

# 序批式生物膜反应器去除猪场 厌氧消化液中的总磷

万金保<sup>1,2</sup> 何华燕<sup>1\*</sup> 邓香平<sup>1</sup> 吴永明<sup>1,3</sup>

(1. 南昌大学环境与化学工程学院,南昌 330031;

2. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室,南昌 330047;

3. 江西省科学院能源研究所,南昌 330029)

**摘 要** 针对猪场废水的危害和难处理性分析了温度、氨氮和 COD 对序批式生物膜反应器(SBBR)处理猪场厌氧消化液的除磷效果的影响。实验结果表明,(1)一定温度范围内温度升高不利于 SBBR 对厌氧消化液的除磷作用;(2)随着进水厌氧消化液氨氮浓度的增加,SBBR 对总磷的去除效率从刚开始 93.5% 降到 38.1%,氨氮浓度的升高不利于总磷的去除;(3)过量的碳源会导致反应器除磷效果下降,进水 COD 浓度宜在 800~900 mg/L。

**关键词** 序批式生物膜反应器 猪场废水 除磷 影响

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2011)05-1047-04

## Total phosphorus removal in swine's anaerobic digestion by sequencing batch biofilm reactor

Wan Jinbao<sup>1,2</sup> He Huayan<sup>1</sup> Deng Xiangping<sup>1</sup> Wu Yongming<sup>1,3</sup>

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Environmental and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3. Research Institute of Energy Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract** With the hazard and intractability of swine wastewater, it was analyzed that the temperature, ammonia nitrogen and COD impact on the SBBR phosphorus removal of swine's anaerobic digestion. The results showed that: (1) in a certain range of temperatures, the higher of the temperature, the lower of phosphorus removal; (2) with the increase of the influent ammonia nitrogen concentration in anaerobic digestion, the rate of phosphorus removal reduced from 93.5% to 38.1%, so the increase of ammonia nitrogen concentration would result in the decrease of pH value, which was detrimental to the removal phosphorus; (3) an excessive amount of carbon source would decrease the efficiency of phosphorus removal, so the appropriate influent COD concentration arranged from 800 mg/L to 900 mg/L.

**Key words** SBBR; swine wastewater; phosphorus removal; effect

2007 和 2008 年鄱阳湖营养状况都为中营养,水质都为Ⅳ类,主要受总磷、总氮污染,但是营养状态指数则由 2007 年的 45 上升至 49.4,富营养化趋势明显。据第一次污染源普查,我国的主要污染源为农业污染源,其排放的总磷占总量的 66.1%,总氮占总量的 57.2%,而畜禽养殖业又是农业污染源的主要贡献者,总磷排放量占农业源的 57.6%。鄱阳湖生态经济区内万头养猪场数量众多,这对鄱阳湖的水质保护构成了严峻挑战。猪场废水属高浓度有机畜禽养殖废水,人们往往先对其进行厌氧消化处理(前处理)以回收甲烷,但前处理产生的厌氧消

化液中氨氮和总磷等污染物含量仍然较高,不能直接排放,需要进一步处理(后处理)。国内外对厌氧消化液的后处理进行了大量的研究,Ng Wun Jen 等<sup>[1-5]</sup>采用传统好氧的后处理工艺,其处理效果均不佳,尤其是氨氮难以达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB18596-2001)。邓良伟等<sup>[6-9]</sup>分别采用添

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAB23C02);  
科技部农业科技成果转化基金项目(2006GB2C500156)

收稿日期:2010-03-29; 修订日期:2010-05-28

作者简介:万金保(1952~),男,教授,主要从事水污染控制及资源化技术的研究工作。E-mail: jbw@ncu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: ziyanyy@163.com

加未消化的原水、MBR、MBBR、生态系统等新型后处理工艺,氨氮的去除率得到了明显的提升,但是总磷的去除问题均未涉及或存在超标现象。众多研究都把厌氧消化液的难处理归结于厌氧消化液 C/N 比和 C/P 比失调。

序批式生物膜法(sequencing biofilm batch reactor,SBBR)在 20 世纪的 80 年代末开始得到研究,它是在生物反应动力学原理基础上,综合考虑水力学机理而开发出来的一种具有占地面积小、运行灵活和稳定性好等诸多特点的废水处理新工艺,尤其适合于水质水量波动大,含特殊难降解、易挥发的有毒有机污染物及要求脱氮除磷的废水处理<sup>[10-12]</sup>。但是 SBBR 在处理猪场厌氧消化液(废水碳、氮、磷比值不合理的情况下)的除磷规律研究国内目前尚少。

1 材料与方法

1.1 厌氧消化液水质

实验采取南昌市某养猪场废水,取回的废水沉淀后经厌氧反应器处理得猪场废水厌氧消化液,水质如表 1。

表 1 猪场废水水质  
Table 1 Quality of swine wastewater

| 序号 | 项目        | 原水            | 消化液         |
|----|-----------|---------------|-------------|
| 1  | COD(mg/L) | 2 000 ~ 6 000 | 800 ~ 1 000 |
| 2  | 氨氮(mg/L)  | 400 ~ 1 400   | 400 ~ 1 400 |
| 3  | 总磷(mg/L)  | 50 ~ 120      | 10 ~ 50     |
| 4  | pH        | 6.8 ~ 8.3     | 7.2 ~ 8.6   |

1.2 实验装置

如图 1 所示,实验装置由 SBBR、PLC 自动控制系统、空气泵、转子流量计和微孔橡胶曝气头等组成。SBBR 为有机玻璃制成的长方体(长 300 mm ×

宽 200 mm × 高 800 mm),有效容积为 42 L,反应器内填料为组合填料,其挂膜装填密度为 30%。

1.3 实验运行方式

实验逐步添加猪场原水稀释液并采用闷曝气加间歇曝气来培养驯化生物膜,当驯化过程的 COD、氨氮、总磷的去除率分别达到:85%、90% 和 87%,表明已驯化成熟<sup>[13]</sup>。SBBR 运行步序为:进水(0.25 h)→厌氧(3 h)→好氧(7 h)→沉淀(0.5 h)→排水(0.25 h)→闲置(1 h),一天 2 个周期,一个周期进水 1 次,每次换水比为 25%(即进水约 13 L),好氧曝气量为 0.140 m<sup>3</sup>/h,排泥时间为 7 d。温度影响实验进水为添加原水的厌氧消化液,氨氮和 COD 影响实验进水则只是厌氧消化液。

1.4 分析方法

COD:重铬酸钾消解测定法;氨氮:纳氏试剂分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:酚二磺酸分光光度法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:N-(1-萘基)-乙二胺二盐酸分光光度法;总氮:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;总磷:钼锑抗分光光度法;pH:雷磁精密数显酸度计。

2 分析与讨论

2.1 温度对除磷效果的影响

一般认为在一定温度范围内聚磷菌(PAO)吸磷与释磷速率均随温度的升高而增大,如朱怀兰等<sup>[14]</sup>在序批式反应器(SBR)中对污泥厌氧放磷速率进行研究,在 17 ~ 37 ℃ 范围内温度每增加 10 ℃,释磷速率增加一倍左右。但是也有资料认为,PAO 是嗜冷细菌,除磷速率在一定范围内随温度增加而降低。Panswad 等<sup>[15]</sup>发现温度从 20 ℃ 变到 35 ℃ 过程中,由于聚糖菌(GAO)所占的比例增加而 PAO 的减少,放磷速率不断增加,但吸磷速率不断减少,总的除磷速率不断降低。越来越多的研究发现低温对于促进实验室内 PAO 的除磷效果有很好的作用<sup>[16]</sup>。

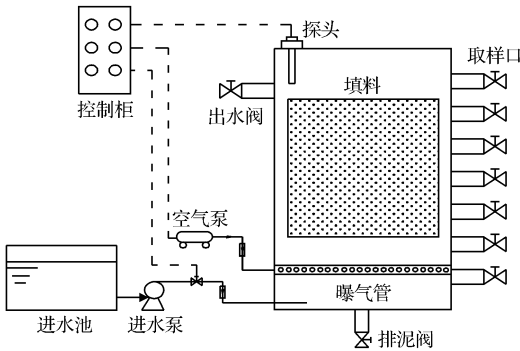


图 1 SBBR 实验装置图  
Fig.1 Schematic diagram of SBBR

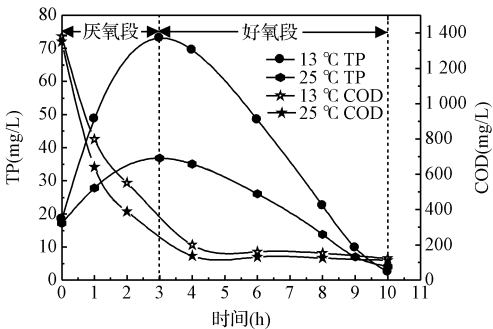


图 2 水温对总磷和 COD 去除的影响  
Fig.2 Effect of water temperature on TP and COD removal

实验对比了冬天和夏天温度对稳定运行 30 d 后 SBBR 上清液中总磷变化的影响。从图 2 的 COD 变化曲线可知,夏天实验温度更高,曲线斜率绝对值增大,单位时间 COD 去除率增大,在此温度范围内 SBBR 中生物膜活性随温度上升而增强,这在厌氧段表现的尤为突出。但从总磷变化曲线上,随着温度的上升曲线斜率绝对值减小。即无论是厌氧段的释磷量和释磷率,还是好氧段的吸磷量和吸磷率在 25 ℃ 的水平都远低于 13 ℃。13 ℃ 时 SBBR 整个周期总磷去除率为 86.4%,而 25 ℃ 时仅为 76%。实验并未出现释磷率随温度的增加而增加的现象,表明 SBBR 处理添加原水的厌氧消化液的低温优势除了 PAO 属嗜冷细菌这一因素外,很可能是因为在此温度范围内,温度升高诱导 GAO 成为生物膜中的优势功能菌<sup>[17]</sup>。

2.2 进水氨氮对除磷效果的影响

反应器的同步脱氮除磷成为众多研究的热点和难点,尤其在碳源不充足的污水处理方面。传统同步脱氮除磷工艺下,厌氧段硝态氮介入,过量曝气和 GAO 的竞争对 PAO 的除磷效能都有消极影响。近来发现的一种 PAO 可以利用硝态氮作为电子受体而不是氧进行缺氧吸磷-反硝化聚磷菌,一定程度上缓解了厌氧段硝氮介入的影响,但已有报道称混合液中的高浓度的亚硝态氮会抑制缺氧磷吸收<sup>[18]</sup>。

为分析进水厌氧消化液氨氮浓度对 SBBR 除磷的影响,实验用水先将厌氧消化液氨氮稀释至 100 mg/L,然后再加入 NH<sub>4</sub>Cl 调节而成。由图 3 的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 曲线可以看出,随着氨氮负荷的提高,出水硝态氮的浓度也增加,即硝化作用也随之加强,导致实验经测定系统内的 pH 低于 6。在总磷去除率曲线上,随着氨氮浓度的增加,总磷的去除效率直线下降,从刚开始 93.5% 降到 38.1%。由此可见,进水氨氮的浓度对 SBBR 总磷的去除有很大的

影响,分析其影响途径有 2 条:一是高氨氮进水易诱发强硝化作用,从而消耗了系统内的大量碱度,导致 pH 降低的很大,酸性条件会促进磷的厌氧释放,当 pH 值低于 5.2 时会出现大量而快速的磷释放,这是一种无效释放,是细胞在酸性条件下自溶,磷酸钙、磷酸镁等磷酸盐在酸性条件下溶解的结果,这时释磷并不能在随后的好氧区吸收,属于磷的无效释放,从而导致磷的去除率低;二是通过大量硝酸盐氮的产生使反硝化菌大量繁殖并优先利用有机基质从而抑制 PAO 的厌氧磷释作用,导致总磷去除率下降。

2.3 进水 COD 浓度对除磷效果的影响

由 2.2 分析可知,SBBR 直接处理厌氧消化液,生物膜中的 PAO 在厌氧段同样难以和反硝化菌竞争碳源,脱氮和除磷很难达到两全。

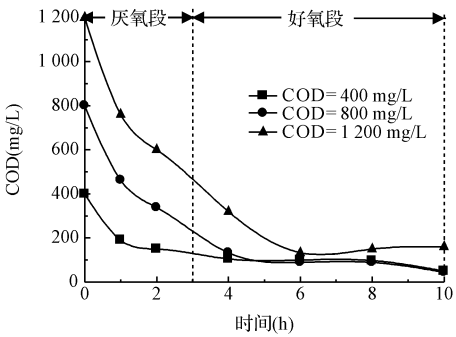


图 4 不同进水对 COD 去除的影响

Fig. 4 Effect of different inflows on COD removal

为探讨适合猪场废水厌氧消化液除磷的 COD 浓度,实验用水先将猪场废水厌氧消化液稀释 10 倍,然后再加入葡萄糖调节而成。在图 4 的 COD 曲线上可以看出各曲线厌氧段的高位下行速率基本一致,进水 COD 浓度的提高对 SBBR 有机物降解速率影响不大,这说明 SBBR 对有机负荷冲击的良好抵抗力。但是图 5 中总磷在不同的进水 COD 浓度下变化曲线差异较大,当 COD 进水从 400 mg/L 左右增加到 900 mg/L 左右时,释磷量从 17.6 mg/L 增加到 22.6 mg/L。但再继续增加进水 COD 浓度,释磷量减少,在进水 COD 为 1 200 mg/L 左右时,磷的释放量为 16 mg/L。这一现象说明过量的碳源并不能被 PAO 利用,因为 PAO 一个循环中聚集的多聚磷酸盐颗粒是有限的,能够释放的磷也是有限的,因此在释放磷过程中产生的能量也是有限的,过量的碳源并不能被 PAO 所利用。事实上,过量的碳源还可能诱发其他的不依靠磷代谢的其他异养菌,如诱发 GAO 的快速增长<sup>[19]</sup>。

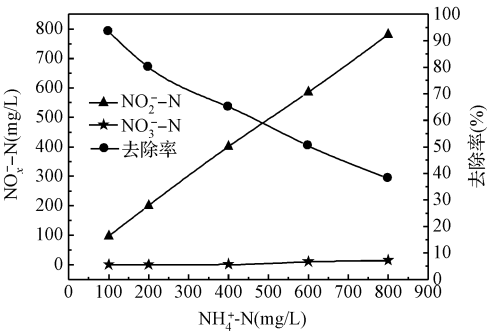


图 3 进水氨氮对总磷去除的影响

Fig. 3 Effect of inflow ammonia on TP removal

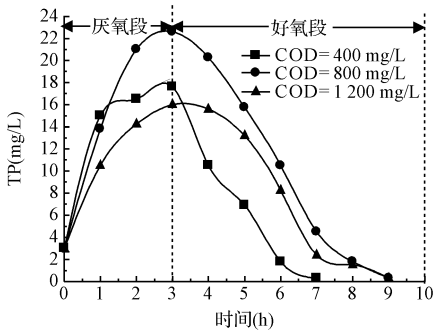


图 5 进水 COD 对总磷去除的影响

Fig. 5 Effect of inflow COD on TP removal

综上所述,在考虑 SBBR 对厌氧消化液除磷效率上可以酌量减少进水 COD 浓度,维持在 800 ~ 900 mg/L 左右为宜。

### 3 结 论

(1)在实验温度范围 13 ~ 25 °C 内,低温 SBBR 处理厌氧消化液除磷效果更强,一定温度范围内温度升高不利于 SBBR 对厌氧消化液的除磷作用。

(2)随着进水厌氧消化液氨氮浓度的增加,SB-  
BR 对总磷的去除效率直线下降,从刚开始 93.5% 降到 38.1%,氨氮浓度的升高不利于总磷的去除。

(3)过量的碳源并不能被聚磷菌所利用还会诱发其他异养菌导致反应器除磷效果下降。考虑 SB-  
BR 对厌氧消化液的除磷效率,进水 COD 浓度宜在 800 ~ 900 mg/L 左右。

### 参 考 文 献

[1] Ng Wun Jen. Aerobic treatment of piggery wastewater with the sequencing batch reactor. *Biological Wastes*,**1987**, 22 (4):285-294

[2] Jung-Jeng Su, Cheng-Ming Kung, Jing Lin, *et al.* Utilization of sequencing batch reactor for in situ piggery wastewater treatment. *Journal of Environmental Science and Health*,**1997**,32A(2):391- 405

[3] Chung-Min Liao, Takaaki Maekawa. Nitrification/ denitrification in an intermittent aeration process for swine wastewater. *Journal of Environmental Science and Health*,**1994**, 29B(5): 1053-1078

[4] 徐洪泉,杨可俊,刘膺虎,等.集约化猪场粪便污水沼气发酵综合处理系统的生产试验. *中国沼气*,**1991**,9(3): 26-29

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

[6] 邓良伟,蔡昌达,陈铭铭,等.猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用. *农业工程学报*,**2002**,18(3): 92-94

[7] 孟海玲,董红敏,黄宏坤.膜生物反应器用于猪场污水深度处理试验. *农业环境科学学报*,**2007**,26(4):1277-1281

[8] 曹玉成,张妙仙,单胜道. MBBR 处理猪场废水厌氧消化液的研究. *环境工程学报*,**2008**, 2(5):591-594

[9] 王翠霞,贾仁安.猪场废水厌氧消化液的污染治理工程研究. *江西农业大学学报*,**2007**,29(3): 437-442

[10] 王亚宜,李探微,韦甦,等.序批式生物膜技术(SBBR)的应用及其发展. *浙江工业大学学报*,**2006**,34(2): 213-219

[11] Peter A. Wildere, Robert L. Irvine, Mervyn C. Goron-  
szy. *Sequencing Batch Reactor Technology*. London:  
IWA Publishing, **2001**. 26-33

[12] 万金保,邓香平,吴永明. SBBR 工艺研究进展. *工业水处理*,**2008**,28(9):5-9

[13] 万金保,邓香平,王敬斌,等. SBBR 挂膜前活性污泥培养与驯化的研究. *环境工程学报*,**2009**, 3(2):246-248

[14] 朱怀兰,史家梁,徐亚同. SBR 除磷工艺的研究. *上海环境科学*,**1993**,12(8):8-13

[15] Thongchai Panswad, Apiradee Dounghchai, Jin Anotai. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system. *Water Reserch*,**2003**,37(2):409-415

[16] Whang L. M. , Park J. K. Competition between polyphos-  
phate and glycogen accumulating organisms in biological  
phosphorus removal systems effect of temperature. *Water  
Science and Technology*,**2002**,46(1-2):191-194

[17] Erdal U. G. , Erdal Z. K. , Randall C. W. The competi-  
tion between PAOs (phosphorus accumulating organisms)  
and GAOs (glycogen accumulating organisms) in EBPR  
(enhanced biological phosphorus removal) systems at dif-  
ferent temperatures and the effects on system performance.  
*Water Science and Technology*,**2003**,47(11):1-8

[18] 黄荣新,李冬,张杰,等.电子受体亚硝酸氮在反硝化除  
磷过程中的作用. *环境科学学报*,**2007**, 27(7):1141-  
1144

[19] Wen-Tso Liu, Takashi Mino, Kazunori Nakamura, *et al.*  
Glycogen accumulating population and its anaerobic sub-  
strate uptake in anaerobic-aerobic activated sludge without  
biological phosphorus removal. *Water Research*, **1996**,30  
(1):75-82