

论述与研究

## DO 对 PU 填料系统脱氮功能菌数量的影响

赵丽敏, 张朝升, 曹勇锋, 荣宏伟, 张可方

(广州大学 珠江三角洲水质安全与保护省部共建教育部重点实验室, 广东  
广州 510006)

**摘要:** 利用聚氨酯(PU)填料构建序批式生物膜反应器(SBBR)以实现同步硝化反硝化。在不同 DO 浓度条件下稳定运行的系统中分别提取生物膜样品的基因组 DNA,选取总细菌、亚硝化菌(AOB)、硝化菌(NO)和反硝化菌四种目的基因,采用实时荧光定量 PCR 技术对脱氮功能菌进行定量分析,研究 DO 对系统运行效能及功能菌数量的影响。从荧光定量 PCR 结果分析,在进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 20~25 mg/L 及 5 种不同 DO 浓度下,DO 为 2.5、3.5、4.5 mg/L 时,AOB 数量相差不大,拷贝数为  $7.75 \times 10^5 \sim 8.60 \times 10^5$  copies/ng;低 DO (1.5 mg/L) 或高 DO (5.5 mg/L) 都会引起 AOB 的大幅减少;在 DO = 2.5 mg/L 时 NO 和反硝化菌的数量达到最大值,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率较高,为 93.30%,对 TN 的去除率最高,为 83.73%。综合来看,DO 的最佳浓度为 2.5 mg/L,此时系统运行效能最佳,各功能菌达到和谐稳定的微环境状态。

**关键词:** DO 浓度; 同步硝化反硝化; 序批式生物膜反应器; 聚氨酯填料; 荧光定量 PCR; 氨氧化菌; 硝化菌; 反硝化菌

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0001-06

## Effect of Dissolved Oxygen on Amount of Functional Bacteria for Nitrogen Removal in Polyurethane Filler System

ZHAO Li-min, ZHANG Chao-sheng, CAO Yong-feng, RONG Hong-wei,  
ZHANG Ke-fang

(Key Laboratory for Water Quality Security and Protection in Pearl River Delta < Ministry of Education and Guangdong Province >, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Polyurethane (PU) fillers were used in sequencing batch biofilm reactor (SBBR) to achieve simultaneous nitrification and denitrification (SND). Genomic DNA of total bacteria, ammonia-oxidizing bacteria (AOB), nitrite-oxidizing bacteria (NOB) and denitrifying bacteria were extracted from biofilm in the stable systems at different DO concentrations. To investigate the effect of DO concentration on the system's performance and the amount of functional bacteria, the real-time PCR technology was used to quantitatively analyze the functional bacteria for nitrogen removal. The results showed that at the  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration of 20 to 25 mg/L, the amounts of AOB at DO concentrations of 2.5 mg/L, 3.5

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278133、21477027); 广东省科技计划项目(2014A020216049、2014A020216048);  
广州市教育系统创新团队项目(13C01)

通信作者: 张朝升 E-mail: gdzcs@126.com

mg/L and 4.5 mg/L were similar with average copy numbers of  $7.75 \times 10^5$  to  $8.60 \times 10^5$  copies/ng. Both of low DO concentration (1.5 mg/L) and high DO concentration (5.5 mg/L) could significantly reduce the amount of AOB. The amounts of NOB and denitrifying bacteria were the highest at DO concentration of 2.5 mg/L, and the maximum removal rates of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN were 93.30% and 83.73%, respectively. On the whole, when DO concentration was 2.5 mg/L, the system had a good performance, and all bacteria were under a harmonious microenvironment.

**Key words:** dissolved oxygen concentration; SND; SBBR; polyurethane (PU) filler; real-time PCR; AOB; NOB; denitrifying bacteria

近年来,国内外学者发现序批式生物膜法(SBBR)可很好地实现同步硝化反硝化(SND)<sup>[1~3]</sup>,参与这一过程的主要功能微生物为亚硝化菌(AOB)、硝化菌(NO)和反硝化菌,这三种菌群对SND过程起着至关重要的作用<sup>[4~6]</sup>。聚氨酯填料(PU)的特殊微孔结构能够限制氧的扩散<sup>[7]</sup>,使得生物膜从外到内形成不同的DO浓度梯度,这为实现SND提供了合适的环境<sup>[8]</sup>。

荧光定量PCR技术能够对生物反应器中的功能菌属进行定量分析<sup>[9]</sup>,与传统PCR和FISH技术相比,具有应用范围广、灵敏度高、操作简单等优点<sup>[10~12]</sup>。它是利用监测指数扩增期内每个循环后荧光信号强度计算出达到设定阈值时所经历的循环数,并与标准值进行比较,从而得到目的基因的拷贝数<sup>[13,14]</sup>。

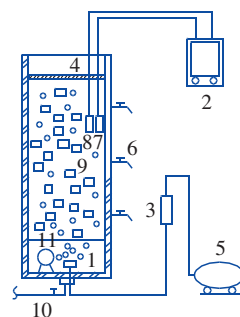
目前运用SBBR法从宏观上分析DO对生物膜系统脱氮影响的研究较多<sup>[15~18]</sup>,但将PU填料作为SBBR反应器内生物膜附着生长的载体并对其微生物菌群进行定量分析的研究不多。为此,采用实时荧光定量PCR技术研究不同DO浓度时PU填料系统内总细菌、AOB、NOB和反硝化菌数量的变化规律,采用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN去除率评估系统运行效能,探求微观微生物与宏观脱氮效率之间的相关性,同时考察PU填料上主要功能菌群的分布情况,确定以PU为填料的SBBR反应器实现SND的最佳DO浓度。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置和填料

SBBR反应器如图1所示,由有机玻璃材料制作,尺寸为40 cm × 13 cm × 13 cm,有效容积为6.5 L,侧面设有两个取样口,底部排水,采用空气泵曝气,并设水泵一台,用于搅拌水体,使溶解氧分布均匀,且保证填料在曝气阶段保持悬浮状态,利于填料

与氧气充分接触。填料填充率为30%<sup>[19]</sup>。待挂膜阶段的出水水质稳定后,将填料随机平均分配到5个2 L烧杯中进行不同DO浓度影响平行试验,平行试验的填料填充率和运行过程与驯化阶段一致,采用虹吸排水。

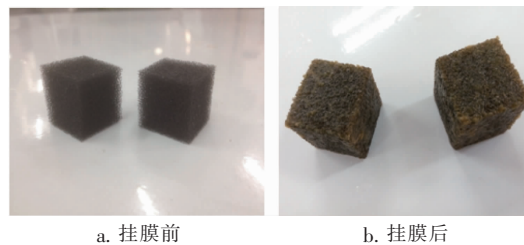


1.曝气头 2.pH、DO测定仪 3.转子流量计 4.隔离网  
5.曝气泵 6.取水口 7.pH探头 8.DO探头 9.载体  
10.排水管 11.潜水泵

图1 SBBR反应器

Fig. 1 Schematic diagram of SBBR reactor

PU填料(见图2)的表面活性高,相比其他填料,比表面积更大,其微孔结构有很强的表面吸附能力和吸水性,更易于挂膜,规格为25 mm × 25 mm × 25 mm,总比表面积 $>1\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$ ,孔隙率 $>97\%$ 。



a. 挂膜前

b. 挂膜后

图2 挂膜前后的PU填料

Fig. 2 PU filler before and after biofilm formation

### 1.2 试验用水

原水为人工模拟城市污水,采用淀粉、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 与 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 分别作为碳源、氮源和磷源,以 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 调节pH值在7.3~7.8,并投加适量微量元素。该原

水的 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、TN 分别为(213 ~ 286)、(21.1 ~ 25.5)、(0 ~ 0.95)、(21.2 ~ 30.8) mg/L。

### 1.3 分析项目与方法

#### 1.3.1 水质分析方法

COD:重铬酸钾消解法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ :纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ :N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ :麝香草酚分光光度法;DO、pH 值:HQ40d 便携式分析仪。

#### 1.3.2 生物膜取样方法

待系统稳定后分别采集不同 DO 水平下的生物膜样品(整体、表面、内部),用以测定总细菌、AOB、NOB 和反硝化菌的拷贝数。用镊子随机取出几个填料,沿正方体六个面 2 mm 处剪切下来作为表面生物膜样品,剩下的作为内部生物膜样品,另外随机取几个填料作为整体生物膜样品,分别将其放入三个小烧杯中,加少许去离子水,用干净的小勺子挤压填料,使附着的生物膜全部脱落,将泥水混合物用定性滤纸过滤,待泥水完全分离后,称取 0.05 ~ 0.2 g 生物膜样品到 1.5 mL 离心管中,备用。

#### 1.3.3 DNA 提取与检测

DNA 提取采用 Power Biofilm™ DNA Isolation Kit 试剂盒,提取后的 DNA 产物经紫外分光光度计测定核酸浓度和纯度后,置于冰箱(-20℃)中保存。

#### 1.3.4 实时荧光定量 PCR 检测

定量 PCR 引物及反应条件见表 1。

表 1 Real-time PCR 正、反向引物与反应条件

Tab.1 Real-time PCR primer and reaction condition

项 目	引物名称	定量 PCR 程序
总细菌	341f 和 518r	95℃ 预变性 3 min;95℃ 变性 30 s; 57℃ 退火 30 s;72℃ 延伸 1 min;40 个循环 <sup>[20]</sup>
AOB	CTO189fA/B 和 CTO189fCRT1r	95℃ 预变性 3 min;95℃ 变性 30 s; 60℃ 退火 30 s;72℃ 延伸 1 min;40 个循环 <sup>[21]</sup>
NOB	NSR1113f 和 NSR1264r	95℃ 预变性 3 min;95℃ 变性 30 s; 59℃ 退火 30 s;72℃ 延伸 1 min;40 个循环 <sup>[22]</sup>
反硝 化菌	Cd3aF 和 R3cd	98℃ 预变性 5 min;98℃ 变性 10 s; 60℃ 退火 30 s;72℃ 延伸 1 min;39 个循环 <sup>[23]</sup>

Real-time PCR 试验采用 SYBR Green I 荧光染料法进行测试,扩增体系如下:12.5 μL 1 × SYBR Green PCR master mix,9.5 μL DEPC 处理水,正、反

向引物各 1 μL,DNA 模板 1 μL,共 25 μL。将目标细菌测序验证后的质粒作为标准阳性样品使用。将重组质粒按 10 倍梯度稀释后用作标准样品。选取 5 个稀释梯度的质粒作为标准品并带入未知样品进行定量 PCR 扩增,设 3 个平行样。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DO 对系统运行效能的影响

SBBR 系统运行工况如下:瞬时进水→连续曝气(480 min)→沉淀(110 min)→瞬时排水。通过调节 SBBR 系统的曝气量,将溶解氧浓度分别控制在 1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.5 mg/L,保持进水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TN 的浓度分别为 246.67、23.70、0.025、0、23.73 mg/L,其出水浓度随 DO 的变化如表 2 所示(数据为多个稳定周期的平均值)。

表 2 不同 DO 条件下系统的出水水质

Tab.2 Quality of effluent under different DO concentrations

mg · L<sup>-1</sup>

DO	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TN
1.5	24.00	13.75	0	0	13.75
2.5	18.67	2.30	0.66	0.9	3.86
3.5	21.33	1.35	1.16	4.6	7.11
4.5	24.00	1.35	1.07	6.7	9.12
5.5	24.00	0.50	0.97	9.8	11.27

DO 浓度对 COD 的去除效果影响较小,去除率均可达到 90% 以上;但 DO 浓度对去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的影响较大。当 DO = 1.5 mg/L 时,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除率均为 42% 左右,出水中基本检测不到  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  与  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,这是由于系统 DO 浓度过低,主要被异养菌用于氧化有机物,影响了系统的硝化效能,该观点与李爽等人<sup>[24]</sup>研究 DO 对聚氨酯脱氮系统运行效果的影响的结论是一致的。当系统 DO 处于 2.5 ~ 5.5 mg/L 时,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度低于 2.3 mg/L,去除率达到 93% 以上,出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度在 0.6 ~ 1.2 mg/L 之间,出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度随 DO 浓度的提高而大幅度增加,这说明当系统 DO ≥ 2.5 mg/L 时硝化反应较彻底。同时,随着 DO 浓度逐渐从 2.5 mg/L 上升到 5.5 mg/L,TN 去除率从 83.73% 下降到 52.51%,主要原因是由于 DO 的上升,提高了氧气穿透生物膜的能力,使生物膜内部形成较大的好氧区,从而提高了系统的硝化能力,但同时也降低了系统的反硝化能力。

## 2.2 DO对总细菌数量的影响

图3为总细菌菌群的 Real-time PCR 分析结果。不同 DO 浓度下生物膜上的总细菌数量相差不大,相比较而言,DO = 2.5 mg/L 时最多,平均拷贝数约为  $1.45 \times 10^9$  copies/ng,其他 DO 浓度下的总细菌平均拷贝数为  $(1.0 \pm 0.1) \times 10^9$  copies/ng。但是表面细菌数量随着 DO 浓度的提高而逐渐减少,内部细菌数量则随着 DO 浓度的提高而显著增加,即随着 DO 值的升高微生物在 PU 填料上的分布发生了较大变化。当 DO = 1.5 mg/L 时,99% 以上微生物都趋向于在填料表面生长,争夺不充足的氧气;当 DO = 5.5 mg/L 时 80% 左右的微生物都生活在填料内部,避开填料表面的高浓度溶解氧,选择在适宜的 DO 环境下生长,同时由于气量的增大使得填料流动加快,增加了填料的碰撞和摩擦,从而降低了填料表面微生物的生长。综上所述,PU 填料可提供满足微生物对溶解氧不同需求的各种场所,其由外向内产生溶解氧梯度,为生物膜附着创造了有利条件。

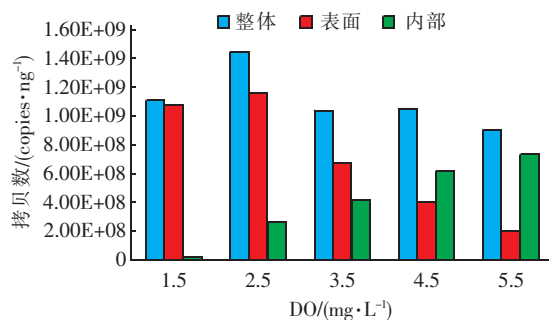


图3 不同 DO 条件下总细菌的数量

Fig. 3 Populations of total bacteria at different DO concentrations

## 2.3 DO对硝化菌群的影响

图4为硝化菌群的 Real-time PCR 分析结果。当 DO = 1.5 mg/L 时,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果最差,AOB 和 NOB 的数量也最少,说明该 DO 条件不利于 AOB 和 NOB 的生存;当 DO 为 2.5 ~ 4.5 mg/L 时,AOB 数量大幅度增加,为  $7.75 \times 10^5 \sim 8.60 \times 10^5$  copies/ng,说明 AOB 适合在 DO 为 2.5 ~ 4.5 mg/L 范围内增殖;在 DO = 2.5 mg/L 时,系统运行效能最佳,NOB 数量达到最大值,平均拷贝数为  $9.0 \times 10^6$  copies/ng,此后随着 DO 升高又逐渐减少;当 DO = 5.5 mg/L 时,系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率最高,而 AOB 和 NOB 数量分别下降到  $4.89 \times 10^5$  和  $6.65 \times 10^6$  copies/ng,说明尽管硝化细菌数量有所减少,但

是其活性很好,硝化反应没有受到影响。

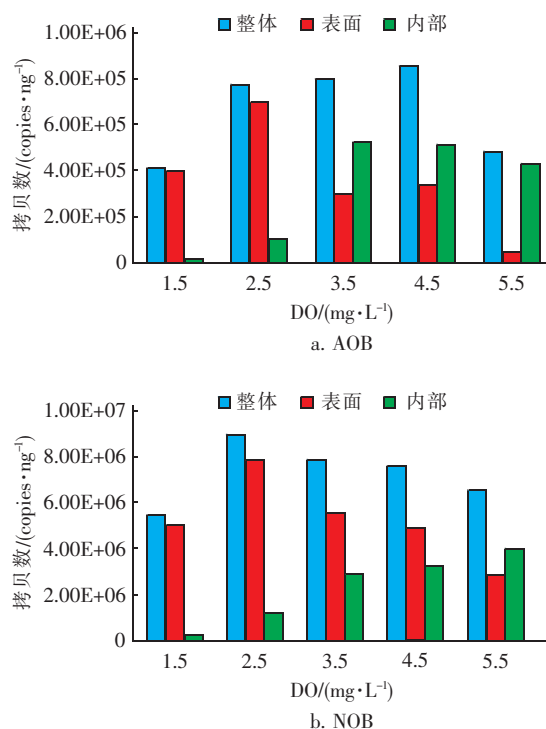


图4 不同 DO 条件下 AOB 和 NOB 数量的变化

Fig. 4 Populations of AOB and NOB at different DO concentrations

另外由填料表面和内部硝化细菌数量的变化可知:当 DO = 1.5 mg/L 时,AOB 和 NOB 基本上都生活在填料表面,争夺不充足的氧气;当 DO = 5.5 mg/L 时,99% 以上的 AOB 和 55% 左右的 NOB 生活在填料内部,说明 AOB 相比 NOB 对 DO 的变化更敏感,NOB 所能适应的溶解氧浓度比 AOB 要高,对于本试验系统的硝化过程而言,AOB 和 NOB 适宜生长的 DO 浓度为 2.5 ~ 4.5 mg/L。

## 2.4 DO对反硝化菌群的影响

在不同 DO 条件下反硝化菌数量的变化如图 5 所示。当 DO = 1.5 mg/L 时,硝化细菌数量最少,反硝化细菌也较少,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除率最低,都约为 42%,系统出水中基本上未检测到  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,说明影响反硝化菌数量的主要原因是硝化过程受阻,使得反硝化菌可利用的基质不足,严重抑制了反硝化菌的生长,从而影响到系统的脱氮效能。当 DO = 2.5 mg/L 时,反硝化菌数量最多,此时对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除率较高,说明充足的基质和合适的 DO 浓度促进了反硝化菌的增长,能够进行高效的反硝化反应,此时出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度也

较低;当DO为3.5~5.5 mg/L时,反硝化菌的数量大幅度降低,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度不断升高,TN去除率由70%左右下降到约52%,说明PU填料生物膜内氧气的逐渐扩散,引起缺氧区的缩小从而不利于反硝化的进行,造成了对TN去除率的下降。

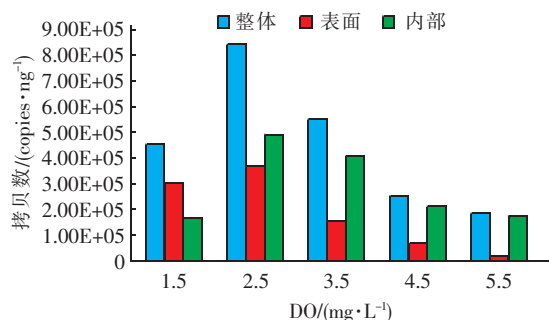


图5 在不同DO条件下反硝化菌群数量的变化

Fig. 5 Populations of denitrifying bacteria at different DO concentrations

## 2.5 讨论

采用PU填料的SBBR脱氮系统实现SND过程主要依靠AOB、NOB和反硝化菌,其中AOB及NOB完成氨氮到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化,而反硝化菌再以有机物和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为基质,经反硝化作用转化为 $\text{N}_2$ 、NO或 $\text{NO}_2$ 等,因此如何通过宏观参数的控制以实现三种功能菌的协同代谢,是系统能否成功运行的关键。每种微生物都有其最适DO浓度,DO值的变化将直接影响系统功能菌的数量及活性,从而影响系统的运行效能。当DO值较高时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率高,但TN去除率明显下降,反硝化菌数量也大幅度降低,说明影响了反硝化过程,而DO值较低时则影响了AOB和NOB的数量及活性,这与谭冲<sup>[7]</sup>对改性聚氨酯填料生物膜系统脱氮特征及微生物机制的研究结果一致。对于PU填料SBBR脱氮系统,将DO控制在2.5 mg/L左右,在保证不影响有机物降解的情况下,更有利于节约能耗和维持系统中脱氮功能菌的相对平衡,使系统很好地实现SND。

## 3 结论

① 在PU填料SBBR系统中,DO浓度升高对总细菌数量影响较小,PU填料因其比表面积大且空间连通性好,由内而外产生溶解氧扩散梯度,有利于微生物生长,易于形成生物膜,且在DO=2.5 mg/L时系统可取得最佳的SND效果。

② 当DO为1.5 mg/L时,AOB、NOB和反硝

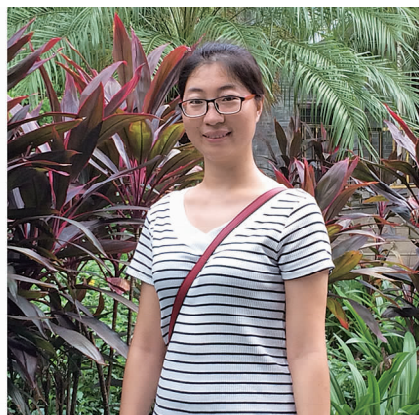
化菌数量都较低,说明此时DO已严重影响硝化细菌发挥硝化作用,从而抑制了反硝化菌的增殖;当DO浓度过高时,虽保证了硝化反应的进行,但反硝化菌数量少,严重影响了对TN的去除。

③ 在DO=2.5 mg/L时,各脱氮功能菌数量达到最大值,构成一个和谐稳定的微生态环境,系统的运行效能最佳,该值为SBBR脱氮系统的最佳控制浓度。

## 参考文献:

- [1] 张立秋,韦朝海,张可方,等. 常温下SBBR反应器中亚硝型同步硝化反硝化的实现[J]. 环境工程, 2009,27(1):40-43.
- [2] Hai R T, He Y Q, Wang X H, *et al.* Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from swine wastewater in a sequencing batch biofilm reactor[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(1):303-308.
- [3] Bellucci M, Ofiteru I D, Head I M, *et al.* Nitrification in hybrid bioreactors treating simulated domestic wastewater[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2012, 94(6):1657-1666.
- [4] Wang J, Zhang C S, Rong H W. Analysis and succession of nitrifying bacteria community structure in sequencing biofilm batch reactor[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2014, 98(10):4581-4587.
- [5] 张蕊,韩志英,陈重军,等. 生物膜型污水脱氮系统中膜结构及微生物生态研究进展[J]. 生态学杂志, 2011,30(11):2628-2636.
- [6] 张朝升,王竞茵,荣宏伟,等. 荧光定量PCR监测抑制剂对低温SBR微生物的影响[J]. 广州大学学报:自然科学版, 2015,14(1):69-75.
- [7] 谭冲. 改性聚氨酯填料生物膜系统脱氮特征及微生物机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 金云霄,冯传平,丁大虎,等. 悬浮填料SBBR处理生活污水的运行工况优化研究[J]. 中国给水排水, 2010,26(3):34-38.
- [9] Kim J, Shin S G, Han G. Common key acidogen populations in anaerobic reactors treating different wastewaters: Molecular identification and quantitative monitoring[J]. Water Res, 2011, 45(8):2539-2549.
- [10] van Frankenhuyzen J K, Trevors J T, Flemming C A, *et al.* Optimization, validation and application of a real-time PCR protocol for quantification of viable bacterial cells in municipal sewage sludge and biosolids using reporter genes and *Escherichia coli*[J]. J Ind Microbiol

- Biotechnol, 2013, 40(11): 1251 – 1261.
- [11] Furukawa T, Hashimoto R, Mekata T. Quantification of vancomycin-resistant enterococci and corresponding resistance genes in a sewage treatment plant[J]. J Environ Sci Health: Part A, 2015, 50(10): 989 – 995.
- [12] 赵大勇, 燕文明, 冯景伟. 实时荧光定量 PCR 技术对氨氧化细菌的研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 8 – 13.
- [13] Navarro E, Serrano-Heras G, Castano M J, et al. Real-time PCR detection chemistry[J]. Clinica Chimica Acta, 2015, 439: 231 – 250.
- [14] Wang X H, Zhang Y, Wen X H. Real-time PCR quantification of the population dynamics of ammonia-oxidizing bacteria in a pilot-scale wastewater treatment plant[J]. Biochem Eng J, 2012, 66(15): 61 – 65.
- [15] 荣宏伟, 张朝升, 彭永臻, 等. DO 对 SBBR 工艺同步硝化反硝化的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 16 – 19.
- [16] 荣宏伟, 谢玉辉, 张可方, 等. DO 对 SBBR 工艺亚硝酸型 SND 及过程控制的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 103 – 108.
- [17] 张朝升, 张可方, 方茜, 等. 序批式生物膜法对城市污水的脱氮效果[J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 54 – 55, 76.
- [18] 张小玲, 陈莹, 邱静, 等. 曝气量及 COD 浓度对 SBBR 同步硝化反硝化效能的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 129 – 133.
- [19] Feng Q, Wang Y, Wang T, et al. Effects of packing rates of cubic-shaped polyurethane foam carriers on the microbial community and the removal of organics and nitrogen in moving bed biofilm reactors[J]. Bioresour Technol, 2012, 117: 201 – 207.
- [20] 林海龙, 李伟光, 闫险峰, 等. 中药废水污泥群落结构解析中 PCR – DGGE 引物的选择与评价[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1505 – 1510.
- [21] Hornek R, Pommerening-Roser A, Koops H P. Primers containing universal bases reduce multiple amoA gene specific DGGE band patterns when analysing the diversity of beta-ammonia oxidizers in the environment[J]. J Microbiol Methods, 2005, 66(1): 147 – 155.
- [22] Dionisi H M, Layton A C, Harms G, et al. Quantification of *Nitrosomonas oligotropha*-like ammonia-oxidizing bacteria and *Nitrospira* spp. from full-scale wastewater treatment plants by competitive PCR[J]. Appl Environ Microbiol, 2002, 68(1): 245 – 253.
- [23] Heylen K, Vanparys B, Geves D, et al. Nitric oxide reductase(norB) gene sequence analysis reveals discrepancies with nitrite reductase(nir) gene phylogeny in cultivated denitrifiers[J]. Environ Microbiol, 2007, 9(4): 1072 – 1077.
- [24] 李爽, 刘侨博, 耿峰, 等. DO 对单级聚氨酯脱氮系统运行效果的影响[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 24 – 28.



作者简介:赵丽敏(1991 – ), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 主要研究领域为污水脱氮除磷理论与工艺及水处理微生物分子生物学。

E – mail: 1340599008@qq.com

收稿日期: 2016 – 03 – 20