浓度低于1 mg/L时,其氧化能力不足以将有机物氧化为二氧化碳的形式,TOC在氯胺消耗中变化不大^[18],可以用TOC初始值表示 $[B]$.即 $dc/dt = k'[A]$ (其中 $k' = k[B]$).可用上述一级反应动

力学模型对管网水中氯胺消耗系数进行拟合, 得出消耗系数 k' 与 $\rho(\text{TOC})$ 的关系见表 2. k' 与 $\rho(\text{TOC})$ 的关系可表示为

$$y = 0.013e^{0.2869x} (R^2 = 0.958)$$



$w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ $\theta = 25^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 7.00$

图 4 TOC 对管网水中氯胺衰减的影响

Fig. 4 Impact of TOC on chloramine decay in drinking water distribution system

表 2 TOC 与水相消耗系数的关系

Table 2 Relationship between TOC and bulk decay

函数类型	k' 与 $\rho(\text{TOC})$ 的关系	R^2
线性	$y = 0.0071x + 0.0106$	0.9426
幂函数	$y = 0.0195x^{0.4491}$	0.9217
指数函数	$y = 0.0129e^{0.2869x}$	0.9576
多项式	$y = 0.0001x^2 + 0.0065x + 0.0109$	0.9429

2.4 NO_2^- -N 对氯胺衰减的影响

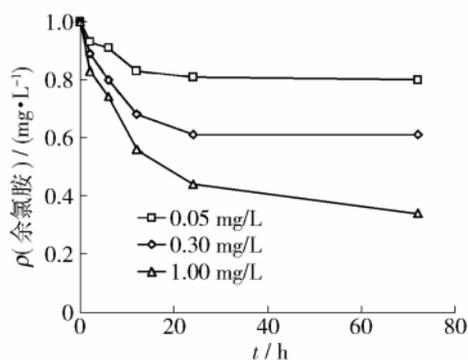
如果氯胺消毒管网中发生硝化作用, 则会产生一定量的亚硝酸盐, 亚硝酸盐为还原性物质, 将会对氯胺衰减造成一定影响, 因此研究中向管网水中加入一定量的 KNO_2 溶液调节水样中 NO_2^- 的质量浓度, 研究 NO_2^- 对氯胺消耗的影响. 从图 5 可以看出, 在初始 24 h 内, 氯胺有一个比较快的消耗阶段, 但随后消耗速率则减缓, 这与 Margerum 等^[14] 所得结论相似. 当加入 0.05 mg/L 的 NO_2^- 时, 在 24 h 内, 氯胺消耗量为 0.20 mg/L; 当 NO_2^- 的质量浓度为 0.3 及 1 mg/L 时, 氯胺衰减量分别达到 0.39 和 0.56 mg/L. 可见, 亚硝酸盐对氯胺的衰减存在着较大的影响, 有研究指出 1 mg/L NO_2^- 可以消耗 5 mg/L 的有效氯, 如果管网中发生硝化作用, 则 NO_2^- 可能是导致氯胺消耗的一个重要原因^[21-22].

在水中氯胺与亚硝氮发生如下反应: $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ ^[23], 根据化学反应

动力学原理, 氯胺消耗速率可表示为 $dc/dt = k[\text{NH}_2\text{Cl}][\text{NO}_2^-]$ ^[18].

可以用上述模型对管网水中加入氯胺的消耗系数进行拟合, 得出 k' 与 $\rho(\text{NO}_2\text{-N})$ 的关系如表 3 所示. k' 与 $\rho(\text{NO}_2\text{-N})$ 的关系可表示为

$$y = -0.002x^2 + 0.008x + 0.003 (R^2 = 0.9663)$$



$w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ $\theta = 25^\circ\text{C}$ $\text{pH} = 7.00$,

$\rho(\text{TOC}) = 2.580 \text{ mg/L}$

图 5 亚硝酸盐对氯胺衰减的影响

Fig. 5 Impact of nitrite on chloramine decay

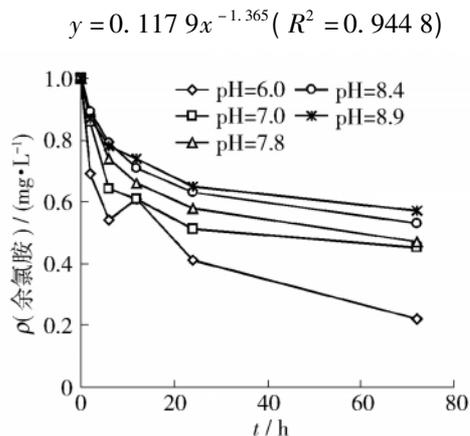
表 3 NO_2^- -N 与水相消耗系数的关系

Table 3 Relationship between Nitrite and bulk decay

函数类型	k' 与 $\rho(\text{NO}_2\text{-N})$ 的关系	R^2
线性	$y = 0.006x + 0.003$	0.9619
幂函数	$y = 0.0079x^{0.238}$	0.7411
指数函数	$y = 0.0033e^{1.054x}$	0.8788
多项式	$y = -0.002x^2 + 0.0081x + 0.0031$	0.9663

2.5 pH 对氯胺衰减的影响

图 6 是 pH 的变化对氯胺衰减的影响情况. 可以看出, pH = 7.0 ~ 8.9 范围内, 随着 pH 的降低, 氯胺在 72 h 内的衰减速率总体趋势升高, 但消耗速率随 pH 降低升高的幅度不大, 而在 pH = 6.0 时, 72 h 内的消耗速率则迅速升高. 如在 pH = 8.9、6.0 的条件下, 在 72 h 内, 氯胺质量浓度分别下降了 0.43、0.78 mg/L. 氯胺的衰减反应是酸催化反应, H^+ 对氯胺的衰减反应起到一定的促进作用, 因此使氯胺的消耗随 pH 的降低而呈现明显的上升趋势. 这与 Jafvert 等所研究的结论是一致的^[24]. 用一级动力学模型对不同 pH 下的氯胺消耗系数进行拟合, 得出消耗系数 k' 与 pH 的关系如表 4 所示, 可见, 可用幂函数来表示 k' 与 pH 的关系



$w(\text{Cl}) : w(\text{N}) \theta = 25\text{ }^\circ\text{C} \rho(\text{TOC}) = 2.580\text{ mg/L}$

图6 pH对氯胺衰减的影响

Fig.6 Impact of pH on chloramine decay

表4 pH与水相消耗系数的关系

Table 4 Relationship between pH value and bulk decay

函数类型	k' 与pH的关系	R^2
线性	$y = -0.0015x + 0.0191$	0.8898
幂函数	$y = 0.1179x^{-1.3651}$	0.9443
指数函数	$y = 0.0306e^{-0.1848x}$	0.9271

2.6 温度对氯胺衰减的影响

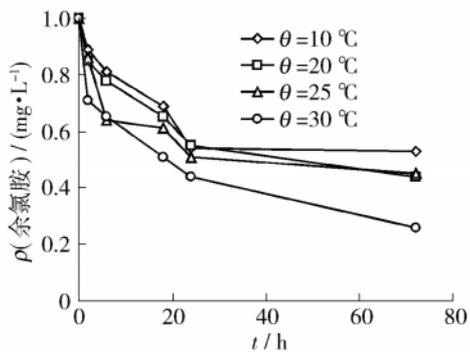
温度 θ 对氯胺衰减的影响如图7所示, 试验温度分别为10、20、25和30 $^\circ\text{C}$ 。可以看出, 随着温度的升高, 氯胺衰减都有不同程度的增加, 当温度由10 $^\circ\text{C}$ 升高到30 $^\circ\text{C}$ 时, 氯胺的总消耗量和单位时间消耗分别由0.47 mg/L和0.0065 mg/(L·h) 升高到0.74 mg/L和0.0103 mg/(L·h)。一方面, 温度的升高提高了氯胺和水中有机物的反应活性, 使得氯胺与有机物的反应速率升高; 另一方面, 温度的升高增加了氯胺自分解速率, 使氯胺的消耗量和消耗速率升高。用一级动力学模型对不同温度下的氯胺消耗系数进行拟合, 得出 k' 与 θ 的关系如表5所示, k' 与 θ 的关系可表示为

$$y = 0.00005x^2 - 0.00031x + 0.0081 (R^2 = 0.8825)$$

表5 温度对氯胺水相衰减的影响

Table 5 Relationship between temperature and bulk decay

函数类型	k' 与 θ 的关系	R^2
线性	$y = 0.0002x + 0.0046$	0.7622
指数函数	$y = 0.0052e^{0.0199x}$	0.8065
多项式	$y = 0.00005x^2 - 0.0003x + 0.0081$	0.8825



$w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1 \rho(\text{TOC}) = 2.580\text{ mg/L}$

图7 温度对氯胺衰减的影响

Fig.7 Impact of temperature on chloramine decay

3 结论

1) 氯胺存在自衰减现象, 氯胺自衰减随质量浓度升高而增加; 相同氯胺质量浓度下 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的衰减速率要低于 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 的情况。

2) 在管网水中, 氯胺在 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 时的衰减速率也低于 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 3:1$ 时的情况, 因此建议在实际工程中使用 $w(\text{Cl}) : w(\text{N}) = 4:1$ 的氯胺消毒管网, 以更好地保证管网末端的余氯量。

3) 水中有机物质量浓度、 NO_2^- 质量浓度均会提高氯胺的衰减速率, 其质量浓度越高, 氯胺衰减速率越快。

4) 温度和 pH 会影响氯胺的衰减速率, 温度越高, 氯胺衰减速率越快; 氯胺的衰减反应是酸催化反应, pH 的提高会降低氯胺的衰减速率。

参考文献:

[1] ROOK J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters [J]. Water Treatment & Examination, 1974, 23(2): 234-243.

[2] 程立, 方闻, 谭斌, 等. 一氯胺消毒剂检测新技术及应用[J]. 供水技术, 2008, 2(5): 43-45.
CHENG Li, FANG Wen, TAN Bin, et al. A new testing method and its application for monochloramine [J]. Water Technology, 2008, 2(5): 43-45. (in Chinese)

[3] VIKESLAND P J, OZEKIN K, VALENTINE R L. Monochloramine decay in model and distribution system waters [J]. Water Research, 2001, 35(7): 1766-1776.

[4] YANG X, SHANG C. Chlorination byproduct formation in the presence of humic acid, model nitrogenous organic compounds, ammonia, and bromide [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(19): 4995-5001.

[5] QI Y N, SHANG C. Formation of haloacetic acids during

- monochloramination [J]. *Water Research*, 2004, 38 (12): 2374-2382.
- [6] 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 distribution system and its control [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(2): 6-9. (in Chinese)
- [7] STEPHEN E D, BERTRAND G, JEAN P C, et al. Modeling monochloramine loss in the presence of natural organic matter [J]. *Water Research*, 2005, 39 (14): 3418-3431.
- [8] ZHANG Y, EDWARDS M. Accelerated chloramine decay and microbial growth by nitrification in premise plumbing [J]. *Journal American Water Works Association*, 2009, 101(11): 51-62.
- [9] MUTOTI G, DIETZ J D, AREVALO J, et al. Combined chlorine dissipation: pipe material, water quality, and hydraulic effects [J]. *Journal American Water Works Association*, 2007, 99(10): 96-106.
- [10] SWIDERSKA B M, WOLSKA M. Underlying free chlorine decay in the water distribution system [J]. *Ochrona Srodowiska*, 2007, 29(3): 19-24.
- [11] NICHOLAS B H, HUA F, WEST J R, et al. Bulk decay of chlorine in water distribution systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129 (1): 78-81.
- [12] PAULA V, SERGIO Y C, DALIA L. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2004, 53(7): 453-467.
- [13] YANG H, CHENG H. Controlling nitrite level in drinking water by chlorination and chloramination [J]. *Separation & Purification Technology*, 2007, 56(3): 392-396.
- [14] MARGERUM D W, SCHURTER L M, HOBSON J, et al. Water chlorination chemistry: nonmetal redox kinetics of chloramine and nitrite ion [J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, 28(2): 331 - 337.
- [15] PINTAR K D M, ANDERSON W B, SLAWSON R M, et al. Assessment of a distribution system-nitrification critical threshold concept [J]. *Journal American Water Works Association*, 2005, 97(7): 116-129.
- [16] 陈杰,李星,杨艳玲,等. 预氯胺化控制消毒副产物技术研究[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(7): 5-8. CHEN Jie, LI Xing, YANG Yan-ling, et al. Study on pre-chloramination process for control of disinfection byproduct [J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21 (7): 5-8. (in Chinese)
- [17] 焦中志,陈忠林,陈杰,等. 氯胺消毒对消毒副产物的控制研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37 (11): 1486-1488. JIAO Zhong-zhi, CHEN Zhong-lin, CHEN Jie, et al. Control of disinfection by-products in drinking water by monochloramine disinfectant [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(11): 1486-1488. (in Chinese)
- [18] 唐峰. 给水管网中一氯胺消耗特性的研究[D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2006: 30-31. TANG Feng. The study of monochloramine decay in drinking water distribution system [D]. Beijing: School of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, 2006: 30-31. (in Chinese)
- [19] LEE W, WESTERHOFF P. Formation of organic chloramines during water disinfection-chlorination versus chloramination [J]. *Water Research*, 2009, 43 (8): 2233-2239.
- [20] CLARK R M, SIVAGANESAN M. Predicting chlorine residuals in drinking water: a second order model [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2002, 128(2): 152-161.
- [21] JOLYNN C, STEVE L. Improving chloramine residuals and minimizing nitrification [J]. *Florida Water Resources Journal*, 1999, 26(2): 26-28.
- [22] SUNG W D, HUANG X, WEI I W. Treatment and distribution system effects on chloramine decay, pH, nitrification, and disinfection by-products: case study [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, 131(3): 201-207.
- [23] LIEU N I, WOLFE R L, MEANS III E G. Optimizing chloramine disinfection for the control of nitrification [J]. *Journal American Water Works Association*, 1993, 85 (2): 84-90.
- [24] JAFVERT C T, VALENTINE R L. Dichloramine decomposition in the presence of excess ammonia [J]. *Water Research*, 1987, 21(8): 967-973.

(责任编辑 吕小红)