

文章编号: 1674-9669(2023)03-0400-07 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjksx.2023.03.013

引文格式: 朱彦辉, 朱易春, 刘祖文, 等. 低强度超声波提升厌氧污泥对重金属Cu(II)极限浓度调控效果[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(3): 400-406.

低强度超声波提升厌氧污泥对重金属Cu(II)极限浓度调控效果

朱彦辉^{a,b}, 朱易春^{a,b}, 刘祖文^a, 田帅^a, 李鑫^a

(江西理工大学, a. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室;

b. 赣州市流域污染模拟与控制重点实验室, 江西赣州 341000)

摘要:以污泥基质降解速率(v_{COD})、胞外聚合物(EPS)和酶活性(DHA)等变化为评价指标,探究了不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波提高厌氧污泥对重金属Cu(II)耐受性影响的效应。结果表明,低强度超声波能够提高污泥微生物对Cu(II)的耐受性。随着进水Cu(II)浓度升高,超声组与对照组 v_{COD} 均下降,但超声组 v_{COD} 下降幅度更缓。超声组和对照组进水Cu(II)浓度与污泥基质降解速率抑制百分比之间的关系拟合得到 IC_{50} 分别为94.62 mg/L和88.85 mg/L,表明低强度超声波能够提高厌氧污泥对Cu(II)的抑制阈值。进水Cu(II)浓度为1 mg/L时,超声组与对照组EPS含量略有提高,而后随着Cu(II)浓度升高而逐渐降低,但超声组比对照组EPS含量更高,可能是低强度超声波通过促进污泥分泌更多的EPS降低了Cu(II)的生物毒性。此外,超声组的DHA活性比对照组提高了3.95%~36.31%。因此,通过低强度超声波可以提高厌氧污泥对重金属Cu(II)的耐受性,从而维持污水厌氧生物处理的稳定运行。

关键词:低强度超声波;厌氧污泥;重金属Cu(II);脱氢酶活性;胞外聚合物

中图分类号:TF19;X703.1 文献标志码:A

Effect of low-intensity ultrasound on controlling the limit concentration of heavy metal Cu(II) in anaerobic sludge

ZHU Yanhui^{a,b}, ZHU Yichun^{a,b}, LIU Zuwen^a, TIAN Shuai^a, LI Xin^a

(a. Jiangxi Province Key Laboratory of Environmental Geotechnical Engineering and Hazards Control; b. Ganzhou City Key Laboratory of River Basin Pollution Simulation and Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: With the changes of sludge matrix degradation rate (v_{COD}), extracellular polymeric substances (EPS) and enzyme activity (DHA) as the evaluation indexes, the effects of low-intensity ultrasound on the tolerance of heavy metal Cu(II) in anaerobic sludge were investigated under different influent Cu(II) concentrations. The results show that low-intensity ultrasound can improve the tolerance of sludge microorganisms to Cu(II). With the increase of the concentration of Cu(II) in the influent, the v_{COD} decreases in both the ultrasound group and the control group, but v_{COD} in the ultrasound group decreases more slowly. The fit of the relationship between the influent Cu(II) concentration and the percentage inhibition rate of sludge matrix degradation in the ultrasonic group and the control group yields IC_{50} of 94.62 mg/L and 88.85 mg/L, respectively, indicating that low-intensity ultrasonic waves can improve the inhibition threshold of Cu(II) by anaerobic sludge. The EPS content in the

收稿日期: 2022-05-21; 修回日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868025); 江西省自然科学基金重点项目(20202ACBL204017)

通信作者: 朱易春(1979—), 教授, 主要从事污水生物处理技术研究。E-mail: zhuych@jxust.edu.cn

ultrasound group and the control group increase slightly when the concentration of Cu(II) is 1 mg/L in the influent, and then decrease gradually with further increasing concentration of Cu(II). However, the EPS content in the ultrasound group is higher than that in the control group, which may be that low-intensity ultrasound reduces the biotoxicity of Cu(II) by promoting more EPS secretion from sludge. In addition, compared to the control group, the DHA activity of the ultrasound group is increased by 3.95%–36.31%. Therefore, the tolerance of anaerobic sludge to the heavy metal Cu(II) can be improved through low-intensity ultrasound, to maintain the stable operation of the anaerobic biological treatment of sewage.

Keywords: low-intensity ultrasound; anaerobic sludge; heavy metal Cu(II); dehydrogenase activity; extracellular polymer substances

随着能源危机加剧,厌氧生物处理技术因具有节约能耗、污泥产率低、CO₂排放量小、能量可回收等优势而受到广泛关注^[1-2]。在污水厌氧生物处理过程中,产甲烷菌世代时间长、生存条件苛刻及对环境变化敏感等问题影响了反应器运行稳定性以及污水处理效果。此外,重金属也是影响厌氧生物处理效果的重要因素之一。Cu(II)是污废水中较常见的重金属,是厌氧反应过程产甲烷菌中氢化酶、乙酰辅酶A合成酶、超氧化物歧化酶等的重要组成元素^[3-6],但是,过量的Cu(II)会抑制厌氧微生物菌群活性,造成出水水质变差。因此,提高厌氧微生物对Cu(II)的抑制阈值是确保污水厌氧生物处理过程稳定且高效运行的关键。

超声波是一种频率高于 20 kHz 的弹性机械波,超声波在气体或液体介质中主要以纵波的形式传播,通常将声强小于 10 W/cm² 的超声波称为低强度超声波^[7]。研究表明,低强度超声波能促进厌氧污泥活性,其主要作用是弱稳态空化和机械作用,同时产生解耦联代谢作用,导致污泥量减少^[8]。XIE 等^[9]研究发现低强度超声波可以通过增强厌氧污泥活性提高污水厌氧处理效果,超声组出水 COD 较对照组降低 30%。ZHU 等^[10]也发现低强度超声波可以显著提高厌氧污泥活性,厌氧污泥辅酶 F₄₂₀ 和脱氢酶含量分别增加了 59.8% 和 192.3%,COD 去除率达到 87.3%。此外,低强度超声辐照过程产生的稳态空化效应与能量转化可以导致混合液环境发生变化,对污泥的粒径、胞外聚合物(EPS)、沉降性能均产生相应影响,细胞结构和酶活性也会发生改变,从而对重金属离子的形态和毒性产生关联影响^[11-13]。

基于此,为了提升厌氧污泥对 Cu(II) 的极限浓度,本研究采用批次试验,设置超声组与对照组反应器,在不同进水 Cu(II) 浓度下考察低强度超声波对厌氧污泥的强化效果,并通过对两组反应器污泥酶活性(DHA)、污泥 EPS、出水挥发性脂肪酸(VFA)及污泥生物量(VSS/TSS)等因素进行分析,探究低强度超声波提升厌氧污泥对 Cu(II) 耐受性的作用规律,

以期低强度超声波应用于厌氧生物处理含重金属 Cu(II) 污水提供新的思路。

1 实验部分

1.1 进水水质和接种污泥

采用人工配制污水,以葡萄糖为碳源,氯化铵为氮源,磷酸二氢钾为磷源,反应器进水所需 C、N、P 的质量比为 200:5:1,通过投加 NaHCO₃ 调节碱度,反应器进水有机物浓度约为 900 mg/L, Cu(II) 以 CuSO₄·5H₂O 形式按需投加。厌氧污泥取自本课题组稳定运行的超声组与对照组 ABR 反应器,超声组超声参数为频率 20 kHz、声能密度 0.1 W/mL、辐照时间 10 min、辐照周期 24 h,辐照污泥比例 10%^[11]。污泥总悬浮物(TSS)浓度为 13.54 g/L,挥发性悬浮物(VSS)浓度为 7.72 g/L, VSS/TSS = 0.57,初始污泥沉降性能(SV₃₀) = 53%,污泥 pH ≈ 7.0,污泥颜色为黑褐色,低强度超声波驯化稳定后进行 Cu(II) 耐受性实验。

1.2 实验方法

分别从两组运行稳定的 ABR 中取出等量污泥,用 0.1 mol/L NaCl 溶液洗涤 3 次,均分成 6 份装入 12 个 500 mL 血清瓶(有效体积 400 mL)中,分别对应添加 Cu(II) 浓度 0、1、10、25、50、100 mg/L,血清瓶编号依次为 1、2、3、4、5、6。以探究低强度超声波提升厌氧污泥对重金属 Cu(II) 的极限浓度的调控效果。其中,污泥体积 150 mL,每天换水 250 mL,然后将血清瓶置于 (35 ± 1) °C 和 120 r/min 的恒温水浴摇床中培养,保持进水 COD 浓度 900 mg/L 左右,进行重金属 Cu(II) 冲击 24 h,恢复 96 h,每 24 h 取样测定进出水 COD 浓度,冲击 24 h 后测定污泥 DHA 活性,实验结束时测定污泥 VSS、TSS、EPS 含量,以及出水 VFA 组分与含量等。

1.3 测试方法

COD 测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)的快速密闭催化消解法测定^[14]; TSS、VSS 采用重

量法测定;EPS采用热提取法^[15]测定;脱氢酶的提取与活性测定采用氯化三苯基四氮唑分光光度法^[16];VFA采用Agilent 7890B配有氢火焰离子检测器(FID)和Agilent DB-FFAP毛细管柱气相色谱仪测定。

1.4 数据分析

1.4.1 污泥基质降解速率

将反应底物葡萄糖换算成当量化学需氧量(COD_{equ}),并选取底物转化降解历时曲线的线性部分计算污泥最大基质转换速率(v_{COD})^[17]。

$$\text{COD}_{\text{equ}} = \frac{16(2x + \frac{y}{2} - z)\Delta s}{12x + y + 16z} \quad (1)$$

式(1)中:COD_{equ}表示当量化学需氧量的数值,单位mg/L; x 、 y 、 z 分别代表底物分子式C_xH_yO_z;Δs代表底物降解曲线线性部分底物浓度差的数值,单位mg/L。

$$v_{\text{COD}} = \frac{\text{COD}_{\text{equ}} \times V}{(T_2 - T_1) \times X} \quad (2)$$

式(2)中: V 表示反应器有效容积; T_1 与 T_2 分别代表底物

降解曲线起止时间; X 表示反应体系厌氧生物量,以VSS含量计。

1.4.2 金属离子IC₅₀

金属离子IC₅₀即污泥降解速率为最大比降解速率50%时添加金属离子浓度。

$$v_{\text{COD}}(\%) = \frac{v_{\text{COD}i}}{v_{\text{COD}0}} \times 100\% \quad (3)$$

$$IP(\%) = \frac{v_{\text{COD}0} - v_{\text{COD}i}}{v_{\text{COD}0}} \times 100\% \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: $v_{\text{COD}i}$ 表示超声组 v_{COD} , $v_{\text{COD}0}$ 代表对照组 v_{COD} 。当 $IP=50\%$ 时,对应的添加金属离子浓度即为IC₅₀。

2 结果与讨论

2.1 低强度超声波对污泥基质降解速率(v_{COD})的影响

为考察不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对污泥 v_{COD} 的影响与恢复性能,开展重金属Cu(II)冲击24 h,恢复96 h实验,研究结果如图1所示。

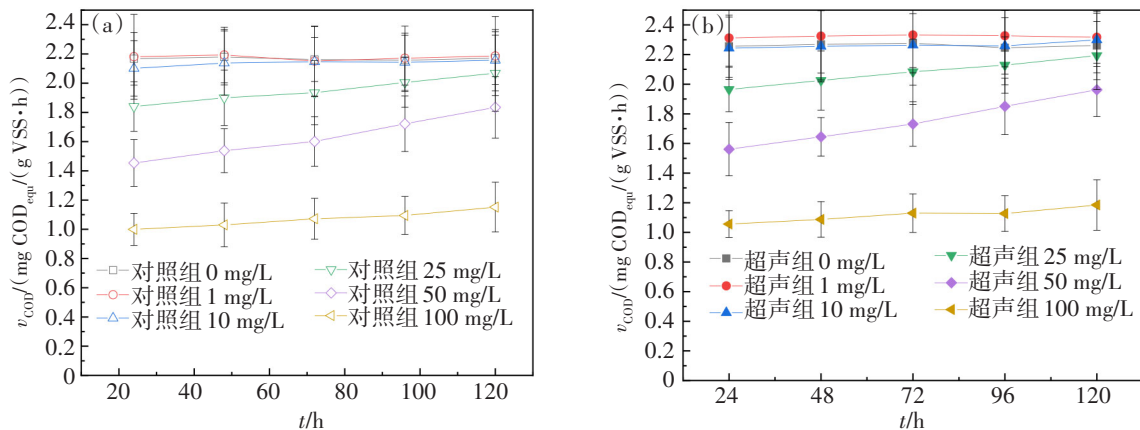


图1 不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对污泥基质降解速率(v_{COD})影响:(a)对照组;(b)超声组

Fig.1 Effect of low intensity ultrasound on degradation rate of sludge matrix at different influent Cu(II) concentrations: (a) control group; (b) ultrasound group

由图1可知,无论是超声组,还是对照组,添加1 mg/L Cu(II)时 v_{COD} 均有所提高,当进水Cu(II)浓度达到10 mg/L时,Cu(II)对厌氧污泥降解有机物产生轻微抑制,但反应24 h后,超声组 v_{COD} 为2.24 mg COD_{equ}/(g VSS·h),仍然高于对照组不添加Cu(II)时的2.17 mg COD_{equ}/(g VSS·h)。当Cu(II)浓度达到25 mg/L时,重金属Cu(II)对厌氧污泥活性产生明显抑制,反应24 h后,超声组 v_{COD} 下降了12.94%,而对照组 v_{COD} 下降了15.08%;停止添加Cu(II)96 h后,两组血清瓶 v_{COD} 基本都能得到恢复。当Cu(II)浓度上升至50 mg/L时,污泥活性受到较严重抑制,反

应24 h后超声组 v_{COD} 下降了30.8%,对照组 v_{COD} 下降了32.89%;停止添加Cu(II)96 h后,超声组 v_{COD} 恢复到86.96%,对照组 v_{COD} 恢复到84.64%。当Cu(II)浓度上升至100 mg/L时,污泥活性受到严重抑制,反应24 h后,对照组与超声组 v_{COD} 分别下降了53.87%和53.18%。由此可知,低强度超声波可以提高厌氧污泥的 v_{COD} ,但促进效果随着添加Cu(II)浓度上升而逐渐减弱。这主要是由于Cu(II)浓度越高,对厌氧污泥活性抑制越显著,从而削弱了低强度超声波的促进作用。

2.2 低强度超声波对污泥DHA活性的影响

DHA在厌氧生物反应过程中与细胞的氧化磷酸

化过程紧密相连,是评估厌氧微生物活性与微生物量的一个重要指标^[18]。为探究不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对污泥DHA活性的影响,在进行冲击实验24 h后对12个血清瓶污泥取样并测定,研究结果如图2所示。

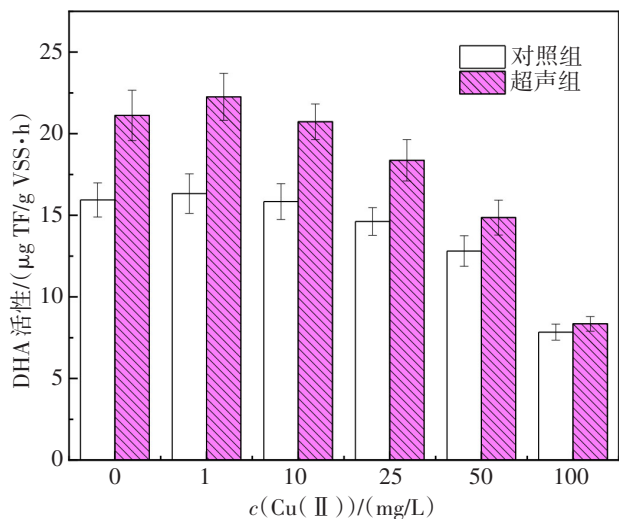


图2 不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对DHA活性影响

Fig.2 Effect of low intensity ultrasound on DHA activity at different influent Cu(II) concentrations

由图2可见,添加Cu(II)浓度分别为0、1、10、25、50、100 mg/L时,超声组DHA活性相比对照组分别提高了32.5%、36.31%、30.87%、26.65%、16.00%、3.95%。这可能是由于超声增加了细胞通透性,进而增强了胞内外物质的传递,提高了酶与反应底物的接触频率^[19]。酶活性的增加也可能是为了抵抗超声刺激而做出的细胞反应,这主要是由于低强度超声波产生的空化效应会对细胞造成轻微损伤,细胞在超声刺激下分泌更多的酶,可进行自我修复,从而增强微生物活性^[20]。此外,也有研究认为低强度超声波可以改变酶分子的构象,使其结构更加合理,从而提高酶活性^[21]。添加1 mg/L Cu(II)时,两组血清瓶中污泥DHA活性均有所提高;当Cu(II)浓度达到10 mg/L时,Cu(II)对污泥DHA活性产生轻微抑制;继续增加Cu(II)浓度,污泥DHA活性受到的抑制逐渐增强,并且低强度超声波对DHA活性的促进效果随着Cu(II)浓度的升高而逐渐减弱,这是由于低强度超声波对DHA活性的促进效果不足以抵消过高浓度Cu(II)对污泥的毒害作用,说明低强度超声波对Cu(II)耐受性提升有一定的浓度范围。但是,超声组DHA活性均高于对照组,这说明低强度超声波可以增强反应器对重金属Cu(II)的耐受性。

2.3 低强度超声波对污泥EPS含量影响

EPS是污泥微生物重要的组成成分,EPS的变化对污泥抵御外界风险能力具有重大影响^[22-24]。EPS是由微生物代谢、裂解以及吸附的颗粒物质产生的高分子聚合物,其包裹在细胞壁外,可以极大地保护菌体免受重金属的毒害作用,重金属离子随水进入反应器后,累积至一定量后必会改变污泥性质,进而影响污泥EPS含量^[25]。为探究低强度超声波强化厌氧污泥抗Cu(II)冲击的作用机制,在进行Cu(II)冲击恢复阶段,对12个血清瓶中污泥EPS量进行检测分析,结果如图3所示。

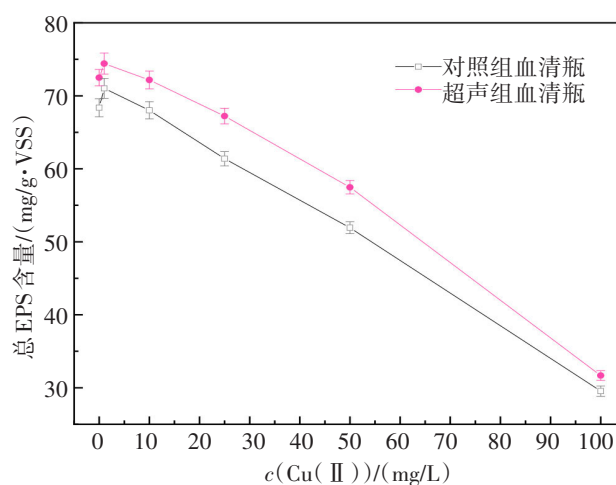


图3 不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对EPS含量影响
Fig.3 Effect of low intensity ultrasound on EPS content at different influent Cu(II) concentrations

由图3可见,Cu(II)浓度在1 mg/L时,两组反应器EPS含量均有所增加,前面研究也表明1 mg/L Cu(II)对污泥并未产生毒性,反而促进了厌氧反应过程的 v_{COD} 。当Cu(II)浓度分别为10、25、50、100 mg/L时,超声组EPS比对照组分别增加了6.10%、9.51%、10.67%、7.24%。当Cu(II)浓度为10~50 mg/L时,超声对污泥分泌EPS的促进作用随着进水Cu(II)浓度增加而增大;当Cu(II)浓度大于50 mg/L时,Cu(II)严重抑制了污泥活性,超声波的促进作用开始减弱。污泥在应对Cu(II)冲击时,污泥胞外聚合物表面的官能基团能够为金属Cu(II)提供吸附位点,从而降低重金属离子对污泥微生物的生物毒性。低强度超声波能够促进污泥分泌更多的EPS,增强污泥对重金属Cu(II)的耐受性,强化反应器重金属对Cu(II)冲击的抵抗力,提高运行稳定性。

2.4 低强度超声波对污泥VFA含量与组分的影响

VFA主要包括乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸、异戊酸等,是厌氧消化过程中重要的中间产

物,是有机物质在厌氧水解酸化阶段的主要产物^[26]。监测VFA含量可以反映有机物质的水解酸化过程^[27]。为探究低强度超声波在不同进水Cu(II)浓度下对反应器出水VFA含量与组分的

影响,在进行重金属Cu(II)冲击恢复阶段,对12个血清瓶中污泥VFA含量与组分进行检测分析,如表1所列。

表1 不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对VFA组分与含量的影响

Table 1 Effect of low intensity ultrasound on VFA composition and content at different influent Cu(II) concentrations

隔室	VFA含量/(mg/L)					
	乙酸	丙酸	异丁酸	正丁酸	异戊酸	正戊酸
对照组1	14.63 ± 1.67	10.96 ± 1.24	0.34 ± 0.03	0.94 ± 0.15	0.38 ± 0.04	0.35 ± 0.04
超声组1	33.49 ± 4.12	22.85 ± 2.76	0.48 ± 0.02	0.96 ± 0.18	0.34 ± 0.03	0.21 ± 0.04
对照组2	15.63 ± 1.84	11.77 ± 1.35	0.38 ± 0.05	0.85 ± 0.08	0.28 ± 0.04	0.49 ± 0.07
超声组2	35.54 ± 3.54	22.79 ± 2.89	0.47 ± 0.03	1.09 ± 0.12	0.42 ± 0.05	0.28 ± 0.04
对照组3	19.88 ± 2.09	13.45 ± 1.75	0.48 ± 0.04	1.25 ± 0.15	0.54 ± 0.07	0.44 ± 0.06
超声组3	36.78 ± 3.28	23.45 ± 3.34	0.55 ± 0.05	1.34 ± 0.11	0.59 ± 0.05	0.53 ± 0.08
对照组4	27.21 ± 3.37	16.57 ± 1.98	0.66 ± 0.05	1.45 ± 0.17	0.85 ± 0.11	0.56 ± 0.07
超声组4	45.43 ± 5.14	27.44 ± 3.87	0.48 ± 0.07	1.43 ± 0.16	1.08 ± 0.21	0.71 ± 0.07
对照组5	45.29 ± 4.87	30.21 ± 3.75	0.66 ± 0.07	1.75 ± 0.21	1.02 ± 0.24	0.68 ± 0.09
超声组5	58.96 ± 6.29	40.28 ± 4.69	0.75 ± 0.09	1.69 ± 0.19	1.11 ± 0.16	0.86 ± 0.10
对照组6	96.65 ± 10.22	62.49 ± 6.65	0.77 ± 0.09	2.65 ± 0.22	1.08 ± 0.17	0.98 ± 0.17
超声组6	101.28 ± 11.43	68.87 ± 7.38	1.04 ± 0.18	2.38 ± 0.34	1.21 ± 0.09	1.28 ± 0.14

研究表明,低强度超声波辐照与添加金属Cu(II)均会促进厌氧反应体系中VFA含量升高,并且随着添加Cu(II)浓度增加,反应体系中累积的VFA总量也逐渐增大。反应体系中VFA以乙酸和丙酸为主,添加Cu(II)浓度为0、1、10、25、50、100 mg/L时,超声组VFA比对照组分别增加了211.34%、206.09%、175.47%、161.85%、130.20%、106.95%。相比未添加Cu(II),当Cu(II)浓度为1 mg/L时,超声组与对照组VFA总浓度仅略微升高;随着Cu(II)浓度升高,对照组与超声组VFA总量均快速提升,并且对照组VFA的累积速率明显高于超声组。VFA的累积主要是由于污泥活性受到抑制,厌氧微生物无法将VFA进一步转化^[28]。综上,低强度超声波与添加重金属Cu(II)均能够促进厌氧反应中间产物VFA的积累,但是,当进水Cu(II)浓度过高,促进产生的VFA对厌氧反应过程产生酸抑制,低强度超声波对VFA的促进效果被减弱。

2.5 低强度超声波对污泥VSS/TSS影响

污泥中VSS浓度大致代表了污泥中微生物的含量,VSS/TSS在一定程度上代表了污泥中微生物含

量比例,其数值的变化间接反映微生物的生长情况^[29]。批次实验未对两组血清瓶污泥进行取样测试,研究结果如图4所示。

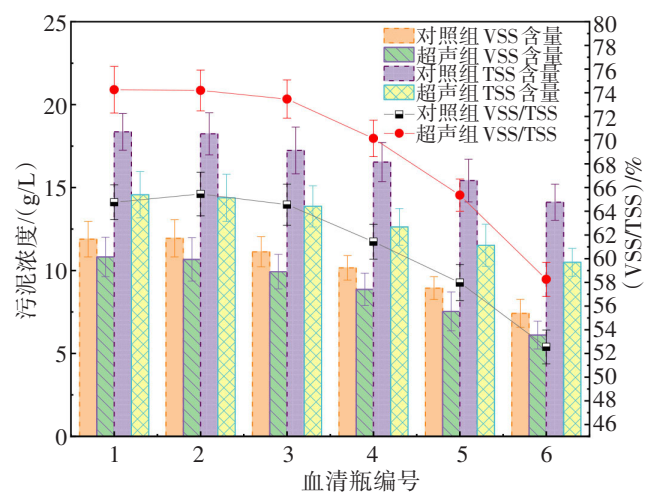


图4 不同进水Cu(II)浓度下低强度超声波对污泥VSS/TSS影响

Fig.4 Effect of low intensity ultrasound on sludge VSS/TSS at different influent Cu(II) concentrations

由图4可知,当Cu(II)浓度为1 mg/L时,超声组与对照组污泥VSS、TSS、VSS/TSS相比不添加Cu(II)时变化较小;随着进水Cu(II)浓度增加,两组血清瓶污泥VSS、TSS、VSS/TSS均呈现逐渐降低的趋势,并且降低速度逐渐加快。超声组污泥VSS、TSS浓度均低于对照组,但是,超声组污泥VSS/TSS始终高于对照组,添加Cu(II)浓度0、1、10、25、50、100 mg/L时,对照组VSS/TSS分别为64.76%、65.46%、64.56%、61.43%、57.98%、52.55%,超声组VSS/TSS分别为74.26%、74.2%、73.47%、70.15%、65.36%、58.25%。综上可知,低强度超声波与添加重金属Cu(II)均会伴随污泥产生减量化

效应,但是,超声组污泥中微生物活性更高,经低强度超声波辐照后,更有利于污泥微生物的生长^[30]。

2.6 低强度超声波对污泥 IC_{50} 影响

利用线性回归方程对超声组和对照组进水Cu(II)浓度与基质降解速率抑制百分比之间的关系进行拟合,拟合结果如图5所示。线性拟合对照组和超声组的相关系数 R^2 分别为0.984 4和0.984 9,拟合得到对照组和超声组污泥Cu(II)的半抑制浓度 IC_{50} 分别为88.85 mg/L和94.62 mg/L,这说明低强度超声波能够提高污泥中Cu(II)的 IC_{50} ,增强污泥对Cu(II)的耐受性。

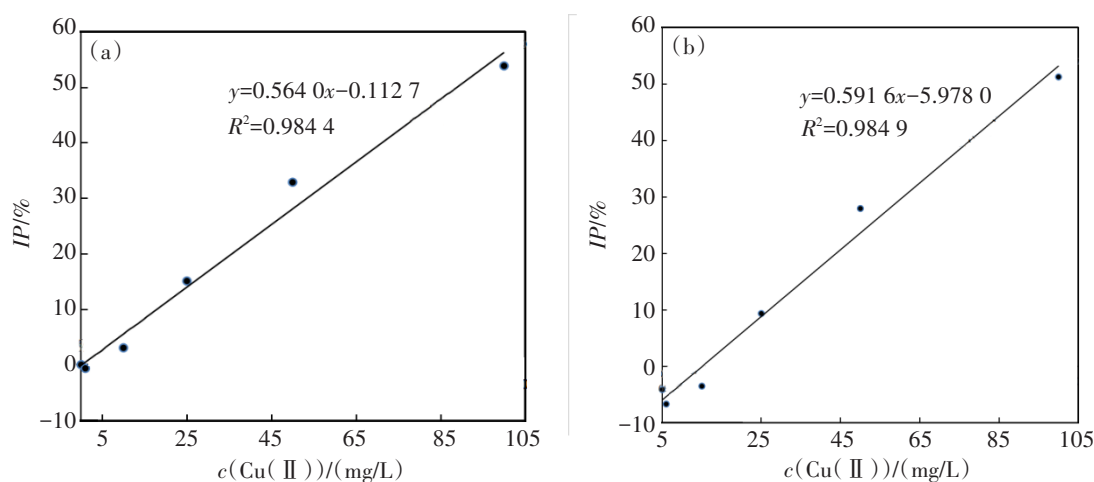


图5 对照组(a)与超声组(b)的污泥 IC_{50}

Fig.5 Sludge IC_{50} in control group (a) and ultrasonic group (b)

3 结论

1)低强度超声波可提高处理含Cu(II)污水有机物去除效果与 v_{COD} ,但超声促进效果随进水Cu(II)浓度增加而逐渐减弱。低强度超声波能够促进污泥分泌更多的EPS,从而提高反应器对Cu(II)冲击的抵抗力,使得运行稳定。对照组和超声组污泥Cu(II)的半抑制浓度 IC_{50} 分别为88.85 mg/L和94.62 mg/L,低强度超声波能够提高污泥中Cu(II)半抑制浓度 IC_{50} ,增强污泥对Cu(II)的耐受性。

2)低强度超声波能促进污泥DHA活性,对DHA活性的促进效果随着Cu(II)浓度增加而逐渐减弱。低强度超声波与添加Cu(II)均能够促进厌氧反应中间产物VFA含量增加,但是,随着进水Cu(II)浓度升高,低强度超声波对VFA的促进效果减弱。低强

度超声波与添加Cu(II)均会产生污泥减量化效应,但超声能增强厌氧微生物活性。

参考文献:

- [1] 田帅,朱易春,黄书昌,等.厌氧生物处理低浓度污水研究进展[J].化工进展,2021,40(4):2338-2346.
- [2] 张瑜,石先阳. Fe^{3+} 对厌氧产甲烷体系的影响及生物有效性研究[J].水处理技术,2018,44(8):76-80.
- [3] FERMOSE F G, BARTACEK J, JANSEN S, et al. Metal supplementation to UASB bioreactors: from cell-metal interactions to full-scale application[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(12): 3652-3667.
- [4] 胡婉蓉,林敏,宋云龙,等.非常规微量元素对厌氧发酵性能的提升作用[J].新能源进展,2021,9(2):85-94.
- [5] SERAVALLI J, GU W W, TAM A, et al. Functional copper at the acetyl-CoA synthase active site[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of

- America, 2003, 100(7): 3689-3694.
- [6] MATAINAHO F T. Comparisons of the anaerobic treatment of soluble wastewaters using various configurations under mesophilic (35 °C) and thermophilic (55 °C) conditions[D]. Nashville, TN, USA: Vanderbilt University, 2001.
- [7] PITT W G, ROSS S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth[J]. *Biotechnology Progress*, 2003, 19(3): 1038-1044.
- [8] 朱易春, 王佳琪, 杜茂安. 低强度超声波强化污水生物处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] XIE B, LIU H, YAN Y. Improvement of the activity of anaerobic sludge by low-intensity ultrasound[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 260-264.
- [10] ZHU Y, LI X, DU M, et al. Improve bio-activity of anaerobic sludge by low energy ultrasound[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72(12): 2221-2228.
- [11] 李鑫, 朱易春, 连军锋, 等. 低强度超声波对 ABR 处理低浓度污水效果及污泥特性的影响[J]. *化工进展*, 2021, 40(11): 6401-6408.
- [12] 曾玉, 龙焙, 张斌超, 等. 自养硝化颗粒污泥吸附铅离子机理研究[J]. *江西冶金*, 2022, 42(1): 53-60.
- [13] 闫怡新, 刘红. 低强度超声波强化污水生物处理技术[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(8): 31-33.
- [14] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [15] LI J B, YE W, WEI D, et al. System performance and microbial community succession in a partial nitrification biofilm reactor in response to salinity stress[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 512-518.
- [16] AMBROSE H W, PHILIP L, SURAIISKUMAR G K, et al. Anaerobic co-digestion of activated sludge and fruit and vegetable waste: evaluation of mixing ratio and impact of hybrid (microwave and hydrogen peroxide) sludge pre-treatment on two-stage digester stability and biogas yield[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101498.
- [17] 王祥锬, 闵祥发, 李建政, 等. 产氢产乙酸和产甲烷反应对厌氧消化的限速作用[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 2997-3002.
- [18] 武原原, 李姗姗, 吴淑妍, 等. Ni^{2+} 和金霉素共存对序批式反应器性能、微生物活性及其微生物群落的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(10): 89-100.
- [19] CHISTI Y. Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity[J]. *Trends in Biotechnology*, 2003, 21(2): 89-93.
- [20] WU J, LIN L. Ultrasound-induced stress responses of panax ginseng cells: enzymatic browning and phenolics production[J]. *Biotechnology Progress*, 2002, 18(4): 862-866.
- [21] MA H L, HUANG L R, JIA J Q, et al. Effect of energy-gathered ultrasound on alcalase[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1): 419-424.
- [22] FLEMMING H C, WINGENDER J. The biofilm matrix[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 8(9): 623-633.
- [23] BASUVARAJ M, FEIN J, LISS S N. Protein and polysaccharide content of tightly and loosely bound extracellular polymeric substances and the development of a granular activated sludge floc[J]. *Water Research*, 2015, 82(1): 104-117.
- [24] WANG Z, GAO M, WANG S, et al. Effect of hexavalent chromium on extracellular polymeric substances of granular sludge from an aerobic granular sequencing batch reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251: 165-174.
- [25] 王立闯, 郝娇, 李延吉, 等. 玉米秸秆对鸡粪厌氧发酵过程及酶活性的影响规律研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(11): 1441-1446.
- [26] SIDDIQUE M N I, WAHID Z A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 359-371.
- [27] REN Y Y, YU M, WU C F, et al. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: research updates and tendencies[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1069-1076.
- [28] 徐一雯, 杨国栋, 王凤侠, 等. 预处理及物料配比对有机垃圾厌氧发酵的影响[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 100-106.
- [29] 贺绍鑫, 温皓, 王东羽, 等. 不同絮凝剂对黑臭底泥沉降及脱水性能的影响[J]. *江西冶金*, 2022, 42(2): 67-72.
- [30] 李鑫. 低强度超声波强化厌氧折流板反应器处理低浓度污水特性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.

(责任编辑:赵中波)