

不同生物膜载体下 MBBR 中微生物群落变化特征

张新波^{1,2}, 张祖敏^{1,2}, 宋 姿^{1,2}, 祁 丽^{1,2}, 张 丹^{1,2}, 刘 阳^{1,2},
纪冬丽^{1,2}, 温海涛^{1,2}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院 基础设施防护和环境绿色生物技术国际联合研究中心, 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 以沸石粉和聚氨酯海绵为原料制备新型生物膜载体,对比分析了投加新型载体和传统聚氨酯海绵载体的移动床生物膜反应器(MBBR)的微生物群落结构及功能性脱氮菌属的演替变化特征。结果表明,微生物在新型载体和传统聚氨酯海绵载体上的生长速率分别为 0.009 5 和 0.006 5 g/(g 载体·d)。通过对微生物群落分析,两种生物膜载体上的菌群存在较大的差异性,但 *Proteobacteria* 和 *Bacteroidetes* 在整个试验过程中是最占优势的两种菌。Shannon、ACE 和 Chao1 等指数表明新型载体上微生物多样性更加丰富稳定,并且存在较多的反硝化功能性菌属(*Sphaerotilus*、*Flavobacterium* 和 *Thermomonas* 等),从而提高了 MBBR 工艺的脱氮性能。

关键词: 移动床生物膜反应器; 聚氨酯海绵; 生物膜载体; 微生物群落; 功能性菌属
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0063-06

Characteristics of Microbial Communities in MBBR with Different Biofilm Carriers

ZHANG Xin-bo^{1,2}, ZHANG Zu-min^{1,2}, SONG Zi^{1,2}, QI Li^{1,2}, ZHANG Dan^{1,2},
LIU Yang^{1,2}, JI Dong-li^{1,2}, WEN Hai-tao^{1,2}

(1. Joint Research Centre for Protective Infrastructure Technology and Environmental Green Bioprocess, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: New biofilm carrier was prepared using zeolite powders and polyurethane sponges as raw materials. The succession changes in microbial community and functional denitrification bacteria in the moving bed biofilm reactor (MBBR) with new biofilm carriers and traditional polyurethane sponge carriers were compared and analyzed. The results showed that the growth rates of microorganisms on the new biofilm carriers and the traditional polyurethane sponge carriers were 0.009 5 g/(g·d) and 0.006 5 g/(g·d), respectively. The analysis of microbial community showed great differences between the two types of biofilm carriers; however, *Proteobacteria* and *Bacteroidetes* were the two dominant bacteria in the whole experiment process. Shannon, ACE, and Chao1 indices showed that the microbial diversity on the new biofilm carrier was more abundant and stable, and there were more denitrification functional bacteria (*Sphaerotilus*, *Flavobacterium*, *Thermomonas*, etc.) on the new biofilm carrier, which improved the

nitrogen removal performance in the MBBR process.

Key words: moving bed biofilm reactor; polyurethane sponge; biofilm carrier; microbial community; functional bacteria

随着水体富营养化问题的日益加剧和国家排放标准的日益提高,控制并减少氮的排放成为防治水体富营养化的重要对策之一^[1]。移动床生物膜反应器(MBBR)具有运转灵活、水损低、耐冲击负荷、泥龄长、剩余污泥量少、无需定期反冲洗、无需载体回流、无需清洗滤料和更换曝气器等诸多特点^[2-4],已被证实为简单高效的污水脱氮处理工艺^[5-6]。在MBBR工艺中,由于生物膜载体外层溶解氧浓度较高,以好氧硝化菌为主;内部则因氧传递受阻及外部氧大量消耗形成缺氧区,反硝化菌占优势,这样载体由外向内形成好氧/缺氧的微环境,从而达到了同步硝化反硝化(SND)的目的^[7-8]。因此,生物膜载体是MBBR的核心,直接影响生物膜的生长速率和附着微生物量^[9],从而影响MBBR的处理效果。基于此,笔者以沸石粉和聚氨酯海绵为原料制备新型生物膜载体,并对比分析了投加新型载体和传统聚氨酯海绵载体的MBBR系统在相同运行条件下微生物的生长情况以及生物膜载体上菌群的变化特征。

1 材料与方法

1.1 新型载体的制备

将聚氨酯海绵按20%的填充率装入容积为1 L的ZR4-6六联搅拌器内,同时加入3 g沸石粉,在叶轮的搅动下,使沸石粉进入聚氨酯海绵内部;首先在转速为100 r/min的条件下,设置第1个叶轮的运行时间为1 h,第2个叶轮的运行时间为2 h,依此类推,第6个叶轮的运行时间为6 h;上述过程完成后,将转速调至150 r/min,依旧将第1~6个叶轮的运行时间分别设为1~6 h;按增幅为50 r/min来设置转速,最大转速为300 r/min。

聚氨酯海绵在加入到六联搅拌器之前,在烘箱(60 ℃)内烘干2 h后称其质量(记为 m_1),在运行完每一个转速后,将6个容器内的新型载体取出并分别放入烘箱(60 ℃)内烘干12 h后称其质量,分别记为 m_{2-1} 、 m_{2-2} 、 m_{2-3} 、 m_{2-4} 、 m_{2-5} 和 m_{2-6} , $m_2 - m_1$ 即为聚氨酯海绵吸附沸石粉的质量。每个条件运行3次取平均值,确定最佳转速和最佳结合时间。

1.2 试验装置和运行参数

试验装置为两个由有机玻璃制成的长方形

MBBR反应器,有效容积为12 L。聚氨酯海绵的长×宽×高为15 mm×15 mm×15 mm,密度为28 kg/m³,平均比表面积为0.846 m²/g,每平方英寸(1英寸=2.54 cm)含80孔;沸石粉粒径为0.15 mm,密度为2.1~2.6 g/cm³,布氏硬度为3.5~5.5;自制新型生物膜载体的长×宽×高为15 mm×15 mm×15 mm,密度为32 kg/m³。采用聚氨酯海绵载体的反应器记为R₁,采用新型载体的反应器记为R₂,两个反应器的载体填充率均为20%。试验接种污泥取自天津某污水处理厂二沉池,污泥混合液的悬浮固体浓度为2.8 g/L。生物膜载体挂膜20 d后开始连续进水,反应器的水力停留时间(HRT)为12 h。两个MBBR反应器均在室温[(20±1) ℃]下运行,每天将pH值调至中性。

1.3 原水水质

试验采用人工配制废水,即在自来水中溶解葡萄糖、(NH₄)₂SO₄、KH₂PO₄、酵母粉及微量元素,具体水质如下:TOC、NH₄⁺-N、TP、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、酵母提取物分别为110~160、20~30、2.5~3.5、0.02~0.28、0.3~1.2、30 mg/L,微量元素成分中MgSO₄·7H₂O、CaCl₂·2H₂O、MnCl₂·7H₂O、ZnSO₄·7H₂O、CoCl₂·6H₂O、CuSO₄·5H₂O、FeCl₃·Na₂MoO₄·2H₂O分别为5.07、0.368、0.275、0.44、0.42、0.391、1.45、1.26 mg/L。

1.4 检测方法

DO、pH值:哈希HQ11d便携式分析仪;MLSS、MLVSS:标准测定方法;生物膜载体的附着生物量(AGBS)和挥发性附着生物量(VAGBS)分别按式(1)、(2)计算。

$$AGBS = \frac{m_b - m_a}{m_c} \quad (1)$$

$$VAGBS = \frac{m_b - m_d}{m_c} \quad (2)$$

式中: m_a 是经105 ℃干燥后孔径为0.45 μm玻璃纤维滤膜的质量; m_b 是经105 ℃干燥后玻璃纤维滤膜和载体中微生物的质量之和; m_c 是经105 ℃干燥并去除微生物后的载体质量; m_d 是经600 ℃干燥的玻璃纤维滤膜和载体中微生物的质量之和。

1.5 微生物菌群分析

在运行的第 15、35、55 和 75 天,分别提取两个反应器内生物膜载体上的生物量进行高通量测序。引物体系(341F 和 805R)能有效扩增出 16S rDNA 的多个可变区(V3、V4),能够准确鉴定出多个物种。首先对样品的基因组 DNA 进行提取和质检,然后进行 PCR 扩增和产品纯化,最后实现 Illumina MiSeq 测序。菌群丰富度相关指数包括 Shannon、ACE、Chao1、Simpson 等,用 Mothur 软件进行计算。

2 结果与分析

2.1 新型载体的选择

在转速分别为 100、150、200、250 和 300 r/min 的条件下,运行 1~4 h 时,聚氨酯海绵吸附沸石粉的量均呈增加趋势,当运行时间超过 4 h 后,新型载体的质量趋于稳定,此时聚氨酯海绵吸附沸石粉已达饱和;在运行 4 h 时,100、150、200、250 和 300 r/min 对应的沸石粉平均增量分别为 0.087 5、0.157 7、0.121 5、0.067 3 和 0.067 1 g,因此试验确定最佳搅拌时间为 4 h,最佳转速为 150 r/min。

2.2 生物膜的形成和生长

生物膜生长的整个过程分为 4 个阶段,即:排放污泥阶段(0~10 d)、生物膜快速生长阶段(10~45 d)、生物膜缓慢生长阶段(45~60 d)和生物膜成熟

阶段(60~90 d)。在第 1 阶段,附着于生物膜载体表面的不稳定污泥随水流排出,而此时生物膜的生长速率缓慢,导致生物量呈下降趋势。第 2 阶段,两个 MBBR 反应器中的微生物都迅速生长,生长速率分别为 0.009 5 和 0.006 5 g/(g 载体·d)。在第 3、4 阶段,生物膜缓慢生长至成熟期。在整个过程中,新型载体上的附着生物量平均为 (0.385 ± 0.119) gVAGBS/g 载体,而聚氨酯海绵上的附着生物量平均为 (0.279 ± 0.092) gVAGBS/g 载体。 R_2 对 TOC 的去除率为 $(94.3 \pm 1.8)\%$,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 $(97.2 \pm 2.1)\%$ 。与 R_1 相比, R_2 对 TN 的去除率提高了将近 10% (见表 1)。由于聚氨酯海绵的多孔结构,在生物膜的培养过程中,微生物不断地附着在生物载体的内部空间上^[10]。随着生物膜在生物载体上的质量增加,生物膜的厚度也增加。本研究使用的聚氨酯海绵和沸石粉的比表面积分别为 0.846 和 23.4 m²/g,沸石粉的比表面积远大于聚氨酯海绵。通过旋转,沸石粉可以进入聚氨酯海绵的孔隙和通道,充分利用其多孔性,提高整个载体的比表面积,有利于更多微生物的附着。因此,新型载体上附着了更多的微生物,这有利于生物载体中缺氧环境的形成^[11],在促进反硝化过程的同时促进了同步硝化反硝化(SND)的发生和 TN 的去除。

表 1 MBBR 反应器的运行效果

Tab. 1 Operation effect of MBBR

t/d	TOC 去除率/%		$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率/%		TN 去除率/%		SND/%	
	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2	R_1	R_2
1	87.1	89.4	83.5	94.3	46.5	60.1	57.3	77.5
15	94.0	95.7	93.7	94.4	64.1	80.2	71.4	83.8
35	94.6	95.7	96.3	93.9	72.2	84.2	80.7	92.3
55	95.0	96.1	97.9	97.4	77.5	84.5	82.4	90.4
75	94.9	95.9	98.3	99.5	79.3	87.5	85.0	90.4

2.3 微生物菌群多样性及相似性分析

生物膜载体中的微生物群落是影响载体脱氮性能的主要因素。 R_1 和 R_2 中不同阶段微生物菌群的多样性检测结果见表 2。接种污泥(D_1)有 61 117 个序列和 1 594 个 OTUs。 R_1 、 R_2 中生物膜载体上微生物序列数分别为 55 874~67 087、57 332~72 310。二者的生物多样性均呈现先增加后降低的趋势,在 55 d 时达到最大值。Shannon 指数通常用于估计样品中的微生物多样性,在运行后期(第 75 天), R_2 中的微生物多样性高于 R_1 。ACE 和 Chao1 通常用于评估物种总数,在运行后期(第 75 天), R_2 中生物膜

样品的 ACE 和 Chao1 指数分别为 883.976 和 923.623, R_1 中则分别为 566.242 和 553.902。整体来说,新型载体生物膜上微生物的多样性和稳定性有所增强。

本研究通过主坐标分析(PCoA)方法揭示了接种污泥和生物膜样品中菌群的异同。样本之间的加权 UniFrac 距离代表了样品中微生物群落的相似性情况,即距离越近相似度越高。分析结果见图 1。可以看出,原始污泥中的微生物群落与所有生物膜样品中的微生物群落差异很大,这可能是由于世代时间较长的微生物更容易附着于生物膜载体上生

长,因此生物膜上微生物种属繁多,食物链长,物种丰富度高。在前 15 d, R_1 和 R_2 两个样品中的微生物菌群只有轻微的差异,从第 35 天和第 55 天的结

果来看,两个反应器间的微生物群落出现了一定的差异,这种差异在第 75 天时又有所减小,这表明微生物群落的稳定性随生物膜的成熟而提高。

表 2 R_1 和 R_2 中不同阶段微生物菌群的多样性

Tab. 2 Biodiversity at different stages in R_1 and R_2

样品	序列数	OTUs	Shannon	ACE	Chao1	Coverage	Simpson
D_1	61 117	1 594	8.827	8 767.725	9 184.585	0.954	0.993
D_{15A}	55 874	6 816	5.691	825.508	843.526	0.996	0.948
D_{15B}	63 974	5 290	5.975	890.864	855.031	0.996	0.960
D_{35A}	64 315	4 567	6.187	820.983	853.016	0.996	0.966
D_{35B}	71 798	10 042	5.367	814.585	773.725	0.996	0.902
D_{55A}	67 087	7 272	5.953	827.873	865.231	0.996	0.952
D_{55B}	72 310	14 708	5.254	755.544	754.08	0.997	0.882
D_{75A}	62 622	19 534	4.442	566.242	553.902	0.998	0.810
D_{75B}	57 332	15 601	5.517	883.976	923.623	0.996	0.876

注: D_{15A} 和 D_{15B} 分别为 R_1 和 R_2 在第 15 天的数据,其他同理。

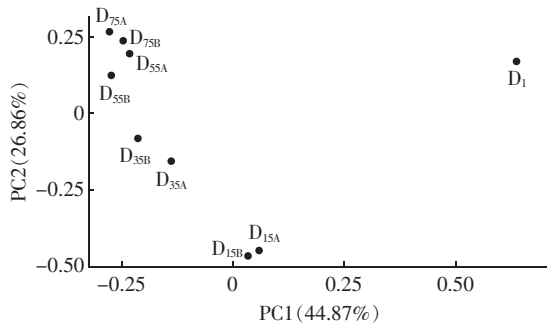


图 1 R_1 和 R_2 中不同阶段微生物菌群的 UniFrac 距离

Fig. 1 UniFrac distances of microbial communities at different stages in R_1 and R_2

2.4 微生物群落演替

从接种污泥和两个反应器的生物膜样品中共鉴定出 29 个细菌门类,其中 *Proteobacteria* 和 *Bacteroidetes* 在整个试验运行过程中都是最占优势的菌属,这和其他研究是一致的^[12-13]。变形杆菌属和拟杆菌属均属于革兰氏阴性菌,表面主要由脂多糖组成^[14],这使得它们容易附着在生物载体表面。对于反应器 R_1 , *Proteobacteria* 占比在 1 ~ 15 d 的时间内由 57.78% 降到了 38.36%,而在 15 ~ 35 d 又逐渐增加到了 55.36%,从 35 d 直至运行结束,数量一直保持较稳定的状态 (D_1 : 57.78%, D_{15A} : 38.36%, D_{35A} : 55.36%, D_{55A} : 55.34%, D_{75A} : 54.71%),而 *Bacteroidetes* 数量则呈相反的趋势 (D_1 : 19.96%, D_{15A} : 51.71%, D_{35A} : 36.07%, D_{55A} : 25.44%, D_{75A} : 26.69%)。对于反应器 R_2 , *Proteobacteria* 的占比在前 15 d 持续下降,第 15 ~ 75 天持续增加到 67.91%

(D_1 : 57.78%, D_{15B} : 26.87%, D_{35B} : 41.52%, D_{55B} : 65.55%, D_{75B} : 67.91%), *Bacteroidetes* 则呈相反的变化趋势 (D_1 : 19.96%, D_{15B} : 59.91%, D_{35B} : 45.62%, D_{55B} : 21.12%, D_{75B} : 12.11%)。与接种污泥相比,两个 MBBR 在运行初期 (1 ~ 35 d) *Saccharibacteria* 占比增加,后期 (35 ~ 75 d) 则数量降低,其中 R_1 中 *Saccharibacteria* 占比最高可达 7.51%, R_2 中 *Saccharibacteria* 占比最高可达 11.48%。与接种污泥相比, R_1 中 *Verrucomicrobia* 的占比在 15 ~ 35 d 突然增加 (从 1.82% 增加到 11.07%),而在 R_2 中, *Verrucomicrobia* 的占比在整个运行过程中从 0.20% 逐渐增加到 8.82%。出现这种趋势的原因可能是:在两个反应器运行的中后期,由于微生物数量增加消耗掉更多的溶解氧,而 *Verrucomicrobia* 属于反硝化菌,因此其数量在中后期逐渐增加。另外, *Acidobacteria* 是接种污泥中的第 3 种优势菌,但在两个 MBBR 反应器中的比例相对较小,这可能是由于 *Acidobacteria* 不能适应生物膜提供的生长环境。

从纲水平来看, *Proteobacteria* 中最丰富的 4 类细菌分别是 *Betaproteobacteria*、*Gammaproteobacteria*、*Alphaproteobacteria* 和 *Deltaproteobacteria*,占到总微生物数量的 26.90% ~ 67.92%。大多数样品中 *Betaproteobacteria* 所占比例最高,尤其是在 D_{75A} 和 D_{75B} 两个样品中分别占到 43.89% 和 43.05%。 *Betaproteobacteria* 中所含的 *Nitrosococcus oceanus* 和 *Rhodocyclus* 与脱氮有密切关系,对生物膜的高效运行起着重要作用^[15]。 *Sphingobacteriia* 是参与 COD

和氮去除的主要微生物,在 *Bacteroidetes* 中占有最大比例 (R_1 和 R_2 中平均占比分别为 16.33% 和 18.70%),其次是 *Flavobacteriia* (R_1 和 R_2 中平均占比分别为 7.63% 和 2.37%) 和 *Bacilli* (R_1 和 R_2 中平均占比分别为 0.72% 和 0.46%)。接种污泥的 *Cytophagia* 比例相对较小,但随着生物膜在生物载体上生长其比例逐渐增加并最终成为主要优势菌种之一。*Cytophagia* 易分泌黏性物质,使其易附着于生物膜上生长,同时促进了生物膜的形成。

从属水平上可以看出,接种污泥和生物膜样品中的微生物种类有较大差异。接种污泥中含有丰富的菌属,如 *Terrimonas*、*Ferribacterium*、*Thauera*, 然而这些菌属在生物膜样品中基本不存在。虽然 R_1 和 R_2 中生物膜样品的微生物群落有所差异,但最丰富的 5 种微生物基本相同,即 *Sphaerotilus*、*Thermomonas*、*Flavobacterium*、*Prostheco bacter* 和 *Enterobacter*。*Thermomonas* 在接种污泥中只占很小比例,但在两个反应器内却发生了很大改变, R_1 中 *Thermomonas* 数量在早期显著增加,在后期逐渐减小 (D_{15A} : 16.10%, D_{35A} : 8.62%, D_{55A} : 0.49%, D_{75A} : 0.12%),在 R_2 中亦是如此 (D_{15B} : 14.86%, D_{35B} : 2.71%, D_{55B} : 1.08%, D_{75B} : 0.89%)。*Thermomonas* 是一种革兰氏阴性菌,它可以利用有机电子供体将硝酸盐或亚硝酸盐还原为分子氮。*Sphaerotilus* 在接种污泥中未检测到,但反应器运行到 35 d 时却成为生物膜载体上的优势菌属(在 D_{35A} 和 D_{35B} 中分别为 10.85% 和 22.35%),试验结束时仍保持最高比例。由于附着在生物膜上的微生物种类繁多,因此很难在属水平上准确描述各类微生物的变化。*Flavobacterium* 在异养条件下发生反硝化^[16],其在 R_1 和 R_2 中的平均占比分别为 1.47% 和 5.57%,这与 R_2 的反硝化效果更好相一致。*Prostheco bacter* 和 *Enterobacter* 都是化学异养微生物,它们在去除有机物方面起着重要作用。此外,生物膜载体上的菌群会随着投加不同类型的碳源而发生变化。

2.5 功能性脱氮菌属

一般来说,*Nitrosomonas* 是氨氧化细菌(AOB)中最常见的菌属,而 *Nitrospira* 是亚硝酸盐氧化细菌(NO₂-)中最常见的菌属。接种污泥和生物膜样品中 AOB、NO₂- 和反硝化细菌(DNB)的相对丰度如图 2 所示。AOB 在所有样品中的比例均约为 0.65%,因此 R_1 和 R_2 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果无显著差异。

除接种污泥中 NO₂- 含量相对较少外,其他生物膜样品中 NO₂- 含量约为 0.25%。尽管 NO₂- 的含量低于 AOB,但水样中的亚硝酸盐没有积累,这表明 NO₂- 一旦存在,它便能将亚硝酸盐转化为硝酸盐。研究还表明,反硝化作用是 MBBR 同步硝化反硝化的限速步骤。随着生物膜载体中 DO 浓度的降低,DNB 含量逐渐增加($D_{75} > D_{55} > D_{35} > D_{15}$),且 R_2 中 DNB 含量高于 R_1 ,这与前者的高脱氮率和 SND 性能相一致。

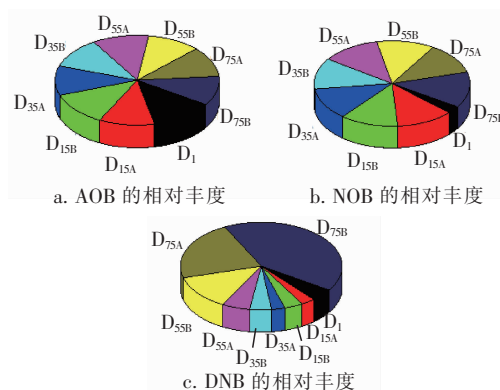


图 2 所有样品中 AOB、NOB 和 DNB 的相对丰度

Fig. 2 Relative abundance of AOB, NOB and DNB of all samples

3 结论

- ① 与传统聚氨酯海绵载体相比,新型载体上附着了更多的生物量,有助于营造缺氧环境,促进了 MBBR 反应器的 SND 性能。
- ② 生物膜样品与接种污泥中的微生物群落存在较大的差异性。
- ③ 新型载体上的微生物群落多样性更加丰富,且存在较多的反硝化细菌。
- ④ 新型载体被证实可应用于 MBBR 反应器中并可促进工艺的脱氮性能。

参考文献:

- [1] Chu L B, Wang J L. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor[J]. Chem Eng J, 2011, 170 (1): 220 - 225.
 - [2] 张鹏,袁辉洲,柯水洲. MBBR 法处理城市污水去除污染物的特性研究[J]. 水处理技术, 2009, 35 (10): 91 - 96.
- Zhang Peng, Yuan Huizhou, Ke Shuizhou. Study on the characters of treating urban sewage to remove pollutants

- with MBBR process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(10): 91–96 (in Chinese).
- [3] 王学江, 夏四清, 陈玲, 等. DO对MBBR同步硝化反硝化生物脱氮影响研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(4): 514–517, 538.
- Wang Xuejiang, Xia Siqing, Chen Ling, *et al.* Effect of DO on simultaneous nitrification and denitrification in MBBR [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2006, 34(4): 514–517, 538 (in Chinese).
- [4] 张新波, 宋姿, 祁丽, 等. 聚氨酯海绵载体填充率对MBBR脱氮的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(15): 78–81.
- Zhang Xinbo, Song Zi, Qi Li, *et al.* Effect of filling fraction on nitrogen removal of polyurethane sponge-based moving bed biofilm reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(15): 78–81 (in Chinese).
- [5] 孟涛, 刘杰, 杨超, 等. MBBR工艺用于青岛李村河污水处理厂升级改造[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(2): 59–61.
- Meng Tao, Liu Jie, Yang Chao, *et al.* Application of MBBR process in upgrading and reconstruction of Licunhe WWTP in Qingdao City [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(2): 59–61 (in Chinese).
- [6] 王翥田, 叶亮, 张新彦, 等. MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2): 71–73.
- Wang Zhutian, Ye Liang, Zhang Xinyan, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2): 71–73 (in Chinese).
- [7] Zhang X B, Song Z, Guo W S, *et al.* Behavior of nitrogen removal in an aerobic sponge based moving bed biofilm reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 245(Pt A): 1282–1285.
- [8] 方茜, 张朝升, 张立秋, 等. 曝气量对同时硝化/反硝化除磷工艺效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(21): 14–18.
- Fang Qian, Zhang Chaosheng, Zhang Liqiu, *et al.* Influence of aeration rate on simultaneous nitrification/denitrification phosphorus removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(21): 14–18 (in Chinese).
- [9] Zhang X B, Chen X, Zhang C Q, *et al.* Effect of filling fraction on the performance of sponge-based moving bed biofilm reactor [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 219: 762–767.
- [10] Luo Y L, Guo W S, Ngo H H, *et al.* Removal and fate of micropollutants in a sponge-based moving bed bioreactor [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 159: 311–319.
- [11] Guo W S, Ngo H H, Dharmawan F, *et al.* Roles of polyurethane foam in aerobic moving and fixed bed bioreactors [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(5): 1435–1439.
- [12] Wang L F, Li Y, Wang L, *et al.* Responses of biofilm microorganisms from moving bed biofilm reactor to antibiotics exposure: Protective role of extracellular polymeric substances [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 254: 268–277.
- [13] Wang X D, Bi X J, Hem L J, *et al.* Microbial community composition of a multi-stage moving bed biofilm reactor and its interaction with kinetic model parameters estimation [J]. *J Environ Manage*, 2018, 218: 340–347.
- [14] Atabek A, Camesano T A. Atomic force microscopy study of the effect of lipopolysaccharides and extracellular polymers on adhesion of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *J Bacteriol*, 2007, 189(23): 8503–8509.
- [15] Tang B, Chen Q Y, Bin L Y, *et al.* Insight into the microbial community and its succession of a coupling anaerobic-aerobic biofilm on semi-suspended bio-carriers [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 247: 591–598.
- [16] Huang C, Li Z L, Chen F, *et al.* Microbial community structure and function in response to the shift of sulfide/nitrate loading ratio during the denitrifying sulfide removal process [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 197: 227–234.



作者简介: 张新波 (1978 –), 女, 山东诸城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型废水生物处理技术、饮用水安全控制技术。

E-mail: zxbcj2006@126.com

收稿日期: 2019-01-13