

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.18.007

## 生物法减缓MBR膜污染的研究进展

毛鑫<sup>1</sup>, 张冰<sup>1</sup>, 唐和礼<sup>1</sup>, 申渝<sup>1,2</sup>, 时文歆<sup>3</sup>

(1. 重庆工商大学 国家智能制造服务国际科技合作基地, 重庆 400067; 2. 重庆南向泰斯环保技术研究院, 重庆 400060; 3. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045)

**摘要:** 膜生物反应器(MBR)因占地面积小、剩余污泥产量少等诸多优点已被广泛运用到水处理中,但膜污染所带来的频繁膜清洗和膜更换提高了MBR的实际运行成本,是制约其发展的主要因素。因此,大量研究致力于发展MBR膜污染的减缓方法,包括物理法、化学法和生物法等;其中,生物法由于具有成本低、环境友好及可持续性等优点而受到广泛关注。对MBR中减缓膜污染的生物控制方法进行了系统分类,重点介绍了群体感应与淬灭技术、能量解偶联、生物酶法、NO诱导法、D-氨基酸抑制法、裂解与捕食六种生物法在MBR中减缓膜污染的最新应用和进展,并根据目前生物法存在的一些问题对其未来的研究方向进行了展望。

**关键词:** 膜生物反应器; 膜污染; 生物法; 胞外聚合物(EPS)

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)18-0034-08

## Research Progress of Biological Methods to Mitigate MBR Membrane Fouling

MAO Xin<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>, TANG He-li<sup>1</sup>, SHEN Yu<sup>1,2</sup>, SHI Wen-xin<sup>3</sup>

(1. National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. Chongqing South-to-Thais Environmental Protection Technology Research Institute Co. Ltd., Chongqing 400060, China; 3. College of Environmental and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Membrane bioreactor (MBR) has been widely used in water treatment due to its advantages such as small floor area and low sludge yield. However, frequent membrane cleaning and membrane replacement caused by membrane fouling increase the actual operating cost of MBR, which are the main factors restricting its development. Therefore, extensive research were devoted to developing mitigation methods for membrane fouling in MBR, including physical, chemical and biological methods. Among them, biological method has been widely concerned because of its advantages such as low cost, environmental friendliness and sustainability. Herein, the biological control methods for membrane fouling mitigation in MBR were systematically classified into quorum sensing/quenching, energy uncoupling, biological enzyme, nitric oxide induction, D-amino acid inhibition, cracking and predation. The latest applications and progress of these kinds of biological methods in MBR were mainly introduced. Moreover, the future research directions of biological methods were prospected according to some

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52000017); 重庆市自然科学基金资助面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0824); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000825、KJZD-M202000801); 重庆市高校工业污染控制技术创新群体项目(CXQT19023); 环境科学与工程重庆市重点学科化工分离技术团队项目(ZDPTTD201915)

**通信作者:** 申渝 E-mail: shenyu@ctbu.edu.cn; 张冰 E-mail: hitzhangbing@163.com

problems existing in current researches.

**Key words:** membrane bioreactor; membrane fouling; biological method; EPS

膜污染机理十分复杂,颗粒、微生物、无机离子、胞外聚合物(EPS)、可溶性微生物产物(SMP)等吸附或聚集在膜上都能促进膜的污染。减缓膜污染的方法大致可分为物理法、化学法、生物法三类,其中,物理法、化学法虽然仍是应用最为广泛的膜污染减缓方法,但其高成本及长期清洗对膜结构和性质产生的损害等问题不容忽视。相比之下,具有成本低、环境友好且可持续性等优点的生物法可能是一种更好的选择。生物法主要是借助生物、生物酶、生物机理等方式去除膜污染物。在MBR运行过程中,采用生物法减缓膜污染可以有效降低膜上微生物数量和EPS的含量,保持膜完整的化学结构并恢复膜通量。为此,着重介绍生物法减缓膜污染的最新研究进展,总结不同生物法的技术原理、应用领域,并对其研究重点和方向进行了展望。

## 1 膜污染生物减缓方法研究进展

### 1.1 群体感应与群体淬灭技术

#### ① 群体感应(QS)技术

20世纪70年代,细菌细胞间存在交流首次被报道,但直至1994年才提出QS概念。QS是指细菌间通过信号分子的传递进行交流,根据其浓度的变化调控微生物的群体行为<sup>[1]</sup>,如胞外多糖的合成和分泌、细菌的聚集、生物膜的形成、抗性基因的表达等。该信号分子大致分为三类:革兰氏阴性菌种内交流的酰化高丝氨酸内酯(AHLs)、革兰氏阳性菌种内寡肽类物质、种间交流的AI-2型群体感应信号分子<sup>[1]</sup>。其中,对AHLs信号分子的研究最为广泛和深入。

AHLs信号分子对群体感应调控的生物膜形成具有重要作用,目前的研究大都表明外源信号分子的投加会促进MBR膜表面生物膜的形成,从而加快膜污染过程。肖霄等<sup>[2]</sup>对MBR不同运行时间段的AHLs信号分子与膜污染之间的联系进行了探究。结果发现,MBR不同运行阶段中微生物的群落结构存在差异,该差异可以改变起主要作用的信号分子的种类和浓度,其中3种信号分子(C8-HSL、3-oxo-C8-HSL和3-oxo-C6-HSL)分别促进了混合液SMP和EPS、混合液SMP和膜上EPS中蛋白质(PN)的形

成,从而导致膜生物污染。

然而,张楠等<sup>[1]</sup>的研究表明,信号分子的投加可以延长膜污染周期。他们向MBR自养脱氮系统中投加不同浓度的信号分子C8-HSL(2、5、6  $\mu\text{mol/L}$ ),发现信号分子的投加虽然促进了反应器内和膜丝表面的EPS的分泌,但其膜污染周期随着C8-HSL浓度的增加从14 d分别延长到20、23和25 d。其原因可能是信号分子对污泥中PN和多糖(PS)的形成具有不同的促进作用,导致污泥中PN/PS比的改变,进而改变污泥性质,延长膜污染周期<sup>[1]</sup>。然而,对其更进一步的减缓膜污染的机理尚不清楚,仍需深入探讨。

#### ② 群体淬灭(QQ)技术

QQ技术是在QS理论的基础上发展起来的,主要通过抑制信号分子的产生、灭活信号分子和阻止信号分子与特异性受体结合三种方式来减少或消除细菌群落之间的联系。目前,QQ技术是环境学领域的重点研究方向,已被广泛运用到MBR系统膜污染研究(见表1),主要使用一些群体淬灭剂(如QQ化合物、QQ酶、QQ细菌等)来减缓膜污染。

表1 QQ技术在膜污染减缓中的应用

Tab.1 Application of QQ technology in membrane fouling mitigation

淬灭类型	MBR类型	污水类型	减缓效果
石墨烯/聚吡咯膜改性条件下投加QQ细菌ssn-2 <sup>[3]</sup>	EMBR	含400~800 mg/L苯酚的合成废水	滤饼层从16.4 g/m <sup>2</sup> 、10.9 g/m <sup>2</sup> 下降到了8.5 g/m <sup>2</sup>
壳聚糖、聚丙烯腈外裹海藻酸钠构建的QQ细菌 <sup>[4]</sup>	传统MBR	COD为500 mg/L的合成废水	对照组的膜组件吸附总生物量(TAB)是淬灭组的2.7倍
含红球菌的海藻酸微球 <sup>[5]</sup>	传统MBR	合成废水	与对照MBR相比,跨膜压差(TMP)达到-70 kPa所需的时间增大了约10倍

Jiang等<sup>[3]</sup>在电极-膜生物反应器(EMBR)中投加QQ细菌ssn-2。结果表明,QQ细菌ssn-2有着较好的膜污染减缓效果,在120 d的运行过程中,EPS含量与AHLs浓度呈正相关。此外,为了减少群体

淬灭剂的流失以及降低其对MBR污泥活性的影响,在群体淬灭剂实际应用过程中,往往需要联合固定化技术以达到稳定的膜污染减缓效果。杨莹<sup>[4]</sup>选用了壳聚糖、聚丙烯腈两种材料外裹海藻酸钠共同构建QQ细菌的核壳结构,并将新构建的QQ小球投入MBR中。结果表明,该QQ小球能明显抑制膜组件上生物膜的形成,降低MBR中EPS含量,从而减缓膜污染。

目前,QQ技术作为环境学领域的一个重点研究方向,正在快速发展。例如,为克服群体淬灭剂中QQ化合物、QQ酶存在的成本高、稳定性差等缺点,学者们正在探寻能够产生QQ酶的QQ细菌<sup>[3-5]</sup>;为保证QQ细菌的生物活性及减少其流失,开发了各种固定化技术(如QQ管束、QQ微球、QQ圆筒等)。但是QQ技术研究还存在一些问题,如QQ技术大部分研究集中在MBR工艺上,在其他生物处理工艺中的研究相对较少;现有研究中涉及的污水类型多为生活污水或合成废水,对其他污水类型的适用性还需进一步探讨。

信号分子是连接QS和QQ技术的桥梁,两种技术最终通过直接或间接控制信号分子在反应器中的浓度来减缓膜污染。过低浓度的信号分子会降低污泥中微生物的活性,影响MBR出水水质;过高浓度的信号分子则会加速EPS的形成,加剧膜污染。因此,在投加信号分子或群体淬灭剂时,应注意将反应器内的信号分子控制在安全浓度范围内。目前,QS和QQ技术展现出较好的膜污染控制效果,但其投入实际工程应用前仍有一些问题亟待去解决。

## 1.2 能量解偶联

微生物的生理行为与代谢密切相关,正常情况下微生物代谢氧化与磷酸化相互偶联。能量解偶联是通过外部条件的改变抑制ATP的合成,从而使ATP储量无法为微生物生长提供必需的能量,导致分解代谢与合成代谢相分离的过程<sup>[6]</sup>。能量代谢是MBR中生物膜形成的重要影响因素,能量解偶联理论上是通过添加解偶联剂抑制细菌的能量合成进而减缓MBR膜上生物膜的形成。

近年来的一些研究表明,解偶联剂可有效抑制MBR系统中膜组件表面生物膜的形成,以及减少MBR中EPS的含量。Feng等<sup>[7]</sup>在解偶联剂3,3',4',5-四氯水杨酰苯胺(TCS)抑制枯草芽孢杆菌生物膜形成的机理研究中发现,TCS通过抑制细菌活性和减少

细菌EPS的分泌,从而抑制生物膜的形成。赵迎雪<sup>[8]</sup>使用重力流膜生物反应器(GD-MBR),探究TCS对膜污染的减缓效果。实验结果表明,TCS的投加能够降低污泥混合液及膜上EPS的含量,显著减小MBR运行过程中膜的总阻力、滤饼层阻力及膜孔堵塞阻力,并在一定程度上增加GD-MBR的出水通量。因此,TCS可以有效减缓膜污染。

解偶联剂的投加量对膜污染的减缓效果具有重要影响。Ding等<sup>[9]</sup>探究了不同浓度的解偶联剂2,4-二硝基苯酚(DNP)对MBR膜污染减缓效果的影响。结果表明,不同的DNP投加量对膜的污染速率有一定影响;与对照组相比,低投加量(15、30 mg/gVSS)会促使污泥释放更多的SMP,进而显著提高滤饼阻力,加剧膜污染;高投加量(45 mg/gVSS)则会抑制EPS中PN和PS的释放,有效减缓膜表面滤饼层的形成。Ding等<sup>[10]</sup>还研究了不同浓度TCS的投加对GD-MBR膜污染的影响。他们发现适宜剂量(10~30 mg/L)的TCS抑制了细菌ATP的合成,降低了污泥和EPS的产生量;而高剂量(50 mg/L)的TCS会破坏污泥絮凝体,使更多的细小污泥和SMP释放出来并在膜上形成致密的滤饼层,加剧膜污染。因此,不同种类、不同剂量的解偶联剂对膜污染的减缓效果存在差异,这可能与解偶联剂抑制细菌的活性程度有关。

投加解偶联剂操作简便、成本较低,但利用能量解偶联减缓膜污染时应注意以下问题:①目前常见的解偶联剂大都是含有苯环的化合物,对MBR中的微生物具有毒害作用,故要控制其在反应器中的浓度;②高浓度的解偶联剂会抑制细菌的活性,反应器中可能会出现污泥浓度降低、出水水质变差的情况;③相关研究周期较短,不能很好地说明解偶联剂长期减缓MBR膜污染的效果。

## 1.3 生物酶法

近年来,应用生物酶法减缓MBR膜污染的研究越来越多。生物酶法减缓膜污染的机理一方面是利用对大分子有亲和力的细胞壁水解酶来促进细胞降解,通过改变膜上生物膜的结构来减缓膜污染;另一方面是通过生物酶对反应器中的EPS进行降解,破坏EPS的稳定性进而实现膜污染的缓解。

### ① 水解细胞壁

通过补充细胞壁水解酶,可以减少生物膜EPS和SMP的数量,简化生物膜结构,从而减缓膜污染



并改善膜性能<sup>[11]</sup>。其中,蛋白酶和淀粉酶均有较好的膜污染控制效果,溶菌酶也早在1992年就被发现具备溶解细菌细胞壁的作用<sup>[12]</sup>。

Wong等<sup>[13]</sup>将含有蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶的水解酶分别投加到厌氧膜生物反应器(AnMBR)中或固定在膜上,以探究其减缓膜污染的效果。结果表明,分散和固定化酶通过水解作用限制了滤饼层的形成,减缓了膜污染。但在近一个月的MBR运行过程中,投加分散酶的MBR的TMP始终小于固定化酶的MBR,且运行20 d后,两者之间的TMP差值稳定在10 kPa左右,这主要是由于固定化酶和蛋白质水解产物增加了膜的凝胶阻力。虽然酶的两种投加方式均表现出较好的MBR膜污染减缓效果,且分散水解酶的性能比固定化水解酶更高,但相比物理法、化学法减缓膜污染而言,两种投加方式都还有进一步增强的潜力。

## ② 酶解EPS

EPS主要由多糖、蛋白质、核酸、脂质和腐殖质等多种物质组成,是生物膜的重要组成部分。当微生物细胞停留在MBR膜表面一段时间后,会产生EPS促使更多的微生物吸附在膜表面上,形成生物膜并加剧膜污染。

早在2003年,Loiselle等<sup>[14]</sup>就发现投加生物酶能有效分离膜表面生物膜。蛋白酶K、胰蛋白酶、枯草杆菌蛋白酶、艾威蛋白酶、木瓜蛋白酶等都能成功降解和分离生物膜,其中枯草杆菌蛋白酶在防止生物附着及生物膜分离方面有着较好的效果。该研究为减缓MBR膜生物污染提供了一条新途径。

此外,为了精准、稳定地酶解MBR膜表面的EPS,在实际应用中通常将生物酶固定化。目前,较为新颖的固定化方法是将生物酶固定到纳米级磁性颗粒(MNP)表面。MNP具有较大的比表面积,能够固定更多的酶,在外部磁场作用下生物酶也易从反应器中分离。Bilad等<sup>[15]</sup>将BsXynA(一种木聚糖酶)与MNP耦合,通过磁力将BsXynA吸引到MBR磁膜表面,以此来持续去除膜表面的EPS。研究结果表明,运行3 h后磁酶-磁膜MBR的TMP增长速率远远小于对照组MBR;运行24 h后,对照组MBR的TMP为24.3 kPa,而磁酶-磁膜MBR的TMP仅为9.7 kPa。此外,Bilad等<sup>[15]</sup>还将两张污染膜进行了对换,一段时间后磁酶-磁膜MBR的TMP从25 kPa降到15.3 kPa。以上研究表明,BsXynA可以有效降

解膜表面的污染物,阻止TMP的快速上升,进而实现膜污染的显著缓解。

作为一种微量、高效的催化剂,低浓度的生物酶就能有效减缓MBR膜污染<sup>[16]</sup>。生物酶法减缓膜污染的优势在于生物酶对MBR中功能微生物无毒害作用,在不产生二次污染的同时,还能保持微生物的活性。但是,生物酶法对膜污染的减缓效果会受到温度、pH等外部条件的制约。另外,生物酶的成本问题也是阻碍其大规模应用的一个重要因素。

## 1.4 NO诱导法

NO是生物系统中广泛存在的信号分子,它能够诱导生物膜扩散并改变其生长方式,使生物膜向游离状态改变。NO诱导法的原理是通过NO促进生物膜游离基因的表达,即通过刺激磷酸二酯酶的活性以及环二鸟苷酸(c-di-GMP)的降解来诱导生物膜的扩散<sup>[17]</sup>,进而减缓膜污染。

NO在减缓膜污染以及改变微生物生长方式方面具有应用前景,但是NO的低溶解性、易氧化的特点阻碍了其在膜污染减缓中的直接应用。因此,为克服以上缺点,大量研究使用NO供体化合物(如硝普酸钠、亚硝酸钠、林西多明、MAHMA-NONOate等)以实现NO的持续供给,达到与直接通入NO相同的效果,进而实现膜污染的缓解(见表2)。

表2 NO供体化合物在膜污染减缓中的应用

Tab.2 Application of NO donor compounds in membrane fouling mitigation

NO供体类型	浓度/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	废水类型	减缓效果
DETA-NONOate <sup>[11]</sup>	500	反渗透浓缩液	生物膜上微生物总量减少了30%
PROLI-NONOate <sup>[17]</sup>	40	合成废水	反应器运行24 h的生物膜扩散率为27%; 反应器运行48 h的生物膜扩散率为25%
MAHMA-NONOate <sup>[18]</sup>	40	含240 mg/L葡萄糖的合成废水	生物膜活细胞减少25%,EPS减少8%
DETA-NONOate <sup>[19]</sup>	500	合成废水	运行2~3 d,超过50%的生物膜被分解

Barnes等<sup>[18]</sup>采用铜绿假单胞菌(PAO1)模拟膜污染微生物,探究NO供体化合物的投加在减缓膜污染方面的机理。研究发现,在三种供体化合物中MAHMA-NONOate是最佳的NO供体化合物,低浓

度的MAHMA-NONOate能够有效抑制单种、多种混合微生物的膜污染。同时,还指出生物膜的扩散与细菌和EPS的减少紧密相关。Oh等<sup>[19]</sup>探究了半衰期较长的NO供体化合物(DETA-NONOate)的投加对膜表面细菌群落和生物膜扩散的影响。研究表明,在不降低过滤性能的前提下,投加DETA-NONOate可以减缓TMP的增长速率。此外,对膜表面细菌群落特征的鉴定结果表明,DETA-NONOate的投加对生物膜细菌群落没有选择性偏差。

以上研究表明,NO诱导法不仅可以有效减缓MBR中生物膜的生长,其在微生物群落结构的优化方面也具有重要作用。与能量解偶联相比,NO诱导法在有效减缓膜污染的同时,不会对微生物产生毒害效应,不会影响整个MBR系统的处理效能;但NO诱导法目前仍停留在实验室研究阶段,需要更多的理论和实践支撑其实际运用。

### 1.5 D-氨基酸(DAA)抑制法

DAA抑制法是通过DAA改变肽聚糖层的结构以及干扰蛋白质的合成,从而抑制MBR中生物膜的生长<sup>[20]</sup>。DAA能够被各种细菌合成和释放,且自身亲水性较强,难以被细菌降解,因此使用DAA减缓膜污染是一种多来源、低成本的生物方法。Hochbaum等<sup>[21]</sup>对膜表面生物膜的形成以及DAA对生物膜的作用机理进行了研究,指出膜表面生物膜的形成大致可分为两个阶段,即生物膜最初小部分聚集附着在膜表面,随后逐渐成长为大型聚集体,形成生物膜;投加DAA对膜污染的减缓作用不是通过阻止最初微生物细胞的表面附着,而是抑制了后阶段生物膜中蛋白质组分的积累。该研究不仅说明DAA的投加能有效防止生物膜的生长,还表明在膜表面微生物附着的后一阶段投加DAA效果更好。

Wang等<sup>[20]</sup>探究了不同种类的DAA减缓膜生物污染的作用机制是否存在差异性。研究表明,三种DAA均能通过抑制革兰氏阳性菌( $G^+$ )和革兰氏阴性菌( $G^-$ )细菌的吸附,降低聚醚砜膜上的胞外多糖和蛋白质含量来减缓膜生物污染。这表明上述不同种类的DAA减缓膜生物污染的机理大致相同。然而,单独使用DAA抑制法减缓膜生物污染存在着DAA的不稳定、控制效率低等问题。Guo等<sup>[22]</sup>将DAA固定到由多巴胺改性的埃洛石纳米管上制备了一种新型纳米复合材料,并利用该材料制备了一种改性膜。该纳米复合材料改性膜不仅保证了

DAA的活性稳定,提高了膜的长期抗生物污染能力,还具有较好的过滤和机械性能。因此,固定化技术是一种较好的维持DAA稳定性的途径。

DAA是一种低成本、环境友好的抑制剂,但是存在不稳定的问题。此外,目前关于DAA减缓MBR膜污染的相关研究较少,DAA复杂的作用机制及其浓度对微生物和MBR运行效能的影响等问题还需要不断探索和解决。

### 1.6 裂解与捕食法

#### ① 噬菌体裂解法

近年来,噬菌体裂解法在膜污染减缓方面的应用受到了广泛关注。该法通过噬菌体特异性识别、感染和裂解细菌,从而使生物膜不断分解。Bhattacharjee等<sup>[23]</sup>从某污水厂中分离出一种溶菌噬菌体,并将其投加至MBR系统中。在投加该溶菌噬菌体后,膜上大量的生物膜开始分解消失,最终膜通量恢复到原来的78%。该项研究虽然表现出噬菌体在减缓膜生物污染方面的巨大潜力,但在细菌和噬菌体的长久对抗过程中,某些细菌可能会对特定的噬菌体免疫,单种噬菌体也许不能取得理想的膜污染减缓效果。

噬菌体鸡尾酒(Pyophage cocktail)技术是一种基于噬菌体控制膜生物污染的新方法,其本质是选用不同种类的噬菌体共同去除污染膜上的微生物。Aydin等<sup>[24]</sup>采用MBR处理含红霉素、四环素和磺胺甲恶唑等高浓度制药废水,并探究Pyophage cocktail技术对膜污染的减缓效果。研究发现,反应器运行22 d后,与对照MBR相比,采用Pyophage cocktail技术的MBR的TMP显著降低了18.4 kPa。另外,微生物分析结果也表明Pyophage cocktail的生物强化作用对生物膜的分解具有积极的影响。

Pyophage cocktail技术解决了单种类噬菌体可能被细菌免疫的问题,在减缓膜污染方面为噬菌体裂解法提供了一条新的途径。目前,噬菌体裂解法的研究还处于探索阶段,噬菌体的投加量对MBR运行的影响及噬菌体的回收利用等问题需进一步探索。

#### ② 原生、后生动物捕食法

大多数的物理法和化学法减缓膜污染都是为了防止生物膜附着在膜表面或使生物膜从膜表面脱离这两个角度来考虑的,但是利用原生动物和后生动物捕食法减缓膜污染,不仅可以保留膜表面的生

物膜,还可以提高膜的渗透性。Derlon 等<sup>[25]</sup>发现在没有生物捕食的情况下,膜表面会形成致密扁平的生物膜,大幅降低膜通量。生物的捕食会改变膜上生物膜的结构,提高膜通量。在捕食动物存在的情况下,反应器膜通量约为 10 L/(m<sup>2</sup>·h),而在没有捕食的情况下监测到的膜通量仅为 5 L/(m<sup>2</sup>·h)。

近年来,有关原生、后生动物中蠕虫减缓 MBR 膜污染的报道越来越多,蠕虫可通过捕食作用吞食微生物,减少回流污泥产量,进而减缓膜污染。Liu 等<sup>[26]</sup>研究了 MBR 与蠕虫反应器(SSBWR)组合工艺对膜污染的减缓效果,结果表明,SSBWR-MBR 延缓了 TMP 的增长。Li 等<sup>[27]</sup>建立了一种厌氧-缺氧-好氧膜生物反应器(A<sup>2</sup>O-MBR)和蠕虫反应器(WR)的组合工艺,并对膜污染减缓效果进行了研究。结果发现,在该组合工艺中,WR 中的微好氧处理和捕食的相互作用使得膜过滤周期延长了 66.7%。此外,高通量测序分析结果表明联合工艺中滤饼层的微生物群落更加均匀。由此可见,A<sup>2</sup>O-MBR 和 WR 的

组合工艺具有较好的膜污染减缓效果。

噬菌体裂解法与原生、后生动物捕食法都能通过减少生物膜上的细菌数量和优化微生物的群落结构来减缓膜污染,但噬菌体、原生和后生动物投加量过多会导致 MBR 中细菌数量大量减少,影响 MBR 的处理效能;并且相比于其他生物法(QQ、生物酶法、能量解偶联等),单独使用噬菌体或者原生、后生动物减缓膜污染的效率较低,回收利用也相对困难;但噬菌体裂解法与原生、后生动物捕食法无需投加化学物质、处理成本低、副产物少,且不产生二次污染,在膜污染减缓方面潜力较大。

1.7 不同方法的比较

生物法在控制膜污染方面展现出较好的效果,其主要是通过阻断生物膜的形成或降解生物膜形成所需的重要物质来减缓膜污染。对不同膜污染生物减缓方法的优缺点、适用场合等进行了比较<sup>[1-27]</sup>,结果见表3。相比于其他生物方法,QQ 技术、能量解偶联、生物酶法、NO 诱导法更具有发展前景。

表3 膜污染生物减缓方法的比较

Tab.3 Comparison of biological methods for membrane fouling mitigation

项 目		途径	优点	缺点	适用场合	研究现状	成本	发展前景
QS 与 QQ	QS	投加信号分子	诱导生物膜的形成,强化 MBR 处理效能	可能导致更加严重的膜污染	缩短生物反应器的启动过程、膜污染探究等	处于实验室研究阶段,有较少膜污染方面的研究	高	*
	QQ	投加群体淬灭剂(化合物、酶或细菌)	从源头上减小膜污染,且膜污染控制效率较高	成本高、稳定性差等	膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较多膜污染方面的研究	高	**
能量解偶联		投加解偶联剂	操作简便、成本较低	大多数解偶联剂对微生物具有毒害作用等	污泥减量、膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较多膜污染方面的研究	低	**
生物酶法		投加生物酶	高效、对环境友好、不产生二次污染	膜污染减缓效果易受温度、pH 等影响	废水治理、膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较少膜污染方面的研究	高	**
NO 诱导法		投加 NO 供体化合物	相比于化学清洗,提高了膜的使用寿命	易产生耐受性、稳定性差等	膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较多膜污染方面的研究	高	**
D-氨基酸(DAA)抑制法		投加 DAA	多来源、低成本、环境友好	不稳定、控制效率低	膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较少膜污染方面的研究	低	*
裂解与捕食	裂解	投加噬菌体	来源广泛,具有良好的抗菌性能	存在细菌免疫问题	膜污染控制等	处于实验室研究阶段,有较少膜污染方面的研究	低	*
	捕食	投加原生和后生动物	成本低、无二次污染	回收利用比较困难,受环境条件影响大	污泥减量、膜污染控制等	有实际应用,有较少膜污染方面的研究	低	*

注: \*表示较有发展前景;\*\*表示有发展前景。



## 2 结语

生物法可以有效减缓 MBR 系统中的膜生物污染,且具有其他膜污染减缓方法不具备的优势,如:①生物法不会对膜的性质或结构产生损害,提高了膜的使用寿命;②生物法可以原位提高膜的过滤周期;③大多数生物法(如生物酶法、裂解与捕食法等)减缓膜污染具有连续性、长期性等特点。

但生物法仍存在以下问题亟待解决:①反应器中适宜浓度的 AHLs 可减缓膜污染,且信号分子浓度的高低会影响膜污染的减缓效果,未来 QS 和 QQ 技术减缓膜污染的关键就在于维持反应器中信号分子的适宜浓度。②目前常见的解偶联剂大都是含有苯环的有毒化合物,且高浓度的解偶联剂会降低微生物的活性。因此,低浓度、环境友好的解偶联剂是下一阶段研究的方向。③对于生物酶法和 DAA 抑制法,解决生物酶和 DAA 的不稳定问题应是未来研究的重点。④裂解捕食中噬菌体和原生、后生动物的回收利用比较困难,相关的工艺或技术有待进一步研究。

近 10 年来,采用生物法减缓 MBR 膜污染的技术发展迅速,并且有着较好的减缓效果。但生物法相比物理法和化学法减缓膜污染还存在着发展上的滞后性。因此,今后围绕生物法减缓 MBR 膜污染的相关问题还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张楠,张肖静,谢旭扬,等. 群体感应信号分子对 MBR 自养脱氮系统膜污染的影响研究[J]. 膜科学与技术, 2020, 40(3): 102-108.  
ZHANG Nan, ZHANG Xiaojing, XIE Xuyang, *et al.* Effect of quorum sensing signal molecules on membrane fouling in MBR-based autotrophic nitrogen removal system[J]. Membrane Science and Technology, 2020, 40(3): 102-108(in Chinese).
- [2] 肖霄,于多,郭海娟,等. AHLs 信号分子对 MBR 膜生物污染的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(9): 1-8.  
XIAO Xiao, YU Duo, GUO Haijuan, *et al.* Impact of N-acyl homoserine lactones (AHLs) signal molecules on membrane biofouling [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(9): 1-8(in Chinese).
- [3] JIANG B, ZENG Q Z, HOU Y, *et al.* Quorum quenching bacteria bioaugmented GO/PPy modified membrane in EMBR for membrane antifouling [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718: 137412.
- [4] 杨莹. 群体感应淬灭菌球核壳结构的构建及其抗膜污染性能的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019.  
YANG Ying. Construction of Quorum Quenching Beads Core-shell Structure and Its Capacity for Membrane Biofouling Control [D]. Changsha: Hunan University, 2019(in Chinese).
- [5] KIM S R, OH H S, JO S J, *et al.* Biofouling control with bead-entrapped quorum quenching bacteria in membrane bioreactors: physical and biological effects [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(2): 836-842.
- [6] DING A, ZHAO Y X, YAN Z S, *et al.* Co-application of energy uncoupling and ultrafiltration in sludge treatment: evaluations of sludge reduction, supernatant recovery and membrane fouling control [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020, 14(4): 43-52.
- [7] FENG X C, WU Q L, CHE L, *et al.* Analyzing the inhibitory effect of metabolic uncoupler on bacterial initial attachment and biofilm development and the underlying mechanism [J]. Environmental Research, 2020, 185: 109390.
- [8] 赵迎雪. 基于能量解偶联的膜法污泥减量及膜污染控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.  
ZHAO Yingxue. Study on Membrane Sludge Reduction and Membrane Fouling Control Based on Energy Uncoupling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).
- [9] DING A, LIN D C, ZHAO Y X, *et al.* Effect of metabolic uncoupler, 2, 4-dinitrophenol (DNP) on sludge properties and fouling potential in ultrafiltration membrane process [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1882-1888.
- [10] DING A, ZHAO Y X, NGO H H, *et al.* Metabolic uncoupler, 3,3',4',5-tetrachlorosalicylanilide addition for sludge reduction and fouling control in a gravity-driven membrane bioreactor [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020. DOI: 10.1007/s11783-020-1275-4.
- [11] JO Y, JOHIR M A H, CHO Y, *et al.* A comparative study on nitric oxide and hypochlorite as a membrane cleaning agent to minimise biofilm growth in a membrane bioreactor (MBR) process [J]. Biochemical Engineering Journal, 2019, 148: 9-15.
- [12] 刘二燕. 微波辅助固定化溶菌酶对印染污泥溶胞和

- 脱水性能的影响[D]. 上海:东华大学,2019.
- LIU Eryan. Effect of Microwave-assisted Immobilized Lytic Enzyme on Lysis and Dehydration Performance of Printing and Dyeing Sludge [D]. Shanghai: Donghua University, 2019(in Chinese).
- [13] WONG P C Y, LEE J Y, TEO C W. Application of dispersed and immobilized hydrolases for membrane fouling mitigation in anaerobic membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 491: 99–109.
- [14] LOISELLE M, ANDERSON K W. The use of cellulase in inhibiting biofilm formation from organisms commonly found on medical implants [J]. *Biofouling*, 2003, 19 (2): 77–85.
- [15] BILAD M R, BATEN M, POLLET A, *et al.* A novel in-situ enzymatic cleaning method for reducing membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) [J]. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 2016, 1(1): 1–22.
- [16] TAN C H, KOH K S, XIE C, *et al.* The role of quorum sensing signalling in EPS production and the assembly of a sludge community into aerobic granules [J]. *The ISME Journal*, 2014, 8 (6): 1186–1197.
- [17] BARNES R J, BANDI R R, CHUA F, *et al.* The roles of *Pseudomonas aeruginosa* extracellular polysaccharides in biofouling of reverse osmosis membranes and nitric oxide induced dispersal [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 466: 161–172.
- [18] BARNES R J, BANDI R R, WONG W S, *et al.* Optimal dosing regimen of nitric oxide donor compounds for the reduction of *Pseudomonas aeruginosa* biofilm and isolates from wastewater membranes [J]. *Biofouling*, 2013, 29(2): 203–212.
- [19] OH H S, CONSTANCIAS F, RAMASAMY C, *et al.* Biofouling control in reverse osmosis by nitric oxide treatment and its impact on the bacterial community [J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 550: 313–321.
- [20] WANG S Y, SUN X F, GAO W J, *et al.* Mitigation of membrane biofouling by D-amino acids: effect of bacterial cell-wall property and D-amino acid type [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 164: 20–26.
- [21] HOCHBAUM A I, KOLODKIN-GAL I, FOULSTON L, *et al.* Inhibitory effects of D-amino acids on *Staphylococcus aureus* biofilm development [J]. *Journal of Bacteriology*, 2011, 193(20): 5616–5622.
- [22] GUO X Y, FAN S G, HU Y D, *et al.* A novel membrane biofouling mitigation strategy of D-amino acid supported by polydopamine and halloysite nanotube [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 579: 131–140.
- [23] BHATTACHARJEE A S, CHOI J, MOTLAGH A M, *et al.* Bacteriophage therapy for membrane biofouling in membrane bioreactors and antibiotic-resistant bacterial biofilms [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015, 112(8): 1644–1654.
- [24] AYDIN S, CAN K. Pyophage cocktail for the biocontrol of membrane fouling and its effect in aerobic microbial biofilm community during the treatment of antibiotics [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 318: 123965.
- [25] DERLON N, PETER-VARBANETS M, SCHEIDEGGER A, *et al.* Predation influences the structure of biofilm developed on ultrafiltration membranes [J]. *Water Research*, 2012, 46(10): 3323–3333.
- [26] LIU J, ZUO W, TIAN Y, *et al.* Improvement of an integrated system of membrane bioreactor and worm reactor by phosphorus removal using additional post-chemical treatment [J]. *Water Science & Technology*, 2016, 74(9): 2202–2210.
- [27] LI L P, ZHANG J, TIAN Y, *et al.* A novel approach for fouling mitigation in anaerobic-anoxic-oxic membrane bioreactor (A<sup>2</sup>O-MBR) by integrating worm predation [J]. *Environment International*, 2019, 127: 615–624.
- 
- 作者简介:毛鑫(1998– ),男,重庆人,在读硕士研究生,研究方向为膜法废水处理技术。  
E-mail:15736337917@163.com  
收稿日期:2021-01-15  
修回日期:2021-03-18

(编辑:丁彩娟)