

颗粒污泥 SBR 处理生活污水同步除磷脱氮的研究

卢姗, 季民*, 王景峰, 魏燕杰

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 采用厌氧-好氧的 SBR 运行方式, 以人工配水培养的好氧颗粒污泥为接种污泥, 处理碳、氮、SS 浓度均较高的生活污水, 研究了系统中颗粒污泥的稳定性及其去除有机物和同步除磷脱氮的效果。经过 1 个月的驯化培养, 颗粒污泥即可呈现出良好的污染物去除性能并趋于稳定, 反应器中颗粒污泥含量始终占污泥总量的 68% 以上。颗粒污泥系统污泥浓度为 5 000 ~ 6 000 mg/L, SVI 值为 20 ~ 35 mL/g。经过 3 个月的运行后, 反应器中颗粒污泥由原来以粒径 0.6 ~ 0.9 mm 的中等大小颗粒占主体变为粒径 > 1.25 mm 的大颗粒占主体。稳定运行阶段颗粒污泥系统对 COD、TOC、磷酸盐、氨氮、总氮和 SS 的平均去除率分别为 83.04%、70.41%、94.30%、86.51%、41.82% 和 85.89%。对反应器运行过程中典型周期的分析, 反映出颗粒污泥良好的同步除磷脱氮效果。

关键词: 好氧颗粒污泥; 生活污水; 同步除磷脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1687-06

Simultaneous Phosphorus and Nitrogen Removal of Domestic Sewage with Aerobic Granular Sludge SBR

LU Shan, JI Min, WANG Jing-feng, WEI Yan-jie

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: By seeding aerobic granular sludge cultivated from artificial wastewater, an anaerobic/aerobic SBR was applied to treat domestic sewage of high COD, TN and SS. The stability of granular sludge and the removal of organic pollutants, nitrogen and phosphorus of domestic sewage were investigated. After one month incubation, the reactor had good pollutant removal performances and run stably. The ratio of granular sludge to total suspended solids was over 68% all along. The sludge concentration was 5 000 ~ 6 000 mg/L and SVI value was 20 ~ 35 mL/g. After three months operation, most of the granules were over 1.25 mm instead of 0.6 ~ 0.9 mm in the beginning. During the stable operation phase of the granular sludge SBR, the average removal efficiencies of COD, TOC, phosphate, ammonium nitrogen, total nitrogen, SS were 83.04%, 70.41%, 94.30%, 86.51%, 41.82% and 85.89%, respectively. Analysis of the pollutant removal in typical cycle showed that the granular sludge had good simultaneous phosphorus and nitrogen removal performance.

Key words: aerobic granular sludge; domestic sewage; simultaneous phosphorus and nitrogen removal

好氧颗粒污泥具有微生物浓度高、沉淀速度快、能够同时实现脱氮除磷等独特优点, 成为水污染控制领域的研究热点之一。研究者甚至预言好氧颗粒污泥在未来可能会很大程度上取代传统絮状活性污泥, 成为污水生物处理的主流^[1]。目前, 研究者们在好氧颗粒污泥的形成条件和机理^[2]、微生物组成^[3~5]、对氮磷^[6~9]、难降解有机物^[10]、重金属^[11, 12]的去除等方面做了大量的理论基础研究。但这些研究通常采用人工配水, 对实际污水的研究不多, 已报道的包括乳制品废水^[13]、生活污水^[14]、豆制品废水^[15]、酿酒厂废水^[16]等。在好氧颗粒污泥工程化应用领域, 荷兰代尔夫特理工大学的 van Loosdrecht 等的研究成果最为显著, 已获得全球技术专利^[17]并应用城市污水进行了中试^[18], 目前已有 2 个工程化应用的反应器投入运行。而国内这方面的研究刚刚起步, 迟寒等^[19]对好氧颗粒污泥处理城市生活污水进行了初步研究, 但运行时间较短且采用的污水属于

低浓度有机废水。本试验采用具有较高有机物、总氮和悬浮物浓度的实际生活污水, 研究了这种水质条件下厌氧-好氧颗粒污泥 SBR 中颗粒污泥的稳定性, 并考察其去除有机物和同步除磷脱氮的效果。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

试验采用的 SBR 反应器由双层有机玻璃圆柱制成, 有效体积 8 L, 内层直径为 15 cm, 有效高度为 48 cm。反应器内外夹层之间采用循环水保温, 控制反应器在接近恒温条件下运行。本研究中反应器采用厌氧-好氧运行方式(图 1), SBR 系统由可编程控制器(PLC)控制进水、厌氧搅拌、污泥曝气、沉降、排

收稿日期: 2006-09-27; 修订日期: 2006-12-05

基金项目: 教育部天津大学、南开大学合作项目

作者简介: 卢姗(1982~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: nankelsh@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: jimin@tju.edu.cn

水及闲置等全过程,具体运行参数为进水 5 min,厌氧搅拌 90 min,好氧曝气 240 min,沉降 5 min,排水 10 min,静置 10 min.周期总长为 360 min,体积交换

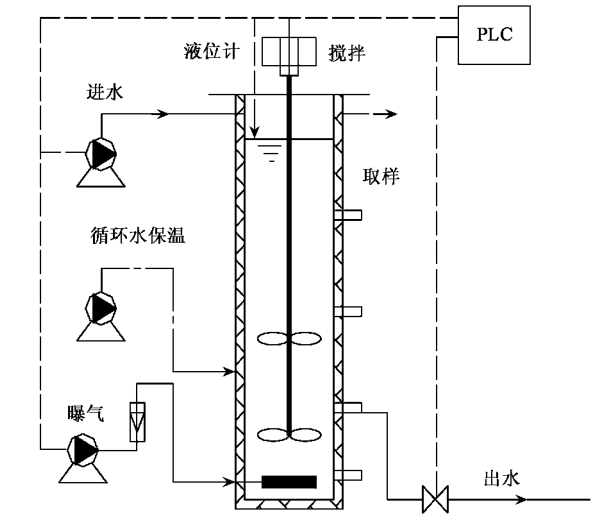


图 1 试验装置示意
Fig.1 Schematic diagram of experimental equipments

率为 70%,泥龄为 30~40 d.进水采用潜水泵进水,厌氧采用电动搅拌机搅拌,好氧采用微孔曝气器曝气,供气量由转子流量计控制,排水采用重力排水.

1.2 进水水质及接种污泥

试验用水为天津大学校园内的生活污水,水质指标见表 1.

以实验室培养的同步脱氮除磷好氧颗粒污泥为接种污泥^[8].颗粒污泥呈黑褐色细砂状外观,粒径为 0.8~1.5 mm.显微镜下观察污泥呈球形或椭球形,结构密实且轮廓清晰.污泥沉降性能良好,SVI 为 20~40 mL/g.污泥浓度为 3 000 mg/L 左右.

1.3 分析项目及方法

TOC 采用催化氧化法测定(Shimadzu TOC-V_{CPH}).污泥中金属元素含量采用全量分解法将污泥消解后用原子吸收法(日立 180-80 偏振塞曼原子吸收光谱仪)测定.氨氮采用纳氏试剂法测定.COD、磷酸盐、总氮、MLSS、SS 及 SVI 均采用标准方法测定^[20].由于颗粒污泥沉降性能较好,使用 SV5 min 计算 SVI 值.污泥粒径分布采用多目分筛法测定^[21].

表 1 生活污水水质/mg·L ⁻¹						
Table 1 Composition of domestic wastewater/mg·L ⁻¹						
项目	COD	TOC	磷酸盐	氨氮	总氮	SS
数值范围	516.13~1 422.92	31.58~198.62	3.47~9.52	34.34~106.76	45.89~146.65	169.70~827.45

2 结果与讨论

由于试验所用生活污水各项污染物指标比前期人工配水高出较多,为使反应器更好地适应新的水质,首先进入驯化阶段,用自来水稀释生活污水,并逐步提高生活污水的比例,经过 1 个月的驯化培养,颗粒污泥呈现出良好的污染物去除性能并趋于稳定,稳定后运行了 2 个月.驯化阶段为第 1~132 个周期,稳定运行阶段为第 133~357 个周期.

2.1 颗粒污泥稳定性

2.1.1 污泥特性变化

随着水质的变化,颗粒污泥很快由黑褐色转化为黄褐色,但形状和强度无明显变化.颗粒污泥生物相仍以球菌、杆菌为主,并有大量活跃的钟虫、轮虫等原生和后生动物.

污泥中金属元素的总量及各金属元素的含量随进水水质也发生变化,采用生活污水后污泥中金属元素总量比配水时有所降低后趋于平稳,其中 Ca、Fe、Zn 和 Cu 元素含量减少,而 K 和 Mg 元素含量提

高,Mn、Pb 和 Cr 元素变化不大.

2.1.2 污泥浓度及沉降性能变化

污泥浓度及沉降性能变化如图 2 所示.驯化阶段进水 COD 容积负荷为 1.18~1.94 kg/(m³·d),稳定运行阶段进水 COD 容积负荷为 1.42~3.91 kg/(m³·d).驯化初期的前 48 个周期内污泥浓度有所下降,从 2 919.4 mg/L 降至 2 778.3 mg/L.为防止污泥浓度进一步下降,于第 49 个周期补泥,污泥浓度直接升至 4 484.06 mg/L.在此之后污泥浓度呈波动上升趋势,基本维持在 5 000~6 000 mg/L,最高时达到 7 520.6 mg/L.试验第 341 个周期进水中各项污染物浓度骤降,污泥浓度随之迅速下降,至第 357 个周期降至 4 011.25 mg/L.

驯化初期颗粒污泥的 SVI 值与接种颗粒污泥相近,为 20.38~28.47 mL/g.但随着进水 COD 容积负荷的增加,污泥浓度增长,尤其是絮状污泥的迅速增长,SVI 值随之迅速上升至 50 mL/g 左右.试验进行到第 245 个周期后,由于反应器中颗粒污泥比例的再次提高,絮状污泥生长受到限制,SVI 值又有所下

降,并稳定在 20 ~ 35 mL/g 之间。

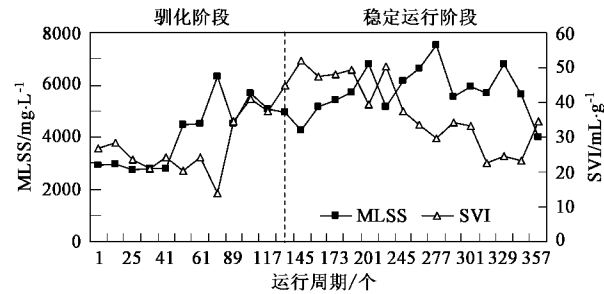


图 2 沉降性能及污泥浓度变化
Fig.2 Variation of sludge SVI and MLSS

2.1.3 污泥粒径分布变化

本研究将污泥按粒径大小划分为 5 个区间,并将 0.18 mm 作为区分界线,粒径 < 0.18 mm 的污泥定义为絮状污泥,粒径 > 0.18 mm 的污泥定义为颗粒化污泥.在整个驯化及稳定运行阶段,反应器中始终以颗粒污泥为主体,虽然在进水有机负荷冲击下有部分颗粒解体现象发生,但颗粒污泥始终占 68% 以上(图 3).驯化阶段颗粒污泥的解体主要发生在 0.6 ~ 0.9 mm 这一粒径区间,同时絮状污泥与粒径在 0.18 ~ 0.45 mm 颗粒污泥不断增长.进入稳定运行阶段后,最突出的变化就是絮状污泥的逐渐减少和 > 1.25 mm 颗粒污泥的增长.经过 3 个月的运行后,反应器中颗粒污泥由原来 0.6 ~ 0.9 mm 的中等大小颗粒占主体变为 > 1.25 mm 的大颗粒占主体。

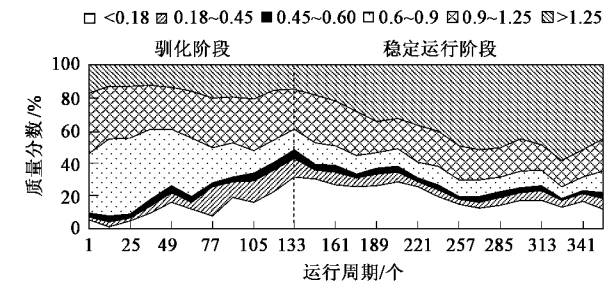


图 3 污泥粒径分布变化
Fig.3 Variation of particle size distribution

2.2 污染物去除效果

2.2.1 有机物的去除效果

驯化阶段进水 COD 为 429.69 ~ 770.46 mg/L,基本呈逐步上升趋势,但出水 COD 变化不大,大多维持在 150 mg/L 左右.说明颗粒污泥能够很好地适应新的水质,COD 去除率由 60% 左右稳步提高到 80% 左右.进入稳定运行阶段后,进水 COD 浓度波动较大,变化范围为 516.13 ~ 1422.92 mg/L,而 COD 去除率已能稳定在 73.41% ~ 91.26% 之间(图 4).

由于试验所用生活污水中悬浮性有机物含量较高,而在除磷脱氮过程中往往需要利用溶解性有机物,因此,试验中以 TOC 值表征该指标(图 5).进水 TOC 的波动范围很大,为 31.58 ~ 198.62 mg/L.而出水 TOC 大多稳定维持在 20 ~ 30 mg/L 范围内。

对厌氧-好氧颗粒污泥 SBR 来说,氮、磷的同步去除就是以碳循环为中心,围绕胞内储存物质的代

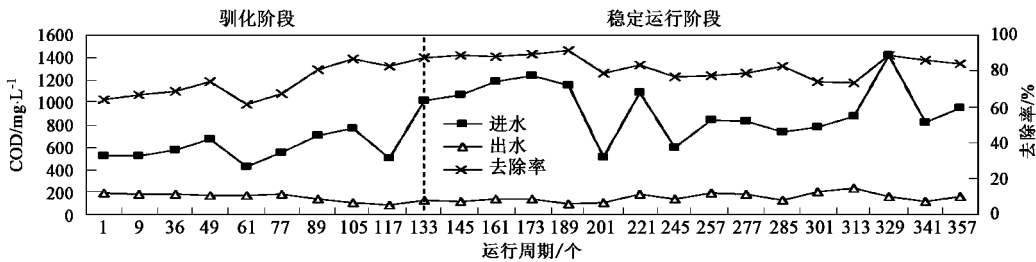


图 4 COD 去除效果
Fig.4 COD removal performances

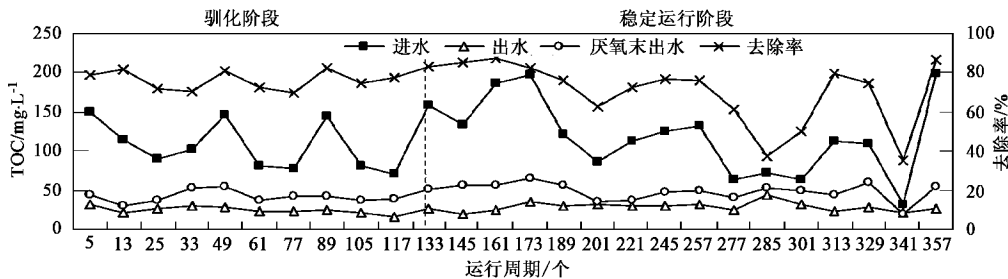


图 5 TOC 去除效果
Fig.5 TOC removal performances

谢完成的,厌氧有机物的去除率直接关系好氧阶段氮、磷等污染物的去除效果.在反应器运行的前 13 个周期厌氧 TOC 去除率仍与配水试验时相近,达 70% 以上.之后的驯化阶段中厌氧 TOC 去除率下降到 50% 左右.进入稳定运行阶段后,除进水 TOC 浓度偏低不但影响出水 TOC 去除率,也同样影响厌氧 TOC 去除率的情况外,厌氧 TOC 去除率大多维持在 60% 左右.这与王暄等^[22]采用城市污水进行厌氧-好氧周期循环条件下,厌氧快速吸收有机物的研究中厌氧搅拌 1 h 后 60% 左右的 COD 去除率结论一致.而竺建荣等^[23]采用人工配水研究厌-好氧交替工艺对有机污染物的去除效果,厌氧 2.5 h 后对 COD 的去除效率约为 16.7% ~ 33.4%, COD 主要是在好氧

阶段被去除.

2.2.2 磷酸盐的去除效果

反应器对磷酸盐具有良好的去除效果,如图 6 所示.驯化阶段进水磷酸盐浓度为 2.03 ~ 5.50 mg/L,稳定运行阶段进水磷酸盐浓度为 3.47 ~ 9.52 mg/L.出水磷酸盐浓度大多为 0.50 mg/L 以下,去除率达 90% 以上.但反应的第 33、257 和 301 个周期发生了出水磷酸盐浓度异常偏高,去除率大幅下降现象.这可能为生物除磷由于“过量曝气”而产生的阶段性的失效现象^[24].当曝气时间过长,如周期低负荷运行条件下,聚磷菌在消耗完 PHB 后,消耗聚糖元.这样就使聚磷菌在厌氧条件下吸收底物的能力下降,并最终影响磷酸盐的吸收.

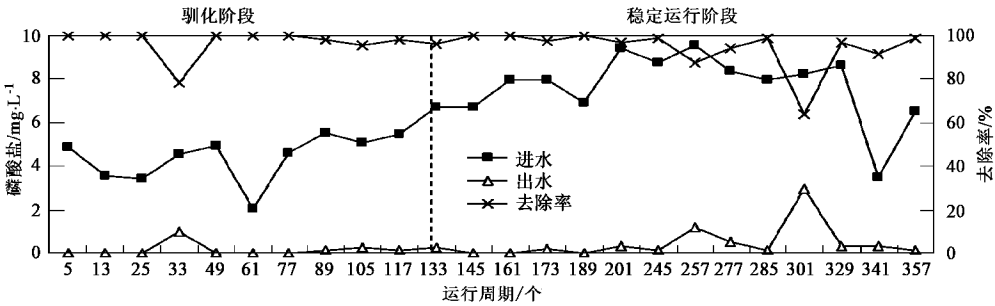


图 6 磷酸盐去除效果

Fig.6 Phosphate removal performances

2.2.3 硝化和脱氮的效果

生活污水的氨氮值较高,但反应器通常具有较好的氨氮去除效果,如图 7 所示.驯化阶段进水氨氮浓度为 34.17 ~ 73.53 mg/L,稳定运行阶段进水氨氮浓度为 34.34 ~ 106.76 mg/L.出水氨氮浓度大多为 20 mg/L 以下,最低达到 1 mg/L 以下.去除率为 62.79% ~ 99.22%,平均去除率达 86.51%.

颗粒污泥 SBR 的典型特征是在好氧阶段发生总氮的去除.颗粒污泥具有相对致密的结构与较大的粒径,由于传质限制的存在,在颗粒污泥沿传质方向有明显的好氧区、缺氧区、厌氧区之分,能够做到外部硝化,内部反硝化,因此可以利用颗粒污泥实现

同步硝化反硝化,使单级生物脱氮过程成为可能^[25].本试验中驯化阶段进水总氮浓度为 54.44 ~ 95.04 mg/L,稳定运行阶段进水总氮浓度为 45.89 ~ 146.65 mg/L.去除率为 18.47% ~ 76.72%,平均去除率为 41.82%(图 8).总氮去除效果不够稳定,最主要的原因就是试验用水中的碳氮比严重失调,进水 TOC 与总氮之比仅为 0.47 ~ 2.26,低于 2.86 的理论值^[26].尽管系统中存在的反硝化除磷现象可以“一碳两用”,节省了脱氮过程对碳源的需要,但也不足以提供反硝化过程所需的充足碳源.因此在现有水质条件下,反应器对总氮的去除量已达到极限,若要进一步提高脱氮效果仍需外加碳源.

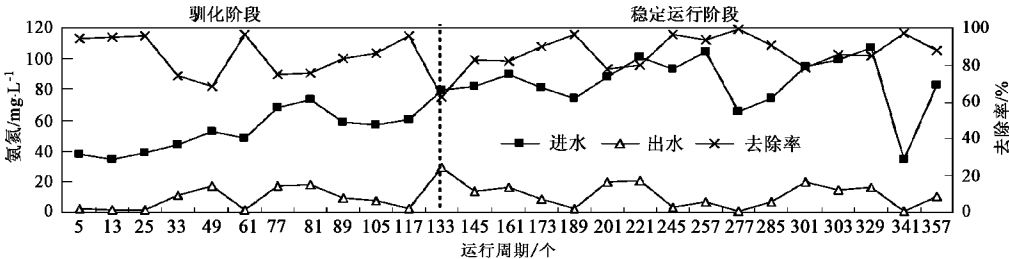


图 7 氨氮去除效果

Fig.7 Ammonium nitrogen removal performances

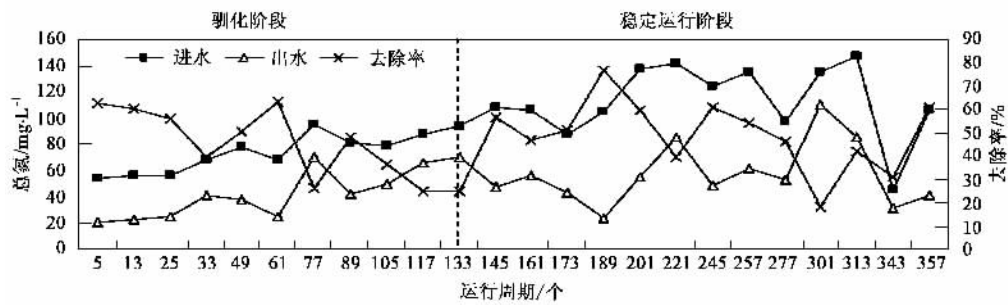


图 8 总氮去除效果

Fig.8 Total nitrogen removal performances

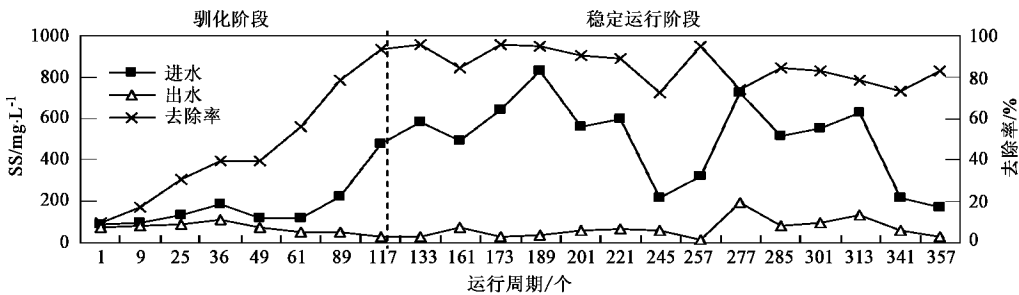


图 9 SS 去除效果

Fig.9 SS removal performances

2.2.4 SS 的去除效果

驯化阶段进水 SS 浓度为 85.95 ~ 478.71 mg/L, 去除率从第 1 个周期的 9.63% 稳步提高到第 117 个周期的 93.25%。反应器从处理基本不含 SS 的人工配水转为处理 SS 含量较高的生活污水具有较强的适应性,1 个月即可达到较高的去除率。稳定运行阶段进水 SS 浓度为 169.70 ~ 827.45 mg/L, 去除率可稳定在 72.03% ~ 95.58%(图 9)。虽然系统对 SS 的去除率较高,但出水 SS 量仍较高,这主要是由于为使沉淀速度较大的颗粒污泥在反应器中占优势,反应器控制的沉淀时间只有 5 min。

2.3 颗粒污泥同步除磷脱氮效果

运行过程中典型周期颗粒污泥系统有机物、磷酸盐、氮的去除情况变化特征如图 10 所示。由图 10 可知,有机物大部分在厌氧阶段被吸收,TOC 厌氧去除量为 76.42 mg/L,相应的去除率达到 61.30%。并伴随着磷酸盐的释放,厌氧释磷量为 43.31 mg/L。好氧阶段 TOC 去除量仅为 19.02 mg/L,但却发生了伴随着聚磷菌吸磷的同步硝化和反硝化反应。好氧阶段磷的吸收主要在 1 h 完成,吸磷速率(以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计)可达 5.24 mg/(L·h),好氧末磷酸盐浓度仅为 0.10 mg/(L·h)。氨氮的好氧去除率达到了 95.19%。颗粒污泥在好氧过程中伴随着磷酸盐的吸收也发生了明显的反硝化反应,好氧总氮去除率达到了

51.31%。

反应器中发生了基于胞内储存物质的同步氮、磷的去除。厌氧阶段聚磷菌和反硝化聚磷菌将其细胞内多聚磷酸盐转化为无机磷并加以释放,厌氧释磷过程产生的能量被用来合成胞内多聚物 PHB(聚 β -羟基丁酸)以及摄取废水中的溶解性有机基质;好氧阶段颗粒污泥表层的异养菌首先可以将厌氧末剩余有机物进行好氧呼吸,而表层的各类硝化菌可以很快地进行硝化反应,产生的硝态氮沿颗粒表面的空隙进入颗粒内部被反硝化菌(包括反硝化聚磷菌、反硝化聚糖菌以及其它具有储存能力的反硝化菌)利用进行脱氮。而磷酸盐则可以被颗粒表层以及颗粒内层的聚磷菌分别以氧分子或硝态氮为电子受体氧化胞内储存物质,完成除磷或反硝化除磷。

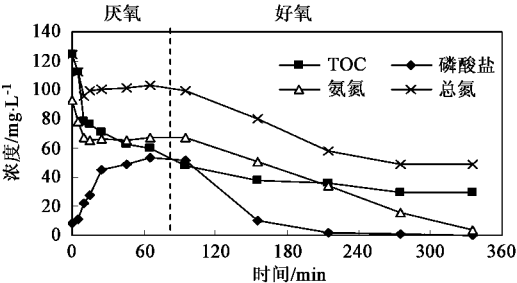


图 10 典型周期污染物去除特征(第 245 个周期)

Fig.10 Characteristics of organics, nitrogen and phosphate removal in typical cycle(cycle 245)

3 结论

(1) 以实验室培养的同步除磷脱氮好氧颗粒污泥为接种污泥,采用厌氧-好氧颗粒污泥 SBR 处理高浓度生活污水,经过 1 个月的驯化培养,颗粒污泥即可呈现出良好的污染物去除性能并趋于稳定.

(2) 颗粒污泥系统具有较高的污泥浓度 5 000 ~ 6 000 mg/L 和较低的 SVI 值 20 ~ 35 mL/g. 在整个驯化及稳定运行阶段,反应器中始终以颗粒污泥为主体,虽然在进水有机负荷冲击下有部分颗粒解体现象发生,但颗粒污泥始终占 68% 以上. 经过 3 个月的运行后,反应器中颗粒污泥由原来的 0.6 ~ 0.9 mm 的中等大小颗粒占主体变为 > 1.25 mm 的大颗粒占主体.

(3) 稳定运行后系统对生活污水中 COD、TOC、磷酸盐、氨氮和总氮各项污染物有较好的去除效果. 对反应器运行过程中典型周期的分析,反映出颗粒污泥具有良好的同步脱氮除磷效果.

(4) 脱氮除磷工艺在碳源不足的情况下,总氮的去除率会受到影响. 颗粒污泥 SBR 反应池中如果存在过多的絮状污泥,出水悬浮物可能会较高,需要在其后连接沉淀池.

参考文献:

[1] de Bruin L M M, de Kreuk M K, van der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: An alternative to activated sludge? [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11-12): 1 ~ 7.

[2] 郝晓地,陈新华,戴吉,等. 极具工程化潜力的好氧颗粒污泥技术[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(8): 1 ~ 7.

[3] Williams J C, de los Reyes III F L. Microbial community structure of activated sludge during aerobic granulation in an annular gap bioreactor[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(1): 139 ~ 146.

[4] 李光伟,刘和,云娇,等. 应用 T-RFLP 技术研究五氯酚对好氧颗粒污泥中细菌组成的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 794 ~ 799.

[5] 孙寓姣,左剑恶,杨洋,等. 好氧亚硝化颗粒污泥中硝化细菌群落结构分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1858 ~ 1861.

[6] Beun J J, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. N-removal in a granular sludge sequencing batch airlift reactor[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **75**(1): 82 ~ 92.

[7] de Kreuk M K, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(6): 761 ~ 769.

[8] 王景峰,王暄,季民,等. A/OSBR 中同步硝化反硝化除磷颗粒污泥的富集[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(17): 100 ~ 104.

[9] 王景峰,王暄,季民,等. 聚糖菌颗粒污泥基于胞内储存物质

的同步硝化反硝化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 473 ~ 477.

[10] Jiang H L, Tay J H, Maszenan A M, *et al.* Enhanced phenol biodegradation and aerobic granulation by two coaggregating bacterial strains[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(19): 6137 ~ 42.

[11] Liu Y, Xu H, Yang S F, *et al.* A general model for biosorption of Cd^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} by aerobic granules [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **102**(3): 233 ~ 239.

[12] Xu H, Liu Y, Tay J H. Effect of pH on nickel biosorption by aerobic granular sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(3): 359 ~ 63.

[13] Arrojo B, Mosquera-Corral A, Garrido J M, *et al.* Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors [J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3389 ~ 3399.

[14] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules with domestic sewage [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(6): 694 ~ 697.

[15] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(8): 2818 ~ 2827.

[16] Wang S G, Liu X W, Gong W X, *et al.* Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2006.

[17] van Loosdrecht M C M, de Kreuk M K. Method for the Treatment of Waste Water with Sludge Granules [P]. Dutch and International patent: NL1021466C, WO2004024638(A1), 2004-03-25.

[18] de Bruin L M M, van der Roest H F, de Kreuk M K, *et al.* Promising results pilot research aerobic granular sludge technology at WWTP Ede [A]. In: Bathe S, de Kreuk M K, McSwain, *et al.* Aerobic Granular Sludge, Water and Environmental Management Series No. 7 [C]. UK: IWA Publishing, 2005. 135 ~ 142.

[19] 迟寒,刘毅慧,杨凤林,等. 好氧颗粒污泥处理城市生活污水 [J]. *水处理技术*, 2006, **32**(8): 73 ~ 77.

[20] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[21] Laguna A, Ouattara A, Gonzalez R O, *et al.* A simple and low cost technique for determining the granulometry of upflow anaerobic sludge blanket reactor sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(8): 1 ~ 8.

[22] 王暄,季民,王景峰,等. 厌氧-好氧周期循环条件下厌氧快速吸收有机物的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(2): 322 ~ 327.

[23] 竺建荣,刘纯新,何建中,等. 厌-好氧交替工艺的生物除磷特性研究[J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(4): 394 ~ 398.

[24] Janssen P M J, Meinema K, van der Roest H F R. 生物除磷设计与运行手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 24.

[25] Yang S F, Tay J H, Liu Y. A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **106**(1): 77 ~ 86.

[26] 孙锦宜. 含氮废水处理技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 214.