

连续流超声对低水温活性污泥性能和污泥减量的影响

李道甲^{1,2}, 员建^{1,2}, 马华继^{1,2}, 王梦杰³, 焦秀梅^{1,2}, 张春青^{1,2},
汪艳宁^{1,2}, 张沁唯^{1,2}

(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. 北京汇清源水务科技有限公司, 北京 100015)

摘要: 低水温条件下活性污泥的生物活性较低,且易于发生微丝菌污泥膨胀,导致泥水分离困难,出水水质变差。建立了连续流超声波调控活性污泥系统,在 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水温下进行超声调控活性污泥性能和污泥减量研究。结果表明:超声处理对系统的影响随着超声能量密度的加大和超声处理时间的延长而加强。在 $0.133 \sim 0.667 \text{ W/mL}$ 和 $5 \sim 10 \text{ min/d}$ 超声处理条件下,系统表观污泥产率系数介于 $0.19 \sim 0.27 \text{ kgVSS/kgCOD}$ 之间,污泥减量率(SRE)为 $22.86\% \sim 45.71\%$;超声处理能在一定程度上促进系统中有机物的去除,COD去除率超过 86% ,出水COD浓度稳定低于 50 mg/L ;超声处理一定程度降低了污泥沉降速率,导致污泥容积指数升高,但在沉淀 30 min 后,超声处理对污泥沉降速率的影响不大,超声处理系统的SVI值没有超过 220 mL/g ;超声处理会导致活性污泥的胞外聚合物(EPS)含量增加,相对增加量为 $17.14 \sim 51.96 \text{ mg/gMLSS}$,相对比增加速率为 $0.222 \sim 0.866 \text{ mg/(gMLSS} \cdot \text{d)}$ 。

关键词: 活性污泥; 低水温; 连续流超声处理; 污泥性能; 污泥减量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0016-07

Effect of Continuous Ultrasonication on Activated Sludge Performance and Sludge Reduction under Low Water Temperature

LI Dao-jia^{1,2}, YUAN Jian^{1,2}, MA Hua-ji^{1,2}, WANG Meng-jie³, JIAO Xiu-mei^{1,2},
ZHANG Chun-qing^{1,2}, WANG Yan-ning^{1,2}, ZHANG Qin-wei^{1,2}

(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. Beijing Hui Qing
Yuan Water Business Scientific Co. Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: The bio-activity of activated sludge under low water temperature is lower, and the corresponding system is prone to occur filamentous bulking. So its sludge settleability and effluent quality are deteriorated. A continuous flow ultrasonically controlled activated sludge system was established to perform activated sludge performance and sludge reduction under the water temperature of $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$. The results indicated that the effect of ultrasonication on the treatment system was strengthened with the increase of ultrasonic density and time. With the ultrasonic density of $0.133 \sim 0.667 \text{ W/mL}$ and

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20140518); 天津市水质科学与技术重点实验室开放基金资助项目(TJKLAST-PT-2017-01)

通信作者: 员建 E-mail: yuanjian63@126.com

ultrasonic time of 5–10 min/d, the observed biomass yield (Y_{obs}) of system was 0.19–0.27 kgVSS/kgCOD, and its sludge reduction rate (SRE) reached 22.86%–45.71%. The ultrasonication promoted the removal of organic pollutants in the water, the COD removal efficiency was more than 86%, and the effluent COD concentration was stable below 50 mg/L. The ultrasonication decreased the sludge settling velocity to some degree, and increased the sludge volume index (SVI). While there was little effect on the sludge settling velocity after sedimentation of 30 min, and the SVI in the controlled reactor was less than 220 mL/g. The ultrasonication promoted the increase of the extracellular polymeric substances (EPS) in the activated sludge. The relative increment of EPS was 17.14–51.96 mg/gMLSS, and the relative specific increment rate of EPS was 0.222–0.866 mg/(gMLSS · d).

Key words: activated sludge; low water temperature; continuous ultrasonication; sludge performance; sludge reduction

活性污泥法已经被广泛应用于工业废水和城市污水处理,但同时会产生大量的剩余污泥,且污泥膨胀和生物泡沫问题也时常发生,成为困扰业界的重大问题^[1–2]。通过各种手段调控和强化活性污泥的性能,提高系统工艺能效,同时减少剩余污泥的产量,是当前研究的热点之一。

活性污泥性能调控可以从工艺条件优化(如pH值、泥龄、污泥负荷及营养、溶解氧等)、工艺流程改进(如设置生物选择器、优化回流方式、耦合生物膜技术等)以及施加外部影响(如投加化学药剂,施加超声场、电场或磁场)等方面进行^[3–7]。污泥原位减量是指通过物理、化学或生物等手段降低微生物产率以及利用微生物自身内源呼吸,使污水处理过程的污泥产量降低,从源头上实现污泥减量。其方法包括溶胞–隐性生长、解偶联代谢、原生动物捕食等。Ma等^[8]采用20 kHz超声波处理活性污泥,污泥减量效果良好。

超声波技术用于污水和污泥处理领域具有独特的优势。一方面低强度超声波可有效提高微生物的酶活性、促进生物体细胞的生长和代谢,常被用于强化污水的生物处理^[7,9]。另一方面,当超声强度达到一定值后可抑制生物体的生长,甚至破坏微生物的细胞壁而造成其死亡和分解^[10],故被用于消除污泥丝状膨胀和泡沫^[11–12]以及污泥的原位减量^[13–14]。因此,控制一定强度的超声可望同步实现活性污泥性能调控和污泥原位减量,而选择适宜的超声强度、确定超声处理对活性污泥性能和污泥减量的影响是开发相关技术的关键和重要内容。

水温对活性污泥的性能有重要影响。在低水温(12~15℃)条件下,活性污泥微生物的酶活性较

低,相应的酶所催化的生化反应速率也较低,因此在低水温下活性污泥系统的工艺性能较差。另一方面,较低的水温有利于微丝菌(*Microthrix parvicella*)的生长,易引发丝状污泥膨胀和生物泡沫问题^[15]。调查表明许多城镇污水处理厂在冬春季较低水温下运行时,经常出现污泥膨胀和生物泡沫问题,污泥沉降性能较差,泥水分离较困难,出水水质超标。目前,采用超声波技术对低水温活性污泥的性能调控与污泥减量的研究还没见报道。因此,调控活性污泥性能及同步污泥原位减量具有重要的意义。

课题组的前期研究确定了超声调控的基本条件,包括超声频率、能量密度和超声处理时间等^[16]。本研究建立了连续流超声处理低水温活性污泥的调控系统,在动态条件下进行了初步调控研究,目的是获取连续流超声处理低水温活性污泥调控系统的操作特性、工艺性能、活性污泥性能调控效果和污泥减量效果,奠定解析超声调控机理的基础,并为污水处理厂在冬季低水温条件下稳定高效运行和污泥原位减量提供技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由进水蠕动泵、主反应器、空气泵、曝气头、连续流超声反应器、自动控制装置等组成,如图1所示。共有4个完全相同的有机玻璃主反应器R1~R4,单个反应器尺寸为60 mm×60 mm×1100 mm,有效容积为3.6 L;采用底部进水和进气,且设有取样口和污泥接口,在有效水深的2/3处设排水口,沿反应器高度方向设有3个排水口或取样口。空气压缩机、进水蠕动泵和排水电磁阀由微电脑时控开关自动控制。反应器两侧设置恒温水浴,恒温

水浴区底部进水上部出水,连接到低温恒温槽。反应器底部排泥管连接到超声反应器进料泵,超声反应器出料管接回主反应器。

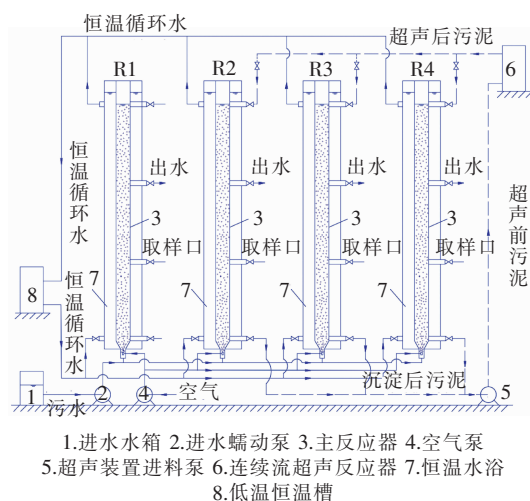


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

连续流超声反应器由进料蠕动泵、超声反应罐(置于超声波反应箱内)、超声波探头、超声波发生器等组成。超声反应罐为不锈钢材质,直径为100 mm,高为150 mm,有效容积为150 mL,底部侧向进料,上部侧向出料;超声波探头直径为20 mm,浸没深度为10 mm;超声发生器的输出功率在2%~100%可调,最大输出功率为1 000 W。

1.2 接种污泥与模拟污水

接种污泥采用普通絮状活性污泥,取自天津市某城市污水处理厂的生物池。

模拟污水以葡萄糖为碳源、 NH_4Cl 为氮源、 KH_2PO_4 和 Na_2HPO_4 为磷源,控制 COD 为 400 mg/L、TKN 为 40 mg/L、TP 为 6 mg/L、pH 值为 7.5 左右。模拟污水组成如表 1 所示。

表1 模拟污水组分及含量

Tab.1 Composition and content of simulated sewage

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

组 分	含 量	组 分	含 量
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	375	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.70
NH_4Cl	76	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.31
KH_2PO_4	13.5	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.25
Na_2HPO_4	13.5	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12
$\text{CaCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	36.22	EDTA	1.88
$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	45.75	H_3BO_3	0.15
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.49	NaHCO_3	300
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.26	—	—

1.3 试验方法

1.3.1 装置启动与运行

将取回的污水厂污泥曝气 0.5 h,静置沉淀 30 min 后滤去粗大杂物,再取 1 200 mL 接入反应器中。注入模拟污水至正常水位,启动曝气泵,开启低温恒温槽,进行反应器的水浴循环,控制反应器内水温为 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$,开始运行。

4 个反应器均以 SBR 模式运行,充水比为 0.33;周期时间为 4 h,其中进水为 5 min,曝气为 2.5 h,沉淀为 1 h,排水为 25 min;以 DO 浓度调节曝气量,控制 pH 值在 6.5~8.5;4 个反应器初始污泥负荷为 $0.24 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。

R1 为对照反应器,其中的活性污泥不进行超声处理。R2、R3 和 R4 沉淀后的活性污泥每天均采用连续流超声设备处理 1 次:在某个周期排水结束后,开启进料蠕动泵以 100 mL/min 流量往连续流超声设备的反应罐进料,在反应罐出料口有污泥流出后开启超声波设备进行超声处理,采用周期性开停模式(周期时间为 6 s,其中 2 s 开启 4 s 停止),超声有效时间为 30 s;R2 的超声能量密度和超声时间分别为 0.133 W/mL 和 5 min,R3 的为 0.133 W/mL 和 10 min,R4 的为 0.667 W/mL 和 10 min。超声后的污泥返回相应的反应器,超声处理完成后开始下一周期的运行。

每 2 d 采集进水和出水水样进行 COD、SS、TN、TP、pH 值等项目分析,并测定污泥沉降速率、SV、MLSS、SVI、胞外聚合物(EPS)等。

1.3.2 评价指标

以表观污泥产率系数(Y_{obs})表征剩余污泥产率;以 R1 的 Y_{obs} 作为参照,采用污泥减量率(SRE)表征系统的污泥减量效果;以污泥沉降速度表征其沉降性能;以活性污泥的 EPS 相对增加量和 EPS 相对比增加速率表征超声作用的影响。

1.3.3 检测项目及方法

COD、SS、TN、氨氮、TP、MLSS、SV、SVI 按照国家标准方法进行测定;pH 值采用 pH 计测定;污泥沉降速度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的反应器中活性污泥混合液的污泥界面高度,由高度差和沉降时间计算得出;胞外聚合物采用热水浴法提取^[17],EPS 总量为多糖和蛋白质含量之和,其中多糖采用硫酸-蒽酮比色法测定^[18],蛋白质采用考马斯亮蓝法测定^[19]。

2 结果与讨论

2.1 污泥减量效果

各反应器的污泥减量情况如表2所示。运行60 d后,没有超声处理的对照反应器剩余污泥表观产率系数为0.35 kgVSS/kgCOD,有超声处理的反应器的剩余污泥表观产率系数均低于对照反应器,具有一定的污泥减量效果。超声处理后的污泥减量率跟超声处理条件有较大关系,即超声处理的能量密度越大、每天连续超声处理的时间越长,污泥减量效果越好。

表2 各系统的污泥减量情况

Tab.2 Sludge reduction in each reactor

项 目	R1	R2	R3	R4
累计剩余污泥量/g	136.97	99.97	91.81	62.38
$Y_{obs}/(\text{kgVSS} \cdot \text{kg}^{-1} \text{COD})$	0.35	0.27	0.24	0.19
污泥减量率/%		22.86	31.43	45.71

2.2 污水处理效果

系统对有机物的去除效果如图2所示。4个反应器进水COD在400 mg/L左右,没有超声处理的R1的出水COD由初始阶段的90 mg/L以上降至后期的60~70 mg/L。R2的出水COD浓度始终高于R1,可见在较低的能量密度和较短超声时间内,超声处理会导致系统对有机物的去除性能降低。在前25 d,R3和R4的出水COD浓度与对照反应器的差异不大,之后则均明显小于对照反应器。因此,在超声能量密度和超声时间达到一定限值后,超声处理能促进系统对有机物的去除。

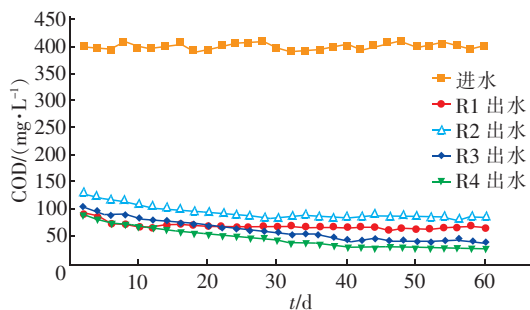


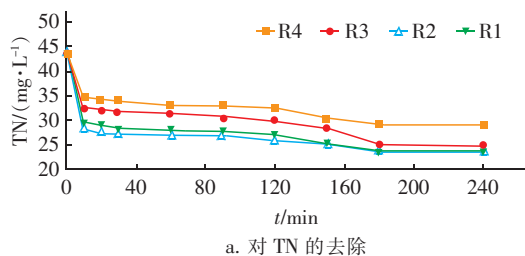
图2 系统对COD的去除效果

Fig.2 Removal of COD by different reactors

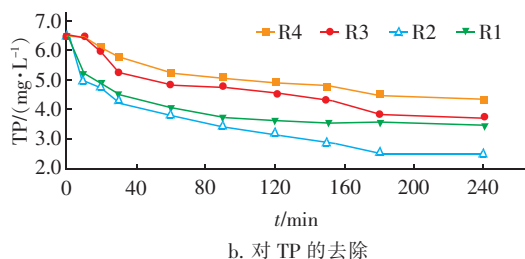
R3反应器出水COD浓度在运行30 d后低于60 mg/L,运行38 d后低于50 mg/L;而R4反应器出水COD浓度在运行8 d后低于60 mg/L,运行24 d后低于50 mg/L。运行60 d时,R3和R4出水COD分别为40和30 mg/L,对COD的去除率分别

达到86.9%和91.5%;而对照反应器R1出水COD为67 mg/L,对COD的去除率为83.4%。显然,有超声处理的R3和R4出水COD浓度均稳定低于50 mg/L,满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。

图3给出了一个运行周期内氮、磷的去除情况。在运行周期结束后,4个反应器对总氮的去除率介于33.9%~46.3%之间,对总磷的去除率介于31.1%~60.9%之间,系统对氮、磷的去除率不高,这是由于系统运行采用的有机负荷高于生物脱氮除磷系统的要求。



a. 对TN的去除



b. 对TP的去除

图3 系统对TN、TP的去除效果

Fig.3 Removal of TN and TP by different reactors

2.3 超声处理对活性污泥沉降性能的影响

图4(a)给出了4个反应器中的活性污泥在曝气停止后的静置沉淀情况。可见,没有超声处理的对照反应器R1的泥水界面沉降速度最快,而经过超声处理后活性污泥的沉降速度均有所降低。R1的最大沉降速度最高,达到4.06 m/h,且在沉淀开始后的第7分钟即已出现。R2、R3和R4中活性污泥的最高沉降速度分别为2.18、1.62和1.57 m/h,相应的出现时间分别是沉淀开始后的10、15和20 min。超声处理一定程度改变了污泥絮体结构,降低了污泥沉降速度。随着超声能量密度的增大和超声时间的延长,系统中活性污泥沉降速度下降。在沉淀25 min后,4个反应器中的污泥沉降速度已经相差不大,沉淀60 min后,4个反应器的污泥沉降速度基本相同,均处于0.7~0.8 m/h之间。

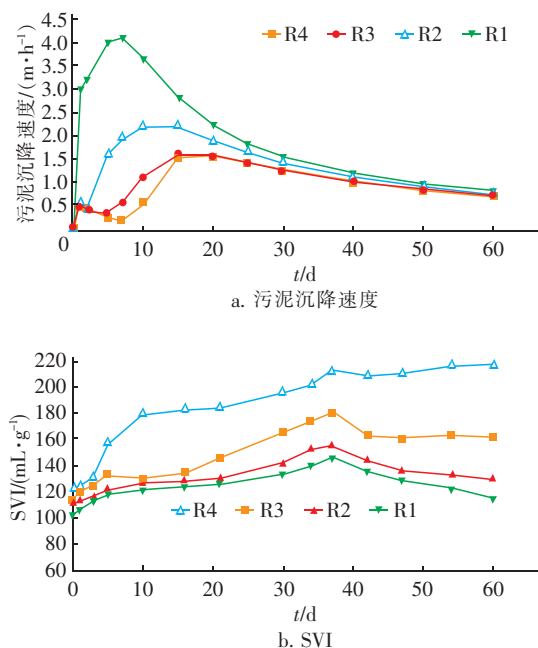


图4 超声处理对污泥沉降性能的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic treatment on sludge settleability

由图4(b)可知,没有超声处理的对照反应器R1的SVI值最低,介于102~146 mL/g之间,R2、R3、R4中活性污泥的SVI值分别为107.6~156.2、113.4~180.3、178.7~217.4 mL/g。可见,经过超声处理后活性污泥的SVI值均有所升高,超声处理会导致活性污泥沉降性能降低,且随着超声能量密度的增大和超声时间的延长,SVI的升幅增大。在超声能量密度为0.133 W/mL和连续超声处理10 min/d的条件下,系统的污泥沉降性能受到的影响并不大,而在超声能量密度为0.667 W/mL和连续超声处理10 min/d的条件下,活性污泥沉降性能变差,与处于微膨胀状态的活性污泥的沉降性能相似。因此,在实际应用中,应控制超声处理时的能量密度,以保证污泥沉降性能和延长超声设备工作寿命。

2.4 超声处理对活性污泥胞外聚合物的影响

经超声处理后活性污泥的胞外聚合物总量及其中的胞外多糖与蛋白质含量均明显升高,且均随着运行时间的延长而增加(见图5)。在运行60 d后,没有超声处理的R1中活性污泥EPS含量从40.94 mg/gMLSS增长到了59.15 mg/gMLSS,而有超声处理的R2、R3和R4中的活性污泥EPS总量分别从41.79、40.90和41.42 mg/gMLSS增加到了76.29、80.42和111.11 mg/gMLSS。可见,R1、R2、R3和R4的EPS增加量分别为18.21、34.50、39.52和

69.69 mg/gMLSS,增加率分别为44.48%、82.56%、96.63%和168.25%,比增加速率分别为0.53、0.86、0.92和1.32 mg/(gMLSS·d)。因此,有超声处理的R2、R3和R4中活性污泥的EPS含量均高于没有超声处理的对照反应器R1,即超声处理能有效地促进活性污泥中EPS含量的增加及比增加速率的提高,R2、R3和R4的EPS比增加速率比R1分别高出62.26%、73.58%和149.06%。此外,随着超声能量密度的增大和超声时间的延长,反应器中活性污泥EPS含量增幅加大、比增加速率也相应升高。从污泥的沉降性能方面考虑,一方面超声处理导致活性污泥中EPS的多糖含量增加,污泥絮体变得更加蓬松;另一方面超声处理也使得EPS的蛋白质组分含量增加,增加了活性污泥表面的负电荷,导致细胞间的排斥力增大,从而综合导致活性污泥的絮凝沉降能力下降,这也从另一方面解释了前面超声处理导致活性污泥沉降性能降低的结论。

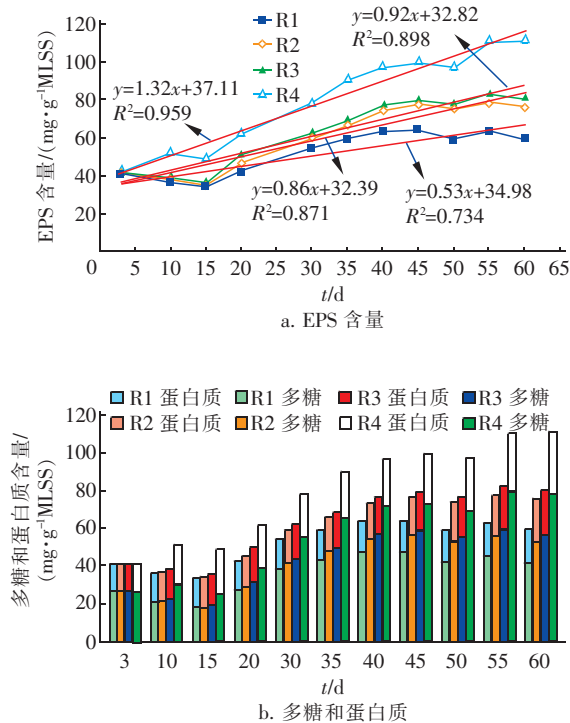


图5 各反应器中EPS含量的比较

Fig. 5 Comparison of EPS content in different reactors

此外,随着运行时间的延长,R2、R3和R4的EPS相对增加量也在不断提高(见图6)。运行60 d后,R2、R3和R4的EPS相对增加量分别增至17.14、21.27和51.96 mg/gMLSS,增加率分别为28.97%、35.95%和87.83%。可见,超声处理有效

提高了活性污泥 EPS 的相对增加量和 EPS 相对比增加速率,而且随着超声处理能量密度的增大和超声时间的延长,这两者也逐渐升高。在反应器运行稳定后,R2、R3 和 R4 的 EPS 相对比增加速率平均值分别为 0.222、0.305 和 0.866 $\text{mg}/(\text{gMLSS} \cdot \text{d})$ 。然而,超声处理促进 EPS 含量增加的机理尚需进一步研究。

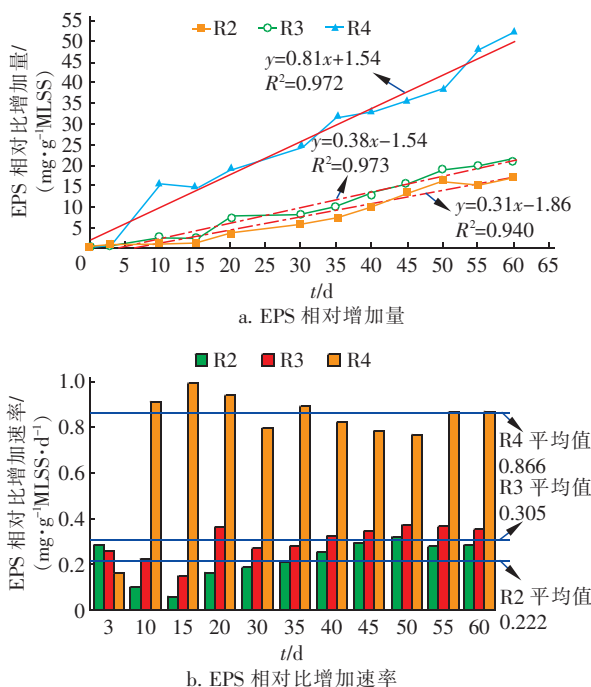


图6 系统中活性污泥胞外聚合物的增加情况

Fig.6 Increase in EPS of activated sludge in different reactors

3 结论

① 超声处理有效实现了低水温下活性污泥系统的污泥减量,而且污泥减量率随着超声处理能量密度的增加和处理时间的延长而提高。在 0.133 ~ 0.667 W/mL 和 5 ~ 10 min/d 超声处理条件下,系统表观污泥产率系数为 0.19 ~ 0.27 kgVSS/kgCOD,污泥减量率为 22.86% ~ 45.71%;超声处理能在一定程度上促进系统对有机物的去除,对 COD 的去除率超过 86%,出水 COD 稳定低于 50 mg/L。

② 连续超声处理一定程度改变了污泥絮体结构,降低了污泥沉降速度,导致污泥容积指数升高。随着超声能量密度的增大和超声时间的延长,活性污泥沉降性能下降,但有无超声处理的活性污泥在沉淀 0.5 h 后的沉降速度差异不大。超声处理能促进活性污泥中胞外聚合物(EPS)含量及其多糖和蛋

白质组分的增加。

③ 控制超声处理时的能量密度在一定范围内,不仅可取得较好的污泥减量和污水处理效果,而且污泥沉降性能可以满足工艺的要求。

致谢:研究得到了天津市高等学校科技发展基金(20140518)、天津市水质科学与技术重点实验室开放基金(TJKLAST-PT-2017-01)、天津城建大学校级大学生创新创业项目(201710792074)的资助。吴克、李萌、高楚云、肖萌和黄词苑同学参与了部分研究,在此一并感谢。

参考文献:

- [1] 徐天凯,彭党聪,徐涛,等. 城市污水处理厂 A²/O 工艺污泥膨胀与上浮的诊断[J]. 中国给水排水,2016,32(23):31-35.
Xu Tiankai, Peng Dangcong, Xu Tao, et al. Diagnosis of sludge bulking and floating in A²/O process in municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(23): 31-35 (in Chinese).
- [2] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, et al. Filamentous bulking sludge—a critical review [J]. Water Res, 2004, 38(4): 793-817.
- [3] Semblante G U, Hai F I, Bustamante H, et al. Effects of sludge retention time on oxic-settling-anoxic process performance: Biosolids reduction and dewatering properties [J]. Bioresour Technol, 2016, 218: 1187-1194.
- [4] Wen Y, Zheng W, Yang Y, et al. Influence of Al³⁺ addition on the flocculation and sedimentation of activated sludge: Comparison of single and multiple dosing patterns [J]. Water Res, 2015, 75: 201-209.
- [5] Ferrer-Polonio E, Fernández-Navarro J, Alonso-Molina J L, et al. Changes in the process performance, sludge production and microbial activity in an activated sludge reactor with addition of a metabolic uncoupler under different operating conditions [J]. J Environ Manage, 2017, 203: 349-357.
- [6] Niu C, Liang W, Ren H, et al. Enhancement of activated sludge activity by 10-50 mT static magnetic field intensity at low temperature [J]. Bioresour Technol, 2014, 159: 48-54.
- [7] Cheng C, Zhou Z, Qiu Z, et al. Enhancement of sludge reduction by ultrasonic pretreatment and packing carriers in the anaerobic side-stream reactor: Performance, sludge characteristics and microbial community structure [J].

- Bioresour Technol, 2018, 249: 298 – 306.
- [8] 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]. Bioresour Technol, 2012, 116: 441 – 447.
- [9] Erriu M, Blus C, Szmukler-Moncler S, *et al.* Microbial biofilm modulation by ultrasound: Current concepts and controversies [J]. Ultrason Sonochem, 2014, 21 (1): 15 – 22.
- [10] Pilli S, Bhunia P, Yan S, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: A review [J]. Ultrason Sonochem, 2011, 18 (1): 1 – 18.
- [11] Wunsh B, Heine W, Neis U. Combatting bulking sludge with ultrasound [J]. Ultrason in Environmental Engineering, 2002, 35 (1): 201 – 212.
- [12] Neis U. Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound [M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2015.
- [13] Mohammadi A R, Mehrdadi N, Bidhendi G N, *et al.* Excess sludge reduction using ultrasonic waves in biological wastewater treatment [J]. Desalination, 2011, 275 (1/3): 67 – 73.
- [14] Salsabil M R, Laurent J, Casellas M, *et al.* Techno-economic evaluation of thermal treatment, ozonation and sonication for the reduction of wastewater biomass volume before aerobic or anaerobic digestion [J]. J Hazard Mater, 2010, 174 (1/3): 323 – 333.
- [15] Rossetti S, Tomei M C, Nielsen P H, *et al.* *Microthrix parvicella*, a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge [J]. FEMS Microbiol Rev, 2005, 29 (1): 49 – 64.
- [16] 王梦杰, 员建, 马华继, 等. 低强度超声波对膨胀活性污泥沉降性能及污泥减量的影响 [J]. 化工进展, 2017, 36 (3): 1134 – 1139.
- Wang Mengjie, Yuan Jian, Ma Huaji, *et al.* Effect of low intensity ultrasonic treatment on settleability of bulking sludge and sludge reduction [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36 (3): 1134 – 1139 (in Chinese).
- [17] Wang Z P, Liu L L, Yao J. Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors [J]. Chemosphere, 2006, 63 (10): 1728 – 1735.
- [18] Meng L, Xi J, Yeung M. Degradation of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from activated sludge by low-concentration ozonation [J]. Chemosphere, 2016, 147: 248 – 255.
- [19] 陈茂霞, 周后珍, 朱晓华, 等. 考马斯亮蓝法检测活性污泥中蛋白质含量优化 [J]. 环境科学与技术, 2015, 38 (4): 1 – 5.
- Chen Maoxia, Zhou Houzhen, Zhu Xiaohua, *et al.* Optimization of determination of protein in activated sludge by Bradford Method [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38 (4): 1 – 5 (in Chinese).



作者简介:李道甲(1992 –),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制及污泥资源化。

E – mail: 804641717@ qq. com

收稿日期: 2018 – 12 – 05