

# 基于常规饮用水工艺羟基自由基处理高藻水

白敏冬<sup>1,\*</sup>, 李海燕<sup>1</sup>, 满化林<sup>1</sup>, 黄孟斌<sup>1</sup>, 郑武<sup>1</sup>, 田一平<sup>2</sup>, 张芝涛<sup>2</sup>

1. 厦门大学环境与生态学院, 海洋生物资源开发利用协同创新中心, 厦门 361102  
2. 大连海事大学环境工程研究所, 大连 116026

**摘要** 我国水体的富营养化日益严重, 水源地出现季节性藻类爆发现象, 严重威胁饮用水安全。以厦门市莲坂水厂各工艺段出水为研究对象, 采用大气压强电离放电产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ), 分别对水源水、混凝沉淀出水、砂滤出水进行处理, 处理时间为4.5 s。当注入总氧化剂浓度为 $1.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 高藻浓度从 $25.3\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 降到 $800\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ;对混凝沉淀出水注入总氧化剂 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、砂滤出水注入 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞都未检出; $\cdot\text{OH}$ 处理后 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TOC及 $\text{UV}_{254}$ 均有明显降低, 砂滤出水三卤甲烷小于 $8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;检测的各项指标均达到国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5479-2006)。因此, $\cdot\text{OH}$ 可快速有效安全地杀灭高藻, 为我国高藻水源地饮用水卫生安全保障提供技术支撑。

**关键词** 羟基自由基;高藻水;消毒副产物

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)09-4897-06 DOI 10.12030/j.cjee.201611225

## Treatment of algae bloom water using $\cdot\text{OH}$ based on conventional drinking water process

BAI Mindong<sup>1,\*</sup>, LI Haiyan<sup>1</sup>, MAN Hualin<sup>1</sup>, HUANG Mengbin<sup>1</sup>, ZHENG Wu<sup>1</sup>, TIAN Yiping<sup>2</sup>, ZHANG Zhitao<sup>2</sup>

1. Collaborative Innovation Center for Exploitation and Utilization of Marine Biological Resources, College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China  
2. Environmental Engineering Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

**Abstract** Due to the increasing eutrophication in China, harmful algae blooms often occur in water body periodically, which poses serious threats to drinking water safety. Using a strong ionization discharge technology at atmosphere pressure,  $\cdot\text{OH}$  was used to remove algae bloom. Other conventional process such as coagulation, sedimentation and sand filtration were applied respectively in the Lianban Water Plant in Xiamen (China). The total reaction time required in the three water processes was only 4.5 s. When the total reactive oxidant (TRO) concentration injected to algae bloom water was  $1.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , the algae content was decreased by  $\cdot\text{OH}$  from  $25.3\times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  to  $800\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ . When the TRO that was injected into coagulation, sedimentation and sand filtration water achieved  $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively, the algae contents were not detected (ND) in treated effluents. At the same time, water quality in  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , TOC and  $\text{UV}_{254}$  were decreased and the disinfection by-products (DBPs) such as, trihalomethanes (THMs) concentration was lower than  $8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  in treated effluents. The treated effluent, resulting from this technology, met the requirement of the National Drinking Water Standards (GB 5479-2006). Therefore,  $\cdot\text{OH}$  was effective and safe to remove freshwater algae without further treatment being required.

**Key words** hydroxyl radicals; algae bloom water; disinfection by-products

湖泊水与河流库区水约占我国饮用水水源的25%。近年来,水体富营养化现象日益严峻,高藻的爆发频率明显上升,水中藻浓度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、氮磷值高,甚至超过地表水III类标准。高藻爆发时,常规混凝沉淀-砂滤-氯消毒的饮用水处理工艺除藻效果受限,仍有大量藻细胞穿透砂滤池进入供水管网。并且在加

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC06B01, 2013BAC06B02); 国家重大科研仪器研制项目(61427804); 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2015RA4008)

收稿日期: 2016-11-30; 录用日期: 2017-01-17

第一作者: 白敏冬(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 高级氧化技术。E-mail: mindong-bai@163.com

\* 通信作者



分别在3、4 取样点取样。检测1~4 取样点所取水样的藻类和相关水质指标。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 $\cdot\text{OH}$ 及总氧化剂 TRO 的检测

$\cdot\text{OH}$  采用4-羟基苯甲酸(4-HBA)作为捕捉剂,液相色谱二极管阵列检测器进行检测,具体参考资料中的方法<sup>[6]</sup>。

总氧化剂 TRO 以  $\cdot\text{OH}$  为主,包括  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{HO}_2^-$ 、 $\text{O}_2^-$ 、 $\text{O}_3^-$ 、 $\cdot\text{HO}_3$  和  $\text{O}_2^+\text{H}_2\text{O}$  等氧自由基的总氧化剂浓度,采用余氯分析仪(哈希 CL17,美国)在线监测,并依据 USEPA 330.5 标准(CAS No. 7782-50-5)<sup>[8]</sup>,采用 N,N-二乙基对苯二胺分光光度法(Bioquest CE2501,英国)校正 TRO 浓度(以  $\text{Cl}_2$  计)。

#### 1.3.2 藻细胞活性的分析

染色剂为 SYTOX<sup>®</sup> Green(Life Technologies,美国)核酸染色剂,当藻细胞受损死亡,核酸染色剂进入细胞跟 DNA 结合,在 488 nm 蓝激发光激发下,呈现绿色荧光;活细胞呈现叶绿素的自体红色荧光<sup>[8]</sup>。采用徕卡 DM6000B 全自动荧光显微镜,放大 400 倍,在自然光下找到藻细胞,分别在绿色激发光和蓝色激发光下观察判别死活、计数,以 100 格为一个计数单位,按 1 mL 记录。

#### 1.3.3 水质指标的检测

水质指标检测由便携式 pH 计(METTLER TOLEDO SG2,美国)、便携式浊度仪(HACHI 1900C,美国)、便携式溶解氧(DO)检测仪(WTW IDS310,德国)、紫外可见分光光度计(Cecil-2501,英国)测定  $\text{UV}_{254}$ 、总有机碳 TOC 分析仪(SHIMADZU TOC-L<sub>CPH</sub>,日本)。

#### 1.3.4 消毒副产物指标的检测

硝酸盐由离子色谱(Thermo Fisher Scientific ICS-2100,美国)测定,三卤甲烷(THMs)采用气相色谱(Agilent Technologies 7890B,美国)测定,主要测定参数:分流比为 1:2,进样口温度和检测器温度分别为 200 °C 和 290 °C,柱型是 HP-5 MS,载气为氮气,流速控制在  $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,升温程序为 35 °C 保持 9 min;  $2\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 40 °C;  $20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 80 °C;  $40\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温至 160 °C 保持 4 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\cdot\text{OH}$ 处理饮用水工艺中高藻水的效果

原水中的总藻浓度为  $25.3 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,主要有伪鱼腥藻、棒胶藻和弯形小尖头藻,其中伪鱼腥藻是优势藻种,藻密度为  $20.2 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。基于常规饮用水处理工艺,  $\cdot\text{OH}$  杀灭高藻的效果如表 1 所示,将 TRO 浓度为  $1.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  溶液注入到原水中,高藻浓度由  $25.3 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$  降到  $800\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,致死率高达 99.7%,该藻浓度并不会影响后续处理工艺;经混凝沉淀处理后,高藻浓度降为  $2.1 \times 10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,注入 TRO 为  $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,处理后未检出活藻细胞;处理砂滤出水,总氧化剂 TRO 为  $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,杀灭砂滤出水中的病原微生物。

表 1  $\cdot\text{OH}$  杀灭高藻的效果  
Table 1 Effect of algae inactivation using  $\cdot\text{OH}$

检测项目	原水处理		混凝沉淀出水处理		砂滤出水处理	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水
TRO/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	—	1.8	—	0.6	—	0.2
总藻/( $10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	25.3	0.08	2.1	ND	ND	ND
伪鱼腥藻/( $10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	20.2	0.08	1.5	ND	ND	ND
弯形小尖头藻/( $10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	1.3	ND	0.1	ND	ND	ND
棒胶藻/( $10^4\text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ )	3.8	ND	0.5	ND	ND	ND

注:ND 表示未检出。

## 2.2 $\cdot\text{OH}$ 杀灭高藻的阈值 $CT$

高藻水中伪鱼腥藻、棒胶藻和弯形小尖头藻死亡的判定和计数,采用 SYTOX<sup>®</sup> Green 荧光染色法, $\cdot\text{OH}$  处理前后的染色照片如图 2 所示。在全自动荧光显微镜下观察,原水中 3 种藻均呈现叶绿素的自体红色荧光,表明藻细胞都是活的。 $\cdot\text{OH}$  处理后,3 种藻在 488 nm 蓝色激光条件下发出鲜明的绿色荧光,表明藻细胞已死亡。因为  $\cdot\text{OH}$  作用改变藻细胞膜的通透性,可使大分子 SYTOX-Green 核酸染料进入到细胞与 DNA 结合的结果。

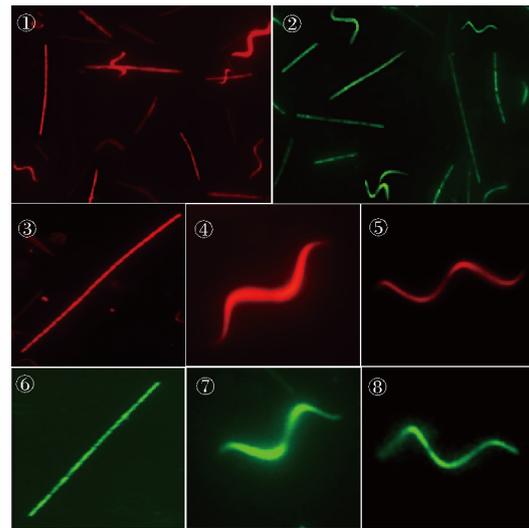
$\cdot\text{OH}$  杀灭混凝沉淀出水中总藻的致死  $CT$  值 ( $C$  为 TRO 浓度,以  $\text{Cl}_2$  计, $T$  为接触时间)-细胞存活率的  $\lg$  值关系曲线如图 3 所示。水中总藻浓度为  $25.3 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ , $\cdot\text{OH}$  杀灭高藻的时间为 4.5 s。随着  $CT$  值上升,藻细胞存活率呈直线下降趋势。当  $\cdot\text{OH}$  杀灭总藻的致死  $CT$  值为  $0.045 \text{ mg} \cdot \text{min} \cdot \text{L}^{-1}$  检出活细胞数量小于  $10 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

CORAL 等<sup>[3]</sup>采用  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  臭氧杀灭铜绿微囊藻和水华鱼腥藻,时间为 30 s,致死  $CT$  值为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{min} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是我们  $\cdot\text{OH}$  法的 4.4 倍。DALY 等<sup>[9]</sup>利用氯气杀灭铜绿微囊藻,氯气浓度为  $12.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,杀灭时间为 30 min,致死  $CT$  值为  $14.1 \text{ mg} \cdot \text{min} \cdot \text{L}^{-1}$ ,是  $\cdot\text{OH}$  法的 313.3 倍。ZAMYADI 等<sup>[10]</sup>用配制的氯溶液杀灭蓝藻,当  $CT$  值为  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{min} \cdot \text{L}^{-1}$  时,60% 蓝藻失活并裂解释放藻毒素。这是因为  $\cdot\text{OH}$  具有极强的氧化性 ( $E_0 = 2.80 \text{ V}$ ) 和高化学反应速率常数  $10^9 \text{ mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{s})^{-1}$ ,可在低  $CT$  值条件下杀灭高浓度藻细胞。

## 2.3 $\cdot\text{OH}$ 对高藻水水质的改善

$\cdot\text{OH}$  处理原水、混凝沉淀出水、砂滤出水的水质指标如表 2 所示。经  $\cdot\text{OH}$  处理后,原水、混凝沉淀出水、砂滤出水的浊度、亚硝酸盐氮和色度都有一定程度的降低,水质明显改善。处理过程中, $\cdot\text{OH}$  等氧自由基分解生成氧气,溶于水中使溶解氧 DO 含量明显增加; $\cdot\text{OH}$  作用于水体中的蛋白质和氨基酸等有机氮化合物,使氨氮浓度升高<sup>[11]</sup>。因此,利用  $\cdot\text{OH}$  处理高藻水,砂滤出水后的各项指标达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 标准。

$\cdot\text{OH}$  处理前后  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TOC 和  $\text{UV}_{254}$  的变化如图 4 所示, $\text{UV}_{254}$  表征 TOC、AOC、三卤甲烷的前体物等的替代参数。A 流程  $\cdot\text{OH}$  处理原水,注入 TRO 浓度为  $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TOC 分别降低 27.81%、28.75% 表明水中有机物被氧化降解,有机物总量下降; $\text{UV}_{254}$  降低了 40%,表明水中总有机碳、生物可同化有机碳以及三卤甲烷前体物被有效地氧化降解。B 流程  $\cdot\text{OH}$  处理混凝沉淀出水,注入 TRO 浓度为  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TOC 和  $\text{UV}_{254}$  分别降至  $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.021 \text{ cm}^{-1}$ 。C 流程  $\cdot\text{OH}$  处理砂滤出水,注入 TRO 浓度为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TOC 和  $\text{UV}_{254}$  分别降至  $1.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.020 \text{ cm}^{-1}$ 。EDZWALD 等<sup>[12]</sup>指出  $\text{UV}_{254}$  与三卤甲烷前驱物 (THMFP) 之间存在密切相关性。因此,采用  $\cdot\text{OH}$  处理高藻水时,有效氧化降解有机物,同时降低生成三卤甲烷等消毒副产物的风险。



① 对照混藻叶绿素自体荧光照片;②  $\cdot\text{OH}$  处理混藻 SYTOX-Green 染色照片;③④⑤ 依次为伪鱼腥藻、棒胶藻和弯形小尖头藻的叶绿素自体荧光照片;⑥⑦⑧ 依次为伪鱼腥藻、棒胶藻和弯形小尖头藻的 SYTOX-Green 染色照片。

图 2 藻细胞荧光染色照片

Fig. 2 Fluorescence microscope photos of algae

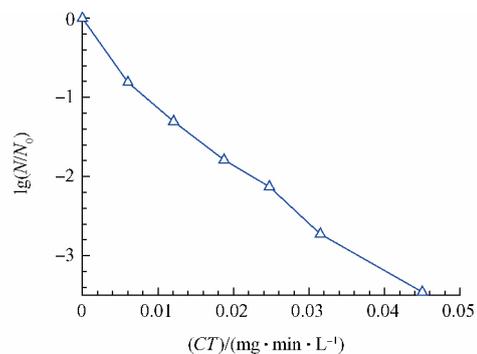


图 3  $\cdot\text{OH}$  杀灭总藻的  $CT$  值

Fig. 3  $CT$  values of  $\cdot\text{OH}$  inactivation of total algae

表 2 ·OH 处理前后水质的变化  
Table 2 Changes of water quality before and after ·OH treatments

检测项目	原水处理		混凝沉淀出水处理		砂滤出水处理		GB 5749-2006
	前	后	前	后	前	后	
TRO/(mg·L <sup>-1</sup> )	—	1.8	—	0.6	—	0.2	—
pH	8.51	8.47	7.46	7.60	7.42	7.47	6.5~8.5
温度/℃	24.60	25.90	24.50	24.80	24.40	25.10	—
溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.88	11.02	8.15	10.51	7.86	9.36	—
浊度/NTU	15.70	8.72	2.20	1.71	0.70	0.64	1.0
色度/度	6.64	4.55	3.50	2.45	3.50	1.93	15
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.15	0.26	0.08	0.15	0.08	0.09	0.5
COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	3.92	2.83	2.46	2.25	1.29	1.21	3.0
TOC/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.93	2.80	3.07	2.48	1.52	1.45	5.0
UV <sub>254</sub> /cm <sup>-1</sup>	0.045	0.027	0.031	0.021	0.025	0.020	—
亚硝酸盐氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.019	0.001	0.017	0.001	0.004	0.001	1.0
总菌落数/(cfu·mL <sup>-1</sup> )	6 400	360	3 700	ND	580	ND	≤100

注:ND 表示未检出。

## 2.4 消毒副产物 THMs 的生成情况

近年来,饮用水中消毒副产物得到越来越多的学者关注。·OH 处理高藻水,对消毒副产物三氯甲烷(TCM)、二氯一溴甲烷(BDCM)、一氯二溴甲烷(DBCM)和三溴甲烷(TBM)进行了检测,其结果如图 5 所示。·OH 处理原水,THMs 生成量增加,总值小于 18 μg·L<sup>-1</sup>;·OH 处理混凝沉淀出水和砂滤出水,THMs 略有上升,总值小于 8 μg·L<sup>-1</sup>。·OH 处理后,原水中生成的 THMs 总量明显高于混凝沉淀出水和砂滤出水,这是由于原水中天然有机物浓度高,组分复杂,经混凝沉淀后,大量有机物被絮凝去除,水中 THMs 的前驱体有机物组分显著降低。

ZAMYADI 等<sup>[10]</sup>用氯气处理库区水,1 h 后生成 THMs 近 22 μg·L<sup>-1</sup>。NEALE 等<sup>[13]</sup>采用 3.5 mg·L<sup>-1</sup>次氯酸盐处理湖水,总余氯维持在 2.5 mg·L<sup>-1</sup>,处理数小时后,生成 THMs 为 111.8 μg·L<sup>-1</sup>。张锁娜等<sup>[14]</sup>利用臭氧曝气处理 6 min,投加氯气经过 10 h 处理水厂砂滤出水,测得水中 THMs 含量近 90 μg·L<sup>-1</sup>。相比于·OH 处理高藻水,无需加入氯及其氧化物,即可有效控制 THMs 消毒副产物生成。因此,·OH 处理高藻水生成的 THMs 量少,与氯气、臭氧相比具有极大的优势。

## 2.5 ·OH 处理高藻水的能耗

基于常规饮用水处理工艺,采用·OH 处理高藻水的能耗为 0.02 kWh·m<sup>-3</sup>,以 1.00 元·(kWh)<sup>-1</sup>计算,处理每吨饮用水增加成本仅 0.02 元。HUANG 等<sup>[15]</sup>利用活性炭/高锰酸钾强化混凝-膜过滤工艺处理高藻水,处理每吨水的能耗为 0.071 kWh·m<sup>-3</sup>,成本为 0.49~0.91 元·m<sup>-3</sup>;GAO 等<sup>[16]</sup>采用电絮凝电

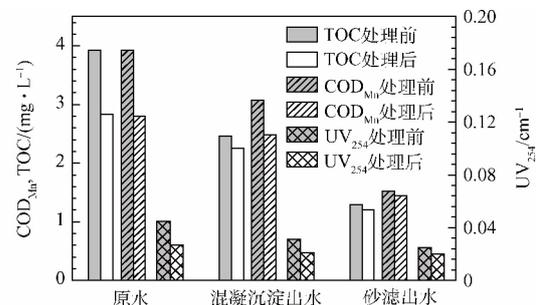


图 4 ·OH 处理前后 COD<sub>Mn</sub>、TOC 和 UV<sub>254</sub> 的变化

Fig. 4 Change of COD<sub>Mn</sub>, TOC and UV<sub>254</sub> before and after ·OH treatments

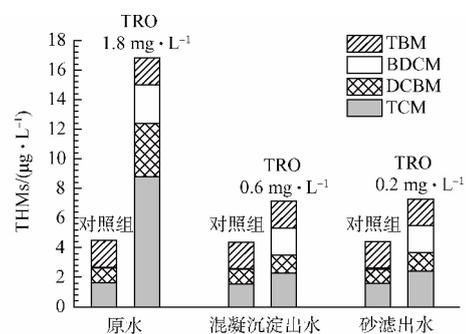


图 5 ·OH 处理后 THMs 的变化

Fig. 5 Change of THMs before and after ·OH treatments

气浮工艺处理高藻水,完全去除藻细胞时能耗为  $0.29 \sim 0.60 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ ,成本为  $0.29 \sim 0.60 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ ,增加运行成本太高,饮用水厂难以承受。因此,结合常规饮用水处理工艺的 $\cdot\text{OH}$ 处理高藻水技术,经济性强,具有工程实用意义。

### 3 结论

1)  $\cdot\text{OH}$ 可高效快速杀灭水中的藻类。经 $\cdot\text{OH}$ 处理后,原水中藻浓度由  $25.3 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 降至  $800 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,混凝沉淀出水中藻浓度由  $2.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 降至未检出,反应时间仅为  $4.5 \text{ s}$ ,可保证常规饮用水工艺的后续处理,防止藻细胞进入城市供水管网。

2)  $\cdot\text{OH}$ 处理后水质得到改善。原水、混凝沉淀出水、砂滤出水的 TOC 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量均降至  $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,  $\text{UV}_{254}$ 降至  $0.020 \text{ cm}^{-1}$ 。

3) 控制 THMs 生成。 $\cdot\text{OH}$ 处理后 THMs 生成量在  $8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之内,远低于国家标准,保证饮用水安全。

4) 综上所述, $\cdot\text{OH}$ 可高效快速、安全、经济处理高藻水,处理后的各项指标达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)标准,为我国高藻水源地饮用水卫生安全保障提供重要的技术支撑。

### 参考文献

- [1] ZAMYADI A, FAN Y, DALY R, et al. Chlorination of *Microcystis aeruginosa*: Toxin release and oxidation, cellular chlorine demand and disinfection by-products formation [J]. *Water Research*, 2013, 47(3): 1080-1090
- [2] ZHANG R, YUAN D X, LIU B M. Kinetics and products of ozonation of CI Reactive Red 195 in a semi-batch reactor [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2015, 26(1): 93-99
- [3] CORAL L A, ZAMYADI A, BARBEAU B, et al. Oxidation of *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena flos-aquae* by ozone: Impacts on cell integrity and chlorination by-product formation [J]. *Water Research*, 2013, 47(9): 2983-2994
- [4] 顾雨辰, 张光生, 郝小龙, 等. 高压脉冲气液混合放电等离子体对铜绿微囊藻的灭活研究 [J]. *上海环境科学*, 2013, 32(6): 257-263
- [5] 洪伟辰, 白敏冬, 满化林, 等. 气浮- $\cdot\text{OH}$ 强氧化组合工艺处理高藻水研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3634-3639
- [6] BAI M D, ZHENG Q L, TIAN Y P, et al. Inactivation of invasive marine species in the process of conveying ballast water using  $\cdot\text{OH}$  based on a strong ionization discharge [J]. *Water Research*, 2016, 96: 217-224
- [7] BAI M D, ZHANG Z T, ZHANG N H, et al. Treatment of  $250 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  ballast water in oceanic ships using  $\cdot\text{OH}$  radicals based on strong electric-field discharge [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2012, 32(4): 693-702
- [8] FAN J J, HO L, HOBOSON P, et al. Evaluating the effectiveness of copper sulphate, chlorine, potassium permanganate, hydrogen peroxide and ozone on cyanobacterial cell integrity [J]. *Water Research*, 2013, 47(14): 5153-5164
- [9] DALY R I, HO L, BROOKES J D. Effect of chlorination on *Microcystis aeruginosa* cell integrity and subsequent microcystin release and degradation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12): 4447-4453
- [10] ZAMYADI A, HO L, NEWCOMBE G, et al. Fate of toxic cyanobacterial cells and disinfection by-products formation after chlorination [J]. *Water Research*, 2012, 46(5): 1524-1535
- [11] 关春雨, 马军, 鲍晓丽, 等. 臭氧催化氧化-活性炭处理微污染源水 [J]. *水处理技术*, 2007, 33(11): 75-78
- [12] EDZWALD J K. Coagulation in drinking water treatment: Particles, organics and coagulants [J]. *Water Science & Technology*, 1993, 27(11): 21-35
- [13] NEALE P A, ANTONY A, BARTKOW M E, et al. Bioanalytical assessment of the formation of disinfection byproducts in a drinking water treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(18): 10317-10325
- [14] 张锁娜, 王海波, 李肖肖, 等. 臭氧对饮用水中氯化消毒副产物生成的影响 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4091-4096
- [15] HUANG W W, CHU H Q, DONG B Z, et al. A membrane combined process to cope with algae blooms in water [J]. *Desalination*, 2014, 355: 99-109
- [16] GAO S S, YANG J X, TIAN J Y, et al. Electro-coagulation-flotation process for algae removal [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177(1/2/3): 336-343