

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.011

AnMBR强化养殖废水能源回收的过程与效能

曾 婷¹, 胡以松¹, 唐嘉陵^{2,3,4}, 蒲云辉³, 黄 进^{3,4}, 史 强⁵,
潘声旺³, Abdelfatah Abomohra³

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 宜宾学院 固态发酵资源利用四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000; 3. 成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 4. 成都大学 农业农村部杂粮加工重点实验室, 四川 成都 610106; 5. 宜宾清和环保科技股份有限公司, 四川 宜宾 645250)

摘 要: 分析了厌氧膜生物反应器(AnMBR)与传统厌氧生物反应器(如UASB)处理养猪废水过程中的污染物去除特性、甲烷生成特征及微生物群落结构。结果显示,AnMBR对COD的去除率保持在80%~90%,而UASB仅为40%~60%。由于AnMBR的厌氧微生物产甲烷活性更强,故其甲烷产量(最大约为0.27 L/gCOD)较UASB的高。通过分析厌氧污泥中微生物群落结构发现,AnMBR污泥中富集了大量能去除难降解有机物的功能菌,还含有大量乙酸营养型和氢营养型产甲烷菌,有机物降解途径更丰富,甲烷生成途径更多样,进而保证了更高的甲烷产量。此外,AnMBR的能量回收效率高于UASB系统,表明AnMBR用于养殖废水处理不仅可高效去除污染物,还能强化能源回收。

关键词: 厌氧膜生物反应器; 养猪废水; 厌氧消化; 微生物群落结构; 能源回收

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0067-08

Procedure and Efficiency of Livestock Wastewater Energy Recovery Enhanced by AnMBR

ZENG Ting¹, HU Yi-song¹, TANG Jia-ling^{2,3,4}, PU Yun-hui³, HUANG Jin^{3,4},
SHI Qiang⁵, PAN Sheng-wang³, Abdelfatah Abomohra³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Solid-state Fermentation Resource Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin University, Yibin 644000, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 4. Key Laboratory of Coarse Cereal Processing <Ministry of Agriculture and Rural Affairs>, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 5. Yibin Qinghe Environmental Technology Co. Ltd., Yibin 645250, China)

Abstract: The characteristics of pollutant removal, methane generation and microbial community composition of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) and a traditional up-flow anaerobic sludge

基金项目: 四川省科技计划项目(2020YJ0196); 四川省农村发展研究中心项目(CR2001); 固态发酵资源利用四川省重点实验室开放基金资助项目(2018GTJ008); 成都水生态文明建设研究重点基地课题(2018SST-06、2018SST-15); 农业农村部杂粮加工重点实验室开放基金资助项目(2021CC007、2021HBZ004)

通信作者: 唐嘉陵 E-mail: tangjialing88@126.com; 胡以松 E-mail: yshu86@163.com

bed (UASB) in the treatment of swine wastewater were analyzed. The removal rate of COD in the AnMBR remained at 80%–90%, whereas that of UASB was merely 40%–60%. Owing to the higher methanogenic activity of anaerobic microorganisms, the methane yield of AnMBR (up to 0.27 L/gCOD) exceeded that of UASB. Through the analysis of the microbial community composition in anaerobic sludge, it was discovered that the AnMBR sludge was enriched with a considerable number of functional bacteria capable of removing refractory organic matters, and also contained a significant number of acetotrophic and hydrotrophic methanogenic bacteria. The degradation pathways of organic matters were more abundant, and the methanogenesis pathways were more diverse, thereby ensuring higher methane yield. Additionally, the energy recovery efficiency of the AnMBR was higher than that of the UASB system, suggesting that the AnMBR employed in livestock wastewater treatment not only effectively eliminated pollutants but also enhanced energy recovery.

Key words: anaerobic membrane bioreactor; swine wastewater; anaerobic digestion; microbial community composition; energy recovery

我国畜禽养殖废水每年排放了大量TN、TP和COD^[1]。养殖废水中有机物、氮、磷和悬浮物含量高^[2-3],且存在重金属、抗生素和病原微生物^[4],对环境的危害不容忽视。目前,主要采用固液分离、厌氧消化、好氧法及生态法等工艺处理养殖废水^[5-6]。厌氧消化可同时回收资源和能源,且运行成本较低,是理想的处理技术之一^[2]。但传统厌氧消化系统存在启动时间长、处理效果不稳定、甲烷化效率低、污泥流失严重等问题^[4,7-8]。厌氧膜生物反应器(AnMBR)是厌氧技术与膜分离技术的结合,能高效截留污染物,保证优异的出水水质,显著提升甲烷化效率^[9-10]。此外,AnMBR中水力停留时间(HRT)与污泥停留时间(SRT)分离,有利于世代周期较长的功能菌群(如产甲烷菌)在反应器中富集,从而提高系统的稳定性和甲烷产量^[10]。

尽管利用AnMBR处理废物的研究较多^[11-12],但有关其处理实际养殖废水长期运行的报道却比较少见^[7,13]。另外,与传统厌氧消化系统(如UASB)相比,AnMBR在有机物去除效果和能源回收效能等方面的优势还不得而知,相关的机制和生物学原理仍需进一步研究。基于此,笔者利用AnMBR与UASB同时处理实际养猪废水,考察其不同HRT条件下对养猪废水中污染物的去除效果、甲烷生成性能、能源回收效率等,再结合微生物活性特点及微生物群落结构特征,解析AnMBR强化养猪废水实现能源高效回收的过程与机制,旨在为AnMBR处理养殖废水的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 厌氧反应器

AnMBR反应器由有机玻璃制成,总体积为3.0 L,其中工作体积为2.6 L(见图1)。反应器上部植入氯化聚乙烯平板膜组件,膜面积为0.2 m²,孔径为0.2 μm左右。废水存储于进水桶中(4℃),通过蠕动泵注入反应器。进水泵与液位传感器连接以保持反应器内液面恒定。出水泵与膜组件相连,从膜组件抽出滤液。为避免膜污染过快,出水泵采用间歇模式(开8 min,关2 min)运行。出水管上安装压力传感器监测和记录跨膜压差(TMP)。当TMP超过40 kPa时,出水泵反转清洗膜组件,恢复膜通量。运行过程中,利用循环热水浴维持反应器内的温度为(37±1)℃,产气量采用湿式气体流量计测定。

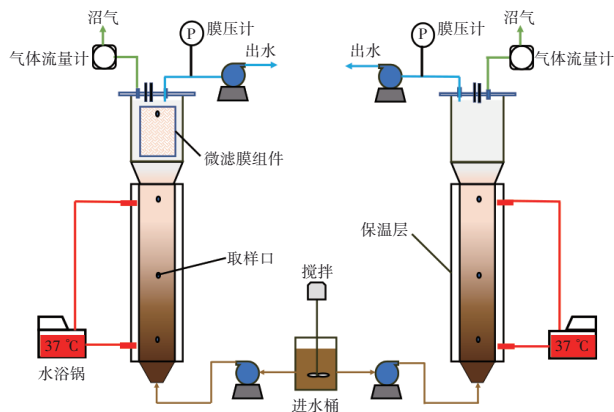


图1 AnMBR与UASB反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of AnMBR and UASB

实验分两个阶段进行,第一阶段系统的HRT为

15 d,第二阶段反应器流量提升至0.26 L/d,HRT调节为10 d。运行期间每天从反应器中排出剩余污泥,保证反应器的污泥停留时间为60 d左右。为探讨AnMBR与传统厌氧消化系统的不同,以及在有机物去除效果、能源回收效能方面的优势,同时运行一组UASB反应器作为对照。

1.2 养猪废水的来源与特点

1.2.1 养猪废水

养猪废水取自陕西省西安市蓝田县某养猪场废水贮存池。猪场内约有100头在栏肉猪,废水主要来源于尿液、部分粪便、饲料残渣和猪舍冲洗水等。养猪废水运至实验室后首先利用筛网过滤去除大于5 mm的颗粒残渣,而后储存于2~4℃冰箱中备用。预处理后废水中总化学需氧量(TCOD)、TN、NH₄⁺-N及总悬浮物(TSS)分别为13.3~27.8、1.2~3.1、0.9~1.7和8.1~9.9 g/L。

1.2.2 接种污泥

反应器的接种污泥为西安市某啤酒废水处理厂中温厌氧消化池污泥。污泥经过自然沉淀后去除上清液,而后分别接种至AnMBR和UASB中。接种污泥的悬浮固体浓度(MLSS)及挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)分别为10.9和5.4 g/L,MLVSS/MLSS值为0.49左右。

1.3 分析项目及方法

1.3.1 常规分析方法

水样中的COD、溶解性化学需氧量(SCOD)、TSS和挥发性悬浮固体(VSS)按照国家标准方法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解分光光度法测定,NH₃-N采用纳氏试剂分光光度法测定。气体组分采用气相色谱仪分析,仪器配有填充柱和热导检测器分析仪(TCD),载气为氩气。反应器出水中的挥发性脂肪酸(VFAs)和乳酸等采用高效液相色谱仪分析。

1.3.2 甲烷生成活性(SMA)分析方法

为探究厌氧微生物的产甲烷特性,参照先前的研究进行了甲烷生成活性实验^[14]。首先利用生理盐水缓冲液清洗厌氧污泥,去除有机物及杂质,然后将20 mL污泥分装至血清瓶中(工作容积为80 mL)。将预先配制的营养液(K₂HPO₄为1.76 g/L、NH₄Cl为0.45 g/L、MgSO₄·7H₂O为0.2 g/L、CaCl₂为0.3 g/L)煮沸0.5 h,去除溶解氧,冷却至室温后使用。向每个血清瓶添加50 mL底物(醋酸钠)和10

mL营养液,以确保所有血清瓶中的F/M值为0.5左右。随后,利用氮气吹洗血清瓶5 min,去除氧气,再利用橡胶塞密封,并迅速使用铝卷压紧。所有血清瓶均置于恒温摇床中培养[(37±1)℃,100 r/min]。定期测定瓶中生物气的产量和成分。设置3组平行实验,计算R_{max},并通过修正的Gompertz方程模拟确定SMA,见式(1)。

$$P = P_0 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{\max} \cdot e}{P_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中:P为甲烷的累积产生量,mL;P₀为最大产甲烷潜力,mL;R_{max}为甲烷的最大产生速率,mL/h;λ为延滞期,h;t为消化反应时间,h。

1.3.3 微生物群落分析

为考察污泥中微生物的群落结构,进行了高通量测序分析。细菌采用的扩增引物为341F: CCTACGGGNGGCWGCAG 和 805R: GACTACH-VGGGTATCTAATCC,古菌的测试采用340F: CCCTAYGGGGYGCASCAG、1000R: GGCCATGCAC-YWCYTCTC(第一轮)和349F: GYGCASCAGKCG-MGAAW、806R: GGACTACVSGGGTATCTAAT(第二轮)进行。利用Illumina MiSeq平台进行测序分析,并对获得的基因序列进行筛选和比对,进而获得微生物的种类及相对丰度。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果

运行过程中反应器对COD的去除效果如图2所示。

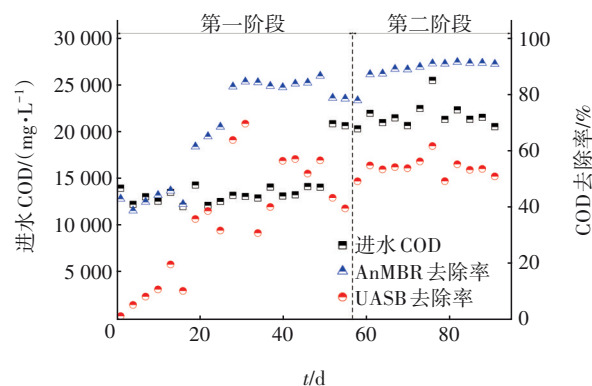


图2 不同反应器对COD的去除效果

Fig.2 Efficiency of COD removal by different reactors

尽管进水水质波动较大,但AnMBR运行稳定后对COD的去除率保持在80%~90%,而UASB出水

中的COD浓度受进水波动的影响较大,去除率只有40%~60%,明显低于AnMBR。可见与UASB相比,AnMBR对有机物的去除效果更好。这可能与两方面原因有关:首先,膜孔径较小,可将大部分颗粒态或大分子有机物截留于反应器内^[15],从而保证了出水的COD浓度较低;另外,由于膜组件的高效分离作用,使得SRT与HRT完全分离,更有利于微生物在反应器内富集,进而有助于物质快速降解转化,保证出水水质^[16]。此外,随着反应器的持续运行,微生物在反应器内逐渐被驯化成熟,两组反应器对COD的去除效果逐渐提高并保持稳定。

氨氮是产甲烷过程的重要影响因素之一^[8]。高氨氮浓度会改变微生物的群落结构,影响代谢途径,抑制厌氧微生物的活性,进而降低甲烷产量^[17]。运行过程中反应器对 NH_4^+-N 的去除效果如图3所示。可知,AnMBR和UASB中氨氮浓度的变化基本相似。AnMBR出水氨氮浓度在1 250~2 050 mg/L之间,而UASB出水氨氮浓度为1 320~2 150 mg/L,均不会对甲烷发酵过程产生严重影响。另外,两组反应器中的pH平均值为 7.1 ± 0.2 ,随着HRT的缩短,pH呈下降趋势,但始终维持在6.9~7.5之间,有利于厌氧消化产生甲烷。

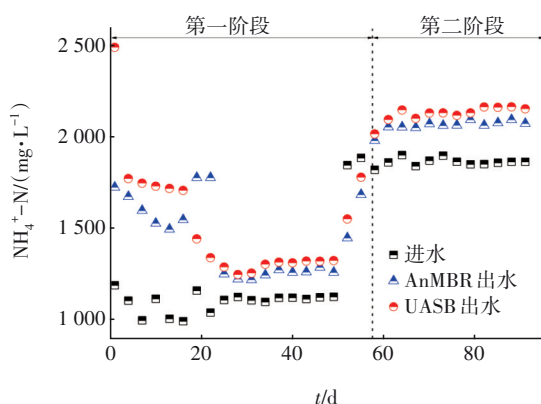


图3 不同反应器对 NH_4^+-N 的去除效果

Fig.3 Efficiency of NH_4^+-N removal by different reactors

各反应器中VFAs的变化如图4所示。第一阶段开始时,AnMBR出水VFAs浓度为2 g/L左右,这可能是由于反应器中微生物没有完全适应运行条件所致,但随着反应器的运行,出水VFAs浓度逐渐下降,最终维持在1 g/L以下,这可能与操作过程中细菌被驯化有关。VFAs的高效去除保证了甲烷的生成,同时也有利于获得较好的出水水质。UASB出水VFAs浓度始终高于AnMBR,表明膜组件的植

入有利于VFAs的高效转化,这可能是由于膜组件的截留作用更有利于功能微生物在反应器中富集,使反应器表现出更强的有机物降解能力。此外,反应器出水中丙酸和乙酸为VFAs的主要成分(见表1),这可能与进水中物质的组分特性及反应器内微生物群落结构有关^[15]。

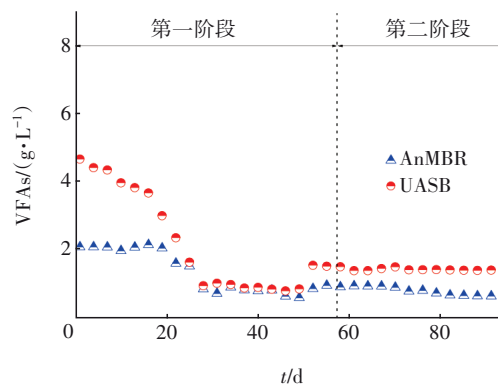


图4 各反应器中VFAs的变化

Fig.4 Change of VFAs in each reactor

表1 反应器运行过程中VFAs组分的变化

Tab.1 Change of VFAs in each reactor during operation %

项目	乳酸	乙酸	丙酸	异丁酸	丁酸	异戊酸	戊酸	己酸
第一阶段								
AnMBR	3.50	47.97	36.86	2.80	7.44	1.37	0.04	0.02
UASB	5.35	39.87	30.25	6.55	11.61	6.29	0.04	0.05
第二阶段								
AnMBR	2.85	31.29	45.29	2.60	17.16	0.73	0.04	0.05
UASB	2.47	29.19	43.08	5.57	18.34	1.34	0.01	0.00

2.2 甲烷回收性能

各反应器中生物气产量的变化如图5所示。可以看出,缩短HRT有利于提高生物气产量。在AnMBR中,当HRT为15 d时(第一阶段),生物气产量逐渐增加至0.9 L/d左右,缩短HRT至10 d时(第二阶段),生物气产量增加至1.3 L/d。这是由于在较低的HRT条件下,更多的有机物进入反应器中,从而使甲烷产量更高。第一阶段中UASB的生物气产量仅为0.7 L/d,第二阶段时生物气产量提升至1.1 L/d左右,均低于AnMBR中的生物气产量,表明AnMBR能够强化物质转化,提升生物气回收效率。

两个反应器中在第一阶段产生的生物气成分主要为 CH_4 、 CO_2 及少量 N_2 ,第二阶段主要为 CH_4 与 CO_2 。第一、二阶段AnMBR的生物气中甲烷含量分别为81.4%和82.5%,略高于UASB的(分别为79.0%和81.8%),说明AnMBR有助于甲烷化进程。

AnMBR 在第一阶段的平均甲烷产量为 0.27 L/gCOD,而第二阶段却降低至 0.23 L/gCOD。推断在此阶段,较高的有机负荷率(OLR)或 F/M 抑制了微生物的活性。据报道,高 F/M 会改变微生物的群落结构及活性,最终导致甲烷产量下降^[7]。而 UASB 的平均甲烷产量也由第一阶段的 0.22 L/gCOD 降至第二阶段的 0.19 L/gCOD。在 AnMBR 中,大分子或难降解有机物被膜组件截留于反应器中,有效延长了其在反应器中的停留时间,为有机物的甲烷化过程提供了有利条件^[18]。此外,膜组件还有助于功能微生物菌群富集,提高微生物活性,进而提高甲烷产率^[15]。

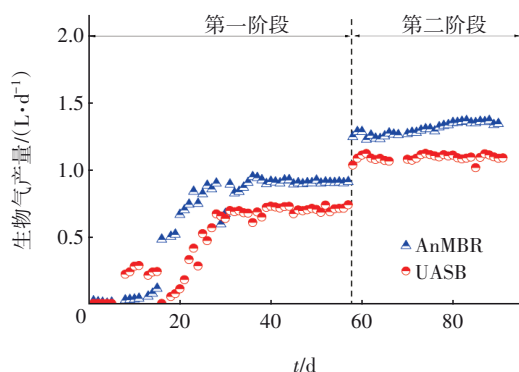


图5 各反应器中生物气产量的变化

Fig.5 Change of biogas production in each reactor

2.3 微生物活性的变化

第一阶段两组反应器的甲烷产率均较大,且 AnMBR 的甲烷产率及产量高于 UASB,这可能与产甲烷微生物的活性有关。为此,探究了两组反应器的甲烷生成特性。结果发现,AnMBR 污泥的最大甲烷产率和 SMA 值分别为 1.21 mL/h 和 6.65 mgCOD/(gVSS·h),远大于 UASB 污泥的最大甲烷产率(0.87 mL/h)和 SMA 值[5.24 mgCOD/(gVSS·h)]。此外,AnMBR 污泥的甲烷生成迟滞时间为 6.7 h,明显小于 UASB 污泥的(7.2 h),表明 AnMBR 污泥具有更高的产甲烷活性,进一步证实了 AnMBR 甲烷产量更高。

2.4 厌氧污泥微生物群落结构分析

2.4.1 细菌群落分析

采用高通量测序技术分析了厌氧污泥中细菌的群落结构,结果如图 6 所示。可以看出,AnMBR 与 UASB 的优势菌均为 *Firmicutes*、*Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria*,相对丰度之和分别为

92.7% 与 93.7%。其中 *Firmicutes*、*Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 能有效降解纤维素、蛋白质和果胶等^[19],有助于去除废水中的复杂有机物。此外,*Proteobacteria* 种类繁多,具有去除难降解有机物的能力,有利于物质的转化^[20]。AnMBR 中 *Proteobacteria* 的相对丰度为 18.5%,高于 UASB 污泥的(17.03%),这可能是 AnMBR 对有机物的去除率高于 UASB 的原因。*Actinobacteria* 可降解木质素^[21],能够为养殖废水中复杂有机物的转化提供条件。AnMBR 与 UASB 中 *Actinobacteria* 的相对丰度分别为 5.41% 与 8.37%,有利于有机物的高效降解,并为产甲烷菌提供优质底物,促进甲烷生成。另外,*Firmicutes* 中的某些种属(如 *Tissierella*)能高效降解蛋白质、葡萄糖等,并产生 VFAs(乙酸、丁酸和丙酸)等产甲烷菌的优质基质^[22],从而有利于甲烷的生成。

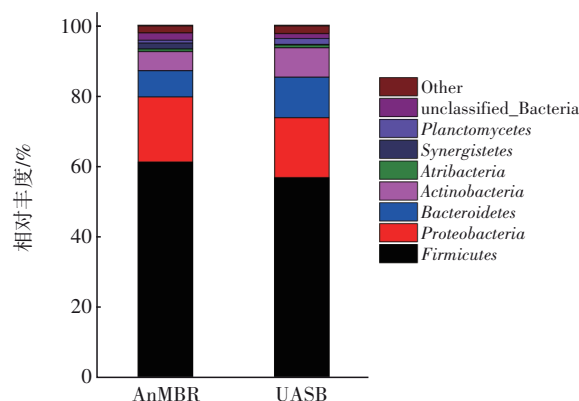


图6 厌氧污泥中细菌的相对丰度

Fig.6 Relative abundance of bacteria in anaerobic sludge

2.4.2 古细菌群落分析

图 7 为厌氧污泥中古细菌的相对丰度。可以看出,AnMBR 污泥中优势古菌属为 *Methanosarcina*、*Methanotrix*、*Methanoculleus* 和 *Methanobacterium*,其相对丰度之和高达 96.6%,而 UASB 污泥中优势古菌属为 *Methanosarcina*,相对丰度为 97.4%。由此可见,相较于 UASB,AnMBR 污泥中古菌微生物群落更加丰富。微生物群落的丰富度和物种的多样性反映了反应器的稳定性,可见相比于 UASB,AnMBR 处理养猪废水更加稳定,进一步解释了 AnMBR 中甲烷产量大于 UASB 的原因。

此外,*Methanosarcina* 和 *Methanotrix* 属是乙酸类营养型甲烷菌^[23],*Methanoculleus* 属是嗜氢营养型甲烷菌,*Methanobacterium* 则属于多营养型产甲烷菌^[24]。氢营养型产甲烷菌能够利用甲烷化过程中

产生的 H_2 与 CO_2 生成 CH_4 , AnMBR 污泥中氢营养型甲烷菌的相对丰度远高于 UASB 污泥的,说明甲烷的生成途径更多,底物降解多样性更丰富,进一步解释了 AnMBR 生物气中甲烷含量较高的原因。

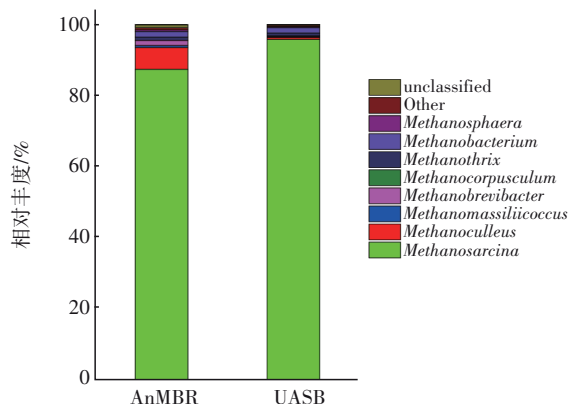


图7 厌氧污泥中古细菌的相对丰度

Fig.7 Relative abundance of archaea in anaerobic sludge

2.5 能量收支平衡分析

以单位体积养猪废水为计算基准,养猪废水分别在 AnMBR 与 UASB 中进行厌氧发酵,从而获得甲烷,产能按式(2)、(3)计算。

$$E_1 = P_{G1} - P_1 - P_2 - P_M - 1/2P_{M2} \quad (2)$$

$$E_2 = P_{G2} - P_3 - P_4 - P_M - 1/2P_{M2} \quad (3)$$

式中: E_1 为 AnMBR 系统处理单位体积养猪废水的净产能, $kW \cdot h/m^3$; P_{G1} 为 AnMBR 处理单位体积养猪废水产甲烷转化的电能, $kW \cdot h/m^3$; P_1 、 P_2 分别为 AnMBR 系统的进、出水泵所消耗的电能, $kW \cdot h/m^3$; E_2 为 UASB 系统处理单位体积养猪废水的净产能, $kW \cdot h/m^3$; P_{G2} 为 UASB 处理单位体积养猪废水产甲烷转化的电能, $kW \cdot h/m^3$; P_3 、 P_4 分别为 UASB 系统的进、出水泵所消耗的电能, $kW \cdot h/m^3$; P_M 、 P_{M2} 分别为系统中的水浴锅、搅拌装置所消耗的电能, $kW \cdot h/m^3$ 。

单位体积养猪废水产甲烷转化的电能 P_c 按式(4)计算。

$$P_c = \frac{V\alpha\eta}{Q} \quad (4)$$

式中: V 为甲烷量, mol; α 为甲烷的理论可用能量,取 $0.222 kW \cdot h/mol$; η 为甲烷产电的热转化率,取 33% ^[25]; Q 为养猪废水体积, m^3 。

泵所需的能量按照式(5)计算^[26]。

$$P = \frac{Q_1\gamma h}{1000Q_2} \quad (5)$$

式中: P 为所需的能量, $kW \cdot h/m^3$; Q_1 为进、出水泵流量, m^3/s ; γ 为 $9800 N/m^3$; h 为压力水头, m; Q_2 为反应器进、出水流量, m^3/h 。

以厌氧发酵单位体积养猪废水作为计算基准,各项能源参数结果见表2(HRT=15 d)。可以看出,处理 $1 m^3$ 养猪废水时, AnMBR 可产生约 $15.19 kW \cdot h$ 的电能,除去泵以及搅拌、水浴锅的能耗,净产能约为 $4.18 kW \cdot h$,说明 AnMBR 处理养猪废水可实现能源净收益。而 UASB 生成甲烷转化的电能为 $11.84 kW \cdot h$,除去泵以及搅拌、水浴锅的能耗,净产能仅为 $0.83 kW \cdot h$ 。由此可见,与 UASB 相比,利用 AnMBR 进行能源回收的优势更明显。

表2 AnMBR 与 UASB 的能量平衡计算结果

Tab.2 Calculation results of energy balance of AnMBR and UASB

项 目		AnMBR	UASB
能量消耗	进、出水泵流量/($10^{-9} m^3 \cdot s^{-1}$)	2.006	2.006
	反应器进、出水流量/($10^{-6} m^3 \cdot h^{-1}$)	7.222	7.222
	进水预估压力水头/m	1.2	1.2
	出水预估压力水头/m	2	0
	进水所需能量/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	3.266×10^{-3}	3.266×10^{-3}
	出水所需能量/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	5.44×10^{-3}	0
	进、出水泵所需总能量/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	13.39×10^{-3}	5.02×10^{-3}
	搅拌所需电能/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	1	1
	37℃水浴锅所需电能/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	10	10
能量产出	废水的甲烷产量/($m^3 \cdot m^{-3}$)	5.08	3.96
	甲烷能转化的电能/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	15.19	11.84
	净产能/($kW \cdot h \cdot m^{-3}$)	4.18	0.83

注: ^a表示膜阻力为 20 kPa; ^b表示假定泵能转化效率为 65%^[25]。

3 结论

① 在不同 HRT 条件下, AnMBR 对 COD 的去除率较为稳定,且保持在 80%~90%,远高于 UASB 的 40%~60%。AnMBR 出水中 VFAs 含量较低,且以乙酸和丙酸为主。AnMBR 对有机物的去除效果优于 UASB。

② 当 HRT 为 15 d 时,两组反应器的甲烷产量均较高。AnMBR 中甲烷产量可达 $0.27 L/gCOD$,高于 UASB 的甲烷产量和产率,且 AnMBR 中厌氧污泥的 SMA 值更大,微生物活性更强。

③ 厌氧污泥中 *Firmicutes*、*Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria* 为主要的功能菌群,为复杂有机物的降解提供了条件。与 UASB 相比,

AnMBR 污泥中不仅存在乙酸型产甲烷菌,还存在大量氢营养型产甲烷菌,有机物降解途径更丰富,甲烷生成途径更多样,进而保证了更高的甲烷产量。

④ AnMBR 处理养殖废水时的净产能为 $4.18 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, 而 UASB 仅为 $0.83 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, 这表明 AnMBR 适合处理养殖废水,且能达到较好的能源回收效果。但运行过程中 AnMBR 的膜污染特性及相关控制措施,仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱辉翔,张树楠,彭英湘,等. 绿狐尾藻湿地对养殖废水中不同污染负荷氮去除效应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 217-224.
ZHU Huixiang, ZHANG Shunan, PENG Yingxiang, et al. Effect of *myriophyllum elatinoides* wetland on nitrogen removal from swine wastewater under different pollution loads[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 217-224 (in Chinese).
- [2] ZHANG N, LIU W C, PENG Y Z, et al. Anaerobic membrane bioreactors for livestock wastewater treatment and resource recovery: opportunities and challenges[J]. Current Pollution Reports, 2021, 7(3): 277-285.
- [3] ZHANG M, LIU Y S, ZHAO J L, et al. Variations of antibiotic resistome in swine wastewater during full-scale anaerobic digestion treatment[J]. Environment International, 2021, 155: 106694.
- [4] 赵晨菊,余薇薇,喻涛,等. 微量元素强化厌氧发酵技术处理畜禽废水进展研究[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1107-1112.
ZHAO Chenju, YU Weiwei, YU Tao, et al. Research progress of trace element enhanced anaerobic fermentation technology to treat livestock wastewater[J]. Applied of Chemical Industry, 2021, 50(4): 1107-1112(in Chinese).
- [5] 廖新梯. 养殖废水处理理论与实践进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2317-2319.
LIAO Xindi. Research progress on livestock wastewater treatment technology[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(11): 2317-2319(in Chinese).
- [6] 徐圣君,王华彩,姜参参,等. 畜禽养殖废水生物处理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S2): 153-162.
XU Shengjun, WANG Huacai, JIANG Cancan, et al. Research progress on biological treatment technology of livestock and poultry breeding wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S2): 153-162(in Chinese).
- [7] JIANG M M, WESTERHOLM M, QIAO W, et al. High rate anaerobic digestion of swine wastewater in an anaerobic membrane bioreactor [J]. Energy, 2020, 193: 116783.
- [8] 张玉秀,孟晓山,王亚伟,等. 畜禽废弃物厌氧消化过程的氨氮抑制及其应对措施研究进展[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 985-998.
ZHANG Yuxiu, MENG Xiaoshan, WANG Yawei, et al. Research progress of ammonia inhibition and counter measures during anaerobic digestion of livestock wastes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(4): 985-998(in Chinese).
- [9] 臧颖,胡以松,杨媛,等. 投加零价铁对 AnDMBR 处理预浓缩污水的影响研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(8): 91-95.
ZANG Ying, HU Yisong, YANG Yuan, et al. Effects of zero-valent iron addition on anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for pre-concentrated wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(8): 91-95 (in Chinese).
- [10] ASLAM A, KHAN S J, SHAHZAD H M A. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment-potential benefits, constraints, and future perspectives: an updated review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149612.
- [11] VINARDELL S, ASTALS S, PECES M, et al. Advances in anaerobic membrane bioreactor technology for municipal wastewater treatment: a 2020 updated review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 130: 109936.
- [12] 晏习鹏,肖小兰,亓金鹏,等. 中试厌氧膜生物反应器对剩余污泥的消化效果[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 1-8.
YAN Xipeng, XIAO Xiaolan, QI Jinpeng, et al. Digestion of excess sludge in a pilot anaerobic membrane bioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 1-8(in Chinese).
- [13] 许美兰,李元高,叶茜,等. 厌氧旋转膜生物反应器处理畜禽养殖废水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(23): 91-95.
XU Meilan, LI Yuangao, YE Qian, et al. Treatment of livestock wastewater by anaerobic rotating membrane bioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34

- (23): 91–95(in Chinese).
- [14] YANG Y, ZANG Y, HU Y S, *et al.* Upflow anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment at room temperature and short HRTs: process characteristics and practical applicability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 383: 123186.
- [15] TANG J L, PU Y H, ZENG T, *et al.* Enhanced methane production coupled with livestock wastewater treatment using anaerobic membrane bioreactor: performance and membrane filtration properties [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126470.
- [16] HU Y S, CAI X L, XUE Y, *et al.* Recent developments of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment and bioenergy recovery: focusing on novel configurations and energy balance analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356: 131856.
- [17] 彭韵, 李蕾, 伍迪, 等. 微生物群落对氨胁迫响应的宏基因组学研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(2): 777–786.
- PENG Yun, LI Lei, WU Di, *et al.* Metagenomic analysis on the responses of microbial community to ammonia stress [J]. *Chinese Environmental Science*, 2022, 42(2): 777–786(in Chinese).
- [18] LEI Z, YANG S M, LI Y Y, *et al.* Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient temperature: a review of achievements, challenges, and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 756–768.
- [19] TANG V T, RENE E R, FU D F, *et al.* Effect of mixed microbial culture addition on enhanced river water quality: pollutant removal and microbial community characteristics [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 18: 100707.
- [20] JIA L P, JIANG B H, HUANG F, *et al.* Nitrogen removal mechanism and microbial community changes of bioaugmentation subsurface wastewater infiltration system [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122140.
- [21] QIN S Y, WAINAINA S, LIU H M, *et al.* Microbial dynamics during anaerobic digestion of sewage sludge combined with food waste at high organic loading rates in immersed membrane bioreactors [J]. *Fuel*, 2021, 303: 121276.
- [22] ZHANG L, LOH K C, ZHANG J X, *et al.* Three-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge: identifying bacterial and methanogenic archaeal communities and their correlations with performance parameters [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 285: 121333.
- [23] 张立国, 秦岩, 李建政, 等. UASB启动运行特征及互营丙酸氧化菌定量分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 615–622.
- ZHANG Ligu, QIN Yan, LI Jianzheng, *et al.* The performance of UASB at startup and the quantitative analysis of syntrophic propionate-oxidizing bacteria [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 615–622 (in Chinese).
- [24] 陈昌明, 张岩, 张博康, 等. AFMBR处理生活污水的功能菌群特性研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2099–2107.
- CHEN Changming, ZHANG Yan, ZHANG Bokang, *et al.* Study on the characteristics of microbial community in anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2099–2107(in Chinese).
- [25] ASLAM M, MCCARTY P L, SHIN C, *et al.* Low energy single-staged anaerobic fluidized bed ceramic membrane bioreactor (AFCMBR) for wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 240: 33–41.
- [26] XIONG J Q, YU S C, HU Y S, *et al.* Applying a dynamic membrane filtration (DMF) process for domestic wastewater preconcentration: organics recovery and bioenergy production potential analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 680: 35–43.

作者简介: 曾婷(1996–), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为废物资源化利用。

E-mail: 1141131696@qq.com

收稿日期: 2022-02-15

修回日期: 2022-06-12

(编辑: 任莹莹)