

污泥龄对 SBR/OSA 工艺中污泥减量效果的影响

蒋一凡, 李彬彬, 胡 旻, 余 静, 秦浩然, 史浩垒
(扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100)

摘 要: 针对序批式活性污泥与厌氧反应器组合工艺(SBR/OSA 工艺), 分析了污泥龄(SRT)对污泥减量效果的影响。试验结果表明, 在 SRT 分别为 30、20 和 15 d 条件下, SBR/OSA 工艺连续运行 9 个月, 在不影响出水水质的前提下, SRT = 20 d 时污泥减量率可以达到 39%, 污泥减量效果最佳。分析厌氧柱污泥上清液的多糖、蛋白质、挥发性脂肪酸(VFA)等指标发现, 厌氧柱内发生的污泥衰减作用是污泥减量的主要原因。

关键词: 污泥龄; SBR/OSA 工艺; 污泥减量; 污泥衰减

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0105-05

Effect of Sludge Retention Time on Sludge Reduction Efficiency in SBR/OSA Process

JIANG Yi-fan, LI Bin-bin, HU Yang, YU Jing, QIN Hao-ran, SHI Hao-lei
(College of Environmental Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)

Abstract: Effect of sludge retention time (SRT) on sludge reduction efficiency was analyzed in a combined process of sequencing batch activated sludge reactor and anaerobic reactor (SBR/OSA process). SBR/OSA process was continuously operated for 9 months at SRT of 30 d, 20 d and 15 d. Under the premise of not affecting the effluent quality of SBR/OSA process, the best sludge reduction efficiency was achieved when SRT was 20 d, and the sludge reduction rate could reach 39%. It was found that sludge decay in the anaerobic reactor was the main reason of sludge reduction through analyzing the polysaccharide, protein and volatile fatty acid (VFA) concentration in the mixed sludge supernatant of the anaerobic reactor.

Key words: sludge retention time; SBR/OSA process; sludge reduction; sludge decay

污泥处置一直是污水处理领域的难题^[1], 因此探索处理剩余污泥的新方法意义重大。而在活性污泥法处理污水过程中, 减少污泥量十分重要, 例如控制运行参数或对污泥回流的处理。OSA(好氧-沉淀-厌氧)工艺利用污泥回流的方式, 可以减少 30% 的污泥量^[2]。该工艺只是在普通活性污泥工艺的基础上增加厌氧池, 即可在不影响出水水质的

情况下实现污泥减量, 同时改善污泥的沉降性能。唐悦恒等^[3]采用 SBR/OSA 工艺得到 46% 的污泥削减率。目前, 大多数研究关注 ORP、污泥回流比等对工艺的影响^[4], 鲜有科研人员分析污泥停留时间对污泥减量化的影响。

笔者通过改变 SBR 和 OSA 反应器的污泥停留时间, 确定 SBR/OSA 工艺的最佳污泥减量工况, 旨

在为 OSA 工艺的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

试验装置如图 1 所示。

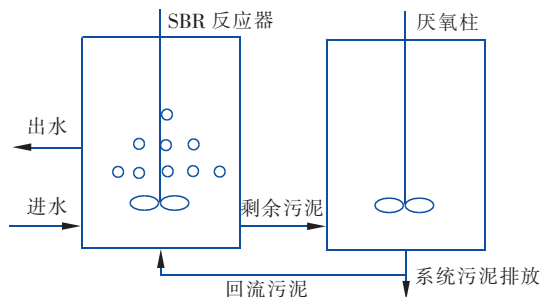


图 1 试验流程

Fig. 1 Schematic diagram of experiment progress

SBR 和厌氧柱有效容积均为 6 L。SBR 每天运行 3 个周期,每个周期 8 h,分成 6 个阶段:进水、缺氧、好氧、沉淀、出水、静置,充水比为 0.4。从 6 月份开始驯化 2 个月活性污泥,然后在室内环境温度下稳定运行 5 个月,污泥龄(SRT)分别为 30、20、15 d。在中温 $[(33 \pm 2) ^\circ\text{C}]$ 厌氧条件下,厌氧柱 24 h 间断搅拌,待工况运行稳定后($\text{MLSS} \approx 3\,000\text{ mg/L}$)进行厌氧污泥回流。每天排泥 1 次,在 SBR 曝气快结束时,相应量的剩余污泥进入厌氧柱,并由厌氧柱排出等体积的系统污泥,其中 SBR/OSA 工艺回流 50% 的系统污泥与进水一同进入 SBR。对照组无污泥回流过程。

1.2 原水水质和检测方法

试验原水为人工合成废水,采用 CH_3COONa 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KH_2PO_4 配制合成废水,使 $\text{COD}:\text{N}:\text{P} \approx 100:10:1$ 。具体水质: COD 、 NH_3-N 、 TP 分别为 (574 ± 65) 、 (60 ± 8) 、 $(6.2 \pm 1.3)\text{ mg/L}$ 。适量补充 Ca 、 Zn 、 Fe 、 Mg 、 Mn 、 Cu 、 Co 、 Mo 等微量元素。

COD 、 TN 、 TP 、 MLSS 均采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定,多糖、蛋白质和挥发性脂肪酸(VFA)分别采用蒽酮法、Folin-酚试剂法和气相色谱法检测。

系统累计排放的污泥量与累积去除的 COD 总量之间的比值为系统污泥表观产率系数(Y_{obs}),按式(1)计算。

$$Y_{\text{obs}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{ai}}}{NV_e \sum_{i=1}^n (X_{\text{oi}} - X_{\text{ei}})} \quad (1)$$

式中, n 为装置稳定运行的天数; d ; S_{ai} 为装置运行到第 i 天时污泥的排放量, g ; N 为每天 SBR 的运行周期; V_e 为系统出水体积, L ; X_{oi} 、 X_{ei} 分别为装置运行到第 i 天时原水和出水 COD 浓度, g/L 。

通过式(2)~(4)分析 SBR/OSA 工艺在不同工况下反应区污泥增长的情况。

$$S_0 = S_1 - S_2 \quad (2)$$

$$S_2 = S_{21} + S_{22} \quad (3)$$

$$S_d = S_{21} - S_1 \quad (4)$$

式中, S_0 为对照组 SBR 与试验组污泥产量的差值, g/d ; S_1 为对照组 SBR 的污泥产量, g/d ; S_2 为试验组污泥产量, g/d ; S_{21} 为试验组 SBR 的污泥产量, g/d ; S_{22} 为试验组厌氧柱的污泥产量, g/d ; S_d 为试验组 SBR 与对照组 SBR 污泥产量的差值, g/d 。

2 结果与讨论

2.1 SBR/OSA 工艺的出水水质

表 1 为 SBR/OSA 工艺在不同工况下的出水水质。

表 1 SBR/OSA 工艺在不同工况下的出水水质

Tab. 1 Effluent quality of SBR/OSA process under different working conditions

项 目	对照组 SRT/d			试验组 SRT/d		
	30	20	15	30	20	15
出水 COD 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	20.8	15.3	19.7	19.8	11.8	13.2
COD 平均去除率/%	96.1	97.4	96.7	96.3	98.0	97.8
出水 TN 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	15.0	18.2	15.5	15.3	17.6	14.7
TN 平均去除率/%	74.2	70.3	73.6	73.9	71.4	75.0
出水 TP 平均浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.3	1.1	1.1	1.3	1.2	1.1
TP 平均去除率/%	83.1	84.3	84.0	82.9	83.7	83.9

由表 1 可知,当 SRT 分别为 30、20 和 15 d 时,试验组 COD 平均去除率分别为 96.3%、98.0% 和 97.8%,略高于对照组,表明厌氧污泥的回流可以提高对 COD 的去除效果。这是由于回流的污泥长期处于饥饿状态(无基质供给、无氧气),进入 SBR 后加强了对碳源的摄入。

在 SRT 变化过程中,试验组和对照组对 TN 的去除率均在 70% 以上,去除效果较好,而 TP 去除率随着 SRT 的减小略微增加,这可能是由于聚磷菌这类兼性细菌在厌氧/好氧耦合的环境下超量释磷或吸磷的结果。总之,对营养物质的去除效果与 SBR

的运行条件有关。虽然通过降解部分有机物可以减少污泥量,但这不是导致 OSA 系统污泥减量的首要原因。因此,仅可以认为 SRT 对污泥减量具有一定的影响。

从表 1 还可以看出,对照组和试验组的除磷效果均较好。以 SRT = 20 d 为例,对主反应区 TP 进行质量平衡分析。试验组和对照组进水 TP 质量分别为 50.19 和 44.64 mg/d,出水 TP 质量分别为 8.64

和 7.92 mg/d,根据质量守恒定律,试验组和对照组剩余污泥所含磷的质量分别为 41.55 和 36.72 mg/d,则污泥含磷量分别达到 0.056 9、0.041 3 gP/gMLSS。可见,试验组剩余污泥含磷量高于对照组,说明试验组污泥吸磷能力优于对照组,接近污泥极限含泥量。

2.2 SBR/OSA 工艺的污泥减量效果

表 2 为 SBR/OSA 工艺的污泥减量效果。

表 2 污泥减量效果

Tab. 2 Efficiency of sludge reduction

SRT/d	累积天数/d	对照组		试验组			
		累积排放量/g	污泥产量/(g · d ⁻¹)	累积排放量/g	污泥产量/(g · d ⁻¹)	污泥减少量/(g · d ⁻¹)	污泥减量率/%
30	60	26.52	0.44	18.72	0.31	0.13	30
20	40	28.63	0.72	17.74	0.44	0.28	39
15	30	20.14	0.67	13.09	0.44	0.23	34

由表 2 可知,相同 SRT 条件下,试验组的污泥产量均低于对照组,当 SRT 为 20 d 时,试验组污泥减量率为 39%,高于 SRT 为 15 和 30 d 的。说明引入厌氧柱可以有效减少污泥产量,且 SRT 不同,SBR/OSA 工艺的污泥减量效果也不同。污泥减量是由于剩余活性污泥在厌氧柱中发生了衰减,最终生成以挥发性脂肪酸为主的产物,这些产物通过污泥回流可以作为二次基质,为主反应区的厌/缺氧阶段提供丰富的碳源,以达到污泥减量的目的。但是延长 SRT 并没有提高系统的污泥减量率,这可能是由于增加污泥停留时间导致了污泥老化,进而影响污泥活性,使厌氧环境下利用 SBR 剩余污泥进行溶解和水解酸化的能力减弱。另外,缩短 SRT 也会影响污泥减量效果,因为混合污泥在厌氧柱内停留时间太短,容易导致溶胞作用不完全,反而增加了污泥浓度,可见 SRT 较短可能会增加污泥产量。已有报道证明,多级厌氧或厌氧/好氧交替反应可减少污泥量的产生^[5,6],与本试验结果一致。

2.3 SBR/OSA 工艺的污泥表观产率

本试验不考虑微生物内源代谢造成的微生物减少量。结果表明,当 SRT = 30 d 时,对照组和试验组的 Y_{obs} 值分别为 0.118 和 0.082 gSS/gCOD;当 SRT = 20 d 时,对照组和试验组的 Y_{obs} 值分别为 0.167 和 0.107 gSS/gCOD;当 SRT = 15 d 时,对照组和试验组的 Y_{obs} 值分别为 0.163 和 0.108 gSS/gCOD。可见,SRT 为 30 d 时污泥表观产率最小,即活性污泥工艺去除单位 COD 产生的污泥量较小。当 SRT 降

至 20 d 时,对照组和试验组的 Y_{obs} 值分别增加了 41.52% 和 30.49%,是因为剩余污泥浓度几乎不变,而 SBR 排出的剩余污泥体积增加导致系统污泥累积量增大。当 SRT 继续下降至 15 d 时,对照组和试验组的 Y_{obs} 值较 SRT 为 20 d 时变化不大,可能是由于该阶段试验在 12 月份进行,外界环境温度低导致微生物代谢缓慢,活性污泥增长速度变慢。SRT = 30 d 时,试验组 Y_{obs} 值比对照组降低了 30.51%;当 SRT = 20 d 时,试验组的 Y_{obs} 值比对照组降低了 35.93%;SRT = 15 d 时,试验组 Y_{obs} 值比对照组降低了 33.74%。可见,SRT = 20 d 时污泥表观产率降低的比例最大,而且进一步证实 SBR/OSA 系统确实有污泥减量的效果。

2.4 SBR/OSA 工艺各工作区对污泥减量的影响

表 3 为不同反应工况下各反应区的污泥产量。

表 3 不同工况下各反应区的污泥产量

Tab. 3 Sludge yield of different reaction zones in different conditions g · d⁻¹

项 目	S_1	S_2	S_{21}	S_{22}	S_0	S_d
SRT = 30 d	0.54	0.31	0.63	-0.32	0.23	0.09
SRT = 20 d	0.89	0.44	0.73	-0.29	0.45	-0.16
SRT = 15 d	0.72	0.44	0.67	-0.23	0.28	-0.05

由表 3 可知,厌氧区的污泥产量均为负值,这是因为该区的污泥浓度较高,在无能量供给及厌氧环境下,导致部分微生物降解甚至死亡。主体反应区的剩余污泥在厌氧区进行水解酸化,SRT 越长,污泥衰减作用越强,表现为厌氧区污泥产量较低。厌氧

区污泥停留时间越长,ORP 值越低,OSA 工艺污泥减量越明显。在 SBR/OSA 工艺中,提高污泥在厌氧柱的停留时间可以提高污泥衰减效果,这可能是污泥减量的主要原因,即污泥的内源消化作用^[7]。

从表 3 还可以看出,SBR/OSA 工艺主体反应区污泥产量最高为 0.73 g/d(SRT = 20 d),而 SRT 为 15 和 30 d 时的污泥产量相差不大。当污泥龄为 15 和 20 d 时, S_d 值均为负值,表明 SBR/OSA 系统主体反应区污泥的产量低于传统 SBR。这是因为好氧/厌氧交替的环境形成不同的微生物种群,微生物利用回流基质主要用于维持自身代谢,使污泥减量系统主体反应区污泥增长缓慢。而当 SRT = 30 d 时, S_d 值却为 0.09 g/d,略大于 SBR 系统,说明 SRT 值变大会促进减量系统主体反应区微生物增殖,可能是由于厌氧区回流的丰富有机基质促进了污泥自我补偿性增长。同时随着 SRT 的增加,污泥水解酸化作用增强,污泥减量效果是由于主体反应区的污泥低产量以及厌氧区污泥衰减相互影响的结果。因此污泥减量系统与传统 SBR 相比,SRT = 20 d 时污泥减少量最多,可达 0.45 g/d。

2.5 厌氧柱的污泥衰减作用

当 SRT = 15 d 时,对进出厌氧区的污泥上清液进行检测,结果如图 2 所示。

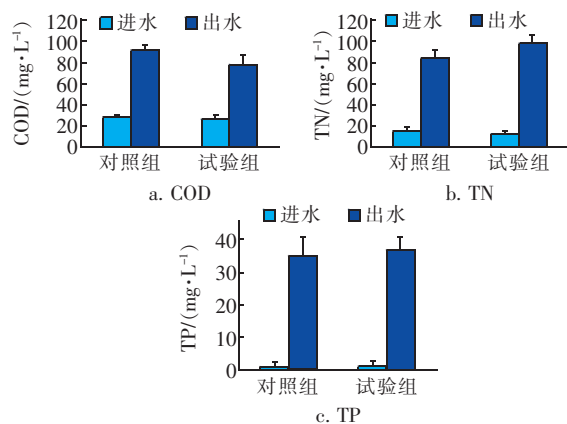


图2 厌氧区污泥上清液中 COD、TN 和 TP 的变化

Fig. 2 Change of COD, TN and TP of sludge supernatant in anaerobic zone

由图 2 可知,厌氧柱出水 COD 浓度远高于进水,进水取自主反应区曝气快结束时的混合污泥,所以其上清液 COD 值很低,然后混合污泥突然进入厌氧环境,微生物极易被降解,胞内物质释放引起出水 COD 浓度升高。试验组厌氧区 COD 值低于对照

组,可能是已经熟悉了厌氧/好氧交替环境的微生物更适应厌氧环境,因而其细胞结构不易被破坏。另外,出水 TN、TP 也都高于进水,在厌氧条件下微生物将有机氮化合物分解、转化成氨态氮,所以 TN 主要由氨氮构成,而且厌氧柱中微生物衰减、死亡可导致 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度升高,因而厌氧出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 升高,又由于厌氧释磷,使得厌氧污泥上清液 TP 浓度显著增加。

根据图 2 计算,SBR/OSA 工艺回流液所携带的 COD、TN 和 TP 的含量分别为 15.6、19.6 和 7.4 mg/d,而每天进水含有的 COD、TN 和 TP 分别为 4 132.8、432 和 44.6 mg/d,回流液 COD 和 TN 含量仅占进水 COD 含量的 0.38% 和 4.54%,因此 SBR/OSA 工艺增加的碳源和 TN 是很少的,主反应区的污泥负荷与对照组相差不大。回流液 TP 含量占进水 TP 含量的 16.59%,但是 TP 的增加并没有影响系统的出水水质,说明 SBR/OSA 工艺去除 TP 的能力较强,其厌氧/好氧交替的环境更适宜聚磷菌生长。

曝气末的混合污泥上清液中几乎不含多糖、蛋白质和 VFA,混合污泥进入厌氧环境后降解为多糖、蛋白质、脂肪等溶解性有机物,然后再进一步转化为以 VFA 为主的产物。图 3 为厌氧污泥上清液中多糖、蛋白质和 VFA 含量的变化。

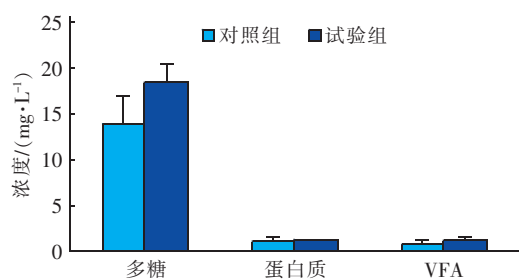


图3 厌氧污泥上清液中多糖、蛋白质和 VFA 含量的变化

Fig. 3 Change of polysaccharide, protein and VFA of sludge supernatant in anaerobic zone

由图 3 可知,厌氧污泥上清液的主要成分为多糖、蛋白质和 VFA 均较少。其中,试验组多糖、蛋白质以及 VFA 含量分别高于对照组 32.9%、10.74% 和 81.94%,说明 SBR/OSA 工艺与普通厌氧反应器相比水解酸化程度较高。这可能与 SBR/OSA 工艺的污泥浓度有关,污泥回流造成 SBR/OSA 厌氧柱中污泥浓度较高,底物浓度高有利于厌氧反应的进

行,加快生化反应速率,因而在污泥解体过程中释放出更多的多糖、蛋白质和 VFA。也可能是由于两组系统之间污泥性质的差异,有回流途径的试验组回流污泥在 SBR 反应器中也进行分解,因为厌氧柱中的污泥长期处于厌氧环境中,进入 SBR 反应器后,不适应好氧环境的厌氧污泥被主反应区活性污泥当成生命活动的能源,成为劣势的回流污泥被迅速分解,然后通过排剩余污泥再一次进入厌氧柱中,经过长期积累,SBR/OSA 工艺厌氧污泥上清液细胞聚合物物质相比于对照组会略高。

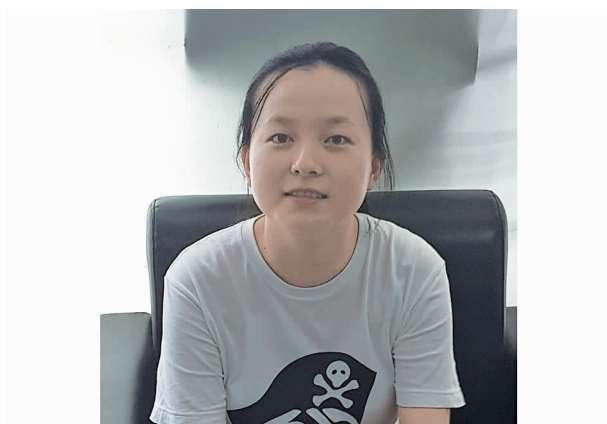
3 结论

① SBR/OSA 工艺可以有效减少系统污泥的产量,其中 SRT 是一个关键影响参数。系统的 SRT 为 20 d 时,污泥减少量最多,污泥减量率达到 39%。当污泥龄为 15 和 30 d 时,污泥减量率分别为 34% 和 30%。随着 SRT 增加,系统 Y_{obs} 值减小,SRT 为 20 d 时 Y_{obs} 值减小比例最大。

② 系统污泥减量效果是各个反应区相互作用的结果,表现为厌氧柱污泥发生衰减,其上清液 COD、蛋白质和多糖等有明显上升趋势,而 SBR 反应器的污泥进行补偿性增长。

参考文献:

- [1] Qian L L, Wang S Z, Xu D H, *et al.* Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: A review [J]. *Water Res*, 2016, 89: 118 – 131.
- [2] Semblante G U, Hai F I, Bustamante H, *et al.* Effects of iron salt addition on biosolids reduction by oxic – settling – anoxic (OSA) process [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2015, 104: 391 – 400.
- [3] 唐悦恒,方闻,罗莹,等. SBR/OSA 工艺的污泥减量化运行机理研究 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(5): 104 – 108.
- Tang Yueheng, Fang Wen, Luo Ying, *et al.* Operation mechanism of SBR/OSA process for sludge reduction [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(5): 104 – 108 (in Chinese).
- [4] 王建芳,赵庆良,刘志刚,等. 好氧 – 沉淀 – 厌氧工艺剩余污泥减量化影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2008, 28(5): 427 – 432.
- Wang Jianfang, Zhao Qingliang, Liu Zhigang, *et al.* Influence factors of excess sludge reduction of the oxic-settling-anaerobic technique [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(5): 427 – 432 (in Chinese).
- [5] Demir Ö, Filibeli A. The investigation of the sludge reduction efficiency and mechanisms in oxic-settling-anaerobic (OSA) process [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 73(10): 2311 – 2323.
- [6] Pareja P M R, Jiménez A R, Aragón C A, *et al.* Changes in enzymatic and microbiological activity during adaptation of a conventional activated sludge (CAS) to a CAS-oxic-settling-anaerobic (OSA) adapted process [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 57(6): 2719 – 2725.
- [7] 李彬彬. 污泥减量的序批式活性污泥法工艺研究 [D]. 扬州:扬州大学,2016.
- Li Binbin. The Study on a Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process for Sludge Reduction [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016 (in Chinese).



作者简介:蒋一凡(1991 –),女,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术。
E-mail: 543107925@ qq. com
收稿日期: 2017 – 05 – 23