

文章编号: 1000-5013(2008)01-0072-04

# 低功率超声波去除铜绿微囊藻技术

舒天阁, 苑宝玲, 王少蓉

(福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 针对富营养化水体中的藻污染问题, 利用超声波在水中的机械效应和空化效应产生的高压、冲击波、声流和剪切等力学作用, 研究不同超声频率、超声功率、超声时间对铜绿微囊藻的去除影响。结果表明, 当超声频率为 500 kHz, 超声功率为 80 W 时, 藻类的去除效果最好, 超声 5 min 后, 除藻率可达到 94%, 而且通过二次超声可进一步抑制残余藻类的生长, 稳定除藻效果。最后, 采用 FDA-PI 双色荧光法观察和识别经超声处理后藻细胞的存活形态和结构变化, 研究超声除藻的作用机理。

**关键词:** 铜绿微囊藻; 超声; 空化效应; FDA-PI 双色荧光; 除藻技术; 水处理

**中图分类号:** Q 681; X 143; Q 949.3

**文献标识码:** A

随着水体富营养化程度的加剧和范围的扩大, 淡水水华暴发的频率和强度日趋严重。藻类大量繁殖会消耗水中溶解氧, 散发恶臭, 破坏水环境的生态平衡, 并释放出多种藻毒素。特别是在饮用水的生产中, 高藻水源水能够堵塞滤池, 增加反冲洗水量, 影响混凝沉淀效果, 其混凝络合物能够穿透滤池, 影响出水浊度, 造成管网的腐蚀和二次污染。目前, 水厂常用除藻单元工艺主要有化学药剂法、气浮、直接过滤和生物处理等<sup>[1]</sup>, 但是在安全性、经济性和除藻效率等方面, 并不能完全达到要求。Nakano 等<sup>[2]</sup>在研究中提到, 利用超声技术在线控制水体中藻类的生长情况, 具有达到较好的效果。王波等<sup>[3]</sup>研究了超声波的机械效应对铜绿微囊藻的即时去除, 发现超声波可以安全、高效地去除藻类。本文主要研究超声作用对铜绿微囊藻的去除, 初步探讨超声除藻机制, 优化超声频率、超声功率、超声时间等工艺条件, 为设计超声除藻仪和将此工艺引入水厂处理单元提供工艺参数和理论依据。

## 1 实验材料

### 1.1 藻种及培养条件

铜绿微囊藻(FACHB-315), 中国科学院水生生物研究所提供。实验采用对数生长期的藻液。

### 1.2 主要试剂及仪器

(1) 试剂。碘化钾(分析纯, 天津市福晨化学试剂厂), 乙二酸荧光素(FDA, 美国 SIGMA 公司), 碘化丙锭(PI, 美国 SIGMA 公司)。(2) 仪器。AG1012 型超声功率源, Spectrum Lab53 型紫外分光光度计(上海棱光技术有限公司), OL YMPUS 荧光显微镜, BX51 及 DP70 荧光源, CCD 数码摄像系统。

## 2 实验方法

### 2.1 藻浓度与吸光度关系的确定

取一定浓度的藻液, 通过稀释, 配制成浓度不同的藻液, 于锥形瓶中用磁力搅拌器进行搅拌, 使藻细胞均匀分散于培养液中。分别测出各浓度藻液在 680 nm 处的吸光值。然后, 用显微镜计数器对各浓度的藻液进行计数, 从而建立藻浓度与吸光度的关系, 作为后续试验的定量研究依据。

收稿日期: 2007-11-19

作者简介: 舒天阁(1981-), 男; 通讯作者: 苑宝玲(1973-), 女, 教授, 博士, 主要从事超声除藻及控藻技术的研究。E-mail: yuanbaoling@yahoo.com.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(D0610011); 福建省环境保护局科技计划项目(2005H1008)

2.2 空化强度评估<sup>[4]</sup>

在不同频率,超声功率为 80 W 的超声反应器中,超声辐射 0.2 mol · L<sup>-1</sup> 碘化钾溶液 2 min,并用紫外分光光度计测量 354 nm 处的吸光度,测超声反应器的空化强度.

2.3 藻细胞的活性识别

对藻细胞的活性识别主要是利用 FDA-PI 双色荧光法<sup>[5]</sup>. FDA 荧光素进入活细胞中进行积累,在蓝光下,发出亮绿色荧光;而 PI 则进入死细胞中,与细胞内 DNA 和 RNA 物质相作用生成红色荧光物,蓝光下使死亡细胞发出红色荧光.

3 结果与讨论

3.1 藻细胞浓度的标准工作曲线

实验结果表明,当波长为 680 nm 和藻细胞浓度在 0.5 ×10<sup>6</sup> ~ 16.0 ×10<sup>6</sup> 个 · mL<sup>-1</sup> 范围内,吸光度(A)与藻细胞浓度(C)成正比.其线性回归方程为 A = 11.313 C,相关系数 R<sup>2</sup> = 0.997 6,实验数据取自 3 次测定的平均值.后续试验铜绿微囊藻细胞浓度,均根据此工作曲线换算而来.

3.2 反应器空化强度评估结果

采用碘释放法测定 ·OH 的生成量,间接评价不同频率条件下超声反应器的空化强度.结果表明当反应器频率为 0.02,0.2,0.5,1.0,1.65 MHz 时,其吸光度值(A)分别为 0.006,0.035,0.062,0.024,0.008.可以看出,在一定范围内,随着超声频率的升高,吸光度也随之增高,即超声空化过程中产生的 ·OH 增多.但当超声频率超过 500 kHz,超声空化作用随着频率的升高反而减弱,表现为吸光度的降低.这说明超声频率对 ·OH 的产生量具有饱和性,过高的频率反而导致了 ·OH 产生量的减少,中频率(500 kHz)条件下的超声声化学产额最高.

3.3 超声强度对藻去除效果的影响

用不同超声频率、功率分别辐照藻液 10 min,将超声后的藻液静置于光照培养箱中,每 24 h 取上清液测量吸光度.不同超声强度处理铜绿微囊藻后,藻去除率(φ)的变化如图 1 所示.从图 1(a)可以看出,

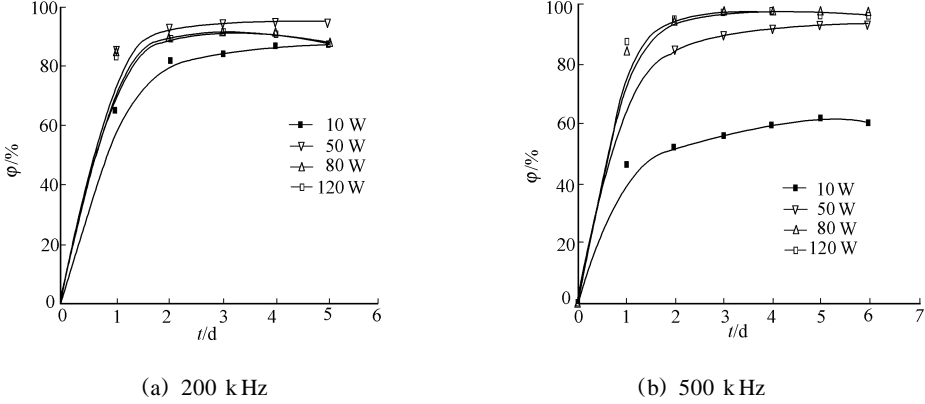


图 1 超声强度对藻去除的影响

Fig. 1 Effects of ultrasonic power on algal removal

在超声频率为 200 Hz 时,50 W 超声功率的处理效果比 10 W 的处理效果明显.在第 5 天时,10 W 的超声除藻率为 85 %,而 50 W 的超声除藻率为 93 %.随着声强的增加,超声除藻效率没有增加,反而下降了,80 W 和 120 W 的除藻效率在第 5 天都为 86 %.这说明随着功率的增加,超声对藻类的去除具有饱和的趋势.因此,在超声频率 200 kHz 的条件下,选择匹配功率为 50 W.同样,从图 1(b)可以看出,随着超声功率的增加,超声除藻的效果也增加,但超声功率继续增加,去除效果并没有增加得很明显.超声频率为 500 kHz 时,80 W 和 120 W 的去除效率比较接近,考虑到经济效益,采用 80 W 功率作为超声频率 500 kHz 时的匹配功率.

3.4 超声时间对藻类去除的影响

用 500 kHz,80W 的超声辐照藻液,辐照时间分别为 1,5,10,15,20 min.将经超声作用的藻液静置于光照培养箱中,每 24 h 取上清液测量吸光度,结果如图 2 所示.从图 2 可以看出,随着超声时间的

增加,超声除藻的效果也增强;但继续作用,藻的去除率变得缓慢.从第 5 天的去除效果看,超声作用时间 5 min 和 10 min 的效果差不多.这是由于固定超声设备在一定的功率和频率辐射下,它所产生的空化强度是一定的,超声时间的延长不能改变超声空化强度.因此,实验选用 5 min 作为处理时间.

### 3.5 二次超声对藻类去除的影响

待经超声处理的藻液回绿后,将藻液混匀,在同样的条件下再次超声并测其上清液的吸光度.第 1 次超声后,藻液的浓度每天下降,一直到第 5 d,才出现藻体个数的增加.因此,对混匀的藻液进行二次超声,结果如图 3 所示.从图 3 可以看出,二次超声后的藻液,其上清液的浓度维持在较低的水平,而且藻液的稳定性较一次超声更好,除藻效果能持续 15~20 d,而不使藻液持续生长.同时,实验中发现,经二

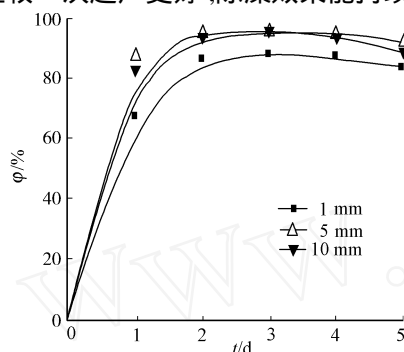


图 2 超声作用时间对微囊藻去除的影响

Fig. 2 Effects of ultrasonic time on algal removal

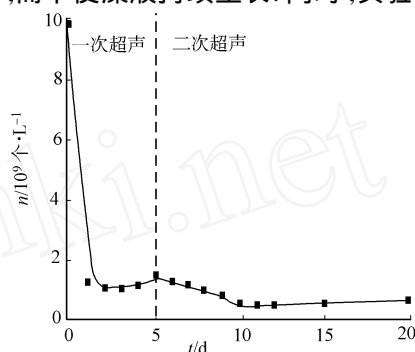


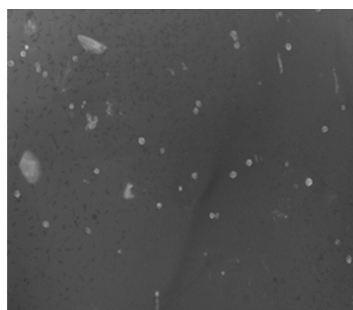
图 3 二次超声对微囊藻去除的影响

Fig. 3 Effects of re-ultrasonic on algal removal

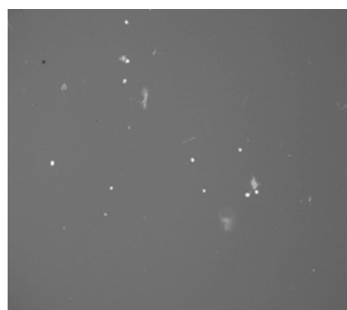
次超声处理后,受超声作用而沉于底部的藻量变少,藻液泛黄.这说明超声的空化作用不仅杀死了藻,而且对藻的生长有抑制作用,藻细胞内部的关键组分受到了破坏,二次超声的结果导致绝大部分的藻细胞受到了破坏.因此,经二次超声作用后的藻液具有较大的稳定性,能在水体中较长时间的稳定和控制藻体的个数.这将意味着在处理实际藻污染水体时,间歇超声将是除藻进而抑制藻生长的一个有效方法.

### 3.6 藻细胞的活性识别

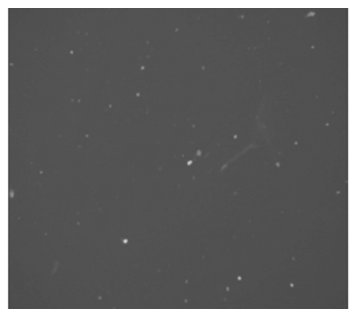
超声处理后的铜绿微囊藻在荧光场下的照片,如图 4 所示.比较图 4 可以发现,图 4(a), (c) 的藻细



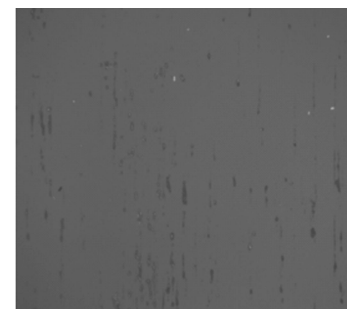
(a) 超声处理 24 h 后的上清液



(b) 超声处理 24 h 后沉降液中的细胞形状



(c) 超声处理 120 h 后的上清液



(d) 超声处理 120 h 后沉降液中的细胞形状

图 3 经超声处理后铜绿微囊藻 FEA-PI 双重染色状况

Fig. 3 Epifluorescence micrographs of *M. aeruginosa* stained by FEA-PI double fluorescent dyes

胞多是完整的,而图 4(b), (d) 的藻细胞多是破碎的藻细胞.由此可知,经超声处理后的藻液的上清液多

为完整的细胞,而沉淀到底下的多为被打破的藻细胞。

此外,经超声作用 24 h 后,铜绿微囊藻的气囊受到超声空化作用,发生共振破裂,导致失去悬浮能力,沉降至反应器底部死亡,表现为上清液中活细胞多,沉降液中死细胞多;而随着超声作用后静置时间的延长,上清液中越来越多的细胞出现死亡和沉降,表现为超声 120 h 后,上清液中活细胞的减少和混匀液中死细胞的增加。这些现象说明了,超声除藻机制是利用超声波在水中的机械效应和空化效应产生的高压、冲击波、声流和剪切等力学作用杀灭藻细胞,破坏其生长关键组分,从而达到超声除藻的目的。

## 4 结束语

实验探讨超声频率和超声功率对超声除藻的影响,得出在超声频率 500 kHz,超声功率 80 W 时,对藻类的去除效果最好。通过二次超声可进一步抑制残余藻类的生长,稳定除藻效果。FDA-PI 的双重染色法验证了超声波对铜绿微囊藻具有良好的破碎效果。超声除藻的机理主要是依据超声空化作用对藻细胞的内部的关键部分的破坏作用,尤其对有气囊的藻类作用更加明显。因此,超声技术作为一种除藻技术在未来的实际水处理中是可行的。

### 参考文献:

- [1] 彭海清,谭章荣,高乃云. 给水处理中藻类的去除[J]. 中国给水排水,2002,18(2):29-31.
- [2] NAKANO K, LEE T J, MATSUMURA M. In situ algae bloom control by the integration of ultrasonic radiation and jet circulation to flushing[J]. Environ Sci Technol, 2001, 35, 4941-4946
- [3] 王波,张光明,王慧. 超声波去除铜绿微囊藻的研究[J]. 环境污染治理技术与设备,2006,6(4):47-49.
- [4] LEE T J, NALAMP K, MATSUMURA M. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control[J]. Environ Technol, 2001, 22: 383-390.
- [5] 谌丽斌,梁文艳,曲久辉,等. FDA-PI 双色荧光法检测蓝藻细胞活性的研究[J]. 环境化学,2005,24(5):554-557.

## Studies on the Removal of *Microcystis aeruginosa* by Low-Power Ultrasonic

SHU Tian-ge, YUAN Bao-ling, WANG Shao-rong

(College of Environment and Resource, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The removal efficiency of *Microcystis aeruginosa* by the mechanical effects, which was caused by ultrasonic cavitations, such as high pressure, shock wave, acoustic streaming and shear force, was studied. The efficiency of algal removal can be reached to 94% at the optimum conditions: 80 W ultrasonic power, 500 kHz ultrasonic frequency, and 5 minutes for ultrasonic duration. The efficiency of algal removal can be stabilized by the secondary ultrasonic processing. Furthermore the mechanism of algal removal by ultrasonic was investigated by the fluorescent method called FDA-PI (fluorescein diacetate and propidium iodide).

**Keywords:** *Microcystis aeruginosa*; ultrasonic; ultrasonic cavitations; FDA-PI double fluorescent dyes; mechanism; water treatment

(责任编辑:黄仲一)