

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.005

## 好氧颗粒污泥减缓MBR膜污染的研究进展

张鑫<sup>1,2,3</sup>, 于思伟<sup>1,2</sup>, 郑江辉<sup>1,2</sup>, 包罗<sup>1,2</sup>, 朱勤燕<sup>1,2</sup>, 李新冬<sup>1,2</sup>

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 赣州市赣江流域水质安全保障技术创新中心, 江西 赣州 341000; 3. 西安晶能环保科技有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 膜污染问题一直以来都是膜生物反应器(MBR)面临的重大挑战之一,引入好氧颗粒污泥(AGS)则是控制膜污染的一种新途径。介绍了好氧颗粒污泥对MBR混合液特性的影响,将好氧颗粒污泥膜生物反应器(AGMBR)与传统MBR对比分析,系统阐述了AGMBR中膜污染情况及其膜阻力分布,以及AGS的特性(颗粒污泥粒径分布、胞外聚合物成分及含量)对MBR膜污染的控制效果,并深入探究AGS缓解膜污染的机理。研究表明,调节好氧颗粒污泥粒径,控制溶解性微生物产物(SMP)与胞外聚合物(EPS)的含量以维持颗粒污泥稳定性可显著降低膜污染速率,延长膜组件的使用寿命。通过引入成熟稳定的AGS来改善污泥混合液特性对于MBR中膜污染控制前景广阔,然而AGMBR的工程化应用还有待深入研究,维持AGS的稳定性及进一步明确AGS对MBR膜组件的影响在未来仍是重要的研究方向。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 膜生物反应器; 膜污染; 膜污染阻力; 粒径; 胞外聚合物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0028-06

## Research Progress of Aerobic Granular Sludge in Reducing MBR Membrane Fouling

ZHANG Xin<sup>1,2,3</sup>, YU Si-wei<sup>1,2</sup>, JIA Jiang-hui<sup>1,2</sup>, BAO Luo<sup>1,2</sup>, ZHU Qin-yan<sup>1,2</sup>, LI Xin-dong<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Innovation Center for Water Quality Security Technology at Ganjiang River Basin, Ganzhou 341000, China; 3. Xi'an Jingneng Environmental Protection Technology Co. Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The membrane fouling in membrane bioreactor (MBR) is always one of the main challenges faced by researchers, and the introduction of aerobic granular sludge (AGS) is a new way to control membrane fouling. The effect of AGS on the characteristics of MBR mixed liquids is introduced. Based on the comparison analysis of aerobic granular sludge membrane bioreactor (AGMBR) and traditional MBR, the membrane fouling and the distribution of membrane resistance in AGMBR, and the characteristics of AGS (particle size distribution, composition and content of extracellular polymeric substances), were systematically explored. The mechanism of membrane pollution mitigation was further

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51864017、41662004); 大学生创新创业训练计划项目(201910407009)

通信作者: 李新冬 E-mail: lixind@163.com

discussed. By adjusting the particle size of aerobic granular sludge and controlling the content of soluble microbial product (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) to maintain the stability of granular sludge, the membrane fouling rate can be significantly reduced and the service life of the membrane can be prolonged. The introduction of mature and stable AGS to improve the characteristics of mixed liquids has broad prospects for MBR membrane fouling control. However, the engineering application of the AGMBR process needs further study. Strengthening the stability of AGS and further clarifying the influence of AGS on the MBR system are still an important research direction in the future.

**Key words:** aerobic granular sludge; membrane bioreactor; membrane fouling; membrane fouling resistance; particle size; extracellular polymeric substances

膜污染问题一直是MBR所面临的瓶颈,严重影响了膜组件的过滤性能与使用寿命,并且大幅增加了MBR在运行和维护过程中的能耗需求,限制了该工艺的稳定性及经济性。在以往的大量研究中,缓解膜污染的措施主要有膜清洗、膜材料及结构的选择优化、工艺运行条件的优化、改善污泥混合液特性等。目前,越来越多的研究者将好氧颗粒污泥(AGS)技术与MBR结合形成复合式好氧颗粒污泥膜生物反应器(AGMBR),通过改善污泥混合液性质,将絮状污泥替换成AGS来寻求膜污染控制新途径。

一体式AGMBR具有占地面积小、HRT短、微生物活性高,能同时发挥AGS同步脱氮除磷功能和MBR出水水质优良的优点。刘克成等<sup>[1]</sup>对比分析了传统MBR工艺与AGMBR工艺对雄安新区变电站生活污水的处理性能,发现传统MBR工艺对COD、TN、TP的平均去除率分别为89.4%、41.7%、27.1%,而AGMBR工艺对COD、TN、TP的平均去除率分别高达92.7%、79.5%、67.6%。可以看出,絮状污泥和颗粒污泥在TN和TP的去除方面差异非常显著,主要原因应该是颗粒污泥内部更易形成缺氧、厌氧区,更加有利于污染物的去除。另外,AGS的加入可以大大缓解膜污染,使其成为近年来废水处理领域的研究热点和前沿技术<sup>[2-4]</sup>。

因此,基于AGMBR的研究现状,综述了AGMBR的混合液特性、膜污染及膜阻力分布、颗粒污泥粒径及溶解性微生物产物(SMP)与胞外聚合物(EPS)对膜污染的影响,进一步探索AGS缓解膜污染的机理,阐明AGS与MBR相结合的实际意义与价值,并对AGMBR在未来的研究中需要重点关注的问题提出展望。

## 1 AGMBR的混合液特性

将成熟稳定的AGS引入MBR可使污泥混合液特性发生变化,AGS独特的空间结构形成了多功能的微环境,从而改善了污泥的沉降性能和膜过滤性能。因此,AGMBR无论是在技术和经济可行性上,还是在工业级推广等方面均具有较大优势,值得深入探究。

AGS的粒径、表面电荷等特性变化会影响污泥的沉降性能以及颗粒污泥与膜表面的相互作用,从而改善膜过滤性能。宋志伟等<sup>[5]</sup>研究了AGS投加量对MBR污泥混合液特性的影响,结果发现,随着AGS投加量的增加,污泥沉降性能得到明显改善,SVI由135.85 mL/g下降至29.36 mL/g,这是因为AGS尺寸较大且结构密实,沉降速度较絮状污泥明显加快,故而提高了反应器内污泥的整体沉降性能,且污泥活性得到改善;AGS疏水性能增强,Zeta电位由-20.302 mV降低至-4.325 mV,膜通量衰减率由63.3%降低至42.8%,膜过滤性能得到提高。Iorhemen等<sup>[6]</sup>在MBR反应器内培养AGS,25 d时系统获得成熟稳定的AGS,污泥粒径从115  $\mu\text{m}$ 增长到576  $\mu\text{m}$ ;SVI<sub>30</sub>由161 mL/g降低至37 mL/g,SVI<sub>5</sub>同样由187 mL/g降低至40 mL/g,污泥沉降性能得到明显改善,且污泥浓度明显增加,平均MLSS浓度为9 200 mg/L。可见,与传统MBR相比,AGS的加入明显改善了MBR污泥混合液的理化性质,二者结合具有广阔的应用前景。

此外,AGS中的微生物群落结构对颗粒污泥的生长、稳定性及污染物的去除效果起着至关重要的作用。AGS由于氧扩散的限制而呈层状结构,颗粒外部为好氧区,颗粒内部核心为厌氧区,在好氧区和厌氧区之间存在一个过渡的缺氧区。将AGS引

入MBR中,丝状菌增多并相互缠绕形成AGS的骨架,而EPS的分泌促进了AGS维持其颗粒稳定性,进而缓解膜污染<sup>[7]</sup>。AGS与普通絮状污泥的区别在于各菌群的占比不同,AGS的独特结构使得颗粒污泥富集了大量的微生物优势种群(如硝化菌、反硝化菌、聚磷菌),从而维持颗粒污泥的稳定性,实现同步硝化与反硝化作用。在反应器实际运行中,各工艺参数的改变不仅会影响颗粒污泥的理化特性,而且会影响AGS微生物群落的丰富度、多样性及其代谢活动<sup>[8]</sup>,从而影响颗粒污泥MBR系统长期运行的稳定性。综上,AGS的稳定性不仅对系统连续运行具有重要意义,而且在实际废水中具有广阔的应用价值。目前,影响颗粒污泥生长及稳定性的因素还没有得到很好的认识,深入研究AGS稳定性依然是AGMBR的主要挑战之一。

## 2 AGMBR中膜污染及膜阻力分布

### 2.1 膜污染

与传统MBR相比,AGMBR在膜污染控制方面显示出了积极的作用。Wang等<sup>[9]</sup>研究了高通量条件下不同形态污泥的膜污染情况,结果发现性能良好、尺寸较大的好氧颗粒污泥MBR最长运行时间达到61 d,TMP总体呈平稳上升趋势,延长了过滤周期;而絮状、膨胀、粒径较小的污泥运行时间仅为15 d左右,表明膜污染程度与污泥的形态结构密切相关,结构紧凑且成熟稳定的颗粒污泥可以大大减缓膜污染进程,从而延长膜组件的使用寿命。Juang等<sup>[10]</sup>对比分析了传统MBR与AGMBR的运行情况,实验研究表明,MBR的TMP在10 500 min后开始急剧上升并在15 000 min时达到最高值(60 kPa),而AGMBR的TMP在前16 000 min比较稳定,随后上升至85 kPa。可见,当污泥粒径较小时,污泥更容易沉积在膜表面,形成更为致密且渗透性能较差的滤饼层,导致膜通量下降,膜污染程度加重;而颗粒污泥相对稳定且密实的结构使其能够在MBR中维持更好的通量条件,从而缓解膜污染进程。刘克成等<sup>[1]</sup>通过长期的过滤试验对比了传统MBR与AGMBR中膜组件的水力反洗及化学清洗后膜通量的恢复情况。结果发现,MBR经水力反洗后膜通量恢复率为85%,而AGMBR达到了93%。经NaClO离线清洗后,MBR反应器中膜通量恢复率为90%,AGMBR达到了96.8%。两个膜组件的通量恢复对比结果证

明了AGS能够显著改善膜组件的过滤性能,减缓膜污染。

### 2.2 膜阻力分布

膜污染类型根据发生的位置可分为滤饼层污染和膜孔堵塞污染,而AGMBR与传统MBR的主要膜污染类型不同。传统MBR膜污染主要表现为滤饼层污染,而AGMBR中的膜污染以膜孔堵塞为主<sup>[11]</sup>。

为了更清楚地了解AGS与膜组件的相互作用及膜污染机理,根据Darcy定律对膜阻力分布进行分析<sup>[12]</sup>:

$$R_T = R_m + R_f = R_m + R_p + R_c \quad (1)$$

式中: $R_T$ 为膜过滤总阻力; $R_m$ 为膜固有阻力; $R_f$ 为膜污染阻力; $R_p$ 为孔隙堵塞阻力; $R_c$ 为滤饼层阻力。

式(1)中, $R_p$ 是指由于颗粒沉积到膜孔内而产生的不可逆膜污染阻力; $R_c$ 可分为 $R_{c,irr}$ 和 $R_{c,rev}$ ,其中 $R_{c,irr}$ 是指膜表面滤饼层所产生的不可逆污染阻力,可通过特别的物理清洗操作去除; $R_{c,rev}$ 是膜表面滤饼层产生的可逆污染阻力,可通过普通反冲洗去除。

AGS因其较大的尺寸和紧凑的结构,阻碍了膜面凝胶层的形成以及污染物在膜孔内的吸附和堵塞,很好地延缓了膜污染进程。王成端等<sup>[13]</sup>考察了AGMBR中的膜组件污染特性,发现系统连续运行75 d后膜过滤总阻力为 $7.89 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ;膜表面滤饼层阻力和膜孔堵塞阻力分别为 $5.32 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 和 $2.34 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ ,分别占总阻力的67.42%和29.66%。可见,膜污染的总阻力主要由膜表面滤饼层造成。然而,Wang等<sup>[9]</sup>在研究高通量下不同形态污泥的MBR膜污染阻力分布时却发现,絮状污泥和膨胀污泥的 $R_c/R_f$ 比分别达到了61.23%和79.02%,均大于对应的 $R_p/R_f$ ,说明滤饼层阻力是絮状污泥和膨胀污泥MBR膜污染的主要原因;而对于好氧颗粒污泥MBR, $R_p$ 占膜污染阻力的76.21%,显著大于 $R_c$ 占比,表明膜孔堵塞是好氧颗粒污泥MBR膜污染的关键因素。

尽管研究已证实AGMBR中膜污染得到了缓解,但反应器能够长期稳定运行才是最终目标。di Trapani等<sup>[14]</sup>通过RIS模型研究了AGMBR处理高浓度柑橘废水时的膜污染阻力分布,结果发现,在短期内尽管AGMBR主要污染机制是 $R_{c,irr}$ ,但在整个实



验过程中 $R_{c,irr}$ 出现了下降,同时观察到 $R_p$ 占比从41.20%下降到25.92%;且 $R_{c,rev}$ 占比出现显著增加,从8.95%升至28.52%。这表明在污染发展和可逆性方面,AGMBR系统的短期效果可能更好。然而,在系统长期运行中,经过化学清洗操作后的剩余阻力 $R_{Res}$ (即使利用化学药剂也不能被去除的不可逆污染阻力)不容忽视,因为这可能会严重影响膜的过滤性能,导致膜清洗操作成本增加并且缩短膜的使用寿命。因此,如果能维持颗粒污泥的粒径与稳定性,加上颗粒污泥紧凑的结构以及丰富的微生物群落特征,AGMBR系统将会有极大的应用潜力。

### 3 AGS特性对MBR膜组件的影响

#### 3.1 AGS粒径对膜污染的影响

AGS的粒径和结构改变了MBR污泥混合液的特性,污泥粒径的变化可能会导致污泥沉降性能、颗粒质量、氧传递阻力等发生改变<sup>[15]</sup>,从而影响膜污染行为。Zhang等<sup>[16]</sup>探究了不同粒径(0~0.5、0.5~0.7、0.7~1、1~1.2、1.2~1.7、>1.7 mm) AGS对MBR膜污染的影响。结果发现,MBR膜污染出现了一个临界AGS尺寸(1~1.2 mm):粒径在1.2 mm以上时,AGS因尺寸较大不易在膜表面沉积,故形成了较为疏松的滤饼层;粒径在1 mm以下时,AGS尺寸越小,膜过滤性能越好,这是因为分泌的EPS含量减少,从而减轻了膜污染。在临界尺寸下,由于膜表面滤饼层的致密结构和更多EPS的附着作用,膜组件表现出了严重的膜孔堵塞和不可逆污染。Wang等<sup>[17]</sup>研究了AGMBR膜表面污染层中的污泥粒径大小分布,结果发现,膜表面污染层中以絮状污泥( $d \leq 0.18$  mm)为主,占污染层中污泥总量的50%,且不同粒径的颗粒污泥( $d > 0.18$  mm)在污染层中所占比例均略低于混合液污泥。这些数据表明,大量的颗粒污泥倾向于保持悬浮而不易沉积在膜表面。相反,大部分絮状污泥更容易沉积在膜表面而形成密实的滤饼层,导致TMP迅速上升,膜污染速率更快。

伍璐莹<sup>[3]</sup>研究了增强型AGMBR中的膜污染情况,通过污泥粒径分布分析证明了平均粒径较小(239  $\mu\text{m}$ 和202  $\mu\text{m}$ )的颗粒污泥更易附着并累积在膜表面而造成膜污染。Shen等<sup>[18]</sup>研究了浸没式MBR中絮体粒径对膜污染的影响。研究发现,絮体

尺寸的降低显著增加了滤饼层的水力阻力和渗透压阻力,导致膜过滤性能变差,膜污染速率变快。AGS在反应器中的培养驯化与稳定直接关系到AGMBR在废水处理过程中的污染物去除效率和膜污染程度。因此,在未来的研究中调控AGS粒径以及维持AGS的稳定性是控制膜污染、提高膜通量的有效方法。

#### 3.2 EPS的成分和含量对膜污染的影响

以往的研究指出,EPS是AGMBR中主要的膜污染物<sup>[19]</sup>。EPS可分为结合态EPS和溶解态EPS(sEPS),也有研究者<sup>[20]</sup>将sEPS称为溶解性微生物产物(SMP),结合态EPS又分为紧密结合型EPS(TB-EPS)和松散结合型EPS(LB-EPS)。EPS是一种复杂的高分子聚合物,存在于细胞外和微生物聚集体内,主要由PN、PS、腐殖酸和核酸类物质等组成<sup>[21-22]</sup>。EPS的成分和含量决定了膜污染的性质与程度,对AGMBR中的EPS进行深入分析并监测污染发展是非常重要的。

Iorhemen等<sup>[23]</sup>在TOC为(266  $\pm$  27) mg/L及HRT为10 h条件下对AGMBR中的EPS进行了分析,结果发现TB-EPS中显示出较高的PS(25.49 mg/gMLVSS)与PN含量(171.67 mg/gMLVSS);而LB-EPS中PS(<1 mg/gMLVSS)与PN含量(0.01~1.92 mg/g MLVSS)均较低。尽管TB-EPS中的PN/PS浓度很高,但TMP的增长速率缓慢,整个实验过程中都低于10 kPa,较低的LB-EPS含量是AGMBR膜污染程度减轻的重要原因,证实了LB-EPS与膜污染的相关性显著强于TB-EPS。另外,溶液sEPS中的PS与PN组分浓度分别低于20 mg/L和10 mg/L,低于传统MBR,使得AGMBR中的膜污染程度降低。刘克成等<sup>[1]</sup>对传统MBR与AGMBR反应器中污泥分泌的EPS含量及构成进行了30 d的连续监测,发现AGMBR反应器中PS的平均浓度仅为传统MBR的46%,EPS总量也明显低于传统MBR,仅为传统MBR的75.2%。可以看出,在AGMBR反应器中,不论是PS组分浓度还是EPS总量,好氧颗粒污泥都明显低于普通的絮状污泥,这可能是导致AGMBR反应器中膜污染进程缓慢的主要原因之一。

Tavana等<sup>[24]</sup>对已运行60 d的AGMBR中的EPS进行分析,结果发现LB-EPS中并没有检测到PN,而在第四阶段PS含量达到最高,SMP中PS含量同样表现出很高的含量,此时MBR膜组件经历了最严

重的膜污染。可见,PN和PS的含量与膜污染的程度紧密相关。

然而,Wang等<sup>[17]</sup>对AGMBR中不同粒径生物质的EPS和膜污染物进行分析时发现,絮状污泥的沉降性能和过滤性能随EPS含量的增加而显著降低。而对于颗粒污泥,EPS含量与污泥特性无显著相关性。另外,对于絮状污泥,过滤比阻(SRF)随EPS的增加而显著增大;而颗粒污泥中的EPS与SRF的关系并不显著。伍璐莹<sup>[3]</sup>研究发现,AGMBR混合液中SMP含量较低,而膜污染物中的SMP含量非常高,推断SMP是导致膜污染的主要原因。因此,应对SMP和EPS的化学组成及其与膜组件之间的相互作用进行深入研究,寻找有效的方法来控制SMP与EPS的含量,以维持系统的稳定运行,从而实现最大限度的膜污染控制。

#### 4 结论与展望

AGMBR工艺具有占地面积小、处理效果优良、成本低等优势,工程化应用前景良好。然而,膜污染是影响MBR工艺稳定运行及广泛应用的关键问题。未来对于AGMBR的研究需要关注以下两方面的问题:

① 增强AGS的稳定性。虽然AGMBR系统在污染物去除和膜污染控制方面具有优势,但AGS的稳定性与制粒机制直接关系膜污染的程度,深入探究影响AGS生长及稳定性的关键因素以维持系统的稳定运行至关重要。例如,群体感应已被证明可以调节EPS的种类和分泌量,因此可从微观层面研究分子和细胞对颗粒污泥稳定性的影响。

② 控制MBR膜组件的不可逆污染。由于AGMBR中膜表面形成的滤饼层较为疏松,但无法阻碍胶体颗粒、SMP和EPS进入膜孔,在系统运行后期会造成严重的不可逆膜污染,从而严重缩短反应器运行时间并且增大膜清洗的成本与膜更换频率。因此如何控制或克服AGMBR运行后期出现的不可逆膜污染将是该工艺未来发展中面临的一个重大挑战。

#### 参考文献:

- [1] 刘克成,范辉,高燕宁. 好氧颗粒污泥MBR工艺处理变电站生活污水性能研究[J]. 环境工程, 2021, 39(9): 31-36.  
LIU Kecheng, FAN Hui, GAO Yanning. Performance of aerobic granular sludge MBR process for the treatment of substation sewage [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(9): 31-36(in Chinese).
- [2] LIÉBANA R, MODIN O, PERSSON F, *et al.* Integration of aerobic granular sludge and membrane bioreactors for wastewater treatment [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2018, 38(6): 801-816.
- [3] 伍璐莹. 增强型膜生物反应器内好氧颗粒污泥的培养及膜污染行为研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.  
WU Luying. Culture and Membrane Fouling Behavior of Aerobic Granular Sludge in Enhanced Membrane Bioreactor [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018(in Chinese).
- [4] IORHEMEN O T, HAMZA R A, TAY J H. Membrane fouling control in membrane bioreactors (MBRs) using granular materials [J]. Bioresource Technology, 2017, 240: 9-24.
- [5] 宋志伟,曹雯雯,王秋旭,等. 好氧颗粒污泥对膜生物反应器污泥性能的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3725-3730.  
SONG Zhiwei, CAO Wenwen, WANG Qiuxu, *et al.* Influence of aerobic granular sludge on sludge property in membrane bioreactor during phenolic wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3725-3730(in Chinese).
- [6] IORHEMEN O T, HAMZA R A, ZAGHLOUL M S, *et al.* Simultaneous organics and nutrients removal in side-stream aerobic granular sludge membrane bioreactor (AGMBR) [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, 21: 127-132.
- [7] DAI C C, BIN L Y, TANG B, *et al.* Promoting the granulation process of aerobic granular sludge in an integrated moving bed biofilm-membrane bioreactor under a continuous-flowing mode [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135482.
- [8] 袁强军,张宏星,陈芳媛. 不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4661-4668.  
YUAN Qiangjun, ZHANG Hongxing, CHEN Fangyuan. Long-term stability of aerobic granular sludge under low carbon to nitrogen ratio [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4661-4668(in Chinese).
- [9] WANG Y Q, ZHONG C, HUANG D, *et al.* The membrane fouling characteristics of MBRs with different aerobic granular sludges at high flux [J]. Bioresource Technology, 2013, 136: 488-495.

- [10] JUANG Y C, SU A, FANG L H, *et al.* Fouling with aerobic granule membrane bioreactor[J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(9): 1870–1875.
- [11] HONG T B T, PHUONG T T N, HA M B. Integration of aerobic granular sludge and membrane filtration for tapioca processing wastewater treatment: fouling mechanism and granular stability[J]. *Journal of Water Supply*, 2018, 67(8): 846–857.
- [12] DENG L J, GUO W S, NGO H H, *et al.* Application of a specific membrane fouling control enhancer in membrane bioreactor for real municipal wastewater treatment: sludge characteristics and microbial community [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2020, 312: 123612.
- [13] 王成端, 黄国富. 好氧颗粒污泥膜生物反应器中的污泥性质与膜污染研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 756–762.  
WANG Chengduan, HUANG Guofu. Study on sludge properties and membrane fouling in aerobic granular sludge membrane bioreactor [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 756–762 (in Chinese).
- [14] DI TRAPANI D, CORSINO S F, TORREGROSSA M, *et al.* Treatment of high strength industrial wastewater with membrane bioreactors for water reuse: effect of pre-treatment with aerobic granular sludge on system performance and fouling tendency[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 31: 100859.
- [15] 黄冬梅, 张冰, 唐和礼, 等. 好氧颗粒污泥膜生物反应器的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2020, 40(4): 132–140.  
HUANG Dongmei, ZHANG Bing, TANG Heli, *et al.* Advances in aerobic granular sludge membrane bioreactor [J]. *Membrane Science and Technology*, 2020, 40(4): 132–140 (in Chinese).
- [16] ZHANG W X, JIANG F. Membrane fouling in aerobic granular sludge (AGS)–membrane bioreactor (MBR): effect of AGS size [J]. *Water Research*, 2019, 157: 445–453.
- [17] WANG J F, QIU Z G, CHEN Z Q, *et al.* Comparison and analysis of membrane fouling between flocculent sludge membrane bioreactor and granular sludge membrane bioreactor [J]. *PloS One*, 2012, 7(7): e40819.
- [18] SHEN L G, LEI Q, CHEN J R, *et al.* Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor: impacts of floc size[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 269: 328–334.
- [19] WANG X, ZHANG B, SHEN Z Q, *et al.* The EPS characteristics of sludge in an aerobic granule membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21): 8046–8050.
- [20] ZHAO W Q, YANG S S, HUANG Q Y, *et al.* Bacterial cell surface properties: role of loosely bound extracellular polymeric substances (LB-EPS) [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2015, 128: 600–607.
- [21] 王玉莹, 支丽玲, 马鑫欣, 等. 好氧颗粒污泥胞外聚合物组分特征分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(2): 153–160.  
WANG Yuying, ZHI Liling, MA Xinxin, *et al.* Characterization of extracellular polymeric substances from aerobic granular sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(2): 153–160 (in Chinese).
- [22] DING Z J, BOURVEN I, GUIBAUD G, *et al.* Role of extracellular polymeric substances (EPS) production in bioaggregation: application to wastewater treatment[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99: 9883–9905.
- [23] IORHEMEN O T, HAMZA R A, ZAGHLOUL M S, *et al.* Aerobic granular sludge membrane bioreactor (AGMBR): extracellular polymeric substances (EPS) analysis[J]. *Water Research*, 2019, 156: 305–314.
- [24] TAVANA A, PISHGAR R, TAY J H. Impact of hydraulic retention time and organic matter concentration on side-stream aerobic granular membrane bioreactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133525.

作者简介: 张鑫(1995–), 男, 陕西志丹人, 硕士研究生, 研究方向为膜分离技术。

E-mail: 1206867570@qq.com

收稿日期: 2021-10-19

修回日期: 2022-11-26

(编辑: 丁彩娟)