

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.026

# 超声波技术预防性抑制蓝藻水华的研究

范功端, 林茜, 陈丽茹, 林茹晶, 苏昭越, 陈薇

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**指出传统的蓝藻水华治理方法中存在的问题:大规模地杀灭蓝藻,造成大量藻细胞破裂,细胞内藻毒素等有害分泌物释放到水中,引发二次污染。介绍蓝藻水华的预防性调控方法,即在水体形成水华前,通过抑制蓝藻细胞生长,将其藻类生物量始终控制在一定水平以下,避免蓝藻水华的暴发。综述了超声参数对除藻抑藻效果的影响,以及超声对藻细胞生理系统的影响,探讨超声除藻抑藻的机理,并针对以往研究存在的不足,对后续研究重点进行了展望。

**关键词:**超声波技术;预防性抑制;蓝藻水华;铜绿微囊藻

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0158-07

## Research on preventive inhibition for cyanobacteria blooms using ultrasound technology

FAN Gongduan, LIN Qian, CHEN Liru, LIN Rujing, SU Zhaoyue, CHEN Wei

(College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Problems in traditional methods for treating cyanobacteria bloom were pointed out, which is algal cells rupture will happen when killing massive cyanobacteria, and intracellular algal toxins and other harmful secretions are inevitably released to the aquatic environment, leading to the secondary pollution. Therefore, the preventive regulation method for cyanobacterial blooms was proposed in this study. Before cyanobacterial blooms happen, algae biomass was herein controlled under a certain level by inhibiting algae growth. Thus the cyanobacterial blooms were avoided. In addition, the influence of the ultrasonic parameters on the algae removal or inhibition as well as the ultrasound influence on cellular physiological system was analyzed. The mechanism of algae removal and inhibition by the ultrasound was employed. Given the existed deficiencies in previous studies, the focus of follow-up study was prospected.

**Key words:** ultrasound technology; preventive inhibition; cyanobacterial blooms; *Microcystis aeruginosa*

蓝藻水华(Cyanobacterial bloom)指在温度、光照、营养盐适宜的条件下,表层水体中蓝藻急剧增长而成为优势种的现象<sup>[1]</sup>。具有浮力或运动能力的蓝藻在水面聚集、形成浮渣的现象被称为表层水华(surface bloom),人们所称的蓝藻水华通常指表层水华,常发生在富营养化水体中<sup>[2]</sup>。形成表层水华的蓝藻是具有伪空泡、可形成高生物量的物种,典型藻种有铜绿微囊藻、鱼腥藻和束丝藻等。

蓝藻水华已成为世界性的环境问题,我国蓝藻

水华问题也日趋严重,各类水体频频发生蓝藻水华问题,包括大型湖泊、城市供水水库、城市景观湖与城市河道等。水体发生蓝藻水华会引起生态系统失衡,造成鱼类等水生生物的大量死亡<sup>[3]</sup>。有些藻类产生的有害代谢物,如土腥素、硫醇、吡啶、胺类、酮类、藻毒素等,不仅使水体产生异味,还可能通过食物链威胁人类健康,致使人体患上各种疾病,如皮肤病、胃肠疾病、肺炎及肝癌等<sup>[4]</sup>。若饮用水源出现蓝藻水华,则会影响净水厂的运行管理与供水安

基金项目:国家自然科学基金(51308123);中国博士后科学基金(2014M561856)

作者简介:范功端(1984—),男,副教授,博士,主要从事水体修复、水处理理论与技术研究。E-mail: fgdfz@fzu.edu.cn

全<sup>[5]</sup>。如今,防治蓝藻水华已成为世界性的热点、难点和前沿问题。

## 1 蓝藻水华防治新思路

### 1.1 传统的应急处理思路

蓝藻水华的根治措施是减少外源性营养盐的输入量,降低水体中氮盐、磷、盐的含量,使藻类缺失必要的营养物质而无法大量繁殖<sup>[6]</sup>,常采用截污、换水、曝气混合以及底泥疏浚等措施,但这些措施只能在短期内控制水体氮磷负荷。以往所采用的物理、化学和生物等方法大多遵循应急处理思路(图1),即大规模地杀灭蓝藻,造成大量藻细胞破裂,使细胞内容物释放到水中,部分藻类还会释放藻毒素,导致水体二次污染。这些应急处理方法有效期短,难以彻底清除蓝藻种源,蓝藻水华可能再次发生。净水厂常采用投加强氧化剂或增设除藻工艺应对蓝藻水华,如化学预氧化法、混凝剂法和气浮法等。这些方法同样可能造成藻类大量死亡,且复杂的工艺增加了制水成本。

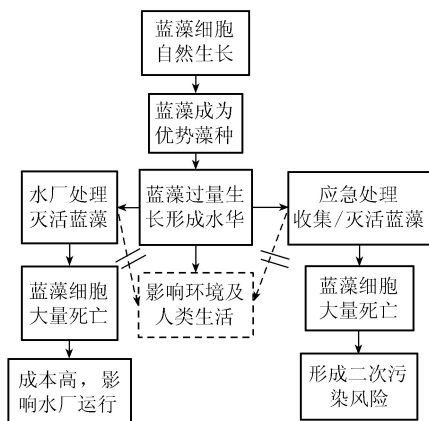


图1 蓝藻水华的水厂处理和应急处理思路

### 1.2 预防性调控方法

针对上述方法的弊端,提出了蓝藻水华的预防性调控方法(图2)。预防性调控方法指在蓝藻水华形成之前,通过抑制蓝藻细胞生长,将其生物量始终控制在一定水平以下,就可避免蓝藻水华的暴发<sup>[7]</sup>,同时也能避免二次污染等不利影响,降低环境风险,减少治理成本。

超声波技术是近几年发展起来的一种新型环境技术,在水处理领域的应用十分广泛。利用超声产生的空化作用、自由基效应等可去除水中三卤甲烷前体物、消毒后形成的消毒副产物、持久性有机污染物、内分泌干扰物、藻毒素、有害藻华和有毒有害的难降解有机物等。超声波技术具有以下优点:操作和控制相对容易,在处理中不引入其他的化学物质,反应条件温和,反应速度较快,安全、经济等,被称为

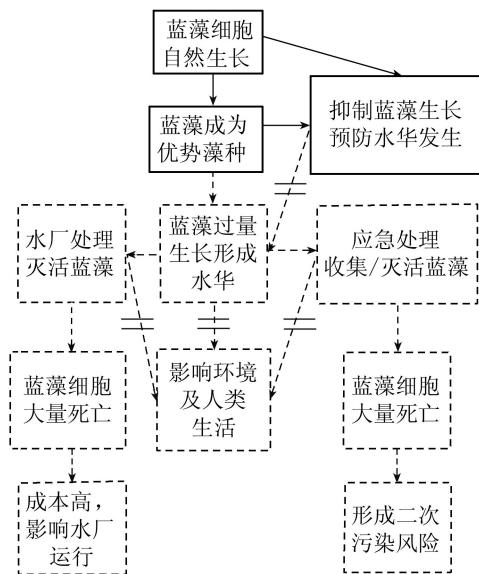


图2 蓝藻水华的预防性调控方法

“环境友好技术”<sup>[8]</sup>,可作为蓝藻水华的预防性调控技术。

## 2 超声除藻抑藻技术研究现状

超声应用于除藻、抑藻的研究集中在近10多年里,主要关注超声控制参数、除藻效果以及作用机理研究。2000年以来,日本学者<sup>[9]</sup>和韩国学者<sup>[10-11]</sup>陆续发表论文,探讨把超声作为一种直接净化技术应用于自然水体,利用超声抑制水库、湖泊等缓流水体中蓝藻水华的暴发。2003年后,我国的汤娇雯<sup>[12]</sup>、郝红伟<sup>[13-14]</sup>、张光明<sup>[15-17]</sup>等学者也相继开展了超声除藻抑藻的相关研究,超声除藻技术有了进一步的发展。

### 2.1 超声参数对除藻抑藻效果的影响

#### 2.1.1 超声频率

频率是一个重要的超声参数,因为空化阈与空化泡(cavity bubble)直径取决于超声频率<sup>[18]</sup>。游离气泡的共振频率可以通过以下公式来估算<sup>[19]</sup>:

$$f = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( p_0 + \frac{2\sigma}{a} \right) - \frac{2\sigma}{a\rho}}$$

式中: $f$ 为超声频率; $\gamma$ 为在恒定压力下的气体的热容量和体积之比; $a$ 为气泡的半径; $p_0$ 为环境压力; $\rho$ 为周围介质的密度; $\sigma$ 为周围介质的表面张力,常忽略不计。

Petrier等<sup>[20]</sup>在实验研究超声降解苯酚速度时发现,200 kHz 超声的降解速度是20 kHz 的9.8倍。因此,探索最佳的超声频率具有十分重要的应用价值。碘量法检测结果表明,在较低频率范围内(21.5 ~ 84.4 kHz),频率越低,功率越大(40 ~ 1200 W),空化作用的强度越大<sup>[21]</sup>,藻细胞的叶绿素荧光强度越弱,表明细胞光合活性越差。频率越大,产生空化泡

所需要的功率强度越大。

特定频率超声对藻类作用具有选择性,超声除藻抑藻实验得到的最佳频率值差异很大,如 580 kHz<sup>[22]</sup>、150 kHz<sup>[23]</sup>、1.7 MHz<sup>[12-13]</sup>、200 kHz<sup>[16]</sup>、80 kHz<sup>[17-24]</sup>等,目前超声的频率还未有确定的数值或范围。部分研究选用超声频率值时,只关注超声对藻类的去除效果,未考虑到实际应用时的限制,实验所采用的高频超声难以应用在实际中,因为超声频率越高,其在水中衰减越快,有效作用范围越小(仅几厘米),因此,建议采用频率相对较低(20~200kHz)的超声波。

### 2.1.2 超声功率

能耗是考察超声处理效能的指标之一,而且对实验时采用的超声设备,若超声频率不同,功率一般也不同,因此比较不同超声频率作用效果时,还应该考虑到超声功率的影响。功率越大(32~80W),反应速度越快,所需的处理时间越短,因此消耗的能量越少<sup>[17]</sup>。以生物减少量为评价指标与以效率(效率为去除率与功率密度的比值<sup>[22]</sup>)为评价指标得到的最佳频率是不同的<sup>[25]</sup>,效率决定的最优超声参数考虑了经济性。

通常采用功率密度衡量超声作用强度,功率密度指单位体积介质输送的功率,单位为 W/L, kW/L 或 W/mL。Rajasekhar 等<sup>[26]</sup>以效率评估作用效果时认为:超声功率密度越大,对藻类的抑制作用越显著。在一定的功率范围内(0~80W),随着功率的增加,空化作用存在饱和现象,当功率超过一定值时,抑藻效果就没有明显提升<sup>[14]</sup>。Wu 等<sup>[25]</sup>分析认为:功率越大,覆盖在传感器表面的空化泡就越多,超声穿透气泡后的强度衰减越大,更多的声能转化为热能,则蓝藻的生长抑制效果逐渐趋于稳定,因此,频率相同时,超声处理铜绿微囊藻时存在最佳功率值。

考虑到高强度超声能耗大,超声强度过大会使藻细胞破碎,使细胞内容物及藻毒素(部分藻类含有藻毒素)释放到水体中,增加二次污染风险,同时高强度对其他水生生物会产生较大影响。因此,实际应用时推荐选用低强度超声。

### 2.1.3 超声辐照时间

辐照时间是影响除藻效果的重要因素,能反映实际应用时的经济性。Lee 等<sup>[21]</sup>用超声处理 Senba 湖泊的蓝绿藻(Blue-Green Algae, BGA)的实验发现,超声处理 3 s 就能使 80% 的藻细胞沉降,时间延长至 30 s 时,藻细胞几乎全部沉降。碘量法实验结果表明,作用时间越长,空化作用的强度也会越大。对于自然水体藻类,短时间的超声作用效果明显。

对于常见蓝藻-铜绿微囊藻,通常采用更长的超声处理时间(0~30 min)。特定频率和功率的超声,辐照时间越长,抑制效果越好,藻细胞悬液浓度下降越快<sup>[22]</sup>,恢复初始生物量所需的时间越长,但当辐照时间大于某一值时,作用效果会逐渐趋于稳定。大多数实验结果显示,超声处理前 5 min 的处理效率较高<sup>[13, 17, 26]</sup>,如果继续增加处理时间,虽然抑藻效果在提升,但是经济性却越来越差。

### 2.1.4 超声辐照模式

超声输入能量相同时,多频次、低剂量的辐照模式对藻类的生长抑制作用更明显<sup>[11]</sup>。超声对藻细胞的作用是有时效性的,超声作用后的细胞会出现细胞体积增大、Chl-a 含量增大的应激性反应,细胞利用自身的修复能力可实现再生长,因此在细胞机能将要恢复时,对细胞再次施加超声波,能够阻断细胞继续生长分裂。汤娇雯等<sup>[12]</sup>研究超声对钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)的作用效果,采用每 3 d 辐照 4 min 时,超声处理后灌类生物量为对照组的 30.1%;而采用每 11 d 辐照 12 min 时,超声处理后灌类生物量为对照组的 60%。超声辐照模式关系到超声应用时的操作方式与能量消耗。现有研究结果认为,相较于单次高剂量的超声辐照,间歇式、短时间辐照能得到更好的除藻抑藻效果。

## 2.2 超声对藻细胞生理系统的影响

### 2.2.1 藻种与生长期

不同的藻类,由于藻细胞内部结构、形态的差异性,其对于超声作用的响应也是不同的。聚球藻(*Synechococcus*)不含气囊,超声辐照后溶液电导率变化微小,而具有气囊的铜绿微囊藻溶液的电导率急剧增大,藻细胞的丙二醛(*Malondialdehyde*, MDA)浓度明显增大,脂质过氧化作用更明显<sup>[12]</sup>。卷曲鱼腥藻因为丝状结构,相比于铜绿微囊藻和小球藻,更易受超声破坏,且胞内气囊结构强度比微囊藻弱,相同强度超声处理后,恢复初始生物量的时间较长<sup>[26]</sup>。由于小球藻不含气囊,超声作用后的细胞光密度并没有明显低于初始水平。

不同生长期的藻细胞,对超声作用的抵抗能力不同。Ahn 等<sup>[10-11]</sup>研究发现,对于培养模式为 4 h/10 h 光暗周期的铜绿微囊藻,在光照末期(第 13 小时),超声对铜绿微囊藻的生长具有最佳抑制效果,原因是大部分铜绿微囊藻在此时处于分裂阶段,藻细胞抵抗外界刺激的能力较弱。处于对数生长期的藻细胞对超声的抵抗力比延滞期的藻细胞强,因为对数期的藻细胞代谢活性高,可在短期内恢复受到的破坏;而延滞期的藻类细胞生理活性差,对外界干扰的抵抗能力弱,细胞易受到严重损害<sup>[27]</sup>。

### 2.2.2 气囊

浮游植物蓝藻的典型特征是具有气囊,气囊由中空的圆柱形囊泡堆叠而成<sup>[28]</sup>,气体能够透过气囊膜<sup>[29]</sup>,因此可调节细胞所受到的浮力,调整细胞在水柱中的位置,当气囊所受压力超过临界值时,气囊结构将会崩塌瓦解,呈扁平状<sup>[30]</sup>。Klebahn 的锤子、瓶塞和瓶子试验表明,对藻类悬液施加一定压力能够破坏气囊,使藻类沉降于容器底部。早在 1971 年,Lehmann 等<sup>[31]</sup>就利用超声产生的一系列反应,破坏铜绿微囊藻细胞内的气囊。流式细胞仪(flow cytometry, FCM)检测能够更准确地评估气囊受损与再生的情况,Jong 等<sup>[32]</sup>发现超声作用后气囊破裂的微囊藻呈现出不同的侧向散射图(side scatter)和荧光光谱,透射电子显微镜扫描图片也显示蓝藻细胞的气囊受损。

当超声频率较高时,藻类去除速率常数可以显著提高<sup>[17]</sup>。与不含气囊的聚球藻(*Synechococcus*)相比,铜绿微囊藻的生物量增量下降了 65%,所需的再生时间也更长,该现象表明共振效应影响了含气囊藻类的生长<sup>[12]</sup>。虽然功率只有 0.6 W/cm<sup>2</sup>,但实验超声频率较高(1.7 MHz),接近计算得到的含气囊藻细胞的特征频率。Rajasekhar 等<sup>[26]</sup>的实验也证实超声作用后,含气囊藻种的生长受到更明显的抑制。然而,Walsby 等<sup>[33]</sup>的实验表明,蓝藻细胞气囊的直径约为 67 nm,要求产生共振效应的频率非常大,且气囊不是球形,因此气囊的破坏机理可能不是共振效应。

### 2.2.3 光合作用系统

超声不仅破坏气囊,还会影响藻细胞光合活性。藻胆体(Phycobilisomes, PBS)是蓝藻主要的天然复合物,主要由藻胆蛋白组成<sup>[34]</sup>,藻胆蛋白复合物位于类囊体膜的表面<sup>[35]</sup>。光能量从藻蓝蛋白(Phycocyanin, PC)转移到别藻蓝蛋白上(Allophycocyanin, APC),然后到核心膜连接多肽(Coremembrane linker polypeptide, LCM),最后传递至光合体系 I 和光合体系 II 中的叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl-a)<sup>[36]</sup>。

细胞叶绿素荧光强度能够反映光合活性强弱。短时间超声处理后,绿色微囊藻(*M. viridis*)、铜绿微囊藻和取自 Senba 湖的蓝绿藻的 Chl-a 浓度下降,叶绿素荧光减弱<sup>[21]</sup>,超声处理我国太湖的蓝绿藻也发现藻样的 Chl-a 浓度下降<sup>[37]</sup>。处理后连续培养几日,实验组的 Chl-a 浓度始终低于对照组<sup>[13]</sup>,表明 Chl-a 合成速率降低,原因可能是气囊破裂损伤了类囊体膜上与 Chl-a 合成有关的酶结构,从而影响 Chl-a 的合成。

超声作用后,藻细胞的最大净光合作用速率降低<sup>[16]</sup>,藻胆蛋白荧光光谱也发生改变,表现为 LCM (685 nm) 荧光减弱,PC (650 nm) 和 APC (665 nm) 荧光增强,表明光能量被限制在藻胆蛋白内,无法从 PBS 传递到 Chl-a,进一步的光合作用受到抑制。由于三聚体或六聚体的 PC 聚合物含有中央空腔<sup>[13-14]</sup>,削弱了结构强度,而 Chl-a 位于细胞内,细胞膜在一定程度上保护了胞内色素免受影响,因此细胞吸收光谱显示 PC 峰下降的比 Chl-a 明显。荧光仪扫描结果显示 665 nm 指示的藻胆蛋白荧光峰在超声处理后减弱,表明细胞新陈代谢活性受损,FCM 检测结果也显示细胞活性减弱<sup>[32]</sup>。

### 2.2.4 藻毒素

在 19 世纪后期,人们就发现蓝藻水华会释放潜在的致命毒素。常见藻毒素,如肝毒素(Hepatotoxin)、鱼腥藻毒素-a (Anatoxin-a) 和新石房蛤毒素(Neosaxitoxin),会致使人体胞外染色体断裂<sup>[38]</sup>,对动物和人类造成急性与慢性毒害作用<sup>[39]</sup>。1996 年,巴西就发生首起人类死于微囊藻毒素的事件<sup>[40]</sup>。超声辐照引起的空化作用、自由基效应等破坏了蓝藻细胞的细胞膜/细胞壁,会加剧藻毒素的释放过程。

通过控制超声参数,可以避免藻毒素释放。用输入功率 1200 W、频率 28 kHz 的超声处理铜绿微囊藻后,控制辐照时间在 5 min 以下时,不会引起微囊藻毒素-RR (Microcystin-RR) 的释放<sup>[21]</sup>。功率增大会增加藻毒素释放的风险,维持低功率更安全,而频率对藻毒素的浓度影响不大<sup>[17]</sup>。超声作用后,对藻类持续培养 14 d 后发现,超声处理后的藻毒素仅为对照组的 16%,说明超声虽不会明显降低胞外藻毒素的浓度,但能够抑制藻毒素的释放<sup>[16, 41]</sup>。随后的研究发现,超声能够降解水体中的藻毒素,超声功率越大、辐照时间越长,藻毒素的去除率越高。Zhang 等<sup>[17]</sup>的实验结果也显示一定强度的超声作用藻细胞后,辐照时间越长,藻毒素浓度越小。

上述针对超声对藻细胞生长期、气囊、光合作用系统、藻毒素释放的研究,大多只关注超声即时作用效果或短期内的影响,较少研究超声对藻类的持续性抑制作用效果。超声作用后,若培养条件适宜,气囊可以再生<sup>[32]</sup>,藻细胞可能恢复细胞活性,继续其分裂增殖过程。因此,目前尚不清楚超声作用的时效性与实用性。

### 2.3 超声除藻抑藻机理

超声对藻类作用机理研究的主要结论为超声空化作用。超声波(频率高于 20 kHz 的声波)在水中传播时,使介质产生一系列疏密相间的周期性变形,

当超声强度高于介质的空化阈时,将引发超声空化作用,大量空化泡在短时间内崩溃破裂。在其内部和周围区域产生 100 MPa 以上的高压和 5 000 K 以上的高温<sup>[42]</sup>。空化泡破裂主要引起为机械作用和化学作用。机械作用指高速微射流和强烈的冲击波,化学作用指高温高压环境使水分子降解生成自由基( $\cdot\text{OH}$ )<sup>[43]</sup>。这些作用能破坏蓝藻细胞结构,抑制藻细胞分裂增殖,达到治理蓝藻水华的目的<sup>[42]</sup>。

Broekman 等<sup>[44]</sup>指出超声空化作用产生的高温、高压环境,可使藻类等生物体进入程序性细胞死亡过程(programmed cell death, PCD),从而控制藻类的生长。郝宏伟等<sup>[13-14]</sup>研究认为超声对藻类的抑制作用主要由空化作用引起,200 kHz 是抑制蓝藻生长的最佳频率,空化作用随着功率的增加会出现饱和现象。Joyce 等<sup>[22]</sup>认为空化泡的产生与破裂是藻类灭活的驱动力,频率和功率会影响空化泡的产生。频率越大,要求产生空化泡的功率强度越大,产生的自由基数量也越多,自由基会破坏细胞壁的化学结构,Wu 等<sup>[25]</sup>认为自由基效应对藻类的抑制作用更大,但是张光明等<sup>[17]</sup>的实验得出了不同结论,向水体投加自由基清除剂后,藻类去除率没有变小,因此认为自由基效应不明显。

近年来市场上出现了多种超声除藻设备,设备说明书指出其是利用超声引起的空化作用破坏藻细胞壁、细胞膜,使得藻细胞破碎而死亡。Inman<sup>[45]</sup>用功率 40 W、频率 28 kHz 的市售超声装置处理沉积湖的水华,认为空化作用不是超声除藻的主要原因,也没有证据表明水体中发生了空化作用。Lüring 等<sup>[46]</sup>的实地研究也得出了类似的结论,超声能抑制卷曲鱼腥藻和纳氏拟筒胞藻的生长,但是实验检测超声设备的功率密度只有  $8.5 \times 10^{-4} \text{ W/mL}$ ,如此低强度的超声不足以在水体中引起空化作用,因此不能笼统地将超声对藻类的作用机理概括为空化作用,需要对其作用机理深入研究探讨。

超声作用后藻细胞内部结构、藻细胞活性、细胞膜完整性、光合作用系统等细胞生理特征变化的研究未深入,更难以说明超声抑制水华蓝藻生长的机理。因此,后续研究还有必要利用现代先进的分析方法与技术,在细胞、分子、基因等水平上研究超声作用后藻细胞生理特征变化情况,揭示超声抑制藻类生长的作用机理。

#### 2.4 超声波除藻技术实际应用情况

过去 10 多年,一些研究者尝试将超声波技术用于治理实际水体中的藻类。Nakano 等<sup>[9]</sup>将超声波技术(200 kHz, 200 W)与水射流结合构建超声集成

系统用于控制 Senba 湖(体积 36.5 万  $\text{m}^3$ )蓝藻水华,为期 2 年的水质监测结果表明,启用超声集成系统后,Chl-a、SS 和透明度等与水华相关的指标均维持在较低水平,COD、磷含量等水质指标也有所降低,湖泊水质得到改善。

Ahn 等<sup>[10-11]</sup>在实验室研究的基础上,组建超声设备(22 kHz, 630 W)与水泵的组合装置,用于 9 000  $\text{m}^3$  富营养化池塘中蓝藻的处理,效果显著,研究发现组合装置可以选择性处理蓝藻,在对比试验中,实验组池塘的蓝藻生长受到明显抑制,Chl-a 浓度只有对照组的 61% 和 53%。Ding 等<sup>[47]</sup>在太湖进行的实验结果显示,超声(20 kHz, 40 W)辐照后水体藻类密度由  $10^7$  个/mL 降至  $10^5$  个/mL。Fan 等<sup>[48]</sup>研究团队通过实验室优化超声参数后将超声波安装于浮船上,用于三峡库区小江蓬溪河段水体藻类的治理,通过 2 h 的治理,藻密度由  $(1.10 \pm 0.02) \times 10^7$  个/mL 降至  $(2.1 \pm 0.1) \times 10^5$  个/mL,活体 Chl-a 浓度下降到原来的 13.8%。

综合分析上述应用研究可知,超声波技术可作为解决富营养化湖泊藻类过量繁殖的方法之一。但采用该方法对其他水生动植物的影响、能耗情况等还未有报道。因此,后期研究还应对水质进行长期跟踪监测,研究生态系统的变化情况,重点关注超声对水体中其他水生动植物的影响。相关研究主要关注作用效果,但所选用的超声参数范围小,因此后期研究还应根据实际水体的优势藻种确定最佳的超声波参数,以使作用效果最佳并且最节能。

### 3 结论与建议

综合以上,得出如下结论:

- a. 利用超声预防性控制蓝藻水华,可避免大量藻细胞破裂,细胞内藻毒素等有害分泌物释放到水中而造成二次污染。
- b. 超声频率、功率和辐照时间是影响超声抑藻效果的主要因素,研究表明存在最佳参数组合使除藻效果最佳且能耗最低。
- c. 超声波能够破坏藻细胞的气囊,使藻类失去浮力而沉降,抑制细胞生长。超声会影响藻细胞光合活性,破坏藻胆蛋白结构,抑制光合作用。超声辐照可能加剧藻毒素的释放过程,但通过设定合适的超声参数,可以控制藻毒素的释放量,一定强度的超声还能够降解水体中的藻毒素。
- d. 超声波组合装置能够有效抑制自然水体中的藻类生长,并可选择性地控制蓝藻。超声处理还能在一定程度上改善富营养化水体水质,降低水体氮磷负荷,可用于治理富营养化湖泊蓝藻水华问题。

为了更好地使超声用于水体藻华的控制,还应进行如下研究:

**a.** 不同藻种对超声参数要求不同,为达到除藻效果最佳且能耗最低,需进一步研究确定不同藻种的超声控制参数数值或范围。

**b.** 超声对蓝藻的影响研究大多只关注超声即时作用效果或短期内的影响,需加强研究超声对藻类的持续性抑制作用效果。

**c.** 建议从超声作用对藻细胞生理特征影响方面着手,研究超声作用对藻细胞形态、生理活性、抗氧化酶系统及光合作用系统的影响,揭示超声除藻抑藻机理,并探究超声抑制藻细胞生长而膜损伤小、细胞内容物不释放到水体中的超声组合参数范围,为超声预防性抑藻技术在水体中的大规模应用提供理论依据。

### 参考文献:

[ 1 ] CHORUS I, BARTRAM J. Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management [ M ]. London: E & FN Spon, 1999.

[ 2 ] HUDNELL H K. The state of U S freshwater harmful algal blooms assessments, policy and legislation [ J ]. *Toxicol*, 2010, 55(5) : 1024-1034.

[ 3 ] SAN D M, AZANZA R V, VILLANOY C L, et al. Eutrophic waters, algal bloom and fish kill in fish farming areas in Bolinao, Pangasinan, Philippines [ J ]. *Mar Pollut Bull*, 2008, 57(6-12) : 295-301.

[ 4 ] BARTRAM J, REES G E. Guidelines for safe recreational water environments: coastal and fresh waters [ M ]. Geneva: World Health Organization, 2003.

[ 5 ] JOH G, CHOI Y S, LEE J S A J. Problematic algae in the sedimentation and filtration process of water treatment plants [ J ]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-A*, 2011, 60(4) : 219-230.

[ 6 ] CHOI S K, LEE J Y, KWON D Y, et al. Settling characteristics of problem algae in the water treatment process [ J ]. *Water Sci Technol*, 2006, 53(7) : 113-119.

[ 7 ] 陶益. UV-C 辐照对典型藻类生长抑制效果与机理研究 [ D ]. 北京: 清华大学, 2010.

[ 8 ] ADEWUYI Y G. SONOCHEMISTRY: environmental science and engineering applications [ J ]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2001, 40 ( 22 ) : 4681-4715.

[ 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(24) : 4941-4946.

[ 10 ] AHN C Y, JOUNG H, CHOI A, et al. Selective control of cyanobacteria in eutrophic pond by a combined device of

ultrasonication and water pumps [ J ]. *Environ Technol*, 2007, 28(4) : 371-379.

[ 11 ] AHN C, PARK M, JOUNG S, et al. Growth inhibition of Cyanobacteria by ultrasonic radiation: laboratory and enclosure studies [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(13) : 3031-3037.

[ 12 ] TANG J, WU Q, HAO H, et al. Growth inhibition of the cyanobacterium spirulina ( *Arthrospira* ) platensis by 1.7 MHz ultrasonic irradiation [ J ]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15(1) : 37-43.

[ 13 ] HAO H, WU M, CHEN Y, et al. Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz [ J ]. *Journal of Environmental Science and Health&Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2004, 39(6) : 1435-1446.

[ 14 ] HAO H, WU M, CHEN Y, et al. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation [ J ]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, 33(34) : 151-156.

[ 15 ] ZHANG G, ZHANG P, FAN M. Ultrasound-enhanced coagulation for *Microcystis aeruginosa* removal [ J ]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, 16(3) : 334-338.

[ 16 ] ZHANG G, ZHANG P, LIU H, et al. Ultrasonic damages on cyanobacterial photosynthesis [ J ]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13(6) : 501-505.

[ 17 ] ZHANG G, ZHANG P, WANG B, et al. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa* [ J ]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13(5) : 446-450.

[ 18 ] MASON T J, LORIMER J P. Sonochemistry: theory, applications and uses of ultrasound in chemistry [ J ]. *Endeavour*, 1989, 13(3) : 143-144.

[ 19 ] PHILLIPS D, CHEN X, BAGGS R, et al. Acoustic backscatter properties of the particle/bubble ultrasound contrast agent [ J ]. *Ultrasonics*, 1998, 36(8) : 883-892.

[ 20 ] PETRIER C, JIANG Y, LAMY M O. Ultrasound and environment: sonochemical destruction of chloroaromatic derivatives [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 1998, 32(9) : 1316-1318.

[ 21 ] LEE T J, NAKANO K, MASTUMARA M. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control [ J ]. *Environ Technol*, 2001, 22(4) : 383-390.

[ 22 ] JOYCE E M, WU X, MASON T J. Effect of ultrasonic frequency and power on algae suspensions [ J ]. *J Environ Sci Health Part A: Tox Hazard Subst Environ Eng*, 2010, 45(7) : 863-866.

[ 23 ] MA B, CHEN Y, HAO H, et al. Influence of ultrasonic field on microcystins produced by bloom-forming algae [ J ]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2005, 41(2/3) : 197-201.

[ 24 ] 陈杰, 王波, 张光明, 等. 超声强化混凝去除蓝藻实验研究 [ J ]. *环境工程学报*, 2007(3) : 66-69. ( CHEN Jie,

- WANG Bo, ZHANG Guangming, et al. Enhancement of ultrasonic coagulation on removal of algae [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007 (3): 66-69. (in Chinese)
- [25] WU X, JOYCE E M, MASON T J. Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on *Microcystis aeruginosa* at different ultrasonic frequencies [J]. Water Research, 2012, 46(9): 2851-2858.
- [26] RAJASEKHAR P, FAN L, NGUYEN T, et al. Impact of sonication at 20 kHz on *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena circinalis* and *Chlorella* sp. [J]. Water Research, 2012, 46(5): 1473-1481.
- [27] 张光明, 常爱敏, 张盼月. 超声水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [28] BOWEN C C, JENSEN T E. Tengen. Blue-Green Algae: fine structure of the gas vacuoles [J]. Science, 1965, 147(3664): 1460-1462.
- [29] WALSBY A E. The permeability of blue-green algal vacuole membranes to gas [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1969, 173(1031): 235-255.
- [30] HAYES P K, WALSBY. The inverse correlation between width and strength of gas vesicles in cyanobacteria [J]. British Phycological Journal, 1986, 21(2): 191-197.
- [31] LEHMANN H, JOST M. Kinetics of the assembly of gas vacuoles in the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Archives of Microbiology, 1971, 79(1): 59-68.
- [32] JONG LEE T, NAKANO K, MATSUMURA M. A new method for the rapid evaluation of gas vacuoles regeneration and viability of cyanobacteria by flow cytometry [J]. Biotechnology Letters, 2000, 22(23): 1833-1838.
- [33] WALSBY A E. The permeability of heterocysts to the gases nitrogen and oxygen [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1985, 226(1244): 345-366.
- [34] LARKUM A W D, WEYRAUCH S K. *Photosynthetic* action spectra and light-harvesting in *Griffithsia monilis* (*Rhodophyta*) [J]. Photochemistry and Photobiology, 1977, 25(1): 65-72.
- [35] MULLINEAUX C W. Excitation energy transfer from *Phycobilisomes* to *Photosystem I* in a cyanobacterial mutant lacking *Photosystem II* [J]. Biochimica et Biophysica Acta: Bioenergetics, 1994, 1184(1): 71-77.
- [36] HUBER R. A structural basis of light energy and electron transfer in biology [J]. Bioscience Reports, 1989, 9(6): 635-673.
- [37] QIU Y J, RONG F, YANG F, et al. Ultrasound frequency impacts on the removal of indigenous Blue-Green Algae taken from Lake Taihu [J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 3758-3762.
- [38] REPAVICH W M, SONZOGNI W C, STANDRIDGE J H, et al. Cyanobacteria (blue-green algae) in Wisconsin waters: acute and chronic toxicity [J]. Water Research, 1990, 24(2): 225-231.
- [39] CARMICHAEL W W. Health effects of toxin-producing Cyanobacteria: "The CyanoHABs" [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2001, 7(5): 1393-1407.
- [40] BARRETO V, LIRA V, FIGUEIREDO J, et al. "Caruaru syndrome": a previously undescribed form of acute toxic liver disease in humans caused by microcystin LR with a high lethality rate [J]. Hepatology, 1996, 24(4): 244.
- [41] SONG W, TESHIBA T, REIN K, et al. Ultrasonically induced degradation and detoxification of Microcystin-LR (cyanobacterial toxin) [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(16): 6300-6305.
- [42] PHULL S S, NEWMAN A P, LORIMER J P, et al. The development and evaluation of ultrasound in the biocidal treatment of water [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 1997, 4(2): 157-164.
- [43] MASON T J, COBLEY A J, GRAVES J E, et al. New evidence for the inverse dependence of mechanical and chemical effects on the frequency of ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(1): 226-230.
- [44] BROEKMAN S, POHLMANN O, BEARDWOOD E S, et al. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2010, 17(6): 1041-1048.
- [45] INMAN D A. Ultrasonic treatment of Algae [D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2004.
- [46] LÜRLING M, TOLMAN Y. Beating the blues: Is there any music in fighting cyanobacteria with ultrasound? [J]. Water Research, 2014, 66: 361-373.
- [47] DING Y, PU Y, YIN L, et al. Parameters optimization of ultrasound algae removal technology and bloom removal study in Taihu Lake [J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(2): 354-358.
- [48] FAN G, ZHANG Z, LUO J, et al. Parameter optimization of ultrasound technology for algae removal and its application in pengxi river of Three Gorges Reservoir [J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, 26(4): 1165-1170.

(收稿日期: 2015-06-20 编辑: 徐娟)