

超声波对3种水华爆发主因蓝藻的控制

胡冬雯

(上海市环境科学研究院低碳经济研究中心, 上海 200233)

摘要: 利用改装的超声波发生器对3种水华爆发的主因蓝藻门的铜绿微囊藻、螺旋鱼腥藻、水华束丝藻的去除效果及作用机理进行研究。结果表明, 80 kHz 超声波对3种藻类去除作用不明显, 20 kHz 低频超声波则有显著去除作用, 去除效果依次为螺旋鱼腥藻>水华束丝藻>铜绿微囊藻; 螺旋鱼腥藻和水华束丝藻等长链藻在超声波作用下断裂成为短链甚至单细胞藻体从而失去活性, 相比铜绿微囊藻更为敏感。超声波对3种藻类的去除效果随着作用功率和时间的增加而增强, 但考虑到经济性和安全性因素, 功率-时间选取应和作用范围相适应。

关键词: 超声波; 水华; 除藻

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)07-1432-05 doi:10.11654/jaes.2013.07.021

The Control of Three Species of Blue Algae Causing Algae Bloom by Ultrasonic

HU Dong-wen

(Low Carbon Economy Research Center, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Algae bloom has become a severe problem in China. A lot of techniques were studied on the control of blue algae, one of which is ultrasonic, a physical method with the excellence on simplicity, chemical free and quick effect. In the experiment, the ultrasonic generator was modified to control three major species of algae (*microcystis aeruginosa*, *Anabaena spiroides*, and *aphanizomenon flos-aquae*) causing algae bloom, and the effectiveness and mechanism was reviewed and studied. The ultrasonic of 80 kHz has little effect on algae elimination, while the ultrasonic of 20 kHz has significant reduction effect on all three of them, with *Anabaena spiroides* removed the most and *microcystis aeruginosa* the least. The two long-chain algae, *Anabaena spiroides* and *aphanizomenon flos-aquae*, are more sensitive to ultrasonic because of chain breaking and the loss of activity, while the spherical algae, *Microcystis aeruginosa* is broken by ultrasonic based on the cavitation effect. The effectiveness of ultrasonic increased with the increase of power or extension of time, while proper power and time is recommended based on the cost and security issues. The result may provide foundation for the practical use of ultrasonic on blue algae control in the Yangtze River Delta Region.

Keywords: ultrasonic; algae bloom; algae elimination

近年来,我国水体富营养化问题日益突出,蓝藻水华爆发频率越来越高,规模也越来越大^[1-5]。水华爆发时,不仅损害水生生态系统健康,而且危及人类饮用水安全,因而寻求安全、高效、经济的控藻技术以控制蓝藻水华,已成为我国近期研究的难点和热点^[6-7]。超声波是国内外关注较多的一种新型物理控藻技术^[8-13],它具有操作简便、不引入化学物质、反应条件温和速

度快等优点,其主要工作原理就是将藻类细胞壁和气囊破碎或破坏其生理功能使其死亡。本实验主要比较超声波作用对长三角地区3种水华主因藻类的灭藻效果,探寻其内在作用机理,研究相关物理参数对其敏感性和有效性的影响,旨在为长三角地区蓝藻水华超声波控藻技术的实际应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 藻种选取及培养

水华爆发中以蓝藻门的微囊藻、鱼腥藻、束丝藻等属的藻类最为常见,对水质影响最大^[14-19]。本实验选

收稿日期: 2013-02-05

基金项目: 上海市科委科技攻关项目(08DZ1203106); 青年科技创新基金项目(205804)

作者简介: 胡冬雯,女,硕士,工程师。E-mail: hudw@saes.sh.cn

取铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB-909)、螺旋鱼腥藻(*Anabaena spiroides*, FACHB-498)和水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*, FACHB-1168)作为受试藻种,其中螺旋鱼腥藻和水华束丝藻由圆柱形藻细胞呈管束状排列组成的藻丝,虽然其单个细胞的长度不足 20 μm ,但由几十个细胞串结起来,长度可达毫米级,而铜绿微囊藻为单细胞藻,其细胞呈球状,直径一般不大于 6 μm 。3 种藻种均来自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB-Collection, CAS)。采用 BG-11 培养基,培养温度(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,光照强度 3500 lx, pH6.5~7.0,采取连续 24 h 光照培养^[20]。

1.2 超声波处理装置

选用上海声浦超声波设备厂 CPS-3 型超声波粉碎器,对其频率和功率进行设计改装。改装后的换能器具备 3 种定制式时间模式,0~120 W 的可调输出功率,20 kHz 或 80 kHz 频率,超声发生器配备上直径 2 cm、下直径 1 cm 的锥型探针。

1.3 实验设计

1.3.1 参数水平选择

针对 3 种特征藻种,设计选择 3 组超声的参数变量进行实验,分别为:功率 30、60、90 W,频率 20、80 kHz,时间 5、10、15 min。设计每次破壁实验的破壁容量为 500 mL,比较在不同的参数水平下(表 1),超声波对这 3 种藻的去除作用。

表 1 超声波破壁效果实验因素水平表

Table 1 Factors and levels of wall-breaking experiment

水平	藻种	功率/ W	频率/ kHz	时间/ min	破壁容量/ mL
1	铜绿微囊藻	30	20/80	5	500
2	螺旋鱼腥藻	60	20/80	10	500
3	水华束丝藻	90	20/80	15	500

1.3.2 测试方法

采用分光光度计法和细胞计数法进行藻类生物量浓度测试。用 UV-2000 型分光光度计(UNIKO)测定样品在波长 680 nm 处的光密度值,并与初始光密度值比较,计算藻的去除率^[21]。采用显微镜(Olympus BX51, JAPAN)×400 观察计数,确定丝状藻藻链细胞个数。

1.3.3 数据处理

在 SPSS 19.0 统计软件上进行多重比较及独立样本 *T* 检验统计分析,在 Microsoft Office 的 Excel 中进行数据处理及绘图。

2 结果与分析

2.1 超声波作用频率择优

实验结果表明,在低功率短时间(30 W, 5 min)、中功率中时间(60 W, 10 min)和高功率长时间(90 W, 15 min) 3 种工况条件下,20 kHz 频率超声波对于 3 种藻类均显现去除效果(图 1),而 80 kHz 频率超声波对藻类去除基本没有效果,甚至在一定程度上促使藻类生物量有所上升,这种负向效果对于螺旋鱼腥藻尤其明显,其次为铜绿微囊藻。在 80 kHz 频率的中高功率超声波作用下,水华束丝藻的生物量有所下降,但效果并不明显。

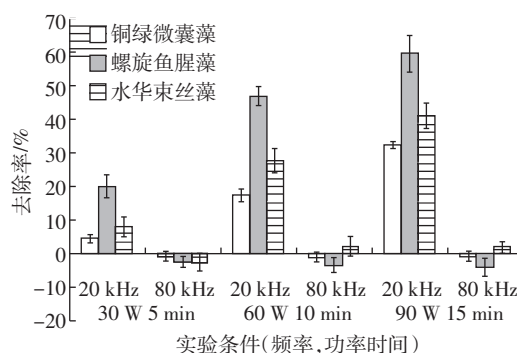


图 1 两种超声波频率对藻类削减率比较

Figure 1 Comparison of elimination rate between 2 frequency

2.2 超声波功率-时间效应

在相同超声波功率-时间工况下,藻类的去除效果均为螺旋鱼腥藻>水华束丝藻>铜绿微囊藻(图 2),且两两之间均存在显著差异($P<0.05$)。在 30 W 5 min 处理中,铜绿微囊藻削减率最低,仅为 4.44%,而水华束丝藻和螺旋鱼腥藻分别为 7.94%和 19.93%;在 90 W 15 min 处理中,螺旋鱼腥藻削减率最高,达 59.42%,而水华束丝藻和铜绿微囊藻分别为 40.95%和 32.22%。

在同等功率的超声波作用下,3 种藻类的生物量削减率均随着作用时间的增长而上升,即作用时间越长,灭藻效果越好。5、10 min 和 15 min 全部藻种和作用功率的平均削减率分别为 21.61%、28.42%和 32.20%。在同等时间的超声波作用下,3 种藻类的生物量削减率均随着作用功率的增强而上升,即作用功率越强,灭藻效果越好。30、60 W 和 90 W 全部藻种和作用时间的平均削减率分别为 15.83%、29.83%和 38.56%。

2.3 藻体显微结构变化

经超声波探针作用后,螺旋鱼腥藻和水华鱼腥藻

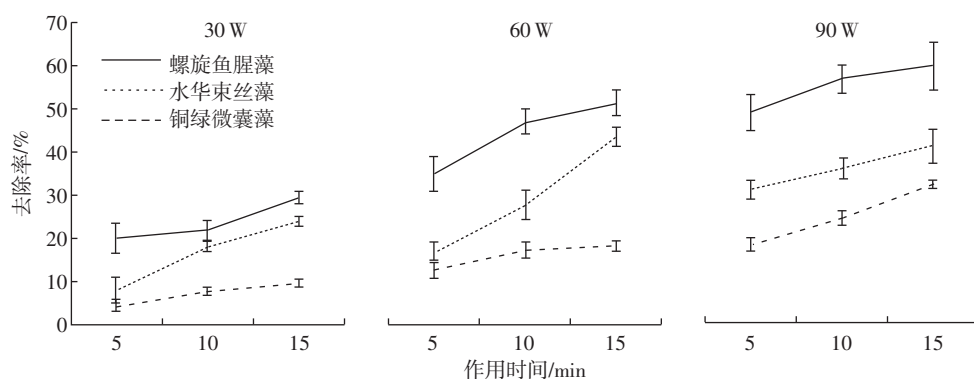


图2 超声波作用功率-时间效应对去除率影响对比

Figure 2 Comparison of elimination rate between different power and time

培养液中聚集的藻丝消失,肉眼观察不可识别藻类形体,静置 24 h 后水体依然清澈,而铜绿微囊藻的培养液作用前后肉眼观察并无明显不同。在×400 显微目镜下进一步观察藻类的显微结构变化可见,螺旋鱼腥藻和水华束丝藻在超声波作用下形态和细胞组成发生了显著变化,丝状藻体被打断,藻细胞以个体形态离散在水体之中;而铜绿微囊藻因其藻类形态本身为球状单细胞个体,且体积较小,并无观察到超声波作用对其造成的影响。用 90 W 的超声波作用 15 min 后,两种长链藻基本都被震碎成为单细胞,而时间作用较短或者超声功率较低的情况下,视野中还能观测到长链型藻体的存在(图 3、图 4)。

3 讨论

超声波主要是利用机械力和空化效应产生的冲击波、高温高压、射流等作用,对藻细胞结构功能及生物活性进行破坏,而频率是控制产生空化效应的最重

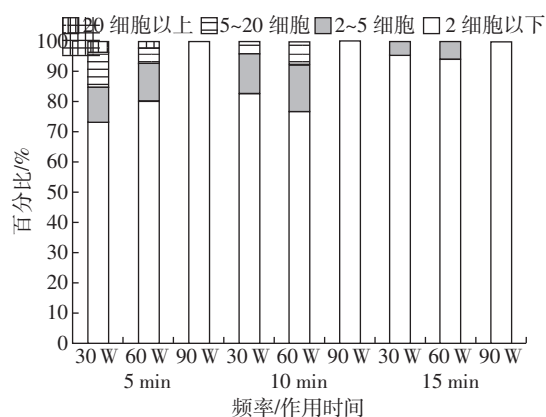


图4 超声波作用下螺旋鱼腥藻藻链组成变化

Figure 4 Structure change of *Anabaena spiroides* under ultrasonic

要因素之一^[22-24]。一方面频率升高可以增加空化泡的数量,增加声化学降解率,但另一方面,高频声波会使空化泡生成周期更短,造成空化泡体积较小,破裂能量变小。本研究中,在频率较低的情况下(20 kHz),超声波对 3 种藻类的去除作用明显好于 80 kHz 高频,这在很大程度上是由于 20 kHz 低频超声波使得 3 种藻类藻体中的空化泡有充足时间产生最大负压,从而在空化泡破裂崩溃时产生更强的冲击波。而高频超声波对藻类生长起到促进作用,亦在一些文献报道中可见^[25]。

藻类自身特征也会影响超声波的作用效果。铜绿微囊藻的藻体及其伪空泡较小,较难以在超声波作用下产生空化效应^[26],这也是其生物量削减率低于另两种丝状藻类的原因之一。从显微结构变化中也可看出,在超声波作用下,螺旋鱼腥藻和水华束丝藻发生空化效应破坏藻体结构,导致这两种长链丝状藻类藻链断裂,形成短链甚至单细胞藻体。丝状藻类断链后即失去了原有活性,对球型藻类必须使其细胞结构破坏才能真正影响其繁殖。

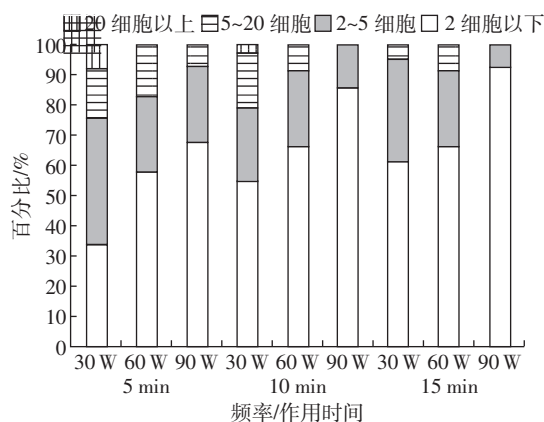


图3 超声波作用下水华束丝藻藻链组成变化

Figure 3 Structure change of *Aphanizomenon flos-aquae* under ultrasonic

超声波功率即其声强,是产生空化效应的必要条件。一般情况下,超声波功率越高,也就意味着较大的振幅,振幅增大能够导致空化泡更剧烈的崩溃,从而产生更高的温度和压力,对藻类的去除效果更好^[27-28]。本研究中90 W功率超声波作用下的藻类生物量削减率较高,而30 W功率的作用效果最差。在功率相同的情况下,作用时间越长除藻效果越好,这在本研究中已有体现,但也有研究表明这种效果具有饱和的趋势。高强度超声波对其他水生生物可能会造成干扰甚至影响其生长,而且其能耗与输出功率成正比,所以选择一个适当的功率值是本技术实际应用的关键。

4 结论

(1)80 kHz 高频超声波不利于水体空化反应,对3种藻类去除作用不明显,反而可能促进其繁殖生长;20 kHz 低频超声波对3种藻类均有去除作用,去除效果依次为螺旋鱼腥藻>水华束丝藻>铜绿微囊藻。这与藻类自身结构有关。

(2)超声波对3种藻类的去除效果随着作用功率和时间的增加而增强,但考虑到经济性和安全性因素,功率-时间选取应和作用范围相适应。

(3)螺旋鱼腥藻和水华束丝藻等丝状藻藻链在超声波作用下断裂成为短链甚至单细胞藻体从而失去活性,故比铜绿微囊藻等细胞呈圆形、近圆形的藻体类群对超声波作用更为敏感。

参考文献:

- [1] Yang M, Yu J, Li Z, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. *Science*, 2008, 317(5842): 1166.
- [2] 万 能, 宋立荣, 王若南, 等. 滇池藻类生物量时空分布及其影响因素[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(2): 184-188.
WAN N, SONG L R, WANG R N, et al. The spatio-temporal distribution of algal biomass in Dianchi Lake and its impact factors[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(2): 184-188.
- [3] 霍守亮, 席北斗, 姚 波, 等. 中国湖泊富营养化防治策略研究[J]. *环境保护*, 2009(4): 16-18.
HUO S L, XI B D, YAO B, et al. Research on prevention strategies of lake eutrophication in China[J]. *Environmental Protection*, 2009(4): 16-18.
- [4] 金春华, 陆开宏, 王扬才, 等. 浙江省3座饮用水水库的蓝藻控制对策及效果[J]. *水利渔业*, 2005, 25(3): 50-55.
JIN C H, LU K H, WANG Y C, et al. Control methods and effects of blue algae in 3 drinking water reservoirs in Zhejiang [J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, 25(3): 50-55.
- [5] 张宁红, 黎 刚, 郁建桥, 等. 太湖蓝藻水华暴发主要特征初析[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(1): 71-74.
ZHANG N H, LI G, YU J Q, et al. Character of blue-green algal blooms outbreak in Taihu Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(1): 71-74.
- [6] 董 军, 施永生. 除藻技术的现状分析及展望[J]. *水科学与工程技*, 2007, 4: 34-36.
DONG J, SHI Y S. Prospects and analysis for present situation of removal algae [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2007, 4: 34-36.
- [7] 彭海清, 谭章荣, 高乃云, 等. 给水处理中藻类的去除[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(2): 29-31.
PENG H Q, TAN Z R, GAO N Y, et al. The elimination of algae in water supply[J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(2): 29-31.
- [8] Shi H X, Qu J H, Liu H J, et al. Effect of ultrasound irradiation on the coagulation and inactivation of *Microcystis*[J]. *Water Supply Research Technology-Aqua*, 2008, 57(2): 101-108.
- [9] Nakano K, Lee T J, Matsumura M. In situ algal bloom control by the integration of ultrasonic radiation and jet circulation to flushing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35: 4941-4946.
- [10] 陆宝平. 超声除藻的应用基础研究[D]. 南京: 东南大学, 2007: 38-39.
LU B P. Research on the application of algae elimination by ultrasonic [D]. Nanjing: Southeast University, 2007: 38-39.
- [11] 陈 杰, 王 波, 张光明, 等. 超声强化絮凝法去除蓝藻实验研究[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(3): 66-69.
CHEN J, WANG B, ZHANG G M, et al. Enhancement of ultrasonic coagulation on removal of algae[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(3): 66-69.
- [12] 王利平, 杨显财, 段松林, 等. 超声波/改性粘土工艺去除人工水体中的蓝藻[J]. *中国给水排水*, 2008, 27(6): 21-23.
WANG L P, YANG X C, DUAN S L, et al. Ultrasonic/Modified clay process for removal of blue algae from artificial waters [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 27(6): 21-23.
- [13] 郝红伟, 陈以方, 吴敏生, 等. 低功率高频超声抑制蓝藻生长研究[J]. *生物物理学报*, 2003, 19(1): 101-103.
HAO H W, CHEN Y F, WU M S, et al. Study on the inhibition of Cyanobacteria's growth by low-power and high-frequency ultrasound[J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2003, 19(1): 101-103.
- [14] 王红兵, 宋伟民, 朱惠刚. 上海淀山湖、黄浦江水系浮游藻类及藻类毒素的动态研究[J]. *环境与健康杂志*, 1995, 12(5): 196-199.
WANG H B, SONG W M, ZHU H G. Study on seasonal dynamics of planktonic algae and microcystins in the Dianshan Lake and Huangpu River[J]. *Journal of Environment and Health*, 1995, 12(5): 196-199.
- [15] 贾晓会, 施定基, 史绵红, 等. 巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说”[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 2968-2977.
JIA X H, SHI D J, SHI M H, et al. Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 2968-2977.
- [16] 李大命, 孔繁翔, 张 民, 等. 太湖和巢湖夏季蓝藻水华期间产毒微囊藻和非产毒微囊藻种群丰度的空间分布[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 7(4): 480-485.
LI D M, KONG F X, ZHANG M, et al. Spatial changes in abundance of

- microcystin-producing and non-microcystin producing microcystis populations in the Taihu Lake and the Chaohu Lake during cyanobacterial bloom period [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, 31(11):2968-2977.
- [17] 汪育文, 李建宏, 吴敏, 等. 南京玄武湖微囊藻水华种类组成的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10):2187-2191.
- WANG Y W, LI J H, WU M, et al. Composition of *Microcystis* species of the cyanobacterial bloom in Xuanwu Lake of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10):2187-2191.
- [18] 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 等. 淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1136-1143.
- XU C Y, YANG J, MA M R, et al. Characteristics of phytoplankton community changes in Dianshan Lake during peak period of algal blooms[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4):1136-1143.
- [19] Chen Yuwei, Qin Boqiang, Teubner Katrin, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assembles: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(4):445-453.
- [20] 郑朔方, 杨苏文, 金相灿. 铜绿微囊藻生长的营养动力学[J]. 环境科学, 2005, 26(2):152-156.
- ZHENG S F, YANG S W, JIN X C. Dynamic studies on the effect of nutrients on the growth of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2):152-156.
- [21] 董正臻. 快速测定藻类生物量的方法探讨[J]. 海洋科学, 2004, 28(11):1-2.
- DONG Z Z. A method of quick determination of algal biomass[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(11):1-2.
- [22] 潘彩萍, 张光明, 王波. 超声波除藻动力学研究[J]. 净水技术, 2006, 25(6):31-34.
- PAN C P, ZHANG G M, WANG B. Kinetic study on ultrasonic algae removal[J]. *Water Purification Technology*, 2006, 25(6):31-34.
- [23] Bowen C C, Jensen T E. Blue-green algae: Fine structure of the gas vacuoles[J]. *Science*, 1965, 147:1460-1462.
- [24] Pradeep R, Linhua F, Thang N. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms[J]. *Water Research*, 2012, 46(14):4319-4329.
- [25] Portenlanger G, Heusinger H. The influence of frequency on the mechanical and radical effects for the ultrasonic degradation of dextrans[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1997, 2(4):127-130.
- [26] Zhang G M, Zhang P Y, Fan M H. Ultrasound-enhanced coagulation for *Microcystis aeruginosa* removal[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, 16(3):334-338.
- [27] Ahn C Y, Park M H, Joung S H, et al. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation: Laboratory and enclosure studies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(13):3031-3037.
- [28] Hao H W, Wu M S, Chen Y F, et al. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation[J]. *Colloids and Surfaces*, 2004, 33:151-156.