

# 浸没式膜生物反应器处理猪场污水运行参数优化

姚惠娇, 董红敏, 陶秀萍<sup>\*</sup>, 尚 斌, 刘 杨

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

**摘 要:** 污水处理是目前猪场废弃物污染防治的难题, 结合猪场污水原水可生化性较好的特点, 作者开展了浸没式膜生物反应器 (MBR) 处理猪场污水运行参数优化试验研究。试验选择 3 种溶解氧质量浓度 (DO: <1.5、1.5~3.0 和 >3.0 mg/L)、3 种水力停留时间 (HRT: 0.75、1.5 和 3.0 d) 和 3 种回流比 (200%、300% 和 400%), 根据正交试验设计形成 9 个处理组, 分 3 批在河南省某人工干清粪猪场进行试验, 每批试验运行 50 d (20 d 驯化期+30 d 试验期)。MBR 有效容积 30 L, 自动进水和出水, 污泥停留时间控制在 25~30 d, 反应器内水温控制在 (20±5)℃, 调节 pH 值为 7~8。结果表明, 当膜生物反应器进水化学需氧量 (COD)、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 质量浓度分别为 (3 277±1 192)、(203.8±51.2)、(361.0±133.3) 和 (65.0±23.1) mg/L 时, 出水的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 质量浓度分别为 (202±201)、(56.6±54.0)、(91.6±69.1) 和 (19.2±10.0) mg/L, 对应的去除率分别为 94.3%±5.8%、70.0%±27.2%、70.7%±20.7% 和 68.3%±17.4%。MBR 在去除污染物的同时, 对污水中粪大肠菌群具有较好的去除作用, 去除率达到 99.9%±0.08%, 试验中 86.4% 的 MBR 出水粪大肠菌群数能达到国家标准的卫生学指标要求。通过正交试验的极差分析发现运行参数对 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果的影响顺序为 DO>HRT>回流比, 对 TP 去除效果影响的顺序为 HRT>DO>回流比, 并优化出 MBR 最佳运行参数为 DO 1.5~3.0 mg/L、HRT 3.0 d 和回流比 300%, 对应试验中的处理 4, 其出水的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 质量浓度分别为 (69.3±48.7)、(10.0±8.2) 和 (14.0±9.9) mg/L, 相应的去除率分别为 97.8%±1.5%、93.8%±5.0% 和 81.5%±14.2%。MBR 出水可采用紫外线杀菌, 杀菌后出水可望回用于圈舍冲洗以减少猪场生产的水资源消耗。

**关键词:** 污水; 膜; 生物反应器; 溶解氧; 水力停留时间; 回流比; 猪场; 效果

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.031

中图分类号: X713

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0223-08

姚惠娇, 董红敏, 陶秀萍, 尚 斌, 刘 杨. 浸没式膜生物反应器处理猪场污水运行参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 223—230. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.031 <http://www.tcsae.org>  
Yao Huijiao, Dong Hongmin, Tao Xiuping, Shang Bin, Liu Yang. Operation parameter optimization of wastewater from swine farms using submerged membrane bioreactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 223—230. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.031 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

膜生物反应器 (MBR) 是一种由膜分离与生物处理相结合的新型污水处理技术, 有浸没式、分离式和隔离式 3 种形式。MBR 处理污水不仅出水水质好、运行稳定, 而且能有效去除微生物、病毒等病原微生物<sup>[1]</sup>。浸没式膜生物反应器因其较高的混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、更好的处理效率及不易堵塞等优点, 过去 20 a 间在城市和工业污水处理中得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。近年来, MBR 的应用扩展到绿化浇灌、车辆冲洗、生活、消防等污水处理<sup>[5-6]</sup>。

MBR 在养殖污水处理方面的报道相对较少, 国外研究了 MBR 对经稀释猪场污水的处理效果及其出水回用<sup>[7]</sup>,

Kornboonraksa 等<sup>[8]</sup>探讨化学沉淀与膜生物反应器组合工艺的猪场污水处理效果。但国内关于 MBR 处理猪场污水的研究集中于对厌氧发酵出水 (即沼液) 的处理, 孟海玲等<sup>[9]</sup>采用间歇曝气膜生物反应器处理猪场厌氧消化液, 发现厌氧发酵出水的化学需氧量/总氮 (C/N) 比值较低 (1.5~4.5), 可生化性较差, 不利于后续的 MBR 处理; 但猪场厌氧消化液经氨吹脱后进入 MBR 能达到较好的处理效果<sup>[10]</sup>。邓良伟等<sup>[11]</sup>的研究发现, C/N 比为 1.5 的厌氧发酵液中添加猪场污水原水后可使 C/N 比值升高至 3.8, 能有效提高后续序批式活性污泥法的生化处理效果。鉴于猪场污水具有较好的可生化性, 如果直接进行 MBR 处理, 不仅可节省沼气工程的投资, 也可简化猪场污水处理工艺, 但尚未见相关的研究报道。

本试验采用人工干清粪猪场的污水, 探讨浸没式膜生物反应器处理猪场污水的可行性并对其运行参数进行优化, 为猪场污水处理提供新的思路和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 膜生物反应器

膜生物反应器 (MBR) 的池体由有机玻璃制成

收稿日期: 2014-10-08 修订日期: 2015-04-01

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201303091)

作者简介: 姚惠娇, 女, 河北石家庄人, 主要从事养殖废弃物处理方面的研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。

Email: yaohuijiao@163.com。

※通信作者: 陶秀萍, 女, 湖北武汉人, 博士, 研究员, 主要从事畜禽养殖环境控制与废弃物处理研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: taoxp@ieda.org.cn

(见图 1)，长×宽×高=460 mm×280 mm×700 mm，总体积 90 L，有效容积 30 L。为了防止低温对试验的影响，冬春两季试验过程中采用加热棒对反应器进行加热，将水温控制在(20±5)℃；夏季试验对反应器不做温控处理，整个试验过程中对池体水温进行监测。

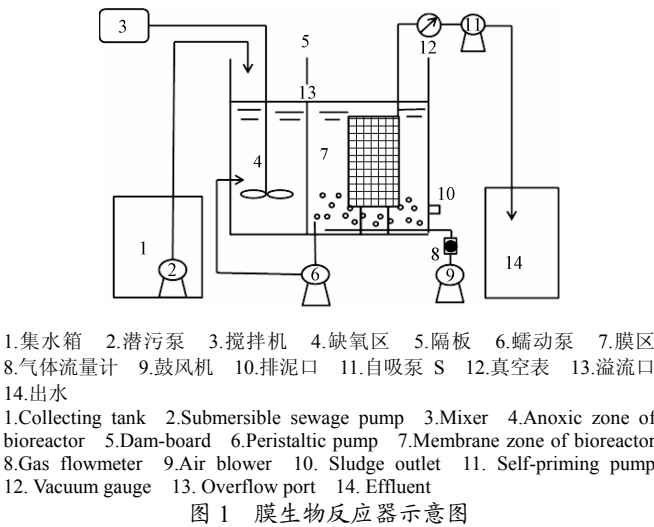


Fig.1 Schematic drawing of membrane bioreactor

池体由隔板分成缺氧区和膜区 2 部分，容积比为 1:2。缺氧区由搅拌机搅拌，搅拌机的转速约 60 r/min；膜区底部铺设曝气管与鼓风机相连，中间安装膜片一组，外侧设置排泥口。膜片为聚偏氟乙烯 (PVDF) 中空纤维膜 (杭州凯宏膜技术有限公司)，膜丝孔径为 0.1~0.2 μm，壁厚 40~45 μm，外径 400 μm，孔隙率 40%~50%，操作压力-0.01~-0.03 MPa，膜组件有效面积为 0.2 m<sup>2</sup>。

本试验试制膜生物反应器共 3 套，同时运行。

1.2 试验污水

试验污水取自河南省某猪场，年出栏 3 万头，现存栏基础母猪 1 638 头，保育猪 4 493 头，育肥猪 4 050 头，该场采用人工清粪方式，猪场污水特性见表 1。本试验在猪场内进行，试验进水为猪场每日清理出的污水原水，污水静置 30 min 后，取其上清液作为膜生物反应器进水。

1.3 试验设计

本试验对 MBR 的水力停留时间 (HRT)、回流比和膜区溶解氧质量浓度 (DO) 3 个参数进行研究，每个参数选择 3 个水平，按 3 水平正交试验表设计，共形成 9 种试验组合，即 9 个处理组 (表 2)。

表 1 猪场污水特性

Table1 Characteristics of piggery wastewater

化学需氧量质量浓度 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	总氮质量浓度 Total nitrogen/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮质量浓度 Ammonia nitrogen/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷质量浓度 Total phosphorus/ (mg·L <sup>-1</sup> )	悬浮颗粒物 量浓度 Suspended solids/(mg·L <sup>-1</sup> )	C/N 比 Ratio of COD to total nitrogen	C/P 比 Ratio of COD to total phosphorus
3277±1192	361.0±133.3	203.8±51.2	65.0±23.1	1999±738	10.3±5.2	56.8±35.7

表 2 正交试验方案

Table 2 Scheme of orthogonal design

处理组 Treatment groups	膜区溶解氧质量浓度 Dissolved oxygen in membrane zone of bioreactor/(mg·L <sup>-1</sup> )	水力停留时间 Hydraulic retention time/d	回流比 Reflux ratio/%
1	<1.5	3.0	200
2	<1.5	1.5	300
3	<1.5	0.75	400
4	1.5~3.0	3.0	300
5	1.5~3.0	1.5	400
6	1.5~3.0	0.75	200
7	>3.0	3.0	400
8	>3.0	1.5	200
9	>3.0	0.75	300

1.4 污泥驯化培养

污泥取自河南省某城市污水处理场，污泥取回后进行驯化：首先分别向 3 套 MBR 中注满稀释 10 倍的猪场污水，稀释污水的有机物浓度不超过污泥处理能力的 20%；接下来，向 MBR 中加入污泥，使反应器内 MLSS 为 4 000 mg/L，闷爆 1d 后连续进水和出水，监测出水 COD 和氨氮质量浓度直至其分别降低至 400 和 80 mg/L<sup>[12]</sup>，之后不断降低猪场污水的稀释倍数以提高 MBR 进水浓度，直至 MBR 进水为猪场污水原水，此时污泥呈棕褐色，驯化完成。将 3 套反应装置的污泥混合均匀，再等量注入各反应器中，5 d 后开始正式试验。

1.5 试验运行

猪场污水原水由潜污泵抽入 MBR 的缺氧区，自动进水，缺氧区污水经隔板上溢流口进入膜区，膜区的污泥混合液由蠕动泵抽回至缺氧区，MBR 出水则由自吸泵间歇抽出，出水抽停比为 5 min:3 min。

通过自吸泵、蠕动泵和鼓风机流量的调节分别控制 MBR 运行的 HRT，回流比和膜区 DO。鼓风机、蠕动泵和搅拌机连续运行，所有泵和风机的运行均由控制箱系统自动控制。

通过每日定量排泥的方法控制污泥停留时间 (SRT，Sludge Retention Time) 为 25~30 d；通过添加酸或碱，使反应器内 pH 值稳定在 7~8。

将 9 个处理组随机组合成 3 批进行试验，每批 3 个处理组，每套试验装置各运行 1 个处理，每批试验持续 50d (其中驯化期 20 d、试验期 30 d)。试验时间分别是 2013 年 12 月至 2014 年 2 月、2014 年 2 月至 4 月、以及 2014 年 6 月至 7 月。

1.6 采样及分析方法

试验期内每间隔 1 d 采样 1 次，每个反应器共采集样品 15 次。样品采集于取样当日 09:00 进行，采样点分别为进水口和出水口，各点取样 500 mL，置于塑料瓶内待测。

水样指标的检测参照《水和废水检测分析方法》<sup>[13]</sup>，其中：化学需氧量 (COD) 和总氮 (TN) 采用重铬酸钾

法、碱性过硫酸钾消解法（DR6000 紫外可见分光光度计，US），氨氮（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）采用蒸馏中和滴定法（凯氏定氮仪 KDN-102C，上海纤检仪器有限公司），总磷（TP）采用钼酸铵分光光度法（7230 g 可见分光光度计，上海精科），混合液悬浮固体浓度（MLSS）采用质量法测定，粪大肠菌群数采用多管发酵法（高压蒸汽灭菌和生化培养箱 SPX-70），色度采用稀释倍数法。

反应器缺氧区和膜区的 pH 值（HI98103，意大利哈纳公司）和 DO（HQ30D，美国 HACH 公司）于每日 09:00 和 17:00 测定。

采用 SPSS 软件对数据进行方差分析和双尾 TTEST 检验。

2 结果与分析

2.1 膜生物反应器的运行效果

膜生物反应器（MBR）的运行效果如表 3 所示。除处理 3 外，MBR 对 COD 的平均去除率大于 92%；MBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率的差异较大，处理 4 的平均去除率为处理 2 平均去除率的 3.3 倍，其原因将在下文进一步分析；MBR 对 TP 的平均去除率相对稳定，基本保持在 58%~82%。MBR 的进水有机负荷（以 COD 计）、MLSS 和污泥负荷率（以 COD 计）分别为 0.4~8.3  $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、6 480~19 117  $\text{mg}/\text{L}$  和 0.06~0.58  $\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ，在本试验条件下，MBR 膜区 MLSS 相对较高，MBR 能承受相对较大的进水负荷。

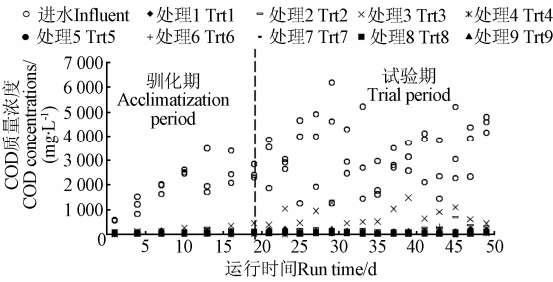
表 3 膜生物反应器的运行效果  
Table 3 Operation effect of MBR

处理 Treatment	化学需氧量 COD		氨氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$		总磷 TP		进水有机负 荷 Organic load of influent/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ )	混合液悬浮固 体质量浓度 Mixed liquor suspended solids/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	污泥负荷率 Sludge load rate/( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ )
	进水 质量浓度 Concentrations of influent/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	去除率 Removal rate/%	进水 质量浓度 Concentrations of influent/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	去除率 Removal rate/%	进水 质量浓度 Concentrations of influent/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	去除率 Removal rate/%			
1	2604±1019	94.2±1.8b	231±53	31.6±23.0d	61.2±19.1	60.2±18.5b	0.87±0.34c	8992±2078c	0.10±0.03c
2	3583±1340	92.0±3.8b	178±55	28.1±18.7d	79.9±23.9	60.3±18.6b	2.39±0.89b	10473±2503b	0.22±0.14b
3	3638±975	79.5±10.3c	203±31	30.9±10.2d	53.8±19.4	70.5±20.7b	4.85±1.30a	13868±3004a	0.37±0.15a
4	3583±1340	97.8±1.5a	178±55	93.8±5.0a	79.9±23.9	81.5±14.2a	1.19±0.45c	9403±2434c	0.11±0.05c
5	3583±1340	97.4±1.5a	178±55	91.2±8.1a	79.9±23.9	68.6±13.8b	2.39±0.89b	12280±2678b	0.17±0.08b
6	3638±975	96.6±2.6a	203±31	56.3±18.1c	53.8±19.4	78.7±14.9a	4.85±1.30a	15226±3219a	0.33±0.07a
7	2604±1019	97.2±0.9a	231±53	88.9±6.9b	61.2±19.1	60.1±19.9b	0.88±0.36c	9026±2763c	0.10±0.03c
8	2604±1019	96.8±1.2a	231±53	85.8±8.1b	61.2±19.1	57.9±14.6b	1.74±0.68b	11579±2513b	0.15±0.04b
9	3638±975	97.5±1.3a	203±31	87.1±13.8b	53.8±19.4	77.1±20.3a	4.85±1.30a	16458±2204a	0.30±0.06a

注：同一列中不同字母表示在 5% 水平上差异显著。进水有机负荷和污泥负荷率均以 COD 计。  
Note: Different letters in each column represent significant differences at level of 5%. Organic load of influent and sludge load rate are based on COD.

2.2 膜生物反应器对污水中 COD 的去除效果

试验期间 MBR 各处理的进水、出水 COD 浓度如图 2 所示，进水 COD 质量浓度为 1 260~6 200  $\text{mg}/\text{L}$ ，MBR 出水 COD 质量浓度为  $(202\pm 201)\text{mg}/\text{L}$ ，去除率为  $94.3\%\pm 5.8\%$ 。



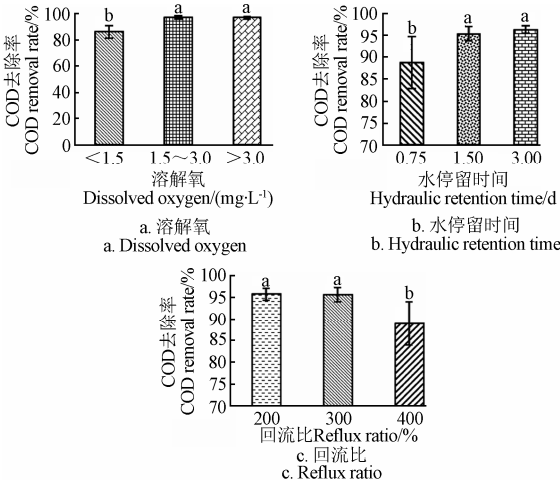
注：图例中处理 1~9 表示各处理组的出水 COD 质量浓度。  
Note: Trt 1~9 in the legend represents effluent COD concentrations of each treatment.

图 2 膜生物反应器运行过程中进水、出水的 COD 质量浓度  
Fig.2 COD concentrations of influent and effluent of membrane bioreactor during entire trial period

反应器处理效果随运行参数不同而有较大变化，第 3 批试验中最大进水质量浓度高达 6 200  $\text{mg}/\text{L}$  时，处理 3（DO<1.5  $\text{mg}/\text{L}$ 、HRT 为 0.75d、回流比 400%）的 COD 去除率仅为 79%，对高浓度进水的抗冲击能力相对较弱；而同批其他 2 个处理组对高浓度进水仍能维持较好的去除效果，对 COD 去除率均大于 97%。可见，如果运行参数组合得当，MBR 对猪场污水 COD 具有较好的去除效

果、且具有较强的抗冲击能力。

溶解氧（DO）、水力停留时间（HRT）和回流比对 COD 去除率的影响如图 3 所示。当 DO 质量浓度从 <1.5  $\text{mg}/\text{L}$  增加至 1.5~3.0  $\text{mg}/\text{L}$  时，MBR 对 COD 的去除率显著提高（ $P<0.01$ ），达到  $97.3\%\pm 1.4\%$ ；但当 DO 质量浓度从 1.5~3.0  $\text{mg}/\text{L}$  进一步增加至 >3.0  $\text{mg}/\text{L}$  时，对 COD 的去除影响不显著。



注：同一图中不同字母表示去除率在 5% 水平上差异显著。  
Note: Different letters in each plot represent significant differences of removal rates at level of 5%.

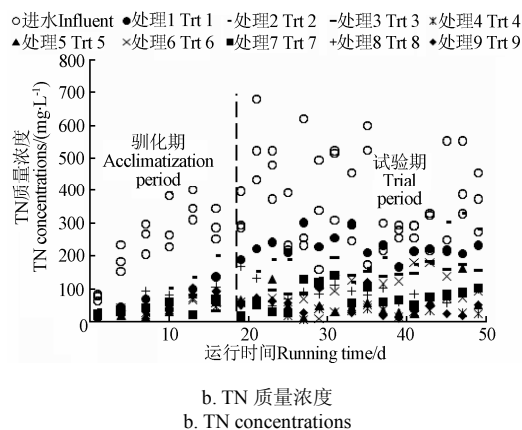
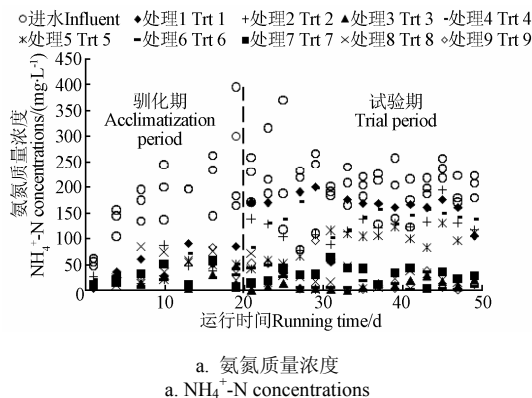
图 3 膜生物反应器运行参数对 COD 去除率的影响  
Fig.3 Effects of operational parameters of membrane bioreactor on COD removal rates

MBR 对 COD 的去除率随 HRT 的增加而上升, HRT 为 0.75、1.5 和 3.0 d 时 COD 去除率分别是  $91.2\% \pm 5.9\%$ 、 $95.4\% \pm 1.6\%$  和  $96.4\% \pm 0.9\%$ , HRT 为 0.75 d 时 COD 去除率显著低于其他 HRT 时的去除率 ( $P < 0.05$ ), HRT 对 COD 去除率的影响可能是通过 MBR 的污泥负荷率改变而实现的。

随着回流比增加, MBR 对 COD 的去除率呈下降趋势, 当回流比从 300% 提高到 400% 时, COD 的去除率显著降低 ( $P < 0.01$ )。

### 2.3 膜生物反应器对污水中氮的去除效果

MBR 进水、出水的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 浓度如图 4 所示。进水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 质量浓度范围分别为 80~370 mg/L、160~680 mg/L, 出水的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 平均质量浓度分别为  $(56.6 \pm 54.0)$  mg/L 和  $(91.6 \pm 69.1)$  mg/L, 对应的去除率分别为  $70.0\% \pm 27.2\%$  和  $70.7\% \pm 20.7\%$ 。DO < 1.5 mg/L 的 3 个处理组对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率小于 32%、TN 的去除率小于 50%, 出水浓度相对较高; 其他 6 个处理组出水的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 平均质量浓度分别为  $(54.1 \pm 51.1)$  mg/L 和  $(67.2 \pm 40.3)$  mg/L, 对应的去除率分别为  $83.3\% \pm 15.5\%$  和  $79.6\% \pm 15.1\%$ 。

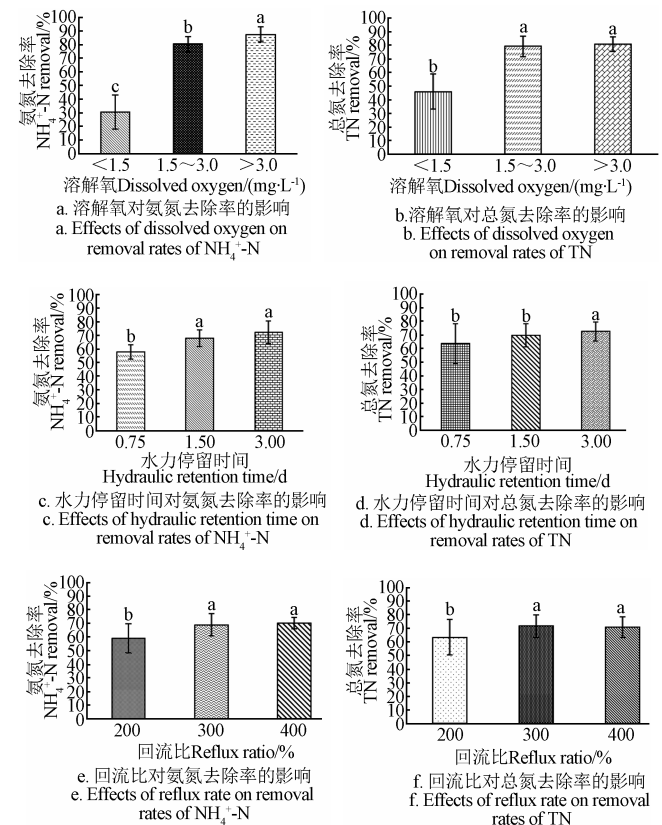


注: 图例中处理 1~9 表示各处理组的出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 质量浓度。  
Note: Trt 1~9 in the legend represents effluent  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TN concentrations of each treatment.

图 4 膜生物反应器运行过程中进水、出水的氨氮和总氮质量浓度  
Fig.4 Ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and total nitrogen (TN) concentrations of influent and effluent of membrane bioreactor during entire trial period

MBR 运行参数对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 去除率的影响如图 5 所示。DO 水平越高, MBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的平均去除率越大,

氨氧化程度越高。当 DO 质量浓度从 <1.5 mg/L 升高到 1.5~3.0 mg/L 时, MBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除率 ( $P < 0.01$ ) 显著提高; 当 DO 质量浓度进一步增加至 >3.0 mg/L 时, 虽然  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的平均去除率仍显著升高 ( $P < 0.01$ ), 但 DO 质量浓度为 1.5~3.0 mg/L 的处理组 4 和处理组 5 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率均高于 DO > 3.0 mg/L 的各处理组, 表明较高的 DO 质量浓度 (1.5~3.0 mg/L) 对猪场污水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  降解固然重要, 但 HRT 和回流比的协同作用也不容忽视。



注: 同一图中不同字母表示去除率在 5% 水平上差异显著。

Note: Different letters in each plot represent significant differences of removal rates at level of 5%.

图 5 膜生物反应器运行参数对氨氮和总氮去除率的影响

Fig.5 Effects of operating parameters of membrane bioreactor on removal rates of ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) and total nitrogen (TN)

随着水力停留时间 (HRT) 增加, MBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除效果不断提高, 且当 HRT 从 0.75 d 增加至 1.5 d 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率显著提高 ( $P < 0.01$ ); HRT 从 1.5 d 升至 3.0 d 时, TN 的去除率显著增加 ( $P < 0.05$ )。

不同水平回流比对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除效果相似。当回流比从 200% 提高到 300% 时, MBR 对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除率均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 但当回流比进一步增加时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 去除率的增幅均不显著。本试验对 MBR 缺氧区 DO 的测定结果表明, 回流比为 200% 和 300% 时缺氧区 DO 质量浓度分别为  $(0.41 \pm 0.20)$  mg/L 和  $(0.50 \pm 0.15)$  mg/L, 有利于反硝化, 当回流比增至 400% 时, 缺氧区 DO 质量浓度提高到  $(0.61 \pm 0.21)$  mg/L, 破坏了反硝化环境<sup>[14-15]</sup>, 因此导致 TN 实际去除率略低于 80% 的理论去除率。

2.4 膜生物反应器对污水中粪大肠菌群数的去除效果

试验过程中 MBR 进水的粪大肠菌群数在  $1.6 \times 10^7 \sim 1.3 \times 10^{10}$  个/L 之间, 远超过现行国家标准的要求 (10 000 个/L) [16], 本试验中 MBR 对粪大肠菌群的去除率为  $99.9\% \pm 0.08\%$ , 出水粪大肠菌群数为  $30 \sim 19\,350$  个/L (图 6), 86.4% 的出水粪大肠菌群数能达到国家排放标准的卫生学指标要求。MBR 出水粪大肠菌群数受进水浓度影响较小, 主要是试验过程中膜丝的破损或滤饼层脱落使出水的粪大肠菌群数增加 [17]。为了确保出水后续排放或回用的生物安全性, 必须进一步消毒处理, 为此本研究测定了出水色度, 其值为  $80 \sim 214$  度, 根据本实验室的内部研究资料表明, 此时 MBR 出水对应的透射率为  $12.1\% \sim 43.5\%$ , 根据李同等 [18] 研究可知, 当猪场沼液透射率  $> 3.8\%$  时, 紫外线对其杀菌率超过 97%, 因此 MBR 处理出水可采用紫外线进行后续杀菌, 据此推断采用紫外线杀菌后出水的粪大肠菌群数  $< 581$  个/L, 远低于国家标准值, 能确保回用安全。

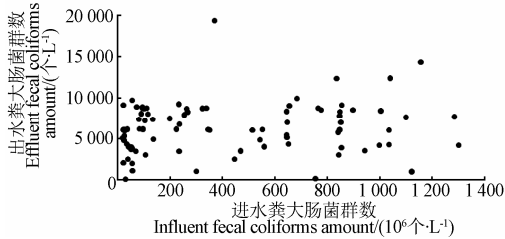
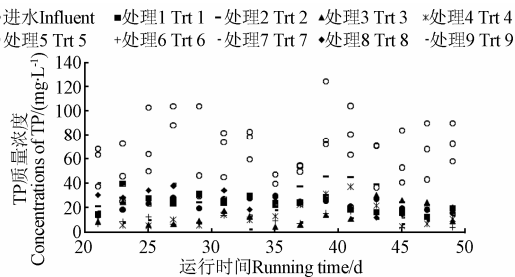


图 6 膜生物反应器进出水中粪大肠菌群数

Fig.6 Numbers of fecal coliforms in influent and effluent of membrane bioreactor

2.5 膜生物反应器对污水中总磷的去除效果

整个试验过程中 MBR 进出水的 TP 质量浓度如图 7 所示, 进水 TP 质量浓度范围为  $23.1 \sim 124.4$  mg/L, 出水 TP 质量浓度为  $(19.2 \pm 10.0)$  mg/L, 平均去除率为  $68.3\% \pm 17.4\%$ 。TP 去除率随着膜区 DO 质量浓度的升高呈现先上升后下降的趋势, DO 质量浓度为  $1.5 \sim 3.0$  mg/L 的 TP 去除率显著高于其他 DO 水平时的去除率 ( $P < 0.01$ )。回流比对 TP 去除的影响与 DO 相同, 回流比为 300% 时的 TP 去除率显著高于 ( $P < 0.05$ ) 其他水平回流比时的去除率。HRT 为 1.5 d 的 TP 去除率低于其他 2 个 HRT 水平时的去除率, 但仅在 HRT 为 0.75 d 和 1.5 d 之间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。



注：图例中处理 1~9 表示各处理组的出水 TP 质量浓度。  
Note: Ttr1~9 in the legend represents effluent TP concentrations of each treatment.  
图 7 膜生物反应器运行过程中进水、出水总磷质量浓度  
Fig.7 Total phosphorus (TP) concentrations of influent and effluent of membrane bioreactor during entire trial period

2.6 膜生物反应器运行参数优化

正交试验数据的极差分析结果如表 4 所示, 其中 A、B 和 C 分别代表参数 DO、HRT 和回流比, 各参数的 3 个水平由低到高依次用 1、2 和 3 表示。运行参数对 COD 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率影响大小的顺序为  $\text{DO} > \text{HRT} > \text{回流比}$ , 对 TP 去除率影响的顺序为  $\text{HRT} > \text{DO} > \text{回流比}$ , 各参数对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 去除均有显著性影响 ( $P < 0.05$ )。

表 4 极差和方差分析结果  
Table 4 Results of range analysis and variance

评价指标 Evaluation index	参数 Parameters		
	膜区溶解氧 质量浓度 Dissolved oxygen in membrane zone of bioreactor / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	水力停留时间 Hydraulic retention time/d	回流比 Reflux ratio/%
COD	$K_1$	88.6	91.2
	$K_2$	97.3	95.4
	$K_3$	97.2	96.4
	极差 Range analysis	8.7	5.2
	最佳组合 Best combination	$A_2$	$B_3$
	$F$	26.4	11.7
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$P$	$< .0001$	$< .0001$
	$K_1$	30.6	58.1
	$K_2$	80.4	68.0
	$K_3$	87.5	72.5
	极差 Range analysis	56.9	14.4
	最佳组合 Best combination	$A_3$	$B_3$
TP	$F$	181.7	9.4
	$P$	$< .0001$	0.0002
	$K_1$	63.7	75.4
	$K_2$	76.3	62.3
	$K_3$	65.0	67.3
	极差 Range analysis	12.6	13.1
	最佳组合 Best combination	$A_2$	$B_1$
	$F$	11.2	10.3
	$P$	$< .0001$	0.0256

注： $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别表示 DO、HRT 和回流比 3 个参数由低到高的 3 个水平的去除率。  
Note:  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  represent the removal rates of the 3 levels of dissolved oxygen (DO), hydraulic retention time (HRT) and reflux ratio in ascending order.

从极差分析结果也可看出, 对于运行参数 DO 而言, 去除 COD 和 TP 的最佳质量浓度为  $1.5 \sim 3.0$  mg/L, 但去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的最佳质量浓度为  $> 3.0$  mg/L; 对于运行参数 HRT, 去除 COD 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的最佳水力停留时间为 3.0 d, 尽管去除 TP 的最佳时间为 0.75 d, 但 HRT 0.75 d 与 3.0 d 对 TP 去除率无显著性差异; 对于运行参数回流比, 去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 最佳值为 300%, 而去除 COD 的最佳值为 200%, 但 200% 与 300% 回流比对 COD 去除率无显著性差异, 综合考虑 MBR 各运行参数的极差分析结果以及不同参数水平对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 去除效果, 确定 MBR 处理猪场污水的优化参数为: DO 质量浓度  $1.5 \sim 3.0$  mg/L、HRT 3.0 d 和回流比 300%。该优化参数组合对应本试验中的处理 4, 该处理试验出水的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 质量浓度分别为  $(69.3 \pm 48.7)$ 、 $(10.0 \pm 8.2)$  和  $(14.0 \pm 9.9)$  mg/L, 相应的去除率分别为  $97.8\% \pm 1.5\%$ 、 $93.8\% \pm 5.0\%$  和  $81.5\% \pm 14.2\%$ 。

### 3 讨 论

#### 3.1 进水对 MBR 处理效果的影响

为了减少生产用水量,干清粪一直是我国猪场采用的主要清粪方式。尽管近年来机械干清粪受到不少规模化猪场的青睐,但目前我国规模化猪场仍以人工干清粪为主。由于人工清粪受诸多因素的影响,因而猪场污水水质变化在所难免,本试验运行过程中,猪场污水的有机负荷在  $0.4 \sim 8.3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  (以 COD 计) 范围,能取得较好的去除效果,主要由于 MBR 的进水有机负荷与 MLSS 正相关 ( $R^2=0.90$ ), 进水有机负荷越高, MBR 中生物量越多,去除效果越好,且膜生物反应器的有机负荷及 MLSS 浓度显著高于传统活性污泥法 ( $0.4 \sim 0.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ) (以 COD 计) [19-20], MLSS 随着 HRT 增加而显著降低 ( $P<0.01$ ), 与文献报道的结果一致 [21-22]。

在本试验控制的 SRT 和 pH 条件下,污泥负荷率受 HRT 的影响显著 ( $P<0.05$ )。污泥负荷率影响 COD 去除率,本试验污泥负荷率在  $0.06 \sim 0.58 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$  (以 COD 计) 范围内, COD 去除率维持 75% 以上,表明 MBR 反应器在较高负荷条件下运行可行的,从而可以减少反应器的有效体积。本试验中的污泥负荷率与 Sun 等报道的 MBR 污泥负荷率 ( $0.2 \sim 0.8 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ) (以 COD 计) [21] 相似,高于 SBR (序批式活性污泥法, sequencing batch reactor)、活性污泥处理工艺的污泥负荷率 ( $0.1 \sim 0.3 \text{ kg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ) (以 COD 计) [23-25]。

Malgorzata 等 [26] 研究表明,当 C/N 比为  $4 \sim 13.4$  时,具有较为理想的脱氮效果。孟海玲等 [9] 处理低碳氮比 ( $1.5 \sim 4.5$ ) 的沼液污水时,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率仅为  $8.6\% \sim 67.1\%$ 。本试验进水 C/N 比在  $10.3 \pm 5.2$  之间,在此条件下反硝化菌可以从进水中获得相对较多的有机碳源,有利于反硝化脱氮进行,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率为  $70.0\% \pm 27.2\%$ 。C/P 比大小同样影响 TP 的去除效果,史静等 [27] 研究发现进水 C/P 比在  $64.1$  和  $42.0$  之间时, TP 去除率显著高于 C/P 比为  $33.0$  和  $17.8$  的去除率,本试验进水 C/P 比在  $56.8 \pm 35.7$  之间,去除率达  $68.3\% \pm 17.4\%$ 。可知猪场人工干清粪污水 C/N 比和 C/P 比维持在较高水平,适合采用生化处理。

#### 3.2 MBR 对总磷的去除效果分析

尽管 MBR 对猪场污水的 TP 具有一定的去处效果,但出水 TP 质量浓度 ( $19.2 \pm 10.0 \text{ mg/L}$ ) 高于排放标准值 ( $8 \text{ mg/L}$ ), 其原因主要是 MBR 膜区 DO 随着污泥回流进入缺氧区导致缺氧区溶解氧浓度过高,本试验过程中对缺氧区 DO 质量浓度的测试数据表明,当回流比为  $200\%$ 、 $300\%$  和  $400\%$  时,缺氧区 DO 质量浓度分别为 ( $0.41 \pm 0.20 \text{ mg/L}$ )、( $0.50 \pm 0.15 \text{ mg/L}$ ) 和 ( $0.61 \pm 0.21 \text{ mg/L}$ ), 均高于厌氧释磷需要的 DO 质量浓度 ( $0.2 \text{ mg/L}$ ) [28]。促进非聚磷菌的增长,抑制反硝化聚磷菌的作用,不利于 TP 的去除,从而使 MBR 出水的 TP 浓度较高。尽管如此,猪场污水需要通过污泥回流进入缺氧区进行反硝化才能实现氮的去除,试验中污泥回流也必不可少。作者的后续试验发现, MBR 出水中正磷酸盐占出水 TP 的  $80\%$  以上,很容易通过投加化学试剂去除。

#### 3.3 温度对 MBR 运行效果的影响

由于每批试验仅驯化和试验就需要  $50 \text{ d}$ , 因  $9$  个处理分  $3$  批运行而只能在不同的季节完成,为了防止低温对试验的影响,冬春两季的试验过程中采用加热棒对反应器进行加热,使反应器中水温保持在  $19.1 \sim 24.5^\circ\text{C}$ 。夏季室外温度较高,因而未对反应器进行温度调节处理,试验过程中监测反应器水温在  $20.8 \sim 27.3^\circ\text{C}$ , 较冬季和春季试验水温稍高。通过试验结果对比发现,夏季较高水温时 (处理组  $3$ 、 $6$  和  $9$ ) COD 的去除率为  $97.9\% \pm 2.1\%$ , 与冬春季 (处理组  $1$ 、 $2$ 、 $4$ 、 $5$ 、 $7$  和  $8$ ) 的 COD 去除率  $95.9\% \pm 2.9\%$  稍高,但差异不显著,孟海玲等 [9] 发现当水温在  $19.5 \sim 35.8^\circ\text{C}$  时, MBR 对 COD 的去除率与温度的相关性不明显。本研究夏季试验 (处理组  $3$ 、 $6$  和  $9$ ) 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率为  $71.7\% \pm 27.2\%$ , TN 的去除率为  $71.4\% \pm 21.6\%$ , 春冬季 (处理组  $1$ 、 $2$ 、 $4$ 、 $5$ 、 $7$  和  $8$ )  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率为  $70.4\% \pm 28.1\%$ , TN 的去除率为  $70.2\% \pm 22.4\%$ , 夏季出水去除率略高于春冬季节试验,但没有显著性差异。徐亚同 [29] 报道当污水处理的温度在  $20 \sim 30^\circ\text{C}$  时,对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除效果较好,且  $28^\circ\text{C}$  的去除率最高。低温条件尤其是北方冬季低温可能对处理效果有较大影响,今后需将温度作为运行参数进行试验,提出不同气候区域的运行方案。

### 4 结 论

1) 采用膜生物反应器处理人工清粪猪场污水,在 pH  $7 \sim 8$ 、SRT  $25 \sim 30 \text{ d}$ 、温度 ( $25 \pm 5$ )  $^\circ\text{C}$  条件下,出水的 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 平均质量浓度分别为 ( $202 \pm 201$ )、( $56.6 \pm 54.0$ )、( $91.6 \pm 69.1$ ) 和 ( $19.2 \pm 10.0$ )  $\text{mg/L}$ , 对应的去除率分别为  $94.3\% \pm 5.8\%$ 、 $70.0\% \pm 27.2\%$ 、 $70.7\% \pm 20.7\%$  和  $68.3\% \pm 17.4\%$ 。

2) MBR 对污水中粪大肠菌群的去 除率为  $99.9\% \pm 0.08\%$ , 出水粪大肠菌群数  $30 \sim 19350$  个/L,  $86.4\%$  的处理出水达到国家标准的卫生学要求,可采用紫外线杀菌,以确保出水的生物安全性。

3) 采用膜生物反应器处理人工清粪猪场出水的优化运行参数为: DO 质量浓度为  $1.5 \sim 3.0 \text{ mg/L}$ 、HRT 为  $3.0 \text{ d}$  和回流比  $300\%$ , 该运行条件下 MBR 出水的 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TP 质量浓度分别为 ( $69.3 \pm 48.7$ )、( $10.0 \pm 8.2$ ) 和 ( $14.0 \pm 9.9$ )  $\text{mg/L}$ , 相应的去除率分别为  $97.8\% \pm 1.5\%$ 、 $93.8\% \pm 5.0\%$  和  $81.5\% \pm 14.2\%$ 。

MBR 直接处理猪场污水是可行的,出水可采用紫外线杀菌,杀菌出水有望回用于圈舍冲洗以减少猪场生产的水资源的消耗。

#### [参 考 文 献]

- [1] Buzatu P, Lavric V. Optimal operating strategies of a submerged membrane bioreactor for wastewater treatment[J]. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 2011, 25(1): 89—103.
- [2] Jimenez J, Grelier P, Meinhold J, et al. Biological modelling of MBR and impact of primary sedimentation[J]. Desalination, 2010, 250(2): 562—567.

- [3] Santos A, Ma W, Judd S. Membrane bioreactors: Two decades of research and implementation[J]. *Desalination*, 2011, 273(1): 148—154.
- [4] Boyle-Gotla A, Jensen P, Yap S, et al. Dynamic multidimensional modelling of submerged membrane bioreactor fouling[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 467(1): 153—161.
- [5] 丛学志, 陈洪斌, 戴晓虎, 等. 低温条件下倒置 A<sup>2</sup>O—MBR 处理生活污水回用的中试研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(3): 73—76.  
Cong Xuezhi, Chen Hongbin, Dai Xiaohu, et al. Pilot-scale study of domestic wastewater treatment and reuse with inverted A<sup>2</sup>O-MBR process under low temperature[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(3): 73—76. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡以松, 王晓昌, 张永梅, 等. A<sup>2</sup>O-MBR 工艺处理校园生活污水与回用评价[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(21): 20—22.  
Hu Yisong, Wang Xiaochang, Zhang Yongmei, et al. Assessment of A<sup>2</sup>O/MBR Process for campus domestic sewage treatment and reuse[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(21): 20—22. (in Chinese with English abstract)
- [7] Prado N, Ochoa J, Amrane A. Zero nuisance piggeries: Long-term performance of MBR (membrane bioreactor) for dilute swine wastewater treatment using submerged membrane bioreactor in semi-industrial scale[J]. *Water Research*, 2009, 43(6): 1549—1558.
- [8] Kornboonraksa T, Lee H, Lee S, et al. Application of chemical precipitation and membrane bioreactor hybrid process for piggery wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(6): 1963—1968.
- [9] 孟海玲, 董红敏, 朱志平, 等. 运行条件对膜生物反应器处理猪场厌氧消化液效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 179—183.  
Meng Hailing, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Influences of operation parameters on performance of MBR treating digested piggery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(9): 179—183. (in Chinese with English abstract)
- [10] 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 提高猪场沼液净化处理效果的氨吹脱控制参数[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 205—211.  
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of piggery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(11): 205—211. (in Chinese with English abstract)
- [11] 邓良伟, 郑平, 李淑兰, 等. 添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化液性能[J]. *环境科学*, 2006, 26(6): 105—109.  
Deng Liangwei, Zheng Ping, Li Shulan, et al. Performance improvement of sequencing batch reactor (SBR) treating digested piggery wastewater by addition of raw wastewater[J]. *Environmental Science*, 2006, 26(6): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [12] 毋海燕, 杨云龙. 复合生物反应器挂膜及污泥驯化试验[J]. *工业用水与废水*, 2004, 6(35): 41—44.  
Wu Haiyan, Yang Yunlong. Test of membrane hanging and sludge acclimation in a compound biological reactor[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2004, 6(35): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] Ciudad G, González R, Bonrhardt C, et al. Modes of operation and pH control as enhancement factors for partial nitrification on with oxygen transport limitation[J]. *Water Research*, 2007, 41(20): 4621—4629.
- [15] 丁安, 梁恒, 郭五珍, 等. 回流对间歇式 A/O-MBR 脱氮除磷影响的中试研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 44(5): 33—37.  
Ding An, Liang Heng, Guo Wuzhen, et al. Impact of reflux on nitrogen and phosphorus removal performance of a pilot scale of intermittent A/O-MBR[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 44(5): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [16] 畜禽养殖业污染物排放标准 GB 18596-2001[S].
- [17] Arrojo B, Mosquera-Corra A, Garrido J M, et al. A membrane coupled to a sequencing batch reactor for water reuse and removal of coliform bacteria[J]. *Desalination*, 2005, 179(1/2/3): 109—116.
- [18] 李同, 董红敏, 陶秀萍. 猪场沼液絮凝上清液的紫外线杀菌效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 165—171.  
Li Tong, Dong Hongmin, Tao Xiuping, et al. Disinfection effects of ultraviolet on supernatants of flocculated digestate from swine farm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(6): 165—171. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王燕飞. 水污染控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 105—108.
- [20] Galil N, Jacob L. Comparative characterization of biosolids from a membrane bioreactor and from a sequencing batch reactor[J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(5): 1001—1008.
- [21] Sun D, Hay C, Khor S. Effects of hydraulic retention time on behavior of start-up submerged membrane bioreactor with prolonged sludge retention time[J]. *Desalination*, 2006, 195(1): 209—225.
- [22] Xu Shengnan, Wu Donglei, Hu Zhiqiang. Impact of hydraulic retention time on organic and nutrient removal in a membrane coupled sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 2014, 55(2): 12—20.
- [23] Obaja D, Macé S, Mata-Alvarez J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(1): 7—14.
- [24] Bernat K, Kulikowska D, Zielińska M, et al. Nitrogen removal from wastewater with a low COD/N ratio at a low oxygen concentration[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(7): 4913—4916.
- [25] Susanne L, Harald H. Comparing the performance and operation stability of an SBR and MBBR for single-stage nitrification-anammox treating wastewater with high organic load[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(10): 1319—1328.
- [26] Malggorzata K, Hanna M, Eugeniusz K. Factors affecting the biological nitrogen removal from wastewater [J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(1): 1015—1021.



- [27] 史静, 吕锡武, 朱光灿, 等. 进水碳磷比对连续流反硝化除磷工艺脱氮除磷效果的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(1): 94–98.
- Shi Jing, Lü Xiwu, Zhu Guangcan, et al. Effect of COD-to-phosphorus ratio on performance of continuous-flow two-sludge process[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(1): 94–98. (in Chinese with English abstract)
- [28] Chen Hongbo, Wang Dongbo, Li Xiaoming, et al. Effect of dissolved oxygen on biological phosphorus removal induced by aerobic/extended-idle regime[J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 90(15): 27–35.
- [29] 徐亚同. 废水的硝化作用[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 68–71.
- Xu Yatong. Nitrification of waste water[J]. Advances in Environmental Science, 2006, 27(2): 68–71. (in Chinese with English abstract)

## Operation parameter optimization of wastewater from swine farms using submerged membrane bioreactor

Yao Huijiao, Dong Hongmin, Tao Xiuping\*, Shang Bin, Liu Yang

(Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Institute of Environment & Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Waste-water is very difficult to treat, especially the waste water from swine farms with high contents of organic matters. Addressing the environmental problems incurred by waste-water is important for the swine farms for their sustainable development. The raw waste-water from swine farm in this study was treated by submerged membrane bioreactor (MBR). Three levels of dissolved oxygen concentrations (DO: <1.5 mg/L, 1.5~3.0 mg/L, and >3.0 mg/L), three levels of hydraulic retention times (HRT: 0.75 d, 1.5 d and 3.0 d) and three levels of reflux ratios (RR, 200%, 300%, and 400%) were used to form nine combined experiments treatments using the orthogonal design. The nine treatments were conducted in three batches in a swine farm with manual manure dry-collection method. The farm was located in Henan province. The MBR was designed with an available volume of 30 L, and the inside temperatures of bioreactors were controlled at (25±5)°C by heating rods, and the pH values were maintained around 7~8 by addition of acid or alkali. During the experiments, waste-water was pumped to MBR automatically, and sludge retention time (SRT) was controlled at 25-30 d. Each batch of the experiments lasted for 50 d, including 20 d of acclimatization and 30 d for the trial. The results showed that the average concentration of chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of the MBR effluents were (202±201) mg/L, (56.6±54.0)mg/L, (91.6±69.1) mg/L and (19.2±10.0) mg/L when the influent having COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP concentrations of (3277±1192) mg/L, (203.8±51.2) mg/L, (361.0±133.3) mg/L, and (65.0±23.1) mg/L, respectively. The corresponding removal rates of MBR were 93.6%±9.5%, 70.0%±27.2%, 70.7%±20.7% and 68.3%±17.4%, respectively for each of these measured parameters. MBR could also remove the fecal coliforms from waste water efficiently. A removal rate of (99.9±0.08)% was observed, and the amount of fecal coliforms in effluents ranged from 30 to 19,350 count/L. About 86.4% of the effluent could meet the hygiene requirements of the national standard. The range analysis results indicated that the importance order of operational parameters on the removal of COD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was DO>HRT>RR, while the order for the TP removal was HRT> DO>RR. When DO increased from <1.5 mg/L to 1.5-3.0 mg/L, the removal rates of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, and TN increased significantly ( $P<0.01$ ). However, when DO was further increased to >3.0 mg/L, significant difference ( $P<0.01$ ) was only observed in the removal rate of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. In comparison with HRT of 0.75 d, the removal rates of COD NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TP increased significantly ( $P<0.01$ ) under HRT of 1.5 d. As for reflux rate (RR), the removal rates of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TN at RR of 300% were significantly higher ( $P<0.05$ ) than those at RR of 200%, but significant differences ( $P<0.05$ ) in the removal rates of COD and TP were observed between RR of 300% and RR of 400%. With reference to range analysis results, the optimized operational conditions of MBR were DO of 1.5~3.0 mg/L, HRT of 3.0 d and RR of 300%, which corresponded to the Treatment 4 in the experiments, in which the COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP concentrations were (69.3±48.7) mg/L, (10.0±8.2) mg/L and (14.0±9.9)mg/L, respectively, and the corresponding removal rates were 97.8%±1.5%, 93.8%±5.0% and 81.5%±14.2%, respectively. The effluent from MBR could be disinfected using ultraviolet to ensure biosecurity if the disinfected effluent was recycled for on farm flushing, which implicates the water resource conservation in swine production.

**Key words:** waste water; membranes; bioreactor; dissolved oxygen; hydraulic retention time; reflux ratio; swine farm; effect