

A SBR-SBR 组合反应器用于高浓度有机污水的处理

李秀金

董仁杰

(北京化工大学环境工程系) (中国农业大学水利与土木工程学院)

摘要 把 Anaerobic Sequencing Batch Reactor (A SBR) 和 Aerobic Sequencing Batch Reactor (SBR) 连接在一起构成 A SBR-SBR 组合反应器系统, 用于牛场高浓度有机污水的处理。A SBR 作为预处理反应器主要用于去除有机物, SBR 用于生物脱氮处理。通过试验确定 A SBR 的最佳有机负荷率(以 COD 质量浓度计)为 $3 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 在此负荷率下处理后的污水在 SBR 中进一步处理。对硝化和反硝化分别与同时进行 A SBR-SBR 系统的污水处理性能进行了试验研究。发现, 当硝化在反应器中进行, 反硝化在自然条件下的出水混合液和上清液中进行时, 混合液中 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 在 3 周之内即被全部转化, 上清液中反硝化反应相对较慢; 要通过同时的硝化与反硝化高效地去除污水中的氨氮, 则需要添加适量碳元素, 并实行分段进水。

关键词 牛场污水; 处理; A SBR; SBR

中图分类号 X 505

Aerobic Treatment of Concentrated Cattle Wastewater With Anaerobic Sequencing Batch Reactor (A SBR) Combining With Aerobic Sequencing Batch Reactor (SBR)

Li Xiujin¹, Dong Renjie²

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract An Anaerobic Sequencing Batch Reactor (A SBR) was combined with an Aerobic Sequencing Batch Reactor (SBR) for treating concentrated cattle wastewater, A SBR was used as the first step for pretreatment, while SBR as the second reactor for further treatment. The loading rate of $3 \text{ g COD} (\text{L} \cdot \text{day})^{-1}$ was found to be the best one for A SBR and used for generating influence for the SBR. The performance of A SBR-SBR system was investigated when nitrification and denitrification occurred separately or simultaneously. It was found that in the natural condition, $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ could be denitrified completely in the total effluent (including both supernatant and sludge) in 3 Weeks, and the denitrification was relatively slow and incomplete in the effluent supernatant. A certain amount of additional carbon source needs to be added and the influent fed at different segments in order to achieve significant denitrification.

Key words cattle wastewater; treatment; A SBR; SBR

收稿日期: 2001-11-04

李秀金, 北京化工大学环境工程系 107 信箱, 100029

董仁杰, 北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区) 184 信箱, 100083

近年来,我国的养牛业有了较大的发展,养牛场的规模也在不断地扩大。大规模养牛场每天要产生大量的粪便和污水,对环境造成了比较严重的污染,因此,迫切需要有效的方法进行处理。

序批式反应器作为污水处理的一种方法近年来受到了比较广泛的关注。序批式反应器是现行的活性污泥法的一种变型,它的生物反应机理和传统的活性污泥法基本相同,仅是运行操作工艺和过程不同^[1,2]。序批式反应器有厌氧和好氧 2 种,即 Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) 和 Aerobic Sequencing Batch Reactor (SBR)。目前,对 SBR 的研究较多,但对 ASBR 的研究相对较少。ASBR 于 1992 年由美国阿阿华州立大学研究成功,但投入实用的时间相对较晚^[3-5]。由于奶牛场污水的有机物含量较高,因此需要使用 ASBR 作预处理。但厌氧消化并不能去除污水中高浓度的氨氮,氨氮的去除需要通过好氧处理。SBR 反应器的一个独特的优点是可在同一反应器内实现有机物的氧化、脱氮、除磷等多种功能^[6]。基于此,提出了把厌氧 ASBR 和好氧 SBR 结合到一起的思路,通过 ASBR 与 SBR 组合系统的处理达到高效去除有机物和氨氮的双重目的。处理后的污水一部分用于农田灌溉,一部分循环到养殖舍作为粪便和地板的冲洗水。这样既可避免牛场污水对环境的污染,又可节约水资源。

1 材料与方法

1.1 污水来源

试验用污水取自某牛场。由于牛场污水中污染物的浓度是变化的,为便于研究,试验用污水中 COD 的质量浓度 $\rho(\text{COD})$ 皆调整为 $20\,000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,污水的特性见表 1。

1.2 试验装置

ASBR 试验装置由进料罐、进出料泵、混合气泵、ASBR 反应器、气体计量计等组成。ASBR-SBR 组合反应器污水处理系统(简称 ASBR-SBR 系统)则由 ASBR 试验装置外加一个 SBR 反应器和相应的附件组成(图 1)。ASBR 作为预处理反应器,其出水作为 SBR 的进水被泵入 SBR 做进一步的处理。

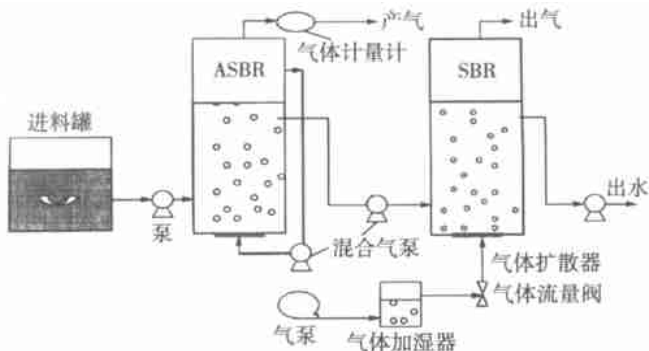


图 1 ASBR-SBR 组合反应器污水处理试验装置

1.3 试验方案

首先对单级 ASBR 的性能进行试验,研究有机负荷率对产气率和污染物去除率的影响,以确定 ASBR 的最佳有机负荷率。测试了有机负荷率为 $2, 3, 4\text{g}(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 时 ASBR 的污水处理效果。ASBR 的运行参数为:进水 5 min,反应 10 h 50 min,沉淀 1 h,出水 5 min;一个周期的运行时间为 12 h。在反应期间,每隔 1 h 通过混合气泵把反应器顶部的气体抽到底部 1 次(2

m in), 气体通过安装在底部的气体扩散器扩散到水中形成气泡, 气泡在由底部上浮过程中搅动污泥和水, 使污泥与水得到充分的接触, 以利于微生物的消化。试验结果显示, 有机负荷率为 $3 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时, A SBR 的产气率和污染物去除率最高, 故使 A SBR 在此负荷率下运行。随后把 SBR 与 A SBR 连接到一起组成 A SBR-SBR 系统。对 A SBR-SBR 系统, 着重研究硝化和反硝化分别和同时进行系统的污水处理性能。SBR 的具体运行参数依试验内容的不同而不同。

1.4 测试参数

测试的参数包括产气率、化学需氧量(COD)、总固体(TS)、挥发性固体(VS)、凯氏氮(TKN)、总氮(TN)、氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_x\text{-N}$, 含 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$)和pH等。COD, TS, VS和TKN的质量浓度根据APHA(1995)标准方法测定^[7]; pH用Accumet pH计测定; $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的质量浓度用HACH公司DR2000分光光度计测定^[8]。文中所有数据皆为3次测试结果的平均值。

2 结果与讨论

2.1 ASBR 的处理性能

污水中有机负荷率对A SBR处理性能的影响见表1。可以看出, 当有机负荷率由 $2 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 增加到 $3 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 各污染物的去除率有所变化, 但变化不大, 说明这2种有机负荷率对A SBR污染物去除性能的影响并无明显区别; 但后者的产气率为 $0.97 \text{ L}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 明显高于前者的 $0.60 \text{ L}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。当有机负荷率增加到 $4 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 产气率和污染物去除率都明显降低, 说明此时有机负荷率已经过高, A SBR反应器已不能在给定时间里消化如此量的有机物。由于有机负荷率为 $3 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时与 $2 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时A SBR的污染物去除率相近, 而 $3 \text{ g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时的有机物处理能力和产气率都较高, 因此, 确定该值为A SBR的最佳有机负荷率。在随后的试验中, A SBR一直使用该有机负荷率。

表1 有机负荷率对ASBR处理性能的影响

检测项目	$\rho_i/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	有机负荷率/ $[\text{g}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$					
		2		3		4	
		$\rho_o/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%	$\rho_o/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%	$\rho_o/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%
COD	20 000	12 290	38.6	12 240	38.8	15 200	24.0
TS	12 642	9 312	26.3	9 178	27.4	11 403	9.8
VS	9 916	7 228	27.1	6 898	30.4	8 129	18.0
TN	1 238	1 148	7.3	1 165	5.9	1 175	5.1
TKN	1 238	1 148	7.3	1 165	5.9	1 175	5.1
$\text{NH}_3\text{-N}$	640	700	- 9.4	690	- 7.8	680	- 6.3
pH	7.3	7.4		7.4		7.5	
产气率/ $[\text{L}(\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$		0.60		0.97		0.79	

注: ρ_i , ρ_o 分别为进水和出水中检测物的质量浓度, 有机负荷率以COD质量浓度计; 全文同。

2.2 ASBR-SBR 系统的处理性能

当 A SBR 与 SBR 组合后,硝化与反硝化过程即可以在 SBR 反应器中同时进行,也可分别进行。硝化与反硝化分别进行时,硝化在反应器中进行,反硝化在反应器外如贮粪池中进行。硝化与反硝化分离有利于提高硝化转化效率,且由于养殖场一般都有现成的贮粪池,因此无需额外的投入。

2.2.1 硝化与反硝化分别进行

足够的碳元素和缺氧是反硝化反应的 2 个必要条件,缺一不可。硝化与反硝化分别进行时,在 1 个循环周期内(12 h),实行 10.5 h 连续曝气,最后 1.5 h 为静置期(供气停止)。此时 COD, TS, VS, TN, TKN 的去除率分别达 90.2%, 72.2%, 79.3%, 41.8% 和 86.7%, 有 92.7% 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 通过硝化转化成 $\text{NO}_x\text{-N}$, 但出水中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的质量浓度达 $555 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2)。这说明 A SBR-SBR 系统在该运行条件下可获得较好的有机物和总固体的去除效果,硝化转化效率也较高,但无明显的反硝化反应发生。

表 2 硝化与反硝化分别进行时 ASBR-SBR 系统的处理性能

检测项目	A SBR		SBR	
	$\rho_i/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_o/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_o/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	污染物去除率/%
COD	20 000	12 240	1 970	90.2
TS	12 642	9 178	3 516	72.2
VS	9 916	6 898	2 053	79.3
TN	1 238	1 165	720	41.8
TKN	1 238	1 165	165	86.7
$\text{HN}_3\text{-N}$	640	690	47	92.7
$\text{NO}_2\text{-N}$	0	0	239	
$\text{NO}_3\text{-N}$	0	0	316	
pH	7.3	7.4	6.3	

注: ρ_o 为 SBR 出水口检测物的质量浓度。

为模拟自然条件下贮粪池中反硝化反应的情况,取出水上清液和混合液(包括上清液和污泥)各 3 L, 分别放到 2 个 5 L 的容器中静置。每隔一定时间取样分析,测定 $\text{NO}_x\text{-N}$ 质量浓度的变化,结果见图 2。

混合液中反硝化反应速率较快, $\text{NO}_x\text{-N}$ 在 3 周之内即全部转化。在上清液中,前 6 周内反硝化反应速率相对较快, 75% 的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 在此期间被转化,但之后反硝化转化速率明显变慢, 4 个月后,仍有约 18% 的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 残留在上清液中。其原因是混合液中含有污泥,可提供足够的反硝化反应需要的碳元素,而上清液中可利用

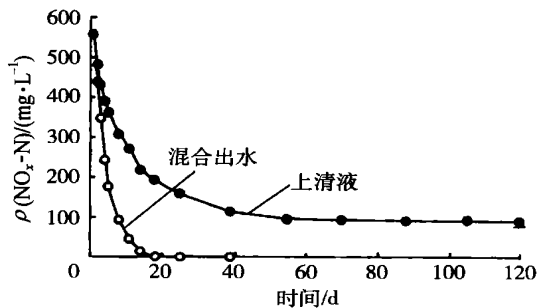


图 2 模拟自然条件下反硝化反应的试验结果

的碳元素含量较少,抑制了反硝化菌的活动。但是,随着混合液中反硝化反应的进行和污泥的消化,液体变得浑浊,所以,利用混合液进行反硝化除氮是不适宜的。随着反硝化反应的进行,上清液的水质并未发生明显的变化。因此,一个可行的方法是,将A SBR-SBR系统的出水先经沉淀分离,上清液排入贮粪池中暂存并进行自然反硝化。大部分(3/4) $\text{NO}_x^- \text{N}$ 在45 d左右就可完全转化,若要完全去除硝态氮,则需添加碳元素。经自然反硝化后,碳元素的需求量会显著减少。

2.2.2 硝化与反硝化同时进行

为在SBR中同时实现硝化与反硝化,改变了SBR的曝气方式,采用间歇曝气,设置了曝气段与缺氧段。其中曝气段用于硝化反应,缺氧段用于反硝化反应。1.5 h的缺氧段与2 h的曝气段交替进行,一个周期内曝气和缺氧时间皆为6 h,进、出水各1次,无额外添加碳元素。此时A SBR-SBR系统的污水处理效果与硝化和反硝化分别进行时基本相同(表3)。除了有机物和

表3 硝化和反硝化同时进行时A SBR-SBR系统的处理性能

检测项目	A SBR		SBR					
	$\rho_i/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho_o/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1次进水		多次分段进水			
			无碳元素添加		无碳元素添加		添加碳元素	
			$\rho_o/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%	$\rho_o/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%	$\rho_o/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	污染物去 除率/%
COD	20 000	12 240	1 920	90.4	2 172	89.1	2 154	89.2
TS	12 642	9 178	3 752	70.3	3 852	69.5	3 802	69.9
VS	9 916	6 898	2 010	79.7	2 110	78.7	2 210	77.7
TN	1 238	1 165	672	45.7	494	60.1	172	86.1
TKN	1 238	1 165	150	87.9	128	89.7	135	89.1
$\text{NH}_3\text{-N}$	640	690	35	94.5	0	100	0	100
$\text{NO}_2\text{-N}$	0	0	354		146		15	
$\text{NO}_3\text{-N}$	0	0	168		220		22	
pH	7.3	7.4	6.4		7.6		8.1	

总固体去除效果较好外,氨氮的硝化转化效率也很高(94.5%),但反硝化效果不如期望的理想,出水中 $\text{NO}_x^- \text{N}$ 的质量浓度仍高达 $522\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经分析认为是1次进水引起的。由于进水只有1次,进水中容易消化的有机物(反硝化菌碳元素)在第1个缺氧段(停气)和第1个曝气段即已被消耗待尽,使得后面3个缺氧段已无足够容易消化的有机物可被利用,因而抑制了反硝化菌的活动。基于此,对SBR的运行参数进行了重新设计(图3),其目的是通过多次分段进

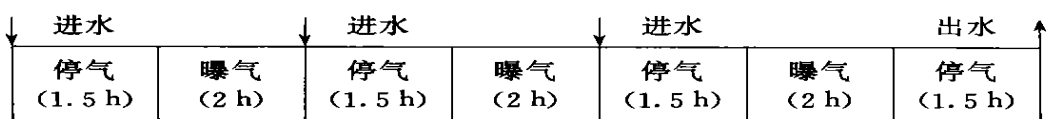


图3 多次分段进水时SBR的运行方式

水为各缺氧段的反硝化反应提供所需要的碳元素。结果显示,这种方法可使反硝化程度有所提高,出水中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的质量浓度降低到 $366\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但反硝化反应并不完全。综合上述结果分析发现,碳元素是抑制反硝化反应的主要原因。尽管SBR中含有足够多的有机物,但大多是相对较难消化的,容易消化的有机物在A SBR中已被基本消化,使得SBR中无足够的碳元素供反硝化菌利用。因此,要想通过反硝化反应完全脱氮,则需要添加碳元素。其他的研究者在研究厌氧和好氧2级反应器用于其他污水处理时也发现过同样的问题^[9]。

由于原污水中含有大量的可溶性有机物SCOD,SCOD大多是容易生物降解的,因此,选择原污水作添加碳源。原污水静置1昼夜后,取上清液并测其 $\rho(\text{COD})$ (其中主要是SCOD),将上清液稀释至 $\rho(\text{COD})$ 与SBR进水中相同,然后按SBR进水体积的15%加入SBR进水中。该添加量事先通过小型试验确定,是保证完全反硝化所需的最小添加量。这时SBR的运行方式与不加碳元素时完全一样(图3)。该运行方式下出水中 $\text{NO}_x\text{-N}$ 的质量浓度由原来的 $366\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $37\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明碳元素的添加取得了较好的效果,并且硝化效果好,氨氮得到了完全的转化。同时还可看到,改变进水次数和添加碳元素对污染物去除率并无明显的影响(表3)。这是因为改变进水次数并没有改变总有机负荷率,而添加碳元素虽提高了有机负荷率,但添加的是容易消化的SCOD,所以对污染物去除率的影响不大。

3 结 论

1) 在A SBR-SBR系统中,A SBR作为预处理反应器主要用于去除有机物,SBR用于通过硝化与反硝化反应进行生物脱氮,并可进一步去除有机物。A SBR的最佳有机负荷率为 $3\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$,在此负荷率下可获得较高的产气率和污染物去除率。

2) 当硝化与反硝化分别进行时,硝化在SBR中进行,反硝化在自然条件下的出水混合液或上清液中进行。上清液中的反硝化反应主要发生在前6周,75%的硝态氮在此间得到了转化,反硝化反应对上清液的水质无明显影响。因此,若对脱氮的要求不高,利用上清液在贮粪池内进行自然反硝化是可行的,反硝化不宜在混合液中进行。

3) 当硝化与反硝化的同时进行,进水方式和添加适量的碳元素对A SBR-SBR系统的有机物、总固体去除率和硝化效果无明显影响,但对反硝化反应有不同程度的影响。与1次进水相比,多次分段进水可提高反硝化效果,但提高的幅度不大。可利用碳元素的不足是抑制SBR中反硝化反应的主要原因,要通过反硝化反应完全脱氮,则需要添加碳元素。在SBR的进水中添加体积为进水的15%的原污水上清液(两者 $\rho(\text{COD})$ 相同),分3次进水,可实现氨氮的完全硝化和几乎完全的反硝化转换,并可获得较高的有机物、总固体去除率。

参 考 文 献

- 1 Zhang R H, Li Xiujin. Treatment of dairy wastewater with sequencing batch reactor systems. In: A SAE Proceedings of the 1999 A SAE Annual International Meeting Toronto, Canada 1999, Paper No. 994069
- 2 Irvine R, Busch A W. Sequencing batch biological reactors: An overview. J Water Pollution Control Fed, 1979, 51(2): 35~ 243
- 3 Dague R R, Pidaparti S R. Anaerobic sequencing batch reactor treatment of swine wastes. In: Purdue

- University. Proceedings of the 46th Purdue Industrial Waste Conference. Chelsea, Michigan, U.S.A. 1992, 751~ 760
- 4 Haberl R, Atanasoff K, Braun R. Anaerobic-aerobic treatment of organic high strength industrial wastewater. *Wat Sci Tech*, 1991, 23: 1909~ 1918
 - 5 Zhang R H, Yin Y, Sung S, et al. Anaerobic treatment of swine waste by the anaerobic sequencing batch reactor. *Transactions of the ASAE*, 1997, 40(3): 761~ 767
 - 6 Bicudo J R, Classen J J, Goldsmith C, et al. Reduction of nutrients and odor in swine manure with sequencing batch treatment and intermittent aeration. In: *ASAE Proceedings of the 1999 ASAE annual international meeting*. Toronto, Canada. 1999, Paper No. 994049
 - 7 APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed. American Public Health Association, Washington D. C., 1998
 - 8 HACH. HACH Water Analysis Handbook (2nd ed). Colorado, U.S.A.: HACH Company, 1992
 - 9 Haberl R, Atanasoff K, Braun R. Anaerobic-aerobic treatment of organic high strength industrial wastewater. *Wat Sci Tech*, 1991, 23: 1909~ 1918