

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.004

膜生物膜反应器及其气体逆扩散的影响

王宇航¹, 杨婧娟¹, 陈宇超², 陈博², 张媛媛¹, 蒋敏敏²,
郑君健¹, 张学洪¹

(1. 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541000; 2. 桂林理工大学 环境
科学与工程学院, 广西 桂林 541000)

摘要: 膜生物膜反应器(MBfR)作为一种新兴膜处理技术,由于其污染物去除效率高、气体利用率高且不产生二次污染而备受关注。以MBfR为研究对象,系统介绍了其反应器分类和工作原理,对MBfR中普遍存在的逆扩散问题进行了详细的讨论,对供气方式、供气压力,以及其他因素如气体停留时间、生物膜活性、膜材料性质等对逆扩散的影响进行了总结。最后对气体逆扩散的可能抑制措施进行了展望。

关键词: 膜生物膜反应器(MBfR); 中空纤维膜; 气体逆扩散

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0025-07

Membrane Biofilm Reactor and Influence of Gas Back Diffusion

WANG Yu-hang¹, YANG Jing-juan¹, CHEN Yu-chao², CHEN Bo²,
ZHANG Yuan-yuan¹, JIANG Min-min², ZHENG Jun-jian¹, ZHANG Xue-hong¹

(1. School of Life & Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Science and
Technology, Guilin 541000, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin
University of Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: The membrane biofilm reactor (MBfR), a novel membrane treatment technology, has attracted considerable attention because of its appreciable pollutants removal efficiency, high gas utilization rate and no secondary pollution. Taking MBfR as the research object, the classification and working principles of MBfR reactors are systematically introduced. The problem of gas back diffusion commonly existing in MBfR is discussed in detail. The influencing factors of back diffusion, such as gas supply mode, gas supply pressure and gas retention time, biofilm activity and membrane material properties, are summarized. Eventually, the possible control measures for gas back diffusion are prospected.

Key words: membrane biofilm reactor (MBfR); hollow fiber membrane (HFM); gas back diffusion

膜生物膜反应器(MBfR)是一种将中空纤维膜 (HFM)无泡曝气与生物膜技术相结合的新兴水处

基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20297009、桂科 AD20297007); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY05039、2021KY0221)

通信作者: 张学洪 E-mail: zhangxuehong@x263.com

理技术,被广泛应用于水处理领域^[1-2]。在MBfR中,由于气态底物通过HFM以无泡曝气的形式扩散到生长在HFM外表面的生物膜中,可以实现100%的气体传质效率,与直接曝气方式相比,有效克服了气体底物溶解度低、过剩气体大量浪费和产生易燃易爆环境等问题。此外,MBfR还具有处理效率高、剩余污泥产量低和运行成本低等优点,逐渐受到人们的青睐^[2]。

虽然MBfR在水处理领域具有很大的发展潜力,但是该技术目前还面临一个亟待解决的问题,即逆扩散(Back diffusion),这也是限制MBfR大规模工程化应用的主要挑战之一^[3-4]。MBfR中HFM膜组件有封闭式和开放式两种供气模式,其中,封闭式供气模式虽然可以达到气体的较高利用率,但是生物膜和反应器水溶液中的其他气体(如氮气、水蒸气等)会逆扩散至HFM膜腔内,占用有效气体底物的空间,导致HFM的扩散效率下降,从而降低反应器对污染物的去除效能。而开放式供气模式虽然可以抑制逆扩散带来的负面影响,但会造成气体的大量浪费。此外,如果以H₂或CH₄为底物,还会产生爆炸的风险^[5]。因此,对MBfR中逆扩散的机理及调控措施的研究具有重要意义。

1 MBfR概述

1.1 MBfR的工作机制

在MBfR中,生物膜附着在HFM表面,气态底物通过HFM膜壁上的微孔以无泡形式扩散至生物膜内,而溶解态底物(污染物、碳源和其他营养元素等)则从生物膜的另一侧扩散进入生物膜,称之为异向扩散生物膜(Counter-diffusional biofilm)^[2]。与传统的曝气方式相比,MBfR通过HFM以无泡形式异向扩散气态底物的模式,由于增加了气体与生物膜的接触面积,有效提升了气态底物的利用效率。此外,由于异向扩散的特性使得生物膜中形成独特的微生物群落结构,并且可以通过调节气态底物的供气压力来调控生物膜内的微生物结构,实现对气态底物的充分利用,从而提升反应器对污染物的去除效率^[6]。

根据HFM供给的气态底物的不同,MBfR可分为:氧基质生物膜反应器(O₂-MBfR,也称MABR)、氢基质生物膜反应器(H₂-MBfR)和甲烷基质生物膜反应器(CH₄-MBfR),不同的反应器类型适用于不

同的污染物去除场景。

1.2 O₂-MBfR

O₂-MBfR是一种基于空气或氧气的新型反应器,通过附着在中空纤维膜表面的生物膜去除外源有机物,如苯、甲苯、乙苯、二甲苯化合物、氯化溶剂和氯酚等^[7-9]。此外,由于O₂-MBfR的底物异向扩散模式,导致生物膜两侧双底物受到限制,生物膜不同深度生长着不同的微生物群落,因此利用生物膜的这一特性可同时去除COD和氮,以及实现厌氧氨氧化过程。目前,O₂-MBfR已经进入了商业应用的阶段^[10]。

1.3 H₂-MBfR

H₂-MBfR是在O₂-MBfR的基础上,引入氢气作为电子供体,主要去除水中的氧化性污染物,如硝酸盐、亚硝酸盐、砷酸盐、高氯酸盐、溴酸盐等无机阴离子和对氯硝基苯、三氯乙烷等卤代有机化合物^[11]。HFM的微孔曝气与生物膜技术相结合,克服了氢气在水中溶解度较低的难题,提高了氢气的利用效率,同时避免了氢气外逸造成爆炸的风险,实现了对氧化性污染物的低成本的高效去除。

H₂-MBfR可用于处理各种类型的受污染水,如地下水、生活污水、养殖废水、卤水等。Zhao等^[6]采用两种中试规模的H₂-MBfR进行串联,同时处理地下水中的硝酸盐和高氯酸盐,达到了良好的去除效果。美国APTwater公司开发了第一个MBfRs商业应用项目——ARoNite™(自养降解硝酸盐)氢基质反硝化工艺,从目前发展状况来看,自养反硝化处理饮用水中氧化性污染物的ARoNite™极有可能在市场上获得成功,尤其是缺水地区^[12]。

1.4 CH₄-MBfR

CH₄-MBfR以甲烷作为电子供体驱动污染物还原,其作用机理与H₂类似,不同的是甲烷在反应器中既可以作为电子供体也可以作为碳源,且成本与H₂相比更为低廉^[13]。Luo等^[14]发现,在相同的HFM材料条件下,CH₄的扩散效率通常比H₂低,这是因为在相同的复合中空纤维膜和温度下,CH₄的渗透能力比H₂小,尽管CH₄的亨利系数略小于H₂,但它的相对分子质量为H₂的8倍,且CH₄分子的体积较大,因此会更加缓慢地透过HFM膜壁。在CH₄-MBfR中主要依赖厌氧甲烷氧化菌对氧化性污染物进行还原降解。已经有研究^[14-15]表明,CH₄-MBfR可以还原水中的高氯酸盐、硝酸盐和亚硝酸盐等氧化态

阴离子。

在所有MBfR类型中,气态底物的传质是反应器运行的核心,由于HfM膜曝气系统可以将任何气体由膜腔传递到水相,且在封闭模式下可实现100%的气体传递效率,与传统的曝气方式相比,提高了气体的传递效率,可以降低整个系统的能耗和处理成本。此外,膜曝气通过膜壁微孔实现无泡曝气,气体在膜壁处直接溶解在水相中,它不会像传统曝气那样将挥发性有机污染物和有气味的化合物带入大气。但MBfR在封闭运行模式下提高了气体传质的同时也会面临逆扩散的影响,生物膜和水中的其他气体会逆扩散至膜腔内,导致有效气体(目标气态底物)在膜腔内的浓度降低,从而降低了反应器对污染物的去除效果。

2 逆扩散机理及影响

2.1 逆扩散的研究背景

虽然理论上通过中空纤维膜供气可以达到100%的气体扩散效率,但是由于其他原因尤其是逆扩散的存在,气体扩散效率往往会降低,因此抑制逆扩散对提高MBfR反应器的运行效率有着重要作用。目前,关于逆扩散的研究已经取得了一定进展。

对减轻逆扩散影响的研究最早开始于20世纪60年代,主要集中在提高中空纤维膜的气体传质效率上。随着研究的不断深入,Li等^[16]通过对反应器间歇脱气过程设计,实现了膜腔内氧气分压达到较高水平且损失较小,氧传质性能仅随时间略有下降,避免了逆扩散给反应器带来的不良影响。Castagna等^[17]研究表明,水蒸气在中空纤维膜内的冷凝和滞留也会影响中空纤维膜的性能,可通过扩大气体流速来减轻逆扩散造成的影响。Perez-Calleja等^[3]通过实验和模型系统探索了运行模式对逆扩散的影响,结果表明,采用中空纤维膜结合开放模式和封闭模式的优点的周期排气的运行策略,大大降低了逆扩散对氧气传质的影响。Shesh等^[18]也对逆扩散进行了相应的研究,使用一系列总压力、入口CO₂浓度、开放式和封闭式操作模式,对由两个大孔聚乙烯层和一个无孔聚氨酯层组成的复合中空纤维膜进行了CO₂向碳酸钠溶液的转移试验。研究发现,CO₂通量和传质系数随供气端平均分压的增加而增大;对封闭模式而言,由于受到逆扩散的影响,CO₂

传质的有效膜面积随供气端CO₂分压的降低而减小。

2.2 逆扩散机理

由于水中通常存在大量溶解性气体(主要是氮气),而中空纤维膜内供应的是纯气体,在渗透压作用下,氮气会扩散至中空纤维膜膜腔内,此现象称为逆扩散^[3]。

此外,生物膜内反硝化反应产生的氮气还会加剧氮气向中空纤维膜内的逆扩散(见图1)。如图1所示,有压力的气态底物从一端供应,另一端密封,由于渗透压的关系,随着与气体供应端距离的增大,中空纤维膜内的有效气体(气态底物)分压逐渐降低,氮气的分压逐渐升高。有效气体由中空纤维膜向生物膜中扩散的通量随着距离的增大而降低,在末端甚至可变为零。N₂一开始会从生物膜向中空纤维膜内扩散,扩散通量逐渐减小,当生物膜中的N₂和中空纤维膜内的N₂渗透压相同时,N₂不再向中空纤维膜内扩散,当超过这个距离时,由于中空纤维膜内的N₂渗透压大于生物膜,N₂将由中空纤维膜向生物膜扩散,并且随距离的增大逐渐增加。在封闭式供气模式下,中空纤维膜末端有效气体向生物膜的扩散通量通常较低,使得大量纤维膜不能发挥其效能,利用效率下降,造成膜材料和反应器容积的浪费。

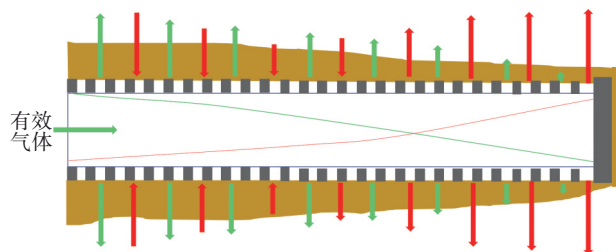


图1 封闭模式下中空纤维膜内有效气体和氮气的扩散

Fig.1 Diffusion of available gas and nitrogen in hollow fiber membrane under closed mode

在膜生物膜反应器中,气体传质至关重要。以膜曝气生物反应器为例,封闭运行模式虽然可以显著提高氧转移效率,但由于逆扩散的影响(见图2),生物膜内产生的氮气随着硝化反硝化作用的进行不断扩散到中空纤维膜膜腔内,使得随着与供气端距离的增加,膜腔内氧气浓度逐渐降低,氮气浓度逐渐升高,直至达到平衡。

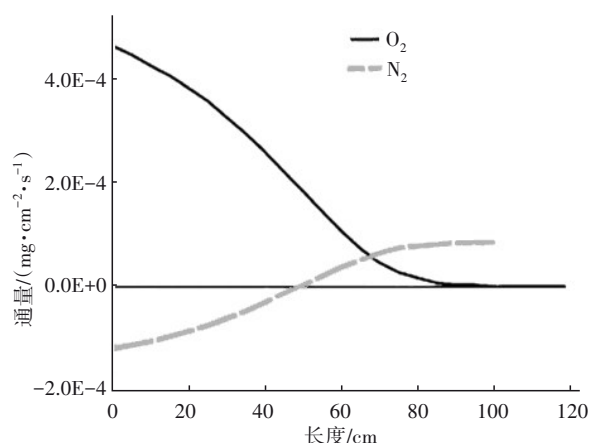


图2 氧气和氮气通量随供气端距离增加的变化情况

Fig.2 Change of oxygen and nitrogen flux with the increase of the distance from the gas supply ends

2.3 逆扩散对反应器的影响

逆扩散对反应器的负面影响主要表现为有效气体的扩散效率下降,原因可分为两个方面:一是其他气体占据中空纤维膜内有效气态底物的空间,降低气态底物的平均浓度;二是中空纤维膜膜腔内的水蒸气发生冷凝而堵塞膜孔。研究^[9]表明,由于逆扩散的影响,生物膜上所产生的氮气扩散到中空纤维膜腔内,使得离供气端较远的膜丝出现“钝化”,即有效气体含量减少,平均气体利用率下降。Perez-Calleja等^[3]研究表明,由于逆扩散的影响,有效气体由中空纤维膜内向生物膜的扩散通量随着与气体供应端距离的增加而逐渐下降,导致了在中空纤维膜表面附着的生物膜获得有效气体的量随之减少,生物膜生长形势逐渐变差,从而进一步降低整个系统的污染物平均去除效率。Xia等^[9]利用H₂-MBfR去除水中硝酸盐的研究表明,在气体逆扩散的影响下,封闭运行模式的中空纤维膜上的微生物群落与微生物代谢和反硝化过程相关的大部分功能基因随着远离气体供应端呈现减弱趋势。因此,降低逆扩散的影响可以提高平均跨膜气体通量,进而提高反应器的整体性能。

3 逆扩散的影响因素及控制措施

影响逆扩散的因素有很多,总体来说,可归为膜组件的供气模式、供气压力和其他因素。逆扩散对反应器的负面影响主要体现在降低了有效气体的传质效率,而传质效率的主导因素是中空纤维膜内的有效气体的浓度(压力),因此,降低逆扩散影响的控制措施应围绕如何提升中空纤维膜内有效

气体浓度。

3.1 中空纤维膜供气模式的影响

中空纤维膜的供气模式主要包括五种(见图3):①开放式供气,有效气体从一端供应,另一端开放;②一端密封供气,有效气体从一端供应,另一端密封;③两端供气,有效气体从膜组件的两端同时供入;④脉冲式供气,按一定时间间隔进行供气-关闭供气-供气循环;⑤周期性排气,按一定时间间隔供气-排气-供气。

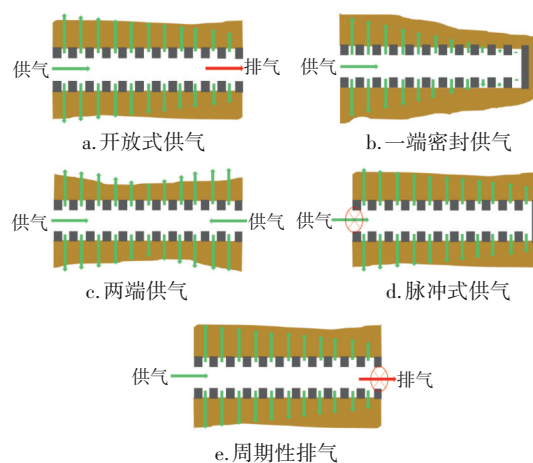


图3 供气模式

Fig.3 Air supply mode

一端供气与两端供气从原理上看均属于密闭供气模式,两端供气模式下,中空纤维膜内有效气体向生物膜扩散及分布理论上沿中点呈对称分布,即在中点位置受逆扩散的影响最大。不同工艺和供气方式下逆扩散的影响见表1。

对于开放运行模式,整个膜腔内的气体流速很高,在这种情况下,膜腔内的气体流动传质能力远大于透过膜壁的扩散传质,使得膜腔内气体分布更加均匀,平均的跨膜传质效率也比较高。但大量的气体未通过膜壁扩散就直接从开放端排出,造成了大量气体的浪费,不仅增加运行成本,还可能会产生易燃易爆环境。此外,挥发性有机物可以透过膜孔扩散到膜腔内,伴随着气流释放到大气而造成污染。

Fang等^[19]研究了中空纤维膜作为气体传输介质时膜组件中气体迁移和气体组成成分的变化,建立了一种计算模型并通过中试验证了模型的正确性。模拟和实验结果均表明,气体的逆扩散对中空纤维膜内的气体传质具有显著影响,N₂的逆扩散降

低了膜腔内 O_2 的分压,从而降低了 O_2 的利用效率;采用脉冲式的供气策略,避免了气体成分沿膜长的变化,也就使得气体浓度沿中空纤维膜长度的分布更加均匀。Perez-Calleja 等^[3]提出了周期性排气方法,即中空纤维膜的一端供气,而另一端设置一个可以封闭和开放的排气装置,周期性地打开排气装

置,以排出扩散进入膜腔内的气体,重新建立气体压力分布。研究发现,在 MABR 封闭式运行状况下,周期性地排放膜腔内的气体可以大大提高气体扩散效率和污染物的去除通量,而且当排气周期足够短时,气体的传质效率甚至会高于连续开放运行模式。

表 1 不同工艺和供气方式下逆扩散的影响

Tab.1 Influence of back diffusion under different process and gas supply mode

供气方式	工艺类型	供气方式分析	逆扩散的影响
开放式供气	MABR	气体平均跨膜传质效率提高,但由于大量有效气体由末端排出造成了气体大量浪费	对逆扩散产生抑制作用
	H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR	对 H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR 来说,除提高气体传质效率外,以 H_2 、 CH_4 为有效气体不但造成气体的浪费,还会产生爆炸的风险	
封闭式供气	MABR	实现 100% 的气体利用率,但会造成惰性气体如 N_2 在膜腔末端的积累,降低气体传质效率	受逆扩散的影响较大
	H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR		
两端供气	MABR	两端供气模式下,有效气体向生物膜的扩散及分布理论上沿中点呈对称分布	受逆扩散的影响较大
	H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR		
脉冲式供气	MABR	可以使气体均匀分布在膜腔内,提高气体传质效率	抑制逆扩散作用
	H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR		
周期性排气	MABR	重新建立了气体在膜腔内的平衡,大大提高了气体的传质效率;但对于 H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR 来说,保持较高的气体传质效率的同时而又不产生爆炸的风险是一个很重要的问题	抑制逆扩散作用
	H_2 -MBfR、 CH_4 -MBfR		

3.2 供气压力的影响

供气压力对逆扩散也有影响。Li 等^[16]研究表明,随着供气压力的增加, O_2 -MBfR 膜腔内的 O_2 和 N_2 浓度分布也相应出现变化,在较低的供气压力下,远离供气端,膜腔内的 O_2 浓度逐渐下降, N_2 浓度上升,膜腔末端几乎没有 O_2 ;而在较高的供气压力下,虽然远离供气端但仍然会出现 O_2 浓度下降的趋势,但是膜腔末端 O_2 浓度与低供气压力相比会出现大幅增加。Xia 等^[9]在封闭模式下运行 H_2 -MBfR,研究发现当没有其他限制因素时,增加 H_2 的供气压力有助于反硝化的进行,进而提高整个系统的硝酸盐去除效率。

Shesh 等^[18]用中空纤维膜作为气体传质的媒介研究了 CO_2 作为供应气体时的传质效率和传质系数。研究表明, CO_2 的传质效率和传质系数随供气压力和供气浓度的增加而增大。此外,随着 CO_2 分压的增大,无论是封闭模式还是开放模式, CO_2 的跨膜通量都出现增大趋势。以上研究表明,当供气压力增大时,膜腔内的供气气体分压和膜壁外分压平衡点会向增大扩散通量的方向移动,从而对逆扩散产生抑制作用。

3.3 其他因素

除上述两种因素外,一些其他的因素如停留时间、生物膜或膜材料等也会对逆扩散产生影响。Syron 等^[20]在研究 O_2 -MBfR 时,发现气体停留时间对确定氧气传质效率至关重要,氧气在膜腔内的停留时间与氧气传质效率呈正相关;此外,该研究还表明在较高的供气压力下,逆扩散的影响较小。Pellicer-Nàcher 等^[21]通过实验和数学模型研究证明了生物膜的生长有助于气体的跨膜传质效率,并且随生物膜活性的增加而增强,这是由于生物膜对氧气的消耗促进了膜腔内氧气不断向生物膜扩散,从而降低逆扩散的影响。

膜材料对逆扩散的影响主要体现在中空纤维膜的理化性质(生物亲和度、承受的最大供气压力等)对气体传质效率的影响。中空纤维膜主要分为以聚丙烯和聚乙烯等材料为代表的微孔膜、以硅胶膜为代表的致密膜和复合膜三种^[22],其中,微孔膜虽然孔隙率和接触面积较大,但承受的最大供气压力较低;致密膜孔隙率小且能承受较大的压力,但气体的扩散系数较低;复合膜虽然克服了微孔膜和致密膜的缺陷,也是当前主流膜生物膜反应器中最常采用的,但其成本通常较为昂贵^[23]。因此,研

制一种气体扩散效率高、生物亲和性好且成本低廉的膜材料,将其应用到反应器中对降低逆扩散的影响具有重要意义。

4 结语

膜生物膜反应器(MBfR)作为一种新型、高效的水处理工艺,具有处理成本低、气体利用率高、不产生二次污染等优点,应用前景广泛。目前,国内外对该技术的研究主要还处于实验室小试和中试规模阶段,还有很多挑战和制约其工程应用的因素尚未解决。一方面,逆扩散对中空纤维膜上生长的生物膜的影响尚不明确,对有效抑制逆扩散的相关策略也缺乏深入研究。另一方面,MBfR的实际工程应用还存在许多技术问题,如中空纤维膜材料生物亲和性较差、膜污染控制困难及处理量小等。未来的研究重点应集中在逆扩散的抑制策略、膜材料的改进、膜污染控制及工程推广等方面。

气体传质作为MBfR的核心,提高气体利用效率对整个系统污染物去除效率的提高、节省反应器的运行成本有重要意义,未来气体逆扩散的研究应集中在以下方面:

① 明确气体逆扩散在反应器系统中的变化规律,针对抑制逆扩散的负面影响进行优化反应器设计和供气模式,以改善反应器性能;

② 探究气体逆扩散对HFM表面生物膜之间的影响,考察不同供气方式下运行的MBfR系统中生物膜群落结构差异,以改善生物膜对污染物去除的效果;

③ 改进膜材料,提高中空纤维膜的气体传质效率以及生物亲和性,从而提高气体的利用效率,最终达到抑制逆扩散的目的。

参考文献:

- [1] CASEY E, GLENNON B, HAMER G. Oxygen mass transfer characteristics in a membrane-aerated biofilm reactor[J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2015, 62(2): 183-192.
- [2] MARTIN K J, NERENBERG R. The membrane biofilm reactor (MBfR) for water and wastewater treatment: principles, applications, and recent developments[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 83-94.
- [3] PEREZ-CALLEJA P, AYBAR M, PICIOREANU C, *et al.* Periodic venting of MABR lumen allows high removal rates and high gas-transfer efficiencies [J]. *Water Research*, 2017, 121: 349-360.
- [4] RITTMANN B E. Biofilms, active substrata, and me [J]. *Water Research*, 2018, 132: 135-145.
- [5] JIANG M, ZHANG Y, YUAN Y, *et al.* Nitrate removal and dynamics of microbial community of a hydrogen-based membrane biofilm reactor at diverse nitrate loadings and distances from hydrogen supply end [J]. *Water*, 2020, 12(11): 3196.
- [6] ZHAO H P, ONTIVEROS-VALENCIA A, TANG Y N, *et al.* Removal of multiple electron acceptors by pilot-scale, two-stage membrane biofilm reactors [J]. *Water Research*, 2014, 54: 115-122.
- [7] SYRON E, SEMMENS M J, CASEY E. Performance analysis of a pilot-scale membrane aerated biofilm reactor for the treatment of landfill leachate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 120-129.
- [8] NERENBERG R. The membrane-biofilm reactor (MBfR) as a counter-diffusional biofilm process [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, 38: 131-136.
- [9] XIA S Q, ZHONG F H, ZHANG Y H, *et al.* Bio-reduction of nitrate from groundwater using a hydrogen-based membrane biofilm reactor [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(2): 257-262.
- [10] 陈文华, 潘超群, 厉雄峰, 等. MABR技术在农村生活污水治理上的应用[J]. *水处理技术*, 2019, 45(5): 126-128, 134.
CHEN Wenhua, PAN Chaoqun, LI Xiongfeng, *et al.* The application research on rural domestic wastewater by MABR [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(5): 126-128, 134(in Chinese).
- [11] 蒋敏敏, 张学洪, 李海翔. 氢基质生物膜反应器在饮用水处理中的研究进展[J]. *净水技术*, 2015, 34(z1): 23-26.
JIANG Minmin, ZHANG Xuehong, LI Haixiang. Research progress of hydrogen-based membrane biofilm reactor (MBfR) for drinking water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(z1): 23-26 (in Chinese).
- [12] ZHOU C, ONTIVEROS-VALENCIA A, NERENBERG R, *et al.* Hydrogenotrophic microbial reduction of oxyanions with the membrane biofilm reactor [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 3268.
- [13] SUN F Y, DONG W Y, SHAO M F, *et al.* Aerobic methane oxidation coupled to denitrification in a

- membrane biofilm reactor: treatment performance and the effect of oxygen ventilation [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 145: 2–9.
- [14] LUO Y H, CHEN R, WEN L L, *et al.* Complete perchlorate reduction using methane as the sole electron donor and carbon source [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4): 2341–2349.
- [15] SHI Y, HU S H, LOU J Q, *et al.* Nitrogen removal from wastewater by coupling anammox and methane-dependent denitrification in a membrane biofilm reactor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11577–11583.
- [16] LI J, ZHU L P, XU Y Y, *et al.* Oxygen transfer characteristics of hydrophilic treated polypropylene hollow fiber membranes for bubbleless aeration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 362(1/2): 47–57.
- [17] CASTAGNA L, ZANELLA A, SCARAVILLI V, *et al.* Effects on membrane lung gas exchange of an intermittent high gas flow recruitment maneuver: preliminary data in veno-venous ECMO patients [J]. *Journal of Artificial Organs*, 2015, 18(3): 213–219.
- [18] SHESH T, EUSTANCE E, LAI Y J S, *et al.* Characterization of CO₂ flux through hollow-fiber membranes using pH modeling [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 592: 117389.
- [19] FANG Y, NOVAK P J, HOZALSKI R M, *et al.* Condensation studies in gas permeable membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2004, 231(1/2): 47–55.
- [20] SYRON E, SEMMENS M J, CASEY E. Performance analysis of a pilot-scale membrane aerated biofilm reactor for the treatment of landfill leachate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 120–129.
- [21] PELLICER-NÀCHER C, DOMINGO-FÉLEZ C, LACKNER S, *et al.* Microbial activity catalyzes oxygen transfer in membrane-aerated nitrifying biofilm reactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 446: 465–471.
- [22] VOSS M A, AHMED T, SEMMENS M J. Long-term performance of parallel-flow, bubbleless, hollow-fiber-membrane aerators [J]. *Water Environment Research*, 1999, 71(1): 23–30.
- [23] AHMED T, SEMMENS M J, VOSS M A. Oxygen transfer characteristics of hollow-fiber, composite membranes [J]. *Advances in Environment Research*, 2004, 8(3/4): 637–646.

作者简介:王宇航(1997–),男,山东枣庄人,硕士研究生,从事污水处理技术相关研究。

E-mail:wyuhang0420@163.com

收稿日期:2021-01-16

修回日期:2021-03-07

(编辑:丁彩娟)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命