

厌氧水解-SBR 工艺处理高浓度有机废水运行工序的优化

高峰¹, 杨朝晖¹, 曾光明¹, 陈军², 谢更新¹, 张薇¹

(1. 湖南大学环境科学与工程系, 长沙 410082; 2. 中山医科大学第一医院, 广州 510080)

摘要:将 ASBR 反应器和 SBR 反应器结合组成厌氧水解-SBR 工艺用于养猪场废水的处理, ASBR 反应器作为厌氧水解反应器, 主要完成对有机物的水解, 达到初步降解有机物的目的, 在反应器每次进水量和排水量不大于其有效容积 70 % 的前提下, 研究了 ASBR 反应器厌氧搅拌段的时间对污水可生化性和对后续 SBR 脱氮处理效果的影响. 结果表明, 厌氧搅拌 36 h 的污水既保持了较高的可生化性, 出水 BOD/COD 保持在 0.4 左右, 又能在后续 SBR 处理中取得较好的脱氮效果, 经 SBR 反应器处理后出水 $\text{NH}_4^+-\text{N} < 10 \text{ mg/L}$. 通过实验分析进一步确定了好氧 SBR 反应器运行的最佳工序, 厌氧水解-SBR 运行工序优化后, BOD₅ 的总去除率达到 98 % 以上, NH_4^+-N 去除率达到 99 % 以上, 但出水 COD_{Cr} 达不到排放标准, 经混凝沉淀处理后方能达标排放.

关键词:养猪场废水; 厌氧水解; SBR; 消化; 硝化反硝化

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)05-0084-05

Optimization of Piggery Wastewater Treatment with Combined Anaerobic Hydrolysis and SBR Process

GAO Feng¹, YANG Zhao-hui¹, ZENG Guang-ming¹, CHEN Jun², XIE Geng-xin¹, ZHANG Wei¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering of Hunan University, Changsha 410082, China; 2. The First Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Anaerobic sequence batch reactor and aerobic sequence batch reactor were combined to treat the piggery wastewater. The ASBR was used to digest the wastewater for primary organic matter removal. Influences of digestion time to the wastewater's BOD/COD and to the nitrogen removal in behind SBR were studied. The result indicated that the wastewater with 36 hours' digestion retained high BOD/COD ratio of about 0.4. The nitrogen removal efficiency of this kind of wastewater in behind SBR was high with the effluent NH_4^+-N concentration less than 10 mg/L and a removal ratio higher than 99 %. The total BOD₅ removal ratio of A/O SBR was higher than 98 % but the effluent COD_{Cr} concentration couldn't meet the discharging standard before coagulating sedimentation.

Key words: piggery wastewater; anaerobic hydrolysis; SBR; digest; nitrification/denitrification

目前国内外对规模化养猪场废水的处理虽然有很多研究^[1~4], 但既能有效去除有机物又能高效脱氮的工艺较少.

SBR 法因其工艺简单、操作灵活、耐冲击负荷和处理效果好等优点而在废水处理中被广泛应用, SBR 反应器分厌氧和好氧 2 种, 即 Anaerobic sequence batch reactor (ASBR) 和 Aerobic sequence batch reactor (SBR), ASBR 反应器应用于废水的厌氧水解处理具有工艺简单、操作灵活、基质降解速率高、污泥沉降性能好等优点^[5~7], 适宜于用作有机物含量极高的养猪场废水的厌氧生物处理, 但 ASBR 反应器不能完成废水的脱氮操作, 而好氧 SBR 活性污泥法能在同一反应器中创造出厌氧/好氧交替进行的环境, 完成有机物降解、脱氮、除磷等多种操作. 因此, 本研究将 ASBR 反应器和好氧 SBR 反应器结

合在一起组成厌氧水解-SBR 工艺, 并应用于规模化养猪场废水的处理.

1 实验材料和方法

1.1 废水水样

本次试验用水取自浏阳某养猪场, 该养猪场年产牲猪 4×10^4 头, 清粪工艺采用水冲式, 废水水质见表 1.

1.2 实验装置

本实验中所采用的 ASBR 反应器和 SBR 反应器均为有效容积 10 L 的圆柱形有机玻璃容器, 其中

收稿日期: 2003-11-03; 修订日期: 2003-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70171055)

作者简介: 高峰 (1979 ~), 男, 硕士研究生, 主要从事污水生物处理的研究.

ASBR 反应器为带搅拌装置的密闭容器,并置于恒温水浴锅中加热,温度控制在 35 ℃(中温)左右. SBR 反应器为一装备了时控器可控制曝气和搅拌自动交替进行的有机玻璃容器,并配备了温控仪和加热器将反应器中的水温控制在 20 ℃~25 ℃.

表 1 废水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 The quality of wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	含量	排放标准 ¹⁾
COD_{Cr}	10000~15000	400
BOD_5	4000~9000	150
NH_4^+-N	1000~1300	80
SS	5000~8000	200
pH	7.0~8.5	6~9

¹⁾ 牲畜养殖业污染物排放标准(GB 8596-2001)

1.3 实验方法

厌氧水解-SBR 工艺中 ASBR 反应器和 SBR 反应器以串联的方式连接,将取自养猪场的废水直接投加到 ASBR 反应器中消化,ASBR 反应器的出水作为 SBR 反应器的进水,ASBR 和 SBR 反应器的进出水均采用瞬时操作的进出水方式.实验中水质指标的测定均按国家标准方法进行^[8].

2 实验结果与讨论

2.1 ASBR 反应器的启动

为了缩短 ASBR 反应器启动的时间,将取自城市污水处理厂的消化污泥作为接种污泥投加到反应器中,并立即加入养猪场废水进行浸泡.污泥驯化阶段以出水 COD_{Cr} 去除率为控制指标改变反应器的进水量,当去除率达到 50 %并能稳定运行 10 d 后方加大反应器的进水量,此次污泥驯化共分 4 个阶段进行,进水量分别为反应器有效容积的 20 %、40 %、60 %和 70 %.最终反应器中 COD_{Cr} 有机负荷稳定在 $5\sim7\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, COD_{Cr} 去除率达到 50 %~70 %.

2.2 ASBR 反应器厌氧操作的优化

2.2.1 ASBR 反应器中厌氧消化时间对废水可生化性的影响

将 ASBR 反应器每次进水量稳定在反应器有效容积的 70 %基础上,研究了反应器中废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 随厌氧消化时间的变化,结果如图 1 所示.

由图 1 可见,ASBR 反应器中污水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 随厌氧消化的进行呈逐渐减小的趋势,厌氧开始时废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 为 0.55,可生化性较好,随着厌氧消化的进行由于废水中的微生物优先利用易生物降解的有机物,废水中 BOD_5 浓度下降的速

度快于 COD_{Cr} 浓度下降的速度,导致废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 逐渐下降.但在厌氧消化的第 12~36 h 期间,废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 下降的幅度则非常小,仅从 0.43 下降至 0.39,这是由于废水中的微生物在降解易生物降解有机物的同时也转化了部分难生物降解的有机物.随着厌氧消化的继续进行,废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 开始快速下降,当厌氧消化进行到第 60 h 和第 72 h 时,废水的 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 分别下降至 0.21 和 0.18.可见随着厌氧时间的延长,厌氧消化液的可生化性下降,同时由于厌氧处理不具备脱氮能力,厌氧消化在降解有机物的同时必然会降低废水的 COD/N ,这会影响后续好氧处理去除有机物和脱氮的效果.因此,对于有后续好氧处理的厌氧处理而言,厌氧消化对废水 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 造成的影响必须考虑.

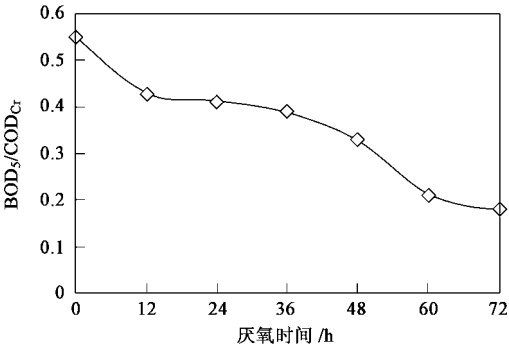


图 1 厌氧消化时间对废水可生化性的影响
Fig.1 Effect of digesting time on $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ of wastewater

2.2.2 ASBR 厌氧消化对后续 SBR 处理的影响

试验共分 4 套装置进行,ASBR 反应器厌氧搅拌的时间分别定为 12、36、48 和 72 h,每次的进水量都是 7 L,进水和出水都按瞬时操作的方式进行,沉淀时间定为 1 h,沉淀后的出水加入到 SBR 反应器中作进一步处理,SBR 反应器的运行周期定为 12 h,其中进水和沉淀排水阶段各为 1 h,SBR 处理试验的平均数据见表 2.

由表 2 可知,养猪场废水厌氧消化的程度对后续好氧处理去除有机物和脱氮都有很大影响.首先,后续 SBR 处理对有机物的去除效果随着废水厌氧消化程度的提高而呈下降趋势,厌氧消化 12 h 的废水在经过后续 SBR 处理后, COD_{Cr} 从 $8764.3\text{ mg}/\text{L}$ 下降到了 $825.7\text{ mg}/\text{L}$,去除率为 90.6 %,而经过厌氧消化 72 h 的废水虽然水中 COD_{Cr} 浓度下降到了 $2345.6\text{ mg}/\text{L}$,但经过后续 SBR 处理后出水 COD_{Cr} 浓度反而较高,达到 $1132.5\text{ mg}/\text{L}$,去除率仅为

51.7%,后续 SBR 处理 BOD_5 去除率的变化类似于 COD_{Cr} 去除率的变化.分析 COD_{Cr} 和 BOD_5 去除效果变化的原因,在厌氧消化过程中,废水中难生物降解有机物的降解较为困难,微生物优先利用易生物降解的有机物,这造成废水可生化性的下降.如图 1 中厌氧消化时间超过 36h 后,废水的 BOD_5/COD_{Cr} 下降较为明显,势必会影响后续好氧处理的效果.另一

方面,好氧处理中微生物的生长需要一定比例的营养元素,一般认为好氧生物处理较为合适的 $BOD_5:N:P$ 为 100:5:1,由于厌氧消化只能去除有机物而不具备脱氮的能力,厌氧消化的不断进行必然会导致废水 C/N 的下降,从而抑制了活性污泥中微生物的生长而导致系统有机物去除能力的下降.

其次,从表 2 中可以看出,就脱氮而言,最佳的

表 2 不同程度厌氧消化液的 SBR 处理结果/ $mg \cdot L^{-1}$
Table 2 The running result of SBR treating digest/ $mg \cdot L^{-1}$

指标	废水在投加到 SBR 反应器前在 ASBR 反应器中厌氧消化的时间/h											
	12			36			48			72		
	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %
COD_{Cr}	8764.3	825.7	90.6	4638.5	873.4	81.2	2749.7	1047.8	61.9	2345.6	1132.5	51.7
BOD_5	3673.5	69.2	98.1	1853.4	82.1	95.6	1015.2	118.3	88.3	483.6	137.4	71.6
NH_4^+-N	1224.6	17.2	98.6	1218.9	9.6	99.2	1229.7	226.5	81.6	1256.4	287.8	77.1
TN	1387.4	317.6	77.1	1345.3	275.7	79.5	1321.7	474.2	64.1	1306.8	568.3	56.5

厌氧消化时间为 36h,经后续 SBR 处理后出水 NH_4^+-N 和 TN 的浓度都达到最低.究其原因,废水的厌氧消化是一个降解有机物的过程,随着消化反应的进行,废水的 C/N 必然会逐渐降低,而 C/N 恰恰是生物脱氮过程中一个至关重要的因素,过低的 C/N 必然会阻碍反硝化过程,从而导致系统脱氮能力的低下.厌氧消化 12h 的废水不能在后续 SBR 处理中取得最好的脱氮效果是由于好氧处理中异养菌对硝化菌的竞争抑制作用所致.当进水有机物浓度高时,废水中的异养菌就会大量繁殖,并和硝化菌竞争底物和溶解氧,由于硝化菌产率低、比增长速率小,在和异养菌的竞争中处于劣势,生长和活性都受到抑制,从而导致系统脱氮能力的下降.由以上分析可见,将 ASBR 反应器中厌氧消化的时间定为 36h,既能充分利用厌氧消化承受负荷高、处理能耗低的优点,又能不影响到后续好氧处理,具有广泛的参考价值.

3 SBR 工序的优化

3.1 SBR 反应器运行方式的选择

SBR 反应器在废水处理中具有运行方式灵活多样的特点,可根据废水的水质和处理要求调整 SBR 的运行工艺,使 SBR 反应器发挥最大的性能.在本次试验中根据废水 NH_4^+-N 含量极高,达到 1000 mg/L 以上,而废水的 COD/NH_4^+-N 又相对较低(4~6)的特点,为了提高装置的反硝化能力,实现硝化和反硝化的和谐进行,将反应器的曝气分成 2

次进行,中间增设厌氧搅拌阶段,及时地反硝化一部分前期曝气所产生的 NO_3^--N ,为后续硝化反应减少阻力,同时也有利于 TN 的去除.

本实验研究了采用 12h 为一个周期前提下, SBR 反应器以 4 种不同运行工序(表 3)运行时的处理效果(表 4).

表 3 SBR 反应器的运行工序/h
Table 1 The working procedure of SBR/h

运行工序	进水搅拌	曝气	搅拌	曝气	沉淀排水
1	2	2	4	2	2
2	2	3	3	3	1
3	1	4	2	4	1
4	2	8			2

对比表 4 中的实验数据可以发现,在负荷相同情况下, SBR 反应器在工序 1、工序 2 和工序 3 条件下的运行效果明显好于工序 4 条件下的运行效果,可知以间歇曝气方式运行的 SBR 反应器相比于普通的 SBR 反应器更适合于养猪场高浓度有机废水的处理.同时,在工序 1、工序 2 和工序 3 中又以工序 3 的运行效果最好,有机物和氮的去除率都最高,表明工序 3 在时间顺序上适当的厌氧、好氧的比例关系为反应器中的微生物创造了良好的生长条件,有利于反应器中各种微生物在协同作用下完成对有机物和氮氮的降解.因此,将本工艺中 SBR 处理段反应器的运行方式确定为以间歇曝气方式运行中间增设厌氧搅拌段的运行方式,并在工序 3 基础上进一步研究了 SBR 的最佳运行工序.

表 4 SBR 反应器在各工序下的运行结果/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 4 The running results of SBR with different working procedure/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

工序	COD _{Cr}			BOD ₅			NH ₄ ⁺ -N			TN		
	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %	进水	出水	去除率/ %
1	4378.2	864.7	80.2	1751.3	64.8	96.3	1026.4	9.3	99.1	1184.7	225.2	81.0
2	4378.2	875.3	80.0	1751.3	67.1	96.2	1026.4	18.8	98.2	1184.7	243.4	79.5
3	4378.2	647.2	85.2	1751.3	57.2	96.7	1026.4	4.7	99.5	1184.7	214.8	81.9
4	4378.2	1273.9	70.9	1751.3	87.4	95.0	1026.4	37.5	96.3	1184.7	305.9	74.2

3.2 SBR 反应器的最佳运行工序

确定 SBR 反应器最佳运行参数的基本原则是：在确保出水 NH_4^+ -N 达到排放标准的前提下，尽量缩短水力停留时间及确定最优曝气量，同时尽可能地降低出水的 COD_{Cr} 浓度，以减轻对后续处理造成的压力。

3.2.1 进水方式和进水段时间的确定

SBR 工艺的进水可以按限制性曝气、非限制性曝气或半限制性曝气的方式进行，实验中考虑到反应器的有机负荷对生物降解有机物和脱氮的影响，反应器每次的进出水量一般都不超过反应器有效容积的 40%。因此，反应器中滞留了大量的 NO_x^- -N，虽然 SBR 反应器进水中 NO_x^- -N 的含量只有 5 ~ 15 mg/L ，但进水混合后反应器中 NO_x^- -N 的浓度仍达到 60 ~ 80 mg/L ，这部分 NO_x^- -N 如不有效去除，将引起系统中 NO_x^- -N 的积累，导致脱氮效率日趋下降。因此，去除废水中残留的 NO_x^- -N 成为进水阶段必须完成的首要任务。因此，选择进水阶段不曝气的限制性曝气进水方式。实验中考察了进水后反应器中 COD_{Cr} 和 NO_x^- -N 随厌氧时间的变化，具体情况如图 2 所示。

分，从图 2 可见，进水阶段进行到 30 min 时，废水中残留的 NO_x^- -N 浓度已经降到了约为 1 mg/L 的低水平，这一阶段废水中 COD_{Cr} 浓度的降低也主要集中在前 30 min，这与反硝化菌在还原 NO_x^- -N 过程中利用有机物为碳源降解有机物有关。此阶段有机物的降解除反硝化消耗碳源外还与微生物分解有机物和活性污泥的吸附作用有关，活性污泥能够吸附和凝聚水中的悬浮和胶体性有机物质，养猪场废水中含大量的悬浮和胶体性有机物质，活性污泥通过吸附凝聚不但减少了曝气阶段的有机负荷，还去除了一部分难生物降解的有机物。总之，从进水到开始曝气这段厌氧搅拌的时间，对于去除有机物和脱氮都非常重要，从系统运行的稳定性和运行的经济性方面考虑，进水段采用瞬时进水后闲置 40 min 的运行方式。

3.2.2 曝气段时间和曝气量的确定

曝气时间和曝气量的确定，是根据去除有机物和氨氮 2 个指标来控制。由表 4 的实验数据可知，在工艺 3 条件下，SBR 反应器曝气 8 h 后，出水 NH_4^+ -N < 10 mg/L ，同时对有机物的去除也较为彻底，出水 BOD₅ 小于 60 mg/L ，出水的 COD_{Cr} 较高是由养猪场废水中含有大量难生物降解的有机所致，再继续曝气也不能进一步降低出水的 COD_{Cr} 浓度。实验中，在 8 h 的曝气时间里 DO 浓度保持在 2 mg/L 左右，就能达到很好地去去除有机物和脱氮的效果。

3.2.3 沉淀排水时间的确定

由于在 SBR 处理系统中，进水、反应和沉淀是在同一装置中进行，因此，确定一个合理的沉淀时间显得尤为重要，沉淀时间过短，出水中含有大量未沉淀的悬浮物而影响出水水质，沉淀时间过长则会发生污泥上浮现象。另外，该阶段的厌氧环境为生物反硝化提供了可能条件，但由于废水中可用作反硝化碳源的有机物已降解完全，反硝化菌主要利用体内的有机物作碳源进行内源反硝化。由于内源反硝化的速度很慢，且实验中观察到该阶段 NO_x^- -N 浓度的变化甚微，因此，主要从污泥的沉降性能来确定沉

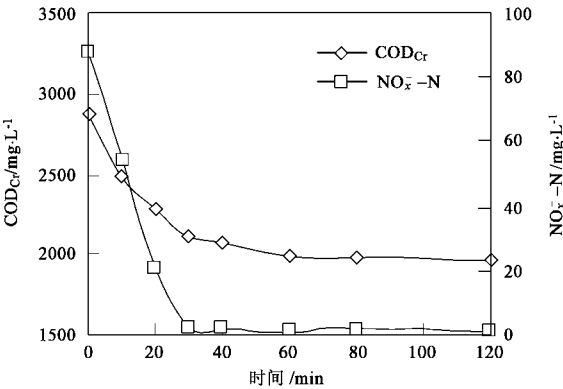


图 2 进水阶段 COD_{Cr} 和 NO_x^- -N 随时间的变化

Fig.2 The changes of COD_{Cr} and NO_x^- -N concentration in different time at the filling stage

由于进水中可用于反硝化碳源的有机物较充

淀段的时间.污泥沉降过程中泥水界面高度和排水口出水中悬浮固体浓度随沉降时间的变化如图 3.

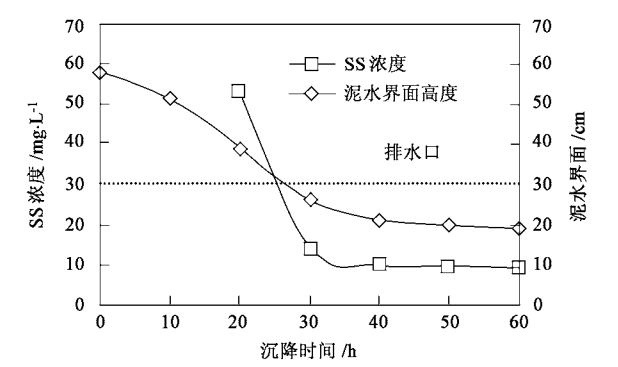


图 3 SS 浓度和泥水界面高度随沉降时间的变化
Fig.3 The changes of SS concentration and sludge water interface in different time at the setting stage

由图 3 可见,当沉淀进行到 30 min 时,泥水界面下降至排水口以下,此时出水中的 SS 浓度从大于 50 mg/L 下降至小于 15 mg/L,之后,出水中 SS 浓度的变化逐渐较少,当沉降时间大于 40 min 后,出水的 SS 浓度趋于稳定.从系统的稳定运行即保证出水水质方面考虑,SBR 反应器的沉淀时间定为 40 min.

4 厌氧水解-SBR 出水后处理

采用试验确定的最优厌氧水解-SBR 工序处理养猪场废水实现了有机物和氨氮的同时高效去除,对 NH₄⁺-N 的去除率达到 99% 以上,出水 NH₄⁺-N 小于 10 mg/L,对 BOD₅ 的去除率也达到 98% 以上,但出水 COD_{Cr} 浓度达不到排放标准(表 5).

表 5 运行工艺的处理结果/ mg·L ⁻¹				
Table 5 The running result of the process/ mg·L ⁻¹				
指标	进水	SBR 出水	水解-SBR 处理去除率/ %	混凝出水
COD _{Cr}	10000 ~ 15000	600 ~ 800	90 ~ 96	70 ~ 100
BOD ₅	4000 ~ 9000	60 ~ 75	98 ~ 99.5	3.5 ~ 10
NH ₄ ⁺ -N	1000 ~ 1300	<10	>99	<10

因此,本试验考虑通过添加混凝剂聚合硫酸铁来改善出水水质,并通过实验确定了聚铁溶液的最佳用量和混合液最佳的 pH 值,向 1 L SBR 反应器出水中投加 4 mL 含铁量为 100g/L 的聚铁溶液,并将混合液的 pH 调至 5 左右,混凝处理后出水 COD_{Cr} 浓度小于 100 mg/L,完全达到排放要求.

5 结论

(1)采用厌氧水解-SBR 工艺处理有机物和氨氮

含量极高的养猪场废水,ASBR 反应器最佳的厌氧搅拌时间为 36h,在去除大部分有机物的同时出水保持了较好的可生化性,BOD₅/COD_{Cr} 维持在 0.4 左右.既能充分利用厌氧消化承受负荷高,处理能耗低的优点,又不影响后续好氧处理.

(2) SBR 反应器以间歇曝气的方式运行效果较好,最佳的操作条件为:限制性曝气进水 40 min,DO 浓度保持在 2 mg/L 以上分 2 次曝气 8h,沉淀排水 40 min.

(3)采用优化工序后的厌氧水解-SBR 工艺处理养猪场废水取得了很好的处理效果,经处理后出水 NH₄⁺-N 小于 10 mg/L,对 BOD₅ 的去除率也达到 98% 以上,但出水 COD_{Cr} 浓度达不到排放标准,经混凝沉淀处理后方能达标排放.

参考文献:

[1] 于金莲,阎宁. 牲畜养殖废水处理方法探讨[J]. 给水排水, 2000,26(9) :44 ~ 46 .
[2] Bernet N, *et al.* Combined Anaerobic-aerobic SBR for the Treatment of Piggery Wastewater[J]. Wat. Res., 2000, 34 (2) :611 ~ 618 .
[3] Eum Y, Choi E. Optimization of Nitrogen Removal from Piggery Waste by Nitrite Nitrification[J]. Wat. Sci. Tech., 2002, 45(12) :89 ~ 96 .
[4] Jern N W. Aerobic Treatment of Piggery Wastewater with the Sequencing Batch Reactor[J]. Biol. Wastes, 1987, 22 : 285 ~ 294 .
[5] Sung S, R R Dague. Laboratory Studies on the Anaerobic Sequencing Batch Reactor[J]. Water Environment Research, 1995, May/ June :294 ~ 301 .
[6] Zhang R H, Yin Y, Sung S, *et al.* Anaerobic Treatment of Swine Waste by the Anaerobic Sequence Batch Reactor[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3) : 761 ~ 767 .
[7] 傅大放,等. 厌氧序批式活性污泥工艺(ASBR)特性研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(10) :1 ~ 4 .
[8] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989 .
[9] 张希衡. 水污染控制工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993 .
[10] Chie-Chien Tseng, Thomas G. Porter. Effect of Influent Chemical Oxygen Demand to Nitrogen Ratio on a Partial Nitrification/complete Denitrification Process [J]. Wat. Res., 1998, 32 (1) :165 ~ 173 .
[11] Hirous Itokawa, *et al.* Nitrous Oxide Production in High-loading Biological Nitrogen Removal Process under Low COD/ N Ratio Condition[J]. Wat. Res., 2001, 35(3) :657 ~ 664 .
[12] Camilia Grunditz, Gunnel Dalhammar. Development of Nitrification Inhibition Assays Using Pure Cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter[J]. Wat. Res., 2001, 35(2) :433 ~ 440 .