# AnMBR 处理高脂肪废水的运行特性和污泥性质研究

肖小兰[1,2]，施万胜[1,2]，黄振兴[1,2]，许之扬[1,2]，缪恒锋[1,2]，
任洪艳[1,2]，赵明星[1,2]，阮文权[*1,2]

（1. 江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 江苏省厌氧生物技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

**摘要：** 高脂肪废水是一类性质较为复杂的废水，在传统厌氧处理中面临污泥漂浮和流失问题。采用厌氧膜生物反应器（AnMBR）对高脂肪废水进行处理，考察了其在厌氧消化过程中的运行特性和污泥性质变化。结果表明，采用 AnMBR 处理高脂肪废水可获得良好的污染物去除效果和强健的稳定性，COD 去除效率可达 99%，挥发性脂肪酸（VFA）质量浓度低于 200 mg/L，然而在后期运行过程中发现消化效率下降。此外，原水中较高浓度的脂肪导致其水解产物–长链脂肪酸（LCFAs）在体系内发生累积，可能对消化效率及污泥性质产生不利影响。进一步监测其污泥性质发现污泥粒径从 26.5 μm 下降至 6.5 μm，而溶解性胞外聚合物（SMP）质量分数则由 47.7 mg/g 累积至 98 mg/g，污泥的相对疏水性从 28.2%上升至 68.1%，表明污泥性质发生恶化，从而导致了膜过滤性能下降，膜通量从 32 $L\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$ 衰减至 10 $L\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$。皮尔逊相关性测试表明，膜过滤性能与污泥粒径存在显著正相关关系，而与 SMP 和污泥相对疏水性呈较强的负相关关系。

**关键词：** 厌氧膜生物反应器；高脂肪废水；长链脂肪酸；污泥性质；污染

**中图分类号：**X 703.1　**文章编号：**1673–1689（2020）01–0084–09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673–1689.2020.01.012

# Operation Characteristics and Sludge Properties of the Anaerobic Membrane Bioreactor Treating Lipids–Rich Wastewater

*XIAO Xiaolan*[1,2]，*SHI Wansheng*[1,2]，*HUANG Zhenxing*[1,2]，*XU zhiyang*[1,2]，*MIAO Hengfeng*[1,2]，
*REN Hongyan*[1,2]，*ZHAO Mingxing*[1,2]，*RUAN Wenquan*[*1,2]

（1. School of Environment and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

**Abstract：** Lipids-rich wastewater is a kind of complex wastewater and easily leads to sludge floating and washingout in the treatment process of conventional anaerobic digestion. In this study，a pilot-scale anaerobic membrane reactor（AnMBR）was adopted to treat the high lipids wastewater，and its operation characteristics and sludge properties were investigated. Results showed that

**收稿日期：** 2018–01–13

**基金项目：** 国家自然科学基金项目（21276114）；国家科技支撑计划项目（2013BAB11B02，2014BAC25B01）。

**作者简介：** 肖小兰（1986—），女，博士，主要从事废水厌氧生物处理技术研究。E–mail：xiaoxiaolanfch@126.com

* **通信作者：** 阮文权（1966—），男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事厌氧处理技术和废物资源化研究。
E–mail：wqruan@jiangnan.edu.cn

excellent treating efficiency and robust stability were obtained in this systerm，with COD removal efficiency of 99% and VFA concenration below 200 mg/L. However，the digestion efficiency gradually decreased in the late operation stage. Additionally，the hydrolysis products of the high lipids in the influent，the long chain fatty acids（LCFAs），were gradually accumulated in the reactor，which may produce negative effects on the digestion efficiency and sludge properties. Furthermore，the sludge particle size decreased from 26.5 μm to 6.5 μm，while the soluble microbial products（SMP）increased from 47.7 mg/g to 98.0 mg/g and the relative hydrophobicity of sludge elevated from 28.2% to 68.1%. These variations further aggravated the fouling，resulting in an attenuation of flux from 32 L·(m²·h)⁻¹ to 10 L·(m²·h)⁻¹. The pearson correlation test showed that the membrane filtration presented a significant positive correlation with the sludge particle size and a strong negative correlation with the MLSS，SMP and sludge relative hydrophobicity.

**Keywords**：anaerobic membrane reactor，lipids-rich wastewater，long chain fatty acid，sludge characteristic，fouling

近年来，越来越多的工业过程中排放出一类高脂肪废水，例如屠宰场肉类加工、乳制品生产及餐厨垃圾处理过程等[1]。这类高脂肪废水含有高浓度的有机物，如直接排放于水体中将严重污染环境和危害人类健康。目前，采用厌氧生物处理将其转化为沼气是实现高脂肪废水资源化、无害化和能源化的有效方法。然而高脂肪废水是一类特殊的废水，其底物中的脂肪水解产物–长链脂肪酸（LCFAs）可吸附在微生物表面，阻碍传质过程，对微生物产生毒害作用，影响其生物性能[2]。国内外很多学者发现采用传统厌氧反应器处理高脂肪废水遇到诸多运行问题，如颗粒污泥的解体[3]、微生物上浮及流失[4]、产甲烷菌活性的抑制[5]以及反应器顶部泡沫积累[6]。曾科等[7]在采用 UASB 处理屠宰场废水过程中发现了严重的污泥上浮和流失问题，从而造成了系统处理效率降低。Hawkes 等[3]采用不同反应器例如 UASB、EGSB、AF 和厌氧接触反应器处理高脂肪冰淇淋废水，认为底物中的油脂对厌氧过程产生了严重影响。

厌氧膜生物反应器（AnMBR）的引入可以有效解决污泥流失问题[8]，膜对悬浮物的完全截留作用提高了反应器内微生物量，增强了其处理能力及处理效果，避免了传统厌氧反应器在处理高脂肪废水时遇到的污泥流失及处理效能低的问题。然而膜污染问题一直是 AnMBR 在实际应用中进一步推广的技术瓶颈。膜污染与诸多因素有关，如膜材质、运行条件、底物特性和污泥性质等。目前关于 AnMBR 在高脂肪废水处理过程中运行特性研究的报道并不多，尤其是关于 AnMBR 在处理实际废水中的膜污染及影响因素的报道较少。因此有必要对 AnMBR 处理高脂肪废水的运行效能及膜过滤性能做进一步研究。本研究以实际高脂肪餐厨废水为研究对象，考察了 AnMBR 在处理高脂肪餐厨废水长期不排泥运行过程中厌氧消化性能、LCFAs 累积、膜过滤性能和污泥性质等变化，分析了其内在的相互关系及可能原因，以期为其工业化应用提供理论指导和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 AnMBR 实验装置

本实验所用 AnMBR 为中式规模，置于苏州某餐厨垃圾处理厂，其结构及流程如图 1 所示。该装置主要由进水单元、厌氧反应单元及膜单元 3 部分组成。其中进水单元包括进水蠕动泵和搅拌装置，通过控制进水泵调节进水流量并采用连续进水模式，进水桶内通过连续搅拌以使进水水质均匀。厌氧反应单元包括主体厌氧罐、温控系统及在线监测系统等。主体厌氧罐有效容积为 1.0 m³，通过自动加热装置及温度控制系统实现温度维持在（39±1）℃。膜单元主要包括膜分离组件和循环泵，其中膜分离组件为外置式管式超滤膜组件，每个膜组件内部包含四根膜管，其直径为 8 mm、长度为 1 m，总膜面积为0.095 m²，膜材质为聚偏氟乙烯（MEMOS，德国），截

留相对分子质量为 100 000。循环泵的功率为 1.1 kW，流量为 2 $m^3/h$。通过调节膜浓缩液出口阀门开度以控制膜管内的平均运行压力为 0.23 MPa，膜表面错流速为 2.2 m/s。过滤后的浓缩液从底部回流至反应器，回流量为 26 L/min，产生的上升流速为 2.0 m/h，保证了底物与微生物的充分接触。

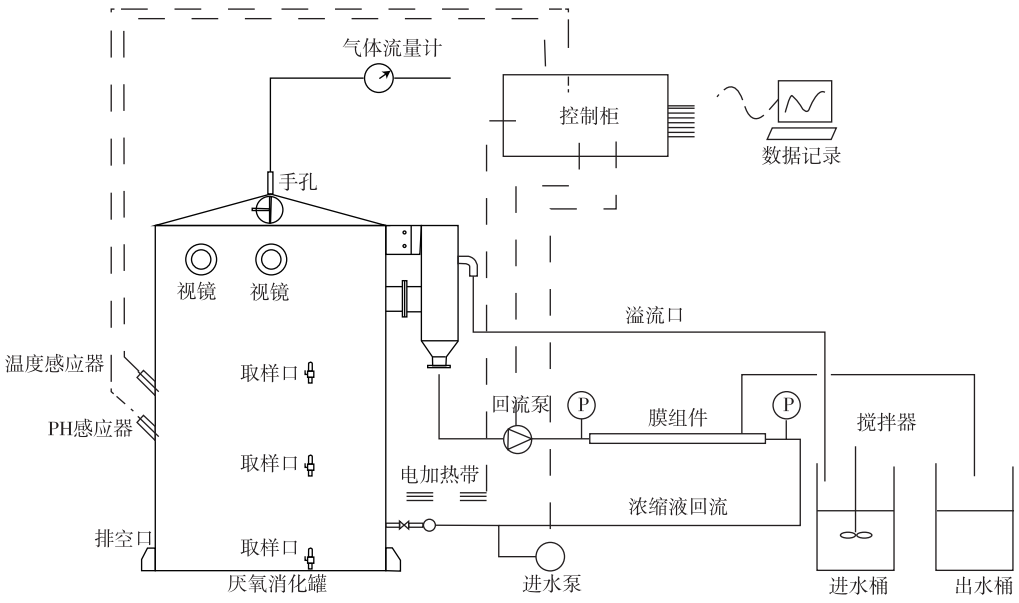



**图 1　厌氧膜生物反应器中试装置图**

**Fig. 1　Schematic diagram of AnMBR**

### 1.2　餐厨废水

本实验中所用高脂肪废水为苏州某餐厨垃圾处理工厂内餐厨垃圾经过高温蒸煮、三相分离工艺后得到的餐厨废水，其性质如表 1 所示。该餐厨废水含有高浓度有机质及悬浮固体，其平均 TCOD 达到 90.2 g/L，MLSS 为 18.5 g/L，为浆状。其中该废水中脂肪含量较高，平均值达到 5.95 g/L。

### 1.3　接种污泥

接种污泥为苏州某餐厨垃圾处理工厂内 CSTR 消化罐内的污泥，其本身对餐厨废水有较好的适应能力。接种污泥中 MLSS 为 7.1 g/L，MLVSS/MLSS 为 0.75，接种量为 1 $m^3$。

### 1.4　反应器运行

由于接种污泥取自现场处理餐厨废水的 CSTR 反应器内，对原水已经有了较好的适应性，因此，在 12 d 内通过采用逐渐提高进水量从而提高负荷的方法快速完成了反应器启动。由于初始运行时膜通量较大，多余的膜出水回流至反应器内。第 12 天后，膜通量迅速衰减，进水量根据膜出水量变化进行调整。整个过程中反应器不排泥运行，总共运行了 140 d。

### 1.5　检测项目和检测方法

电导率采用 DDS-307 电导率仪测定，TN、TP、氨氮、CODCr、MLSS、MLVSS 及 VFA 测定方法见标准测定方法[9]，碱度（以 $CaCO_3$ 计）的测定采用滴定法[10]；可溶性胞外聚合物（SMP）和结合性胞外聚合物（BEPS）的提取和测定参照肖小兰等[11]的测定方法；污泥相对疏水性根据微生物对碳氢化合物的吸附试验来测定[12]；脂肪含量和 LCFAs 分别采用乙醚提取和气相法测定[13-14]。沼气产量的测定采用在线湿式流量计计量，甲烷含量采用便携式红外沼气分析仪（Gasboard-3200L，武汉四方光电科技有限公司产品）测定；污泥粒径采用粒径分析仪（Ls230 型粒径分析仪）测定；采用 SPSS 软件 19.0（IBM corp.，USA）进行皮尔逊相关性分析。

## 2　结果与讨论

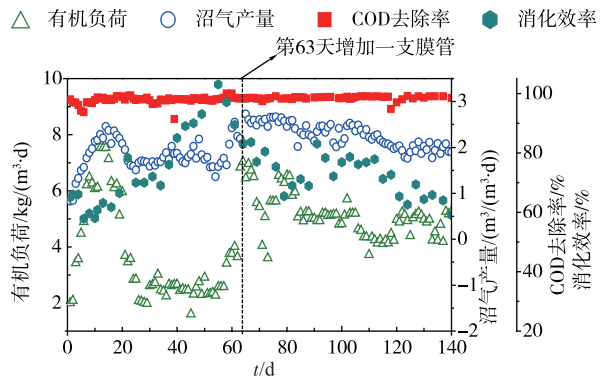
### 2.1　处理性能

AnMBR 在不排泥条件下总共运行了 140 d，其运行过程中厌氧消化性能及稳定性如图 2 所示。由图 2(a)可以看出，在反应器启动阶段（12 d 内），进

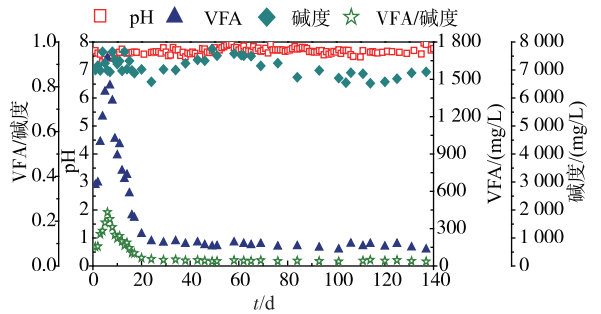
水有机负荷从 2 kg·(m³·d)⁻¹ 逐渐提升至 7.5 kg·(m³·d)⁻¹,COD 的总去除率达到 93%以上,沼气生产强度从 0.9 m³·(m³·d)⁻¹ 迅速提高至 2.8 m³·(m³·d)⁻¹ 左右,完成了反应器的快速启动。然而随着反应器的运行,发现膜通量逐渐衰减,进水量随之减少,从而导致进水有机负荷逐渐降至 2.5 kg·(m³·d)⁻¹ 左右,沼气生产强度约为 1.6 m³·(m³·d)⁻¹(图 2(a))。此外,在此阶段由于微生物对环境及底物的适应性增强,消化效率(由公式 1 计算)从初始接种时的 65%逐渐上升至 89%,在第 52 d 时甚至超过了 100%(图 2(a)),这很可能由于微生物对 LCFAs 的降解具有延滞性[15]。为了提升反应器的处理能力,第 63d 时增加了一个膜组件,由两个膜组件串联运行,最终 AnMBR 的进水有机负荷稳定在 4.5~4.9 kg·(m³·d)⁻¹,进水负荷的增加使得沼气生产强度最终稳定在 2.2 m³·(m³·d)⁻¹(图 2(a)),而在此阶段(第 52~140 d),消化效率又逐渐降低至 59%。已有研究表明[16],在处理含脂肪废水过程中,其水解产物 LCFAs 可对微生物产生毒害作用,影响其消化效率。在本研究中,由于 AnMBR 长期不排泥运行,LCFAs 又具有难降解性,很有可能造成了 LCFAs 在反应器内的累积,对底物降解效率产生一定影响。然而由于膜的截留作用,反应器内能维持较高的微生物量,对餐厨废水仍具有良好的处理效果,在反应器成功启动后的运行过程中,COD 的去除率均能保持在 99%以上。Dereli 等[17]报道了一个中试 AnMBR 处理玉米酒精发酵废水的工艺,获得的 OLR 在 4.5~7.0 kg/m³d,COD 去除效率达 98%。王旭等[18]采用 AnMBR 处理高浓度酒厂废水时,其 COD 去除效率均达到 94.2%以上,表明 AnMBR 处理高浓度废水时可得到高效的有机物去除效果。此外,在整个反应器的启动和运行过程中,沼气中的甲烷体积分数较为稳定,始终保持在 58%左右。在反应器启动后,挥发性脂肪酸(VFA)质量浓度均低于 200 mg/L(图 2(b)),碱度可达到 7 000 mg/L 左右,使得 VFA/碱度始终低于 0.2,小于失稳值 0.4,表明由于膜对微生物的完全截留作用,AnMBR 系统在遇到有毒物质 LCFAs 的累积时,其反应器内高浓度的微生物仍能使系统保持强健的稳定性。

## 2.2 脂肪水解产物 LCFAs 累积

由 2.1 可知,在 AnMBR 处理含脂肪餐厨废水运行后期发现消化效率逐渐降低,很可能因为长期



(a)有机负荷、沼气产量、COD去除率及消化效率变化



(b)pH、VFA、碱度和VFA/碱度

**图 2 AnMBR 不排泥长期运行下厌氧消化性能及稳定性**

**Fig. 2 Digestion performance and stability of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

不排泥运行条件下造成了 LCFAs 的累积,对微生物活性产生了影响。因此,对反应器内 LCFAs 含量进行了跟踪测定。由图 3 可知,初始接种时反应器内 LCFAs 的质量浓度只有 350 mg/L,随着反应器运行,至第 45、90、135 d 时其浓度分别达到 637、1 025、1 398 mg/L,表明 LCFAs 在反应器内产生了累积。Dereli 等[17]在采用中试 AnMBR 处理高脂肪废水时也发现较长的污泥停留时间可导致 LCFAs 的累积。LCFAs 的累积不仅对微生物的消化效率产生不利影响,对污泥性质及膜过滤性能也会造成一定影响。

## 2.3 长期的膜过滤性能

膜组件在 AnMBR 启动之前已经以现场处理餐厨废水的 CSTR 厌氧罐内消化污泥进行了过滤实验,试运行了 10 个月,并获得了稳定平均膜通量为 32 L/(m²·h)。随后将此膜组件与全混合式厌氧消化罐耦合成 AnMBR 处理高脂肪餐厨废水,并对其过滤性能进行了监测,结果如图 4 所示。当 AnMBR 启

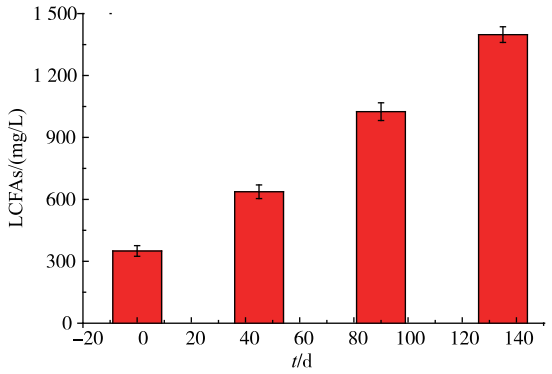



**图 3　AnMBR 不排泥长期运行下 LCFAs 累积**

**Fig. 3　Accumulation of LCFAs in the AnMBR operating without sludge discharge**

动运行至第 12 d 时,膜通量开始逐渐下降,在第 14 d 膜通量下降至初始膜通量的约 20%时进行清洗。清洗后初始膜通量能恢复到 32 L/(m²·h),随后继续运行时膜通量发生急剧下降,至第 21 d 再次清洗后初始膜通量难以达到 32 L/(m²·h),而且之后运行的膜通量衰减速率也较快。膜通量的降低导致膜出水量的降低,进而造成了进水量和进水负荷的降低。为了考察 AnMBR 处理餐厨废水的潜力,在第 63 d 时增加一个组件,最终在第 85 天两个膜组件的平均通量基本在 10 L/(m²·h),AnMBR 的进水有机负荷在 4.5~4.9 kg/(m³·d)。纵观整个运行过程可以发现,在处理高脂肪餐厨废水长期不排泥运行条件下的前期阶段(第 0~63 d),AnMBR 膜通量发生了显著衰减,从而也造成了 2.1 中前期阶段有机负荷的剧烈波动,而在后期阶段(第 63~140 d),AnMBR 只能维持在平均膜通量为 10 L/(m²·h)条件下运行。Saddoud 和 Sayadi[19]的报道中采用 AnMBR 处理屠宰场废水,其膜的性能参数及运行参数和本研究基本相似,获得的膜通量为 2-8 L/(m²·h),如此低的膜通量可大大增加投资成本和运行成本。本研究中膜通量的迅速衰减很可能由于长期不排泥条件下污泥性质发生恶化,而 LCFAs 的累积可对污泥性质产生极大影响[17]。

## 2.4　污泥性质

**2.4.1　MLSS 和 MLVSS 变化**　反应器内 MLSS 和 MLVSS 变化如图 5 所示,在 0~90 d 内,由于微生物的生长和富集,MLSS 和 MLVSS 缓慢增长,其质量浓度分别从 5.3、7.1 g/L 升高至 14.8、20.0 g/L。然而在运行后期(91~140 d),MLSS 和 MLVSS 出现了急剧增加,可能归因于 LCFAs 在反应器内的累积对微生物产生了毒性,致使其对底物的利用率降低,从而使进水中高浓度悬浮固体在反应器发生了累积。在反应器运行后期消化效率的逐渐降低很有可能因为进水高浓度悬浮固体没有得到有效降解。此外,MLSS 和 MLVSS 的升高可增加膜过滤阻力,降低膜通量。

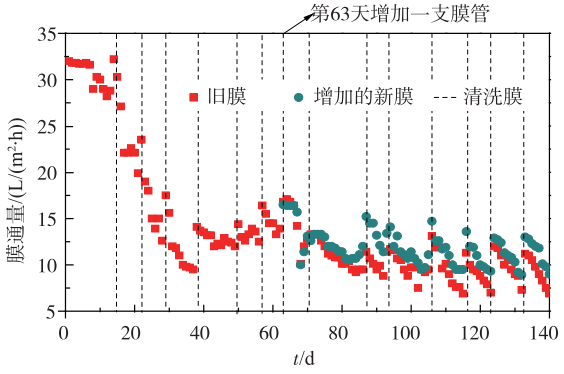



**图 4　AnMBR 不排泥长期运行下膜通量变化**

**Fig. 4　Flux variation of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

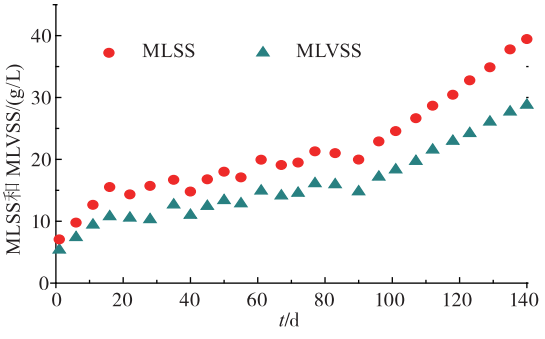



**图 5　AnMBR 不排泥长期运行下污泥质量浓度变化**

**Fig. 5　MLSS and MLVSS concentration variation of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

**2.4.2　污泥粒径**　AnMBR 运行过程中污泥粒径的变化如图 6 所示,在第 1~20 d 内,AnMBR 中污泥体积平均粒径从初始的 26.5 μm 急剧下降至 8.3 μm。Jesion 和 Ho 等[20-21]也发现了在外置式管式膜反应器内出现了污泥解絮作用,这是由于膜表面提供高错流速率的循环泵对污泥产生了剪切作用,从而造成了污泥颗粒粒径的迅速降低。较小的污泥颗粒更易于向膜表面迁移,堵塞膜孔或者在膜表面形成密实的泥饼层,从而造成膜通量的迅速衰减。随后污泥

体积平均粒径缓慢下降至 6.5 μm 左右，可能归因于长期不排泥条件下 LCFAs 的累积对微生物的毒害作用,造成了污泥絮体的逐渐解絮。此外,LCFAs 也是一种表面活性剂,其吸附在污泥表面容易造成污泥颗粒的解体[17]。

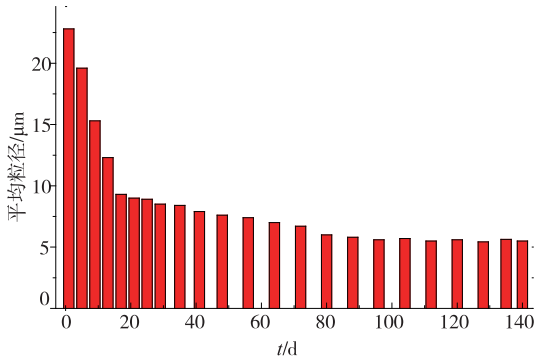



**图 6　AnMBR 不排泥长期运行下污泥体积平均粒径变化**

**Fig. 6　Average sludge particle size variation of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

**2.4.3　SMP 和 BEPS**　SMP 和 BEPS 中的主要物质是蛋白质(PN)和多糖(PS),它们是影响膜污染的主要原因[18-19]。AnMBR 长期不排泥运行下 SMP 含量变化如图 7(a)所示,在整个运行过程中 SMP 呈现累积趋势，其质量分数由初始 47.7 mg/g 逐渐上升至 98 mg/g。Anthony Masse 等[22]采用活性污泥系统处理市政废水也得出相似的结论,其研究结果表明污泥混合液上清液中 SMP 浓度在较长污泥停留时间内发生累积,这是因为在较长的污泥停留时间可导致微生物衰亡，进而释放难降解的微生物产物,SMP 浓度升高。在本研究中除此原因之外,长期不排泥条件下 LCFAs 的累积对微生物也会产生毒性,使微生物自溶,释放更多的 SMP,加剧了 SMP 的累积。此外图 7(b)中 SMP 中 PN 含量的明显增加表明 SMP 的累积主要是由 PN 引起的。孟凡刚[23]认为 SMP 对膜污染具有显著影响，在膜过滤过程中,SMP 极易堵塞膜孔,并且在膜表面逐渐形成凝胶层,加剧膜污染。

BEPS 是结合在细胞表面的微生物产物，对污泥的絮体结构具有重要作用。其总量变化如图 7(a)所示，随着反应器运行,BEPS 由初始质量分数 105 mg/g 逐渐降低至 51 mg/g。Cho 等 [24] 的研究认为 BEPS 浓度在较长的污泥停留时间下逐渐降低是微生物物质产率降低原因。在本研究中可能由于 LCFAs 的累积对微生物产生了毒性,降低了微生物的代谢活性,使微生物物质产率降低,分泌的 BEPS 减少。此外,BEPS 中蛋白质成分对于污泥聚合和生物絮凝起到重要作用,PN/PS 比值的降低与污泥粒径降低有着密切关系[25-26]。图 7(c)为 AnMBR 不排泥运行下 BEPS 中 PN 和 PS 的变化,从图中可以看出,PN 逐渐降低而 PS 无明显变化，导致了 PN/PS 的降低,从而造成了污泥粒径的降低,不利于膜过滤。

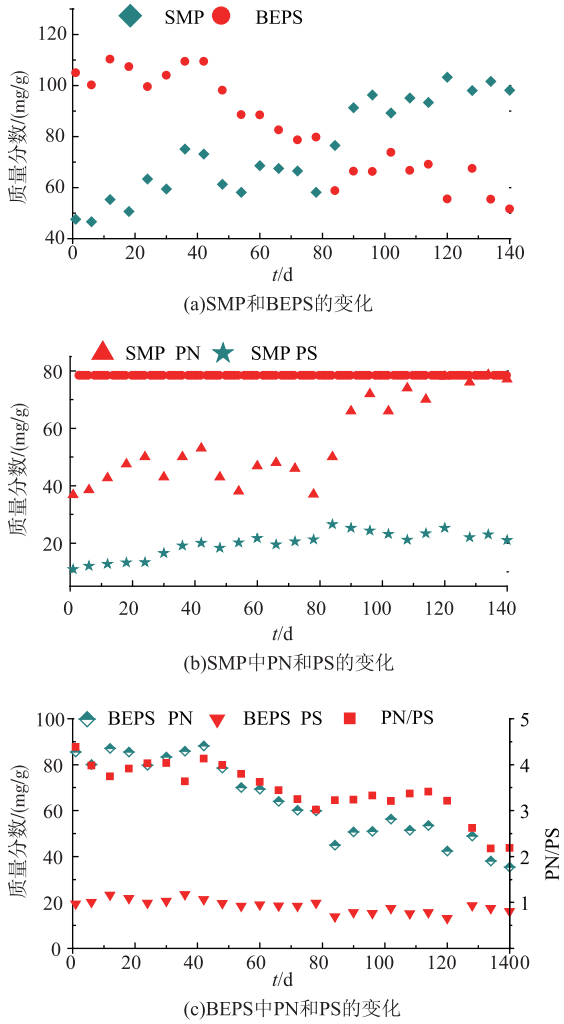



**图 7　AnMBR 不排泥长期运行下胞外聚合物的变化**

**Fig. 7　EPS variation of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

**2.4.4　相对疏水性**　不排泥运行下,AnMBR 内污泥的相对疏水性如图 8 所示,初始接种污泥的相对疏水性为 28.2%,随着反应器运行,污泥相对疏水性逐渐升高至 68.1%。污泥表面疏水性与诸多因素有关,例如底物及细菌组成等。据报道,降解 LCFAs 的乙酸菌为疏水性细菌[27]。此外,LCFAs 可吸附在细胞膜表面形成一层疏水性的脂肪层。这些都可能改变污泥的相对疏水性和表面特性。在本研究中,由于

LCFAs 的难降解性以及运行模式为不排泥运行,造成了 LCFAs 的累积。累积的 LCFAs 逐渐吸附在细胞膜表面,导致污泥相对疏水性的增加。Dereli 等[28]在处理玉米酒精发酵废水时也发现了在较长的污泥停留时间下 AnMBR 体系内出现了 LCFAs 的累积,进而造成了污泥相对疏水性的升高,膜过滤性能恶化。污泥的相对疏水性越高,污泥颗粒之间及活性污泥与膜表面之间存在的疏水作用越强,活性污泥颗粒越容易在膜表面沉积,使膜过滤阻力增大,膜通量降低。

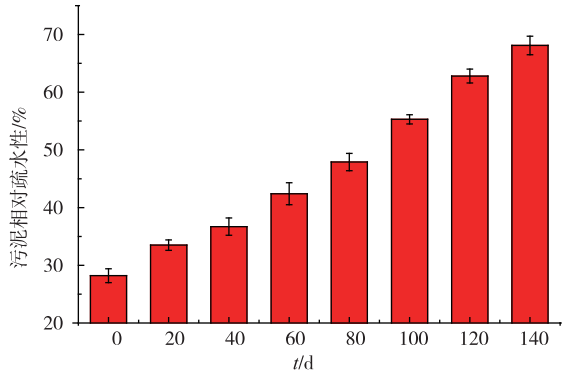



**图 8 AnMBR 不排泥长期运行下污泥相对疏水性变化**

**Fig. 8 Sludge relative hydrophobicity variation of the AnMBR under long term operation without sludge discharge**

### 2.5 膜过滤性能和污泥性质的相关关系

在 AnMBR 长期不排泥运行下,发现污泥性质和膜过滤之间存在统计学上的显著相关性。皮尔逊相关性($p$<0.05)测试结果表明(表 2),膜过滤性能与污泥粒径存在显著的正相关性,相关系数为 0.964,而与 BEPS 也存在着相对较强的正相关性,其相关系数为 0.777。相反的,其与 MLSS、SMP 和相对疏水性分别存在较强的负相关性,相关系数分别为-0.753、-0.822 和-0.757。此外,污泥性质参数之间也存在着相互影响关系。SMP 和 BEPS 之间存在一定的动态平衡,SMP 可以被微生物吸附成为 BEPS,而 BEPS 也可以脱离微生物成为游离的 SMP,因此 SMP 和 BEPS 之间存在显著的负相关性,其相关系数为-0.823。由于 SMP 和 BEPS 是由微生物分泌产生的,因此它们与 MLSS 存在显著相关关系,其相关系数分别为 0.870 和-0.861。此外,SMP 和 BEPS 还分别与污泥相对疏水性有着极其显著的正相关关系和负相关关系,相关系数分别为 0.921 和-0.931。尽管 BEPS 的疏水性基团对污泥相对疏水性有很大贡献,但是在本研究中并没有发现两者的正相关性,污泥相对疏水性的增强很有可能为累积的 LCFAs 吸附在污泥表面,其疏水性极强的长链烷基提高了污泥相对疏水性。从表 1 中还可以看出,污泥的相对疏水性与 MLSS 存在显著的正相关性,相关系数为 0.955,而与污泥粒径存在较强的负相关性,相关系数为-0.716。

**表 1 膜污染和污泥性质的相关性**

**Table 1 Correlations between fouling and sludge characteristics**

| 参数 | 污泥粒径 | SMP | BEPS | 相对疏水性 | 平均膜通量 |
|---|---|---|---|---|---|
| MLSS | -0.734 [a*] | 0.870* | -0.861* | 0.955* | -0.753* |
| 污泥粒径 | - | -0.702* | 0.637* | -0.716* | 0.964* |
| SMP | - | - | -0.823* | 0.921* | -0.822* |
| BEPS | - | - | - | -0.931* | 0.777* |
| 相对疏水性 | - | - | - | - | -0.757* |

注:a 皮尔逊相关系数("-"表示负相关);* 表示显著相关($P$<0.05)

## 3 结 语

考察了 AnMBR 处理含脂肪餐厨废水长期运行过程中运行特性和污泥性质变化,跟踪监测了产气量、COD 去除效率、LCFAs、污泥粒径、SMP、BEPS、污泥相对疏水性等相关参数变化,获得的结果可为规模化 AnMBR 处理高脂肪废水提供一定的理论基础和实际经验,具体结论如下:

由于膜对微生物的完全截留作用,采用 AnMBR 处理餐厨废水可获得良好的处理效果和强健的稳定性。长期不排泥运行可造成脂肪水解产物 LCFAs 的累积,对微生物产生一定的毒性,导致后期运行消化效率的逐渐降低。

LCFAs 的累积可能对污泥性质产生影响,如降低污泥粒径、促进 SMP 释放及提高污泥相对疏水性,从而间接地影响了膜过滤性能。

皮尔逊相关性测试表明,膜过滤性能分别与污泥粒径和 BEPS 有着较强的正相关关系,而与 MLSS、SMP 和污泥相对疏水性存在着较强的负相关关系。

## 参考文献：

[1] XIAO X，SHI W，HUANG Z，et al. Process stability and microbial response of anaerobic membrane bioreactor treating high-strength kitchen waste slurry under different organic loading rates[J]. **International Biodeterioration & Biodegradation**，2017，121：35-43.

[2] EWING J D，TAYLOR V，RICH B. Development，design and operations of full scale anaerobic membrane bioreactor technology leads to better than secondary effluent from high strength industrial waste[C]. Proceedings of WEFTEC.08 Conference，Chicago：2008

[3] HAWKES F R，DONNELLY T，ANDERSON G K. Comparative performance of anaerobic digesters operating on ice-cream wastewater[J]. **Water Research**，1995，29(2)：525-533.

[4] RINZEMA A，ALPHENAAR A，LETTINGA G. The effect of lauric acid shock loads on the biological and physical performance of granular sludge in UASB reactors digesting acetate [J]. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**，1989，46(4)：257-266.

[5] PEREIRA M A，MOTA M，ALVES M M. Operation of an anaerobic filter and an EGSB reactor for the treatment of an oleic acid-based effluent：influence of inoculum quality[J]. **Process Biochemistry**，2002，37(9)：1025-1031.

[6] ZHANG Y，YAN L，CHI L，et al. Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent [J]. **Journal of Environmental Sciences**，2008，20(6)：658.

[7] ZENG Ke，WAND Hongyou，MENG Fanchao，et al. Discussion on oil and grease removal in slaughterhouse and soybean processing wastewater treatment[J]. **Environmental Science and Technology**，2007，30(4)：91-92(in Chinese)

[8] YAN Lintao，HUANG Zhenxin，XIAO Xiaolan，et al. Pilot experiment of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR)for treating high-concentration organic wastewater[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2015，34(12)：1248-1255(in Chinese)

[9] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法(第 4 版)[M]. 北京：中国环境科学出版社，2002

[10] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京：中国轻工业出版社，1998

[11] XIAO Xiaolan，CHEN Kang，WANG Xinhua，et al. Influences of sludge retention time on sludge properties and membrane fouling of submerged membrane bioreactor with the addition of $Ca^{2+}$ [J]. **Membrane Science and Technology**，2012，32(4)：112-117.(in Chinese)

[12] ROSENBERG M，GUTNICK D，ROSENBERG E. Adherence of bacteria to hydrocarbons：a simple method for measuring cell-surface hydrophobicity[J]. **FEMS Microbiology Letters**，1980，9(1)：29-33.

[13] THIEX N J，ANDERSON S，GILDEMEISTER B. Crude fat，diethyl ether extraction，in feed，cereal grain，and forage (Randall/Soxtec/submersion method)：Collaborative study[J]. **Journal of AOAC International**，2003，86(86)：888-898.

[14] NEVES L，PEREIRA M A，MOTA M，et al. Detection and quantification of long chain fatty acids in liquid and solid samples and its relevance to understand anaerobic digestion of lipids[J]. **Bioresource Technology**，2009，100(1)：91-96.

[15] CAVALEIRO A J，PEREIRA M A，ALVES M. Enhancement of methane production from long chain fatty acid based effluents[J]. **Bioresource Technology**，2008，99(10)：4086-4095.

[16] HWU C S，VAN LIER J B，LETTINGA G. Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids[J]. **Process Biochemistry**，1998，33(1)：75-81.

[17] DERELI R K，HEFFEMAN B，GRELOT A，et al. Influence of high lipid containing wastewater on filtration performance and fouling in AnMBRs operated at different solids retention times [J]. **Separation and Purification Technology**，2015，139(139)：43-52.

[18] WANG Xu，WU Zhichao，TIAN Lumei，et al. Upflow flat-sheet membrane coupled anaerobic bioreactor for treatment of brewery wastewater[J]. **Environment Pollution and Control**，2007，29(10)：777-780.(in Chinese)

[19] SADDOUD A，SAYADI S. Application of acidogenic fixed-bed reactor prior to anaerobic membrane bioreactor for sustainable slaughterhouse wastewater treatment[J]. **Journal of Hazardous Materials**，2007，149(3)：700.

[20] JEISON D，TELKAMP P，VAN LIER J B. Thermophilic side stream anaerobic membrane bioreactors：the shear rate dilemma[J]. **Water Environment Research**，2009，81(11)：2372-2380.

[21] HO J，SUNG S. Effects of solid concentrations and cross-flow hydrodynamics on microfiltration of anaerobic sludge [J]. **Journal of Membrane Science**，2009，345(1-2)：142-147.

[22] MASSE A, SPERANDIO M, CABASSUD C. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time[J]. **Water Research**, 2006, 40(12): 2405-2415.

[23] MENG Fangang, ZHANG Hanmin, YU Liansheng, et al. Effect of activated sludge properties on short-Term membrane fouling in membrane bioreactor based on statistical analysis[J]. **Environmental Science**, 2006, 27(7): 1348-1352. (in Chinese)

[24] CHO J, SONG K G, YUN H, et al. Quantitative analysis of biological effect on membrane fouling in submerged membrane bioreactor[J]. **World Filtration Congress, New Orleans**, USA 18-22 April., 2004.

[25] LIAO B Q, ALLEN D G, DROPPO I G, et al. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. **Water Research**, 2001, 35(2): 339-350.

[26] MASSE A, SPERANDIO M, CABASSUD C. Comparison of sludge characteristics and performance of a submerged membrane bioreactor and an activated sludge process at high solids retention time[J]. **Water Research**, 2006, 40(12): 2405-2415.

[27] ALVES M M, PEREIRA M A, SOUSA D Z, et al. Waste lipids to energy: how to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA)[J]. **Microbial Biotechnology**, 2009, 2(5): 538-550.

[28] DERELI R K, GRELOT A, HEFFEMAN B, et al. Implications of changes in solids retention time on long term evolution of sludge filterability in anaerobic membrane bioreactors treating high strength industrial wastewater [J]. **Water Research**, 2014, 59(4): 11-22.

## 科　技　信　息

### 美国 FDA 批准大豆血红蛋白用作色素

2019 年 12 月 17 日，美国食品药物管理局(FDA)批准大豆血红蛋白用作色素。在新的食品成分上市前，相关公司有义务保证食品成分的安全性。

经过审核相关意见，FDA 认为在碎牛肉类似产品(如素食汉堡)中将大豆血红蛋白用作色素是安全的。

[信息来源]厦门 WTO/TBT-SPS 通报咨询工作站. 美国 FDA 批准大豆血红蛋白用作色素 [EB/OL]. (2019-12-19). http://swj.xm.gov.cn/xmtbt-sps/show.asp id=60958

### 欧盟评估一种柠檬酸铁螯合物作为饲料添加剂的安全性和有效性

2019 年 11 月 28 日，据欧盟食品安全局(EFSA)消息，应欧盟委员会要求，欧盟动物饲料添加剂和产品(FEEDAP)研究小组就 CI-FER (柠檬酸铁螯合物(ferric citrate chelate))作为哺乳和断奶仔猪以及小型猪的动物工艺性饲料添加剂的安全性和有效性发表科学意见。

经过评估，专家小组认为在建议使用水平(500 mg/kg 全价饲料)下该饲料添加剂对目标物种是安全的，并有可能改善动物工艺性参数。

[信息来源]食品伙伴网. 欧盟评估一种柠檬酸铁螯合物作为饲料添加剂的安全性和有效性 [EB/OL]. (2019-11-29). http://news.foodmate.net/2019/11/542446.html