

废水中苯酚、硫化物和硝酸盐的同步去除

许健,刘春爽*,张秀霞,李文斐

(中国石油大学(华东)化学工程学院,山东青岛266580)

摘要:利用UASB反应器考察反硝化脱硫工艺(Denitrifying sulfide removal, DSR)对废水中苯酚、硫化物和硝酸盐的去除效果,并通过高通量测序技术分析工艺运行过程中微生物群落结构特征。结果表明:DSR工艺可以同步去除废水中苯酚、硝酸盐和硫化物,硫化物全部转化为硫酸盐,无单质硫积累;控制适当的S/N质量比有利于保持较好的碳氮硫去除率,S/N质量比为2:3时, NO_3^- -N、 S^{2-} 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ -C去除率分别达到73%、95%和80%;DSR工艺运行过程中主要存在的异养反硝化菌属为*Bacillus*、*Thauera*、*Pseudomonas*和*SB-1_norank*,自养反硝化菌属为*Thiobacillus*、*Azoarcus*和*Sulfurovum*。

关键词:反硝化脱硫;硫化物;单质硫;微生物群落结构

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)02-0066-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.02.014

Simultaneous removal of phenol, sulfide and nitrate from wastewater

XU Jian, LIU Chun-shuang*, ZHANG Xiu-xia, LI Wen-fei

(College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: By using UASB reactor, the operational performance of denitrifying sulfide removal process to remove phenol, sulfide, and nitrate from wastewater is investigated. The microbial community structure is analyzed using high-throughput amplicon sequencing method. The results show that phenol, nitrate and sulfide in the wastewater could be simultaneously removed by denitrifying sulfide removal process. The sulfide is converted into sulfate completely and there is no elemental sulfur accumulation. Appropriate S/N ratio is beneficial to maintain a better removal efficiency of carbon, nitrate and sulfide. The removal rates of NO_3^- -N, S^{2-} and $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ -C can reach 73%, 95% and 80%, respectively, when the mass ratio of S/N is 2:3. The *Bacillus*, *Thauera*, *Pseudomonas* and *SB-1_norank* are the main heterotrophic denitrifiers. The *Thiobacillus*, *Azoarcus* and *Sulfurovum* are the main autotrophic denitrifiers identified during the whole process.

Key words: denitrifying sulfide removal; sulfide; elemental sulfur; microbial community

石油炼制、石油加工等行业产生的废水中含有大量的硫化物、氨氮和酚类有机物^[1-3]。此类废水具有毒性、腐蚀性等特点,排入水体后会消耗大量溶解氧引起黑臭,还会造成藻类等水生生物大量繁殖,对周围环境和人体健康危害极为严重^[4-5]。

反硝化脱硫(Denitrifying sulfide removal, DSR)工艺能够在一些自养、异养菌的协同作用下,以废水中硝酸盐为电子受体,硫化物、有机物为电子供体,最终生成 N_2 、 CO_2 、S等,从而实现废水中碳氮硫的同步去除^[6-9]。此工艺运行成本低,无二次污染,且可回收单质硫,因而具有较大的技术优势和良好的应用前景^[10]。近些年来,虽然反硝化脱硫工艺在处理含硫含氮有机废水方面已经取得大量进展,但工艺主要侧重以一种易降解的乙酸钠、葡萄糖等为碳源^[11-13],而针对酚类化合物为碳源的反硝化脱硫工艺研究仍属起步阶段,使得该技术的应用受到一定限制。

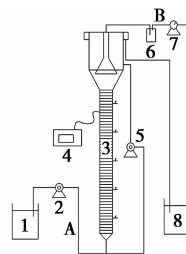
基于此,笔者构建了UASB反应器,以苯酚、硝酸盐及硫化物为进水基质,考察反硝化脱硫工艺对碳氮

硫同步去除效果,并在此基础上通过高通量测序技术分析试验运行各阶段的微生物群落结构特征。

1 材料和方法

1.1 实验装置

连续流实验采用UASB反应器^[14],内径为5 cm,高为80 cm,有效容积为1.57 L,如图1所示。进水通过蠕动泵从反应器底部注入,出水部分回流,



1—进水箱;2—进水蠕动泵;3—UASB反应区;4—温控计;
5—回流蠕动泵;6—吸水瓶;7—湿式气体流量计;
8—出水计量水箱;A—进水管;B—气体收集器

图1 UASB反应器示意图

收稿日期:2016-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21307160);山东省自然科学基金(ZR2013EEQ030);中央高校科研业务费(16CX02040A)

作者简介:许健(1992-),男,硕士研究生,研究方向为水污染控制技术,229606186@qq.com;刘春爽(1981-),女,博士,副教授,主要从事水污染控制研究工作,通讯联系人,0532-86982875,liuchunshuang723@126.com。

回流比控制为 10:1, 反应器采用水浴加热, 温度控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

1.2 实验材料

接种污泥取自中海油(青岛)重质油加工工程技术研究中心污水处理工艺曝气池, 静置后去掉上清液。污泥初始混合液悬浮固体质量浓度(MLSS)为 11.1 g/L, 混合液挥发性悬浮固体质量浓度(MLVSS)为 4.9 g/L, 接种量为 1 L, 混合污泥投入密闭的反应器后静置 24 h。

2 实验方法

2.1 反硝化脱硫工艺的运行

采用人工配水方式进行连续流实验。实验各阶段进水基质质量浓度如表 1 所示。实验药品均为分析纯, 其中苯酚作碳源, 硫化物和硝酸盐分别通过投加化学试剂 $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 KNO_3 提供, NaHCO_3 和 K_2HPO_4 则分别作无机碳源和磷源。实验过程中, 控制反应器温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, 水力停留时间(HRT)为 10 h, 模拟废水 pH 为 (7.5 ± 0.2) 。

表 1 各阶段进水基质质量浓度

阶段	I	II	III
时间/d	1~20	21~34	35~49
$\rho(\text{S}^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	100	200	200
$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	150	300	100
$\rho(\text{C})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	75	150	150
$\rho(\text{NaHCO}_3)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1500	1500	1500
$\rho(\text{K}_2\text{HPO}_4)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	110	110	110

表 2 反硝化脱硫工艺中 S^{2-} 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 的去除情况

阶段	时间/d	出水中各物质质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$					去除率/%			S^0 产率/%
		S^{2-}	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{SO}_4^{2-} - \text{S}$	S^{2-}	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$	
I	1~20	3 ± 0.5	33 ± 2	3 ± 0.2	1 ± 0.5	96 ± 1	97	78	96	0
II	21~34	10 ± 1	80 ± 3	30 ± 2	2 ± 0.5	190 ± 3	95	73	80	0
III	35~49	30 ± 2	32 ± 1	74 ± 3	2 ± 0.2	169 ± 2	85	67	50	0

质量浓度分别增至 80 mg/L 和 30 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 的去除率也分别恢复至 73% 和 95%, 但 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 去除率较阶段 I 降低明显, 仅为 80%。出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度稳定后保持在 2 mg/L 以下, 污泥 SVI 值为 90 mL/g, 沉降性能显著增高, 污泥的质量浓度也略微上升, MLVSS 值升至 2.9 g/L, 实验过程仍没有单质 S 积累现象。

第 III 阶段(S/N 比为 2:1), 水力负荷为 $720 \text{ g}(\text{S})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、 $360 \text{ g}(\text{N})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $540 \text{ g}(\text{C})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 实验全程仍未出现单质 S 积累, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 去除率继续降低, 稳定时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 去除率分别保持在

2.2 分析方法

水样检测前需经 0.45 μm 滤膜过滤, 以防其他物质产生干扰。采用紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)测定 $\text{NO}_3^- - \text{N}$; 乙二胺分光光度法(GB 7493—87)测定 $\text{NO}_2^- - \text{N}$; 铬酸钡分光光度法(HJ/T 342—2007)测定 SO_4^{2-} ; 亚甲基蓝分光光度法(GB/T 16489—1996)测定 S^{2-} ; 4-氨基安替比林分光光度法(HJ 503—2009)测定苯酚; 离子色谱法测定 Ac^- ; 采用硫平衡推算法计算单质硫产率^[15]; 采用高通量宏基因组学技术分析微生物群落^[16]; 标准重量法测定 MLSS 和 MLVSS; pH S-25 型 pH 计直接测定 pH。

3 结果与讨论

3.1 反硝化脱硫工艺运行效能

反应器在运行过程中 S^{2-} 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 等变化情况及其转化规律如表 2 所示。

由表 2 可知, 第 I 阶段, S/N(质量比)为 2:3, 水力负荷为 $360 \text{ g}(\text{S})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、 $540 \text{ g}(\text{N})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $270 \text{ g}(\text{C})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 反应器连续运行 20 d 后, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 去除率分别稳定在 78%、97% 和 96%, 出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度则保持在 1 mg/L 以下, 硫化物全部转化为硫酸盐, 未出现单质 S 积累。此阶段测得污泥 MLVSS 值为 2.3 g/L, SVI 值为 150 mL/g。

第 II 阶段(进水碳氮硫基质同时倍增), 水力负荷增至 $720 \text{ g}(\text{S})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 、 $1080 \text{ g}(\text{N})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $540 \text{ g}(\text{C})/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 的出水

67%、85% 和 50%。此阶段污泥的质量浓度继续增高, 沉淀性能继续增强, 有部分颗粒污泥生成, 此时测得污泥 MLVSS 值为 3.3 g/L, SVI 值为 88 mL/g。可以看出, 在 S/N 为 2:1 时, 碳氮硫去除率较 S/N 为 2:3 时均下降明显, 这是因为在 S/N 为 2:1 时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度相对过低, 使得 DSR 工艺中电子受体不足, 进而导致硫化物和苯酚去除效果变差, 因此控制适当的 S/N 比有利于保持较高的碳氮硫去除率。

综上所述, DSR 工艺可以实现废水中苯酚、硝酸盐和硫化物的同步去除, 且控制适当的 S/N 比有利于保持较好的碳氮硫去除率, 但硫化物全部转化为硫酸盐, 无单质 S 积累现象。试验过程中污泥质量浓度

和沉降性能均不断增高,并伴随有颗粒污泥生成。

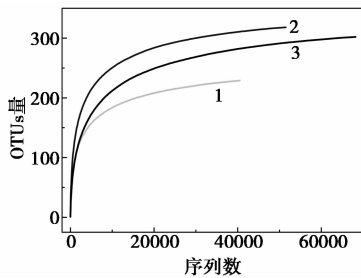
3.2 微生物群落结构

3.2.1 微生物多样性和丰富度

分别取反应器稳定运行阶段 I、阶段 II 和阶段 III 污泥样品(分别命名为 PS1、PS2 和 PS3),依此进行高通量测序,测得微生物多样性与丰富度信息如表 3 所示,微生物群落稀释性曲线如图 2 所示。

表 3 污泥中微生物多样性和丰富度

样品名称	序列数	OTUs	Chao 指数	覆盖率/%	Shannon 指数
PS1	40482	229	242	0.999382	3.33
PS2	51474	318	331	0.999475	3.76
PS3	68200	302	324	0.999501	2.42



1—PS1; 2—PS2; 3—PS3

图 2 微生物群落稀释曲线

由表 3 可知,各样品覆盖率均超过 99%,即样品测序量合理,微生物测定较完全。从 Shannon 指数变化可以看出,微生物多样性由大到小依次为: PS2 > PS1 > PS3,可见当反应器运行至阶段 III 时,微生物多样性大大降低。结合样品中 Chao 指数变化及图 2 稀释曲线可以看出,微生物丰富度由高至低依次为: PS2 > PS3 > PS1。结合微生物多样性和丰富度变化可知,当微生物经过含特定污染物的废水连续培养驯化后,微生物多样性逐渐减少,丰富度则逐渐提高,即功能菌群逐渐显现并开始生长。

3.2.1 微生物群落分析

微生物在菌门水平上的分布情况如表 4 所示。

表 4 样品中微生物在门水平上的分布

菌门	样品分布/%		
	PS1	PS2	PS3
<i>Chloroflexi</i>	17.279	31.612	63.434
<i>Proteobacteria</i>	7.304	8.342	6.727
<i>Firmicutes</i>	22.961	30.252	12.490
<i>Bacteroidetes</i>	11.813	16.540	9.815
<i>Synergistetes</i>	34.410	7.246	4.960
<i>Hyd 24-12</i>	3.011	0.806	0.582
<i>Actinobacteria</i>	0.605	1.026	0.833
其他	2.616	4.175	1.158

注:样品中含量少于 0.5% 的菌门归类为“其他”。

由表 4 可知,样品中共探测到 7 个主要的菌门,分别为 *Proteobacteria*(变形菌门)、*Firmicutes*(厚壁菌门)、*Actinobacteria*(放线菌门)、*Chloroflexi*(绿弯菌门)、*Bacteroidetes*(拟杆菌门)、*Synergistetes*(互养菌门)以及 *Hyd24-12*。其中 *Chloroflexi*、*Firmicutes* 和 *Proteobacteria* 菌门所占比例较多,在样品 PS1(阶段 I)中所占比例分别为 17.28%、22.96% 和 7.31%,当进水基质质量浓度倍增后(阶段 II),*Chloroflexi*、*Firmicutes* 和 *Proteobacteria* 菌门所占比例分别增高至 31.6%、30.25% 和 8.34%,继续调整进水基质质量浓度(阶段 III),*Chloroflexi* 所占比例则继续增加至 63.43%,而 *Firmicutes* 和 *Proteobacteria* 菌门质量分数则分别降低至 12.49% 和 6.72%。

微生物在菌属水平上的主要功能菌群变化情况如表 5 所示。

表 5 样品中微生物在属水平上的主要菌群变化

类别	菌种	样品/%		
		PS1	PS2	PS3
异养反硝化菌	<i>Bacillus</i>	0.04	0.34	6.62
	<i>Thauera</i>	0.35	0.92	0.32
	<i>Pseudomonas</i>	0.12	2.68	0.29
	<i>SB-1_norank</i>	0.07	0.16	0.31
自养反硝化菌	<i>Thiobacillus</i>	0.14	0.32	0.76
	<i>Azoarcus</i>	0.05	0.19	0.21
	<i>Sulfurovum</i>	0.03	0.25	0.07

由表 5 可知,样品中监测到的主要功能菌属有 *Bacillus*、*Thauera*、*Pseudomonas*、*SB-1_norank*、*Thiobacillus*、*Azoarcus*、*Sulfurovum* 等。其中 *Bacillus*、*Thauera*、*Pseudomonas* 和 *SB-1_norank* 为典型的异养反硝化菌属^[17-19]。当水力负荷为 360 g(S)/(m³·d)、540 g(N)/(m³·d) 和 270 g(C)/(m³·d) 时(阶段 I),*Thauera* 菌属质量分数较大,为 0.35%,*Bacillus*、*Pseudomonas* 和 *SB-1_norank* 菌属质量分数分别为 0.04%、0.12% 和 0.07%。当水力负荷提高至 720 g(S)/(m³·d)、1 080 g(N)/(m³·d) 和 540 g(C)/(m³·d) 时(阶段 II),*Bacillus*、*Thauera*、*Pseudomonas* 和 *SB-1_norank* 菌属质量分数分别增至 0.34%、0.92%、2.68% 和 0.16%,其中 *Pseudomonas* 菌属增长最多,成为优势菌属。当水力负荷调整至 720 g(S)/(m³·d)、360 g(N)/(m³·d) 和 540 g(C)/(m³·d) 后(阶段 III),*Bacillus* 和 *SB-1_norank* 菌属质量分数进一步增高,分别为 6.62% 和 0.31%,而 *Thauera* 和 *Pseudomonas* 菌属质量分数则突然降至 0.32% 和 0.29%。此时反应器碳氮硫

去除率较低,可见 *Thauera* 和 *Pseudomonas* 异养菌属质量分数降低是导致此阶段 DSR 工艺运行效能下降的主要原因。

Thiobacillus、*Azoarcus* 和 *Sulfurovum* 为典型的自养反硝化菌属^[20-22]。当水力负荷从 $360 \text{ g(S)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、 $540 \text{ g(N)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 $270 \text{ g(C)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 增加至 $720 \text{ g(S)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、 $1\ 080 \text{ g(N)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 $540 \text{ g(C)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, *Thiobacillus*、*Azoarcus* 和 *Sulfurovum* 菌属质量分数分别从 0.14%、0.05% 和 0.03% 增至 0.32%、0.19% 和 0.25%。继续调整水力负荷至 $720 \text{ g(S)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 、 $360 \text{ g(N)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 和 $540 \text{ g(C)}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, *Thiobacillus* 和 *Azoarcus* 菌属质量分数继续增加至 0.76% 和 0.21%, 而 *Sulfurovum* 菌属质量分数则降低至 0.07%。

4 结论

(1) DSR 工艺可以同步去除废水中苯酚、硝酸盐和硫化物,但试验过程中硫化物全部转化为硫酸盐,无单质 S 积累现象,污泥质量浓度和沉降性能均不断增高,并会伴随有颗粒污泥生成;控制适当的 S/N 质量比有利于保持较好的碳氮硫去除率, S/N 质量比为 2:3 时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 S^{2-} 和 $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}^- - \text{C}$ 去除率可分别达到 73%、95% 和 80% 以上,出水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 质量浓度也保持在 2 mg/L 以下。

(2) DSR 工艺运行过程中主要的异养反硝化菌属为 *Bacillus*、*Thauera*、*Pseudomonas* 和 *SB-1_norank*, 自养反硝化菌属为 *Thiobacillus*、*Azoarcus* 和 *Sulfurovum*。

参考文献

- [1] Olmos A, Olguin P, Fajardo C, et al. Physicochemical characterization of spent caustic from the OXIMER process and sour waters from Mexican oil refineries [J]. Energy and Fuels, 2004, 18(2): 302 - 304.
- [2] Chen C, Ren N, Wang A, et al. Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 78(6): 1057 - 1063.
- [3] Liu C, Xu J, Lee D J, et al. Denitrifying sulfide removal process on high-tetracycline wastewater [J]. Bioresource Technology, 2016, 205: 254 - 257.
- [4] Sarti A, Pozzi E, Chinalia F A, et al. Microbial processes and bacterial populations associated to anaerobic treatment of sulfate-rich wastewater [J]. Process Biochemistry, 2010, 45(2): 164 - 170.
- [5] Damlanovic M H R Z, Foresti E. Dynamics of sulfidogenesis associated to methanogenesis in horizontal-flow anaerobic immobilized biomass reactor [J]. Process Biochemistry, 2009, 44(9): 1050 - 1054.
- [6] Chen C, Wang A, Ren N, et al. Enhancing denitrifying sulfide re-

- moval with functional strains under micro-aerobic condition [J]. Process Biochemistry, 2010, 45(6): 1007 - 1010.
- [7] Reyes-avila J, Razo-flores E, Gomez J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification [J]. Water Research, 2004, 38(14): 3313 - 3321.
- [8] Kim E W, Bae J H. Alkalinity requirements and the possibility of simultaneous heterotrophic denitrification during sulfur-utilizing autotrophic denitrification [J]. Water Science and Technology, 2000, 42(3): 233 - 238.
- [9] Chen C, Wang A, Ren N, et al. Optimal process pattern for simultaneous sulfur, nitrogen and carbon removal [J]. Water Science and Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2009, 136(4): 833 - 837.
- [10] Wong B T, Lee D J. Denitrifying sulfide removal and carbon methanogenesis in a mesophilic, methanogenic culture [J]. Biorecovery Technology, 2011, 102(12): 6673 - 6679.
- [11] Fernandez-Nava Y, Maranon E, Soons J, et al. Denitrification of high nitrate concentration wastewater using alternative carbon sources [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1): 682 - 688.
- [12] Peng Y, Ma Y, Wang S. Denitrification potential enhancement by addition of external carbon sources in a pre-denitrification process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(3): 284 - 289.
- [13] Hamlin H J, Michaels J T, Beaulaton C M, et al. Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture [J]. Aquacultural Engineering, 2008, 38(2): 79 - 92.
- [14] Liu C, Zhao C, Wang A, et al. Denitrifying sulfide removal process on high-salinity wastewaters [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(15): 6463 - 6469.
- [15] Lee D J, Wong B T. Denitrifying sulfide removal by enriched microbial consortium: Kinetic diagram [J]. Bioresource Technology, 2014, 164(7): 386 - 393.
- [16] Ma W, Liu C, Zhao D, et al. Microbial characterization of denitrifying sulfide removal sludge using high-throughput amplicon sequencing method [J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2015, 17(4): 89 - 95.
- [17] Verbaendert I, Boon N, Vos P D, et al. Denitrification is a common feature among members of the genus Bacillus [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2011, 34(5): 385 - 391.
- [18] Liu B, Mao Y, Bergaust L, et al. Strains in the genus Thauera exhibit remarkably different denitrification regulatory phenotypes [J]. Environmental Microbiology, 2013, 15(10): 2816 - 2828.
- [19] Rezaee A, Godini H, Dehestani S, et al. Biological denitrification by *Pseudomonas stutzeri* immobilized on microbial cellulose [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 24(11): 2397 - 2402.
- [20] Wang A, Du D, Ren N, et al. An innovative process of simultaneous desulfurization and denitrification by *Thiobacillus denitrificans* [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2005, 40(10): 1939 - 1949.
- [21] Huang C, Li Z, 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]. Bioresource Technology, 2015, 197(2): 227 - 234.
- [22] Lee D J, Wong B T, Adav S S. *Azoarcus taiwanensis*, sp. nov. a denitrifying species isolated from a hot spring [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(3): 1301 - 1307. ■