

# 超声波除藻技术进展及其应用前景

赵锐<sup>1</sup> 赵嘉嘉<sup>2</sup>

(1. 珠海水资源中心, 珠海 519000;  
2. 天津大学, 天津 300000)

**【摘要】** 近年来,以蓝藻水华为表征的水体富营养化已逐渐成为全球范围内湖泊和水库面临的主要生态环境问题。去除和控制藻类水华,特别是产毒蓝藻水华已经成为湖泊和水库生态修复的关键环节。目前,国内外学者研究了各种控藻技术来治理蓝藻水华,主要包括:化学杀藻法、化学絮凝法、黏土凝聚法和超声辐射法等。其中,超声波控(除)藻属于环境友好型技术,近年来越来越受到国内外的普遍关注,并逐渐应用于藻类水华应急处理。本文介绍了超声波除藻技术的进展及应用前景。

**【关键词】** 超声波; 控藻; 伪空胞; 生理活性

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-0131(2017)05-0028-04

## Progress of ultrasound algae removal technology and application prospect thereof

ZHAO Rui<sup>1</sup>, ZHAO Jiayi<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Water Resources Center, Zhuhai 519000, China;  
2. Tianjin University, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** In recent years, water eutrophication characterized by cyanobacterial bloom has gradually become a main ecological environment problem of lakes and resources all over the world. Removal and control of cyanobacterial bloom, especially toxin-producing cyanobacterial bloom, has become a key link in lake and reservoir ecological restoration. Currently, domestic and foreign scholars study a variety of alga control technologies to control cyanobacterial bloom, mainly including the follows: chemical alga killing method, chemical flocculation method, clay condensation method, ultrasonic radiation method, etc. Wherein, ultrasonic algae control (removal) belongs to an environmental-friendly technology. More and more widespread attention is paid to it at home and abroad in recent years. It is gradually applied to algae bloom emergency treatment. The progress and application prospect of ultrasound alage removal technology are introduced in the paper.

**Key words:** ultrasound; algae control; gas vesicle; physiological activity

近年来,以蓝藻水华为表征的水体富营养化已逐渐成为全球范围内湖泊和水库面临的主要生态环境问题。水体蓝藻如果异常增殖,覆盖水面,将导致水体浑浊,并恶化水质,散发腥臭味,影响周围人类生活,而且在夜间大量消耗水体中的溶解氧,易使鱼类缺氧死亡,

特别是产毒蓝藻株释放的毒素进一步毒害水生动物,造成动物器官损伤和死亡以及由此产生的藻毒素污染等问题,并可能随食物链积累至人体,对水生生态系统和人类健康造成巨大危害,水源地如果发生藻华会直接影响饮用水安全。因此,去除和控制藻类水华,特别

是产毒蓝藻水华已经成为湖泊和水库生态修复的关键环节。

目前,国内外学者研究了各种控藻技术来治理蓝藻水华,主要包括化学杀藻法、化学絮凝法、黏土凝聚法和超声辐射法等。其中,超声波被认为是一种环境友好型技术,具有便于引进自动化操作技术、无化学药物参与、反应温和、速度快、无二次污染等优点。研究表明超声波可有效地抑制藻类生长,对具伪空胞的蓝藻细胞去除效果尤为明显。因此,超声波控藻技术开始逐渐应用到蓝藻水华应急处理中<sup>[1]</sup>。

超声波主要通过空化泡共振效应、高温裂解效应、自由基氧化效应和微射流剪切效应这四种物理化学效应对藻类生理活性和细胞结构产生影响<sup>[2]</sup>。超声波除藻效果取决于功率和频率这两个关键参数。

## 1 超声波对藻类细胞生理活性的影响

### 1.1 超声波对藻类酶活性影响

超声波辐射是人为设置的环境胁迫因子,具有多种生物学效应。最明显的就是破裂细胞介质中的气泡并形成空化作用,产生大量超氧离子( $O_2^-$ )、羟基离子( $OH^-$ )和过氧化氢( $H_2O_2$ )等活性氧(ROS)分子<sup>[3-4]</sup>。活性氧水平升高会导致水体藻细胞细胞膜脂过氧化、蛋白质变性和核酸突变等。为了抵御氧化胁迫,蓝藻在进化过程中形成了一系列抗氧化防御体系。其中合成超氧化物歧化酶、过氧化氢酶是两种最重要的抗氧化酶防御机制。万莉等<sup>[5]</sup>利用超声波(40W)处理200mL铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)悬浮液20min后发现,超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和ATP酶活性( $Na^+/K^+$ -ATPase、 $Mg_2^+$ -ATPase、 $Ca_2^+$ -ATPase)均表现为先升后降的趋势,超氧化物歧化酶升高后迅速降低到对照组以下,过氧化氢酶活性始终大于对照组。Chen等<sup>[6]</sup>研究发现超声辐射60s后,紫球藻细胞中SOD活力增加了49.8%。Al-Hamdani等<sup>[7]</sup>用20kHz,16~18W的超声波辐射极大螺旋藻(*Spirulina maxima*)5s后,发现藻细胞SOD活性下降。以上研究均表明,超声波辐射会导致活性氧升高,当藻类细胞内的抗氧

化防御系统无法清除细胞内的活性氧时,就会引起细胞损伤并死亡。

### 1.2 超声波对藻类光合作用影响

光合作用是藻类获得自身生长所需能量,维持各项生命活动的必要途径。藻类光合作用获取光能的载体是叶绿素和藻胆蛋白。超声波空化产生的高温裂解效应和自由基氧化效应可破坏这些光合色素,降低光能获取能力,从而抑制光合作用,最终导致藻细胞死亡。Zhang等<sup>[8]</sup>研究了低频超声波(频率25kHz,强度0.32W/mL)作用对微囊藻叶绿素a、藻胆蛋白的含量和光合作用放氧速率的影响,发现在超声波作用5min后微囊藻细胞丰度下降10.8%,叶绿素a的含量下降21.35%,藻青蛋白的含量下降44.8%,光合作用产氧速率下降44.8%。Tang等<sup>[9]</sup>研究高频超声波(频率1.7MHz,强度0.6W/cm<sup>2</sup>)对墩顶螺旋藻光合作用活性的影响,发现超声波作用5min后藻胆蛋白的含量下降了40%,叶绿素a的含量下降了25%,光合作用产氧速率下降了49%。超声波对藻胆蛋白的破坏程度远比叶绿素a大,这可能是因为叶绿素a位于类囊体片层内,类囊体膜对其起到了物理屏障的作用。上述研究均表明,超声波对藻类细胞光合活性有强烈的抑制作用。

## 2 超声波对藻类细胞结构的影响

### 2.1 超声波对藻类细胞膜/细胞壁的影响

超声波空化作用产生的高温裂解效应、自由基氧化效应及机械剪切效应还会破坏藻细胞的细胞壁或细胞膜结构,导致藻细胞破裂。Tang等<sup>[10]</sup>和Chen等<sup>[6]</sup>研究超声波对铜绿微囊藻细胞膜透性的影响,发现超声波会引起铜绿微囊藻细胞膜通透性增强。Purcell等<sup>[11]</sup>使用超声强度为0.023~0.031W/mL,频率为20kHz、582kHz、862kHz和1144kHz的超声波分别处理铜绿微囊藻、水华束丝藻、直链藻、栅藻8.6min后发现,超声波辐射能使藻类细胞膜和细胞壁破裂,且不同形态的细胞结构对超声波敏感度不同。丝状藻(水华束丝藻、直链藻)对超声波的敏感度要比单细胞结构的

藻强,且细胞结构的破坏处主要位于连接处。同时超声波频率对丝状藻的藻细胞破坏程度更大。直链藻在低频 20kHz 时细胞壁破损相当严重,而水华束丝藻在 862kHz 和 1144kHz 时细胞壁破损较严重,这主要是由于不同种类藻细胞的细胞壁结构差异造成的。

## 2.2 超声波对蓝藻细胞伪空胞的影响

蓝藻可通过细胞内的伪空胞调节自身浮力大小,并根据自身需要在水柱中垂直迁移以获取光照和营养盐。超声波能使伪空胞产生共振,使其崩溃,进而减弱浮力调节能力,降低光照和营养盐的可获得性,抑制其正常生长<sup>[12]</sup>。陈矜等<sup>[13]</sup>根据形成水华的浮游蓝藻内部具有伪空胞的根本特征,提出了利用合适的超声波驱动伪空胞脉动,实现低功率超声控制和杀灭蓝藻的目的。初步的数值计算表明,超声作用的效果密切依赖于浮游蓝藻伪空胞的内部结构参数,伪空胞中的非气态物质越多,超声作用越小,不易形成大的伪空胞脉动。为了破坏伪空胞,需要供给更大的超声能量。只有在共振状态下,才有可能实现低功率超声驱动蓝藻伪空胞形成大幅脉动,进而达到破坏伪空胞的目的。这些为低能耗超声控制和灭杀浮游蓝绿藻提供了理论基础。Tang 等<sup>[10]</sup>研究了两种不同蓝藻(具伪空胞的铜绿微囊藻和不具伪空胞的聚球藻)在超声波(0.6W/cm<sup>2</sup>, 1.7MHz)处理后的效果,结果发现经超声波处理后的铜绿微囊藻细胞增长率下降 65%,而同样经超声波处理的聚球藻细胞增长率与对照组基本相同。Heiner Lehmann 和 Michael Jost<sup>[14]</sup>利用负染色技术和冰冻刻蚀技术在透射电镜下观察藻细胞的超微结构也发现类似现象,经超声波照射后铜绿微囊藻细胞内伪空胞数量大量减少,但 24h 后又开始恢复。

## 3 功率/频率对超声波控(除)藻的影响

不同功率和频率影响超声波除藻效果。Zhang 等<sup>[15]</sup>研究发现,较高的超声波功率和频率加快了藻细胞去除速率,但当功率高于 48W 时,毒素释放明显增加,因此将功率设定在 48W 以下是必要选择。Yang 等<sup>[16]</sup>研究发现在同样超声波强度,不同超声波频率的

辐射条件下,水中产生的羟基自由基浓度顺序为: 354 > 620 > 803 > 206 > 1062kHz。陈龙甫等<sup>[2]</sup>认为,超声波频率介于 300 ~ 600kHz 之间时,其灭活机制可能以自由基氧化效应为主;在高频范围(1.3 ~ 2.16MHz)内,其灭活机制可能以空化泡共振效应破坏气泡为主;在低频范围(20 ~ 100kHz)内,可能主要依赖微射流的机械剪切作用以及热裂解作用。Rajasekhar 等(2012)研究了相同频率(20kHz),不同强度(0.043W/mL, 0.085W/mL, 0.139W/mL, 0.186W/mL 和 0.32W/mL)的超声波去除微囊藻的效果,结果表明,微囊藻在前 5min 内就可以达到最大去除效果,之后趋于稳定,且超声波强度越大稳定后的去除率越大。由此可见,超声波的频率/功率是影响超声波除藻效果的关键因素,可以通过调节超声波的频率/功率来提高超声波的除藻效果。

## 4 超声波除藻的安全性评价

超声波作为一种新型的藻类水华应急处理技术,其是否会引有毒蓝藻的毒素释放以及对生态系统产生负面影响一直备受关注,也直接关系到超声波能否进行大规模运用。藻毒素是藻类产生的次级代谢产物,当藻细胞死亡或破裂后其会释放到水体中并严重影响饮用水水质安全。微囊藻毒素的毒性主要通过 ADDA 结构进行表达。Song 等研究认为超声波对藻毒素的去除主要依赖羟自由基攻击 ADDA 结构的苯环以及不饱和 C=C,从而有效的破坏藻毒素<sup>[16-17]</sup>。Ma 等<sup>[18]</sup>研究了相同频率(20kHz)不同功率(0.075W/mL, 0.15W/mL, 0.225W/mL)超声波处理下水体中微囊藻毒素释放情况,结果表明,在低功率条件下,超声波处理 20min 后水体中的微囊藻毒素为原来的 5 倍;而在 0.15W/mL 和 0.225W/mL 的超声波处理下,5min 后水体中的微囊藻毒素分别下降到原来的 12% 和 4%。Rajasekha 等(2012)研究也发现较高功率的超声波有利于藻毒素的降解。因此,超声波功率对藻毒素有明显的降解作用,超声功率越大,藻毒素降解作用越大,可以通过适当调节超声功率而降低水体中藻毒素的含量。此外,储昭升等<sup>[19]</sup>研究发现,低强度(20W)定向发射超声波

可以对藻类生长产生抑制作用,而对水体浮游动物、鱼类和沉水植物等其他主要水生生物不产生明显影响。因此,超声波可以作为一种安全、清洁的技术应用于藻华应急处理。

## 5 展 望

过去数十年,超声波控藻技术已被广泛研究。它可以通过破坏蓝藻细胞的超微结构影响其光合作用和细胞活性,抑制细胞的生长并导致细胞死亡。超声波可选择性地去除一些蓝藻(例如:铜绿微囊藻、鱼腥藻),并能降解蓝藻毒素,且对生态系统影响较小。基于以上原因,超声波除藻技术的应用前景广泛。但目前超声波除藻研究大部分集中于实验室或单个藻种小规模研究,针对野外的研究相对较少。太湖曾试运行“常州1号”超声波除藻船,但控藻能力有限,且可能因扰动底泥而引起“湖泛”。现阶段超声波除藻技术研发方向主要有两个:一是针对存在伪空胞的水华蓝藻,重点研发能高效产生空化效应的超声波设备;二是针对其他藻类,主要集中于声强对藻类生理活性的影响和细胞结构的破坏作用。◆

### 参考文献

- [1] WANG ZH, NIE XP, YUE WJ, LI X. Physiological responses of three marine microalgae exposed to cypermethrin [J]. *Environmental Toxicology*, 2012, 27: 563-572.
- [2] 陈龙甫, 姚娟娟, 张智, 等. 超声波除藻的机制以及安全性研究进展[J]. *四川环境*, 2014, 33(1): 150-153.
- [3] CIAWI E, RAE J, ASHOKKUMAR M, et al. Determination of temperatures within acoustically generated bubbles in aqueous solutions at different ultrasound frequencies [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(27): 13656-13660.
- [4] KANTHALE PM, ASHOKKUMAR M, GRIESER F. Estimation of cavitation bubble temperatures in an ionic liquid [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(50): 18461-18463.
- [5] 万莉, 邵路路, 陆开宏, 等. 超声波对铜绿微囊藻超微结构和生理特性的影响[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(3): 516-522.
- [6] CHEN B, HUANG J, WANG J et al. Ultrasound effects on the antioxidant defense systems of *Porphyridium cruentum* [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 61(1): 88-92.
- [7] AL-HAMDANI S, BURNETT C, DURRANT G. Effect of low-dose ultrasonic treatment on *Spirulina maxima* [J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 19(1): 17-28.
- [8] ZHANG G, ZHANG P, LIU H, et al. Ultrasonic damages on cyanobacterial photosynthesis [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13(6): 501-505.
- [9] TANG JW, WU QY, HAO HW, et al. Growth inhibition of the cyanobacterium *Spirulina (Arthrospira) platensis* by 1.7 MHz ultrasonic irradiation [J]. *J Appl Phycol*, 2003, 15(1): 37-43.
- [10] TANG JW, WU QY, HAO HW, et al. Effect of 1.7 MHz ultrasound on a gas-vacuolate cyanobacterium and gas-vacuolate negative cyanobacterium [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, 36(2): 115-121.
- [11] PURCELL D. Control of algal growth in reservoirs with ultrasound [D]. Engleland: Cranfield University, 2009: 113-136.
- [12] HAO HW, WU MS, CHEN YF, TANG JW, WU QY. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, (33): 151-156.
- [13] 陈矜, 陈伟中. 超声波对浮游蓝藻的作用[C]//中国声学学会, 2009年功率超声论文集, 2009: 58-61.
- [14] LHANN H, JOST M. Kinetics of the assembly of gas vacuoles in the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* Kuetz. emend. Elekin [J]. *Arch. Mikrobiol*, 1971, (79): 59-68.
- [15] ZHANG GM, ZHANG PY, WANG B, LIU H. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, (13): 446-450.
- [16] YANG LM, SOSTARIC A. Effect of ultrasound frequency on pulsed sonolytic degradation of Octylbenzene Sulfonic Acid [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2008, 112(3): 852-858.
- [17] SONG W, Weihua, TESHIBA, et al. Ultrasonically induced degradation and detoxification of Microcystin-LR (Cyanobacterial Toxin) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(16): 6300-6305.
- [18] SONG W, CRUZ A A, REIN K, et al. Ultrasonically induced degradation of Microcystin-LR and -RR: Identification of Products, Effect of pH, Formation and Destruction of Peroxides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(12): 3941-3946.
- [19] MA B Z, CHEN Y F, HAO H W, 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.
- [20] 储昭升, 庞燕, 郑朔芳, 等. 超声波控藻及对水生生态安全的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(7): 1135-1139.