

反硝化聚磷 SBR 与微动力曝气组合技术处理猪场废水的研究

吕梁, 王兆德, 张帅, 张志剑*

(浙江大学生态环境研究中心, 杭州 310029)

摘要: 在实验室模拟条件下, 以猪场废水(粪尿及冲洗水等混合废水)为例, 研究传统 SBR(A/O 模式)与反硝化聚磷(DNPAO) SBR 在脱氮除磷及有机质降解方面的可行性及其功效. 结果发现, 采用传统 SBR 工艺直接处理猪场废水, 其处理系统效率较低, 处理效果不稳定, 出水水质不佳, 废水处理出水 TN、TP 和 BOD_5 的去除率分别为 89.08%、86.04% 和 93.88%. 而改用反硝化聚磷 SBR, 同时配以微动力曝气法, 采用废水输入两步法与双循环“厌氧-缺氧/微氧”运行模式, 可实现猪场废水 TN、TP 和 BOD_5 去除率分别高达 93.95%、99.26% 和 99.93%. 由于其独特的工艺设计可使处理水 NO_3^- 浓度和输出负荷“双低”. 同时 ORP、pH 与 DO 3 项关键参数的动态变化可以间接地揭示微动力曝气 SBR 技术运行状态及出水水质, 但在实际条件下的中试运行成效有待于进一步研究.

关键词: 反硝化聚磷; SBR; 微动力; 同步脱氮除磷

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)07-1884-06

Denitrifying Phosphorus-Accumulating SBR Combined with Low-Intensity Aeration Technology for Piggery Wastewater Treatment

LÜ Liang, WANG Zhao-de, ZHANG Shuai, ZHANG Zhi-jian

(Research Center of Eco-Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The wastewater from animal farms in China is threatening the quality and security of local water environment. In the laboratory scale, a traditional SBR(A/O) and a denitrifying phosphorus-accumulating organisms(DNPAO) sequencing batch reactor(SBR) in biologically removing nutrients and organic matters from swine manure were investigated in this study. When piggery wastewater was directly treated with a traditional SBR, the efficiency was low with unstable working state, the reduction of TN, TP and BOD_5 reached 89.08%, 86.04% and 93.88%, respectively. While it performs a good effect in treating high density of piggery wastewater using DNPAO SBR technology, with the help of low-density aeration, two-step of influent feeding and two circulations of anaerobic-anoxic-anaerobic-anoxic(An/Ax₂), the reduction of TN, TP and BOD_5 reached the maximums of 93.95%, 99.26% and 99.93%, respectively. The specific operation of (An/Ax₂) SBR contributed both low concentrations and limited export loads of NO_3^- . The temporal curves of ORP, pH and DO over time could be indicators for simultaneous removals of nitrogen and phosphorus along with biodegradation of organic matter during this specific SBR running. A pilot-scale investigation was recommended to further testify the feasibility and efficiency of this kind of SBR under the real-world condition.

Key words: DNPAO; SBR; low-intensity; simultaneous nitrogen and phosphorus removal

近年来, 传统 SBR 及其衍生的各种升级工艺^[1~8]已日益成熟, 为处理猪场高浓度有机废水提供了一个较好的选择. 在传统 SBR 系统中, 氮的去除分为 2 个阶段: 好氧的硝化阶段和厌氧的反硝化阶段; 而磷的去除是使用聚磷菌通过厌/好氧状态的转化来进行释磷和超量摄磷, 以达到除磷的目的. 反硝化聚磷 SBR 技术是一种新型的 SBR 工艺, 利用反硝化聚磷菌(DNPAOs)^[9~23]在脱氮除磷方面的特别功效对废水进行同步脱氮除磷及有机质的去除. DNPAOs 是一种特殊的聚磷菌, 研究表明^[9~13], 经厌氧释磷的 DNPAOs 在无自由氧的环境下(即缺氧环境)可以将 NO_3^- 作为最终的电子受体进行超量吸磷, 同时 NO_3^- 被还原成 N_2 , 实现同步脱氮除磷的

功效. 还有研究表明^[6, 20], 以“缺/微氧”微动力曝气代替传统的“好氧”曝气, 将曝气量控制在低水平下(如 $0.8 \sim 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$), 从而水中的溶解氧(DO)能够快速地被好氧硝化细菌及其他的好氧及兼性细菌吸收利用, 使得反应器在曝气阶段始终处于缺/微氧状态, 为同步硝化反硝化脱氮及除磷提供了前提条件, 同时“厌氧-缺/微氧”的操作工艺也为 DNPAOs 的富集提供了良好的环境. 在溶解态碳

收稿日期: 2007-07-06; 修订日期: 2007-11-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA062327); 浙江省钱江人才计划专项(2007R10040); 留学归国人员专项(05120603)

作者简介: 吕梁(1985~), 男, 研究实习员, 主要研究方向为废弃物治理与水质安全, E-mail: l_l_liang1027@yahoo.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangzhijian@zju.edu.cn

源有限的情况下, DNPAOs 的引入使吸磷和脱氮过程使用同一碳源, 大大节省了对碳源的需求; 此外, 与传统 SBR 的好氧曝气相比, 微动力曝气不仅创造了同步反硝化聚磷所需的缺氧环境, 还节省了高强度曝气所需的能源, 而这正是传统 SBR 系统所不具备的.

本研究在实验室模拟条件下, 以猪场废水为例, 采用废水输入两步法与双循环“厌氧-缺氧/微氧”运行模式, 通过 DO 的控制分析了反硝化聚磷与微动力曝气 SBR 组合技术在脱氮除磷及有机质降解方面的可行性及其功效, 并且与传统 SBR 的处理效果进行对比, 进一步探究该组合技术的优越性; 同时通过 pH、ORP 和 DO 的采集分析间接地揭示微动力曝气 SBR 技术运行状态及出水水质, 以期优化 SBR 工艺提供科学的试验理论基础.

1 材料与方法

实验用 SBR 反应器如图 1 所示. 其中包括反应池系统(内径为 19 cm、高为 38 cm 底部封盖 PVC 圆柱体, 并设有顶部封盖、排水口/进水口/排泥口/采样口等), 废水排入系统(废水容器、数字化进水蠕动泵及输水管等), 处理水排出系统(处理水容器、数字化排水蠕动泵及输水管等), 曝气系统(曝气泵、曝气扩散器及气量调节器等), 搅拌系统(四桨搅拌器及数字化搅拌机), 剩余污泥排放系统, 在线监测系统(ORP 和 pH), 智能控制系统(在线数据收集器、自动控制平台及电脑).

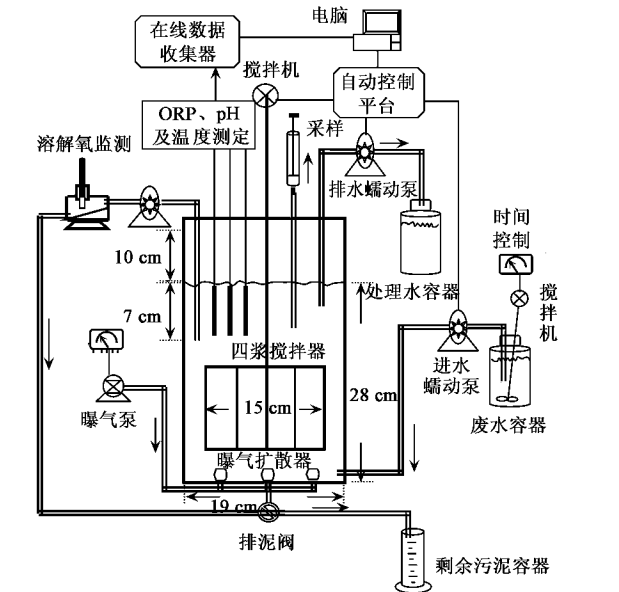


图 1 反硝化聚磷 SBR 系统示意

Fig.1 Diagram of the denitrifying phosphorus-accumulating SBR system

供试猪场废水(位于萧山农垦区)为成年肉猪舍排放废水, 经固液分离后, 冷藏备用. 以城市污水处理厂活性污泥为接种体, 通过梯度递增废水输入法与间隙曝气法, 诱导且扩增反应池 SBR 功能菌群(即硝化、反硝化细菌、聚磷菌及反硝化聚磷菌等)^[6]. 此启动阶段需时约 3 周达到稳定状态, 此后反应池中活性污泥混合液浓度 MLSS 保持在 $8\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 采用传统 SBR 模式时, 设计完整循环周期为 8 h, 水力停留时间(HRT)及污泥停留时间(SRT)分别为 3.3 d 与 18 d, 曝气强度控制在 $2\sim 2.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 采用 DNPA-SBR 运行模式时, 设计完整循环周期为 8 h, HRT 及 SRT 分别为 3.3 d 与 18 d; 采用多点扩散式供气装置, 曝气强度控制在 $0.8\sim 1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 每间隔 1 min 记录 ORP 与 pH 及 DO 等动态数据, 以揭示微动力曝气 SBR 技术运行状态及出水水质. 猪场废水与处理后排放水经过充分搅拌后, 取均匀混合样. SBR 反应器系统运行过程中实施动态采样: 间隔 30 min 采取 10 mL 反应液, 随即经 $5\,000\text{ r/min}$ 离心 5 min, 取上清液水样分析指标为: 总固体物(TS), 总悬浮颗粒物(SS), 氨氮(NH_4^+-N), 硝态氮(NO_3^--N), 凯氏氮(TKN), 总磷(TP), 溶解磷(DP), 化学需氧量(COD), 生化需氧量(BOD_5). 理化分析法均采用文献[24]的分析方法.

2 结果与讨论

2.1 采用传统 SBR 工艺(A/O)的处理效果分析

原水水质与出水水质见表 1. 由表 1 可知, 废水处理出水 TN 浓度为 $42.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 89.08%; TP 浓度为 $27.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 86.04%; BOD_5 浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 93.88%; COD 浓度为 $1\,750\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 75.86%. 出水各主要水质参数值和去除率表明整个反应系统并未达到理想中的效果, 高氮磷、高有机质的输出增加了受纳水体富营养化的隐患. 因此需研究并进一步改进 SBR 反应器在脱氮除磷和降解有机质方面的功效.

2.2 采用反硝化聚磷与微动力曝气 SBR 组合技术的处理效果分析

2.2.1 去除率分析

经实验表明, 采用反硝化聚磷与微动力曝气 SBR 组合技术, 配合以废水输入两步法与双循环“厌氧-缺/微氧”运行模式, 可以有效改善出水水质, 原水水质与出水水质对比如表 2 所示, 实验结

果如图 2、图 3 所示。

表 1 原水水质与出水水质对比(A/O-SBR 系统)

Table 1 Contrast of basic properties of the influent and the effluent using an A/O SBR system			
项目	原水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%
NH_4^+-N	809.30	0	100.00
NO_3^--N	0	49.89	—
TN	846.30	92.41	89.08
TP	198.18	27.66	86.04
DP	59.48	25.92	56.42
COD	7 250	1 750	75.86
BOD_5	2 450	150	93.88

表 2 原水水质与出水水质对比(DNPA-SBR 系统)

Table 2 Contrast of basic properties of the influent and the effluent using a denitrifying phosphorus-accumulating SBR system			
项目	原水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%
TS	6 090	3 180	47.78
SS	2 220	330	85.14
TKN	1 388	50	96.40
NH_4^+-N	1 205.1	0.0	100.00
NO_3^--N	0.0	25	—
TN	1 338	81	93.95
TP	148.1	1.1	99.26
DP	46.6	0.9	98.07
COD	8 004	485	93.94
BOD_5	4 440	3	99.93

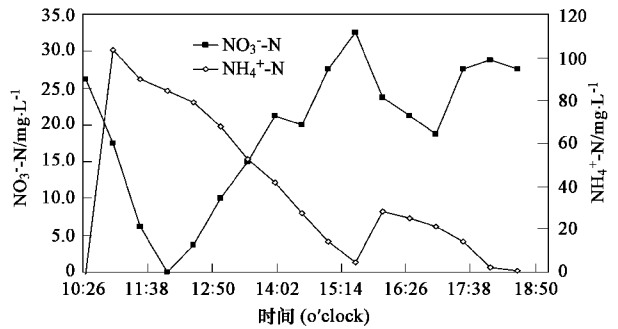


图 2 反硝化聚磷 SBR 系统反应液相氮素浓度动态变化

Fig.2 Profiles of the nitrogenous compounds(NO_3^--N and NH_4^+-N) in liquid phase in a denitrifying phosphorus-accumulating SBR system

表 2 显示了原水水质与出水水质对比。可以看出,采用本组合技术之后,出水水质有了大幅度的改善。废水处理出水 TN 浓度为 $81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 93.95%; TP 浓度为 $1.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 99.26%; BOD_5 浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 99.93%。该废水的主要水质指标浓度均已明显优于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001),由此可见在微动力曝气工艺辅助下的反硝化聚磷 SBR 技术处理猪场废水效果优越。

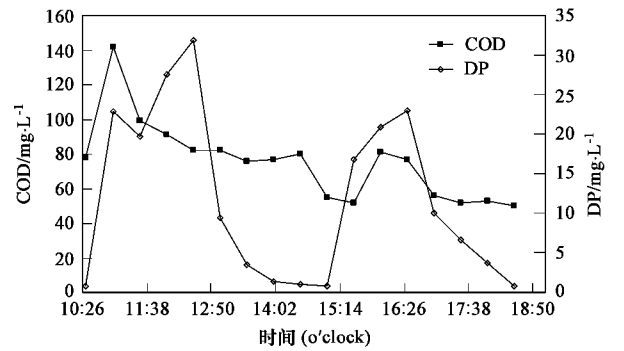


图 3 反硝化聚磷 SBR 系统反应液相磷素及 COD 浓度动态变化

Fig.3 Profiles of the dissolved phosphorus (DP) and chemical oxygen demand (COD) in liquid phase in a denitrifying phosphorus-accumulating SBR system

2.2.2 N、P 和 COD 动态分析

图 2 显示了采用微动力曝气与反硝化聚磷 SBR 组合技术后,在 8 h 的运行周期内,反应器中液相氮素浓度动态变化情况。在厌氧期内,反硝化作用导致了 NO_3^- 浓度的显著下降,而由于进水的缘故, NH_4^+ 的浓度上升。在缺/微氧期时,硝化作用促进了反应液相中 NO_3^- 浓度的升高。从总氮的质量平衡来看,两步法废水输入与双循环运行模式条件下的反硝化聚磷 SBR 系统,从理论上认为减少的氮素最终还原成氮气形态挥发为主。若采用常规的“厌氧-好氧”SBR 工艺,且在一次进水单循环模式下运行,则从理论上认为由新输入废水所含的各氮素总量(主要以氨氮为主),将以硝态氮的形态输出 SBR 反应体系,且保持氮素总质量相等^[25]。显然,由于缺/微氧期存在反硝化聚磷作用,又由于两步法废水输入与双循环模式运行使得在一个运行周期增加了反硝化作用的时间与强度,因此本组合技术可以确保高浓度含氮废水处理出水 NO_3^- 与输出负荷的“双低”,并且 COD、 BOD_5 和 P 均达到国家排放标准。

图 3 显示了采用微动力曝气与反硝化聚磷 SBR 组合技术后,在 8 h 的运行周期内,反应器液相磷素及 COD 浓度动态变化情况。在第 1 个厌氧阶段内,强还原条件导致活性污泥聚磷菌向液相释放磷素,加之第 1 阶段废水输入,反应液相 DP 浓度迅速上升,而此时溶解性 COD 浓度先上升(废水输入)后下降(功能菌代谢消耗)。在随后的缺氧期内,供氧但无自由氧的 ORP 状态促进反硝化聚磷菌生物聚磷从而降低反应液相 DP 浓度,与此同时消耗有机质。在第 2 个厌氧阶段内,尽管有废水的输入,但由于反应体系仍存在相对丰富的 NO_3^- (图 2),反硝化聚磷菌不仅没有生物放磷,而是利用 NO_3^- 作

为电子受体继续进行生物聚磷。随后的缺/微氧期进一步降低反应液相 DP 浓度，确保处理后出水 DP 浓度处于一个较低的水平。

2.2.3 pH、ORP 关系说明及 DO 动态变化

根据实验和研究表明，生物脱氮除磷过程中 pH 和 ORP 存在一定的相关性，并且可以通过 pH、ORP 和 DO 等参数曲线的变化规律对系统运行以及脱氮除磷效果具有一定的控制和指示作用^[26-33]。

图 4 显示了微动力曝气 SBR 系统反应液相 DO 动态变化。由图 4 可以看出：微动力曝气 SBR 法采用的低强度曝气系统使得反应器在整个运行周期的绝大部分时间内，溶解氧 (DO) 始终处于 $< 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这样一个低水平下，并且在微/缺氧时段在反应液相中根本没有探测到自由氧的存在。这表明：在微/缺氧时段，微动力曝气所引入的自由氧在瞬时就被一些自养型微生物所利用或者被用于氧化一些还原态的物质，从而导致反应液相 DO 始终为 0，为同步脱氮除磷创造了良好的环境基础。在微动力曝气结束前约 30 min 内，反应液相自由氧浓度开始上升，最高达氧浓度达到 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，指示出反应体系内 BOD_5 有可能已降解完毕。

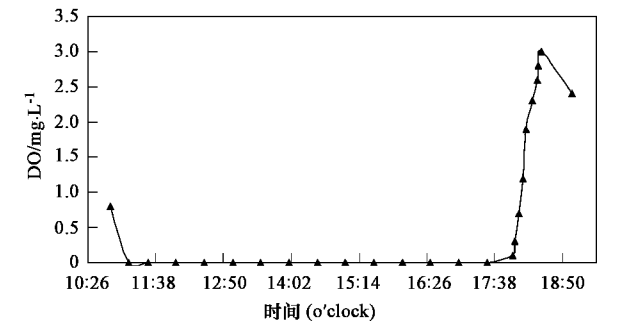


图 4 反硝化聚磷 SBR 系统反应液 DO 浓度动态变化
Fig.4 Characteristics of the dissolved oxygen(DO)in liquid phase in a denitrifying phosphorus-accumulating SBR system

在本研究中，活性污泥的污泥体积指数 SVI 为 60 左右，属于正常范围，在实验过程中并未出现污泥膨胀现象。长期运行后的效果还有待进一步的研究。

图 5 显示了微动力曝气 SBR 系统反应液相 pH 及 ORP 动态变化。在整个反应周期中，pH 和 ORP 的变化特性预示着系统的良好运行，反之也可为系统的优化运行控制提供指示。由图 5 可知：两步法废水输入后形成的厌氧期，ORP 和 pH 迅速下降有利于促进活性污泥磷素的释放、反应液相剩余 NO_3^- 的反硝化作用及有机质的进一步水解。与此同

时，当系统处于缺氧期时，ORP 水平短时间内迅速上升后经历了较为缓慢地增长，但最高 ORP 水平仍处于 -50 mV 以下，说明微动力曝气所提供的氧被功能菌迅速利用，完成缺氧聚磷，并能促进硝化作用的顺利进行(由图 4 也可以看出)。pH 的动态轨迹与 ORP 相似，但厌氧期内反硝化作用提高了 pH 水平，而活性污泥磷素释放与有机质水解作用等过程则降低 pH 水平；微动力曝气的缺氧期内，因曝气吹脱溢出 CO_2 能够首先提高反应液相的 pH 水平，随即 pH 下降说明硝化作用与生物聚磷作用增强，而后 pH 再度上升说明反应体系硝化作用与生物聚磷的作用趋于完成。

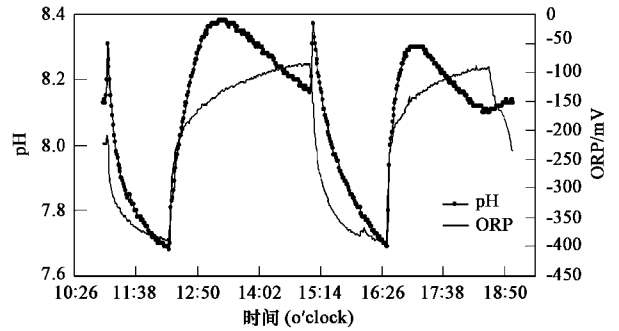


图 5 反硝化聚磷 SBR 系统反应液相 pH 及 ORP 动态变化
Fig.5 Characteristics of the pH and ORP in liquid phase in a denitrifying phosphorus-accumulating SBR system

2.3 SBR 处理效果改进的原因

就技术及工艺运行机制而论，在缺/微氧双循环条件下，系统筛选并增殖的功能菌反硝化聚磷菌具有利用硝酸盐(部分亚硝酸盐)而不是自由氧作为电子受体的独特功能，聚磷的同时进行硝酸盐的还原作用。提供反应系统曝气的同时通过 DO 的监控有效防止了自由氧的累积，保障缺氧条件的存在，使得同步脱氮除磷得以顺利进行。pH、ORP 和 DO 这 3 项关键参数的动态变化可以间接地揭示反硝化聚磷 SBR 系统运行状况及出水水质。据前人研究表明^[7]，在好氧阶段结束后外加碳源将重新引入新的缺氧段，如此可将 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氮素降解至 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，但是这增加了额外的开支。在此，笔者采用的两步进水法在第 2 个缺氧期进水，有机质(碳源)的引入使得反硝化的强度大大增加，同时降低了氧化还原电位，有效地去除尚未被还原的 NO_3^- ，降低了出水的 NO_3^- 浓度。此外，进水量控在总周期进水量的 1/4，额外污染物质的引入也可成功地在缺/微氧条件下得以去除。

实际条件下反硝化聚磷 SBR 与微动力曝气组

合技术运行效能及问题纠正可能与实验室模拟状态有些不同,因此有必要在浙江省畜禽养殖业发达地区(如义乌、嘉兴或杭州等)进行中试研究,以获取更为可靠的运行参数及问题诊断与纠正技术途径。

3 结论

(1)采用传统 SBR 工艺直接处理猪场废水,其处理效率较低,出水 TN 浓度为 $42.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率仅为 89.08%;TP 浓度为 $27.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 86.04%; BOD_5 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为 93.88%。高浓度 N、P 及有机质的排放严重威胁着水体安全。

(2)在废水输入两步法与双循环“厌氧-缺/微氧”运行模式下,反硝化聚磷 SBR 与微动力曝气组合技术可实现猪场废水 TN、TP、 BOD_5 去除率分别高达 93.95%、99.26%和 99.93%。由于其独特的工艺设计可使处理水 NO_3^- 浓度和输出负荷“双低”。

(3)应用微动力曝气 SBR 技术为反硝化聚磷菌的富集和稳定提供了良好的条件,大大降低了高曝气量的好氧环境对反硝化聚磷菌的冲击;同时通过反硝化聚磷菌的促进了同步脱氮除磷,节省了对碳源的需求。同时,微动力曝气还降低了能耗,减少了成本,为薄利的中小型畜禽养殖场废水处理效果差,处理成本高等问题提供了良好可行的解决方法。

(4)通过 ORP、pH 与 DO 关键参数的动态变化可以间接地揭示微动力曝气 SBR 技术运行状态及出水水质。同时可通过各参数曲线的比较,及时了解反应器的运行情况,进一步为系统的调整指明了方向。

参考文献:

- [1] 孙卫红. 新型 SBR 工艺及其在水处理中的应用[J]. 江苏环境科技, 2004, 17(4): 45-47.
- [2] 王闯, 杨海真, 顾国维. 改进型序批式反应器(MSBR)的试验研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(5): 41-43.
- [3] Cassidy D P, Belia E. Nitrogen and phosphorus removal from an abattoir wastewater in a SBR with aerobic granular sludge[J]. Water Res, 2005, 39(19): 4817-4823.
- [4] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms[J]. Water Res, 2006, 40(12): 2303-2310.
- [5] Zhu J, Zhang Z, Miller C. A Laboratory Scale Sequencing Batch Reactor with the Addition of Acetate to remove Nutrient and Organic Matter in Pig Slurry[J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(4): 437-446.
- [6] Zhang Z, Jun Z, Jennifer K, *et al.* A two-step fed SBR for treating swine manure[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(4): 892-900.
- [7] Obaja D, Mace S, Costa J, *et al.* Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(1): 7-14.
- [8] Tilche A, Bacilieri E, Bortone G, *et al.* Biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale sequencing batch reactor treating piggery wastewater[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(1): 199-206.
- [9] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 27(3): 191-196.
- [10] Sponza D T, Atalay H. Simultaneous phosphorus, nitrogen and dinitrotoluene removals in batch anaerobic/anoxic/aerobic sequential [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(1): 25-34.
- [11] Kreuk M K, Heijnen J J, Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 90(6): 761-769.
- [12] Third K A, Burnett N, Ruwisch C R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (phb) as the electron donor in an SBR [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 83(6): 706-720.
- [13] Kishida N, Kim J, Tsuneda S, *et al.* Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms[J]. Water Res, 2006, 40(12): 2303-2310.
- [14] Tsuneda S, Miyauchi R, Ohno T, *et al.* Characterization of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms in activated sludge based on nitrite reductase gene [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 99(4): 403-407.
- [15] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, 92(5): 442-446.
- [16] Meinhold J, Filipe C D M, Daigger G T, *et al.* Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(1): 31-42.
- [17] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. Water Res, 2001, 35(16): 3968-3976.
- [18] Ahn J, Daidou T, Tsuneda S, *et al.* Selection and dominance mechanisms of denitrifying phosphate-accumulating organisms in biological phosphate removal process[J]. Biotechnol Lett, 2001, 23(24): 2005-2008.
- [19] Falkenroth C M, Muller E, Amz P, *et al.* Population changes in a biofilm reactor for phosphorus removal as evidenced by the use of FISH [J]. Water Res, 2002, 2(3): 491-500.
- [20] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing

batch reactor[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **84**(2): 170-178.

[21] 袁林江, 张小玲, 韩玮, 等. 同步反硝化聚磷的试验研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 91-96.

[22] 高廷耀, 夏四清, 周增炎. 城市污水生物脱氮除磷工艺评述[J]. *环境科学*, 1999, **20**(1): 110-112.

[23] 赵耘攀, 刘振鸿. SBR32 艺脱氮除磷研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2002, **33**(4): 7-10.

[24] 国家环境保护总局. 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, 2002.

[25] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system[J]. *Water Res*, 2001, **35**(16): 3968-3976.

[26] Casellas M, Dagot C, Baudu M. Set up and assessment of a control strategy in a SBR in order to enhance nitrogen and phosphorus removal[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(9): 1994-2001.

[27] Guo J, Yang Q, Peng Y Z, *et al.* Biological nitrogen removal with real-time control using step-feed SBR technology[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **40**(6): 1564-1569.

[28] Li B, Irvin S. The comparison of alkalinity and ORP as indicators for nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor (SBR) [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **34**(3): 248-255.

[29] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹, 等. 以 DO、ORP、pH 控制 SBR 法的脱氮过程[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(4): 6-11.

[30] Hu L L, Wang J L, Wen X H, *et al.* Study on performance characteristics of SBR under limited dissolved oxygen [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(1): 293-296.

[31] Kim J H, Chen M X, Kishida N, *et al.* Integrated real-time control strategy for nitrogen removal in swine wastewater treatment using sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2004, **38**: 3340-3348.

[32] Wu C Y, Chen Z Q, Liu X H, *et al.* Nitrification-denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **36**(2): 87-92.

[33] Ra C S, Lo K V, Mavinic D S. Real-time control of two-stage sequencing batch reactor system for the treatment of animal wastewater [J]. *Environ Technol*, 1998, **19**: 343-356.