



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201903080

中图分类号 X524

文献标识码 A

陈贺林, 叶碧碧, 吴越, 等. 超声波对滇池蓝藻伪空胞和群体沉降性能的影响[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 43-51.
CHEN Helin, YE Bibi, WU Yue, et al. Effects of ultrasonic treatment on gas vesicles and settleability of *Cyanobacteria* from Dianchi Lake[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 43-51.

超声波对滇池蓝藻伪空胞和群体沉降性能的影响

陈贺林^{1,2}, 叶碧碧², 吴越², 喻秋², 储昭升^{2,*}, 杨永哲¹

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2. 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012

第一作者: 陈贺林(1993—), 男, 硕士研究生。研究方向: 蓝藻水华控制。E-mail: 1824631844@qq.com

*通信作者: 储昭升(1973—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 湖泊富营养化。E-mail: chuzs@craes.org.cn

摘要 为提高混凝沉淀藻水分离技术的分离效果, 以滇池新鲜蓝藻为研究对象, 研究不同超声波处理条件下, 超声波对伪空胞、蓝藻群体沉降性能及水体水质的影响。结果表明: 超声波对伪空胞的破坏效果满足准一级动力学规律, 反应速率常数 k 随着超声波功率密度的增大而增大, 并逐步趋于饱和; 短时间低功率 (5 s, 5.0~16.7 W·L⁻¹) 的超声波能破坏伪空胞, 改善蓝藻群体沉降性能, 降低水体 pH, 且对水体 DTN、DTP 浓度的影响 <5%; 在保证出水安全的前提下, 综合考虑处理效果和经济成本, 超声波功率密度 16.7 W·L⁻¹、处理时间 5 s 为超声波处理滇池藻样的最佳条件, 该条件下蓝藻伪空胞破坏率、沉降率分别为 84%、80%。利用超声波对滇池蓝藻进行处理, 确定了超声波对滇池蓝藻的伪空胞有破坏作用, 可以改善蓝藻群体的沉降性能, 达到大规模、无污染的藻水分离的目的, 为蓝藻水华控制提供参考。

关键词 超声波; 伪空胞; 蓝藻; 水华控制; 沉降性; 滇池

水体富营养化和藻类水华暴发是全球性的水环境问题^[1-3]。世界各地, 不论发达国家还是发展中国家, 都有藻类水华暴发及藻类污染现象的发生^[4-8]。蓝藻水华暴发会导致水体缺氧^[9-10]、水体异味^[11-13]、甚至供水系统堵塞^[9]; 有的藻类还会产生藻毒素, 严重威胁水生生物、家畜以及人类的健康^[14-15]。

针对蓝藻水华大规模暴发的问题, 机械化打捞是一种应急治理措施。如何有效地实现藻水分离是制约蓝藻水华机械化清除技术工程化应用的关键因素之一。目前, 常用的藻水分离方法有预氧化/加压+混凝沉淀法^[16-17]、加压溶气气浮法^[18-19]和物理过滤法, 其中预氧化会引入新的物质, 破坏藻细胞结构, 引起胞内有机物释放^[17]; 气浮法使藻类与气泡黏附, 形成密度比水小的结合体, 可借助浮力上升并去除, 但存在工艺复杂、电能消耗较大等缺点^[20]; 物理过滤法可以不添加絮凝剂等化学药剂, 处理规模可根据需要灵活设计, 但仅适用于藻密度较低的藻水, 当藻密度较高时, 筛网易被堵塞, 系统易失效^[21]。

蓝藻之所以难处理, 是由于在自然水体中蓝藻细胞聚集成群, 细胞内有伪空胞 (gas vesicle, GV), 群体外面由胶被包裹。伪空胞为蓝藻细胞提供浮力, 使蓝藻上浮不易沉淀去除^[22-23]; 胶被对蓝藻群体起保护作用, 阻碍混凝剂结合, 影响絮凝性能^[24]。有研究表明, 超声波能使蓝藻伪空胞

收稿日期: 2019-03-12; 录用日期: 2019-04-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07401003)

破裂,进而减弱其浮力调节能力,使蓝藻细胞沉降下来^[25]。目前,超声波对实验室培养藻细胞影响的机理及效果已被广泛认可,但对超声波破坏伪空胞的研究^[25-27]多为定性研究(表1),而不同超声波处理条件对伪空胞影响的研究较少,且超声波处理蓝藻的技术参数没有统一的定论。

表1 超声波对微囊藻伪空胞的影响

Table 1 Effect studies of ultrasonic treatment on gas vesicles of microcystis

藻样	研究方法	结果	来源
铜绿微囊藻	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	超声波处理后铜绿微囊藻细胞内伪空胞数量大量减少	[26]
铜绿微囊藻和聚球藻	超声波分别处理具伪空胞的铜绿微囊藻和不具伪空胞的聚球藻	超声波处理后的铜绿微囊藻细胞增长率下降65%,而聚球藻细胞增长率与对照组基本相同	[27]
微囊藻水华	透射电镜观察超声波处理后微囊藻细胞	超声波使蓝藻伪空胞破裂,藻细胞沉降率达到80%	[25]

本研究以滇池蓝藻为研究对象,利用40 kHz超声波进行辐射,研究不同超声波处理条件对滇池蓝藻伪空胞、蓝藻群体沉降性能和水体水质的影响。综合考虑处理效果(藻细胞沉降率 $\geq 80\%$)、出水安全(超声波处理后水体中溶解性总氮、溶解性总磷浓度的变化量 $< 5\%$)和经济成本等因素,得出最佳超声波处理条件,以期为超声波预处理+混凝沉淀法进行藻水分离提供参考。

1 材料和方法

1.1 滇池藻样采集与保存

2018年5—10月,在滇池西北部湖湾处(东经 $102^{\circ}38'33''$ 、北纬 $24^{\circ}56'28''$)采集实验用藻样,采样点藻细胞种类及密度见表2。用25 μ 浮游生物网打捞浓缩表层50 cm的藻细胞,装入25 L PVC桶,当天运回实验室,遮光、曝气保存以维持藻细胞活性。

1.2 实验装置

超声波处理实验装置包括超声波发生器(定制,北京宇翔超声)和不锈钢水槽。超声波发生器由超声波信号发生器和超声波振盒组成,超声波发生器功率为18、60、180、600、1500 W,频率为40 kHz;振盒尺寸为31 cm \times 17 cm \times 10 cm,内部有10个均匀排列的超声波换能器。不锈钢水槽尺寸为40 cm \times 30 cm \times 35 cm,水槽中有36 L去离子水。实验装置见图1。

1.3 实验方法与分析方法

1) 不同超声波处理条件对滇池蓝藻伪空胞的影响。分别取初始藻密度为 1.8×10^9 cells \cdot L $^{-1}$ 的滇池藻样300 mL于500 mL锥形瓶中,置于水槽底部距振盒13 cm处,调节超声波发生器功率分别为18、60、180、600、1500 W,处理时间分别为0、1、3、5、10、15、20、25、30 s,处理完成后,测伪空胞体积。剩余藻样放入恒温培养箱,温度为25 $^{\circ}$ C,光照强度为2000 lx,光暗比为12 h:12 h。培养期间,每天定时人工摇瓶2次,每天测伪空胞体积。

2) 不同超声波处理条件对滇池藻样沉降性能的影响。取初始藻密度为 1.8×10^9 cells \cdot L $^{-1}$ 的滇池

表2 采样点藻细胞种类、密度及占比

Table 2 Species, density and proportion of algal cells at sampling point

藻细胞种类	藻细胞密度/(cells \cdot L $^{-1}$)	占比/%
蓝藻门	1.23×10^9	96.5
绿藻门	2.70×10^7	2.1
硅藻门	1.70×10^7	1.3
合计	1.27×10^9	100.0

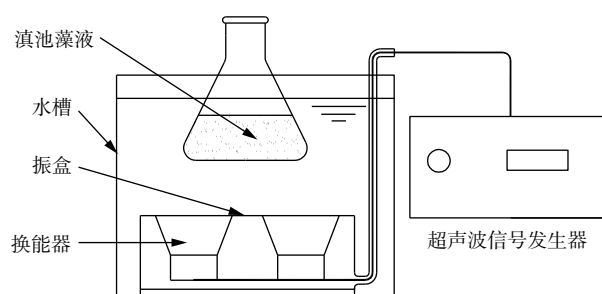


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experiment

藻样各 500 mL, 处理条件与不同超声波处理条件对滇池蓝藻伪空胞的影响实验一致, 藻样处理后, 倒入 500 mL 分液漏斗, 静置 30 min, 取上清液测藻密度。

3) 不同超声波处理条件对滇池藻样水质的影响。取初始藻密度为 $1.8 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 的滇池藻样各 300 mL 进行处理, 调节超声波发生器功率分别为 18、60、180、600、1 500 W, 处理时间分别为 0、1、5、10、20、30 min。超声波处理后, 分别测藻液 pH、溶解性总氮 (dissolved total nitrogen, DTN)、溶解性总磷 (dissolved total phosphorus, DTP)。

4) 藻细胞密度。取 50 mL 藻样于 PVC 小瓶中, 加入 5 mL 鲁哥试剂固定, 样品可保存 15 d, 分析时, 取混合均匀样品 0.1 mL 于浮游生物计数框中, 在光学显微镜 (Leica, DM750, Germany) 400 倍镜下计数, 每个样品重复计数 3 次。

5) 伪空胞体积。伪空胞体积的测定采用毛细压力管法^[28-29], 使用改进的 Walsby 伪空胞测定装置。具体操作步骤: 将藻液装入带刻度的毛细压力管 (毛细压力管内不能有气泡) 内, 置于石英压力管中, 待温度恒定后, 向压力管内通入 1.0 MPa 氮气, 从显微镜中读取毛细管液面位置的变化。通氮气前、后液面位置的变化量为伪空胞破裂所对应的变化量。

6) 藻细胞沉降率。将经超声波处理后的藻水倒入斗体高 20 cm 的分液漏斗, 静置 30 min, 排出下层的藻浆, 上清液混合均匀, 测藻细胞密度 $N_{后}$ 。藻细胞沉降率计算方法见式 (1)。

$$\eta_{藻} = \frac{N_{前} - N_{后}}{N_{前}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta_{藻}$ 为藻细胞沉降率; $N_{前}$ 为超声波预处理前初始藻密度, $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$; $N_{后}$ 为超声波处理后分液漏斗中静置 30 min 上清液藻密度, $\text{cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

7) 水体理化指标测定。pH 采用便携式 pH 计测量, DTN 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, DTP 采用钼锑抗分光光度法测定。

8) 超声波功率密度。目前, 超声波作用强度常采用输入电功率^[30-31]表征, 为体现单位体积样品的电功率, 本研究采用输入电功率与处理样品的体积的比值表征超声波作用强度, 即超声波功率密度, 计算方法见式 (2)。

$$\rho_{声} = \frac{P_{电}}{V} \quad (2)$$

式中: $\rho_{声}$ 为超声波功率密度, $\text{W} \cdot \text{L}^{-1}$; $P_{电}$ 为输入电功率, W; V 为处理样品体积, L。

2 结果与分析

2.1 不同超声波处理条件对滇池蓝藻伪空胞的影响

1) 不同超声波处理条件对滇池蓝藻伪空胞的破坏效果。蓝藻伪空胞破坏率随着超声波功率密度的增大而提高 (图 2), 当作用时间为 30 s 时, 输入的超声波功率密度 $41.7 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$ 的伪空胞破坏率达到 99.9%, 而超声波功率密度为 $0.05 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$ 的伪空胞破坏率仅为 80.6%。随着超声波时间的延长, 伪空胞的破坏效果先快速增大, 之后趋于稳定。超声波功率密度 $5.0 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 处理 1 s 时伪空胞的破坏率达为 34.7%, 处理 7 s 时破坏率可达 81%; 而处理 7 s 之后, 虽然伪空胞的破坏率还在增大, 但变化很缓慢, 处理 30 s 时破坏率为 99%。

2) 超声波处理后滇池蓝藻伪空胞的恢复情况。被超声波破坏的伪空胞会随着时间的推移慢慢恢复 (图 3), 经 $0.5 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$ 超声波处理 5 s 后, 滇池藻样的伪空胞在第 1 天恢复到 60%, 在第 2 天恢复到了 96%; 而经超声波功率密度 $> 1.7 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$ 的超声波预处理的滇池藻样, 第 2 天恢复到 50% 以上, 第 3 天则基本完全恢复。说明短时间的低频低功率 (5 s, 40 kHz, 超声波功率密度 $< 41.7 \text{ W} \cdot \text{L}^{-1}$) 的超声波并没有破坏藻细胞的活性, 在一定时间后, 藻细胞可以进行自我恢复。在工程实践中, 经超声处理的含藻水应尽快进行藻水分离, 以免伪空胞自我恢复, 影响后续工艺处理效果。

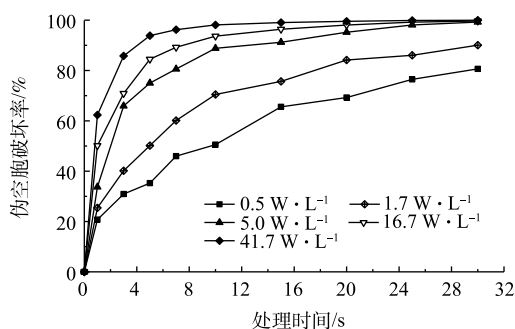


图2 不同超声波处理条件对蓝藻伪空胞的破坏效果

Fig. 2 Destructive effects of different ultrasonic handling times on gas vesicles

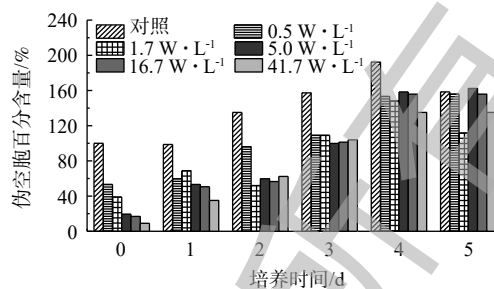


图3 超声波处理5 s后蓝藻伪空胞的恢复

Fig. 3 Recovery of *Cyanobacterial* gas vesicles after 5 s ultrasonic treatment

2.2 不同超声波处理条件对滇池藻细胞沉降率的影响

藻细胞沉降率随着超声波功率密度的增大而提高(图4),在处理时间为30 s时,输入的超声波功率密度为 $41.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的藻细胞沉降率达到90%,而辐射超声功率为 $0.5 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的藻细胞沉降率仅为68%。随着处理时间的延长,藻细胞沉降率先快速增大,之后趋于稳定。处理时间为7 s时,超声波功率密度为 $5.0 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的藻细胞沉降率为79%,要比同时间点的 $0.5 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 组分别高52.9%和12.6%,而只比同时间点的 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $41.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 组分别低0.5%和1.9%。

2.3 超声波对滇池藻液水质的影响

1) 不同超声波处理条件对滇池藻液 pH 的影响。藻液中的 pH 随超声波处理时间的延长而降低(图5),在超声波处理30 min后,各组藻液的 pH 分别降低了0.18、0.20、0.21、0.25、0.38。有研究发现,超声波可以帮助降低藻液 pH^[32], pH 降低的原因可能是超声空化作用及自由基效应产生了 $\cdot\text{H}$ 和 $\cdot\text{OH}$,而 $\cdot\text{H}$ 又比较容易失去电子变成 H^+ ,从而使得藻液的 pH 降低。

2) 不同超声波处理条件对滇池藻液氮磷的影响。不同组滇池藻液的 DTP 和 DTN 变化见图6(a)和图6(b),主要表现在3个方面。

①初始 DTP 和 DTN 浓度不同。藻细胞自身代谢会向水体释放氮磷,导致藻液中 DTP 和 DTN 浓度会发生变化。实验中不同组间藻液的存放时间不同,藻细胞自身代谢程度不同,所以藻液初始 DTP 和 DTN 浓度不同。

②DTP 和 DTN 浓度随超声波处理时间的变化速率。用超声波功率密度为 0.5 、 1.7 、 5.0 、 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的超声波处理藻样,藻液中的 DTP 和 DTN 随着超声波处理时间的增加呈波动上升的趋势;超声波功率密度为 $41.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的藻样,藻液中的 DTP 和 DTN 随着超声波处理时间的增加逐渐增加。

③处理30 min后 DTP 和 DTN 的变化量。

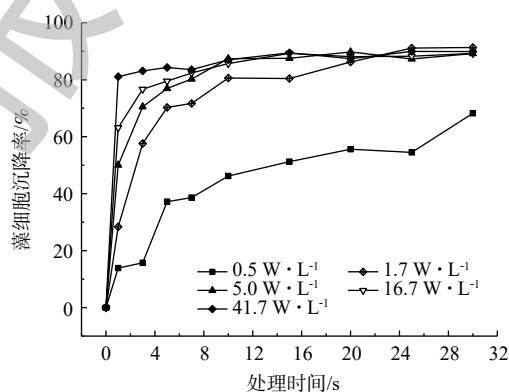


图4 不同超声波处理条件对藻细胞沉降率的影响

Fig. 4 Effects of different ultrasonic treatment conditions on the algae cell settlement rate

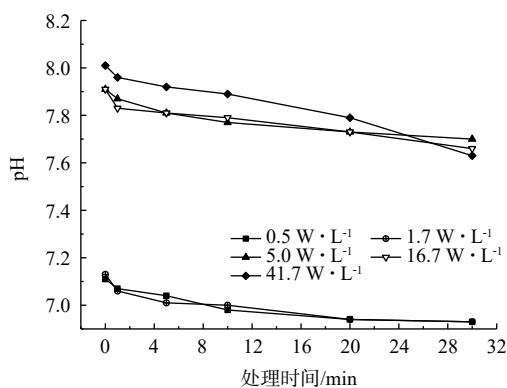


图5 不同超声波处理条件对藻液 pH 的影响

Fig. 5 Effects of different ultrasonic treatment conditions on the pH of algae contained water

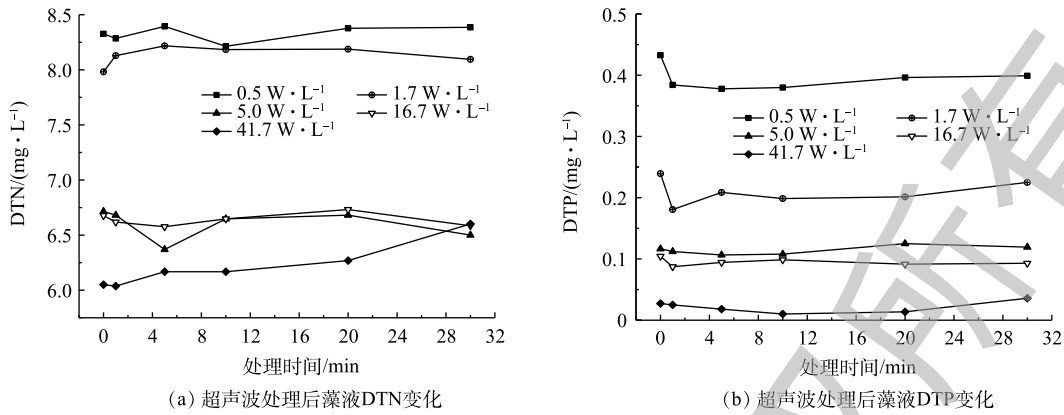


图 6 超声波处理后藻液 DTN 和 DTP 的变化

Fig. 6 Changes of DTN and DTP in algae contained water after ultrasonic treatment

处理 30 min 后，与未处理前相比，用超声功率密度为 0.5、1.7、5.0、16.7、41.7 W·L⁻¹ 的超声波处理的藻样，藻液中的 DTN 的变化量分别为 0.06、0.11、-0.21、-0.09、0.55 mg·L⁻¹，DTP 的变化量分别为 -0.034、-0.014、0.003、-0.011、0.009 mg·L⁻¹。超声波功率密度为 16.7 W·L⁻¹ 的超声波处理藻样 30 min 后，藻液 DTN 增加了 9.1%，大功率超声波 (超声波功率密度 > 16.7 W·L⁻¹) 可能会破坏藻细胞结构，引起胞内有机物释放。

3 讨论

3.1 超声波功率密度破坏伪空胞动力学规律

采用准一级动力学方程拟合不同超声波功率密度下超声波破坏伪空胞随作用时间 t 的变化规律，其反应速率常数 k 、可决系数 R^2 和半衰期 $\theta_{1/2}$ 见表 3。不同超声波功率密度对超声波破坏伪空胞准一级反应常数的影响见图 7。当超声波功率密度在 0.5~41.7 W·L⁻¹ 内变化时，超声波破坏伪空胞准一级反应常数 k 与超声波功率密度的关系见式 (3)。

$$k = 0.0511 \ln(q_{\text{声}}) + 0.0792, R^2 = 0.9505 \quad (3)$$

式中： k 为反应速率常数，s⁻¹； $q_{\text{声}}$ 为超声波功率密度，W·L⁻¹。

由表 3 可知，提高超声波功率密度，反应速率不成比例地升高，这是由于水中的空化强度随着超声波功率的提高而逐渐增大并趋于饱和^[33]，从而导致对伪空胞的破坏效果饱和。

表 3 不同超声波功率密度对超声波破坏伪空胞的准一级动力学模型拟合参数

Table 3 Pseudo-first order kinetics model fitting parameters of gas vesicles destroyed by different ultrasonic power densities

$q_{\text{声}}/(\text{W}\cdot\text{L}^{-1})$	k/s^{-1}	R^2	$\theta_{1/2}/\text{s}$
0.5	0.060	0.9289	11.57
1.7	0.086	0.8965	8.07
5.0	0.17	0.9369	4.18
16.7	0.20	0.9036	3.39
41.7	0.29	0.8810	2.39

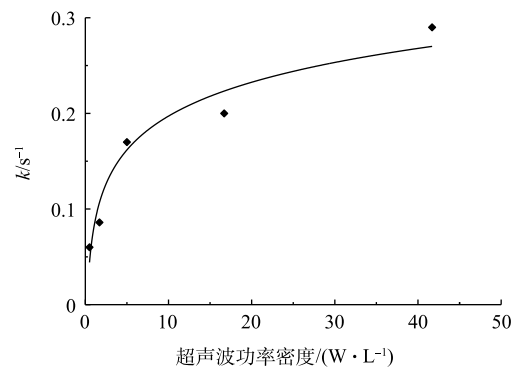


图 7 不同超声波功率密度对超声波破坏伪空胞准一级反应常数的影响

Fig. 7 Effect of different ultrasonic power densities on pseudo-first order kinetics reaction constants of gas vesicles destroyed by ultrasonic waves

3.2 超声波处理滇池藻液的最佳条件

滇池蓝藻伪空胞破坏情况和沉降性能结果表明,短时间低功率(5 s, 40 kHz, 超声波功率密度为 5.0~16.7 W·L⁻¹)的超声波对蓝藻伪空胞破坏率、沉降率分别大于 75%、77%,这与 LEE 等^[25]的研究结果相似。

微囊藻群体在水中的垂直分布受由伪空胞合成和破裂引起的自身浮力变化调控^[34],本研究通过超声波破坏蓝藻伪空胞,改善蓝藻群体沉降性能。伪空胞破坏率对藻细胞沉降率的响应关系见图 8,滇池藻细胞沉降率和伪空胞的破坏率的关系见式(4),当伪空胞破坏率为 15.3% 时,蓝藻群体开始发生沉降,当伪空胞的破坏率 > 91.3% 时,藻细胞沉降率 > 85%。因此,从处理效果(藻细胞沉降率 > 85%)考虑,超声波处理条件为:1) 超声波功率密度 $\geq 5.0 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$, 处理时间 $\geq 15 \text{ s}$; 2) 超声波功率密度为 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$, 处理时间为 10 s。

$$\eta_{\text{藻}} = 47.56 \ln(E_{\text{伪空胞}}) - 129.71, R^2 = 0.8463 \quad (4)$$

式中: $\eta_{\text{藻}}$ 为藻细胞沉降率; $E_{\text{伪空胞}}$ 为伪空胞破坏率。

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,使藻细胞破裂^[35],导致胞内有机物释放。由图 6(a)可知,滇池藻液经 $41.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 超声波处理 30 min 后,藻液 DTN 从 $6.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $6.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,增加了 9.1%。ZHANG 等^[30]利用 $80 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 超声波处理高藻水 5 min,微囊藻毒素浓度从 $0.87 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $3.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SRISUKSOMWONG 等^[31]用 $13 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 超声波处理微囊藻群体,发现群体的黏液层被破坏,但未瓦解细胞。因此,从出水安全考虑(DTN 浓度增加量 < 5%),超声波功率密度应 < $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由于固定强度和频率的超声波产生的空化强度是一定的,处理时间的延长不能改变超声波空化强度^[36],故长时间的处理对伪空胞的作用效果影响不大。研究发现,超声波功率密度为 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 、处理时间为 10 s 时,藻细胞沉降率为 86%;超声波功率密度为 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 、处理时间为 5 s 时,藻细胞沉降率为 80%。处理时间翻倍,意味着需要 2 倍的反应器体积,能耗也需要翻倍,而藻细胞沉降率只增加 6%。因此,在保证处理效果(藻细胞沉降率 $\geq 80\%$)的前提下,从经济成本能耗考虑,最佳超声波处理条件为超声波功率密度 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$,处理时间 5 s。在保证出水安全的前提下,综合考虑处理效果和经济成本,超声处理滇池藻样的最佳条件为超声波功率密度 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$,处理时间 5 s,该条件下蓝藻伪空胞破坏率、沉降率分别为 84%、80%。

4 结论

1) 滇池蓝藻水华以微囊藻为主,超声波破坏该蓝藻伪空胞的动力学模型为一级动力学模型,反应速率常数 k 随着超声波功率密度的增大而增大,并逐步趋于饱和。

2) 短时间低功率(5 s, 40 kHz, 超声波功率密度为 5.0~16.7 W·L⁻¹)的超声波,可以在不破碎藻细胞的情况下,对蓝藻细胞伪空胞的破坏率 > 65%,改善蓝藻群体沉降性能,降低水体 pH,且对水体 DTN、DTP 的影响 < 5%;而超声波功率密度为 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$ 的超声波处理藻样 30 min 后,藻液 DTN 增加了 9.1%。

3) 在保证出水安全的前提下,综合考虑处理效果和经济成本,超声波处理滇池藻样的最佳条件为超声波功率密度 $16.7 \text{ W}\cdot\text{L}^{-1}$,处理时间 5 s,该条件下蓝藻伪空胞破坏率、沉降率分别为 84%、80%。

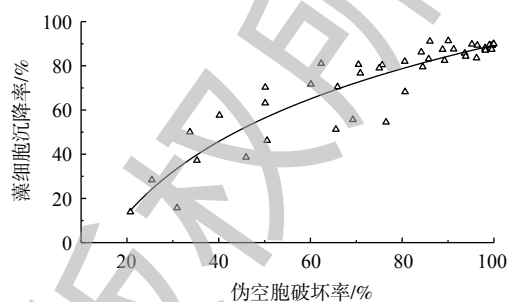


图 8 藻细胞沉降率对伪空胞破坏率响应关系

Fig. 8 Response relationship between algae cell settlement rate and destroyed percentage of gas vesicles

参 考 文 献

- [1] 陈能汪, 章颖瑶, 李延风. 我国淡水藻华长期变动特征综合分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1994-1998.
- [2] 苏雅玲, 邓一荣. 富营养化湖泊中微囊藻毒素及其控制去除技术[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6): 62-66.
- [3] 田珍, 王娟, 孙海丽. 饮用水源水中藻类繁殖危害及处理[J]. *水科学与工程学报*, 2010(1): 9-11.
- [4] BOLTOVSKOY D, CORREA N, BORDET F, et al. Toxic *Microcystis* (*cyanobacteria*) inhibit recruitment of the bloom-enhancing invasive bivalve *Limnoperna fortunei*[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(9): 1968-1981.
- [5] IAN S, EAGLESHAM G K, MCGREGOR G B, et al. First report of a toxic *Nodularia spumigena* (*Nostocales/Cyanobacteria*) bloom in sub-tropical Australia. II. Bioaccumulation of nodularin in isolated populations of mullet (*Mugilidae*)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(7): 2412-2443.
- [6] ISLAM M N, DAISUKE K, HAMILL H D, et al. Modeling mitigation strategies for toxic *cyanobacteria* blooms in shallow and eutrophic Lake Kasumigaura, Japan[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, 18(4): 449-470.
- [7] ROLLWAGEN B G, BOLLENS S M, GONZALEZ A, et al. Feeding dynamics of the copepod *Diacyclops thomasi* before, during and following filamentous cyanobacteria blooms in a large, shallow temperate lake[J]. *Hydrobiologia*, 2013, 705(1): 101-118.
- [8] PADISAK J, UEVEGES V, TAPOLCZAI, K, et al. Photosynthetic characteristics and physiological plasticity of an *Aphanizomenon flos-aquae* (*Cyanobacteria, Nostocaceae*) winter bloom in a deep oligo-mesotrophic lake (Lake Stechlin, Germany)[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 698: 263-272.
- [9] 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.
- [10] DIEGO-MCGLONE M L S, AZANZA R V, VILLANOY C L, et al. Eutrophic waters, algal bloom and fish kill in fish farming areas in Bolinao, Pangasinan, Philippines[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57(6): 295-301.
- [11] DIXON M B, FALCONET C, HO L, et al. Nanofiltration for the removal of algal metabolites and the effects of fouling[J]. *Water Science & Technology*, 2010, 61(5): 1189-1199.
- [12] LI L, GAO N, DENG Y, et al. Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds[J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 1233-1240.
- [13] 杨波. 蓝藻伪空胞的特征及其浮力对氮、磷和温度的响应机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [14] 崔莹, 徐祖信, 尹海龙. 水中藻类污染物及其藻毒素分析方法研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(29): 12873-12875.

- [15] REYNOLDS C S, WALSBY A E. Water-blooms[J]. *Biological Reviews*, 1975, 50(4): 437-481.
- [16] 王付林, 王晓昌, 黄廷林, 等. 高锰酸钾和氯对高藻水的氧化助凝作用[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(3): 9-11.
- [17] 钱爱娟, 丛海兵, 鄢琪, 等. 加压预处理与预氧化强化混凝处理太湖蓝藻水中试比较研究[J]. *供水技术*, 2016, 10(3): 13-20.
- [18] HENDERSON R K, PARSONS S A, JEFFERSON B. The impact of differing cell and algal organic matter (AOM) characteristics on the coagulation and flotation of algae[J]. *Water Research*, 2010, 44(12): 3617-3624.
- [19] 吴玉宝, 王启山, 王玉恒, 等. 混凝-气浮除藻工艺中混凝剂的选择[J]. *给水排水*, 2008, 34(5): 154-156.
- [20] 王建. 微纳米气泡藻水分离实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [21] 王士芬. 湖泊水藻类的去除方法[J]. *污染防治技术*, 2000, 13(1): 23-25.
- [22] REYNOLDS C, OLIVER R, WALSBY A. *Cyanobacterial dominance: The role of buoyancy regulation in dynamic lake environments*[J]. *New Zealand Journal of Marine & Freshwater Research*, 1987, 21(3): 379-390.
- [23] PFEIFER F. Distribution, formation and regulation of gas vesicles[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2012, 10(10): 705-715.
- [24] WALSBY A E, BLEYTHING A. The dimensions of cyanobacterial gas vesicles in relation to their efficiency in providing buoyancy and withstanding pressure[J]. *Microbiology*, 1988, 134(10): 2635-2645.
- [25] LEE T J, NAKANO K, MATSUMARA M. Ultrasonic irradiation for blue-green algae bloom control[J]. *Environmental Technology Letters*, 2001, 22(4): 383-390.
- [26] LEHMANN H, JOST M. Kinetics of the assembly of gas vacuoles in the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* Kuetz. emend. Elekin[J]. *Archives of Microbiology*, 1971, 79(1): 59-68.
- [27] TANG J W, WU Q Y, HAO H W, et al. Effect of 1.7 MHz ultrasound on a gas-vacuolate cyanobacterium and gas-vacuole negative cyanobacterium[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, 36(2): 115-121.
- [28] WALSBY A E, KINSMAN R, GEORGE K I. The measurement of gas vesicle volume and buoyant density in planktonic bacteria[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1992, 15(4): 293-309.
- [29] CHU Z S, JIN X Z, IWAMI N, et al. The effect of temperature on growth characteristics and competitions of *Microcystis aeruginosa* and *Oscillatoria mougeotii* in a shallow, eutrophic lake simulator system[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1): 217-223.
- [30] 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.
- [31] SRISUKSOMWONG P, NIWOOTI W, YASUNOBU 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.
- [32] CHEMAT F, TEUNISSEN P G M, CHEMAT S, et al. Sono-oxidation treatment of humic substances in drinking water[J].

Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(3): 247-250.

- [33] 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.
- [34] WALSBY A E, HAYES P K, BOJE R. The gas vesicles, buoyancy and vertical distribution of cyanobacteria in the Baltic Sea[J]. *European Journal of Phycology*, 1995, 30(2): 87-94.
- [35] 赵锐, 赵嘉熹. 超声波除藻技术进展及其应用前景[J]. *水资源开发与管理*, 2017(5): 28-31.
- [36] 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.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Effects of ultrasonic treatment on gas vesicles and settleability of *Cyanobacteria* from Dianchi Lake

CHEN Helin^{1,2}, YE Bibi², WU Yue², YU Qiu², CHU Zhaosheng^{2,*}, YANG Yongzhe¹

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China

*Corresponding author, E-mail: chuzs@craes.org.cn

Abstract In order to improve the separate efficiency of algae contained water after coagulation-sedimentation, the fresh *Cyanobacteria* from Dianchi Lake was taken as a study object, and the effects of ultrasonic treatment on the gas vesicles and population sedimentation performance of these algae, as well as water quality improvement, were investigated. The result showed that the destruction of gas vesicles with ultrasound fitted the pseudo-first order kinetics model, and the first order reaction rate constant k increased with the increase of the density of ultrasonic power radiation, then it gradually reached the saturation value. In addition, a short time and low power ultrasonic treatment (5 s, 5.0~16.7 W·L⁻¹) could break the gas vesicles to enhance the population settling performance of *Cyanobacteria* colonies, and the pH of waterbody decreased, the effects on DTN and DTP concentrations of waterbody were <5%. In the premise of guaranteeing the effluent safety, through a comprehensive consideration of treatment efficiency and economic cost, the optimized treatment conditions of Dianchi Lake *Cyanobacteria* were determined as follows: the ultrasonic power density of 16.7 W·L⁻¹ and irradiation time of 5 s, which led to 84% gas vesicles destruction rate and 80% *Cyanobacteria* sedimentation rate. This study tested the destructive effect on gas vesicles of *Cyanobacteria* by ultrasonic waves, and the result indicated that it could promote the settlement of *Cyanobacteria* colonies, and could meet the purpose of large-scale and environmentally friendly algae/water separation. Thus it provided a new theoretical approach supporting the *Cyanobacteria* bloom control.

Keywords ultrasonic treatment; gas vesicles; *Cyanobacteria*; bloom control; settleability; Dianchi Lake