

添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能

邓良伟^{1,2}, 郑平^{1*}, 李淑兰², 孙欣², 汤玉珍²

(1. 浙江大学环境工程系, 杭州 310029; 2. 农业部成都沼气科学研究所, 成都 610041)

摘要:采用序批式反应器(SBR)工艺直接处理猪场废水厌氧消化液,处理系统的效率较低,COD去除率仅有10%左右, NH_4^+-N 去除率70%左右;处理出水水质较差,出水COD高于1000 mg/L,出水 NH_4^+-N 在200 mg/L左右;处理系统的工作不稳定,效能逐渐恶化.在猪场废水厌氧消化液中添加部分未经厌氧消化的猪场废水(原水),处理系统的处理效率明显提高,COD去除率高于80%,出水COD降到250~350 mg/L; NH_4^+-N 去除率高于99%,出水 NH_4^+-N 小于10 mg/L;处理系统的稳定性也得到增强.添加原水后,猪场废水厌氧消化液的 BOD_5/COD 比值从0.19上升到0.54, BOD_5/TN 比值从0.28上升到2.04,增加了微生物生长和反硝化所需的碳源,强化了反硝化作用,不仅提高了总氮去除效率,而且通过回补碱度,维持了处理系统的pH值稳定.

关键词:猪场废水;厌氧消化液;SBR;配原水;硝化;反硝化

中图分类号:X713 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)06-0105-05

Performance Improvement of Sequencing Batch Reactor (SBR) Treating Digested Piggery Wastewater by Addition of Raw Wastewater

DENG Liang-wei^{1,2}, ZHENG Ping¹, LI Shu-lan², SUN Xin¹, TANG Yu-zhen²

(1. Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Biogas Scientific Research Institute of the Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China)

Abstract: When digested piggery wastewater was directly treated with a sequencing batch reactor (SBR) process, the efficiency was low with COD removal about 10% and NH_4^+-N removal about 70%. The effluent COD concentration was higher than 1000 mg/L and effluent NH_4^+-N concentration was 200 mg/L or so. The working state of the reactor was unstable and its performance deteriorated gradually during operation. After adding no-digested piggery wastewater (raw wastewater) to digested piggery wastewater in the influent, the reactor performance was significantly improved with COD removal higher than 80% and NH_4^+-N removal up to 99%. The effluent COD concentration was in the range of 250 mg/L to 350 mg/L and effluent NH_4^+-N concentration was lower than 10 mg/L. The working stability of the reactor was greatly increased. After adding raw wastewater, the ratio of BOD_5 to COD in the influent was raised from 0.19 to 0.54, and the ratio of BOD_5 to TN was raised from 0.28 to 2.04, which implied an increase of carbon source for microbial growth and denitrification. The elevated denitrification resulting from the increase of carbon source not only promoted the removal of total nitrogen, but also stabilized the pH value by supplementing alkalinity to treatment system.

Key words: piggery wastewater; digested piggery wastewater; sequencing batch reactor (SBR); addition of raw wastewater; nitrification; denitrification

猪场废水是一种富含氨氮的高浓度有机废水,为了回收能源,通常采用厌氧消化进行前处理.厌氧出水(厌氧消化液)的有机污染物和氨氮(NH_4^+-N)含量较高,需要进一步处理.对于厌氧消化液的好氧后处理,采用的方法主要有活性污泥法、接触氧化法和氧化沟工艺等,处理效果均不理想,出水仍然不能达标^[1,2].近年来,SBR工艺被广泛应用于猪场废水的直接处理,对有机物、氮、磷都取得了良好地去除效果^[3~7].但由于猪场废水原水(以下简称“原水”)的污染物浓度很高,直接采用SBR工艺进行处理时,一般需对原水进行稀释或采用较长的水力停留

时间(HRT),两者都会加大反应器容积和供氧能耗.对原水进行稀释,还会增加因稀释水所致的成本.而将SBR工艺拓展至处理猪场废水厌氧消化液的试验结果和工程实效也不理想,TKN去除率为47.2%~64.6%^[8]; NH_4^+-N 去除率为68.7%^[9]和55%~57.3%^[10];TN去除率为58.5%~75%^[11].

笔者曾采用SBR工艺和水解-SBR工艺,对猪

收稿日期:2004-10-09;修订日期:2004-11-01

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(2002BA514A-1-2-4)

作者简介:邓良伟(1966~),四川安岳人,副研究员,博士研究生,主要从事废水处理研究和工程设计.

* 通讯联系人, Tel: 0571-86971709, E-mail: pzhang@zju.edu.cn

场废水进行处理试验,取得了较好地去除效果^[12,13].在此基础上,拟进一步进行 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液的试验,为猪场废水厌氧消化液的好氧后处理提供稳定、高效技术.

1 材料与方法

小试 SBR 装置(图 1)由不锈钢制成,长×宽×高=30cm×30cm×30cm,总容积 27L,工作容积 18L.曝气采用空压机,型号 ACO-001,空气流量 30L/min.布气采用石英砂头.进水、排水均采用潜水泵,型号 SP-1000.以时间控制器自动控制曝气、进水和排水.以人工虹吸抽排剩余污泥.反应温度 20~25℃,废水流量 4.5~6.0L/d,水力停留时间(HRT)3~4d.SBR 每 d 运行 3 个周期,8h 为 1 个周期,其中曝气 4.0h,沉淀 1.0h,排水 1.0h,进水 1.0h,闲置 1h.

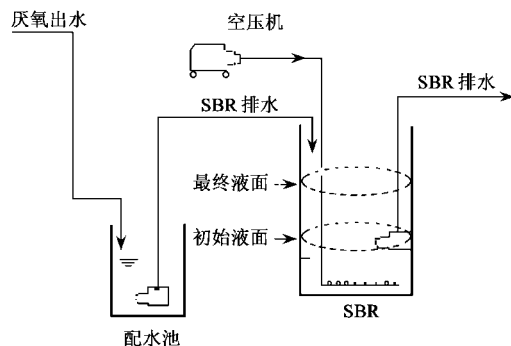


图 1 SBR 试验装置

Fig. 1 Schematic of the SBR system

SBR 装置的好氧接种污泥由实验室驯化而得,接种量为接种后 SV%在 40%~50%之间.

试验所用废水取自某养猪场,每 2d 取一次样.取回的废水先采用厌氧处理^[14],厌氧消化液再进行 SBR 好氧后处理.分析测试参照文献^[15].碱度:电位滴定法; NH_4^+-N :纳氏试剂比色法; NO_2^--N :N-(1-萘基)-乙二胺光度法; NO_3^--N :酚二磺酸比色法;COD:重铬酸钾法; BOD_5 :稀释接种法.

2 结果与讨论

2.1 SBR 工艺直接处理厌氧消化液

在采用 SBR 工艺直接处理厌氧消化液过程中,从外观看,曝气阶段泡沫很多,沉淀后反应器内上清液浑浊,呈黄色.从图 2 可知,在试验的前 10d,COD 去除效果尚可,去除率为 40%~60%,出水 COD 浓度在 400~600 mg/L 之间.随着试验的进行,出水

COD 浓度逐渐增加至 1 000 mg/L 以上,并有继续增加的趋势.至试验后期,COD 去除率降至 10%左右;在进水 COD 浓度较低的情况下,甚至出现 COD 去除率为负数的情况.

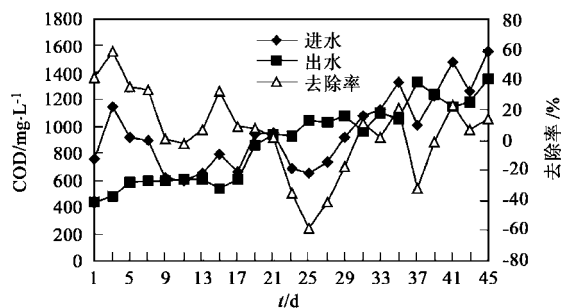


图 2 SBR 对厌氧消化液 COD 的去除

Fig. 2 COD removal from digested piggery wastewater by SBR

从图 3 可以看出,当 SBR 直接处理厌氧消化液时, NH_4^+-N 去除效果优于 COD 去除效果,去除率可达 70%以上,最高可达 95%.但 NH_4^+-N 去除率也呈下降趋势,在进水 NH_4^+-N 浓度相对稳定的情况下,出水 NH_4^+-N 浓度则持续升高.到试验后期, NH_4^+-N 去除率降至 70%左右,出水 NH_4^+-N 浓度升至 200 mg/L 左右.

上述试验与相关文献报道(COD 去除率 10%~20%, NH_4^+-N 去除率 50%~70%)相吻合^[8,10].

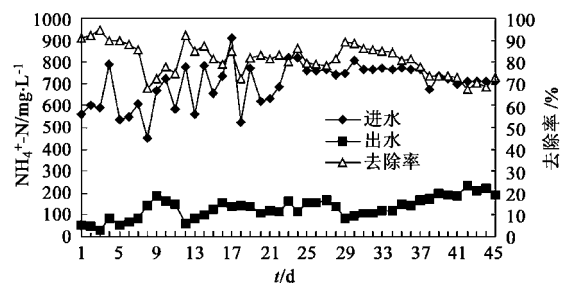


图 3 SBR 对厌氧消化液 NH_4^+-N 的去除

Fig. 3 NH_4^+-N removal from digested piggery wastewater by SBR

因采用 SBR 工艺直接处理厌氧消化液,有 COD 和 NH_4^+-N 去除效率低,反应器工作性能不稳定,处理出水不能满足国标 GB 18596-2001^[16]等问题,因此需研究并改进 SBR 处理厌氧消化液的性能.

2.2 添加原水后厌氧消化液的去除效果

经过多次试验,发现添加原水(原水与厌氧消化液比例大约 3:7)可以改善 SBR 处理厌氧消化液的性能,试验结果见图 4 和图 5.

图 4 显示了厌氧消化液添加原水后,SBR 对

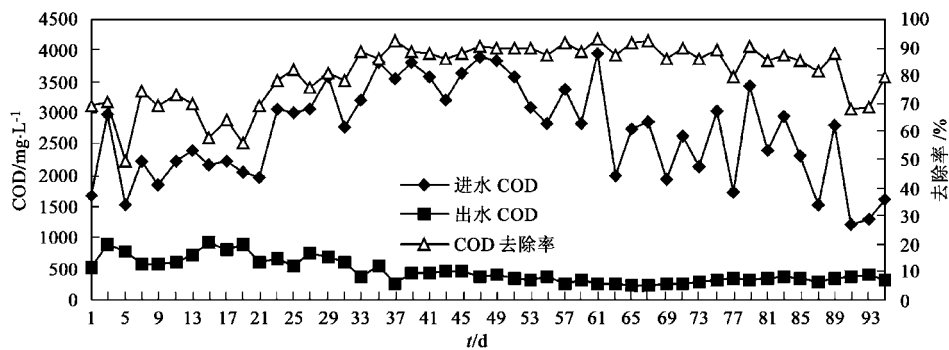


图 4 SBR 处理添加原水后厌氧消化液的 COD 去除率

Fig. 4 COD removal from digested piggy wastewater added raw wastewater by SBR

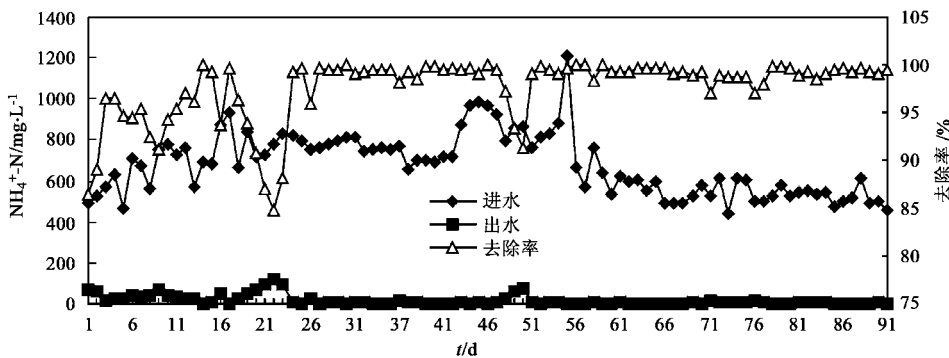


图 5 SBR 处理添加原水后厌氧消化液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率

Fig. 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal from digested piggy wastewater added raw wastewater by SBR

COD 的去除情况.与直接处理厌氧消化液相比,去除效率大大提高.第 1 个月,COD 去除率在 50 % ~ 80 % 之间,出水 COD 浓度为 500 ~ 1 000 mg/L.随着时间的推移,去除效果逐步改善.1 个半月后,COD 去除率高于 80 %,出水 COD 浓度一直稳定在 250 ~ 350 mg/L 之间,满足 GB 18596-2001.从外观上看,曝气过程泡沫少,沉淀后清液呈棕褐色,并且清澈透明.在闲置阶段,可见大量污泥上浮以及微小气泡逸出,说明反应器内存在强烈的反硝化作用.

图 5 显示了厌氧消化液添加原水后,SBR 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果.与直接处理厌氧消化液相比,去除效率显著提高.运行 1 个月后,SBR 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的处理效果稳定,去除效率高达 99 % 以上,出水低于 10 mg/L,显著优于 GB 18596-2001.即使在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高达 1 200 mg/L 的情况下,出水仍能达到很低浓度(<10 mg/L),说明反应器高效稳定.

表 1 添加原水前后厌氧消化液的部分理化特性

Table 1 Characteristics of digested piggy wastewater before and after adding raw wastewater

项目	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{BOD}_5/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD/ BOD_5	BOD_5/TN
原水	6 063	3 960	754	0.65	5.25
厌氧消化液	879	168	590	0.19	0.28
添加原水后的厌氧消化液	2 434	1 306	639	0.54	2.04

2.3 SBR 处理性能改进的原因

2.3.1 添加原水前后厌氧消化液的部分理化特性

添加原水前后,厌氧消化液的部分理化特性见表 1.从表 1 可知,厌氧进水 BOD_5/COD 比值为 0.65,可生化性很好;经过厌氧处理后,厌氧消化液 BOD_5/COD 降为 0.19,难以生化降解;添加原水后,厌氧消化液的 BOD_5/COD 由 0.19 提高到 0.54,显著改善了可生化性,为后处理中好氧微生物的生长提供了易降解的有机碳源.

在反硝化过程中,理论上将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 还原为 N_2 所需的 BOD_5/TN 为 1.71; NO_3^- 还原为 N_2 所需的 BOD_5/TN 为 2.86^[17].经过厌氧消化后,猪场废水的 BOD_5/TN 从 5.25 降到 0.28,远不能满足 SBR 工艺对易降解有机碳源的要求.添加原水后,厌氧消化液的 BOD_5/TN 由 0.28 提高到 2.04,基本上能满足反硝化对电子供体的需求,促进反硝化作用.

2.3.2 反硝化效果分析

将反硝化去除的 $\text{NO}_x^- \text{N}$ ($\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 之和) 占硝化产生的 $\text{NO}_x^- \text{N}$ 之比称为反硝化率, 以此

反映反硝化作用的强弱. 添加原水前后, 在一个 SBR 运行周期中测得的 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 见表 2. 在 SBR 直接处理猪场废水厌氧消化液的过程

表 2 添加原水前后 SBR 处理厌氧消化液的反硝化率

项目	厌氧消化液/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			添加原水后的厌氧消化液/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
	$\text{NO}_2^- \text{N}$	$\text{NO}_3^- \text{N}$	$\text{NO}_x^- \text{N}$	$\text{NO}_2^- \text{N}$	$\text{NO}_3^- \text{N}$	$\text{NO}_x^- \text{N}$
曝气开始	25.2	104.4	129.6	7.6	58.8	66.4
曝气结束	50.2	165.0	215.2	37.0	78.9	115.9
硝化产生量	25.0	60.6	85.6	29.4	20.1	49.5
闲置结束	37.6	133.4	171.0	8.0	36.1	44.1
闲置过程减少量	12.6	31.6	44.2	29.0	42.8	71.8
排水排出量	4.1	12.9	17.0	2.83	6.21	9.04
反硝化转化量	8.5	18.7	27.2	26.2	36.6	62.8
反硝化率/ %			31.8			127

中, 反硝化率仅为 31.8 %, 反硝化作用很不充分. 闲置阶段结束时, 反应液中仍残留相当数量的 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ (171 mg/L). 添加原水后, 反硝化率高达 127 %, 不仅将本运行周期硝化过程中产生的 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 全部去除, 也去除了上一周期残存的 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$. 至闲置阶段结束时, 反应液中只残留少量 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ (44.1 mg/L). 由此可见, 添加原水显著提高了处理系统的反硝化率, 而且也缓解了 $\text{NO}_2^- \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 对硝化和反硝化过程的抑制^[18].

2.3.3 添加原水前后 SBR 处理厌氧消化液的 pH 变化及碱度平衡

由跟踪监测结果(图 6)可知, 采用 SBR 处理添加原水后的厌氧消化液, 在整个曝气过程中 (0 ~ 4h), 硝化作用使 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 降低 88.4 mg/L , pH 从 7.84 缓慢降到 7.44, 降幅仅为 0.4. 采用 SBR 直接处理猪场废水厌氧消化液时, $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 降低 79.2 mg/L , pH 从 7.20 快速降到 6.04, 降幅高达 1.16. 这组实验结果说明, 采用 SBR 处理添加原水后的厌氧消化液可产生更多的碱度, 使反应液 pH 保持相对稳定.

在 SBR 直接处理猪场废水厌氧消化液时, 由于反硝化作用, 沉淀、排水、闲置阶段 (4 ~ 6h) 可使反应液 pH 升高至 7.15, 但仍低于反应周期的初始 pH. 添加原水后, pH 上升幅度增大, 至闲置阶段结束 (第 8h) 时, pH 升高到 8.10, 超过初始 pH (7.84). 一个周期结束时较高的反应液 pH, 为维持下一个周期反应液 pH 稳定 (高于 7.0) 打下基础.

理论上, 将 1g $\text{NO}_2^- \text{N}$ 转化为 N_2 可产生 3.57g 碱度 (以 CaCO_3 计)^[17]. 在猪场废水 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 浓度为 959 mg/L 的情况下, 测得的猪粪水和厌氧消化液的碱度列于表 3. 假定在硝化阶段有 99 % 的 $\text{NH}_4^+ \text{N}$

转化为 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 或 $\text{NO}_2^- \text{N}$, SBR 处理厌氧消化液的反硝化率按 31.8 % 计算, 处理添加原水后的厌氧消化液的反硝化率按 100 % 计算, 所得的碱度平衡结果见表 3.

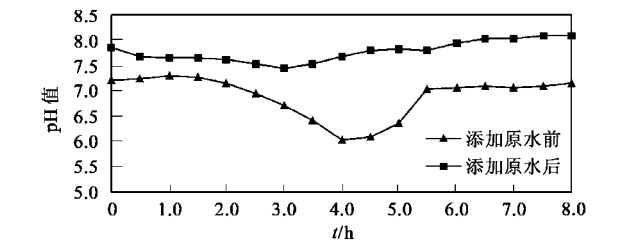


图 6 添加原水前后 SBR 处理厌氧消化液的 pH 周期变化
Fig. 6 Profiles of pH value in SBR treating digested piggery wastewater before and after adding raw wastewater

表 3 添加原水前后 SBR 处理厌氧消化液的碱度平衡¹⁾
Table 3 Alkalinity balance in SBR treating digested piggery wastewater before and after adding raw wastewater

项目	实测碱度 (以 CaCO_3 计) / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	碱度平衡 (以 CaCO_3 计) / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
猪场废水	3 134	
厌氧消化液	4 213	
添加原水厌氧消化液	3 889	
厌氧消化液出水		- 1 545
添加原水厌氧消化液出水	614	607

1) 猪场废水为 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 959 mg/L , 厌氧消化液 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 978 mg/L 时的测定值.

从表 3 计算结果可知, 以 SBR 直接处理厌氧消化液, 碱度缺少 - 1 545 mg/L ; 而以 SBR 处理添加原水后的厌氧消化液, 碱度剩余 607 mg/L . 计算结果与实测结果十分接近. 究其原因, 主要是添加原水后, 充分的反硝化作用补充了硝化作用消耗的碱度. 这也是 SBR 直接厌氧消化液时 pH 迅速降低, 处理添加原水后的厌氧消化液时 pH 能维持在 7.0 以上的重要原因. 说明添加原水可显著提高处理系统反

硝化率,不仅减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累计,使氮得以最终去除,更为重要的是维持了系统中 pH 的稳定,进而维持了处理系统性能的稳定.

在本研究的基础上,可建立“厌氧-加原水-间歇曝气(Anaerobic-adding raw wastewater intermittent aeration, Anarwia)”处理猪场废水工艺,即大部分猪场废水先进行厌氧消化,再与小部分未经厌氧消化的猪场废水混合,采用间歇曝气的序批式反应器(SBR)进行好氧后处理.该工艺不需添加外源有机物,也不需添加外源碱性物质.与厌氧-SBR 工艺相比,Anarwia 工艺出水水质明显改善.与 SBR 直接处理原水相比,Anarwia 工艺的投资和运行费用分别降低大约 10% 和 50%.基于以上优势,Anarwia 工艺也可推广应用于其它高氮高有机物浓度废水的处理.

3 结 论

(1) 采用 SBR 工艺直接处理猪场废水厌氧消化液,处理系统的效率较低,COD 去除率仅有 10% 左右, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率 70% 左右;处理出水水质较差,出水 COD 高于 1 000 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 200 mg/L 左右;处理系统的工作不稳定,效能逐渐恶化.

(2) 在厌氧消化液中添加部分原水,处理系统的处理效率明显提高,COD 去除率高于 80%,出水 COD 降到 250 ~ 350 mg/L; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率高于 99%,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 小于 10 mg/L;处理系统的稳定性也得到增强.

(3) 添加原水之所以能提高反应器效率并增加其工作稳定性,主要原因在于添加原水后,猪场废水厌氧消化液的 $\text{BOD}_5 / \text{COD}$ 比从 0.19 上升到 0.54, BOD_5 / TN 比从 0.28 上升到 2.04,增加了微生物生长和反硝化所需的碳源,强化了反硝化作用,不仅提高了总氮去除效率,而且通过回补碱度,维持了处理系统的 pH 值稳定.

参考文献:

[1] Su Jung-Jeng, Liu Yueh-Lin, Shu Fong-Jin, *et al.* Treatment of piggery wastewater by contact aeration treatment in coordination with the anaerobic fermentation of three-step piggery wastewater treatment (TPWT) process in Taiwan[J].

J. of Environ. Sci. Heal., A, 1997, 32(1): 55 ~ 73.

[2] 郑武,谢晓丽,陈仁中,等.广州市畜牧业废水排放与治理现状分析[J].农业环境与发展,1998, 15(2): 17 ~ 20.

[3] Lo K V, Liao P H, Van Kleek R J. A full-scale sequencing batch reactor treatment of dilute swine wastewater [J]. Can. Agri. Engng., 1991, 33: 193 ~ 195.

[4] Fernandes L, Mckyes E, *et al.* Treatment of liquid swine manure in the sequencing batch reactor under aerobic and anoxic condition [J]. Can. Agri. Engng., 1991, 33: 373 ~ 379.

[5] Bortone G, Gemelli S, Rambaldi A, Tilche A. Nitrification, denitrification and biological phosphate removal in sequencing batch reactors treating piggery wastewater [J]. Wat. Sci. Tech., 1992, 26(5-6), 977 ~ 985.

[6] Su Jung-Jeng, Kung Cheng-Ming, *et al.* Utilization of sequencing batch reactor for In situ piggery wastewater treatment [J]. J. Environ. Sci. Health. A, 1997, 32: 391 ~ 405.

[7] Edgerton B D, McNevin D, Wong C H, Menoud P, Barford J P, Mitchell C A. Strategies for dealing with piggery effluent in Australia: the sequencing batch reactor as a solution [J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 41(1): 123 ~ 126.

[8] Su Jung-Jeng, Lian Wen-Chyan, Wu Jih-Fang. Studies on Piggery wastewater treatment by a full-scale Sequencing Batch Reactor after anaerobic fermentation [J]. Chung-hua Nungxue Huibao, 1999, 188: 47 ~ 58.

[9] Ng W G. Aerobic treatment of piggery wastewater with the sequencing batch reactor [J]. Bio. Waste, 1987, 22: 285 ~ 294.

[10] 杨虹,李道棠,朱章玉,等.集约化养猪场冲栏水的达标处理[J].上海交通大学学报,2000, 34(4): 558 ~ 560.

[11] Bernet N, Delgenes N, Akunna C, *et al.* Anerobic-aerobic SBR for the treatment of piggery wastewater [J]. Wat. Res., 1999, 34(2): 611 ~ 619.

[12] 邓良伟,姚爱莉,梅自立.SBR 工艺处理猪场粪污的试验研究[J].中国沼气,2000, 18(1): 8 ~ 11.

[13] 邓良伟.水解-SBR 工艺处理规模化猪场粪污研究[J].中国给水排水,2001, 17(3): 8 ~ 11.

[14] 邓良伟,陈铭铭.IC 工艺处理猪场废水试验研究[J].中国沼气,2001, 19(2): 12 ~ 15.

[15] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法(第三版)[M].北京:中国环境科学出版社,1989. 238 ~ 239; 252 ~ 256; 260 ~ 263; 266 ~ 269; 345 ~ 356.

[16] GB 18596-2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S].

[17] 郑兴灿,李亚新.污水除磷脱氮技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1998. 51.

[18] Akunna J, Bizeau C, Moletta R. Denitrification in anaerobic digesters: possibilities and influence of wastewater $\text{COD} / \text{NO}_x^- - \text{N}$ ratio [J]. Environ. Technol., 1992, 13: 825 ~ 836.