

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.004

# 生物气循环模式对 AnDMBR 污水处理效能的影响

张晓玲<sup>1,2</sup>, 胡以松<sup>1,2</sup>, 焦城璠<sup>1,2</sup>, 曾婷<sup>1,2</sup>, 杨媛<sup>1,2</sup>, 陈荣<sup>1,2</sup>,  
王晓昌<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 基于小试厌氧动态膜生物反应器(AnDMBR),研究了不同尼龙网孔径(200目和500目)及生物气循环模式(连续冲刷、无冲刷及间歇冲刷)对 AnDMBR 污水处理效能的影响。结果表明,当膜基材孔径为200目时,AnDMBR的运行周期延长。间歇2 h、气体循环1 min为优化的气体循环模式,此时气态甲烷产量较高,溶解性甲烷产量最低,并且膜污染速率最低。AnDMBR对COD的去除率超过80%,对浊度的去除率约为90%。扫描电镜能谱分析(SEM-EDX)表明生物气循环强度影响泥饼层的致密性和厚度。持续的生物气循环会导致污泥颗粒破碎和泥饼层脱落,使污泥平均粒径减小。反应器的细菌群落主要有变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*),古菌群落主要有 *Methanoregula*、甲烷丝菌属(*Methanothrix*)和甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)。

**关键词:** 厌氧动态膜生物反应器; 生物气循环; 膜孔径; 生活污水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0025-07

## Effect of Biogas Circulating Mode on Wastewater Treatment Performance of Anaerobic Dynamic Membrane Bioreactor

ZHANG Xiao-ling<sup>1,2</sup>, HU Yi-song<sup>1,2</sup>, JIAO Cheng-fan<sup>1,2</sup>, ZENG Ting<sup>1,2</sup>,  
YANG Yuan<sup>1,2</sup>, CHEN Rong<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-chang<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The effects of nylon mesh size (200 meshes and 500 meshes) and biogas circulating mode (continuous sparging, no sparging and intermittent sparging) on the wastewater treatment performance of a lab-scale AnDMBR were investigated. The operating cycle of AnDMBR was extended when the membrane supporting material aperture was 200 meshes. The optimal biogas circulating mode was sparged every 2 hours for 1 min. Under this operating mode, the gaseous methane production was higher, and the dissolved methane production and the membrane fouling rate were the lowest. The removal rate of COD by AnDMBR was more than 80%, and that of turbidity was approximately 90%. SEM-EDX

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-237); 陕西省科技创新团队项目(2019TD-025)

通信作者: 胡以松 E-mail: huyisong@xauat.edu.cn

analysis showed that the biogas sparging intensity affected the density and thickness of the cake layer. The continuous biogas circulation led to the breakage of sludge particles, the stripping of sludge cake layer and the decrease in the average particle size of sludge. The bacterial phyla in the bioreactor mainly included *Proteobacteria*, *Chloroflexi*, *Firmicutes* and *Bacteroidetes*, while the archaea genera mainly consisted of *Methanoregula*, *Methanothrix* and *Methanobacterium*.

**Key words:** anaerobic dynamic membrane bioreactor; biogas circulation; membrane aperture; domestic wastewater

厌氧膜生物反应器(AnMBR)极具应用前景,自20世纪80年代开始在高浓度有机废水和固废处理领域实现了工程应用。20世纪90年代以来,AnMBR也被应用于城市污水处理领域<sup>[1-2]</sup>,然而膜污染问题严重限制了其推广应用。有研究表明,厌氧动态膜生物反应器(AnDMBR)是解决该问题的重要研究方向之一,AnDMBR利用以较大孔径的廉价微网替代微滤/超滤膜为膜组件的支撑材料,取得了与AnMBR相近的出水水质<sup>[3-5]</sup>。然而,新兴的AnDMBR在实际城市污水处理中的应用研究还很缺乏,如何强化稳定动态膜的形成及提升AnDMBR的应用潜力还需要深入探讨。有研究认为生物气循环可以强化传质过程并调控泥饼层结构<sup>[6-7]</sup>,有利于提升生物处理与膜污染控制性能。为此,笔者尝试通过调控生物气循环模式改善AnDMBR的产甲烷性能并缓解膜污染,以期推动AnDMBR工艺的实际应用。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

反应器构型如图1所示。

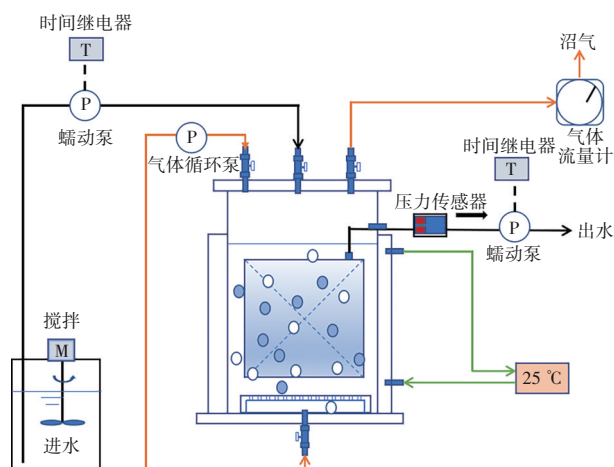


图1 AnDMBR反应器装置示意

Fig.1 Schematics of AnDMBR

反应器由有机玻璃制成,有效容积为1.6 L。采用恒温水浴锅将反应器的温度控制在25 °C左右。反应器底部设有曝气室,曝气室底部与反应器顶部设有阀门,起到使反应器内生物气循环的作用。装置通过时间继电器控制进出水泵,以实现液位的稳定,出水泵与膜组件之间配有压力表。实验中采用的膜基材为大孔径尼龙网(200目和500目)。膜组件由框架和内外支撑通过塑料螺丝组合而成,有效过滤面积为0.02 m<sup>2</sup>。

### 1.2 接种污泥及进水水质

接种污泥来自西安市某啤酒厂。采用的污水包括实际生活污水以及模拟污水,主要水质指标见表1,其中模拟污水的配制参考文献[8]。

表1 主要水质指标

Tab.1 Main water quality indicators

项 目	实际生活污水	模拟污水
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	523.87±50.48	541.42±49.59
SCOD/(mg·L <sup>-1</sup> )	201.83±30.70	230.30±20
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	53.59±2.79	53.60±0.30
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	38.13±2.52	35.72±3.02
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.90±0.72	11.57±2.41
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/(mg·L <sup>-1</sup> )	4.96±0.69	5.85±1.24
TSS/(mg·L <sup>-1</sup> )	140.23±10.11	122.5±13.50
pH	7.4~8.5	7.2~8.0
浊度/NTU	200.25±20.94	150.25±15.94

### 1.3 实验设计

AnDMBR工艺实验设计见表2。实验分为三个阶段,第一阶段为反应器启动阶段,实验过程中进行连续生物气循环,目的是驯化污泥以及考察该运行模式下反应器的运行稳定性;第二阶段为无生物气循环阶段,考察无生物气循环模式对反应器运行周期长短的影响;第三阶段为间歇生物气循环阶段,考察不同气体冲刷频率对产气效果的影响和污水处理效能。

表2 实验设计方案

Tab.2 Experimental design scheme

项 目	第一阶段 (第1~32天)	第二阶段 (第32~103天)	第三阶段 (第103~152天)
进水	模拟污水	实际生活污水	实际生活污水
膜材料	500 目尼龙网	200 目尼龙网	200 目尼龙网
HRT/h	16	12 和 8	8
膜通量/ ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	5.1	6.7 和 10.1	10.1
出水泵抽停模式	4 min:1 min	4 min:1 min	4 min:1 min
生物气循环模式	连续冲刷	无冲刷	间歇冲刷

第一阶段结束后,通过批次实验(以200、300、400目的尼龙网为膜基材的自生和预涂动态膜实验)探索了在连续生物气循环条件下形成稳定动态膜的方式,结果表明在连续生物气循环模式下,无法形成稳定的动态膜,为后续无生物气循环和间歇气体循环阶段的运行提供了依据。间歇冲刷分为5个周期:Ⅰ为间歇24 h、冲刷1 min,Ⅱ为间歇12 h、冲刷1 min,Ⅲ为间歇6 h、冲刷1 min,Ⅳ为间歇3 h、冲刷1 min,Ⅴ为间歇2 h、冲刷1 min。

#### 1.4 分析方法

常规指标的检测参考《水和废水监测分析方法》(第4版);采用激光粒度分析仪检测污泥和泥饼的粒径;采用扫描电子显微镜拍照观察污染后的尼龙网,然后采用能量分散X射线分析仪进行样品的能谱分析。委托上海生物工程公司采用高通量测序技术进行厌氧污泥的微生物种群分析,操作步骤主要包括:样品预处理;提取DNA;PCR扩增;DNA纯化回收;定量混合;利用Illumina MiSeq平台进行测序分析,对获得的序列进行处理和比对。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AnDMBR对有机物的去除效果

AnDMBR对COD的去除效果如图2所示。可知,COD的去除以厌氧微生物的降解为主,以泥饼层截留为辅。3个阶段COD去除率的平均值分别为84.09%、82.18%和82.91%,与赵立健<sup>[9]</sup>和程刚<sup>[10]</sup>采用AnDMBR处理生活污水的去除率相近。第一阶段去除率最高,原因可能有以下3点:①第一阶段的进水为模拟污水,基质主要由易生物降解的有机物组成;②尼龙网的孔径为500目,较小的孔径强化了对COD的截留去除;③采用连续生物气循环模式,强化了传质过程,提高了COD去除率。统计分

析表明3个阶段的COD去除率无显著性差异( $p > 0.05$ )。总之,在3个阶段2种孔径下,进水COD均被有效截留且去除率差别较小,说明HRT、生物气循环模式、出水泵抽停比和膜通量等因素对COD的去除无显著影响。

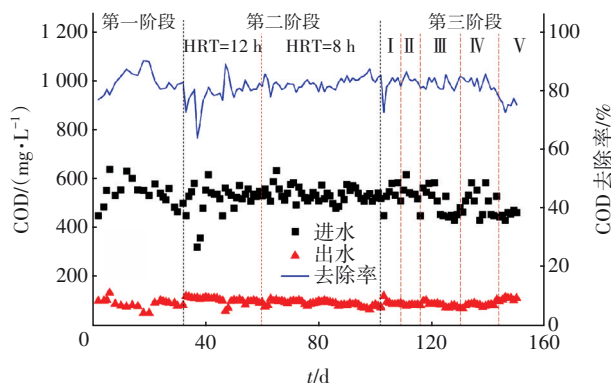


图2 AnDMBR的COD去除效果

Fig.2 COD removal effect of AnDMBR

### 2.2 AnDMBR的产气情况

3个阶段AnDMBR的产气情况见图3。

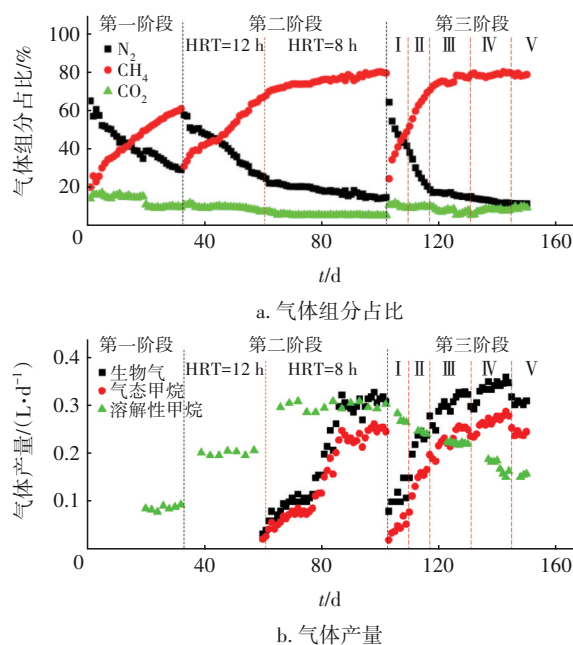


图3 AnDMBR的产气情况

Fig.3 Gas production of AnDMBR

由图3可知,在第一阶段,运行结束时,生物气中甲烷占比为60%;在第二阶段,反应器运行约20 d时甲烷占比达到了60%,本周期运行结束时甲烷占比接近80%,可能是经过驯化后的污泥已经具有较好的产甲烷活性;在第三阶段,反应器运行两周后甲烷占比快速增加到70%,后续稳定在80%左右,



原因可能是增大生物气循环频率可以加快固、液、气相的传质速率,提高反应器的产气性能。

在第一阶段,COD负荷为 $0.75 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,溶解性甲烷产量为 $0.08 \text{ L/d}$ ,甲烷以溶解性甲烷的形式流失。在第二阶段,当HRT为 $12 \text{ h}$ 时,COD负荷为 $1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,甲烷同样以溶解性甲烷的形式流失;当HRT为 $8 \text{ h}$ 时,COD负荷为 $1.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,气态甲烷产量为 $0.24 \text{ L/d}$ ,溶解性甲烷产量为 $0.29 \text{ L/d}$ ,溶解性甲烷产量占甲烷总产量的 $54.7\%$ 。Smith等<sup>[11]</sup>发现在AnMBR中有 $40\% \sim 50\%$ 的甲烷随出水流失,与本实验的结论相似。从厌氧出水中分离和回收溶解性甲烷的技术包括曝气、膜特性和运行条件的优化<sup>[12-13]</sup>,本实验探索了生物气循环对溶解性甲烷释放的影响。在第三阶段,共运行了5个周期,改变了气体冲刷频率,气态甲烷产量的平均值分别为 $0.05$ 、 $0.16$ 、 $0.25$ 、 $0.28$ 和 $0.24 \text{ L/d}$ 。在间歇 $3 \text{ h}$ 、循环 $1 \text{ min}$ 时,气态甲烷产量最大,甲烷产率(去除单位COD的甲烷产量)为 $0.14 \text{ L/g}$ ,且溶解性甲烷降低为 $0.16 \text{ L/d}$ ,溶解性甲烷产量占甲烷总产量的 $36.4\%$ ,仍有较多的甲烷以溶解性甲烷的形式流失,但与第二阶段相比,气态甲烷产量增加了 $16.7\%$ ,溶解性甲烷产量降低了 $45\%$ 。此外,在实验过程中,甲烷产率均低于理论值,与文献报道的甲烷产率( $0.14$ 和 $0.20 \text{ L/g}$ )相近<sup>[14-15]</sup>。总之,增加COD负荷和选择适当的生物气循环模式可以提高气态甲烷产量、降低溶解性甲烷产量。

### 2.3 AnDMBR的膜过滤性能

连续运行过程中的膜过滤性能见图4,其中TMP-on、TMP-off分别指出水泵连续抽吸、停止抽吸时的跨膜压差(TMP)。可知,进水浊度随着实际污水水质波动较大,第二、三阶段出水浊度均在运行 $10 \text{ d}$ 左右逐渐趋于稳定,约为 $(22.4 \pm 3.2) \text{ NTU}$ ,浊度去除率的平均值为 $88.4\%$ 。

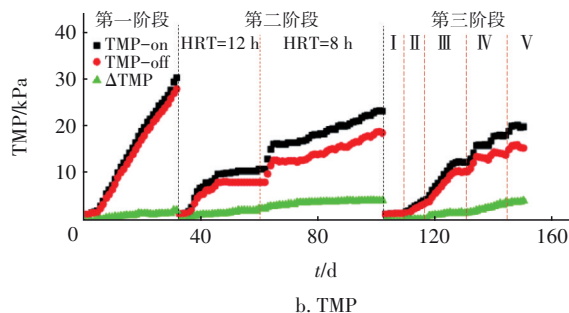
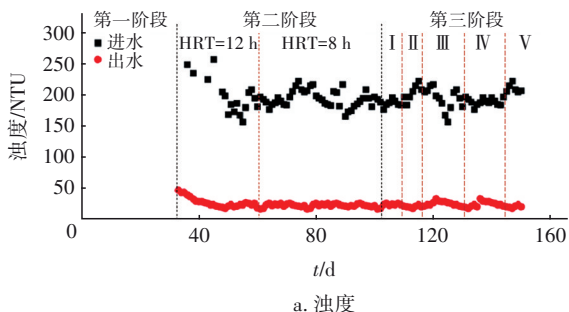


图4 AnDMBR的膜过滤性能

Fig.4 Filtration performance of AnDMBR

在第一阶段,TMP在运行 $30 \text{ d}$ 左右达到 $30 \text{ kPa}$ ,平均膜污染速率为 $0.84 \text{ kPa/d}$ ,可能是在连续生物气循环模式下,污泥絮体颗粒破碎、粒径减小、释放更多的胞外聚合物(EPS),从而加快膜污染速率<sup>[16]</sup>。第二阶段使用新的膜组件进行实验,自第一阶段的累积时间为 $32 \sim 62 \text{ d}$ 时,膜污染速率为 $0.31 \text{ kPa/d}$ ;累积时间为 $62 \sim 103 \text{ d}$ 时,膜污染速率为 $0.25 \text{ kPa/d}$ 。可以看出在第二阶段膜污染得到控制,反应器实现了稳定运行。TMP的分段增长可能是因为运行至 $62 \text{ d}$ 时改变了HRT,有机负荷增加,但膜污染速率未增加,这可能是因为反应器进入了稳定运行阶段,膜通量尚未达到临界值。第二阶段反应器的运行时间明显加长,原因可能是污泥颗粒粒径增大、EPS含量降低。第三阶段5个周期的膜污染速率分别为 $0.04$ 、 $0.38$ 、 $0.72$ 、 $0.46$ 和 $0.26 \text{ kPa/d}$ 。由2.2节可知周期I和II的产气量低,因此从后3个周期优选气体循环模式。周期IV和V产气量相差不大,但周期V的溶解性甲烷产量最低,且膜污染速率明显降低。综合3个阶段的实验结果,认为间歇 $2 \text{ h}$ 、气体循环 $1 \text{ min}$ 为最适合的气体循环模式。程刚<sup>[10]</sup>也进行了曝气抽停比的实验,发现当冲刷 $7 \text{ min}$ 、间歇 $1 \text{ min}$ 时反应器的运行时间最长,适当的曝气频率可以缓解膜污染,与本研究得出的结论相似。

### 2.4 污泥及动态膜性质

#### 2.4.1 颗粒粒径分布

取AnDMBR中的污泥和泥饼层样品做颗粒粒径分布(PSD)分析,结果见图5。3个阶段运行结束后混合污泥的平均粒径分别为 $138$ 、 $268$ 和 $219 \mu\text{m}$ 。无气体冲刷时,污泥经过长时间驯化,平均粒径会增大。若有气体冲刷,污泥粒径会有所减小,可能是大颗粒污泥在剪切力的作用下变成较小的颗粒,这与第一阶段出现严重的膜污染现象相吻合。第

二、三阶段结束后泥饼层的平均粒径分别为263和207  $\mu\text{m}$ ,表明间歇气体冲刷会导致污泥粒径减小并影响小颗粒在膜基材表面的黏附过程。

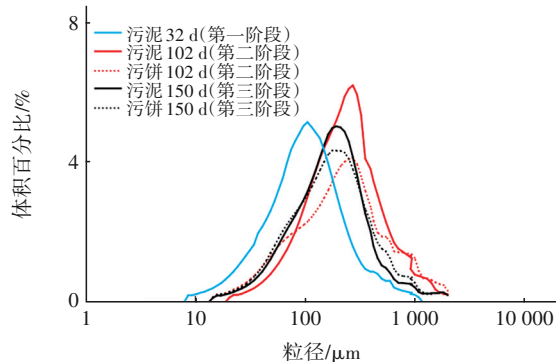


图5 污泥及泥饼的粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of sludge and sludge cake

#### 2.4.2 动态膜的SEM-EDX分析

图6为动态膜的SEM-EDX分析结果。

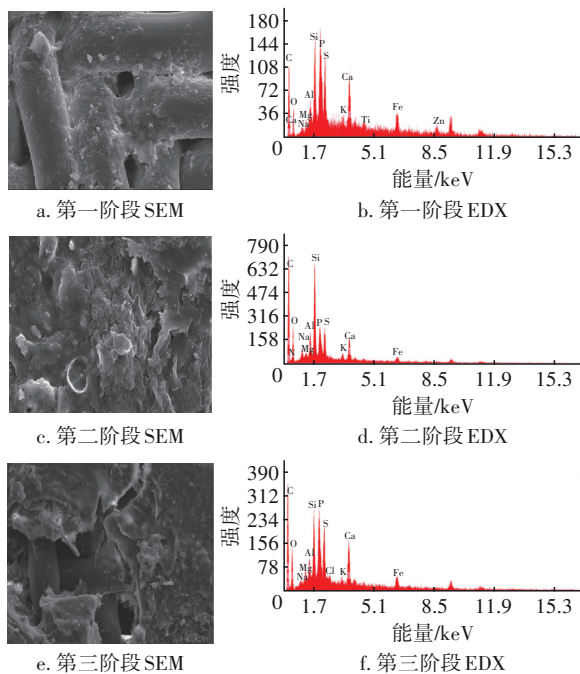


图6 动态膜的SEM-EDX

Fig.6 SEM-EDX of dynamic membrane

由图6可知,在第一阶段无泥饼层形成,在第二、三阶段都有稳定的泥饼层形成。从SEM照片可知,第一阶段主要是凝胶层污染,凝胶层主要由胶体和溶解性微生物代谢产物组成,其形态和物化性质与泥饼层有明显的不同,使用气体冲刷和反冲洗去除效果不明显<sup>[17]</sup>,这与第一阶段膜污染未得到有效控制的现象相吻合。在第二、三阶段的泥饼层主要由小颗粒、胶体和微生物代谢产物等组成<sup>[8]</sup>。

采用EDX分别测定了3个阶段结束时尼龙网表面污染层的元素种类及相对含量,检测到了C、O、K、Si、S、P、Ca、Fe、Al、Mg等元素。可知,第一阶段的金属元素种类及含量最多,特别是高价阳离子( $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等),其可与阴离子和微生物代谢产物中的有机官能团发生化学沉淀和生物沉淀<sup>[18-19]</sup>,附着在膜表面加速膜污染,这也与第一阶段膜污染未得到控制的现象相吻合。

#### 2.4.3 污泥和泥饼的微生物群落

图7为污泥和泥饼样品的微生物群落分析。

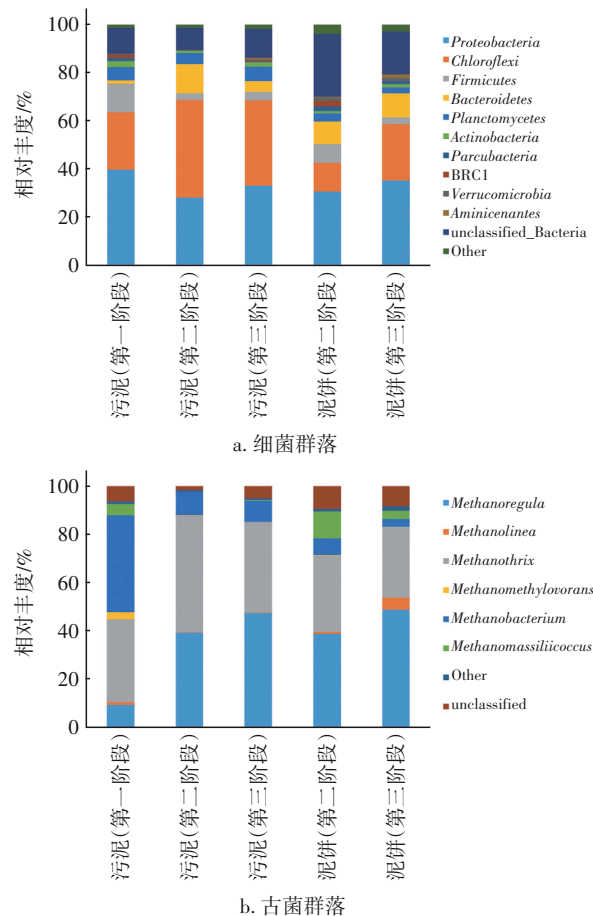


图7 污泥和泥饼样品的微生物群落分析

Fig.7 Microbial communities analysis of sludge and sludge cake samples

图7(a)显示了各阶段污泥及泥饼样品中门水平的微生物及相对丰度,其与常规厌氧反应器的优势菌属种类基本一致<sup>[20-21]</sup>。在所有污泥样品中,最主要的细菌菌群为变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*),它们在3个阶段的相对丰度分别为39.6%/23.7%/11.9%/1.4%、28.1%/40.4%/2.7%/12.1%

和33.0%/35.4%/3.5%/4.4%。*Proteobacteria*可以降解多种物质,例如纤维素、蛋白质和果胶等<sup>[22]</sup>,其在第一阶段丰度最高,在第二阶段丰度最低,可能是其更适合生长于完全混合式的反应器中。*Chloroflexi*可以通过消耗溶解性胞外聚合物(SEPS)来缓解膜污染<sup>[8]</sup>,3个阶段的SEPS浓度分别为22.2、4.7和9.2 mg/L,SEPS在第二阶段浓度明显下降,表明其被*Chloroflexi*消耗,这与第二阶段膜过滤性能提高相吻合。*Firmicutes*和*Bacteroidetes*的丰度较少,但在水解酸化过程中起到了重要作用<sup>[23]</sup>。

污泥及泥饼样品中科属水平的产甲烷古菌相对丰度见图7(b),产甲烷古菌主要由乙酸营养型和氢营养型产甲烷菌组成。在所有污泥样品中,主要的菌属是*Methanoregula*、甲烷丝菌(*Methanothrix*)和甲烷杆菌(*Methanobacterium*),*Methanothrix*属于乙酸营养型产甲烷菌,其他属于氢营养型产甲烷菌。污泥混合液中的*Methanoregula*、*Methanothrix*和*Methanobacterium*在3个阶段的相对丰度分别为9.7%/34.1%/40.1%、39.4%/48.2%/9.3%和47.4%/37.4%/8.7%,表明调控生物气循环模式会使微生物群落结构发生变化,在连续生物气循环时主要富集氢营养型产甲烷菌。实验中*Methanoregula*的富集说明其受运行模式变化的影响较小,*Methanothrix*和*Methanobacterium*的丰度出现波动,说明其受生物气循环模式的影响相对较大。

### 3 结论

① 3种生物气循环模式下,COD的去除率均超过80%,且无显著性差异。选择适当的生物气循环频率可以增加气态甲烷产量、降低溶解性甲烷占比,保障动态膜的结构稳定性、截留效果以及低污染过滤性能。

② 生物气循环可以提高传质效率,但是持续的生物气循环会破坏污泥结构、降低颗粒粒径,导致污染层以凝胶层为主、过滤阻力大;而间歇曝气模式下的污染层以泥饼层为主。生物气循环模式改变了污染层的物化性质和微生物种群结构。

③ AnDMBR优化运行的条件如下:膜基材为200目尼龙网,HRT=8 h,生物气循环模式为间隔2 h、循环1 min。

### 参考文献:

[1] 张世馨. 厌氧膜生物反应器处理城市污水中典型微

量有机污染物的分析研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.

ZHANG Shixin. Removal of Trace Organic Contaminants in Municipal Wastewater by Anaerobic Membrane Bioreactor [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021(in Chinese).

[2] 许颖,夏俊林,黄霞. 厌氧膜生物反应器污水处理技术的研究现状与发展前景[J]. 膜科学与技术,2016,36(4): 139-149.

XU Ying, XIA Junlin, HUANG Xia. State-of-the-arts/anaerobic membrane reactor for wastewater treatment and its future development [J]. Membrane Science and Technology, 2016, 36(4): 139-149 (in Chinese).

[3] CAYETANO R D S, PARK J H, KANG S H, et al. Food waste treatment in an anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR): performance monitoring and microbial community analysis [J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 158-164.

[4] 孙琪媛,胡以松,王晓昌,等. 污水处理中厌氧动态膜生物反应器的研究进展[J]. 工业水处理,2017,37(3): 1-5.

SUN Qiyuan, HU Yisong, WANG Xiaochang, et al. Research progress in anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(3): 1-5 (in Chinese).

[5] 程刚,朱雷,许颖,等. 厌氧动态膜生物反应器中动态膜形成及其运行周期的影响因素分析[J]. 环境工程学报,2018,12(5): 1408-1415.

CHENG Gang, ZHU Lei, XU Ying, et al. Analysis on factors influencing formation of dynamic membrane and operational cycle in anaerobic dynamic membrane bioreactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(5): 1408-1415 (in Chinese).

[6] SHAHID M K, KASHIF A, ROUT P R, et al. A brief review of anaerobic membrane bioreactors emphasizing recent advancements, fouling issues and future perspectives [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 270: 110909.

[7] LIN H J, PENG W, ZHANG M J, et al. A review on anaerobic membrane bioreactors: applications, membrane fouling and future perspectives [J]. Desalination, 2013, 314: 169-188.

[8] 杨媛. 两级动态膜反应器污水浓缩和厌氧发酵产能工艺特性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.

YANG Yuan. Study on the Process Characteristics of a



- Two-stage Dynamic Membrane System in Wastewater Concentration and Anaerobic Fermentation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021 (in Chinese).
- [9] 赵立健. 厌氧自生动态膜生物反应器处理低浓度废水的研究[D]. 济南:山东大学,2010.  
ZHAO Lijian. Study on Anaerobic Self-forming Dynamic Membrane Bioreactor for Low Strength Wastewater Treatment[D]. Jinan: Shandong University, 2010 (in Chinese).
- [10] 程刚. 外置式AFDMBR城市污水处理技术研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2018.  
CHENG Gang. The Study of External Anaerobic Fluidized Bed Dynamic Membrane Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] SMITH A L, SKERLOS S J, RASKIN L, *et al.* Psychrophilic anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater[J]. *Water Research*, 2013, 47 (4): 1655-1665.
- [12] RONGWONG W, GOH K, BAE T H. Energy analysis and optimization of hollow fiber membrane contactors for recovery of dissolve methane from anaerobic membrane bioreactor effluent [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 554: 184-194.
- [13] SETHUNGA G S M D P, LEE J, WANG R, *et al.* Influence of membrane characteristics and operating parameters on transport properties of dissolved methane in a hollow fiber membrane contactor for biogas recovery from anaerobic effluents [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 589: 117263.
- [14] PEÑA M, NASCIMENTO T, GOUVEIA J, *et al.* Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) treating municipal wastewater at ambient temperature: operation and potential use for agricultural irrigation[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 282: 285-293.
- [15] HUANG Z, ONG S L, NG H Y, *et al.* Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling[J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 705-713.
- [16] MAAZ M, YASIN M, ASLAM M, *et al.* Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: novel configurations, fouling control and energy considerations [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 283: 358-372.
- [17] LEI Z, WANG J, LENG L W, *et al.* New insight into the membrane fouling of anaerobic membrane bioreactors treating sewage: physicochemical and biological characterization of cake and gel layers [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 632: 119383.
- [18] 胡以松. A<sup>2</sup>O-MBR污水处理系统中膜污染物质和行为解析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.  
HU Yisong. Analysis of Membrane Foulants and Fouling Behaviors in an A<sup>2</sup>O-MBR System for Wastewater Treatment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013(in Chinese).
- [19] 孟凡刚. 膜生物反应器膜污染行为的识别与表征[D]. 大连:大连理工大学, 2007.  
MENG Fangang. Identification and Characterization of Fouling Behavior in Submerged Membrane Bioreactors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007(in Chinese).
- [20] ERSAHIN M E, TAO Y, OZGUN H, *et al.* Impact of anaerobic dynamic membrane bioreactor configuration on treatment and filterability performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 526: 387-394.
- [21] GAO D W, HU Q, YAO C, *et al.* Integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 240: 362-368.
- [22] 文雯. 活性炭投加对厌氧膜生物反应器甲烷发酵和膜污染控制效能的影响研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.  
WEN Wen. Investigation on the Effect of Activated Carbon Addition on Methane Fermentation and Membrane Fouling of Anaerobic Membrane Bioreactor [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019(in Chinese).
- [23] 龚凯. 厌氧膜生物反应器共消化处理餐厨垃圾与剩余污泥的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.  
GONG Kai. Research on Co-digestion Treatment of Food Waste and Excess Sludge in Anaerobic Membrane Bioreactor[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020(in Chinese).

作者简介:张晓玲(1995- ),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为膜法污水资源化技术。

E-mail:1512240531@qq.com

收稿日期:2022-04-05

修回日期:2022-07-07

(编辑:沈靖怡)