

论述与研究

填料类型对 MBBR 启动及运行效能的影响

朱点钰, 陈年浩, 朱津苇, 朱颖楠, 王瑾丰, 任洪强, 丁丽丽
(南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要: 为了比较具有不同密度和孔隙率的 A、B 两种填料在移动床生物膜反应器 (MBBR) 中处理废水的能力, 采用 R1、R2 两个反应器分别装填两种填料, 并对其水质指标、生物膜表面形态、生理生化特征进行对比研究。结果表明, 填充填料 A 的 R1 反应器的适应性、抗冲击性以及挂膜启动期出水水质均优于填充填料 B 的 R2 反应器; R1 生物膜的厚度、粘附力与生物膜更新速度均高于 R2, 其脱氢酶活性显著高于 R2, 即孔隙率较高、相对密度更接近于 1 的填料应用于移动床生物膜反应器的效果更佳。

关键词: 移动床生物膜反应器; 填料; 废水处理; 启动; 运行效能

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0001-06

Effect of Carrier Type on Startup and Operating Efficiency of Moving Bed Biofilm Reactor

ZHU Dian-yu, CHEN Nian-hao, ZHU Jin-wei, ZHU Ying-nan, WANG Jin-feng,
REN Hong-qiang, DING Li-li

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to compare the ability of two kinds of bio-carriers A and B with different density and porosity to treat wastewater in moving bed biofilm reactors (MBBR), two MBBRs, R1 and R2 filled with carriers A and B respectively, were used to compare their effluent quality indexes, biofilm morphology, physiological and biochemical characteristics. The results showed that the adaptability, impact resistance and the effluent quality during startup phase of reactor R1 were better than those of reactor R2. The thickness, adhesion and renewal rate of R1 biofilm were higher than R2. The activity of dehydrogenase in reactor R1 was also significantly higher than reactor R2. That is to say, a carrier with a higher porosity and the relative density closer to 1 has a better effect when applied to the moving bed biofilm reactor.

Key words: MBBR; carrier; wastewater treatment; startup; operating efficiency

移动床生物膜反应器 (MBBR) 是一种将悬浮生长和附着生长的生物膜相结合的新型生

物膜反应器,其克服了固定床反应器需要定期反冲洗,流化床需要使载体流化,淹没式生物滤池需定期清洗滤料和更换曝气器的缺点。MBBR 工艺的关键在于研究开发了密度接近于水,轻微搅拌下易随水自由运动的生物填料。生物填料具有机械强度高、耐磨耐腐蚀、有效比表面积大和适合微生物吸附生长等特点,适用性强,应用范围广。通过选择适当的填料和驯化微生物,MBBR 具有处理效率高、抗冲击能力强、不易堵塞、无需污泥回流和定期清洗等特点,在市政污水、食品废水、造纸废水、石油废水、制药废水等的处理中得到了广泛的应用。

在 MBBR 应用中,填料的选择尤为重要。目前,国内外研究者多采用聚乙烯、聚丙烯、聚氨酯泡沫和陶粒等填料,并实现了工程化应用^[1]。但是有关填料的密度和孔隙率对反应器流化效果、微生物挂膜和运行效能的影响鲜有报道。

在生物反应器中,基质的转化速率与生物膜内的传质性能有关,填料在反应器内充分流化,可以促进微生物与底物、氧气间的混合和接触,强化传质作用,加快生化反应速度^[2]。因此,笔者采用两种不同密度和孔隙率的高密度聚乙烯(HDPE)填料运行 MBBR 并进行横向对比,通过分析对污染物的去除效果以及胞外聚合物(EPS)、厚度、粘附力等生物膜性能指标,为生物填料的选择提供理论依据,以期提高 MBBR 的处理效率,降低启动时间和运行成本。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

移动床生物膜反应器装置如图 1 所示,高为 45 cm,底部直径为 16 cm,有效容积为 7 L。

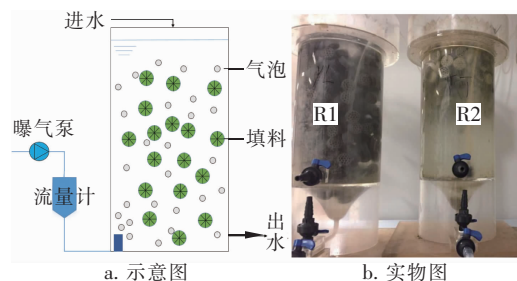


图 1 MBBR 装置

Fig. 1 Moving bed biofilm reactor filled with different carriers

反应器 R1、R2 内分别布设阶梯环状的 A、B 两种柱形 HDPE 悬浮填料,填充率为 30%。两种填料的规格相同,均为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,相对密度分别

为 1 和 0.96,孔隙率分别为 92%、90%。

试验周期为 100 d,按照进水 COD 浓度差异分为两个阶段。其中第 I 阶段(6 月 16 日—7 月 25 日,共 40 d)的进水 COD 控制在 500 mg/L 左右,第 II 阶段(7 月 26 日—9 月 23 日,共 60 d)的进水 COD 为 750 mg/L。为对比两种填料性能,保持其他条件相同。反应器的 HRT 为 12 h,通过曝气装置将 DO 控制在 $(4.0 \pm 2.0) \text{ mg/L}$,通过添加 1.0 mol/L 的 Na_2CO_3 和 HCl 溶液控制 pH 值在 7.0 左右,温度约为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 接种污泥及配水

MBBR 采用排泥法挂膜。接种污泥来自南京市仙林污水处理厂二沉池,该厂采用 CAST 工艺处理生活污水。MBBR 启动时,将接种污泥加入反应器使其浓度约为 3 000 mg/L,闷曝 24 h,最终将接种污泥全部排出。

试验采用葡萄糖模拟废水,其组分如表 1 所示。此外,还添加了微量元素: FeSO_4 为 2.49 mg/L, MnCl_2 为 0.28 mg/L, CuSO_4 为 0.39 mg/L, ZnCl_2 为 0.44 mg/L, CoCl_2 为 0.50 mg/L, Na_2MoO_4 为 0.23 mg/L, MgCl_2 为 0.19 mg/L, EDTA 为 5.00 mg/L。

表 1 MBBR 反应器进水组分

Tab. 1 Component of influent of moving bed biofilm

	reactor	
	mg · L ⁻¹	
项 目	第 I 阶段	第 II 阶段
葡萄糖	500	750
NH_4Cl	101.75	152.625
KH_2PO_4	23.25	34.875
Na_2SO_4	15.0	22.5
KCl	100	150
CaCl_2	15	22.5
Na_2CO_3	0.03	0.04

1.3 分析方法

在 MBBR 运行过程中,测定的常规水质指标主要有 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、DO 和 pH 值。其中, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 参照国家标准分析方法进行测定, DO 和 pH 值分别通过溶氧仪和 pH 计测定。

生物膜形貌和粗糙度用原子力显微镜(AFM, 德国布鲁克公司)观察^[3];生物膜厚度采用 Nikon SMZ1000 光学显微镜测定。

生理生化特征指标包括生物膜胞外聚合物(EPS)含量、脱氢酶活性(DHA)、粘附力。EPS 采用热碱法提取^[4]。其中,多糖(PS)采用硫酸-苯酚法

测定^[5],蛋白质(PN)采用考马斯亮蓝法测定;脱氢酶活性采用 TTC-DHA 法测定;粘附力用原子力显微镜(AFM)测定。

2 结果与讨论

2.1 不同填料的出水水质比较

2.1.1 COD

不同填料 MBBR 对 COD 的去除效果见图 2。

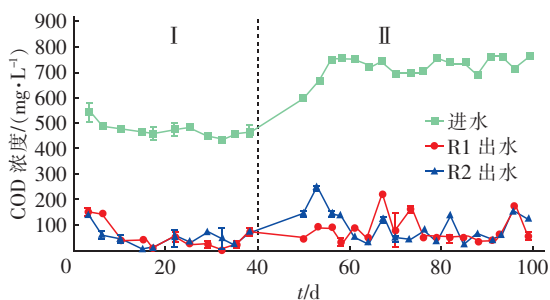


图 2 不同填料的 MBBR 对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal by moving bed biofilm reactors with two different carriers

第 I 阶段的进水 COD 约为 500 mg/L,随着反应器的运行,对 COD 的去除能力逐渐提升,最后趋于稳定。反应器 R1 运行 3 d 后,COD 去除率可达 72.4%,运行 25 d 后,去除率达到 94% 以上,最高可达 99.1%。反应器 R2 运行 3 d 后 COD 去除率为 74.6%,此后处于波动状态,最高达 98.9%,最低仅有 84.3%。

第 II 阶段稳定运行时进水 COD 约为 750 mg/L,第 41~56 天逐渐提升负荷,R2 的处理效果明显不如 R1。而在进水 COD 浓度重新稳定后,R1 和 R2 先后出现 COD 去除率下降的情况,这是由于反应器内生物膜的生长、成熟、脱落和更新所致。总体来看,第 II 阶段 R1 的 COD 去除率大部分稳定在 92.2% 以上,最高可达 95.7%,最低为 70.9%;而 R2 的去除率变化较大,最高达 97.7%,最低仅有 62.9%。

综合两个阶段,R1 去除 COD 的稳定性及抗冲击性均明显优于 R2,去除率在前期较 R2 好,但在后期两者差别不明显。现场观察显示,R1 的流化效果明显好于 R2,R2 中的填料出现了堆积,废水流动不畅,存在滞水区和死水区。沈雁群^[6]利用两种参数不同的聚丙烯和聚乙烯填料运行 MBBR,结果表明,密度更接近于水、比表面积大的填料的流化效果更好,反应器降解污染物的能力也更强。王亚举^[7]以聚乙烯黑、聚乙烯白两种填料在室温条件下运行

MBBR,处理生活污水的结果也表明,表面更粗糙、孔隙率更大的填料对 COD 的去除效果更好。

究其原因,是因为填料的孔隙率越理想、密度越接近于水,通气、过水性能越好,越有利于生物膜附着生长,同时反应器内流化效果也越好,废水与生物膜的接触效率高。这种差异在启动挂膜阶段和抗冲击阶段更为明显,而当环境条件趋于稳定,生物膜生长、代谢和更新趋于平衡时,则参数不同的填料的运行效果趋于接近。

2.1.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TN

填料上生物膜的微生物群落非常丰富,受氧气传递效果的影响,在填料上可形成好氧区和缺氧区或厌氧区,为进行同步硝化反硝化提供了很好的反应条件和场所^[8],因此氨氮和总氮是反映反应器性能的另两个重要指标。第 I 阶段的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 (18.26 ± 1.26) mg/L,TN 为 (29.04 ± 2.66) mg/L,第 II 阶段除逐渐提升负荷的阶段外,进水氨氮为 (34.64 ± 3.28) mg/L,TN 为 (39.82 ± 3.96) mg/L。两个反应器降解 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的能力见图 3。

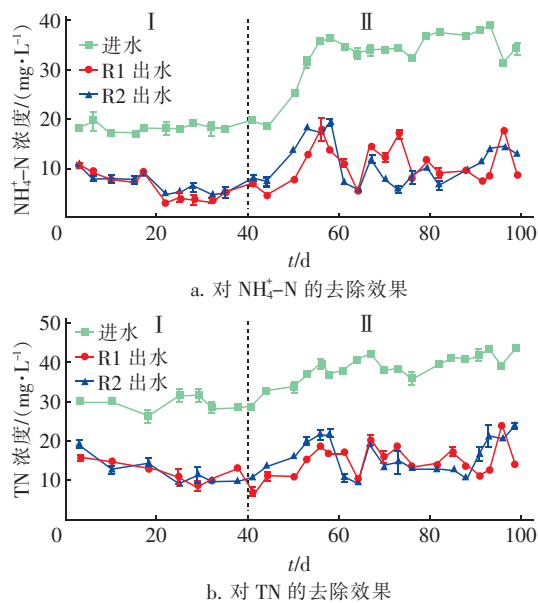


图 3 不同填料的 MBBR 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除效果

Fig. 3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN removal by moving bed biofilm reactors with two different carriers

反应器 R1 运行 3 d 后,氨氮去除率为 41.4%,TN 去除率为 47.9%,反应器 R2 的相应值分别为 40.6% 和 35.9%。之后随着两个反应器内生物膜生长的逐步稳定,氨氮和总氮去除效果逐渐提升。自第 22 天起,R1 的氨氮去除能力较 R2 好,对 TN

的去除效果则未表现出明显的差异。

进入第Ⅱ阶段后,在41~56 d进水负荷快速提升的过程中,R1对氨氮和TN的去除效果显著好于R2,可见其抗冲击性较强。之后,由于生物膜的生长、脱落、更新,两个反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除率均出现波动,其中,R1的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在44.0%~82.8%之间,平均去除率为67.1%;TN去除率在50.3%~74.0%之间,平均去除率为60.4%。R2的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率在47.1%~83.5%间波动,平均去除率为72.8%;TN去除率在41.1%~77.4%之间,平均去除率为61.4%。

A填料密度与水更接近,对水和空气的流动阻力小,在相同的曝气条件下,A填料在反应器内流化运动更充分,促进了微生物与底物、氧气间的混合与接触,强化了传质,提高了生化反应速度^[9]。因此在前期,R1中的微生物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN的降解更彻底,去除效果好于R2。同时R1中生物膜细菌和胞外聚合物与R2相比则更为复杂,即R1中生物膜的孔隙率高、比表面积大,传质效率高于R2。后期两个反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除率差别不明显,这与两个反应器中生物膜的生长周期不同有关。总体来说,R1相对于R2表现出更好的稳定性和高负荷适应性。

2.2 生物膜厚度及形貌差异

R1与R2中生物膜厚度随时间的变化见图4。

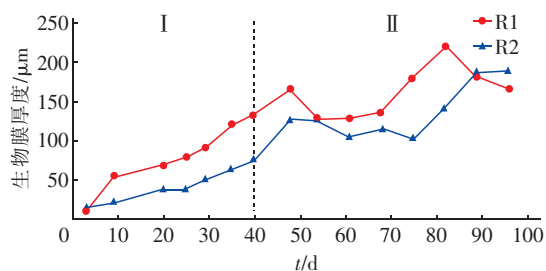


图4 不同填料的MBBR的生物膜厚度变化

Fig.4 Variation of biofilm thickness of moving bed biofilm reactors with two different carriers

在启动运行过程中,R1的生物膜厚度整体高于R2,且两者的变化趋势呈现一致性。第Ⅰ阶段,R1的挂膜速度明显快于R2,增长速率最高时可以达到R2的6.2倍;第Ⅱ阶段,48 d之后,由于生物膜的脱落与更新,生物膜厚度呈现先下降后上升的趋势。两个反应器的生物膜厚度分别在82 d和96 d时达到最大值,依次为219.1和188.3 μm。R1中A填

料的孔隙率高于R2中B填料,流化效果更好,传质更加充分,微生物生长代谢迅速,生物膜增长快。此外,根据Costerton等人的研究,当细菌粘附到固体表面时,会通过调整特异性粘附基因的表达,促进EPS的分泌从而粘结更多的细菌到生物膜表面,使得生物膜厚度增长。R1分泌的EPS较多,这也是其生物膜厚度高于R2的原因之一。

2.3 粘附力、粗糙度和形貌

2.3.1 粘附力

图5是R1、R2两个反应器运行至75 d时粘附力及粗糙度的对比。R1的粘附力大于R2,说明R1中EPS的结构较紧密,与实测的蛋白质和多糖含量呈现一致性。R1的粘附力约为9.6 nN,R2的约为7.4 nN。杨敏等^[10]研究发现TB-EPS中各种有机大分子排列紧密,与细胞壁牢固结合,附着于微生物细胞表面而不轻易脱落;LB-EPS位于TB-EPS外层,具有较强流动性,能够向周围环境扩展延伸,结构较为松散。故R1粘附力大于R2可能是因为R1填料表面生物膜中TB-EPS含量较多,结构致密。Byrd等^[11]以假单胞菌属为例,分析了胞外多糖对生物膜的影响,发现胞外多糖在细胞与载体粘附以及维持生物膜稳定过程中起关键作用,与本试验测得的多糖含量呈现一致性。

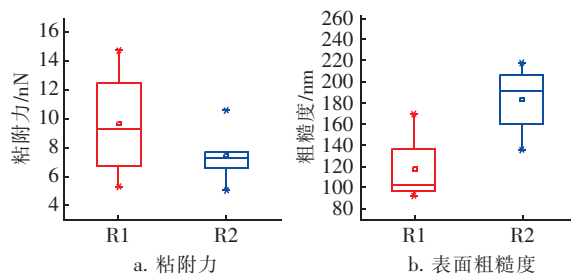


图5 不同填料的MBBR在第75天的生物膜粘附力和表面粗糙度

Fig.5 Biofilm adhesion and roughness of moving bed biofilm reactors with two different carriers on the 75th day

由图5(b)可知,R2的粗糙度(183 nm)大于R1(116.3 nm)。朱燕^[12]研究了5℃条件下MBBR在启动过程中生物膜形貌的变化,发现随着微生物的稳定附着,生物膜的粗糙度有所降低,并认为可能是由于EPS覆盖于微生物表面,降低了微生物间谷的高度。

2.3.2 生物膜形貌

图6是R1、R2两个反应器运行至75 d时的生

物膜形貌(图形大小为 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$)。此时反应器处于运行的第 II 阶段,进水 COD 提升为 $750\ \text{mg/L}$,生物膜正在脱落与更新。由生物膜形貌可以看出 R1 生物膜表面微生物被较多结合紧密的 EPS 覆盖,降低了微生物与微生物之间形成的谷的高度,而 R2 生物膜表面 EPS 较少,这与粗糙度实测结果一致,结合两个反应器多糖与蛋白质的含量变化,说明 R1 生物膜表面的 EPS 含量高于 R2,且 R1 生物膜的形成与更新快于 R2。

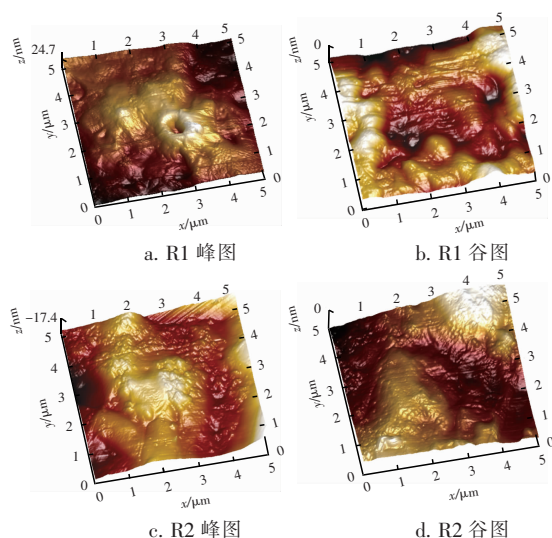


图 6 不同填料的 MBBR 的生物膜形貌峰谷图

Fig. 6 Biofilm morphology of moving bed biofilm reactors with two different carriers on the 75th day

2.4 生物膜活性分析

2.4.1 蛋白质和多糖

整个试验周期中,生物膜样品中蛋白质与多糖含量的变化如图 7 所示。试验开始后,R1 与 R2 生物膜的蛋白质含量迅速上升,并先后在第 40 天与第 25 天达到其峰值即 $9.68/7.38\ \text{mg/个}$ 。在第 I 阶段的前 25 d,R2 的生物膜蛋白质含量一直高于 R1,直至第 29 天反应器稳定后,R1 生物膜蛋白质含量首次超过 R2,并在之后显著高于 R2,这可能是由于 A 填料的孔隙率高于 B 填料,气体通过能力更大,R1 的传质及流化效果更好所致。

提升进水 COD 浓度后,整体上 R1 与 R2 的蛋白质含量在第 II 阶段均有明显下降。R1 与 R2 在第 96 天的蛋白质含量分别为 $4.68/4.44\ \text{mg/个}$,分别仅为第 II 阶段起始值的 $48.3\%/70.5\%$ 。在该阶段,因负荷的提升,细菌可利用基质增多,增殖速率提高。根据周健等人的研究,细菌可利用基质增

多时,其繁殖效率高,但分泌的 EPS 减少^[13],该结论与本试验现象一致。

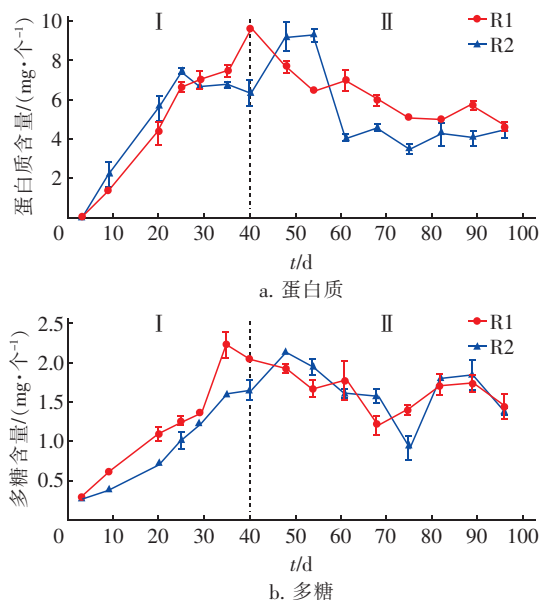


图 7 不同填料的 MBBR 生物膜中蛋白质和多糖含量

Fig. 7 Protein and polysaccharides concentrations of biofilm in MBBRs with two different carriers

R1 与 R2 的生物膜多糖含量在第 I 阶段迅速上升,分别于第 35 天和第 40 天达到峰值即 $2.22/1.65\ \text{mg/个}$,R1 生物膜多糖含量在第 I 阶段持续高于 R2。进入第 II 阶段后,R1、R2 生物膜多糖含量先迅速下降,再逐步回升,且 R1 与 R2 的多糖含量相近。从整体上看,R1 与 R2 多糖含量的变化趋势一致,但 R2 的变化较 R1 有一定的滞后。

2.4.2 脱氢酶活性

脱氢酶是一种能够活化基质上氢的还原酶,在废水生物处理中可以利用脱氢酶活性作为评价微生物分解污染物能力的指标。经测定,在第 40、70、100 天 R1 的脱氢酶活性分别为 $49.4/26.0/24.8\ \text{mgTF/(gSS} \cdot \text{h)}$,显著高于 R2 同期的 $30.0/10.0/11.1\ \text{mgTF/(gSS} \cdot \text{h)}$,这是由于 A 填料的孔隙率高于 B 填料,挂膜效果更加理想所致。进入第 II 阶段后,R1、R2 在第 70 天的脱氢酶活性都出现了大幅度下跌,仅为原值的 $52.6\%/33.3\%$ 。

3 结论

① 孔隙率较高、密度更接近于水的填料的挂膜启动和运行稳定性更好,能快速适应水质变化和负荷提升。

② 填料的密度与水的越接近,对水和空气的

流动阻力越小,流化效果越好,生物膜厚度、粘附力、多糖与蛋白质含量越高,且其脱氢酶活性高,表明反应活性更好。

参考文献:

- [1] 苑泉,王海燕,刘凯,等. 污水厂尾水 MBBR 反硝化深度脱氮填料比较[J]. 环境科学学报,2015,35(3): 713-721.
Yuan Quan, Wang Haiyan, Liu Kai, *et al.* Comparison of the MBBR denitrification carries for nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 713-721 (in Chinese).
- [2] 于鹏飞,张兴文,秦伟杰,等. 内循环移动床生物膜反应器的研究与应用[J]. 环境科学与技术,2008,31(11):120-123.
Yu Pengfei, Zhang Xingwen, Qin Weijie, *et al.* Application of internal-circulation moving bed biofilm reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(11): 120-123 (in Chinese).
- [3] Frederic E, Felix R, Adai C, *et al.* High-speed atomic force microscopy: Imaging and force spectroscopy[J]. FEBS Lett, 2016, 589(12): 3631-3638.
- [4] Bassin J P, Kleerebezem R, Rosado A S, *et al.* Effect of different operational conditions on biofilm development, nitrification, and nitrifying microbial population in moving-bed biofilm reactors[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(3): 1546-1555.
- [5] Houda N, Abdelwaheb C, Asma B R, *et al.* Tertiary nitrification using moving-bed biofilm reactor: a case study in Tunisia[J]. Curr Microbiol, 2015, 70(4): 602-609.
- [6] 沈雁群. 城镇污水 MBBR 强化脱氮除磷技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
Shen Yanqun. Research of Nitrogen and Phosphorous Strengthen Removal Technology of Town Sewage by MBBR[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese).
- [7] 王亚举. MBBR 工艺中悬浮填料的参数控制及优化组合研究[D]. 重庆:西南科技大学,2017.
Wang Yaju. Parameter Control and Optimum Combination of Suspended Filler in MBBR Process[D]. Chongqing: Southwest University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).
- [8] Yan Z, Yan Z, Ren H, *et al.* Physicochemical characteristics and microbial community evolution of biofilms during the start-up period in a moving bed biofilm reactor[J]. Bioresour Technol, 2015, 80: 345-351.
- [9] 李倩. 改性聚乙烯悬浮载体挂膜及其脱氮性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
Li Qian. Biofilm Formation and Nitrogen Removal Performances of Modified Polyethylene Suspended Carriers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [10] 杨敏,胡学伟,宁平,等. 废水生物处理中胞外聚合物(EPS)的研究进展[J]. 工业水处理,2011,31(7): 7-12.
Yang Min, Hu Xuewei, Ning Ping, *et al.* Research progress in extracellular polymeric substances applied to biological wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(7): 7-12 (in Chinese).
- [11] Byrd M S, Sadovskaya I, Vinogradov E, *et al.* Genetic and biochemical analyses of the *Pseudomonas aeruginosa* Psl exopolysaccharide reveal overlapping roles for polysaccharide synthesis enzymes in Psl and LPS production[J]. Molecular Microbiology, 2009, 73(4): 622-638.
- [12] 朱燕. 移动床生物膜反应器启动过程中生物膜性质基础研究[D]. 南京:南京大学,2015.
Zhu Yan. Research on Biofilm Properties during the Startup Process of Moving Bed Biofilm Reactor[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015 (in Chinese).
- [13] 周健,龙腾锐,苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究[J]. 环境科学学报,2004,24(4): 613-618.
Zhou Jian, Long Tengru, Miao Lili. Effect of extracellular polymeric substances(EPS) on sedimentation of activated sludge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(4): 613-618 (in Chinese).



作者简介:朱点钰(1995-),女,江苏靖江人,本科在读,从事移动床生物膜反应器研究。

E-mail: 847499653@qq.com

收稿日期:2018-07-11