

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0079

朱宸, 丁凯耘, 丛海兵, 等. 2015. 水质安全的动态超声波强化混凝除藻水处理试验研究[J]. 环境科学学报, 35(8): 2429-2434

Zhu C, Ding K Y, Cong H B, et al. 2015. Experimental study on the safe removal of cyanobacteria with dynamic ultrasound enhanced coagulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(8): 2429-2434

水质安全的动态超声波强化混凝除藻水处理试验研究

朱宸, 丁凯耘, 丛海兵*, 倪金春, 王铭兆, 王强

扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127

收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-02-16 录用日期: 2015-02-27

摘要: 超声波辐射能够破坏蓝藻气囊, 在水处理工艺中达到强化蓝藻混凝沉淀的效果。然而不适当的超声处理会进一步破坏蓝藻细胞, 导致胞内毒素大量释放, 加重水质污染负荷。本研究为获得水质安全的超声波强化混凝沉淀蓝藻水处理方法, 采用频率 40~120 kHz 的超声波辐射蓝藻水, 考察处理后蓝藻混凝沉淀去除效果及藻毒素释放情况。结果表明, 频率 68~120 kHz、能量密度 59.1~186.4 W·L⁻¹ 的静态超声波作用 10~15 s 后进行混凝沉淀, 藻类去除率达 98% 以上, 且频率越高效果越好; 然而各频率静态超声波作用 5 s 以上均会导致藻细胞内藻毒素释放。采用内衬吸声棉及动态超声方式, 频率 120 kHz、能量密度 38.5~196.6 W·L⁻¹ 超声波作用 7.5~30 s 后, 可避免胞内藻毒素释放, 且能去除水中溶解性藻毒素 18.7%~30.7%, 混凝沉淀后藻类去除率 97.0% 以上, 其它有机物也降低。

关键词: 蓝藻; 超声波; 混凝沉淀; 藻毒素

文章编号: 0253-2468(2015)08-2429-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

Experimental study on the safe removal of cyanobacteria with dynamic ultrasound enhanced coagulation

ZHU Chen, DING Kaiyun, CONG Haibing*, NI Jinchun, WANG Mingzhao, WANG Qiang

School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127

Received 26 December 2014; received in revised form 16 February 2015; accepted 27 February 2015

Abstract: Ultrasonic radiation can damage the cyanobacterial vesicles and enhance the coagulation and sedimentation of cyanobacteria in water treatment processes. However, improper sonication would further damage cyanobacterial cells, leading to the release of intracellular toxins and increase of water contamination. In order to get a safe ultrasonic method, both the removal of cyanobacteria and release of microcystins were evaluated for the cyanobacteria-containing water, which was treated by ultrasound combined with coagulation and sedimentation. Results showed that the removal efficiency of cyanobacterial cells was more than 98% after treated by static ultrasound in the frequency range 68~120 kHz and energy density 59.4~186.4 W·L⁻¹ for 10~15 s, combined with the following coagulation and sedimentation. And the higher the ultrasonic frequency, the higher the removal efficiency. However, static ultrasonic irradiation for more than 5 s in each studied frequency will result in the release of intracellular microcystins. Conversely, after fixed with sound-absorbing cotton in dynamic ultrasonic device, the release of intracellular microcystins could be avoided and 18.7%~30.7% dissolved microcystins could be removed after treated by ultrasound with the frequency of 120 kHz and energy density of 59.4~196.6 W·L⁻¹ for 7.5~30.0 s followed by coagulation and sedimentation. Besides, the removal efficiency of cyanobacterial cells was more than 97% and other organic compounds were also reduced.

Keywords: Cyanobacteria; ultrasound; coagulation and sedimentation; microcystin

1 引言 (Introduction)

蓝藻细胞内存在气囊, 为藻类提供浮力, 使其漂浮于水面, 获得更多的生长繁殖机会 (胡鸿钧,

2011)。由于气囊浮力作用, 蓝藻不易在水厂中被混凝沉淀工艺去除, 给水处理带来了很大难度, 增加处理成本 (梁恒等, 2005)。蓝藻细胞内存在大量的有机物和藻毒素等有害物质, 一旦藻细胞破裂, 有机

基金项目: 江苏省大学生实践创新训练计划项目 (No.201411117045Z); 江苏省科技支撑计划项目 (No.BE2014681); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

Supported by the Jiangsu Province College Students' Innovative Experimental Program (No.201411117045Z); JiangSu province Key Technology R&D Program (No. BE2014681) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

作者简介: 朱宸 (1994—), 女, E-mail: 974568791@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: chb9903@126.com

Biography: ZHU Chen (1994—), female, E-mail: 974568791@qq.com; * Corresponding author, E-mail: chb9903@126.com

物和藻毒素将会大量释放到水中,威胁供水安全(刘成等,2006;黎雷等,2008).为了提高蓝藻去除效果,目前水厂中常采用预氧化强化混凝沉淀或气浮工艺(胡澄澄等,2010),但预氧化剂会使藻细胞壁破裂,藻细胞内有机物、藻毒素、臭味物质等泄漏到水中(董敏殷,2009).预氧化剂还会与水中有机物反应生成新的有害物质(郭婷婷,2012;方晶云等,2006).

超声波是指频率在 20 kHz 以上的振动波,超声波在水中传播时对人体质点产生伸张和压缩作用,形成正负压交替作用,导致水体质点汽化成空泡并快速破裂,空化泡破裂时产生冲击波、高温高压、射流等作用.在水处理及水污染控制领域,超声波可用于降解有机物(韩冰和赵保卫,2007),破坏藻细胞(邵明飞等,2013)、抑制藻类活性和生长(邵路路等,2012;储昭升等,2008),破坏蓝藻气囊、促进藻类沉淀(Liang *et al.*, 2009).目前的研究显示,超声波对蓝藻水处理具有正反两方面的作用,一方面能使蓝藻气囊破裂,失去浮力而下沉(Zhang *et al.*, 2009),另一方面能破坏藻细胞壁,导致胞内藻毒素和有机物释放到水中(乔俊莲等,2009;董敏殷等,2008),污染水质.考虑到饮用水安全性,目前超声波还不能用于饮用水处理.笔者以为,气囊壁比蓝藻细胞壁薄(Bowen and Jensen, 1965),两者存在结构强度上的差异,如果能找到一个超声波频率或强度区间,其破坏力介于气囊壁和藻细胞壁之间,就只会使气囊壁破裂而细胞壁不破裂.但目前的研究还很不系统,往往局限于单个频率的静态超声实验(李芸,2011),缺乏多频率、多强度、多时间的比较,也没有接近工程实际的动态超声波实验研究.因此,本文试图从较大范围的超声波区间去寻找安全的蓝藻超声区间,既取得较好的蓝藻去除效果,又保障供水安全性.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 实验装置

(1) 静态超声波装置

自制静态超声波装置,包括不锈钢水槽、振动子和电源,水槽长 26 cm、宽 21 cm、深 20 cm,底部外侧固定 3 行 3 列共 9 个超声波振动子,振动子并联至电源,每个振动子功率 60 W.装置共 4 套,频率分别为 40、68、80 kHz 和 120 kHz.电源输出功率可调,共 6 个档位,实测输出电压和电流,计算出 6 个档位

对应的输出功率分别为 80、130、190、210、320 W 和 410 W.实验时水量 2.2 L,折合单位体积水体超声波能量密度为 36.4、59.1、86.4、95.5、145.5 和 186.4 $W \cdot L^{-1}$.

(2) 动态超声波装置

动态超声波装置为不锈钢方管,管内壁顶部和两侧固定有 2 cm 厚吸声棉,有效过水断面 6 cm × 6 cm,有效长度 65 cm,如图 1 所示.两端设进出水管,方管底部外壁固定 10 个频率为 120 kHz 振动子,每个振动子功率 60 W.电源输出功率可调,分别为 90、150、210、240、360 W 和 460 W,折合单位体积水体超声波能量密度为 38.5、64.0、89.7、102.6、153.8 和 196.6 $W \cdot L^{-1}$.

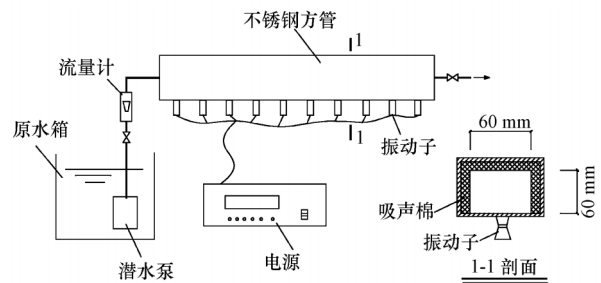


图1 动态超声波实验装置

Fig.1 Experimental device of dynamic ultrasound

(3) 静态混凝沉淀装置

静态混凝沉淀实验装置为深圳中润水工业公司生产的ZR4-6型六联搅拌机.

(4) 超声波强化混凝沉淀过滤含藻水动态实验系统

超声波混凝沉淀过滤蓝藻水处理系统包括原水泵、动态超声波装置、机械搅拌混凝池、斜管沉淀池、提升泵和过滤柱,如图2所示.混凝池水力停留时间 15 min.斜管长度 1 m,直径 25 mm.过滤柱直径

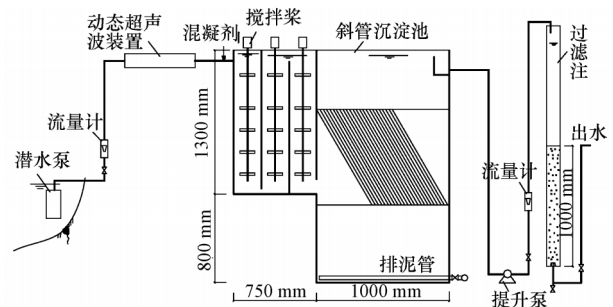


图2 动态超声波混凝沉淀过滤实验系统

Fig.2 Experimental system of dynamic ultrasound coagulation sedimentation and filtration

150 mm,石英砂滤料粒径 0.8~1.5 mm,滤层厚度 1 m.处理系统共设置两套平行系统,一套设有动态超声波装置,而另一套没有.每套设计处理水量位为 $700 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,沉淀池表面负荷 $6 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,过滤速度 $6 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$.

2.2 水样

静态实验水样和蓝藻取自太湖梅梁湾,取样时间为 2014 年 6—9 月,优势藻种为铜绿微囊藻,占 95%以上.向水样中加入蓝藻配制成一定浓度含藻水样,水样叶绿素 a 浓度在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,浊度在 90 NUT 左右.动态超声波混凝沉淀过滤水处理实验在扬州市某水厂进行,潜水泵直接从湖泊水源取水,藻种为铜绿微囊藻.为提高原水藻类浓度,从水源取浓藻加入到原水中.

2.3 材料

混凝剂为硫酸铝 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] 分析纯,配制成 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 使用液.

2.4 实验方法

2.4.1 静态超声混凝沉淀实验 将配置的太湖含藻水样 2.2 L 加入超声波水槽中,用某一频率和某一功率的超声波辐射含藻水样一定时间.部分水样缓慢搅拌 2 h,用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径滤膜过滤,测定水中藻毒素,其余水样用于以下混凝沉淀实验.

将超声波辐射处理后的水样 1 L 加入烧杯中,加入混凝剂为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$]. $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌 1 min, $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌 10 min, $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌 10 min,静置沉淀 30 min,虹吸出上层 800 mL 水混匀测定叶绿素 a 浓度.

改变超声波功率、频率、时间,重复上述实验.

2.4.2 动态超声静态混凝沉淀实验 将配置的太湖含藻水样倒入原水箱,用潜水泵将含藻水注入动态超声波装置,开启超声波电源,待出水稳定后取出口水样,部分水样缓慢搅拌 2 h,用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径滤膜过滤,测定水中藻毒素.其余水样用于混凝沉淀实验(方法同上),测定处理水叶绿素 a 浓度.

选定超声时间 10 s,调节超声波功率分别为 90、150、210、240、360 W 和 460 W,重复上述实验.

选定超声波功率 150 W,调节进水流量,使水流经过超声波装置的时间分别为 7.5、10、15、20 s 和 30 s,重复上述实验.混凝剂投加量 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.4.3 超声波强化混凝沉淀过滤除藻水处理实验

处理系统安装于扬州自来水公司某水厂内,水源为湖泊水.开启原水泵,调节两套处理系统的流量均

为 $700 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,水流经过超声波装置的时间为 12 s.超声波功率 150 W,对应超声能量密度 $64 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$.有超声波装置的处理系统的混凝剂投药量为 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,无超声波装置的处理效果欠佳,将混凝剂投加量增大到 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.每隔 1 h 取原水、沉淀水、过滤水测定藻类数量,用 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径滤膜过滤,测定水中溶解性有机碳(DOC).

2.4.4 测试方法 藻类叶绿素 a 按《水和废水监测分析方法(第 4 版)》推荐方法测定,吸光度采用上海精科仪器公司生产的 UV759S 型紫外分光光度计测定.DOC 采用岛津 TOC-VCPN 测定.藻类数量采用江南光学仪器厂 XSP-BM-8CA 型显微镜人工计数.藻毒素委托扬州大学分析测试中心测定,藻毒素采用高效液相色谱质谱法测定,液相色谱仪为美国安捷伦公司生产的 Agilent1200 型.超声波强度采用北京同德创业科技有限公司生产的 TD-YP0511C 型超声波强度测量仪测定.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 静态超声波除藻效果及安全性

3.1.1 静态超声波混凝沉淀除藻效果 静态超声波除藻效果如图 3 所示,原水浊度 92.4 NTU、叶绿素 a 浓度 $134.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,超声时间 15 s.

从图 3 可见,超声波能量密度越大、频率越高,处理效果越好.频率 40 kHz 超声波处理效果较差,频率 68~120 kHz 的超声波处理效果较好.其中频率 120 kHz、能量密度 $59.1 \sim 186.4 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 超声波作用 15 s 后混凝沉淀,藻类叶绿素浓度小于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率达到 99%,未经超声水混凝沉淀后藻类去除率仅 80%.

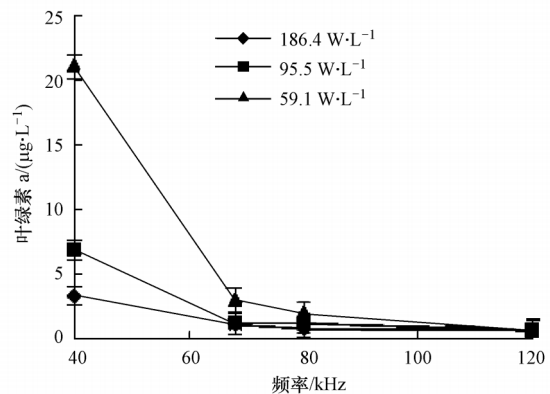


图 3 不同频率超声沉淀水叶绿素 a

Fig.3 The treatment of Chlorophyll-a in sedimentation water by using ultrasound with different frequencies

超声波在液体中以一系列疏密相间的纵波传播,存在正负压强的快速交替变换,负压时形成空化泡,正压时空化泡破裂,空化泡的形成与破裂会形成冲击波,对周围质点产生破坏作用.输入功率相同时,频率越高、振幅越小,振动速度越快,较高的频率能更加快速地形成正负压交替变换,形成有效的空化作用,导致蓝藻气囊破裂.频率相同时,能量越大,振幅越大,越容易使蓝藻气囊破裂.

3.1.2 静态超声波除藻安全性 超声波空化作用产生的局部高压会使藻细胞内气囊破裂,使藻类失去浮力而下沉,也会使藻细胞壁破裂,藻液释放到水中,引起水中有机物和藻毒素增加,污染水质.由于气囊壁和细胞壁厚度及强度存在差别,气囊壁要比细胞壁薄得多,相对脆弱.因此,笔者试图找到一种超声波区间,在此超声波区间范围内,超声波只会使气囊壁破裂而细胞壁不破裂,保障超声波水处理的水质安全性.

含藻水经过不同频率、不同强度静态超声波作用不同时间后,水中藻毒素(MC-LR)浓度如图4所示.从图中可见,各个频率的超声波作用5~15 s后,水中藻毒素浓度均增加,强度越大、频率越高、作用时间越长,藻毒素释放量越大.超声10 s以内,藻毒素释放量为5%左右.这与国内外研究结果是一致的(Zhang *et al.*, 2006)

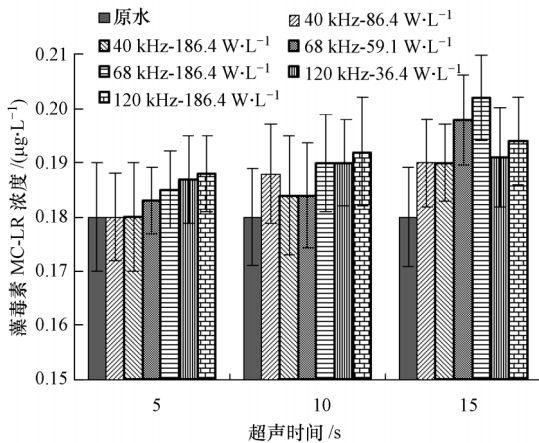


图4 静态超声后水中藻毒素

Fig.4 Concentration of microcystin after static ultrasonic irradiation

结果说明在静态超声波作用下,即使在低频、低强度、短时间作用,藻细胞内藻毒素也出现释放,对水质产生了污染,因而不是不安全的.是不是笔者试图寻找的安全超声区间根本就不存在? 通过进一步研究发现,在超声波水槽中,靠近边壁处、两个振

动子交汇处超声强度异常高,高低相差两倍,如图5所示.边壁处是由于边壁的反射作用,而多个振子发出的超声波发生了叠加、共振等作用,导致超声波水槽中超声强度不均匀.局部高强度超声波使藻细胞壁破裂,藻毒素释放.

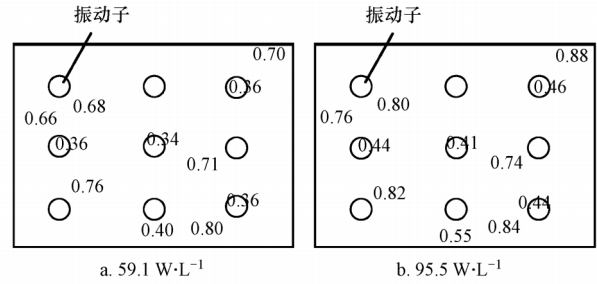


图5 频率120 kHz静态装置超声电压分布(V)

Fig.5 Ultrasound voltage distribution in static equipment of 120 kHz frequency

3.2 动态超声波除藻效果及安全性

3.2.1 动态超声静态混凝沉淀除藻效果 动态超声除藻效果如图6所示,其中图6(a)为不同强度动态超声波除藻效果,原水浊度103.6 NTU、叶绿素a浓度197.6 µg·L⁻¹;图6(b)为不同时间动态超声波除藻效果,原水浊度95.5 NTU、叶绿素a浓度

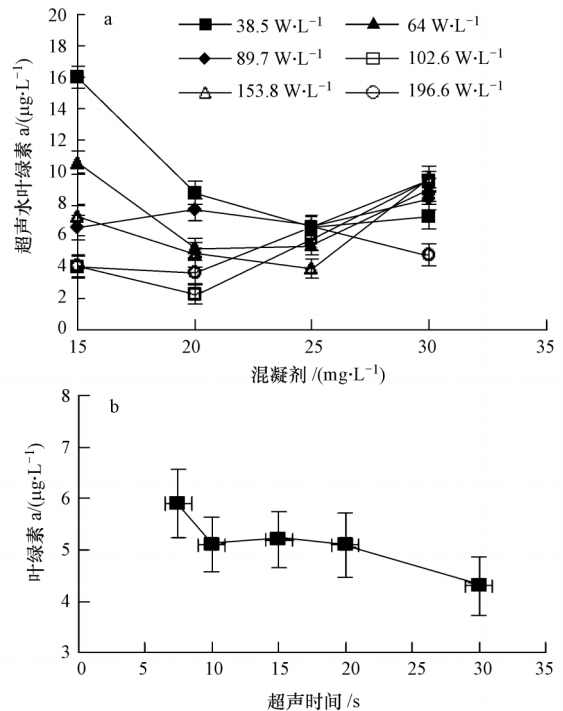


图6 动态超声波静态混凝沉淀除藻效果

Fig.6 Algae removal by dynamic ultrasound and static coagulation sedimentation

222.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.从图 6 可见,频率 120 kHz、能量密度 64~196.6 $\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$ 、超声时间 10 s 以上能取得较好的除藻效果,藻类去除率 97%.

3.2.2 动态超声波除藻安全性 动态超声波作用后水中藻毒素(MC-LR)浓度变化如图 7 所示.从图中可见,经过动态超声波作用后,水中藻毒素不仅没有增加反而减少,减少量 18.7%~30.7%,而且随着超声强度增加、超声时间延长减少幅度增加,这一结果与静态超声结果完全相反.说明动态超声波很好地解决了超声强度不均匀的问题,使藻类受到均匀的适中强度的超声波作用,细胞壁不会破裂,藻毒素不会释放.同时,动态超声波装置中还发生着藻毒素的降解作用,超声波空化作用产生的局部高温、高压,使藻毒素化学键位断裂,藻毒素被降解(Zhang *et al.*, 2009).

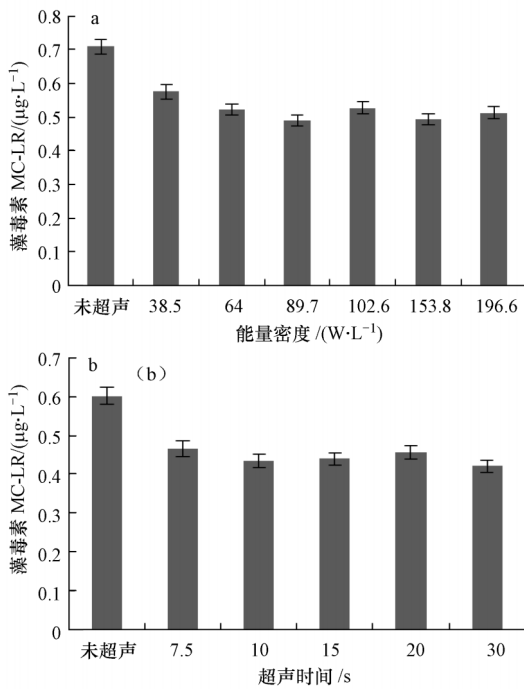


图 7 动态超声波作用后水中藻毒素浓度(120 kHz)(a.不同超声强度比较(10 s);b.不同超声时间比较(64 $\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$))
Fig.7 Concentration of microcystin after dynamic ultrasonic irradiation

为了解决超声波边壁反射问题,在动态超声波装置内两个侧壁、顶部贴了一层 2 cm 厚的吸声棉,正如电影院墙壁上的吸声板.为了降低多个振动子发射的超声波相互叠加问题,将振动子布置成一行,减少多行多列振动子的超声波叠加.采用这两项措施后超声波强度分布比静态装置更均匀,主要表现在:一是沿装置纵向分布较均匀,功率密度 102.6

$\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$ 时超声电压 0.44~0.48 V;二是边壁处超声强度基本无反射,边壁超声电压 0.42 V,而未贴吸声棉时是 0.58 V,如图 8 所示.相比与图 5 所示的静态超声强度分布,动态超声波强度均匀得多,不存在局部高强度,是藻毒素不释放的关键.同时,动态超声波运行时,水流是流动的,藻类颗粒并不总是停留在某个高强度区域,避免了两个振动子之间的藻细胞长时间受到叠加的高强度超声波作用而破裂.

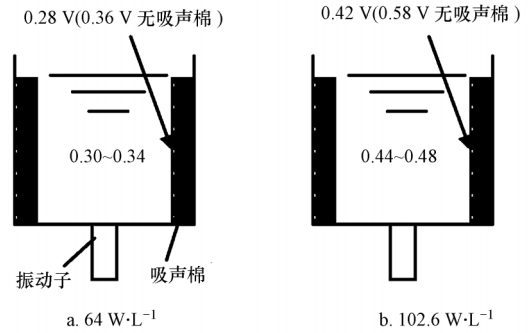


图 8 动态装置超声电压分布(V)

Fig.8 Ultrasound voltage distribution in dynamic equipment of 120 KHz frequency

3.3 动态混凝沉淀过滤除藻效果

根据动态超声波静态混凝沉淀实验的结果,选用频率 120 kHz、能量密度 64 $\text{W}\cdot\text{L}^{-1}$ 、超声时间 12 s (流量 700 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$),进行动态混凝沉淀过滤水处理实验.

原水为扬州市某湖泊水,经投加浓藻后原水浊度 269~299 NTU,藻细胞个数 3.95~4.95 亿个 $\cdot\text{L}^{-1}$, DOC 为 6.1~6.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.超声波水处理系统混凝剂投加量 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,无超声波系统混凝剂投加量 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.各时刻沉淀水藻细胞个数和 DOC 分别见图 9 和图 10.

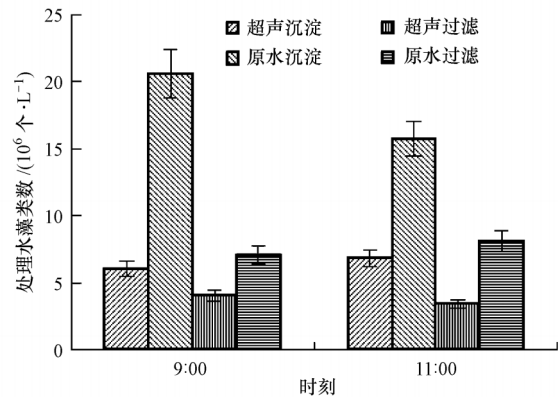


图 9 动态超声波水处理系统出水藻细胞数量

Fig.9 The number of algae cells in effluent of dynamic ultrasound water treatment system

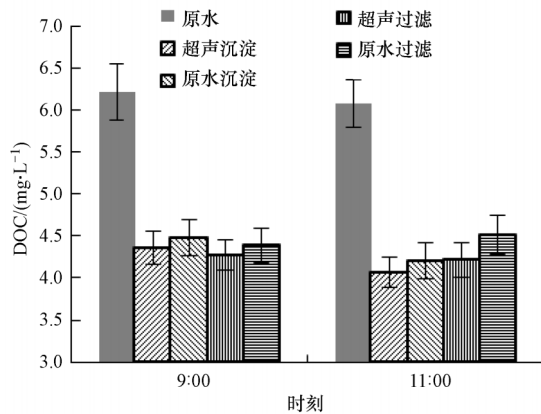


图 10 动态超声波水处理系统出水 DOC

Fig.10 Concentration of DOC in the effluent of dynamic ultrasound water treatment system

从图 9 可见,超声水在投药量较小的条件下处理效果好于原水直接处理,沉淀水和滤后水中藻类细胞个数仅为未超声水的 35%和 50%。另外,相比于静态实验,原水直接混凝沉淀过滤也取得了较好的效果,主要是因为水源水中泥沙颗粒多、浊度高,混凝后包裹在藻类颗粒表面,增加了絮体重量,易于沉淀去除。

DOC 反映水中溶解性有机物,如果藻细胞破裂,藻液泄漏到水中,DOC 将增加.它与藻毒素一样能反映超声波水处理的安全性.从图 10 可见,与原水直接处理相比,超声波作用后 DOC 不仅没有增加,且去除效率比原水直接处理还要高.这进一步说明,动态超声波处理蓝藻水是水质安全的,且有助于 DOC 的去除,其去除机理是超声波产生的局部高压、高温使有机物化学键位断裂,部分有机物分解挥发,DOC 降低(韩冰,赵保卫,2007)。

4 结论(Conclusions)

1) 频率 68 ~ 120 kHz、能量密度 59.1 ~ 186.4 $W \cdot L^{-1}$ 静态超声波作用 10 ~ 15 s 后混凝沉淀,具有很好的蓝藻去除效果,但引起藻毒素释放,功率越大、频率越高、时间越长,除藻效果越好、藻毒素释放量越大。

2) 采用边壁吸声棉吸声处理,并使水流流过动态超声设备,既取得了良好的除藻效果,又能避免藻毒素释放,并且能去除水中藻毒素和其它溶解性有机物.频率 120kHz、能量密度 64 $W \cdot L^{-1}$ 以上、作

用时间 10 s 以上,混凝沉淀后藻类去除率 97%;能量密度 38.5 ~ 196.6 $W \cdot L^{-1}$ 、动态超声作用 7.5 ~ 30 s,能去除藻毒素 18.7% ~ 30.7%,并对 DOC 具有一定的去除效果.在此超声范围的动态超声波处理蓝藻水是水质安全的。

责任作者简介:丛海兵(1968—),男,教授,工学博士,研究方向为水处理、微污染控制.E-mail:chb9903@126.com.

参考文献(References):

- Bowen C C, Jensen T E. 1965. Blue-green algae; fine structure of the gas vacuoles[J]. Science, 147(3664): 1460-1462
- 储昭升, 庞燕, 郑朔芳, 等. 2008. 超声波控藻及对水生生态安全的影响[J]. 环境科学学报, 28(7): 1335-1339
- 董敏殷, 乔俊连, 王国强, 等. 2008. 低频超声波对藻毒素释放和降解的研究[J]. 净水技术, 27(6): 21-23
- 董敏殷. 2009. 化学预氧化对于藻类藻毒素释放和降解的特性研究[D]. 上海: 同济大学
- 方品云, 马军, 王立宁, 等. 2006. 臭氧预氧化对藻细胞及胞外分泌物消毒副产物生成势的影响[J]. 环境科学, 27(6): 1127-1132
- 郭婷婷. 2012. 强化絮凝去除藻胞内物与控制消毒副产物的形态作用机制[D]. 西安: 长安大学
- 韩冰, 赵保卫. 2007. 超声波与其他技术联用降解有机物的研究进展[J]. 净水技术, 26(4): 4-7
- 胡鸿钧. 2011. 水华蓝藻生物学[M]. 北京: 科学出版社
- 胡澄澄, 高乃云, 楚文海. 2010. 沉淀与气浮工艺单元处理太湖原水效果比较[J]. 给水排水, 36(2): 13-17
- 黎雷, 高乃云, 殷娣娣, 等. 2008. 控制饮用水原水中藻类、藻毒素的水厂处理工艺[J]. 中国给水排水, 24(6): 20-24
- 李芸. 2011. 低频低强度超声波控藻效果研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学
- 梁恒, 李圭白, 李星, 等. 2005. 不同水处理工艺流程对除藻效果的影响[J]. 中国给水排水, 21(3): 5-7
- Liang H, Nan J, He W J, et al. 2009. Algae removal by ultrasonic irradiation-coagulation [J]. Desalination, 239(1/3): 191-197
- 刘成, 高乃云, 马晓雁. 2006. 高藻及微囊藻毒素污染原水的应急处理工艺研究[J]. 中国给水排水, 22(21): 9-13
- 乔俊连, 董磊, 董敏殷, 等. 2009. 高频超声波对微囊藻毒素释放及降解的特性研究[J]. 中国给水排水, 25(17): 94-96
- 邵路路, 陆开宏, 朱津永, 等. 2012. 低强度超声波抑制铜绿微囊藻生长的研究[J]. 生态科学, 31(4): 413-417
- 邵明飞, 张宏宇, 杨金萍, 等. 2013. 响应面法优化螺旋藻藻蓝蛋白的超声波提取工艺[J]. 生态学杂志, 30(4): 93-96; 99
- Zhang G M, Zhang P Y, Fan M H. 2009. Ultrasound-enhanced coagulation for *Microcystis aeruginosa* removal [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 16(3): 334-338