

论述与研究

AHLs 信号分子对 MBR 膜生物污染的影响

肖 霄¹, 于 多¹, 郭海娟^{2,3}, 马 放^{1,3}, 纳 云⁴

(1. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036; 2. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 3. 江苏哈宜环保研究院有限公司, 江苏 宜兴 214200; 4. 青海省环境规划和环保技术中心, 青海 西宁 810007)

摘 要: 针对膜生物反应器 (MBR) 运行过程中膜污染的变化情况, 利用超高效液相色谱 (UPLC-MS/MS) 技术检测不同运行时期污泥和膜上滤层中 N-酰基高丝氨酸内酯 (AHLs) 类信号分子的含量和种类变化, 并结合胞外聚合物 (EPS) 与溶解性微生物产物 (SMP) 中各组分的含量变化, 对污染的阶段性变化和群体感应信号分子间的相互关系进行较为全面的分析。研究发现, 在 MBR 系统运行中, 导致膜生物污染的污染物有 EPS 和 SMP, 而主要有 3 种群体感应信号分子能促进混合液与生物滤层中污染物的分泌。其中, C8-HSL 能促进混合液 SMP 及 EPS 中多糖的产生, 3-oxo-C8-HSL 对混合液 SMP 中的蛋白质和 DNA 有很强的促进作用, 3-oxo-C6-HSL 能促进膜上 EPS 中蛋白质的产生, 表明群体感应信号分子通过影响污染物的产生来导致膜生物污染。

关键词: MBR; 膜生物污染; 群体感应; 信号分子

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0001-08

Impact of N-acyl Homoserine Lactones (AHLs) Signal Molecules on Membrane Biofouling

XIAO Xiao¹, YU Duo¹, GUO Hai-juan^{2,3}, MA Fang^{1,3}, NA Yun⁴

(1. College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Jiangsu HIT Yixing Academy of Environmental Protection Co. Ltd., Yixing 214200, China; 4. Qinghai Environmental Planning and Environmental Protection Technology Center, Xining 810007, China)

Abstract: Aiming at the change of membrane fouling during membrane bioreactor (MBR) operation, ultra-performance liquid chromatography linked to tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) was used to detect the content and species of AHLs type signal molecules in the activated sludge and the MBR biocake under different running time. Meanwhile, each component content of EPS and SMP in the biocake and activated sludge were detected. The relationship between the pollution and quorum-sensing signal molecules was analyzed. The results showed that, during the operation of MBR, the contaminants that cause membrane biofouling were EPS and SMP, and there were three groups of quorum-sensing

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0401102)

通信作者: 郭海娟 E-mail: guohaijuan@163.com; 马放 E-mail: mafang@hit.edu.cn

signal molecules that promoted the secretion of pollutants in the mixture and biocake. Among them, C8-HSL could promote the production of polysaccharides of SMP and EPS in the activated sludge, 3-oxo-C8-HSL had a strong effect on the protein and DNA of SMP in the mixed liquor, 3-oxo-C6-HSL could promote production of protein in EPS on membrane surface. It indicated that quorum-sensing signal molecules could cause membrane biofouling by affecting the generation of contaminants.

Key words: MBR; membrane biofouling; quorum sensing; signal molecule

相比于传统的污水处理方法,膜生物反应器(MBR)有很明显的优势,如占地面积小、容积负荷高、污泥产量低、出水水质好等,因而在工业废水和市政污水处理领域受到很大的青睐^[1]。但是,MBR的膜污染,尤其是膜生物污染会降低膜的使用寿命和透水性,这成为限制MBR发展的瓶颈问题^[2]。膜生物污染主要是微生物在膜上沉积、生长导致^[3],以往大部分学者都是在研究膜孔堵塞后对膜组件进行清洗的方法,然而对膜进行物理或化学清洗会造成膜损伤,并产生新的化学污染,同时也没有从根本上解决膜的生物污染问题^[4]。因此,为进一步扩大MBR的市场发展,需要从源头上进行有效的膜污染控制。

近年来,基于群体感应淬灭理论来控制膜生物污染的方法引起了众多学者的高度关注,因而急需从本质上弄清楚群体感应(QS)对MBR膜生物污染的影响^[5-6]。AHLs(N-酰基高丝氨酸内酯)类信号分子对群体感应调控的生物膜形成过程有非常重要的作用^[7]。Siddiqui等^[8]对不同浓度污泥和不同运行时间的生物滤层进行了AHLs活性检测,发现各浓度污泥中AHLs活性都很低,而不同运行时间形成的生物膜中AHLs活性差异则很显著,表明了群体感应和生物膜形成的密切相关性。

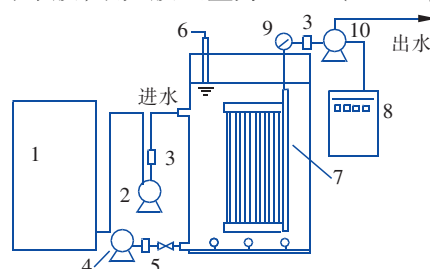
基于此,通过检测MBR运行周期中不同跨膜压力下污泥中和膜生物滤层上信号分子的含量和种类变化,找出导致膜生物污染的主要信号分子,并分析膜生物污染物与群体感应(QS)信号分子间的相关性,这对研究膜生物污染形成机理具有十分重要的意义,并有利于提出更有效的膜污染控制措施。

1 材料与方法

1.1 MBR 试验装置

浸没式MBR中试装置由有机玻璃制成,有效容积为150 L,如图1所示。膜组件为天津膜天膜有限公司的帘式中空纤维滤膜,膜孔径为0.1 μm,面积为1 m²,材质为PVDF,孔内外直径为0.7/1.2 mm,

膜通量为10 L/(m²·h),运行时在池体安装两片帘式中空纤维膜,最大膜通量为20 L/(m²·h)。



1.原水箱 2.进水泵 3.液体流量计 4.曝气泵 5.气体流量计
6.液位浮子 7.膜组件 8.控制箱 9.真空压力表 10.抽吸泵

图1 MBR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of MBR

1.2 MBR 运行与取样

接种污泥取自哈尔滨文昌污水处理厂曝气池,系统采用抽水8 min停2 min、底部曝气的运行方式,出水流量为15.6 L/h,污泥浓度(MLSS)维持在5 000~6 000 mg/L,控制溶解氧浓度为2.5 mg/L,污泥龄为43 d。反应器进水为人工配水,每天配水300 L,进水pH值在7.1~7.5之间。MBR的处理效果如表1所示。

表1 MBR处理效果

Tab.1 Pollutants removal by MBR

项 目	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水/ (mg·L ⁻¹)	500~600	30~40	300~350	5~6
去除率/%	90~95	10~50	5~15	30~90

跨膜压力(TMP)是反映污染状况最直观的指标,从置入未污染的膜组件开始,每天记录数显压力表TMP变化情况,不同运行时期对应着不同的TMP值。共取7个时间点(第16、21、25、29、35、39、44天)的活性污泥样品和生物滤层样品进行分析。

1.3 分析检测方法

1.3.1 EPS 提取方法

将混合液浓缩离心(4 300g,10 min),倒掉上清液后将剩下的污泥重新悬浮于超纯水中。加入体积分数为0.6%的甲醛(36.5%),在4℃下放置1 h

后,再加入体积分数为 40%、1 mol/L 的 NaOH 溶液(98%),4 ℃ 下放置 3 h。离心(1 000g,15 min,4 ℃)并过滤后,将 EPS 提纯以去除残留的甲醛以及其中的离子杂质^[9-10]。将剪下的膜丝加适量超纯水后进行漩涡振荡器振荡,得到污泥悬浮液,后续步骤和提取活性污泥中 EPS 的一致。

1.3.2 SMP 提取方法

取 50 mL 污泥样品离心 10 min(4 ℃、5 000g),再静置 0.5 h,上清液过滤待用^[11]。将剪下的膜丝加适量超纯水后采用漩涡振荡器振荡,得到污泥悬浮液,后续步骤和活性污泥中 SMP 提取步骤一致。采用苯酚硫酸法测定 EPS 和 SMP 中的多糖含量^[12],采用 Folin-酚试剂法测定蛋白质含量^[13]。

1.3.3 AHLs 提取方法

将待测样品在 9 000g 的条件下离心 10 min,采用 0.22 μm 的滤膜过滤,滤液加入等体积并添加 0.5% 甲酸的乙酸乙酯,180 r/min、25 ℃ 振荡 2 h,萃取 3 次,每次振荡 10 min,将 3 次萃取的有机层在旋转蒸发仪上浓缩至 2~3 mL,液氮吹干,将残留物于 -20 ℃ 下密封保存待用^[14]。

1.3.4 UPLC-MS/MS 检测提取的 AHLs

采用 UPLC-MS/MS(超高效液相色谱技术)检测从活性污泥和膜生物滤层中提取的 AHLs 时,将氮吹后的样品用 2 mL、50% 的乙腈溶解,用 0.22 μm 的膜过滤到液相小瓶中(润洗、装瓶 1.5 mL),上机检测。

采用 150 mm 色谱柱,首先对目标信号分子进行调谐,使目标信号分子出现的峰值最强,并使毛细管电压为 3.8 kV,锥孔电压为 30 V,脱溶剂气温度为 450 ℃,载气流速为 650 L/h,锥孔流速为 50 L/h,离子源温度为 150 ℃,柱温为 30 ℃^[14-16]。

2 结果与讨论

2.1 MBR 跨膜压力变化趋势

在低于临界通量下保持恒定通量运行 55 d,在保证 MBR 运行效果的条件下,通过精度为 0.5 kPa 的数显压力表测得的 TMP 如图 2 所示。在 55 d 的运行过程中,TMP 呈现两段式变化,前 42 d TMP 缓慢增加,42 d 时发生陡增,这种临界通量下的两段式变化与很多研究一致^[8,17],即跨膜压力随着污染物在膜上的黏附、微生物生长繁殖、膜孔堵塞等污染的加重而不断升高。研究表明,生物滤层中微生物代谢产物(SMP)或胞外聚合物(EPS)是导致膜污染

的主要因素,而这些细胞代谢物的主要成分为蛋白质、多糖、核酸等,具有黏附、堵塞膜孔、降低孔隙率的作用^[18]。生物滤层的形成是导致膜通量下降的主要原因,生物滤层的属性与 TMP 变化密切相关,而生物滤层的形成和群体感应密切相关。

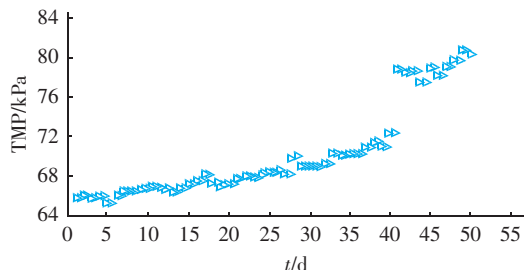
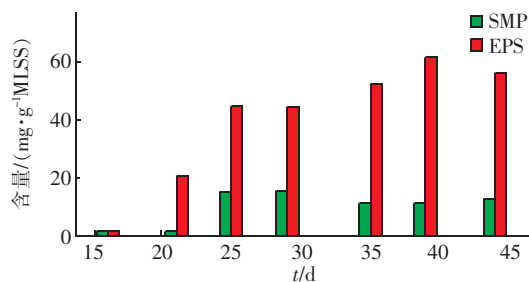


图 2 跨膜压力变化曲线

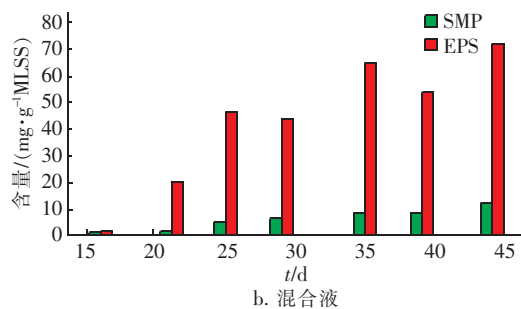
Fig. 2 Variation of TMP with time in MBR

2.2 生物滤层和污泥中的 SMP、EPS 变化

经测定,生物滤层和混合液中 EPS 的产生量始终多于 SMP(见图 3)。在起始阶段生物滤层中的 SMP 含量不高,但由于其亲水性较强,能在膜表面形成黏状松散的泥而逐渐堵塞膜孔。EPS 含量则急剧增加,可以认为随着 MBR 运行时间的延长,膜上附着的微生物逐渐增多并可能激发群体感应的发生,从而促进 EPS 的分泌,加剧膜污染。



a. 生物滤层



b. 混合液

图 3 生物滤层和混合液中 EPS 与 SMP 的含量变化

Fig. 3 Contents of EPS and SMP in biocake and mixed liquor

图 3(b) 显示,混合液中 EPS 的变化幅度更大,

上升趋势较为明显。在运行初期,微生物通过不断分泌胞外聚合物使絮体粒径增大,故此时 EPS 含量增长较快。当 MBR 运行至稳定阶段,由于污泥浓度和系统运行的稳定,微生物群落结构也趋于稳定,虽然会不断产生胞外聚合物,但由于受到水流紊动、扩散等因素的影响,EPS 含量变化较小。SMP 含量在整个运行过程中稳定上升,水流剧烈的紊动能够加速 SMP 扩散;长时间的曝气也会导致部分絮体破碎,使 EPS 与环境接触面积增大,导致释放到液相中的 SMP 增多。

2.3 生物滤层与污泥混合液中污染物的相关性

表2是根据混合液和膜上生物滤层中的 EPS 和 SMP 间的线性关系,研究膜污染物 EPS 和 SMP 的迁移与转换。Pearson 相关系数是用来反映两个变量间线性相关程度的统计量,显著性(P 值)是指两个变量之间的任何差异是由于系统因素而不是偶然因素的影响。Pearson 相关系数 r 的取值在 $-1 \sim 1$ 之间, $|r| > 0.8$ 表示两个变量间有较强的线性关系, $|r| < 0.3$ 表示两个变量之间的线性关系较弱。

表2 混合液和生物滤层中污染物之间的相关性

Tab.2 Correlation of SMP and EPS in mixed liquor and biocake

项 目	混合液 EPS	混合液 SMP	膜 EPS	膜 SMP
混合液 EPS				
r	1.000	0.718	0.946 **	0.845 *
P 值		0.069	0.001	0.017
混合液 SMP				
r	0.718	1.000	0.609	0.665
P 值	0.069		0.147	0.103
膜 EPS				
r	0.946 **	0.609	1.000	0.824 *
P 值	0.001	0.147		0.023
膜 SMP				
r	0.845 *	0.665	0.824 *	1.000
P 值	0.017	0.103	0.023	

注: ** 表示在 0.01 水平上相关性显著(双尾);
* 表示在 0.05 水平上相关性显著(双尾)。

混合液 EPS 与膜上 EPS、膜上 SMP 的相关系数分别为 0.946 和 0.845, P 值分别为 0.001 和 0.017, 在 0.01 和 0.05 水平上线性关系显著,即膜上 EPS 和 SMP 含量与污泥混合液中 EPS 含量变化具有一致性。这表明混合液中的 EPS 随水流紊动扩散,使更多污染物和细菌吸附沉积在膜上,形成膜上的 SMP 和 EPS,从而加速生物滤层的形成。膜上 EPS 和膜上 SMP 的相关系数为 0.824, P 值为 0.023, 在 0.05 水平上线性关系显著,再结合 2.2 节的结果,可知膜上的 SMP 有很大一部分是由膜上的 EPS 释

放而来,故 EPS 是 MBR 运行过程中的主要污染物。

2.4 生物滤层和污泥混合液中 EPS 组分变化

在 MBR 整个运行阶段,生物滤层中蛋白质和 DNA 含量都有增高,而多糖含量变化甚小(见图 4)。EPS 中的蛋白质是主要污染物,微生物通过群体感应分泌 EPS 促进生物膜的形成。而在污染后期,多糖和 DNA 略有增多可能是由于生物膜的衰亡释放所致。Gao 等^[18]研究表明,在 20 和 30 °C 时,混合液和生物滤层中的 EPS 和 SMP 主要成分均为多糖,10 °C 时则主要为蛋白质。多糖含量随温度的降低而降低^[19],蛋白质含量随温度的降低而升高^[20]。反应器运行阶段正值冬天,可能由于气温较低,导致蛋白质成为主要污染物。

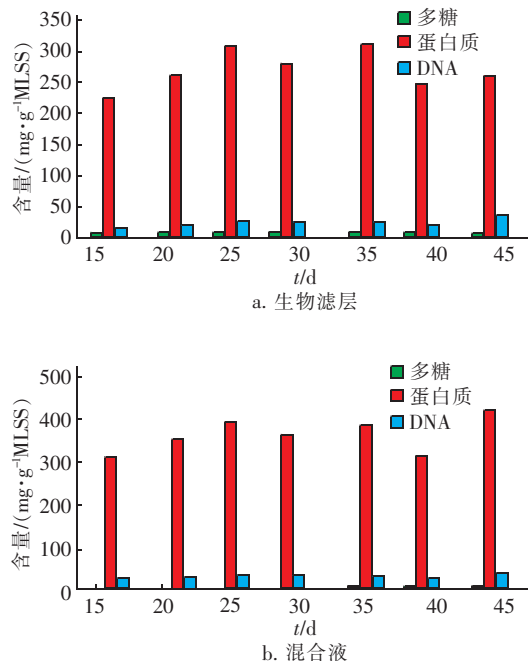


图4 生物滤层和混合液中 EPS 组分含量变化

Fig.4 Variation of EPS component content in biocake and mixed liquor

由图4(b)可知,混合液中 EPS 各组分的含量变化与膜上的基本一致,蛋白质仍为主要成分,多糖含量较少,在中前期稳定,后期略有增长。混合液中蛋白质的变化趋势与膜上生物滤层中蛋白质的变化趋势相似,但含量更多。生物滤层和污泥混合液处于一个体系中,污泥来源相同,环境条件相似,因此,膜上生物滤层中各组分的比例及含量变化与混合液中相似,这与 Wu 等的研究结果相近^[21]。

2.5 生物滤层和混合液中 SMP 组分变化

在生物滤层的 SMP 中蛋白质仍为主要的污染

物,但随着跨膜压力的增大,先呈明显下降趋势,再趋于稳定,而 DNA 和多糖含量变化不大且含量少(见图 5)。蛋白质在 MBR 运行 20 d 后有所下降是微生物吸附到生物膜上造成的。由于对环境的不适应和营养物摄取的困难,微生物消耗自身产生的一部分 SMP,便于代谢繁殖并分泌胞外聚合物,以更好地黏附到滤膜上,当生物膜上的微生物群落结构稳定以后,对环境的抵抗力有所增强,能够稳定地从外界获取营养物质,使得 SMP 中各组分维持在一个相对平衡的状态。

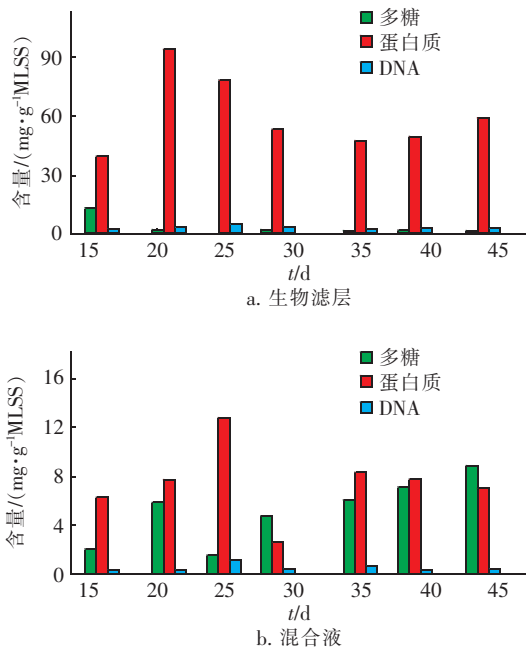


图 5 生物滤层和混合液中 SMP 组分含量变化

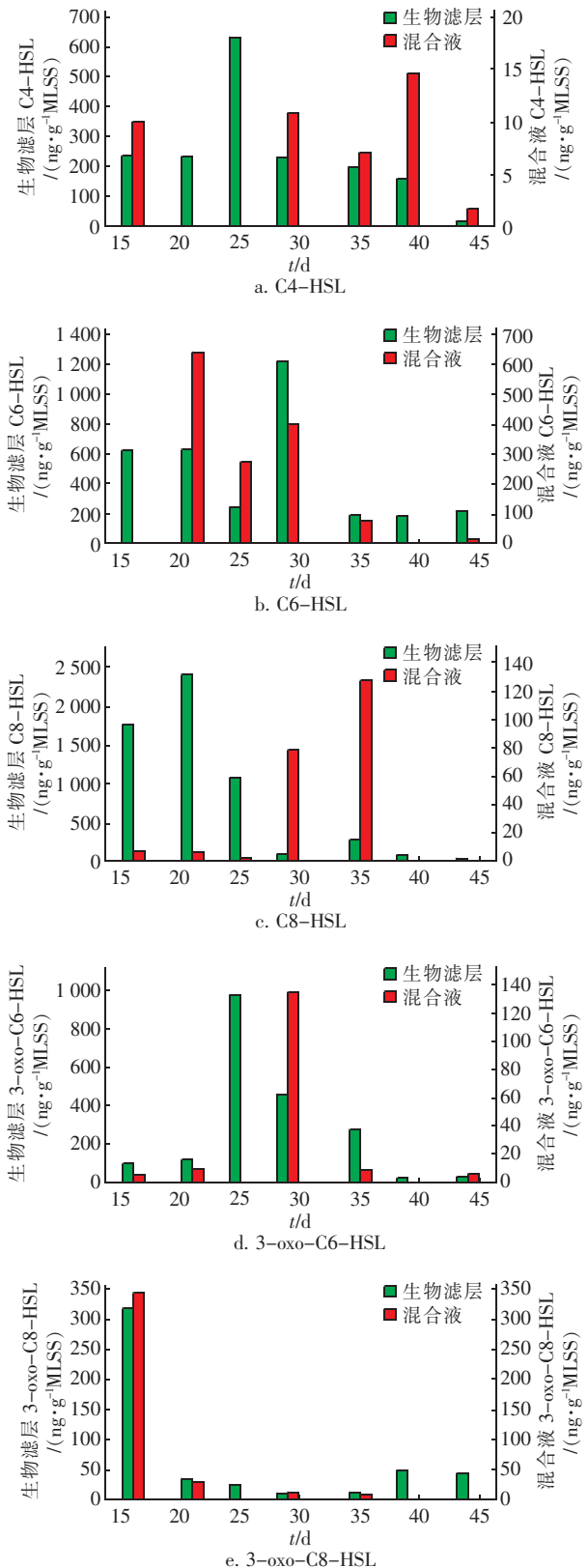
Fig. 5 Variation of SMP component content in biocake and mixed liquor

图 5(b) 显示,混合液中 SMP 组分含量变化和生物滤层的相差极大,各组分含量远低于滤层中各组分含量,蛋白质含量在前 25 d 快速上升,之后逐步下降,而多糖含量一直在小幅度增加, DNA 含量较低。虽然混合液中 SMP 含量不多,但也能促进污染的发生,污染物和微生物易在膜表面沉积而堵塞膜孔,也易黏附在膜上,使生物滤层致密化,恶化透水性能。可以认为,污泥混合液中的 SMP 对生物滤层的形成主要是通过多糖、蛋白质等的黏附作用,它们能间接促进微生物群体感应的发生。

2.6 样品信号分子随 TMP 的变化规律

图 6 为膜上生物滤层和混合液中不同信号分子含量随反应器运行时间的变化,对应的跨膜压力分

别为 67.55、67.8、68.4、69.05、70.25、71、77.45 kPa。随着运行时间的延长,跨膜压力不断增大,也意味着污染物的增多。



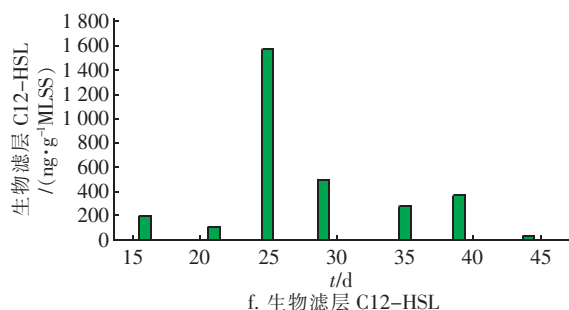


图6 不同信号分子在膜生物滤层和污泥混合液中的含量变化

Fig. 6 Variation of AHLs contents in biocake and mixed liquor

生物滤层上信号分子产生量随着 TMP 的变化呈不同的变化趋势,可以分为3个时间段,25 d 以前为生物膜的形成期,25 ~ 40 d 为生物膜的成熟期,40 d 以后为老化期,在不同的时期对生物滤层形成起主要作用的信号分子也不同。

作用于初期的信号分子主要有 C4 - HSL、C6 - HSL、C8 - HSL、3 - oxo - C8 - HSL,其中含量最多的为 C8 - HSL,其次是 C6 - HSL 和 3 - oxo - C8 - HSL,C4 - HSL 的含量最少;发生作用的前后顺序也略有区别,依次是 3 - oxo - C8 - HSL、C8 - HSL、C6 - HSL,最后是 C4 - HSL。生物膜形成初期,微生物处于适应环境的阶段,还没有形成稳定的群落结构,因此产生信号分子的种类和含量也不稳定,处于不断的变化之中。

在生物膜成熟稳定期发挥作用的信号分子主要有 C4 - HSL、C6 - HSL、3 - oxo - C6 - HSL、C12 - HSL,含量从多到少依次为 C12 - HSL、3 - oxo - C6 - HSL、C6 - HSL、C4 - HSL,基本呈现稳定或逐渐下降的趋势。在该阶段,微生物群落结构相对稳定,信号分子的形成和消耗基本达到平衡,为促进生物膜的更新形成,微生物产生了不同于第1阶段的信号分子。死亡后的微生物释放物质也会堵塞膜孔,加上新形成的致密生物膜,使得跨膜压力逐渐增大。

当生物膜进入大面积的老化时期,细菌死亡导致大量的胞内物质释放,如多糖等黏性物质堵塞膜孔,超过膜污染承受能力,使得跨膜压力急剧增大。而信号分子则由于微生物的营养不足逐渐被代谢掉,造成大多数信号分子含量降得很低,其中只有 C6 - HSL 和 3 - oxo - C8 - HSL 还稳定在较高水平,表明这两种信号分子产生量可能较大或此时群体感

应菌群主要通过这两种信号分子促进生物膜的形成,尤其是 3 - oxo - C8 - HSL 在此阶段呈现缓慢上升的趋势,可以认为它是这个时期主要的信号分子。

混合液信号分子在不同的时段也呈现不同的变化趋势,C4 - HSL 的含量先是维持稳定最后下降,C6 - HSL 和 3 - oxo - C8 - HSL 含量在一直下降,3 - oxo - C6 - HSL 含量先上升后下降,C8 - HSL 的含量则先下降后上升。由此可见,在 MBR 不同运行阶段,活性污泥中微生物的群落结构有差异,群体感应菌群的变化导致发生主要作用的信号分子不同。混合液中的 C6 - HSL、3 - oxo - C8 - HSL、3 - oxo - C6 - HSL 与生物滤层中的变化相似,C8 - HSL 则正好相反,这可以总结为,活性污泥与生物滤层中的群体感应菌群有一定的重叠性,但又存在差异性。

2.7 群体感应信号分子与膜生物污染相关性分析

为探索膜生物污染机理,建立膜生物污染物和不同信号分子间的相互关系,对污染物和信号分子做了相关性分析。混合液中信号分子与污染物的相关性见表3。

表3 混合液中信号分子与污染物的相关性

Tab. 3 Correlation of AHLs and pollutants in mixed liquor

项 目		C4 - HSL	C6 - HSL	C8 - HSL	3 - oxo - C6 - HSL	3 - oxo - C8 - HSL
SMP 多糖	<i>r</i>	-0.441	-0.723	0.983	-0.028	-0.640
	<i>P</i> 值	0.458	0.168	0.003	0.964	0.171
SMP 蛋白质	<i>r</i>	0.170	0.188	-0.410	-0.290	0.996
	<i>P</i> 值	0.784	0.762	0.493	0.636	0.000
SMP 中 DNA	<i>r</i>	0.113	-0.295	-0.379	-0.277	0.996
	<i>P</i> 值	0.857	0.630	0.530	0.652	0.000
EPS 多糖	<i>r</i>	-0.546	-0.813	0.806	-0.123	-0.110
	<i>P</i> 值	0.341	0.094	0.099	0.844	0.835
EPS 蛋白质	<i>r</i>	-0.875	-0.899	0.420	-0.020	-0.539
	<i>P</i> 值	0.052	0.038	0.481	0.974	0.269
EPS 中 DNA	<i>r</i>	-0.860	-0.835	0.445	-0.020	-0.573
	<i>P</i> 值	0.061	0.078	0.453	0.975	0.234

由表3可知,C8 - HSL 与 SMP 及 EPS 中的多糖都有较高的正相关性,相关系数分别为 0.983 和 0.806,3 - oxo - C8 - HSL 与混合液 SMP 中蛋白质和 DNA 的相关性也很高,其他信号分子与各组分含量的相关性都不高或者为负相关。综上所述,MBR 中的活性污泥混合液通过 C8 - HSL 和 3 - oxo - C8 - HSL 调控群体感应较其他信号分子更有效。因此可以认为,活性污泥中的微生物在 MBR 不同运行时期有不同的种群分布,而微生物群落结构的差异可以

调控群体感应强度即信号分子浓度,从而影响 EPS 和 SMP 的分泌,最终导致膜生物污染。

表 4 为膜上信号分子与膜上污染物的相关性分析。3-oxo-C6-HSL 与膜上 EPS 中的蛋白质有较强的正相关性,能解释部分蛋白质的产生;3-oxo-C6-HSL 和膜上 SMP 中 DNA 也有中等程度的相关

性,而其他信号分子的水平与污染物各组分含量的相关性不高。由此可归纳为,生物膜上的 3-oxo-C6-HSL 调控生物膜群体感应较其他信号分子更强,表明微生物群体感应的强度会影响生物膜上附着的生物量和污染物的分泌,导致膜污染,最终造成跨膜压力的增加。

表 4 膜生物滤层信号分子与污染物的相关性
Tab.4 Correlation of AHLs and pollutants in biocake

项 目		C4-HSL	C6-HSL	C8-HSL	3-oxo-C6-HSL	3-oxo-C8-HSL	C12-HSL
SMP 多糖	<i>r</i>	-0.196	-0.690	-0.563	-0.113	-0.512	-0.032
	<i>P</i> 值	0.673	0.086	0.188	0.809	0.240	0.946
SMP 蛋白质	<i>r</i>	0.307	-0.072	0.209	0.341	-0.742	0.294
	<i>P</i> 值	0.503	0.878	0.653	0.455	0.056	0.521
SMP 中 DNA	<i>r</i>	0.530	-0.030	-0.078	0.675	-0.821	0.620
	<i>P</i> 值	0.221	0.949	0.868	0.096	0.024	0.137
EPS 多糖	<i>r</i>	-0.196	-0.690	-0.563	-0.113	-0.512	-0.032
	<i>P</i> 值	0.673	0.086	0.188	0.809	0.240	0.946
EPS 蛋白质	<i>r</i>	0.488	-0.171	-0.299	0.706	-0.727	0.569
	<i>P</i> 值	0.267	0.714	0.515	0.076	0.064	0.183
EPS 中 DNA	<i>r</i>	-0.245	-0.282	-0.569	0.091	-0.509	0.009
	<i>P</i> 值	0.596	0.540	0.183	0.846	0.243	0.985

3 结论

① 导致膜生物污染的污染物有 EPS 和 SMP,且 EPS 是造成膜生物污染的最主要污染物,混合液中的 EPS 是生物滤层中 EPS 和 SMP 的主要来源。

② C8-HSL 能促进混合液中 SMP 及 EPS 多糖的产生,3-oxo-C8-HSL 对混合液 SMP 中的蛋白质和 DNA 有很强的促进作用,3-oxo-C6-HSL 能促进膜上 EPS 中蛋白质的分泌。表明在 MBR 运行过程中,随着微生物群落结构的迁徙,会影响信号分子的产生和降解,进而影响 EPS 和 SMP 的分泌,最终导致膜生物污染。

③ 就群体感应信号分子与膜生物污染的关系进行了全面分析,但是膜生物污染物、信号分子与微生物群落的丰度和多样性的关系有待于通过试验进一步的提高和优化。

参考文献:

[1] Wu Z,Wang Q,Wang Z,*et al.* Membrane fouling properties under different filtration modes in a submerged membrane bioreactor [J]. Process Biochem, 2010, 45 (10):1699 - 1706.

[2] Jiang W,Xia S,Liang J,*et al.* Effect of quorum quenching on the reactor performance, biofouling and biomass characteristics in membrane bioreactors [J]. Water Res, 2013,47(1):187 - 196.

[3] Lade H,Paul D, Ji H K. Quorum quenching mediated approaches for control of membrane biofouling [J]. Int J Biol Sci, 2014,10(5):550 - 565.

[4] Luján-Facundo M J, Mendoza-Roca J A, Cuartas-Uribe B,*et al.* Study of membrane cleaning with and without ultrasounds application after fouling with three model dairy solutions [J]. Food & Bioproducts Processing, 2016,100:36 - 46.

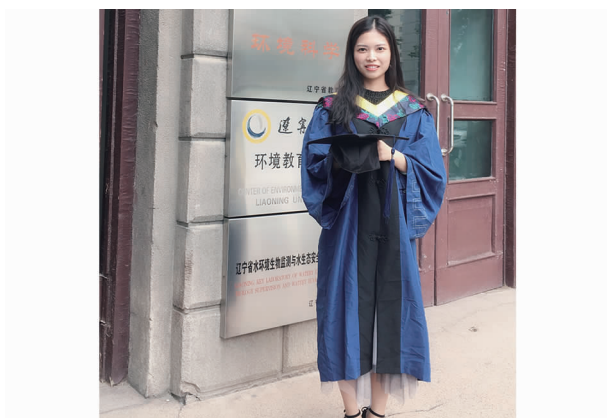
[5] Malaeb L,Leclech P,Vrouwenvelder J S,*et al.* Do biological-based strategies hold promise to biofouling control in MBRs? [J]. Water Res, 2013,47(15):5447 - 5463.

[6] Katebian L,Gomez E,Skillman L,*et al.* Inhibiting quorum sensing pathways to mitigate seawater desalination RO membrane biofouling [J]. Desalination, 2016,393:135 - 143.

[7] Ergön-Can T,Köse-Mutlu B,Koyuncu I,*et al.* Biofouling control based on bacterial quorum quenching with a new application:Rotary microbial carrier frame [J]. J Membr Sci, 2017,525:116 - 124.

[8] Siddiqui M F,Sakinah M,Singh L,*et al.* Targeting N-

- acyl-homoserine-lactones to mitigate membrane biofouling based on quorum sensing using a biofouling reducer[J]. *J Biotechnol*,2012,161(3):190–197.
- [9] Liu H,Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges[J]. *J Biotechnol*,2002,95(3):249–256.
- [10] d'Abzac P,Bordas F,Joussein E,*et al.* Characterization of the mineral fraction associated to extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic granular sludges[J]. *Environ Sci Technol*,2010,44(1):412–418.
- [11] Dierdonck J V,Impe J V,Smets I. Toward a reliable and generic applicable soluble microbial polymer extraction protocol[J]. *Environ Eng Sci*,2012,29(3):174–179.
- [12] Decho A W,Visscher P T,Ferry J,*et al.* Autoinducers extracted from microbial mats reveal a surprising diversity of N-acylhomoserine lactones (AHLs) and abundance changes that may relate to diel pH[J]. *Environ Microbiol*,2009,11(2):409–420.
- [13] Lowry O. Protein measurement with Folin phenol reagent[J]. *J Biol Chem*,1950,193(1):265–275.
- [14] Dubois M,Gilles K A,Hamilton J K,*et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Anal Chem*,1956,28(3):350–356.
- [15] Wang J,Ding L,Li K,*et al.* Development of an extraction method and LC-MS analysis for N-acylated-L-homoserine lactones (AHLs) in wastewater treatment biofilms[J]. *J Chromatogr B*,2017,1041/1042:37–44.
- [16] Morin D,Grasland B,Vallée-réhel K,*et al.* On-line high-performance liquid chromatography-mass spectrometric detection and quantification of N-acylhomoserine lactones, quorum sensing signal molecules, in the presence of biological matrices[J]. *J Chromatogr A*,2003,1002(1/2):79–92.
- [17] Hwang B K,Lee W N,Yeon K M,*et al.* Correlating TMP increases with microbial characteristics in the bio-cake on the membrane surface in a membrane bioreactor[J]. *Environ Sci Technol*,2008,42(11):3963–3968.
- [18] Gao D W,Wen Z D,Li B,*et al.* Membrane fouling related to microbial community and extracellular polymeric substances at different temperatures[J]. *Bioresour Technol*,2013,143(1):172–177.
- [19] Al-Amri A,Salim M R,Aris A. The effect of different temperatures and fluxes on the performance of membrane bioreactor treating synthetic-municipal wastewater[J]. *Desalination*,2010,259(1/3):111–119.
- [20] Ma Z,Wen X,Zhao F,*et al.* Effect of temperature variation on membrane fouling and microbial community structure in membrane bioreactor[J]. *Bioresour Technol*,2013,133(2):462–468.
- [21] Wu B,Yi S,Fane A G. Microbial behaviors involved in cake fouling in membrane bioreactors under different solids retention times[J]. *Bioresour Technol*,2011,102(3):2511–2516.



作者简介:肖霄(1994–),女,湖南常德人,硕士研究生,从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail:1019361645@qq.com

收稿日期:2018–09–04