

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.012

超声对低水温SBR污泥性能及群体感应的影响

陶 艺^{1,2,3}, 员 建^{1,2,3}, 马华继^{1,2,3}, 李道甲⁴, 王美丽⁵,
史新盼^{1,2,3}, 冯家举^{1,2,3}

(1. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 3. 天津城建大学 基础设施防护和环境绿色生物技术国际联合研究中心, 天津 300384; 4. 上海洗霸科技股份有限公司, 上海 200437; 5. 天津城市道路管网配套建设投资有限公司, 天津 300381)

摘 要: 通过建立连续流超声调控低水温SBR系统,分析超声调控对低水温活性污泥性能及群体感应的影响。结果表明,在15℃低水温条件下,超声调控SBR系统的污泥产率系数(Y_{obs})降低至0.306 kgVSS/kgCOD,污泥减量率(SRE)为44.77%。超声调控并不影响活性污泥的正常沉降和系统的稳定运行,系统污泥容积指数(SVI)为121.2~148.0 mL/g, COD去除效果稳定,出水COD可达22 mg/L。活性污泥胞外聚合物(EPS)含量升高,多糖和蛋白质含量分别升至74.71和29.23 mg/gMLSS,提高了63.2%和36.8%。超声调控对活性污泥信号分子浓度有较大影响,C4-HSL浓度为0.196 6 $\mu\text{g/L}$,单位质量污泥的信号分子含量为0.044 $\mu\text{g/gMLSS}$,分别为对照反应器的2.56和2.44倍。超声调控还导致C6-HSL、C7-HSL、C8-HSL、C10-HSL、C12-HSL和C14-HSL等信号分子浓度显著降低。

关键词: 超声; 低水温; 污泥性能; 群体感应

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0076-06

Effects of Ultrasonic Wave on Properties and Quorum Sensing of Sludge in SBR with Low Water Temperature

TAO Yi^{1,2,3}, YUAN Jian^{1,2,3}, MA Hua-ji^{1,2,3}, LI Dao-jia⁴, WANG Mei-li⁵,
SHI Xin-pan^{1,2,3}, FENG Jia-ju^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China; 3. Joint Research Centre for Protective Infrastructure Technology and Environmental Green Bioprocess, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. Shanghai Emperor of Cleaning Technology Co. Ltd., Shanghai 200437, China; 5. Tianjin Urban Road Pipeline Network Complete Set Construction Investment Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: This paper established a continuous-flow ultrasonic SBR system for low temperature wastewater treatment, and investigated the effects of ultrasonic wave on the properties and quorum sensing of activated sludge at low temperature. When the wastewater temperature was 15℃, the yield coefficient (Y_{obs}) of sludge in the ultrasonic SBR system decreased to 0.306 kgVSS/kgCOD, and the sludge reduction

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际创新合作”重点专项(2019YFE0122400)

通信作者: 马华继 E-mail: mahjh510@163.com

rate (SRE) was 44.77%. Ultrasonic wave did not affect the settling performance of activated sludge and the stability of the system. The sludge volume index (SVI) of the sludge in the system was between 121.2 mL/g and 148.0 mL/g. Stable COD removal performance was obtained, and the effluent COD reached 22 mg/L. The extracellular polymeric substances (EPS) content of activated sludge increased, and the polysaccharide and protein contents increased to 74.71 mg/gMLSS and 29.23 mg/gMLSS, respectively, which increased by 63.2% and 36.8%, respectively. Ultrasonic wave significantly affected the concentration of signal molecules in activated sludge. The concentration of C4-HSL was 0.196 6 $\mu\text{g/L}$, and the signal molecule content per unit mass of sludge was 0.044 $\mu\text{g/gMLSS}$, which was 2.56 times and 2.44 times of that of the control reactor, respectively. Ultrasonic wave also resulted in the significant decrease of the concentrations of signal molecules such as C6-HSL, C7-HSL, C8-HSL, C10-HSL, C12-HSL and C14-HSL.

Key words: ultrasonic wave; low water temperature; sludge property; quorum sensing

活性污泥法已广泛应用于污(废)水处理,然而其会产生大量剩余污泥,并存在污泥膨胀和生物泡沫问题,引起了广泛关注。在冬季较低水温条件下,污泥膨胀和生物泡沫问题更加严重^[1],这会导致二沉池泥水分离效果下降,出水水质易超标。

超声波是指频率超过 20 kHz、超出人耳听觉上阈值的声波。低强度超声波能提高微生物酶的活性,促进微生物的代谢和生长。当超声强度达到一定阈值后,会抑制微生物生长,甚至破坏细胞壁而造成其死亡。近十几年来,超声波被广泛用于污水和污泥处理领域,调控活性污泥性能,并同步实现污泥减量、抑制丝状膨胀和系统性能提升^[2]。然而超声调控的生物效应仍需要进一步探索。前期研究发现,超声调控可改善污泥沉降性能并实现污泥原位减量^[3],经超声处理后活性污泥的胞外聚合物(EPS)含量明显升高^[3]。然而,超声调控是如何导致系统活性污泥中EPS含量升高并不清楚。

EPS的组成及含量对活性污泥特性及工艺性能有重要影响。EPS合成与活性污泥中细菌的群体感应有关^[4-5]。因此,有必要探索超声调控对活性污泥群体感应的影响。笔者建立了连续流超声调控低水温SBR活性污泥系统,并进行了初步调控研究,以获取连续流超声调控对低水温SBR系统中污泥特性、污泥减量和活性污泥群体感应的影响。

1 材料与方法

1.1 活性污泥与模拟污水

活性污泥取自天津市某市政污水厂二沉池排出的回流污泥,含水率为99.0%,污泥沉降比(SV)

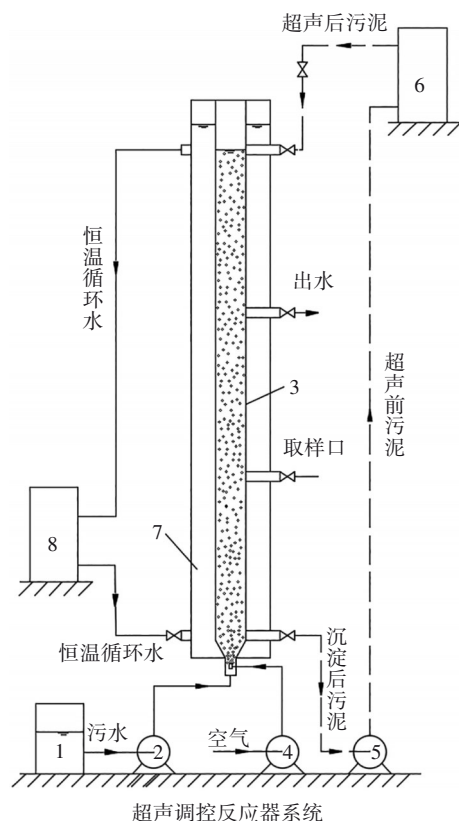
为87%,污泥容积指数(SVI)为80.4~170.8 mL/g, pH为6.95~7.58,颜色为棕褐色。

模拟污水以葡萄糖为碳源、氯化铵为氮源、磷酸二氢钾和磷酸氢二钠为磷源,其按照COD为400 mg/L、TN为50 mg/L、TP为5 mg/L配制。常量组分含量如下:C₆H₁₂O₆为375 mg/L、NH₄Cl为152.86 mg/L、KH₂PO₄为11 mg/L、Na₂HPO₄为11 mg/L、蛋白胨(N含量为12%)为30 mg/L。微量组分含量如下:CaCl₂为20 mg/L、MgSO₄·7H₂O为50 mg/L、EDTA为50 mg/L、H₃BO₃为0.15 mg/L、KI为0.03 mg/L、MoO₃为0.7 mg/L、MnSO₄·H₂O为3.66 mg/L、FeSO₄·7H₂O为0.3 mg/L、ZnSO₄·7H₂O为0.12 mg/L、CuSO₄·5H₂O为0.03 mg/L、CoCl₂·6H₂O为0.15 mg/L、Ni(NO₃)₂为0.085 9 mg/L。

1.2 实验装置

超声调控SBR系统由进水箱、进水蠕动泵、主反应器、空气泵、超声反应器进料泵、超声反应器、恒温水浴和低温恒温槽等组成,如图1所示。主反应器材质为有机玻璃,尺寸为60 mm×60 mm×1100 mm,有效容积为3.6 L。反应器底部进水进气,有效水深1/3处设取样口、2/3处设出水口。反应器正常液位高度处设超声处理后的污泥回流入口。进水蠕动泵、空气泵和排水管上电磁阀的启停和开关由微电脑时控开关自动控制。主反应器两侧设置恒温水浴区,该区通过管路与低温恒温槽相连。主反应器底部排泥管通过进料泵连接至超声反应器。超声反应器出料接回主反应器污泥回流入口。对照SBR系统没有超声反应器进料泵和超声反应器,

其余与超声调控SBR系统相同。



1. 进水箱 2. 进水蠕动泵 3. 主反应器 4. 空气泵 5. 超声反应器进料泵
6. 超声反应器 7. 恒温水浴 8. 低温恒温槽

图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

1.3 实验方法

将取回的活性污泥先曝气0.5 h, 停止曝气后静置沉淀30 min, 将沉淀后的污泥用筛子滤去粗大杂物, 再分别取1 200 mL滤后污泥接入两个主反应器中。注入模拟污水至正常水位, 启动空气泵, 开启低温恒温槽使主反应器的恒温水浴水循环, 控制主反应器内水温为 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。两个主反应器均以SBR模式运行, 充水比为0.33, 周期时间为4 h, 其中进水5 min、曝气反应135 min、沉淀60 min、排水10 min、超声工序30 min。调节曝气量控制主反应器内混合液DO为3~4 mg/L。初始污泥负荷均为 $0.247 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。每天排放剩余污泥, 控制两个系统的泥龄均为10 d。

对照反应器不进行超声调控, 排水后静置30 min。超声调控反应器在白天的3个周期均对活性污泥进行超声, 即在排水工序结束后开启蠕动泵, 将沉淀后的活性污泥以100 mL/min的流量送入连

续流超声反应器。超声反应器采用周期性开停模式(超声周期时间为6 s, 其中开启2 s、停止4 s), 超声频率为20 kHz, 超声强度为 0.113 W/mL , 有效超声时间为30 s。对主反应器内沉淀的污泥全部进行超声处理后停止反应器。超声处理后的污泥送回至主反应器, 随后开始下一周期的运行。

每两天采集1次进水和出水水样, 测定COD、SS、TN、氨氮、TP和pH等指标, 并测定污泥沉降速率。每两天采集反应器中的活性污泥混合样, 测定SV、MLSS、SVI、胞外聚合物(EPS)等指标。装置运行稳定后取SBR系统活性污泥检测群体感应信号分子。

1.4 检测项目及方法

以污泥产率系数(Y_{obs})表示剩余污泥的产率, 以污泥减量率(SRE)表示系统的污泥减量效果, 以污泥沉降速率和SVI表示污泥沉降性能^[2,6]。COD、SS、TN、氨氮、TP、MLSS、SV和SVI按照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定。pH采用pH计测定。污泥沉降速率的测试是在运行周期中曝气停止后, 分别记录不同沉淀时间反应器中活性污泥混合液的污泥界面高度, 再经计算获得。EPS采用热水浴处理法进行提取, 采用硫酸-萘酮比色法^[7]和Lowry法^[8]分别测定提取液中的蛋白质和多糖含量。

活性污泥混合液的信号分子采用液相色谱质谱联用法测定。①对活性污泥样品进行超声破碎, 超声频率为20 kHz、探头浸没深度为10 mm、能量密度为 2 W/mL 、超声时间为10 min。②将超声后的污泥以8 000 r/min离心10 min, 收集上清液。③用乙酸乙酯以体积比例为1:1萃取上清液, 摇匀后静置3 min, 重复萃取3次。④萃取完成后每200 mL的溶液中加入5 g无水硫酸镁, 放置24 h后用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 收集滤液。⑤将滤液用旋转蒸发仪蒸干, 往瓶中加入2 mL色谱级甲醇溶解信号分子, 移入棕色小瓶中, 拧紧盖子放入冰箱待测。⑥将处理后的样品棕色小瓶置于液质联用仪进样器中, 色谱条件: Agilent ZORBAX SB-C18 色谱柱($2.1 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, $1.8 \mu\text{m}$), 分析时间为15 min, 流速为 0.20 mL/min , 进样体积为 $10 \mu\text{L}$, 流动相A为含有1%色谱级甲酸的纯水、B为色谱级甲醇, 采用梯度脱洗; 质谱条件: 离子源为电喷雾离子源(ESI), 采用正离子扫描、多反应离子监测(MRM)模式, 载气为氮气, 温度为 300°C , 离子源为 100°C , 流速为 180 L/h 。

2 结果与讨论

2.1 超声调控系统的污泥减量和COD去除情况

图2为超声调控系统污泥浓度的变化。可知,随着运行时间的增加,两个反应器内污泥浓度均在下降,且超声调控反应器的污泥浓度下降速率更快一些。前15 d,系统内活性污泥处于适应阶段,由于排放的剩余污泥量大于增殖产生的污泥量,对照反应器污泥浓度由初始的4.52 g/L降低到3.62 g/L,降低速率为0.071 7 g/(L·d);而超声调控系统污泥浓度则由4.55 g/L降低至3.40 g/L,降低速率为0.090 2 g/(L·d)。随后反应器进入稳定运行阶段,在21~35 d期间,对照反应器污泥浓度稳定在3.23~3.34 g/L之间;而超声调控系统的污泥浓度仍在缓慢下降,降低速率为0.029 3 g/(L·d),最终在第35天时降低到2.86 g/L。经计算,超声调控系统的 Y_{obs} 为0.306 kgVSS/kgCOD,而同期对照反应器为0.554 kgVSS/kgCOD,可见超声调控导致的系统污泥减量率为44.77%。

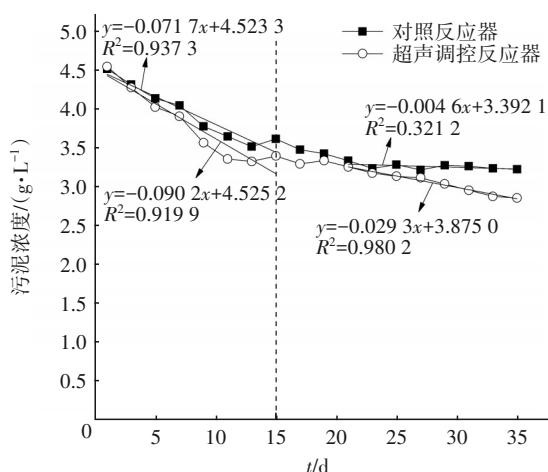


图2 超声调控系统污泥浓度的变化

Fig.2 Change of sludge concentration in ultrasonic SBR system

系统进水COD约为400 mg/L,对照反应器出水COD由初始阶段的60 mg/L以上降至后期的33 mg/L。0~15 d,两个系统的出水COD相近,15 d后稳定运行期间超声调控系统出水COD低于对照反应器,出水COD为22 mg/L,COD去除率达94.5%。

2.2 超声调控对活性污泥沉降性能的影响

超声调控对活性污泥沉降速率的影响如图3所示。可知,0~20 min,对照反应器内活性污泥的泥水界面沉降速率高于超声调控反应器。对照反应器

活性污泥泥水沉降界面最高沉降速率为4.06 m/h,且在沉淀开始后的第7分钟出现;而超声调控反应器相应的最高沉降速率为2.38 m/h,在沉淀开始后20 min达到。超声处理在一定程度上改变了污泥絮体结构,降低了污泥沉降速率。随着超声时间的延长,系统中活性污泥沉降速率下降。在30 min之后,两个系统的污泥沉降速率相差不大,60 min后基本相同,均处于0.72~0.96 m/h之间。系统运行稳定以后,对照反应器的SVI值相对较低,在97.7~128.0 mL/g之间,超声调控反应器在121.2~148.0 mL/g之间。可见,超声调控后活性污泥的沉降性能稍有变差,但并不影响正常沉降,也不会影响系统的稳定运行。

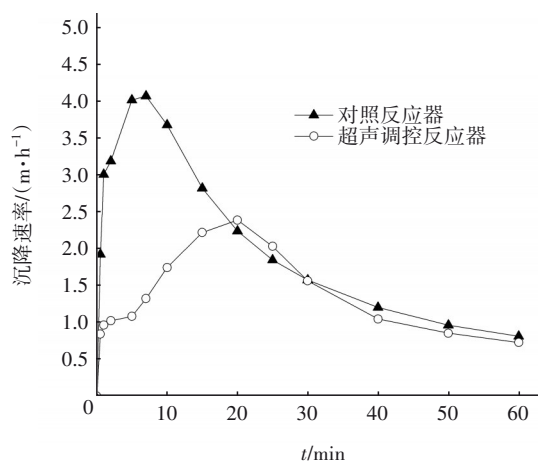


图3 超声调控对活性污泥沉降速率的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic wave on settling rate of activated sludge

2.3 超声调控对胞外聚合物的影响

超声调控反应器中活性污泥胞外聚合物的蛋白质和多糖含量均有所升高。对照组反应器活性污泥的多糖和蛋白质含量分别为45.78和21.37 mg/gMLSS,超声调控反应器的分别为74.71和29.23 mg/gMLSS。超声调控导致活性污泥多糖含量提高了63.2%,蛋白质含量提高了36.8%。可见,超声调控导致系统中活性污泥胞外聚合物含量升高,这与李道甲等人的研究结果一致^[3]。Tian等的研究也表明,在0.15 W/mL低强度超声波处理10 min条件下,污泥中松散型EPS含量由8.3 mg/gVSS增加至18.0 mg/gVSS^[9]。超声处理对活性污泥细胞产生了威胁,细菌为了抵御超声波侵害,群体细胞分泌胞外聚合物到细胞外以抵御超声波侵袭,最终导致了活性污泥中胞外聚合物含量升高。

2.4 超声调控对活性污泥信号分子浓度的影响

在系统稳定运行期间,对照反应器中检测到了C4-HSL($0.076\ 8\ \mu\text{g/L}$)、C6-HSL($0.084\ 7\ \mu\text{g/L}$)、C7-HSL($0.036\ 2\ \mu\text{g/L}$)、C8-HSL($0.039\ 9\ \mu\text{g/L}$)、C10-HSL($0.417\ 0\ \mu\text{g/L}$)、C12-HSL($0.677\ 2\ \mu\text{g/L}$)、C14-HSL($0.298\ 7\ \mu\text{g/L}$)和OXO-C14-HSL($0.599\ 6\ \mu\text{g/L}$)等信号分子。OXO-C6-HSL、OXO-C8-HSL、OXO-C10-HSL和OXO-C12-HSL等信号分子未检出。超声调控反应器中只检测到了C4-HSL($0.196\ 6\ \mu\text{g/L}$)、OXO-C6-HSL($0.002\ 4\ \mu\text{g/L}$)和OXO-C14-HSL($0.020\ 9\ \mu\text{g/L}$)等信号分子。可以看出,在超声调控下,活性污泥中C4-HSL浓度为对照反应器的2.56倍。超声调控反应器中C4-HSL的单位质量污泥信号分子含量为 $0.044\ \mu\text{g/gMLSS}$,见图4,是对照反应器的2.44倍。超声调控反应器中OXO-C14-HSL浓度比对照反应器低 $0.578\ 7\ \mu\text{g/L}$ 。因此,可以推测超声调控导致反应器中C4-HSL信号分子浓度大幅度增加,累积到一定程度后,反馈给活性污泥微生物细胞,使其开启多糖和蛋白质的合成与分泌,最终导致反应器内活性污泥胞外聚合物含量升高。

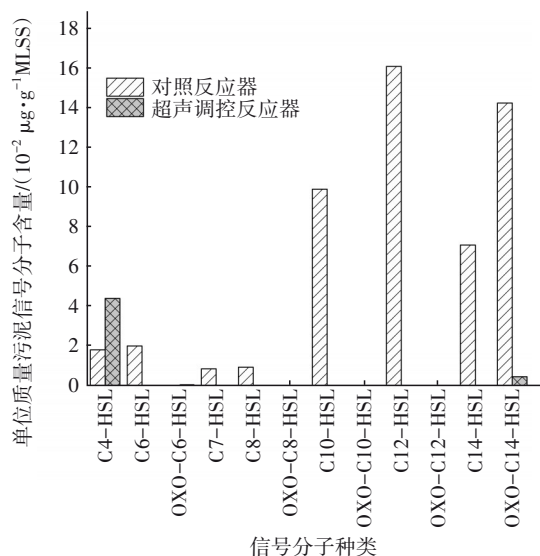


图4 超声调控对活性污泥体系中信号分子含量的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic wave on signal molecules content in activated sludge system

超声调控、信号分子和EPS的模式如图5所示。超声调控初始,活性污泥混合液中的C4-HSL信号分子浓度较低,细菌细胞的多糖和蛋白质以正常速率合成与分泌,活性污泥中胞外聚合物含量正常,见图5(a)。随着超声调控的进行,超声波对活性污

泥中的细菌产生了威胁,细菌应激快速合成与分泌群体感应信号分子C4-HSL,导致反应器活性污泥混合液中C4-HSL信号分子浓度迅速增加并累积到一定程度,之后反馈给活性污泥细菌细胞,使其开启多糖和蛋白质的快速合成与分泌,最终使得反应器内活性污泥胞外聚合物含量迅速增加,见图5(b)。增加的胞外聚合物在一定程度上起到了保护细菌细胞免受超声波损害的作用。

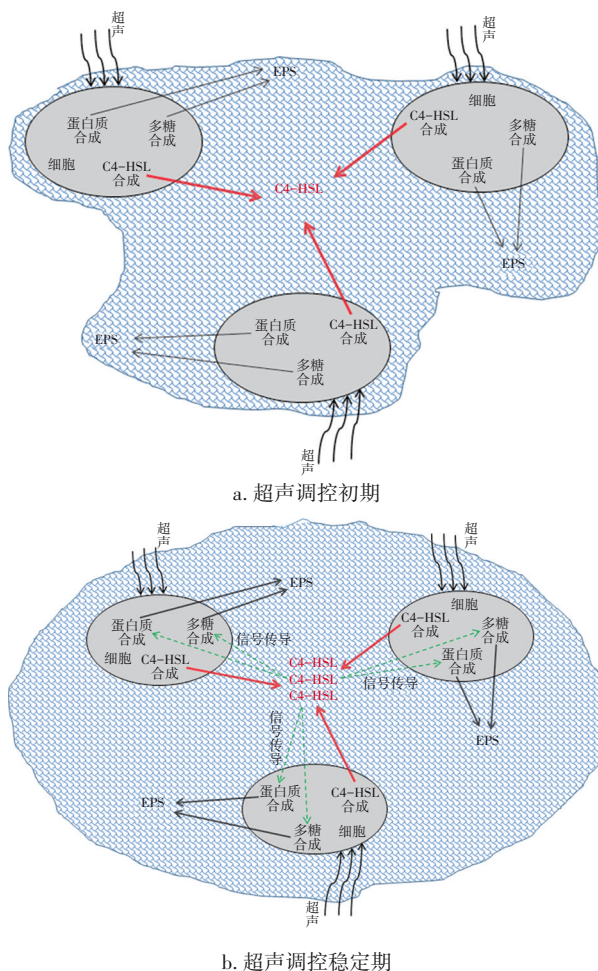


图5 超声调控、信号分子和EPS的模式

Fig.5 Mode of ultrasonic wave, signal molecule and EPS

3 结论

① 在低水温条件下,超声调控反应器的污泥浓度低于对照反应器,污泥产率系数为 $0.306\ \text{kgVSS/kgCOD}$,污泥减量率为44.77%,出水COD在 $50\ \text{mg/L}$ 以下,低于对照反应器。超声调控没有影响活性污泥的正常沉降,系统可稳定、高效运行。

② 超声调控反应器活性污泥的多糖和蛋白质含量分别为 74.71 和 $29.23\ \text{mg/gMLSS}$,相比于对

照反应器分别提高了63.2%和36.8%。超声调控导致活性污泥胞外聚合物含量增加。

③ 超声调控对系统活性污泥中信号分子浓度有较大影响。超声调控系统活性污泥的C4-HSL浓度为0.196 6 $\mu\text{g/L}$,单位质量污泥的信号分子含量为0.044 $\mu\text{g/gMLSS}$,分别为对照反应器的2.56和2.44倍。超声调控还导致C6-HSL、C7-HSL、C8-HSL、C10-HSL、C12-HSL和C14-HSL等信号分子浓度显著降低。超声调控导致反应器中C4-HSL信号分子浓度大幅度增加,累积到一定程度后,反馈给活性污泥微生物细胞,促进了多糖和蛋白质的快速合成与分泌,从而导致反应器内活性污泥胞外聚合物含量升高。

参考文献:

- [1] 王秀朵,秦莉,潘留明,等. 低温下A²O工艺污泥膨胀的微生物群落结构变化[J]. 中国给水排水, 2017, 33(13): 104-107, 112.
WANG Xiuduo, QIN Li, PAN Liuming, *et al.* Microbial community structure change in an A²O activated sludge bulking at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 104-107, 112(in Chinese).
- [2] MA H J, ZHANG S T, LU X B, *et al.* Excess sludge reduction using pilot-scale lysis-cryptic growth system integrated ultrasonic/alkaline disintegration and hydrolysis/acidogenesis pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 441-447.
- [3] 李道甲,员建,马华继,等. 连续流超声对低水温活性污泥性能和污泥减量的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 16-22.
LI Daojia, YUAN Jian, MA Huaji, *et al.* Effect of continuous ultrasonication on activated sludge performance and sludge reduction under low water temperature [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 16-22(in Chinese).
- [4] SHROUT J D, NERENBERG R. Monitoring bacterial twitter: does quorum sensing determine the behavior of water and wastewater treatment biofilms? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(4): 1995-2005.
- [5] SHI Y H, HUANG J H, ZENG G M, *et al.* Exploiting extracellular polymeric substances (EPS) controlling strategies for performance enhancement of biological wastewater treatments: an overview [J]. Chemosphere, 2017, 180(8): 396-411.
- [6] 马华继,张书廷,刘勇,等. 超声波/碱协同溶胞—隐性生长系统的污泥减量效果[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 15-19.
MA Huaji, ZHANG Shuting, LIU Yong, *et al.* Study on excess sludge reduction using ultrasonic/alkaline lysis-cryptic growth system [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 15-19(in Chinese).
- [7] MENG L, XI J Y, YEUNG M. Degradation of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludge by low-concentration ozonation [J]. Chemosphere, 2016, 147: 248-255.
- [8] WANG Z P, LIU L L, YAO J, *et al.* Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors [J]. Chemosphere, 2006, 63(10): 1728-1735.
- [9] TIAN S, HUANG S C, ZHU Y C, *et al.* Effect of low-intensity ultrasound on partial nitrification: performance, sludge characteristics, and properties of extracellular polymeric substances [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105527.

作者简介:陶艺(1997-),男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制及资源化。

E-mail:taoyi970727@163.com

收稿日期:2022-05-10

修回日期:2022-07-04

(编辑:任莹莹)