

腐殖活性污泥 A-OSA 工艺污泥减量 及污染物去除效能

桑磊 尹军* 张居奎

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要 通过在厌氧-好氧-沉淀-厌氧 (anaerobic-oxic-settling-anaerobic, A-OSA) 工艺中添加复合腐殖生物填料, 使之形成腐殖活性污泥 A-OSA (humic activated sludge A-OSA process, HS-A-OSA) 工艺后, 研究了污泥在厌氧反应池内不同停留时间 (3、5.5 和 7 h) 的 HS-A-OSA 工艺污泥减量效果、污染物去除效能及污泥沉降性能的影响。结果表明, 在同等条件下, 与 A-OSA 参照工艺相比, HS-A-OSA 工艺的污泥产量降低了 16.3% ~ 23.0%, 化学需氧量 (COD) 去除率略高, 氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的去除率分别提高了 7.0% ~ 11.2%、9.9% ~ 10.4% 和 11.9% ~ 13.8%, 污泥体积指数 (SVI) 稳定在 $66.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右。综合考虑认为, 对于 HS-A-OSA 工艺而言, 系统中的活性污泥在厌氧反应池内停留时间为 5.5 h 时, 污泥减量及污染物去除效果最佳。

关键词 腐殖活性污泥; A-OSA 工艺; 污泥减量; 脱氮除磷; SVI

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)08-4031-06 DOI 10.12030/j.cjee.201503132

Excess sludge reduction and pollutants removal of humic activated sludge A-OSA process

SANG Lei YIN Jun* ZHANG Jukui

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract The HS-A-OSA process improves upon the A-OSA process by adding the compound humic biological padding. This study investigated the results of sludge reduction, efficiency of pollution degradation, and performance of activated sludge with various sludge retention times (SRT of 3, 5.5, and 7 h) in an anaerobic tank. The results indicate that the HS-A-OSA process reduced excess sludge by 13% ~ 27% compared to the reference process. The efficiency of COD removal was slightly higher for the HS-A-OSA process than it was for the A-OSA process. The removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and TP increased by 7.0% to 11.2%, 9.9% to 10.4%, and 11.9% to 13.8%, respectively. The sludge volume index averaged $66.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. These results suggest that it might be best to apply the HS-A-OSA process with 5.5 h SRT to reduce excess sludge and increase pollutant removal.

Key words humic activated sludge; A-OSA process; sludge reduction; biological nutrient removal; SVI

好氧-沉淀-厌氧 (oxic-settling-anaerobic, OSA) 工艺以其较低的污泥产率和基建运行成本^[1-5], 被认为是极具发展前景的污泥减量方法。但是研究人员发现, OSA 工艺在脱氮方面, 由于污泥产率的降低, 导致减少部分污泥的氮元素进入液相中, 使得 OSA 工艺的氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和总氮去除率低于传统活性污泥 (conventional activated sludge, CAS) 工艺^[6-7]。为了解决 OSA 工艺中存在的这些问题, 研

究人员将厌氧-好氧 (anaerobic-oxic, A-O) 工艺与 OSA 工艺相结合, 组成了厌氧-好氧-沉淀-厌氧 (anaerobic-oxic-settling-anaerobic, A-OSA) 工艺^[8-9], 研究表明, 污泥厌氧反应池水力停留时间分别为 5.56、7.14 和 9 h 时, 系统污泥减量结果分别为 1.236 、 0.771 和 $0.559 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。贾丽^[10]的研究结果表明, 在有机物去除方面, 化学需氧量 (COD) 去除率随污泥在厌氧反应池停留时间的延长而略有提

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07201-001)

收稿日期: 2015-03-16; 修订日期: 2015-04-21

作者简介: 桑磊 (1981—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 污水处理。E-mail: sanglei810330@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hitjunyin@163.com

高,但低于参照 A-O 工艺;在脱氮方面,由于 A-OSA 工艺的污泥龄时间较长,可以使硝化菌更好地硝化进水及回流污泥中的 NH_4^+-N ,所以 A-OSA 工艺出水 NH_4^+-N 低于参照 A-O 工艺出水,但是在 TN 方面,A-OSA 工艺的出水 TN 却高于参照 A-O 工艺出水的平均浓度。由此可见,A-OSA 工艺仍存在改进的余地。

针对以上问题,为了开发一种在污泥减量的同时,又具有良好污水处理效果的新型污泥减量化工艺,将腐殖活性污泥技术引入 A-OSA 工艺,使 A-OSA 工艺转变成腐殖活性污泥 A-OSA(HS-A-OSA)工艺,通过腐殖活性污泥内具有某种特定代谢功能的微生物大量的富集和繁殖,改变系统中活性污泥的菌群结构,提高工艺的生物脱氮除磷效果^[11-16]。为此,以 HS-A-OSA 工艺和 A-OSA 工艺为实验研究对象,对比研究了污泥在厌氧反应池内不同停留时间对系统中污泥产率、污染物去除以及污泥沉降性能的影响,考察腐殖活性污泥对 A-OSA 工艺的强化效果。

1 实验材料与方法

1.1 实验水质

实验采用的人工模拟城市生活污水,以葡萄糖和蛋白胨、硫酸铵、磷酸二氢钾分别作为为碳源、氮源和磷源,用碳酸氢钠调节 pH 值。药品投加量分别为葡萄糖 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,蛋白胨 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,硫酸铵 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷酸二氢钾 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,碳酸氢钠 $750 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验进水水质指标:COD 为 $378 \sim 423 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 为 $46 \sim 56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 为 $50 \sim 58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 为 $5.3 \sim 9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 值为 $7.0 \sim 7.5$ 。

1.2 实验材料

实验所选用的复合腐殖生物填料为实验室自制的褐色圆柱体,其直径约 1.5 cm ,长度约 5 cm 。主要理化特性:孔隙率为 54% ,体积比为 0.78 ,比表面 $1.70 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, SiO_2 含量为 49.4% , P_2O_5 含量为 0.15% , Al_2O_3 含量为 8.38% , CaO 含量为 0.56% , MgO 含量为 0.40% 。

1.3 实验装置

为了能分别对 HS-A-OSA 工艺和 A-OSA 工艺进行对比研究,构建了如图 1 所示的 2 套装置。HS-A-OSA 工艺为和 A-OSA 工艺的厌氧区有效容积均为 14 L ,好氧区的有效容积均为 42 L ,污泥回流段上的污泥厌氧反应池池的最大容积均为 50 L ,回流污泥在此池内的停留时间分别为 $3, 5.5$ 和 7 h 。HS-

A-OSA 工艺和 A-OSA 工艺的主要区别是前者在好氧区内装有一定数量的复合腐殖生物填料。实验采用连续流运行模式,进水流量为 $168 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$,使用蠕动泵控制装置的进水流量和回流污泥流量。当活性污泥培养驯完成,反应器运行效果良好且排泥稳定,开始定期检测 COD、 NH_4^+-N 、TN、总磷(TP)、污泥沉降比(SV)、污泥体积指数(SVI)及混合液悬浮固体浓度(MLSS)等指标。

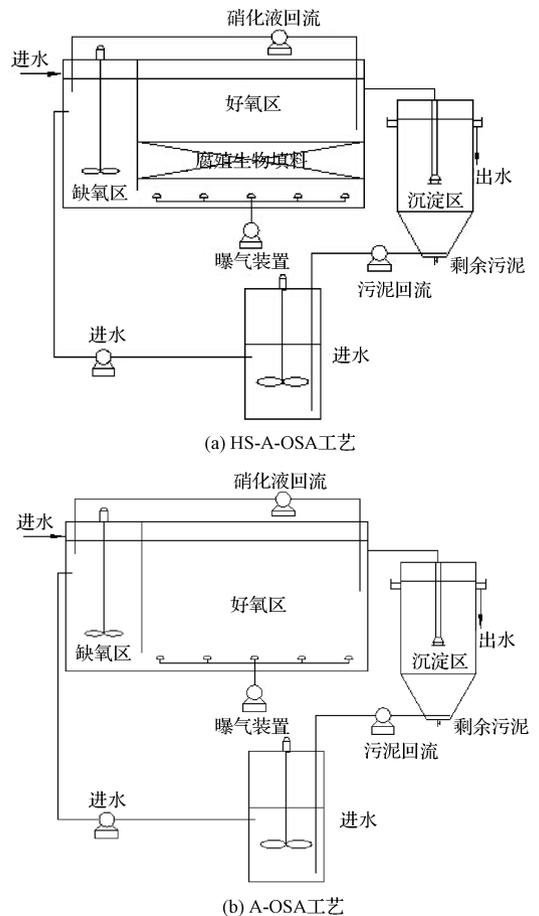


图 1 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HS-A-OSA and A-OSA process

1.4 实验检测方法

实验过程中各项指标具体检测方法如下:COD 采用快速测定法,TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定,TP 采用过硫酸钾消解分光光度法测定,其他指标如 MLSS、SV、SVI 均采用国家标准方法测定^[17]。

SVI 是用以衡量活性污泥沉降性能的指标,指好氧池出口处的混合液,在经过 30 min 静置沉淀后, 1 g 干污泥所占的容积数,即:

$$SVI = \frac{\text{混合液(1 L)30 min 静置沉淀后污泥容积(mL)}}{\text{混合液(1 L)中污泥干重(g)}} \\ = \frac{SV}{MLSS} (\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}) \quad (1)$$

在 3 种不同厌氧反应时间条件下,两种工艺运行至好氧区,MLSS 达到 $3\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,COD 去除率稳定在 80% 以上时,开始记录每次每个工艺的排泥体积 $V_{\text{排}}$,并测定其污泥浓度 $MLSS_{\text{排}}$,计算每次的剩余污泥排放量,计算公式如下:

$$M_{\text{剩余}} = V_{\text{排}} \times MLSS_{\text{排}} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{剩余}}$ 为剩余污泥排放量,g; $V_{\text{排}}$ 为排出剩余污泥体积,L; $MLSS_{\text{排}}$ 为剩余污泥浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

HS-A-OSA 工艺运行至第 n 天的污泥减量率的计算公式如下:

$$W_n = \frac{W_0 - W'}{W_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: W_n 为 A-OSA 工艺运行至第 n 天的污泥减量率,%; W_0 为 A-OSA 工艺运行至第 n 天累积排出的剩余污泥量,g; W' 为 HS-A-OSA 工艺运行至第 n 天累积排出的剩余污泥量,g。

HS-A-OSA 系统运行至第 n 天时,平均污泥减量率计算式如下:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n W_n \quad (4)$$

实验过程中所用试剂均为分析纯级。实验所用的主要仪器有兰州连华环保科技有限公司 5B-1 型 COD 快速测定仪,日本岛津 UV-2600/2700 紫外可见分光光度计。

1.5 污泥培养与驯化

实验选用的接种污泥取自于长春市某城市污水处理厂,此接种污泥的 MLSS 为 $2\ 500\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 为 $73.2\ \text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,在实验室条件下,经 4 周左右时间培养驯化,污泥由松散的黑棕色絮状转变为较紧密的黄褐色絮体,当反应器内 MLSS 达到 $3\ 000\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,COD 去除率稳定在 80% 以上时,活性污泥培养与驯化成功。

2 结果与分析

2.1 不同厌氧反应时间对污泥减量效能影响

图 2 为 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺在 3 种不同厌氧反应时间条件下,60 d 内系统产生的剩余污泥量。由图 2 可知,在相同的运行条件及污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 工艺的污泥产量明显低于 A-OSA 工艺。3 个不同厌氧反应时间下的 HS-A-OSA 工艺污泥产率由低到高的顺序为,首先是污泥在厌氧反应池内停留 5.5 h,其次是停留 7 h,最后是

停留 3 h。HS-A-OSA 工艺在 3 个不同厌氧反应时间下的 60 d 的平均污泥减量率分别为 16.3%、23.0% 和 19.8%,表明通过腐殖活性污泥的内在生物作用可以有效地强化 A-OSA 工艺的污泥减量效能^[13]。

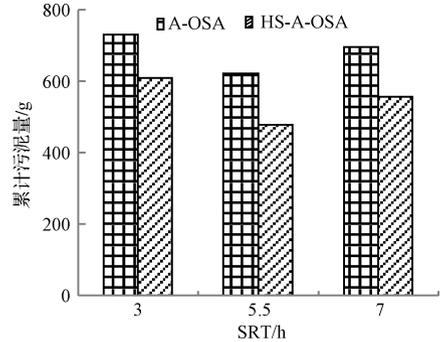


图 2 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺累积剩余污泥产量

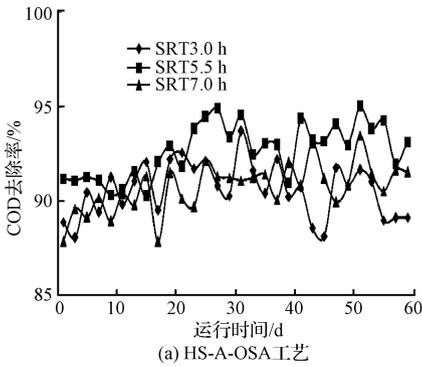
Fig. 2 Cumulative sludge reduction of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank

2.2 不同厌氧反应时间对 COD 处理效能的影响

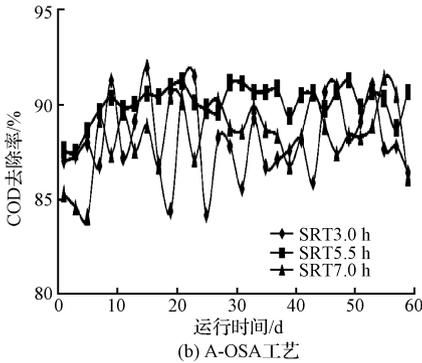
3 种不同污泥厌氧反应时间条件下的 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺对 COD 的去除效率见图 3。由图 3 可知,在 3 种不同污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 工艺的 COD 去除率分别较同等条件下的 A-OSA 工艺提高了 3.0%、2.6% 和 2.5%。其原因为,首先回流污泥在污泥厌氧反应池内衰减分解时,可释放出部分有机质,提高池内 COD 浓度,为池内反硝化菌的反硝化反应提供碳源;其次当污泥回流至主体反应区,吸附降解污水中的有机物时,HS-A-OSA 工艺中的腐殖活性污泥因含有较多的腐殖酸,对污水中的有机污染物表现出了较强的络合螯合能力,在一定程度上强化了系统对有机物的吸附去除能力^[18],所以 HS-A-OSA 工艺在 COD 去除效能方面的表现略优于 A-OSA 工艺。

2.3 不同厌氧反应时间对脱氮效能的影响

3 种不同污泥厌氧反应时间条件下的 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除效率见图 4 和图 5。由图 4 可知,在 3 种不同污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 工艺的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别较同等条件下的 A-OSA 工艺提高了 11.2%、10.1% 和 7.0%。而在 TN 去除方面,由图 5 可知,HS-A-OSA 工艺的 TN 去除率分别较同等条件下的 A-OSA 工艺提高了 10.4%、9.9% 和 10.2%。这是因为 HS-A-OSA 工艺内 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子浓度较高,使得腐殖活性污泥的颗粒粒径较大^[19],污泥絮体密度



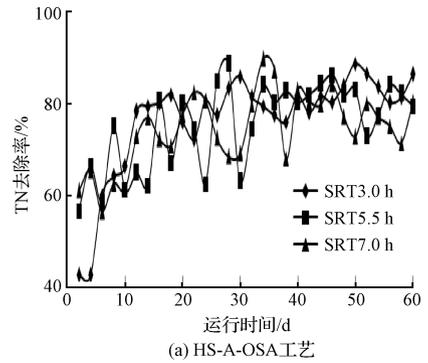
(a) HS-A-OSA工艺



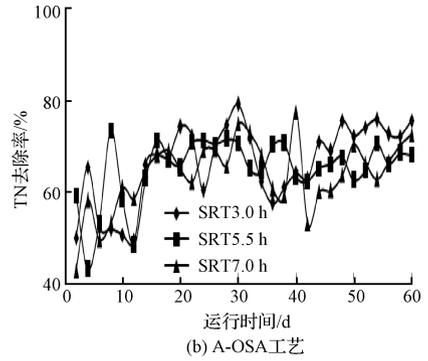
(b) A-OSA工艺

图3 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺 COD 去除率

Fig. 3 COD removal efficiency of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank



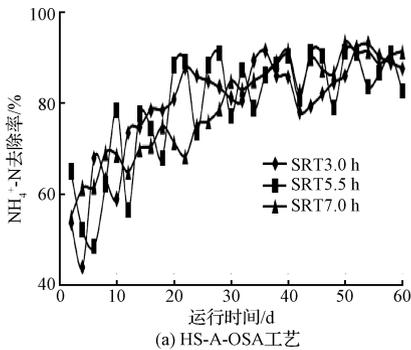
(a) HS-A-OSA工艺



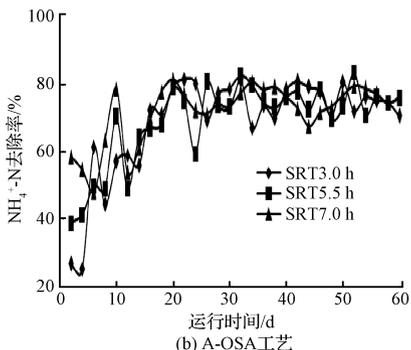
(b) A-OSA工艺

图5 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺 TN 去除率

Fig. 5 TN removal efficiency of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank



(a) HS-A-OSA工艺



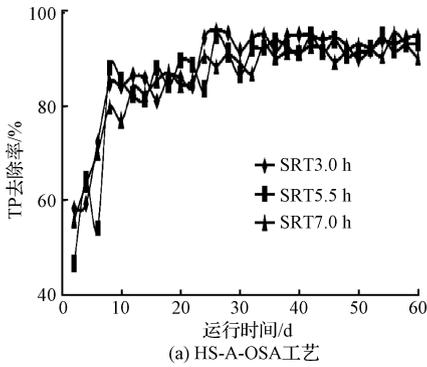
(b) A-OSA工艺

图4 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺 NH₄⁺-N 去除率Fig. 4 NH₄⁺-N removal efficiency of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank

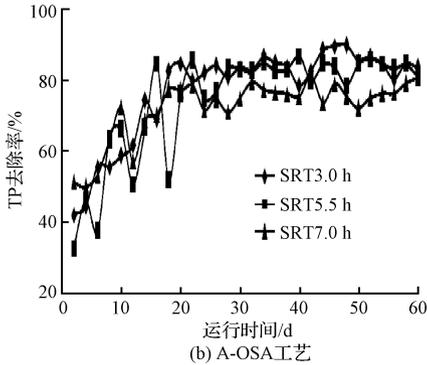
较高,形成了污泥絮体内部的溶解氧梯度,即从絮体表层到絮体内部,溶解氧浓度从高到低,造成絮体表层微生物以好氧菌、硝化菌为主,而到了絮体内部的缺氧区,则是反硝化菌占据了优势。由于这种情况的影响,在好氧区发生了同步硝化反硝化现象^[20],从而在一定程度上提高了 HS-A-OSA 工艺的脱氮效能。

2.4 不同厌氧反应时间对除磷效能的影响

3种不同污泥厌氧反应时间条件下的 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺对 TP 的去除效率见图 6。由图 6 可知,在 3 种不同污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 工艺的 TP 去除率分别较同等条件下的 A-OSA 工艺提高了 11.9%、12.9% 和 13.8%。究其原因有 3 点,首先,同普通活性污泥相比,腐殖活性污泥呈现为疏松的多孔性结构,使得其比表面积更大,吸附容量更大,因此吸磷能力更强;其次,腐殖活性污泥中 Fe³⁺、Ca²⁺ 和 Al³⁺ 等能与磷酸盐反应的离子浓度较高,化学除磷能力较强^[14];最后厌氧区的腐殖活性污泥水解酸化生成的挥发性脂肪酸较多^[21],换言之,可供聚磷菌利用的碳源也就更多,以上 3 种因素综合作用,提高了 HS-A-OSA 工艺的除磷效能。



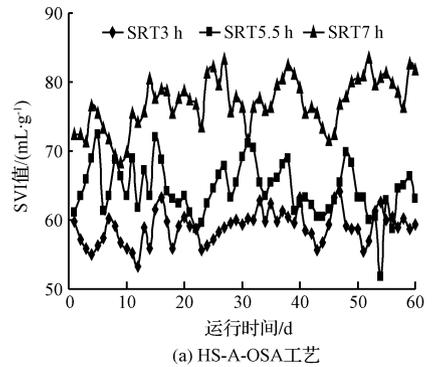
(a) HS-A-OSA工艺



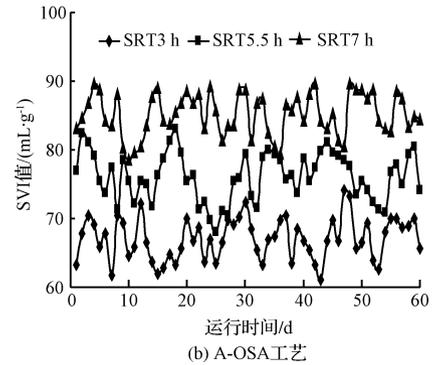
(b) A-OSA工艺

图 6 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺 TP 去除率

Fig. 6 TP removal efficiency of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank



(a) HS-A-OSA工艺



(b) A-OSA工艺

图 7 不同厌氧池停留时间下 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺 SVI 值变化

Fig. 7 SVI variation of HS-A-OSA and A-OSA process at various SRTs of anaerobic tank

2.5 不同厌氧反应时间对污泥沉降性能影响

活性污泥沉降性能的好坏与否将直接影响活性污泥工艺系统的运行效果。3 种不同污泥厌氧反应时间条件下的 HS-A-OSA 和 A-OSA 工艺稳定运行阶段好氧区污泥 SVI 的变化情况见图 7。由图 7 可知,2 种工艺的 SVI 值都比较稳定,HS-A-OSA 工艺的 SVI 值介于 55 ~ 83 mL · g⁻¹ 之间,均值为 66.8 mL · g⁻¹,低于 A-OSA 工艺的 SVI 均值 76.1 mL · g⁻¹,相比下降了 12.2%,表明经复合腐殖生物填料强化的腐殖活性污泥可改善污泥沉降性能,这一结果也与相关文献^[14-15]研究相符。

由于回流污泥在厌氧反应池内停留的时间越长,厌氧反应池的体积就会越大,因此综合考虑系统污泥的减量效果与运行效能,对于 HS-A-OSA 工艺而言,回流污泥在厌氧反应池中的停留时间为 5.5 h 最为理想。

3 结 论

1)HS-A-OSA 工艺可以有效地降低剩余污泥产量,当污泥厌氧反应时间为 3、5.5 和 7 h 时,HS-A-OSA 工艺的污泥产量分别较同等条件下的 A-OSA 工艺下降 16.3%、23.0% 和 19.8%。

2)在 3 种不同污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 较同等条件下的 A-OSA 工艺对在有机物去除效能及脱氮除磷等方面,均有不同程度的提高。

3)在 3 种不同污泥厌氧反应时间条件下,HS-A-OSA 较同等条件下的 A-OSA 工艺的污泥沉降性能均有所改善。综合考虑系统污泥的减量效果与运行效能,对于 HS-A-OSA 工艺而言,回流污泥在厌氧反应池中的停留时间为 5.5 h 时最为理想。

参 考 文 献

[1] CHUDOBA P., CHEVALIER J. J., CHANG J., et al. Effect of anaerobic stabilization of activated sludge on its production under batch conditions at various S_0/X_0 ratios. *Water Science and Technology*, **1991**, 23 (4/5/6): 917-926

[2] CHUDOBA P., CHUDOBA J., CAPDEVILLE B. The aspect of energetic uncoupling of microbial growth in the activated sludge process-OSA system. *Water Science and Technology*, **1992**, 26(9/10/11): 2477-2480

[3] CHUDOBA P., MOREL A., CAPDEVILLE B. The case of both energetic uncoupling and metabolic selection of microorganisms in the OSA activated sludge system. *Environmental Technology*, **1992**, 13(8): 761-770

- [4] YE Fenxia, ZHU Ruifen, LI Ying. Effect of sludge retention time in sludge holding tank on excess sludge production in the oxic-settling-anoxic (OSA) activated sludge process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **2008**,83(1): 109-114
- [5] 朱振超, 周路. 剩余有机污泥“零排放”工程性实验. *上海环境科学*, **1996**, 15(8): 40-41
ZHU Zhenchao, ZHOU Lu. Engineering test on “Zero Discharge” of residual sludge. *Shanghai Environmental Science*, **1996**, 15(8): 40-41(in Chinese)
- [6] 俞小勇. 剩余污泥减量化的解偶联代谢数学模型和好氧-沉淀-缺氧(OXA)工艺的研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, **2006**
YU Xiaoyong. The research on the uncoupled metabolism model of excess sludge reduction and OSA (Oxic-settling-anoxic) process. Hangzhou: Master Dissertation of Zhejiang University, **2006**(in Chinese)
- [7] 王建芳, 金文标, 赵庆良, 等. 好氧-沉淀-厌氧工艺处理效能及抗冲击负荷研究. *环境科学*, **2007**,28(11): 2488-2493
WANG Jianfang, JIN Wenbiao, ZHAO Qingliang, et al. Performance of treating wastewater and anti-shockloading in oxic-settling-anaerobic (OSA) process for minimization of excess sludge. *Environmental Science*, **2007**, 28(11): 2488-2493(in Chinese)
- [8] 高旭, 卢艳华, 郭劲松. A + OSA 活性污泥工艺剩余污泥减量特性研究. *环境科学*, **2009**,30(5): 1475-1480
GAO Xu, LU Yanhua, GUO Jinsong. Characterisation of excess sludge reduction in an anoxic + oxic-settling-anaerobic activated sludge process. *Environmental Science*, **2009**,30(5): 1475-1480(in Chinese)
- [9] 翟小敏, 高旭, 张曼曼. A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究. *环境科学*, **2012**,33(7): 2444-2450
ZHAI Xiaomin, GAO Xu, ZHANG Manman. Analysis of carbon balance and study on mechanism in anoxic-oxic-settling-anaerobic sludge reduction process. *Environmental Science*, **2012**,33(7): 2444-2450(in Chinese)
- [10] 贾丽. A + OSA 污泥减量工艺物质能量转化及其微生物生态特性研究. 重庆大学博士学位论文, **2012**
JIA Li. Study on conversion of the mass and energy and microecological characters in A + OSA excess sludge reduction process. Chongqing: Doctor Dissertation of Chongqing University, **2012**(in Chinese)
- [11] CHOL Y. G., CHUNG T. H. Effect of humus soil on the settling and dewatering characteristics of activated sludge. *Water Science and Technology*, **2000**, 42(9): 127-134
- [12] HAGA K., ARAI S., SAITOU T. Nature of humic acid in a humus pellets and chemical elements of pumice filled in a reactor. *Study on Stockbreeding*, **1993**, 47(9): 1016-1018
- [13] 刘智晓, 崔福义, 秦妹兰, 等. 腐殖土活性污泥技术的除污效能及除臭效果. *中国给水排水*, **2007**,23(14): 18-22
LIU Zhixiao, CUI Fuyi, QIN Shulan, et al. Pollutants removal efficiency and deodorization effect in humus soil activated sludge process. *China Water & Wastewater*, **2007**,23(14): 18-22(in Chinese)
- [14] 吴敏, 魏传银, 潘孝辉, 等. 腐殖土强化活性污泥工艺的除污效果研究. *中国给水排水*, **2009**,25(5): 12-14
WU Min, WEI Chuanyin, PAN Xiaohui, et al. Study on pollutant removal efficiency of humus soil activated sludge process. *China Water & Wastewater*, **2009**,25(5): 12-14(in Chinese)
- [15] 吴敏, 潘孝辉, 朱睿, 等. 腐殖土改善活性污泥沉降与脱水性能的研究. *中国给水排水*, **2009**,25(9): 45-48
WU Min, PAN Xiaohui, ZHU Rui, et al. Study on improvement of settleability and dewatering characteristics of activated sludge by humus soil. *China Water & Wastewater*, **2009**,25(9): 45-48(in Chinese)
- [16] 赵志伟, 赵贞, 刘杰, 等. 腐殖土活性污泥法的除臭效果及其微生物相分析. *环境科学与技术*, **2010**, 33(6E): 128-131
ZHAO Zhiwei, ZHAO Zhen, LIU Jie, et al. The efficiency deodorization of humic soil activated sludge process and its analysis of microorganism. *Environmental Science & Technology*, **2010**,33(6E): 128-131(in Chinese)
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [18] 吴磊, 尹军, 韩相奎, 等. 腐殖活性污泥生化特征及处理效能. *哈尔滨工业大学学报*, **2014**,46(4): 31-35
WU Lei, YIN Jun, HAN Xiangkui, et al. Biochemical characterization and treatment efficiency of humic activated sludge process. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **2014**,46(4): 31-35(in Chinese)
- [19] 吴敏, 朱睿, 潘孝辉, 等. 腐殖土理化性质的研究. *工业用水与废水*, **2009**,40(1): 61-63
WU Min, ZHU Rui, PAN Xiaohui, et al. Physicochemical characteristics of humus soil. *Industrial Water & Wastewater*, **2009**,40(1): 61-63(in Chinese)
- [20] 赵可, 尹军, 王立军, 等. 腐殖土强化 SBR 工艺运行效能实验. *哈尔滨工业大学学报*, **2009**,41(4): 81-84
ZHAO Ke, YIN Jun, WANG Lijun, et al. Performance improvement of SBR process by addition of humus soil. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **2009**,41(4): 81-84(in Chinese)
- [21] 吴磊. 腐殖活性污泥 A²/O 系统脱氮除磷效果与反应动力学研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, **2014**
WU Lei. Study on the performance and kinetics of nitrogen and phosphorus removal in humic activated sludge A²/O system. Harbin: Doctor Dissertation of Harbin Institute of Technology, **2014**(in Chinese)