

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.007

不同消毒工艺对韩江滤后水消毒效果的影响

吴悦¹, 赖永忠^{2,3}, 张彤⁴, 张勉⁴, 杨铭豪¹, 麦家萍¹, 许泽莹¹,
黎妍倩¹

(1. 汕头职业技术学院 自然科学系, 广东 汕头 515041; 2. 汕头大学海洋生物研究所 广东省海洋生物技术重点实验室, 广东 汕头 515063; 3. 汕头市环境保护监测站, 广东 汕头 515041; 4. 广东省粤东技师学院 质量检验工程系, 广东 汕头 515041)

摘要: 韩江是潮汕地区的饮用水源,其水质好坏直接关系到千家万户的用水安全。以汕头市某自来水厂滤后水为原水,采用次氯酸钠消毒(NaClO)、臭氧消毒(O_3)、紫外消毒(UV)、次氯酸钠和紫外同时消毒(NaClO/UV)、臭氧和紫外同时消毒(O_3/UV)、先臭氧后次氯酸钠消毒($\text{O}_3 + \text{NaClO}$)6种消毒工艺,研究了不同消毒工艺的杀菌效果、 UV_{254} 去除率和有机消毒副产物生成情况,并比选出最佳消毒工艺。结果表明:6种消毒工艺对水中细菌的灭杀效果均良好; $\text{O}_3 + \text{NaClO}$ 组合工艺对 UV_{254} 的去除率最高,达到48.4%;6种消毒工艺出水的消毒副产物总量均符合我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求, $\text{O}_3 + \text{NaClO}$ 组合工艺的有机消毒副产物生成风险最低。

关键词: 韩江滤后水; 次氯酸钠; 臭氧; 紫外线; 组合消毒; 有机消毒副产物

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0039-07

Disinfection Efficiency of Filtered Water from Hanjiang River by Different Disinfection Processes

WU Yue¹, LAI Yong-zhong^{2,3}, ZHANG Tong⁴, ZHANG Mian⁴, YANG Ming-hao¹,
MAI Jia-ping¹, XU Ze-ying¹, LI Yan-qian¹

(1. Department of Natural Sciences, Shantou Polytechnic, Shantou 515041, China; 2. Guangdong Province Marine Biotechnology Key Laboratory, Marine Biology Institute of Shantou University, Shantou 515063, China; 3. Shantou Environmental Monitoring Station, Shantou 515041, China; 4. Department of Quality Inspection Engineering, East Guangdong Technician College, Shantou 515041, China)

Abstract: Hanjiang River is a drinking water source of Chaoshan area, and its water quality is directly related to the water safety of millions of households. The filtered water from a waterworks in Shantou was taken as the raw water. The germicidal efficacy, UV_{254} removal efficiency and organic disinfection by-products formation during six disinfection processes [sodium hypochlorite disinfection (NaClO), ozone disinfection (O_3), ultraviolet disinfection (UV), simultaneous sodium hypochlorite and ultraviolet disinfection (NaClO/UV), simultaneous ozone and ultraviolet disinfection (O_3/UV), and

基金项目: 汕头市科技计划项目(2016-40); 2020年广东省科技创新战略专项资金资助项目(pdjh2020b1214); 汕头职业技术学院科研课题(SZK2018Q04); 汕头职业技术学院“创新强校工程”(2019年—2021年)入库项目; 汕头职业技术学院教研教改项目(18jy08)

disinfection by ozone followed by sodium hypochlorite ($O_3 + NaClO$)] were investigated. Finally, the best disinfection process was explored, and the optimal disinfection process was selected. The six disinfection processes had good germicidal efficacy on bacteria in raw water. The removal efficiency of UV_{254} by the combined process of $O_3 + NaClO$ was the highest, which reached 48.4%. The total amount of disinfection by-products produced by the six disinfection processes all met the requirements of *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006), and the formation risk of organic disinfection by-products in effluent of $O_3 + NaClO$ combined process was the lowest.

Key words: filtered water from Hanjiang River; sodium hypochlorite; ozone; ultraviolet rays; combination disinfection; organic disinfection by-products

目前,饮用水消毒工艺包括氯、臭氧、二氧化氯、紫外线及其组合消毒^[1]。传统氯、臭氧消毒等给水处理工艺往往会产生一些诸如三卤甲烷 (THMs)、溴酸盐和甲醛等有害物质,引起二次污染问题^[2]。紫外线消毒在管网中没有持续的消毒效果,也限制了其在饮用水消毒中的应用^[3]。相比于单独消毒处理,联用技术能够有效应对难降解有机污染物的处理难题、提高杀菌消毒能力、控制消毒副产物的生成风险,显示出了巨大的研究和发展潜力^[2]。郑晓英等^[4]研究表明,在相同有效氯投加量条件下,组合工艺较单独次氯酸钠消毒出水的总大肠菌群和粪大肠菌群数更低,三氯甲烷 (TCM) 生成量降低了 36.67%,二溴一氯甲烷 (DBCM) 未检出。罗凡等^[5]指出,相比消毒剂单独作用,紫外线和消毒剂同时作用对微生物的杀灭作用降低,出水消毒副产物生成量少,但当紫外线剂量为 31.5 mJ/cm^2 、消毒剂浓度为 1.0 mg/L 时,出水微生物指标能达到水质标准。

韩江是潮汕地区的饮用水源,其水质好坏直接关系到千家万户的用水安全。目前,有关以韩江流域作为饮用水源的给水处理技术研究甚少,研究不同消毒工艺对韩江水的消毒效果有重要的现实意义。笔者以汕头市某自来水厂滤后水为原水,比较次氯酸钠消毒 ($NaClO$)、臭氧消毒 (O_3)、紫外消毒 (UV)、次氯酸钠和紫外同时消毒 ($NaClO/UV$)、臭氧和紫外同时消毒 (O_3/UV)、先臭氧后次氯酸钠消毒 ($O_3 + NaClO$) 这 6 种消毒工艺的杀菌效果、对 UV_{254} 的去除率,以及有机消毒副产物 TCM、一溴二氯甲烷 (DCBM)、DBCM、三溴甲烷 (TBM)、四氯化碳 (CTC)、二氯乙酸 (DCAA)、三氯乙酸 (TCAA) 和甲醛的生成情况,最后比选出最佳的消毒工艺,旨在为以韩江为水源的给水厂消毒方式选择及工艺升级改造提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原水水质

试验用水为汕头某自来水厂滤后水。试验期间正处于韩江流域丰水期,滤后水水质如下:浊度为 0.01 NTU 、 Br^- 为 $64 \mu\text{g/L}$ 、 Cl^- 为 11.094 mg/L 、氨氮为 0.093 mg/L 、 UV_{254} 为 0.031 cm^{-1} 、 COD_{Mn} 为 1.52 mg/L 、pH 值为 7.51、菌落总数为 55 CFU/mL 。

1.2 试验方法

$NaClO$ 消毒:开启磁力搅拌器后,向装有 2 L 原水的反应器中加入有效氯含量为 1.17 mg/L (投氯量影响因素筛选所得) 的 $NaClO$ 溶液,定时取样后用硫代硫酸钠淬灭水中余氯,并测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs 和 CTC,随后水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA 和 TCAA。

O_3 消毒:开启磁力搅拌器后,向装有 2 L 原水的反应器中,以 0.5 L/min 流量连续通入 2 min 的 O_3 ,定时取样后用氮气淬灭水中剩余臭氧,并测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs 和 CTC,随后水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA 和 TCAA,尾气由 2% 碘化钾溶液吸收。

UV 消毒:开启磁力搅拌器后,向装有 2 L 原水的反应器中心垂直插入一根套有石英管、功率为 8 W 的 254 nm 紫外灯管,打开紫外灯定时取样测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs 和 CTC,随后水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA 和 TCAA。

组合消毒:① $NaClO/UV$ 消毒。开启磁力搅拌器后,向装有 2 L 原水的反应器中加入有效氯含量为 1.17 mg/L 的 $NaClO$ 溶液,同时打开 8 W 的 254 nm 紫外灯管,并保证水中各点紫外辐照均匀;定时取样后用硫代硫酸钠淬灭水中余氯,并测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs 和 CTC,随后水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA 和 TCAA。② O_3/UV 消毒。

开启磁力搅拌器后,向装有2 L原水的反应器中,以0.5 L/min流量连续通入2 min的 O_3 ,同时打开8 W的254 nm紫外灯管,并保证水中各点紫外辐照均匀;定时取样后用氮气淬灭水中剩余臭氧,并测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs和CTC,随后水样经0.45 μm 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA和TCAA,尾气由2%碘化钾溶液吸收。③ $O_3 + NaClO$ 消毒。开启磁力搅拌器后,向装有2 L原水的反应器中,以0.5 L/min流量连续通入2 min的 O_3 后停止通气,反应12 min后向反应器中加入有效氯含量为1.17 mg/L的NaClO溶液,反应持续至60 min;定时取样后分别用氮气和硫代硫酸钠淬灭水中剩余臭氧和余氯,并测定菌落总数、 UV_{254} 、THMs和CTC,随后水样经0.45 μm 滤膜过滤后测定甲醛、DCAA和TCAA,尾气由2%碘化钾溶液吸收。

1.3 分析方法

菌落总数的测定按照《生活饮用水标准检验方法 微生物指标》(GB/T 5750.12—2006); UV_{254} 的测定采用T6新世纪紫外可见分光光度计,以1 cm比色皿超纯水作为空白,同时测定溶液在254 nm和365 nm波长处的吸光度,利用其差值消除悬浮物对吸光度值测定的影响;THMs和CTC采用《水质 挥发性有机物的测定 顶空/气相色谱-质谱法》(HJ 810—2016)测定,分析仪器为GCMS-QP2010Ultra型气相色谱/质谱联用仪,前处理仪器为HS9000型静态/动态顶空一体机;甲醛采用4-氨基-3-联氨-5-巯基-1,2,4-三氮杂茂(AHMT)分光光度法测定;DCAA和TCAA均采用Dionex ICS-600型离子色谱进行测定,分析柱为IonPac AS19型(250 mm×4 mm),保护柱为IonPac AG19型(50 mm×4 mm),淋洗液为20 mmol/L氢氧化钾溶液,流速为1.0 mL/min,进样量为150 μL 。

2 结果与讨论

2.1 杀菌效果

试验结果表明,6种消毒工艺对水中细菌的灭杀效果均良好。向滤后水投加不同消毒剂反应60 min后,6种消毒工艺出水均未检出细菌,对细菌的灭杀率达到100%,微生物安全性均可得到保障。NaClO消毒产生的次氯酸可通过氧化作用破坏酶系统使细菌死亡,同时,次氯酸可分解生成具有极强氧化性的新生态氧 $[O]$,使菌体病毒发生蛋白质变性而致死^[6-7]。刘清华等^[8]指出NaClO消毒性能不

逊于液氯消毒,在细菌极多时也能满足出厂水的细菌指标要求。通过试验还发现,NaClO消毒工艺出水能够保持一定的余氯水平。 O_3 的强氧化性可导致微生物失活而达到消毒目的^[4]。紫外线能辐射损伤微生物、破坏核酸功能,但只能瞬时灭菌,无持续消毒能力^[9]。组合消毒工艺能有效控制出水菌落总数,确保饮用水微生物安全性。

2.2 对 UV_{254} 的去除效果

有机物指标可采用 UV_{254} 表示,6种消毒工艺对 UV_{254} 的去除情况如图1所示。可知,6种消毒工艺对 UV_{254} 的去除率排序为 $O_3 + NaClO > O_3/UV > O_3 > NaClO/UV > UV > NaClO$,且 UV_{254} 去除率随反应时间的延长呈递增趋势。

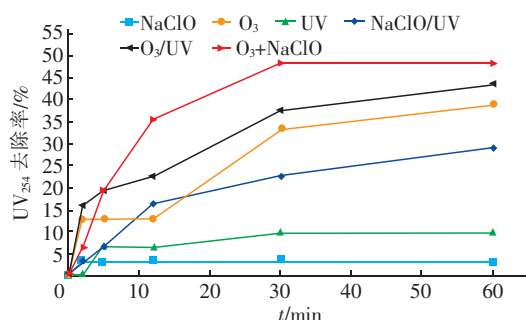


图1 不同消毒工艺对 UV_{254} 的去除效果

Fig. 1 UV_{254} removal by different disinfection processes

反应2 min,NaClO工艺对 UV_{254} 的去除率仅为3.2%,此后保持稳定,可见单独NaClO消毒对 UV_{254} 氧化效果不佳。许青等^[10]认为NaClO可将水中某些大分子有机物氧化为含 $C=C$ 、 $C=O$ 的芳香族化合物。邹辅国则认为氯氧化、加成、取代等作用使少量非腐殖质和富里酸等小分子有机物迅速反应生成新的芳香族和带双键的有机物^[11]。UV消毒对 UV_{254} 的去除率较单独NaClO消毒有增大趋势,这是由于腐殖质类大分子有机物及含 $C=C$ 、 $C=O$ 的芳香族有机物,对254 nm紫外线有强吸收而断链导致 UV_{254} 值降低^[11]。NaClO/UV组合工艺产生的 $HClO$ 、 ClO^- 等在紫外光作用下产生具有强氧化性作用的 $\cdot OH$ 、 $\cdot Cl$ 等自由基,可将水中持久性有机化合物氧化成小分子无机物质^[2,12],该协同作用的结果使其对 UV_{254} 的去除率显著高于单独NaClO消毒和单独UV消毒。 O_3/UV 组合工艺对 UV_{254} 的去除率比单独 O_3 工艺提高了4.8%,这主要是紫外照射增加了 O_3 利用率,并产生能加快有机物氧化的自由

基^[13]。 $O_3 + NaClO$ 组合工艺是去除 UV_{254} 的最佳工艺,去除率达到48.4%。有研究认为预臭氧化和预氯化均对 UV_{254} 有去除作用,但前者效果更好^[14]。预先采用 O_3 消毒12 min,可将水中大分子有机物降解成小分子有机物;随后采用 $NaClO$ 继续消毒60 min, $NaClO$ 在消毒过程中对小分子有机物的去除率优于对大分子有机物的去除率^[7]。

2.3 有机消毒副产物生成情况

2.3.1 THMs及CTC生成情况

试验还分析了6种消毒工艺处理滤后水过程中THMs(包括TCM、DBCM、DCBM、TBM)和CTC的生成情况。消毒过程中TCM的生成情况见图2。

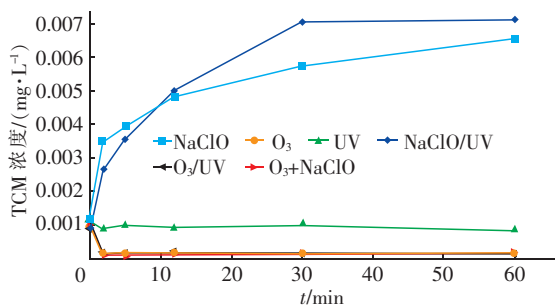


图2 不同消毒过程中TCM的生成情况

Fig. 2 TCM formation by different disinfection processes

由图2可知,对于 $NaClO$ 和 $NaClO/UV$ 消毒工艺来说,随着反应时间的增加,TCM生成量逐渐增加,而其他4种消毒工艺的TCM浓度呈下降趋势。以有效氯投加量为 1.17 mg/L 的条件为例, $NaClO/UV$ 、 $NaClO$ 、 UV 、 $O_3 + NaClO$ 、 O_3 和 O_3/UV 这6种工艺出水TCM生成总量分别为 0.00715 、 0.00655 、 0.00085 、 0.00015 、 0.00010 和 0.00010 mg/L 。由此可见,6种消毒工艺中 $NaClO/UV$ 工艺出水TCM生成量最高,是 O_3 、 O_3/UV 工艺出水TCM浓度的71.5倍,但仍远远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的浓度限值。朱欢欢等^[2]指出在 $NaClO$ 消毒基础上增加 UV 辐照虽可降低消毒剂用量,但在去除有机污染物时较易产生诸如卤代烷烃、溴酸盐等消毒副产物。含 $NaClO$ 的消毒工艺产生消毒副产物TCM的风险较大($O_3 + NaClO$ 工艺除外),而含 O_3 的消毒工艺对TCM有较好的控制作用, $O_3 + NaClO$ 、 O_3 和 O_3/UV 这3种工艺消毒60 min时TCM浓度比初始浓度分别下降84%、90%和92%。单独 UV 消毒过程的TCM下降趋势不显著。

$NaClO$ 消毒过程中DBCM生成量随反应时间的

延长而增加(见图3),该结果与李波等^[15]的研究结果一致。而 $NaClO/UV$ 消毒过程中DBCM生成量随反应时间的延长呈先增加后降低的趋势,这与 $NaClO/UV$ 消毒过程中TCM的变化趋势有所差别。 $NaClO/UV$ 工艺产生卤代烷烃的风险较大,反应12 min后DBCM浓度出现下降趋势,推测可能是因为紫外线加快了水中余氯的衰减,且紫外线的存在对DBCM有一定程度的降解。紫外线本身具有氧化作用,随着紫外线功率的增加,单位时间内DBCM接收的紫外线也增加,使得氧化降解速率增大^[16]。Cassan等^[17]认为 UV 辐射打开 $C-Br$ 键, $\cdot Cl$ 逐渐取代 $\cdot Br$,导致含溴原子多的产物生成量减少。反应60 min后, $NaClO$ 、 $NaClO/UV$ 、 O_3 、 UV 、 $O_3 + NaClO$ 和 O_3/UV 这6种工艺出水DBCM生成总量分别为 0.00045 、 0.00020 、 0.00005 、 0 和 0 mg/L 。由此可见, O_3 、 UV 、 $O_3 + NaClO$ 和 O_3/UV 这4种工艺能较有效控制出水DBCM的生成量。

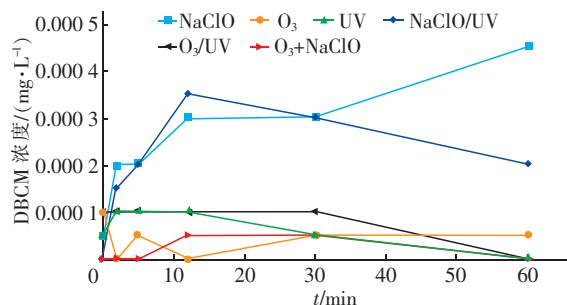


图3 不同消毒过程中DBCM的生成情况

Fig. 3 DBCM formation by different disinfection processes

不同消毒过程中DCBM与TCM的生成情况相似(见图4)。 $NaClO$ 消毒过程中DCBM生成量随反应时间的延长而增加,该结果与李波等^[15]的研究结果仍一致。而 $NaClO/UV$ 消毒过程中DCBM生成量随反应时间的延长呈先增加后降低的趋势,这与 $NaClO/UV$ 消毒过程中DBCM的变化趋势是一致的。 $NaClO/UV$ 工艺产生的卤代烷烃在30 min出现峰值,30 min后DCBM浓度出现下降趋势,推测可能是因为紫外线加快了水中余氯的衰减。反应60 min后, $NaClO/UV$ 、 $NaClO$ 、 UV 、 O_3 、 O_3/UV 和 $O_3 + NaClO$ 这6种工艺的出水DCBM生成总量分别为 0.00205 、 0.00170 、 0.00035 、 0.00010 、 0.00010 和 0 mg/L 。含 $NaClO$ 的消毒工艺产生消毒副产物DCBM的风险较大($O_3 + NaClO$ 工艺除外),而含 O_3 的消毒工艺对DCBM有较好的控制作用, $O_3 +$

NaClO、O₃ 和 O₃/UV 这 3 种工艺反应 60 min 时 DCBM 的浓度比初始浓度分别下降 100%、67% 和 75%。单独 UV 消毒过程的 DCBM 下降不明显。

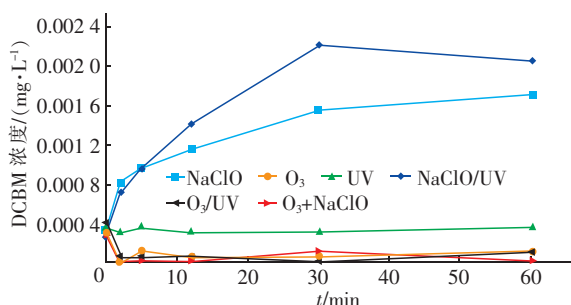


图4 不同消毒过程中 DCBM 的生成情况

Fig.4 DCBM formation by different disinfection processes

此外,NaClO/UV、NaClO、UV、O₃、O₃/UV 和 O₃ + NaClO 这 6 种工艺出水中 TBM 和 CTC 均未检出。综上,在本试验条件下,反应 60 min 时 NaClO 消毒过程 4 种 THMs 生成量关系为:TCM(0.006 55 mg/L) > DCBM(0.001 70 mg/L) > DBCM(0.000 45 mg/L) > TBM(未检出)。李波等^[15]指出溴与有机物的反应速度比氯与有机物的反应速度要快得多,而本试验结果与其相反。林韵等^[18]研究表明,对于含二氯以上 THMs(CHCl₃ + CHCl₂Br)的生成,影响较大的主要因素为溴离子、温度和反应时间,前者属负效应、后两者属正效应,因子交互作用以溴离子与反应时间最为明显。通常在高溴离子浓度下,无论加氯量高或低,生成的 2~3Br-THM 浓度均远高于 2~3Cl-THM 浓度;但当水中溴离子浓度较低时,在加氯量较高的条件下,生成的 2~3Cl-THM 浓度则远高于 2~3Br-THM 浓度。同时,溴离子浓度对 2~3Cl-THM 生成量的影响,在较长反应时间下比较短反应时间下要显著,在较长反应时间、低溴离子浓度下 2~3Cl-THM 的生成量会比 2~3Br-THM 的生成量更多。卢宁等^[19]认为,水中溶解杂质较多时,对氧化剂的瞬间消耗量大,使得次溴酸和次氯酸同有机物反应速率的差别无法完全体现。

同时还可得出,O₃、O₃ + NaClO 和 O₃/UV 这 3 种工艺能较有效地控制 THMs 与 CTC 的生成量。郑晓英等^[4]研究表明,在 NaClO 消毒前投加 O₃ 可使水中生成 THMs 的前体有机物被分解,导致 THMs 的生成量降低。

2.3.2 甲醛生成情况

6 种消毒工艺处理滤后水过程中甲醛的生成情

况见图 5。可知,3 种含 O₃ 的消毒工艺,消毒过程中甲醛生成量随反应时间的延长而增加,其余 3 种工艺消毒过程中均无甲醛检出。鲁金凤等^[20]指出天然有机物各组分经 O₃ 氧化后生成的醛、酮类产物中甲醛产率最大。3 种消毒工艺出水甲醛生成量高低依次为:O₃ > O₃/UV > O₃ + NaClO。相比于单独 O₃ 工艺,O₃/UV 工艺由于 O₃ 和水在紫外光激发下生成活性更高的·OH 可快速氧化水中甲醛,故 O₃/UV 工艺消毒过程中甲醛的生成量低于单独 O₃ 工艺。在臭氧工艺中,O₃ + NaClO 组合消毒工艺出水甲醛生成量最低,其控制甲醛生成的能力优于 O₃ 和 O₃/UV 工艺。这主要是由于 O₃ + NaClO 组合消毒工艺中臭氧投加时间仅 12 min,其臭氧投加量远低于 O₃ 和 O₃/UV 工艺(臭氧投加时间为 60 min)。O₃ + NaClO 组合消毒工艺出水甲醛浓度大于 NaClO、UV 和 NaClO/UV 这 3 种工艺的出水值,主要是因为有机物在 O₃ 作用下,不饱和化合物形成的臭氧化物经水解而导致不饱和键断裂,从而形成甲醛等较小的有机分子^[1]。但 O₃ + NaClO 组合消毒工艺出水甲醛浓度远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值。

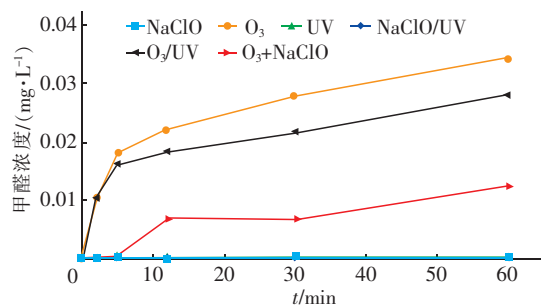


图5 不同消毒过程中甲醛的生成情况

Fig.5 Formaldehyde formation by different disinfection processes

2.3.3 DCAA 和 TCAA 生成情况

6 种工艺出水中 DCAA 和 TCAA 均未检出,即 6 种工艺消毒过程无 DCAA 和 TCAA 生成风险。

2.4 最佳消毒工艺比选

相比于单独消毒工艺(NaClO、O₃ 和 UV 工艺),组合工艺显示出巨大的研究和发展潜力。针对上述试验结果,对各工艺技术进行了综合比较:①6 种消毒工艺对水中细菌的灭杀效果均良好。②就降解 UV₂₅₄而言,O₃ + NaClO 组合工艺对 UV₂₅₄ 的去除率最高;传统 NaClO 消毒工艺对 UV₂₅₄ 的去除效果最

差,仅达到3.2%。由此可见,对于以氯消毒工艺为主的潮汕地区而言,在NaClO消毒之前增加预臭氧,可有效提高对有机物的去除效果。③NaClO/UV、NaClO/UV、O₃、O₃/UV和O₃+NaClO这6种工艺出水的消毒副产物总量均符合国标要求。但对于采用传统氯消毒工艺的潮汕地区而言,O₃/UV工艺的工程投资、运行费用和维护费用相对较高,持续消毒能力不太理想。考虑到现行韩江流域的原水水质较好,采用NaClO消毒工艺的土建、人工、设备投资费用与运行成本最低,建议在NaClO消毒之前增设预臭氧工艺以降低出水THMs、CTC、DCAA、TCAA和甲醛等消毒副产物的生成风险,并适应水质恶化的需求,保障居民用水安全。

3 结论

① NaClO、O₃、UV、NaClO/UV、O₃/UV和O₃+NaClO这6种消毒工艺对水中细菌的灭杀效果均良好;6种消毒工艺对UV₂₅₄的去除率高低依次为O₃+NaClO、O₃/UV、O₃、NaClO/UV、UV、NaClO。

② NaClO/UV、NaClO、UV、O₃、O₃/UV和O₃+NaClO这6种工艺出水的消毒副产物总量均符合我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。但对于采用传统氯消毒工艺的潮汕地区而言,建议在NaClO消毒之前增设预臭氧工艺以降低出水THMs、CTC、DCAA、TCAA和甲醛等消毒副产物的生成风险,同时提升消毒效果。

参考文献:

- [1] 李芳,陆少鸣. 不同的消毒方式对砂滤池出水消毒效果的影响[J]. 环境工程学报,2013,7(7):2414-2418.
Li Fang, Lu Shaoming. Influence of different disinfecting modes on disinfection efficiency of outlet water from sand filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(7): 2414-2418 (in Chinese).
- [2] 朱欢欢,孙韶华,冯桂学,等. 紫外联用高级氧化技术处理饮用水应用进展[J]. 水处理技术,2019,45(3):1-7,13.
Zhu Huanhuan, Sun Shaohua, Feng Guixue, et al. Research progress of the application of titanium salt in water treatment and its sludge recycling[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(3): 1-7, 13 (in Chinese).
- [3] 方自毅,张怡然,马文红,等. 不同消毒方式对引江原水中试处理效果的对比研究[J]. 天津科技,2017,44(7):100-103.
Fang Ziyi, Zhang Yiran, Ma Wenhong, et al. A Pilot-scale study on the effects of different disinfection methods of Yangtze river raw water[J]. Tianjin Science & Technology, 2017, 44(7): 100-103 (in Chinese).
- [4] 郑晓英,王靖宇,李魁晓,等. 次氯酸钠、臭氧及其组合再生水消毒技术研究[J]. 环境工程,2017,35(11):23-27.
Zheng Xiaoying, Wang Jingyu, Li Kuixiao, et al. Studies on reclaimed water disinfection using sodium hypochlorite, ozone and their combination techniques [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(11): 23-27 (in Chinese).
- [5] 罗凡,董滨,何群彪. 紫外线与消毒剂联合作用对黄浦江源水的研究[J]. 环境科学与技术,2011,34(6G):14-17,297.
Luo Fan, Dong Bin, He Qunbiao. Research on Huangpu river water by ultraviolet combined with disinfectant disinfections[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6G): 14-17, 297 (in Chinese).
- [6] 严熙世,范瑾初. 给水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
Yan Xushi, Fan Jinchu. Water Supply Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002 (in Chinese).
- [7] 程丽华,李璐瑶,毕学军,等. 次氯酸钠对二级出水的消毒效果及对水质的影响[J]. 中国给水排水,2013,29(21):104-106.
Cheng Lihua, Li Luyao, Bi Xuejun, et al. Disinfection effect of sodium hypochlorite on secondary effluent from WWTP and its impact on effluent quality [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 104-106 (in Chinese).
- [8] 刘清华,巢猛. 南方城市水厂次氯酸钠代替液氯和投碱工艺的可行性研究[J]. 给水排水,2015,41(12):26-29.
Liu Qinghua, Chao Meng. Feasibility study on sodium hypochlorite replacing liquid chlorine and alkali injection process in southern urban waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(12): 26-29 (in Chinese).
- [9] 邹启贤. 滨河污水处理厂出水氯与紫外消毒对比试验研究[J]. 环境工程,2011,29(3):48-52.
Zou Qixian. Pilot study of the chlorine and ultraviolet disinfection of secondary effluent from Binhe WWTP

- [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(3): 48 – 52 (in Chinese).
- [10] 许青,赵建树,范爱丽,等. 次氯酸钠、二氧化氯处理水厂排泥水试验研究[J]. 供水技术, 2010, 4(6): 31 – 34.
- Xu Qing, Zhao Jianshu, Fan Aili, *et al.* Laboratory test on treatment of sludge water in waterworks by sodium hypochlorite and chlorine dioxide [J]. Water Technology, 2010, 4(6): 31 – 34 (in Chinese).
- [11] 邹辅国. 给水厂不同消毒工艺对比中试研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- Zou Fuguo. Pilot Research on the Different Disinfection for Municipal Water Treatment Plant [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009 (in Chinese).
- [12] Gao Z C, Lin Y L, Xu B, *et al.* Degradation of acrylamide by the UV/chlorine advanced oxidation process[J]. Chemosphere, 2017, 187: 268 – 276.
- [13] 李来胜,祝万鹏,张彭义,等. UV/O₃ – BAC与O₃ – BAC处理二级出水中有机污染物的研究[J]. 水处理技术, 2008, 34(1): 22 – 25, 58.
- Li Laisheng, Zhu Wanpeng, Zhang Pengyi, *et al.* Comparison between UV/O₃ – BAC and O₃ – BAC for treatment of organic pollutants in the effluent from sewage treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(1): 22 – 25, 58 (in Chinese).
- [14] 李秋霞,孙宏伟,赖能成,等. 预氯化去除饮用水水源中高浓度氨氮等污染因子的应急处理研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(3): 99 – 103.
- Li Qiuxia, Sun Hongwei, Lai Nengcheng, *et al.* Counter-emergency removing pollutants at high concentration of water source of drinking water by pre-chlorination technology[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(3): 99 – 103 (in Chinese).
- [15] 李波,曲久辉,刘会娟,等. 含溴离子水氯化过程中消毒副产物生成和分配研究[J]. 科学通报, 2007, 52(17): 2071 – 2076.
- Li Bo, Qu Jiuhui, Liu Huijuan, *et al.* Study on the formation and distribution of disinfection by-products in chlorination of water containing bromine ion [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(17): 2071 – 2076 (in Chinese).
- [16] 员建,夏佰钦,罗小平,等. 紫外光/H₂O₂对氯化消毒副产物三溴甲烷、二溴一氯甲烷的去除效果[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(9): 965 – 969.
- Yuan Jian, Xia Baiqin, Luo Xiaoping, *et al.* Removal effect of UV/H₂O₂ on chlorination disinfection by-products tribromomethane and dibromochloromethane [J]. Environmental Pollution and Control, 2018, 40(9): 965 – 969 (in Chinese).
- [17] Cassan D, Mercier B, Castex F, *et al.* Effects of medium-pressure UV lamps radiation on water quality in a chlorinated indoor swimming pool [J]. Chemosphere, 2006, 62(9): 1507 – 1513.
- [18] 林韵,叶沛茵,涂常青,等. 天然有机物氯消毒副产物的生成及影响因素研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 49 – 54.
- Lin Yun, Ye Peiyin, Tu Changqing, *et al.* Formation and its influence factors of chlorine disinfection by-product [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 49 – 54 (in Chinese).
- [19] 卢宁,段湘林,黄鑫,等. 天然有机物对黄浦江原水中次溴酸稳定性的影响[J]. 净水技术, 2012, 31(2): 19 – 23.
- Lu Ning, Duan Xianglin, Huang Xin, *et al.* Effect of natural organic matters on stability of hypobromous acid in Huangpu river raw water [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(2): 19 – 23 (in Chinese).
- [20] 鲁金凤,张涛,马军,等. 滤后水中 NOM 经臭氧氧化产生的小分子醛、酮和酮酸[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1268 – 1273.
- Lu Jinfeng, Zhang Tao, Ma Jun, *et al.* Aldehydes, ketones, and ketoacids produced during ozonation of NOM fractions isolated from filtrated water [J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1268 – 1273 (in Chinese).



作者简介: 吴悦(1989 –), 女, 广东汕头人, 工学硕士, 研究方向为给水净化与水污染控制。

E-mail: 5.yue@163.com

收稿日期: 2019 – 11 – 12