

陈贺林,李芸,储昭升,等. 超声波控藻技术现状及研究进展[J]. 环境工程技术学报,2020,10(1):72-78.

CHEN H L, LI Y, CHU Z S, et al. Present situation and research progress of ultrasonic algae control technology[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(1): 72-78.

超声波控藻技术现状及研究进展

陈贺林^{1,2}, 李芸¹, 储昭升^{1*}, 叶碧碧¹, 李国宏^{1,2}

1. 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 中国环境科学研究院

2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院

摘要 超声波控藻技术具有设备简单、经济性好、无二次污染及管理方便等优点,具有很大的发展潜力和广阔的应用前景。综述了超声波控藻技术的基本原理、控藻效果影响因素、超声波对水生态的影响及超声波与其他技术联用的控藻效果。采用超声波技术控藻时,超声波强度越大,耗能就越高,经济性也越差,且超声波强度过高会抑制水生生物的生长;从控藻效果、安全性和经济性等方面综合考虑,低强度超声波更适用于蓝藻水华控制。超声波与其他控藻技术联用可以提高控藻效率,低强度超声波与其他技术联用将是今后超声波控藻技术发展的方向。

关键词 超声波;控藻;蓝藻水华;水生态

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2020)01-0072-07 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20190032

Present situation and research progress of ultrasonic algae control technology

CHEN Helin^{1,2}, LI Yun¹, CHU Zhaosheng^{1*}, YE Bibi¹, LI Guohong^{1,2}

1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological

Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology

Abstract Ultrasonic algae control technology has great development potential and broad application prospects with the advantages of simple equipment, economical efficiency, without secondary pollution and simple management. The basic principles of ultrasonic algae control technology, the factors affecting the efficiency of algae control by ultrasound, the impact of ultrasound on water ecological environment and the algae removal efficiency of ultrasound technology combined with other technologies were reviewed. The results showed that in the case of ultrasonic algae control, the higher the intensity, the greater the energy consumption and the more the cost. Moreover, the excessive power could inhibit the growth of aquatic organisms. Considering the removal efficiency, safety and economy of algae control, the low-power ultrasonic technology was more suitable for cyanobacterial bloom control. At the same time, the combination of ultrasound and other algae control technologies could improve the efficiency of algae removal, which would be a development direction of ultrasonic control algae technology in the future.

Key words ultrasound; algae control; cyanobacterial blooms; water ecology

水体富营养化是指湖泊等水体接纳过量的氮、磷等营养物质使藻类及其他水生生物异常繁殖,水体溶解氧浓度和透明度降低,水质恶化的现象^[1]。水体富营养化带来的突出问题是蓝藻水华的暴发。蓝藻水华常会引发水体缺氧与出现异味、供水处理

系统堵塞等问题,且一些蓝藻产生的毒素对水生生物、家畜及人类健康存在极大的威胁^[2-4]。因此,如何控制和消除富营养化水体中有害藻类的爆发性增长是生态学和环境科学领域的重要任务。

目前控制蓝藻水华的方法有生物方法、化学方

收稿日期:2019-02-27

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401-003)

作者简介:陈贺林(1993—),男,硕士研究生,研究方向为蓝藻水华控制,1824631844@qq.com

* 责任作者:储昭升(1973—),男,研究员,博士,长期从事湖泊富营养化研究,chuhs@craes.org.cn

法、物理方法等。生物方法主要包括水生植物抑藻、滤食性鱼类抑藻和微生物抑藻等。邢旭文等^[5]用覆盖水面 20% 面积的美人蕉浮岛净化水体,该浮岛对总氮、总磷、化学需氧量及叶绿素 a (Chla) 的去除率分别达 72%、82%、31% 和 56%;刘建康等^[6]在武汉东湖围隔内放养以浮游生物为食的鲢、鳙鱼,有效遏制了微囊藻水华的暴发。生物方法具有成本低、二次污染风险低等优点,多用于营养盐削减后湖库水质的改善。但生物方法控藻周期长,在蓝藻水华大规模暴发时无法作为应急处理措施,只能作为长效辅助措施;该方法的应用可能会引进新的物种,破坏生物链,如利用水葫芦控藻可能会导致水葫芦的大量繁殖,破坏水生生态系统。

化学方法主要包括化学钝化法、铜制剂法和除草剂等。Jacoby 等^[7]在美国 Green 湖投放 181 t 明矾和 76.5 t 铝酸钠钝化水体营养盐,明显抑制了藻类生长,使湖水透明度由 1.9 m 升至 6.1 m;缪柳等^[8]采用硫酸铜处理水华水体,使 Chla 浓度从 298.98 mg/m³ 降至 40.71 mg/m³。化学方法具有除藻速度快、效果明显的优点,缺点是易造成二次污染,如采用铜制剂法控藻时,有毒的重金属铜可能会在底泥中大量富集,对环境造成新的危害^[9]。

物理方法包括超声波控藻、调水稀释控藻、遮光控藻、改变水体水力学控藻、机械控藻等。Hosper 等^[10]在费吕沃湖采用调水稀释的方法进行控藻,使水体 Chla 浓度从 200 ~ 400 mg/m³ 降至 50 ~ 150 mg/m³;周起超等^[11]在滇池的围隔内利用遮光法控藻,在最佳工况下浮游植物生物量削减了 28.8%。物理方法相较其他控藻方法更为安全,既不会带来新的化学污染,也不会有新的物种入侵,缺点是处理范围及能力受到限制,且要投入一定的人力和物力。

物理方法中,超声波控藻被认为是一种环境友好技术,其对水生生态系统和环境的影响较小,且具有操作简单、反应速度快等优点。超声波在控藻方面显示出良好的效果,且其破坏藻类细胞的超声机制已被广泛接受,因此,该技术具有很大的发展潜力和广阔的应用前景^[12-14]。近年来超声波控藻产品应运而生,但大都应用于中小型水域。笔者对超声波控藻的基本原理、控藻效果影响因素、超声波对水生生态的影响及超声波与其他技术联用的控藻效果进行了综述,以期超声波控藻技术的推广和应用提供参考。

1 超声波控藻基本原理

超声波是指频率高于 20 kHz 的声波,是一种具有聚属、定向、反射及透射等特性的物理能量形式。一般认为,超声波对微生物的细胞结构及功能具有破坏作用,这种破坏可能源于超声机械效应以及空化效应引起的局部高温、高压、冲击波、剪切应力及自由基等^[15-18]。超声波主要从以下 4 个方面破坏藻细胞。

1.1 机械效应和热效应

超声波在传播过程中,会引起介质质点的交替压缩与膨胀,造成介质压力的变化,从而产生机械效应。由于物质具有声吸收特性,超声能量射入物质后,部分超声能量将转变成热能,使物质温度升高。超声波在传播中产生的机械效应、热效应,可使藻类细胞破裂、物质分子中的化学键断裂。超声波传播过程见图 1。

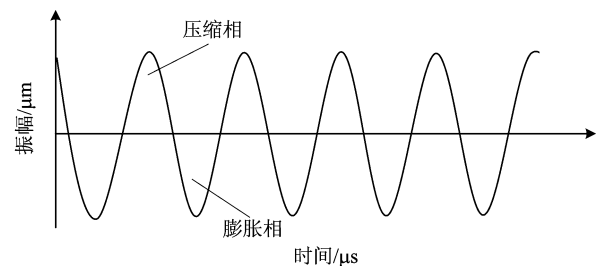


图 1 超声波传播过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasound propagation process

1.2 空化效应

超声波在水中传播时会产生正负压强交替的周期性变化,在此变化中会产生空化泡,在空化泡崩溃的瞬间,可在局部产生约 5 000 K、500 × 10⁷ Pa 的高温、高压,同时产生强烈的冲击波和速度超过 100 m/s 的微射流^[19]。空化泡从产生到崩溃的过程称为超声空化效应,超声空化示意图见图 2。利用空化作用产生的高温、高压、冲击波、射流和剪切力等破坏藻细胞(机械损伤),从而控制藻类生长。Khanal 等^[20]认为,在诱导空化反应时超声波的频率越高,能耗也越大,而且高频率、高功率超声波会对铜绿微囊藻产生较大的机械损伤,从而可能加速微囊藻毒素的释放。

1.3 伪空胞破裂

有些藻类如蓝藻含有伪空胞,伪空胞为蓝藻提供浮力,使其获得适宜的生长条件。超声波可以使藻细胞内伪空胞破裂^[21],导致藻细胞失去上浮能力

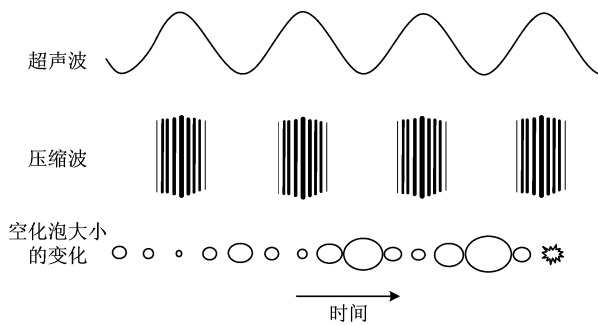


图 2 超声空化示意

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic cavitation

而沉降下来,降低藻细胞的光合作用,增强底栖动物的捕食作用,从而达到控藻的目的。Tang 等^[22]利用超声波(0.6 W/cm²、1.7 MHz)辐照 2 种蓝藻(具伪空胞的铜绿微囊藻和不具伪空胞的聚球藻),发现铜绿微囊藻细胞增长率下降了 65%,而聚球藻细胞增长率与对照组基本相同。陈矜等^[23]研究了不同频率的超声波对伪空胞的作用效果,发现伪空胞有显著的共振响应特征,在 600 kHz 时有最大的响应,出现类似于共振的现象。以上研究表明,伪空胞破裂对超声波的频率具有较高的敏感性。

1.4 自由基效应

超声空化作用为有机物和藻类创造了一个极端的物理环境,在该环境下水被分解,产生·H 和·OH 自由基^[24],自由基进一步造成水中有机分子的断链、自由基的转移和氧化还原反应。自由基能够影响细胞结构,使生物组分发生物理和化学变化^[25];·OH 自由基还会与 DNA 嘌呤碱基和嘧啶碱基发生反应,导致 DNA 断链,造成细胞损伤^[26];·OH 自由基可使微囊藻毒素浓度降低^[27]。脱水产生自由基的量与超声波频率、强度有关,如 Guo 等^[28]研究表明,振幅增大能够使空化泡更剧烈地崩溃,从而产生更高的温度和压力,同时也增大了自由基的浓度;Lee 等^[29]研究发现,不同超声波频率下,超声辐照的空化作用会产生不同量的·OH 自由基。

2 超声波控藻效果的影响因素

2.1 超声波强度

一般来说,随着超声波强度的增加,其控藻效果也随之提高^[9],Joyce 等^[30]使用 1.8、21.0 和 49.0 W/L 的 580 kHz 超声波处理铜绿微囊藻悬浮液,发现藻细胞密度分别降低了 13.2%、36.8%、47.4%,增加超声波强度可以提高对藻类的去除效果。Wu 等^[31]利用不同强度的双频超声波(26 和 20 kHz)辐

照含铜绿微囊藻的水样,发现高强度的超声波对微囊藻的去除率较高。这是由于超声波强度越大,化学反应速率加快,对藻细胞的去除效果越好。但随着超声波强度的增加,其控藻效果具有趋向饱和的趋势,原因在于超声波强度过高时,靠近超声波发生器的地方产生的大量空化泡会形成屏蔽,使大部分声能转化为热能,降低了控藻效率。高强度的超声波还会使藻细胞破裂,导致细胞液及藻毒素释放,如 Zhang 等^[32]利用 80 W/L 超声波处理高藻水 5 min,微囊藻毒素浓度从 0.87 μg/L 增至 3.11 μg/L。为了在实际工程中能安全有效地控藻,应将超声波功率密度控制在 15~30 W/L。

2.2 超声波频率

一般认为,超声波频率越高,空化作用发生越难。但随着超声波频率的提高,单位时间内的超声周期增多,控藻效果先增加后降低,因此超声波控藻存在一个最佳频率。超声波控藻试验的最佳频率,在不同文献报道中有很大的差异。如 Joyce 等^[30]在超声波强度一定时,设定频率为 20、50、580、864 和 1 146 kHz 对铜绿微囊藻进行辐照,发现 580 kHz 为最佳频率。Hao 等^[33]将 3 个螺旋藻样品在 1.7、20 和 200 kHz 的频率下以 40 W 的功率处理 5 min,发现 200 kHz 的超声波对螺旋藻细胞的抑制作用最明显。Srisuksomwong 等^[34]利用 29、43、108、200 和 1 000 kHz 超声波辐照含有微囊藻的鱼塘水,发现 200 kHz 的超声波对沉积微囊藻的影响最大,且能有效减少微囊藻毒素浓度和霉味。Zhang 等^[32]利用 20、80 和 1 320 kHz 超声波处理含微囊藻水样,发现 80 kHz 超声波对微囊藻的去除速率最快。低频超声时形成的空化泡少,空化泡的生长充分,在介质稀疏相内达到共振而强烈振荡,因此空化泡崩溃时会很剧烈,而高频超声波需要更大的能量输入才能达到相同的效果。对于蓝藻水华常见的微囊藻,频率为 40~200 kHz 的超声波有较好的控藻效果。

2.3 超声时间

随着超声时间的增加,超声波控藻的效果增强;但继续作用时,藻细胞的去除率变化不大。如 Yamamoto 等^[35]利用超声波对衣藻和杜氏藻的悬浮液进行不同时间的辐照,结果表明,对于同一频率的超声波,随超声时间的增加,控藻效果先增强,后趋于稳定。Zhang 等^[32]研究发现,5 min 为铜绿微囊藻发生质变的临界处理时间,处理时间进一步增加,控藻效果增加缓慢。Hao 等^[33]研究发现,超声波控藻的效果随作用时间的增加而增加,但最后会趋于

饱和,10 min 为最佳作用时间。这是由于一定功率和频率的超声波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^[36]。因此,为了兼顾控藻效果与能量投入,超声波控藻时应将辐照时间控制在 10 min 以内。

2.4 超声模式

对同一种藻细胞采用不同的处理模式,其控藻效果不同,对含藻水体多次超声,可增强对藻的抑制效果^[37]。如 Tang 等^[38]的研究表明,对钝顶螺旋藻每 3 d 采用超声波辐照 4 min,抑藻率为 30.1%,而每 11 d 辐照 12 min,抑藻率减少了 18.06%。Ahn 等^[39]研究发现,在同样的能量输入条件下,低剂量、多频次的超声波辐照更有利于抑制藻类生长。舒天阁等^[40]对超声 5 d 后的藻液进行二次超声,发现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,控藻效果能持续 15~20 d。笔者通过总结提出以下运行模式供实践工作参考:单次超声时,超声波频率为 40~200 kHz,功率密度为 30 W/L,辐照时间为 10 min;5 d 超声 1 次时,超声波频率为 40~200 kHz,功率密度为 20 W/L,辐照时间为 4 min。

3 超声波对水生态的影响

3.1 对水生生物的影响

储昭升等^[41]利用低强度(功率为 20 W)的超声波辐照浮游动物、鱼类以及沉水植物,发现低强度超声波对水生生物的生长并没有显著影响。Zhou 等^[42]研究发现,将青石斑鱼置于低频低强(频率低于 50 kHz,声强小于 400 mW/cm²)的超声波辐射场中时,其死亡率很低;但经高频高强(频率高于 50 kHz,声强大于 400 mW/cm²)的超声波处理后,其死亡率较高。方金等^[43-44]研究发现,声强为 400 mW/cm²的超声波辐照可促进江黄颡幼鱼的生长;声强为 200 mW/cm²的超声波会促进罗非鱼幼鱼的生长,而声强为 600 mW/cm²的超声波则具有抑制作用。综上所述可知,低强度的超声波对水生生物没有显著影响,而高强度的超声波会抑制水生生物的生长,甚至会导致水生生物死亡。所以,可通过低强度(声强小于 400 mW/cm²)超声波控藻,同时最大程度地降低对水生生物的影响。

3.2 对水体其他指标的影响

超声波用于控藻的同时也会对水体其他指标产生一定影响。研究发现,超声波对藻液浊度的去除有一定的作用,可以降低水体 pH,对水中的有机质也有很好的降解作用^[45-46]。Ahn 等^[47]的研究

表明,超声波辐照使水体溶解氧、总氮和总磷浓度及 pH 降低,但同时增加了电导率和磷酸盐浓度。Li 等^[48]用频率为 20 kHz、功率为 10~30 W 的超声波辐照不同浓度的蓝绿藻样,得到在最佳条件下,Chla、微囊藻毒素、总氮、总磷和化学需氧量的最高去除率分别为 26.2%、96%、86%、63% 和 60.9%。综上,超声波控藻对水质有显著的改善作用,但也可能存在负面影响,如超声波强度过大会使藻细胞破裂,导致藻毒素和藻细胞液外泄,影响水体安全。

4 超声波控藻技术及其他技术的联用

目前超声波控藻技术已得到了较多应用。总体上,超声设备按作用形式可分为 3 类:固定式超声波控藻技术、移动式超声波控藻技术和超声波与其他控藻技术的联用。

4.1 固定式超声波控藻技术

固定式超声波控藻技术在小型湖泊及景观水体中有较多应用。崔峻岭等^[49]在银川市一人工湖泊(73 370 m²)安装了 8 台超声波除藻仪(有效辐照半径为 120 m),60 d 后水体中 Chla 浓度由 48.5 mg/L 降为 7.5 mg/L,控藻效果明显。上海市虹口区园林绿化局于 2005 年 5 月在曲阳公园小湖安装超声波水域净水灭藻装置(功率为 50 W,有效辐照半径为 150 m),经 100 多天、24 h 连续运行,明显改善了水质且未发生水华^[50]。闫莉^[51]在水库设置围栏(约 1 600 m²)并安装超声共振设备(功率为 5 W,辐照半长轴为 180 m、半短轴为 90 m),处理后总藻浓度降低了 25.4%~30.4%,蓝藻浓度降低了 23.5%~39.9%,控藻效果明显。

4.2 移动式超声波控藻技术

大中型湖泊中,水华暴发的位置往往随风向发生改变。由于超声波的能量随距离衰减很快,固定式超声波控藻设备的工作范围仅为 100~200 m,很难在大中型湖泊中有效控藻,移动式超声波控藻设备应运而生。移动式超声波控藻技术机动性强,可以根据风向、蓝藻暴发的位置随时改变航向,能更有效地去除水体中藻细胞,达到最佳的控藻效果。移动式控藻技术大多为船载式的,如丁暘等^[52]用载有超声波除藻装置(频率为 20 kHz,功率为 40 W,辐照时间为 15 s)的实验船在 400 m² 区域作用 1 h 后,水表面的藻细胞密度由 10⁷ 个/mL 降至 10⁵ 个/mL,透明度由 0 cm 升到 35 cm,水质明显改善。韩景明等^[53]利用研制的多功能超声除抑藻平台在三峡库

区支流澎溪河特定区域内移动除藻,在最佳工况(频率为 20~50 kHz,辐照时间为 5 min)下,取得了一定的控藻效果。周学军等^[54]发明的智能化超声波除藻装置(功率为 0.1~2.0 kW、频率为 15~100 kHz)不仅可以人为设定行进路线,还可以通过实时水藻监测结果自动确定超声波控藻行进路线。

4.3 超声波与其他技术联用控藻

4.3.1 超声波与推流联用

超声波与推流联用能有效强化控藻效果,其主要通过推流促进水体流动,扩大超声波的辐照范围,从而解决超声波辐照范围小的问题。Ahn 等^[39]利用超声波与水泵联合装置处理富营养化池塘中的蓝藻,处理池中 Chla 浓度和总藻量分别为对照池的 61% 和 53%。Lee 等^[29,55]将射流曝气与 200 kHz 的超声波处理相结合,建立了超声辐照系统(ultrasonic radiation system, USRS),并将 10 套 USRS 系统布设于 Senba 湖中,治理 Senba 湖的水华。

4.3.2 超声波与臭氧技术联用

超声波引起的湍流可加快臭氧在水中的传播速

度,促使其分解生成真正的氧化剂($\cdot\text{OH}$),加快臭氧的氧化速率^[56]。在北京市什刹海后海的生态修复试验工程中,采用臭氧与超声波相结合的控藻技术,分别于 2001 年 9 月 6—8 日和 14—20 日在试验区(50 m×50 m)进行了 2 次超声波+臭氧复合试验,每天作业 7 h,使藻细胞浓度明显降低,且 8 个月后水体生态系统向良性方向发展^[57]。

4.3.3 超声波与混凝沉淀法联用

超声波可以破坏藻细胞的伪空胞,降低藻细胞迁移能力,改善藻类的聚集性和沉降性,从而提高混凝沉淀对藻类的去除效果。陈杰等^[58]证明超声波可以快速提高藻类混凝去除效率。Liang 等^[59]发现 5 s 的超声波处理,能够提高含藻水的混凝效果。王利平等^[60]采用超声波/改性黏土工艺去除人工水体中的蓝藻,证明可达到很好的去除效果。陆贻超等^[61]研究了超声波和改性黏土集成技术对藻类的去除效果,发现集成技术能明显提高藻类去除率,且对群体形态藻的去除效果更好。

超声波与其他控藻技术联用的比较见表 1。

表 1 超声波与其他控藻技术联用的比较

Table 1 Comparison of ultrasound combined with other algae control techniques

联用技术	原理	适用范围	应用及效果
超声波+推流	推流可促进水体流动,扩大超声波的辐照范围	中深水湖泊 (水深<15 m)	Chla 浓度和总藻量分别降低 50%以上
超声波+臭氧	超声波可加快臭氧在水中的传播速度及氧化速率	人工水体	总藻量降低 30%~50%
超声波+混凝沉淀	超声波可改善藻类的聚集性和沉降性,提高混凝沉淀效果	水厂高藻水、人工水体	Chla 浓度降低 80%左右

5 结语

超声波控藻技术是近年来发展起来的新型控藻技术,具有设备简单、经济性好、无二次污染及管理简单等优点。超声波控藻时,超声波强度越大,耗能就越高,经济性也越差,且易影响水生生物,因而高强度超声波不适合实际推广应用。综合考虑超声波控藻技术的经济性和控藻效果,建议采用低强度超声波进行蓝藻水华控制。

超声波控藻目前大都局限于景观水体或中小型水域,大型湖泊实际应用案例较少。由于超声波的能量在传播过程中衰减得很快,很难对远距离的藻细胞产生影响,加上对水生态安全的担忧,限制了该技术的发展。超声波和其他控藻技术联用能提高控藻效率,运用低频低强超声波联合其他技术控藻,将是今后控藻技术发展的方向之一。

参考文献

- [1] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社,1995.
- [2] REYNOLDS C S, WALSBY A E. Water-blooms[J]. Biological Reviews, 1975, 50(4):437-481.
- [3] PERRI K A, SULLIVAN J M, BOYER G L. Harmful algal blooms in Sodus Bay, Lake Ontario; a comparison of nutrients, marina presence, and cyanobacterial toxins[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(2):326-337.
- [4] SOBCZYNSKI T, JONIAK T. The variability and stability of water chemistry in a deep temperate lake: results of long-term study of eutrophication[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2013, 22(1):227-237.
- [5] 邢旭文,陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(3):29-33.
BING X W, CHEN J C. The control of eutrophic water in ponds by floating-bed soilless culture of plants[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21(3):29-33.
- [6] 刘建康,谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2003, 22(3):193-198.
LIU J K, XIE P. Direct control of microcystis bloom through the use of planktivorous carp-closure experiments and lake fishery

- practice[J]. *Ecological Science*, 2003, 22(3): 193-198.
- [7] JACOBY J, GIBBONS H, STOOPS K, et al. Response of a shallow, polymictic lake to buffered alum treatment[J]. *Lake & Reservoir Management*, 1994, 10(2): 103-112.
- [8] 缪柳, 洪俊明, 林冰. 络合硫酸铜除藻剂应急治理水华对水质及鱼类的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(5): 63-66.
- MIAO L, HONG J M, LIN B. Effects on water quality and fishes of copper sulfate complex applied as algacide for emergency control of algae bloom [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(5): 63-66.
- [9] 申开旭. 云贵高原昭通渔洞水库控藻技术初探[J]. *水利技术监督*, 2015, 23(6): 53-56.
- [10] HOSPER H, MEYER M L. Control of phosphorus loading and flushing as restoration methods for Lake Veluwe, the Netherlands [J]. *Hydrobiological Bulletin*, 1986, 20(1/2): 183-194.
- [11] 周起超, 宋立荣, 李林. 遮光对滇池春季藻类水华的影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(9): 53-59.
- ZHOU Q C, SONG L R, LI L. Effect of shading on the algal blooms during spring in Lake Dianchi, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(9): 53-59.
- [12] RAJASEKHAR P, FAN L, NGUYEN T, et al. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms [J]. *Water Research*, 2012, 46(14): 4319-4329.
- [13] CHEN B, HUANG J, WANG J, et al. Ultrasound effects on the antioxidative defense systems of *Porphyridium cruentum* [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, 61(1): 88-92.
- [14] PARK J, CHURCH J, SON Y, et al. Recent advances in ultrasonic treatment: challenges and field applications for controlling harmful algal blooms (HABs) [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 326-334.
- [15] GOGATE P R, KABADI A M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 44(1): 60-72.
- [16] BOLLAPRAGADA S, SODHI M M S. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(6): 1041-1048.
- [17] ROKHINA E V, PIET L, JURATE V. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, 27(5): 298-306.
- [18] ALFONSO R M, SANDY D, PETER H, et al. Quantification of the ultrasound induced sedimentation of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(4): 1299-1304.
- [19] SUSLICK K S. *Sonochemistry* [J]. *Science*, 1990, 247: 1439-1445.
- [20] KHANAL S K, GREWELL D, SUNG S, et al. Ultrasound applications in wastewater sludge pretreatment: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2007, 37(4): 277-313.
- [21] LEHMANN H, JOSTM. Kinetics of the assembly of gas vacuoles in the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* Kuetz. emend. Elekin. [J]. *Archiv für Mikrobiologie*, 1971, 79(1): 59-68.
- [22] TANG J W, WU Q Y, HAO H W, et al. Effect of 1.7 MHz ultrasound on a gas-vacuolate cyanobacterium and a gas-vacuole negative cyanobacterium [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, 36(2): 115-121.
- [23] 陈矜, 陈伟中. 超声波对浮游蓝藻的作用[C]//中国声学学会功率超声分会 2009 年学术年会论文集. 广州: 中国声学学会功率超声分会, 2009.
- [24] ENVI C, JAMES R, MUTHUPANDIAN A, et al. Determination of temperatures within acoustically generated bubbles in aqueous solutions at different ultrasound frequencies [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(27): 13656-13660.
- [25] 袁易全. 近代超声原理及应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996.
- [26] 申勇立, 郝金库, 曹映玉, 等. 鸟嘌呤受羟基自由基损伤反应机理的量子化学研究[J]. *高等学校化学学报*, 2010, 31(2): 379-382.
- SHEN Y L, HAO J K, CAO Y Y, et al. Quantum chemical studies on the damage mechanism of hydroxyl radical to guanine [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2010, 31(2): 379-382.
- [27] SONG W H, 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.
- [28] GUO Z B, ZHENG Z, ZHENG S R, et al. Effect of various sono-oxidation parameters on the removal of aqueous 2,4-dinitrophenol [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2005, 12(6): 461-465.
- [29] LEE T J, NAKANO K, MATSUMARA M. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control [J]. *Environmental Technology Letters*, 2001, 22(4): 383-390.
- [30] JOYCE E M, WU X, MASON T J. Effect of ultrasonic frequency and power on algae suspensions [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2010, 45(7): 863-866.
- [31] WU X, MASON T. Evaluation of power ultrasonic effects on algae cells at a small pilot scale [J]. *Water*, 2017, 9(7): 470.
- [32] ZHANG G M, ZHANG P Y, WANG B, et al. Ultrasonic frequency effects on the removal of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13(5): 446-450.
- [33] HAO H W, WU M S, CHEN Y F, 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 & Environmental Engineering*, 2004, 39(6): 1435-1446.
- [34] SRISUKSOMWONG P, WHANGCHAI N, YAGITA Y, et al. Effects of ultrasonic irradiation on degradation of microcystin in fish ponds [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2011, 13(1): 67-70.
- [35] YAMAMOTO K, KING P M, WU X G, et al. Effect of ultrasonic frequency and power on the disruption of algal cells [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 24: 165-171.
- [36] 黄浙丰. 基于时序神经网络的藻类水华预测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [37] 潘彩萍, 张光明, 王波. 超声除藻动力学研究[J]. *净水技术*, 2006, 25(6): 31-33.
- PAN C P, ZHANG G M, WANG B. Kinetic study on ultrasonic algae removal [J]. *Water Purification Technology*, 2006, 25(6): 31-33.
- [38] TANG J W, WU Q Y, HAO H W, 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.
- [39] AHN C Y, JOUNG S H, CHOI A, et al. Selective control of cyanobacteria in eutrophic pond by a combined device of ultrasonication and water pumps [J]. *Environmental Technology*

- Letters,2007,28(4):371-379.
- [40] 舒天阁,苑宝玲,王少蓉.低功率超声波去除铜绿微囊藻技术[J].华侨大学学报(自然科学版),2008,29(1):72-75.
SHU T G, YUAN B L, WANG S R. Studies on the removal of *Mircocystis aeruginosa* by low-power ultrasonic [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2008, 29(1):72-75.
- [41] 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):1335-1339.
CHU Z S, PANG Y, ZHENG S F, et al. Algal control by ultrasonic radiation and its risks to the aquatic environment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7):1335-1339.
- [42] ZHOU Y C, HUANG H, WANG J, et al. Vaccination of the grouper, *Epinephalus awoara*, against vibriosis using the ultrasonic technique [J]. Aquaculture, 2002, 203(3):229-238.
- [43] 方金,钱卫国,李伟纯,等.超声波对江黄颡幼鱼生长的影响[J].上海水产大学学报,2008,17(2):210-214.
FANG J, QIAN W G, LI W C, et al. The effect of ultrasonic wave on the growth of *Pseudobagrus Vachelli* [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(2):210-214.
- [44] 方金,钱卫国,周应祺.超声波对尼罗罗非鱼幼鱼生长的影响[J].大连水产大学学报,2009(增刊1):147-152.
FANG J, QIAN W G, ZHOU Y Q. The effect of ultrasonic wave on growth in Nile tilapia [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009 (Suppl 1):147-152.
- [45] CHEMAT F, TEUNISSEN P G, CHEMAT S, et al. Sono-oxidation treatment of humic substances in drinking water [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(3):247-250.
- [46] PETRIER C, DAVID B, LAGUIAN S. Ultrasonic degradation at 20 kHz and 500 kHz of atrazine and pentachlorophenol in aqueous solution; preliminary results [J]. Chemosphere, 1996, 32(9):1709-1718.
- [47] 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.
- [48] LI J P, HAI L, CHEN S, et al. Study on the removal of algae from lake water and its attendant water quality changes using ultrasound [J]. Desalination and Water Treatment: Science and Engineering, 2014, 52(25/26/27):4762-4771.
- [49] 崔峻岭,吴竹林.超声波技术在防治人工湖水藻中的应用[J].宁夏农林科技,2009(2):41.
- [50] 丁永良,卢守珍,郭磊,等.超声波水域灭藻净水装置在上海曲阳公园景观湖的应用[J].上海水务,2006(4):15-18.
DING Y L, LU S Z, GUO L, et al. European union ultrasonic water-purifier for eliminating algae applying to the landscape lake in Quyang Park of Shanghai [J]. Shanghai Water, 2006(4):15-18.
- [51] 闫莉.超声共振技术在水库藻类抑制中的应用初探[J].人民珠江,2015,36(4):88-90.
- [52] 丁暘,浦跃朴,尹立红,等.超声除藻的参数优化及其在太湖除藻中的应用[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(2):354-358.
DING Y, PU Y P, YIN L H, et al. Parameters optimization of ultrasound algae removal technology and bloom removal study in Taihu Lake [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(2):354-358.
- [53] 韩景明.澎溪河水环境及超声波除(抑)藻技术研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [54] 周学军,周民,周德领.智能化超声波除藻装置:205933308U [P]. 2017-02-08.
- [55] 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.
- [56] WEAVERS L K, HOFFMANN M R. Sonolytic decomposition of ozone in aqueous solution mass: transfer effects [J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(24):3941-3947.
- [57] 屠清瑛,章永泰,杨贤智.北京什刹海生态修复试验工程[J].湖泊科学,2004,16(1):61-67.
TU Q Y, ZHANG Y T, YANG X Z. Approaches to the ecological recovery engineering in Lake Shishahai, Beijing [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(1):61-67.
- [58] 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,2007,1(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.
- [59] LIANG H, NAN J, HE W J, et al. Algae removal by ultrasonic irradiation-coagulation [J]. Desalination, 2009, 239(1):191-197.
- [60] 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,2008,24(19):44-46.
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, 24(19):44-46.
- [61] 陆贻超,王国祥,李仁辉.超声波和改性粘土集成技术在去除蓝藻水华上的应用[J].湖泊科学,2010,22(3):421-429.
LU Y C, WANG G X, LI R H. Using the integrated technique of ultrasonic and modified-clay to remove algal blooms [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(3):421-429. ◇