

臭氧灭活水中贾第虫影响因素研究

冉治霖¹, 李绍峰^{2*}, 黄君礼¹, 袁一星¹, 崔崇威¹

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 深圳职业技术学院建筑与环境工程系, 深圳 518055)

摘要: 为研究 O₃ 在水中杀灭贾第虫的效果, 利用荧光活体染色法探讨了不同因素 (CT 值、pH 值、温度、浊度、有机物含量和无机离子等) 对 O₃ 灭活贾第虫效果的影响. 结果表明, O₃ 灭活贾第虫整个过程可分为指数和缓慢灭活期, 指数灭活期反应速度明显快于缓慢灭活期 [$k_1 = (5.64 \pm 0.023) \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_2 = (2.72 \pm 0.002) \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_1 \gg k_2$]; 浊度 0.1 ~ 20 NTU, 温度 5 ~ 35℃, pH 值 6.0 ~ 9.0, HA 在 0.5 ~ 10.0 mg/L 浓度范围内, 浊度越低, 灭活效果越好; 随温度上升, O₃ 灭活贾第虫的能力减弱; 酸性较碱性条件下臭氧杀灭贾第虫的能力更强; 有机物浓度越高, 在反应体系中与贾第虫发生了竞争作用, 降低了灭活率; 水中阴离子对灭活率的影响次序为: $\text{NO}_3^- > \text{None} > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, 而阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cu^{2+}) 均对灭活起到一定促进作用; 当臭氧 CT 值 $\geq 15.0 \text{ min} \cdot \text{mg/L}$, 在饮用水消毒的浊度、温度、pH 值、有机和无机杂质浓度范围内, 贾第虫的灭活率均在 99.0% 以上.

关键词: 臭氧; 灭活; 贾第虫; 影响因素

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1459-05

Effect of Various Factors on Ozone Inactivating *Giardia* in Water

RAN Zhi-lin¹, LI Shao-feng², HUANG Jun-li¹, YUAN Yi-xing¹, CUI Chong-wei¹

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Building & Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic Institute, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to study the effect of O₃ inactivating *Giardia* in water, different factors (CT value, pH, temperature, turbidity, organic content and inorganic ions) which might influence the inactivation were investigated by using fluorescence staining method. The results indicated that the whole process of O₃ inactivating *Giardia* could be divided into two periods, the inactivated rate in log phase was significantly faster than it in the slow phase [$k_1 = (5.64 \pm 0.023) \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_2 = (2.72 \pm 0.002) \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_1 \gg k_2$]. When the turbidity was 0.1 to 20.0 NTU, temperature was 5 to 35℃, pH was 6.0 to 9.0, HA content was 0.5 to 10.0 mg/L, the turbidity was lower, the higher inactivating ratio could be received. With the increasing of temperature, the inactivating effect was decreased. The ability of O₃ inactivating *Giardia* was stronger under acidic condition than it was in alkali circumstance. When the reaction system contained higher concentration of organics, the competition reaction might take place between *Giardia* and organics with O₃, which might reduce inactivation ratio. The sequence of affecting disinfectant ability of O₃ was $\text{NO}_3^- > \text{None} > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, while inorganic cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cu^{2+}) promoted the inactive reaction to a certain extent. If the CT value of O₃ was more than 15.0 min · mg/L, the ratio of inactivation could exceed 99.0% during disinfecting drinking water.

Key words: O₃; inactivating; *Giardia*; effect factors

贾第虫 (*Giardia*) 是一种肠道原生寄生虫, 能够感染人类与动物, 引起贾第虫病. 当含有贾第虫的粪便流入水中时, 饮用水源就会受到污染^[1]. 如果水处理不充分, 饮用水中的贾第虫就会对人类造成严重威胁. 特别是免疫功能缺陷者如婴儿、老人以及艾滋病患者, 被感染后就会引起腹泻, 甚至危及生命^[2]. 据美国疾病控制预防中心估计, 每年约有 250 万感染贾第虫病的案例^[3]. 饮用水和再生水是贾第虫主要感染源, 其广泛存在于水表面和污泥中^[4].

贾第虫对外界环境有较强的抵抗力, 常用的消毒剂 (氯气、氯胺等) 在常规浓度下对其并无很强的杀灭作用. 例如: 氯气虽对贾第虫有轻微的杀伤作用, 但水厂投加的氯气浓度根本达不到完全杀灭的效果, 灭活率若要达到 99%, CT 值需 7 200

min · mg/L^[5]. 研究发现 O₃ 能够快速有效的杀灭隐孢子虫, Finch 等^[6]报道: CT 值为 2.6 min · mg/L, O₃ 就可以使隐孢子虫的灭活率达到 99%.

近年来随着不断暴发水源性贾第虫病, 水中贾第虫的污染及其消毒问题备受关注. 美国疾病控制预防中心把贾第虫作为一种高传染性疾病来防治. 我国对环境水样中贾第虫的研究报道较少, 特别是常规消毒剂对其灭活效果及影响因素. 目前仅仅停留在水样中贾第虫浓度的检测方法及其回收率等方面. 从目前所鉴定的基因型来看, 大部分贾第虫具有

收稿日期: 2009-08-17; 修订日期: 2009-12-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AAZ309)

作者简介: 冉治霖 (1980 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市水资源与饮用水消毒, E-mail: zhiliran@126.com

* 通讯联系人, E-mail: solve28@163.com

人畜共患病的潜在风险,有可能使生产者 and 社区成员受到威胁^[7,8]. 本实验使用 O_3 对水中贾第虫进行灭活,探讨投加浓度、灭活时间、温度、pH 值、浊度、有机物和离子浓度等因素的影响,以求找出 O_3 灭活水中贾第虫效果的最佳条件,以期在实际工程中使用臭氧杀灭饮用水中贾第虫提供依据.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

臭氧: O_3 通入棕色瓶中,其中含 1 L PBS 溶液 (pH = 7.0),用靛蓝比色法测定溶解的臭氧浓度^[9]. 贾第虫 (*Giardia lamblia*) 采于病患猴,经过筛、硫酸锌漂浮和蔗糖梯度离心等步骤,得到浓度为 1.5×10^6 个/mL 贾第虫样品,以 2.5% 重铬酸钾悬浮保存于 4℃ (使用时用 PBS 和纯水各洗 3 次,以去除样品中重铬酸钾).

1.2 方法及设备

1.2.1 试剂

4,6-二脒基-2-苯基-吡啶 (DAPI); Sigma USA; 普匹碘胺 (PI); Sigma USA, HBSS 平衡盐溶液; Sigma USA.

1.2.2 仪器设备

臭氧发生器为 CT-KG2 型 (广州益田环保设备有限公司); 荧光显微镜:重庆奥特 BK-FL; 以 Merck NOVE 60 多参数水质分析仪测定 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cu^{2+} 等离子浓度; 浊度: HACH 浊度测定仪; 腐殖酸浓度: 岛津 TOC_{VPN} 型测定仪; pH 值: 上海精科 PHS-3C 型 pH 计.

1.2.3 荧光染色法

①取 0.5 mL PBS (磷酸缓冲溶液) 保存样品,加入 1 mL HBSS 平衡盐溶液漂洗 2 次; ②沉淀于 160 μ L HBSS 平衡盐溶液中,加入 20 μ L DAPI, 20 μ L PI 储备液, 37℃ 温浴 1 h; ③温浴后加入 1 mL HBSS 清洗 3 次,洗去未染上颜色的 DAPI 和 PI; ④涂片, 荧光显微镜下镜检,各样品分别取 200 个孢囊镜检.

2 结果与分析

2.1 CT 值对灭活率的影响及动力学分析

取 10 mL 比色管分别加入初始浓度为 3.0 mg/L 的臭氧缓冲溶液,之后加入 10^5 个/mL 贾第虫悬浮液,温度 22℃, pH = 7.2, 浊度为 1.0 NTU, 避光反应,不同时间点 (t) 分别取样,并利用荧光染色法检测 200 个 (N_0) 活性贾第虫中存活个数 (N),同时测定反应体系中臭氧浓度. 利用 Jason 等^[10] 研究臭

氧灭活隐孢子虫所得动力学模型 [式 (1)], 对图 1 曲线进行拟合分析, 参数见表 1.

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{N_{1,0}}{N_0} \right) e^{-k_1 CT} + \left(\frac{N_{2,0}}{N_0} \right) e^{-k_2 CT} \quad (1)$$

式中, N_0 及 N 为灭活前的活性贾第虫数量及臭氧反应 t (min) 后活性贾第虫的数量, $N_{1,0}$ 和 $N_{2,0}$ 分别为敏感期和衰减期活性贾第虫的数量, k_1 和 k_2 分别为 2 个阶段的速率常数 (mg · min), CT 为反应时间与消毒剂有效浓度的乘积 (min · mg/L), 结果见图 1.

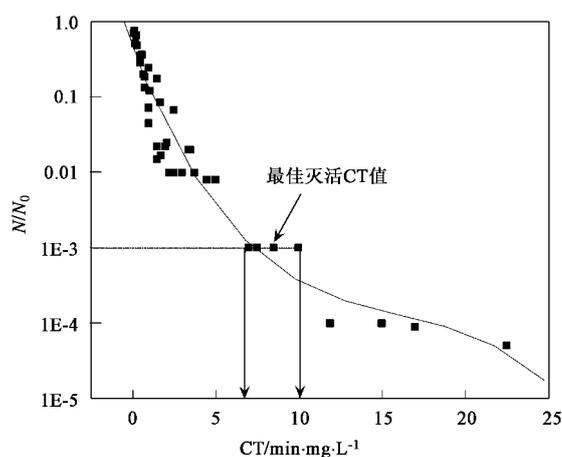


图 1 臭氧灭活贾第虫动力学曲线

Fig. 1 Inactivation kinetics of *Giardia* with O_3 at pH 7.2, 1.0 NTU

从图 1 可以看出, 臭氧灭活贾第虫整个过程可分为 2 段: 指数灭活期 (敏感期) 和缓慢灭活期 (衰减期), 经过线性拟合, 其结果见表 1. $k_1 = (5.64 \pm 0.023) \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_2 = (2.72 \pm 0.002) \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_1 \gg k_2$, 说明指数灭活期的灭活速度明显快于缓慢期, 这可能是由于初始阶段贾第虫数量较多, 臭氧浓度较大, 氧化能力较强造成的, 随 CT 值的逐渐增加, 贾第虫的数量减少, 灭活速率逐渐降低. 由表 1 与图 1 可知 CT 值对灭活率影响较大, 当 pH = 7.2, 浊度为 1.0 NTU, 温度 22℃, 臭氧 CT 值范围为: $7.0 \text{ min} \cdot \text{mg/L} \leq CT \leq 10.0 \text{ min} \cdot \text{mg/L}$.

表 1 臭氧灭活贾第虫动力学曲线拟合参数

Table 1 Fitting parameters obtained for the inactivation of *Giardia* with O_3

温度/℃	pH	浊度/NTU	$k_1/\text{mg} \cdot \text{min}$	$k_2/\text{mg} \cdot \text{min}$	R
22	7.2	1.0	0.5635 ± 0.023	0.02718 ± 0.002	0.998

臭氧在水中发生下列反应: $O_3 \rightarrow O + O_2$, $O + H_2O \rightarrow 2 \cdot OH$; 产生的 $\cdot OH$ 具有比 O_3 更强的氧化能

力,电位高,反应能力强,速度快.而 O_3 对微生物的灭活机制尚不完全清楚,有人认为 O_3 灭活微生物首先攻击细胞膜,侵入膜后作用于外膜脂蛋白和内部的脂多糖,使细胞发生通透性畸变,导致细胞死亡;也有报道认为 O_3 破坏细胞器和细胞内核酸,使细胞的物质代谢和繁殖过程遭到破坏^[11],臭氧灭活贾第虫的机制尚需进一步研究.

2.2 浊度对灭活率的影响

由于天然水中含有各种悬浮物及胶体物质,从而影响了水体的浊度,而 Falabi 等^[12]的研究表明贾第鞭毛虫与隐孢子虫的去除与浊度有显著关系,本研究在 22°C , pH 为 7.2, 臭氧 CT 值为 9.0、12.0、15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$, 分别设置反应体系的浊度为 0.1、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 和 20.0 NTU, 利用荧光染色法检测贾第虫灭活率. 其结果见图 2.

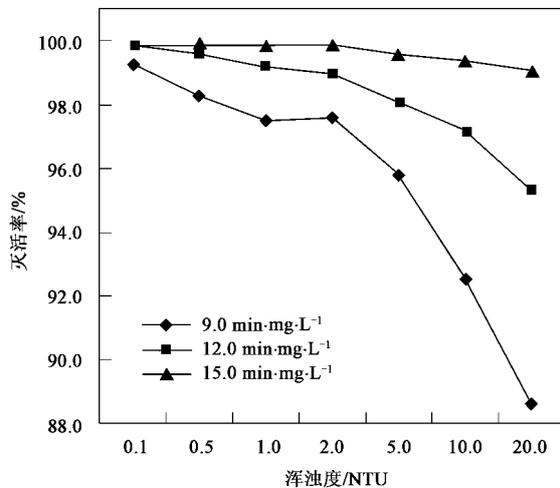


图 2 浊度对贾第虫灭活效果的影响

Fig. 2 Effects of different turbidities on the survival of *Giardia*

由图 2 可见,当 CT 值为 9.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$, 贾第虫的灭活率随浊度的增加而降低 (99.4% ~ 88.6%), 增大 CT 值 (12.0、15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$), 贾第虫的灭活效果逐渐增强, 特别是当 CT 值为 15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$ 时, 浊度 (0.1 ~ 20.0 NTU) 范围内均可达到灭活标准 (灭活率 > 99.0%), 其原因可能是水体中的悬浮物或胶体物质对贾第虫有一定的吸附从而影响了贾第虫的灭活率. 出厂水浊度要求 1.0 NTU 以下, 因此实际生产中, 臭氧 CT 值 15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$ 可以保证贾第虫的灭活. 实验结果还说明混凝和滤前进行臭氧预氧化或氧化, 对控制贾第虫的潜在威胁也能起到一定作用.

2.3 温度对灭活率的影响

在 pH = 7.2, 浊度为 1.0 NTU, 臭氧 CT 值为 9.0、12.0、15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$, 分别设置反应温度为 5、15、22、30 和 35°C , 检测贾第虫灭活率. 其结果见图 3, 当 CT 值为 15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$ 时, 可以达到灭活效果 (灭活率 > 99.0%). 适度降低臭氧 CT 值 (9.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$), 探究温度影响臭氧灭活贾第虫的规律. 在低温 (5°C) 时, 贾第虫处于休眠状态 (灭活率为 94.4%), 有自我保护的能力; 但当温度升至 22°C , 灭活率逐渐增强且达到 99.1%; 随着温度的升高 (35°C), 贾第虫灭活能力减弱 (灭活率 97.0%), 此规律与 CT 值 (12.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$) 时基本相同. 出现此现象的主要原因是随着温度的增加臭氧溶解度下降, 温度越高, 臭氧越容易分解, 故灭活能力减弱.

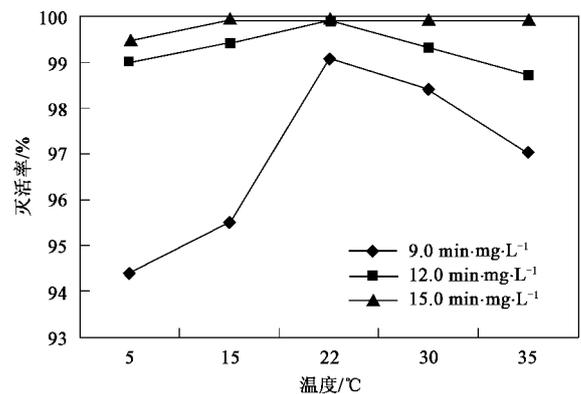


图 3 不同温度下贾第虫灭活率的比较

Fig. 3 Comparison of the inactivation rates of *Giardia* under different temperatures

2.4 pH 值对灭活率的影响

在浊度为 1.0 NTU, 臭氧 CT 值为 9.0、12.0、15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$, 分别设置反应体系的 pH 值为 6.0、7.0、7.5、8.0 和 9.0, 检测贾第虫灭活率 (图 4). 从图 4 可知, 随着 pH 值的增加灭活能力减弱, 贾第虫的灭活率降低 (CT 值为 9.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$, 灭活率由 99.2% 降至 97.3%). 酸性条件下灭活能力强于碱性条件, 这主要是由于臭氧分子的氧化电势在酸性条件下 (2.07 V) 比碱性条件下 (1.24 V) 更高, 氧化能力即灭活贾第虫的能力更强. 饮用水 pH 值一般在 6.5 ~ 8.5 之间, 可见在此范围内, 臭氧 CT 值大于等于 15.0 $\text{min}\cdot\text{mg}/\text{L}$ 后可以完全杀灭贾第虫.

2.5 有机物对灭活率的影响

腐殖酸 (humic acid, HA) 在自然水体中含量较高, 是自由基的引发剂、促进剂, 又是其抑制剂^[13],

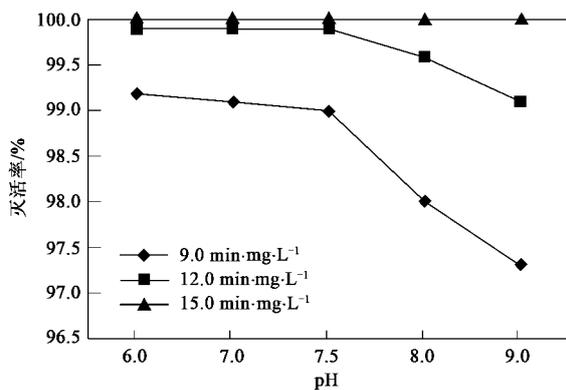


图4 不同 pH 值下贾第虫灭活率的比较

Fig. 4 Comparison of the inactivation rates of *Giardia* under different pH values

是动植物残体经过复杂的物理、化学、生物等过程转化而成的一种广泛存在于水体、土壤中的高分子聚合物,为饮用水中主要的去除对象.本实验以腐殖酸(HA)为有机物主要代表成分,分别设置 HA 浓度为:0、0.5、1.0、2.0、3.0、5.0、10.0 mg/L,考察其对 O₃ 灭活贾第虫的影响(见图 5).

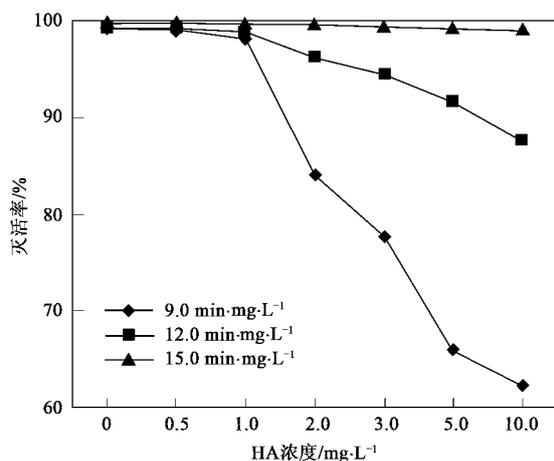


图5 不同浓度 HA 对贾第虫灭活的影响

Fig. 5 Effects of different HA concentrations on the inactivation of *Giardia*

由图 5 可见, O₃ 的 CT 值为 9.0 min·mg/L 时, HA 浓度 0 ~ 1.0 mg/L 时, 贾第虫的灭活率分别为 99.2% (HA 浓度 0.5 mg/L) 和 99.3% (HA 浓度 1.0 mg/L). 当 HA 浓度为 2.0 ~ 10.0 mg/L 时, 灭活率迅速降低, 从 88.3% 降至 60.1%. 这主要由于 HA 是由不同有机物浓缩而成, 含有多种有机大分子物质, 当 HA 浓度较低时, HA 分子中含有很多直接参与反应的攻击位点, 引发臭氧分解而产生·OH, 加速了灭活速度; 当 HA 浓度增加, 在反应体系中与贾第

虫发生了竞争作用, 消耗了一部分臭氧, 从而降低了灭活率^[14]. 当臭氧 CT 值增至 15.0 min·mg/L 时 HA 浓度(0 ~ 10.0 mg/L) 对灭活率的影响不明显(灭活率 ≥ 99.0%).

2.6 水中无机离子对灭活率的影响

天然水体中含有多种无机离子, 且浓度比需去除的有机污染物高得多(几十至几百 mg/L), 水中无机离子可能也是影响臭氧灭活贾第虫灭活率的重要因素^[15]. 本研究在反应体系中分别加入水中常见的无机离子 (NO₃⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Cu²⁺ 等), 与未加离子 (None) 的体系比较, 利用荧光染色法检测贾第虫存活率. 各种离子浓度设定见表 2.

表 2 离子浓度设定表

Table 2 Contents of cations and anions

离子	设定浓度	水质标准 ¹⁾ /mg·L ⁻¹
HCO ₃ ⁻	5.0 mmol/L	450.0
Cu ²⁺	1.0 mg/L	1.0
SO ₄ ²⁻	3.0 mmol/L	250.0
Ca ²⁺	4.0 mmol/L	450.0
NO ₃ ⁻	20.0 mg/L	20.0
Mg ²⁺	4.5 mmol/L	450.0

1) GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准

pH = 7.2, 浊度为 1.0 NTU, 温度 22℃, 当臭氧 CT 值为 9.0 min·mg/L, NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 等无机阴离子对存活率的影响见图 6, 其中贾第虫的灭活率 NO₃⁻ > None > SO₄²⁻ > HCO₃⁻, NO₃⁻ 一定程度上促进了臭氧灭活贾第虫, 由于 NO₃⁻ 本身就是强氧化剂, 而且是水体中·OH 的主要来源^[16], 从而加速了反应. 而 HCO₃⁻ 是众所周知的自由基抑制剂^[13], 加入 HCO₃⁻ 后贾第虫灭活率明显降低, SO₄²⁻ 的作用介于这 2 种离子之间.

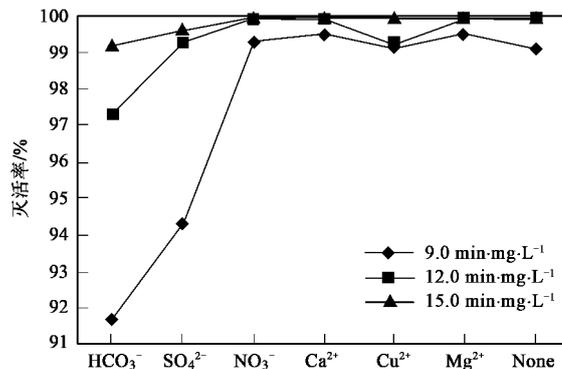


图6 无机离子对贾第虫灭活的影响

Fig. 6 Effects of different inorganic ions on the inactivation of *Giardia*

水中无机阳离子对臭氧氧化工艺也有一定影响^[15]. 实验考察了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cu^{2+} 等无机阳离子对灭活效果的影响(见图 6), 发现这 3 种离子均对灭活有一定程度的促进作用, 灭活率从 99.1% 上升为 99.5%、99.5% 和 99.2%. 金属阳离子促进细菌、病毒等生物体的灭活作用, 可能主要由于二价阳离子是细胞表面蛋白的活性因子, 吸附在细胞表面后打开某些“盐桥”和物质输送通道^[17], 促进氧化剂直接攻击细胞内质, 但机制尚不确定, 还有待进一步的研究. 当反应体系中分别含有设定浓度的无机离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 等), 随着臭氧 CT 值的增加 ($\geq 15.0 \text{ mg} \cdot \text{min}/\text{L}$), 可以达到预期灭活效果(灭活率 $> 99.0\%$).

3 结论

(1) 臭氧灭活贾第虫可分为指数灭活期和缓慢灭活期, 反应速率常数分别为: $k_1 = (5.64 \pm 0.023) \times 10^{-1} \text{ mg} \cdot \text{min}$ 和 $k_2 = (2.72 \pm 0.002) \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{min}$, $k_1 \gg k_2$, 指数灭活期的灭活速度快于缓慢灭活期.

(2) 浊度 0.1 ~ 20 NTU 范围内, 浊度越低, 灭活效果越好; 温度在 5 ~ 35℃ 之间, 随温度升高, 灭活能力呈先增强后降低趋势; pH 值 6.0 ~ 9.0 之间, 臭氧在酸性较碱性条件具有更强的灭活贾第虫能力; HA 在 0.5 ~ 10.0 mg/L 浓度范围内, 对灭活表现为低浓度促进, 高浓度抑制.

(3) 水中无机阴离子对灭活率的影响次序: $\text{NO}_3^- > \text{None} > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, 无机阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cu^{2+} 均对灭活反应具有一定程度促进作用.

(4) 当臭氧的 CT 值 $\geq 15.0 \text{ min} \cdot \text{mg}/\text{L}$, 在饮用水消毒的浊度、温度、pH 值、有机和无机杂质浓度范围内, 对贾第虫的灭活率均在 99.0% 以上.

参考文献:

[1] Lobo M L, Xiao L, Antunes F, *et al.* Occurrence of *Cryptosporidium* and *Giardia* genotypes and subtypes in raw and treated water in Portugal [J]. *Letterin Applied Microbiology*, 2009, **48**(6): 732-737.

[2] Xiao L H, Feng Y Y. Zoonotic *Cryptosporidiosis* [J]. *FEMS Immunology Medical Microbiology*, 2008, **52**(3): 309-323.

[3] Bruce W F, Michael J B, Jacquelin M R. *Giardiasis* surveillance-United States, 1992-1997 [J]. *Morbidity and Mortality Weekly Report CDC Surveillance Summary*, 2000, **49**(1): 1-13.

[4] Nishi L, Baesso M L, Santana R G, *et al.* Investigation of *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp. in a public water-treatment system [J]. *Zoonoses Public Health*, 2009, **56**(5): 221-228.

[5] Korich D G, Mead J R, Madore M S, *et al.* Effects of ozone, chlorine dioxide, chlorine, and monochloramine on *Cryptosporidium parvum* oocyst viability [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56**(5): 1423-1428.

[6] Finch G R, Black E K, Gyurek L, *et al.* Ozone inactivation of *Cryptosporidium parvum* in demand-free phosphate buffer determined by *in vitro* excystation and animal infectivity [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(12): 4203-4210.

[7] Leticia E G, Adrian C C, Enedina J C. Genotype of *Giardia intestinalis* isolates from children and dogs and its relationship to host origin [J]. *Parasitol Research*, 2005, **97**(1): 1-6.

[8] Lalle M, Pozio E, Capelli G, *et al.* Genetic heterogeneity at the β -giardin locus among human and animal isolates of *Giardia duodenalis* and identification of potentially zoonotic subgenotypes [J]. *International Journal for Parasitology*, 2005, **35**(2): 207-213.

[9] Bader H, Hoigne J. Determination of ozone in water by the indigo method [J]. *Water Research*, 1981, **15**(4): 449-456.

[10] Jason L R, Jae H K, Benito C V, *et al.* Role of disinfectant concentration and pH in the inactivation kinetics of *Cryptosporidium parvum* oocysts with ozone and monochloramine [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**(13): 2752-2757.

[11] Giovanni W, Tim C, Honorine D. *et al.* Structural and biochemical alterations in *Giardia lamblia* cysts exposed to ozone [J]. *Journal of Parasitology*, **88**(6): 1100-1106.

[12] Falabi J A, Gerba C P, Karpiscak M M. *Giardia* and *Cryptosporidium* removal from waste-water by a duckweed (*Lemna gibba* L.) covered pond [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(5): 384-387.

[13] Hoigné J, Bader H. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water III: inorganic compounds and radicals [J]. *Water Research*, 1985, **19**(8): 993-1004.

[14] 李海燕, 曲久辉. 饮用水中 DBP 的臭氧氧化效能与影响因素 [J], *环境化学*, 2004, **23**(3): 278-282.

[15] 赵雷, 马军, 孙志忠. 无机离子对催化臭氧氧化降解水中痕量硝基苯效果的影响 [J], *环境科学*, 2006, **27**(5): 924-929.

[16] Sorensen M, Frimmel F H. Photochemical degradation of hydrophilic xenobiotics in the UV/H₂O₂ process: influence of nitrate on the degradation rate of EDTA, 2-amino-1-naphthalene sulfonate, diphenyl-4-sulfonate and 4, 4'-diaminostilbene-2, 2'-disulfonate [J]. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2885-2891.

[17] Jason W R, Jack S, Geli G, *et al.* Calcium efflux is essential for bacterial survival in the eukaryotic host [J]. *Molecular Microbiology*, 2008, **70**(2): 435-444.