

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.018

# MSBR 改为三级 A/O - MBBR 连续流工艺的应用效果

陈如勇<sup>1</sup>, 张晓霞<sup>2</sup>, 周家中<sup>3</sup>, 吴迪<sup>3</sup>, 卢仁江<sup>1</sup>, 朱杰<sup>1</sup>, 沈鑫<sup>1</sup>,  
殷建文<sup>3</sup>

(1. 丽水市供排水有限责任公司, 浙江 丽水 323000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 浙江某污水处理厂原采用 MSBR 工艺, 为强化处理效果, 拟将其改造为三级 A/O - MBBR 连续流工艺。改造后出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN 和 TP 的均值分别为 27.8、5.4、0.41、7.16 和 0.04 mg/L, 稳定达到一级 A 标准; TN 在一级缺氧区、二级缺氧区、三级缺氧区的去除率分别为 43.9%、29.2%、10.5%; 在温度为 25℃、填充率为 25% 的情况下, 悬浮载体的容积负荷达到 0.114 kgN/(m<sup>3</sup>·d), 生物量达到 15.75 g/m<sup>2</sup>; 悬浮载体上硝化菌相对丰度 23.02%, 是活性污泥中硝化菌相对丰度的 16 倍; *Hyphomicrobium* 属在悬浮载体生物膜和污泥中的相对丰度分别为 4.90% 和 6.61%, 与进水中工业废水组分相关。改造工程总投资为 8 497.93 万元, 改造后电耗为 0.610 kW·h/m<sup>3</sup>、药剂费约 0.9 元/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 移动床生物膜反应器; 改良式序批间歇反应器; 三级 A/O 工艺; 悬浮载体; 生物膜; 硝化细菌

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0108-07

## Practical Application Effect of Retrofitted MSBR into Three-stage A/O - MBBR Continuous Flow Process

CHEN Ru-yong<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-xia<sup>2</sup>, ZHOU Jia-zhong<sup>3</sup>, WU Di<sup>3</sup>, LU Ren-jiang<sup>1</sup>,  
ZHU Jie<sup>1</sup>, SHEN Xin<sup>1</sup>, YIN Jian-wen<sup>3</sup>

(1. Lishui Water Supply and Drainage Co. Ltd., Lishui 323000, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

**Abstract:** In order to enhance the effect of a wastewater treatment plant in Zhejiang Province, the original process of modified sequencing batch reactor (MSBR) is retrofitted into continuous flow process including three-stage A/O and moving-bed biofilm reactor (MBBR). After retrofitting, the average effluent COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP were 27.8, 5.4, 0.41, 7.16 and 0.04 mg/L, respectively and reached the first level A standard steadily. TN removal efficiencies were 43.9%, 29.2% and 10.5%, respectively in the three stage anoxic zones. The volumetric load rate of suspended carrier was 0.114 kgN/(m<sup>3</sup>·d) with the filling rate of 25% at 25℃ and the biomass was 15.75 g/m<sup>2</sup>. The relative abundance of nitrifying bacteria on suspended carrier was 23.02%, 16 times of that in activated

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005); 青岛西海岸新区自主创新重大专项(2019-20)  
通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

sludge. The relative abundances of *Hyphomicrobium* in suspended carrier and activated sludge were 4.90% and 6.61% , respectively, which was related to the components of industrial wastewater in the influent. The total investment of the project is 84.979 3 million yuan with power consumption of 0.610 kW · h/m<sup>3</sup> and chemical cost of about 0.9 yuan/m<sup>3</sup>.

**Key words:** MBBR; MSBR; three-stage A/O process; suspended carrier; biofilm; nitrifying bacteria

改良式序批间歇反应器 (MSBR) 由于工艺布置简洁、占地节省、处理效果好,在国内得以广泛应用。但随着污水厂出水标准的提升,已建成 MSBR 系统不能适应新的标准,需要进行提标改造,而 MBBR 嵌合原工艺是可行的策略之一。移动床生物膜反应器 (MBBR)<sup>[1]</sup>,通过向污水中投加悬浮载体作为微生物生长载体,以提高污水处理系统的性能。MBBR 工艺具有处理负荷高、抗冲击能力强、运行管理简便等优点,因此被广泛应用于污水处理厂提标改造。浙江省某污水厂设计规模为 5 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,采用 MSBR 工艺,出水执行一级 A 标准,改造前无法稳定达标。以该污水厂为例,分析 MSBR 改为 MBBR 镶嵌三级 A/O 的应用效果,可为类似污水厂提标改造提供参考。

1 技术路线与改造方案

1.1 改造难点

该污水厂原工艺流程如图 1 所示,其生化段的核心工艺为 MSBR。然而在实际运行过程中,除出水 pH、BOD<sub>5</sub>、SS 和 TP 等指标能稳定达标外,COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 和 TN 的达标率较低。在实际运行过程中面临的问题包括进水中工业废水(合成革、革基布、电镀等)占比大(约 70%),难降解有机物成分多;进水水质超标、水量波动大;进水碳源不足;MSBR 池总停留时间不足,反硝化区池容不足等。

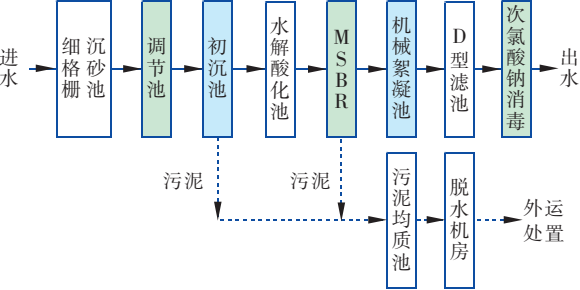


图 1 改造前污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process before upgrading

1.2 工艺选择

针对上述问题,一方面需要增加生化池的池容,另一方面需要提高生化池的生物量,从而形成两条技术路线。技术路线一:将现有的水解池和 MSBR 池改造为 2 组三级 A/O 生物池,在第二级好氧区投加悬浮载体,并新建 2 座二沉池 (Ø42 m) 及相应配水井和污泥泵房、1 座加砂高速沉淀池、1 座反硝化滤池、1 座加药及配电间等,形成“2 组三级 A/O 生物池 + 1 座反硝化滤池”的方案;技术路线二:将现有的水解池和 MSBR 池改造为 3 组二级 A/O 生物池,在第二级好氧区投加悬浮载体,并新建 1 座三级 A/O 生物池、2 座二沉池 (Ø42 m) 及相应配水井和污泥泵房、1 座加砂高速沉淀池、1 座加药及配电间等,形成“3 座二级 A/O 生物池 + 1 座三级 A/O 生物池”的方案。以上两条技术路线均采用多级 A/O 复合生物膜工艺,从运行效果和处理能力来看,两者基本一致。技术路线一需要在反硝化滤池中投加碳源,保障出水 TN 达标,因此出水 COD 和 TN 难以同时确保,保障性一般,且反硝化滤池管理复杂。此外,技术路线一需要铺设现有水解池至 MSBR 池的连接管路,增加了建设费用。而技术路线二通过在第三级 A/O 投加碳源,可确保出水稳定达标,保障性较高,且管理方便,管路改造较少,其工程投资低于技术路线一。最终选择技术路线二为本次改造的方案。

1.3 改造方案

在本次改造中,为保证出水稳定达标,首先重新校核了设计进、出水水质,如表 1 所示。

表 1 污水厂升级改造设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality of upgrading project

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	TN	TP
原设计进水	450	160	300	25	35	5
本次设计进水	500	180	300	45	70	8
本次设计出水	50	10	10	5(8)	15	0.5



## 2.2 对 SS 及 TP 的去除效果

改造前该厂进水 SS 和 TP 均值分别为 209.0、0.9 mg/L,出水均值分别为 7.8、0.08 mg/L,去除率分别达到 96.27% 和 91.11%,改造后效果如图 5 所示。改造后进水 SS 和 TP 均值分别为 259.3、1.75 mg/L,出水均值分别为 5.45、0.04 mg/L,去除率分别达到 96.87% 和 97.32%。经过改造后,出水 SS 和 TP 均能稳定达标。

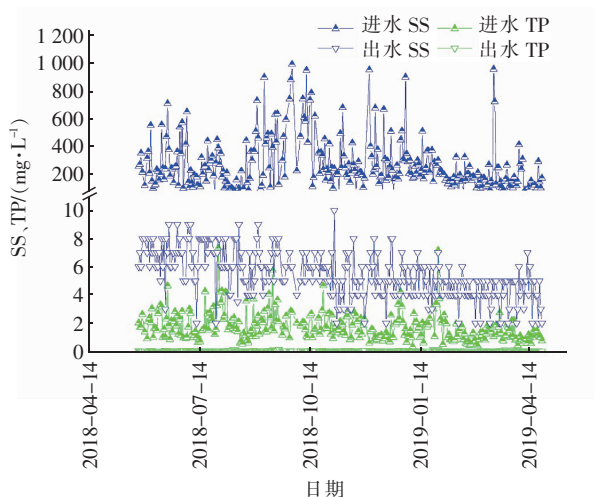


图 5 改造后生化系统对 SS 及 TP 的处理效果

Fig. 5 SS and TP removal efficiency after upgrading

## 2.3 对 TN 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

改造前该厂进水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均值分别为 51.6、29.0 mg/L,出水均值分别为 20.3、3.7 mg/L,两者去除率分别为 60.66%、87.24%。改造后的进、出水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  情况如图 6 所示。

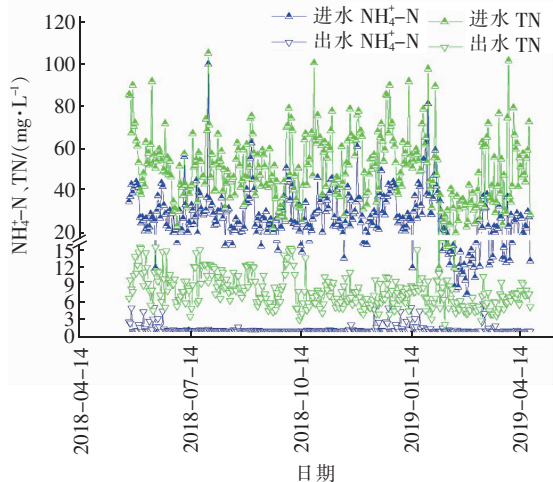


图 6 改造后生化系统对 TN 及  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的处理效果

Fig. 6 TN and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal efficiency after upgrading

进水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  均值分别为 48.67、25.98 mg/L,出水均值分别为 7.16、0.41 mg/L,去除率分别达到 85.29%、98.42%,均高于改造前。该污水厂进水 C/N 严重不足,平均仅为 2.0,在生物池配水井和三级缺氧区投加碳源,碳源投加后进水 C/N 提升至 5.5,通过合理投加碳源,保障了反硝化的进行。在进水水质波动极大的情况下,出水 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  稳定达标,并未受水质冲击和冬季低温的影响。该结果表明,三级 A/O-MBBR 工艺可以抵御较强的水质冲击,一方面悬浮载体的存在增强了系统硝化性能,另一方面,扩大缺氧区、优先保证反硝化的改造思路提高了 TN 的去除效果,从而保证了改造后 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的达标排放。此外,在分配池容适宜、反硝化池容足够的情况下,通过日常碳源的合理投加,能够保障生化系统的反硝化作用正常进行,从而助力出水 TN 达标排放。

改造完成后整个生化段沿程断面氮素浓度变化如图 7 所示。

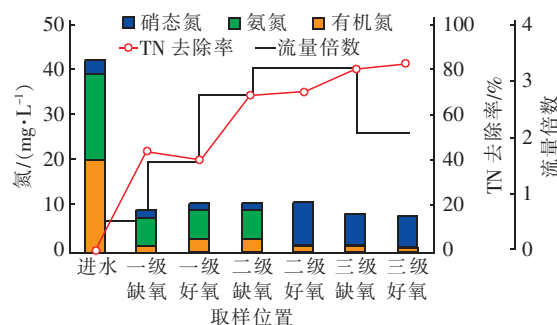


图 7 三级 A/O 沿程断面氮变化

Fig. 7 Change of nitrogen in section along three-stage A/O process

分析各功能段的去除效果,需要结合各功能段的流量倍数去换算。流量倍数为该工艺段考虑回流后的实际流量与进水流量之比。系统的总回流比为 320%,一级好氧区活性污泥对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  氧化的效果并不明显,大部分  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在镶嵌 MBBR 的二级好氧区内被去除。相关研究表明<sup>[2]</sup>,MBBR 悬浮载体上硝化菌属的丰度能够达到 10%~32%,远高于活性污泥上硝化菌的丰度(2%~5%),从而大幅提高了系统的硝化性能。同时,悬浮载体上生物膜动态更新,脱落的生物膜可对活性污泥进行硝化接种,这也是系统硝化性能提高的原因。对沿程样品的研究发现,TN 的去除在缺氧区进行,在一级缺氧区和二级缺氧区中 TN 的去除率分别为 43.9%、



29.2%,而在三级缺氧区 TN 的去除率为 10.5%,TN 的去除量为 4.4 mg/L,该区域的 TN 去除,也进一步保证了 TN 的达标排放。

取好氧 MBBR 区域悬浮载体进行硝化速率测定。悬浮载体如图 8 所示,悬浮载体表面生物膜厚度适中,生物膜呈现灰黑色,经测定其生物量为 15.75 g/m<sup>2</sup>。硝化速率测定试验用水取自 MBBR 池进水,平均温度为 25 ℃,维持系统溶解氧在 2.0 mg/L 以上,试验时间根据 MBBR 池实际水力停留时间进行控制,直至氨氮浓度达到 1 mg/L 以下,以验证悬浮载体生物膜的硝化能力。试验结果如图 9 所示,整个硝化过程进行得较为平稳,氨氮浓度稳定下降。在载体填充率为 25% 的情况下,容积负荷达到 0.114 kgN/(m<sup>3</sup>·d)。

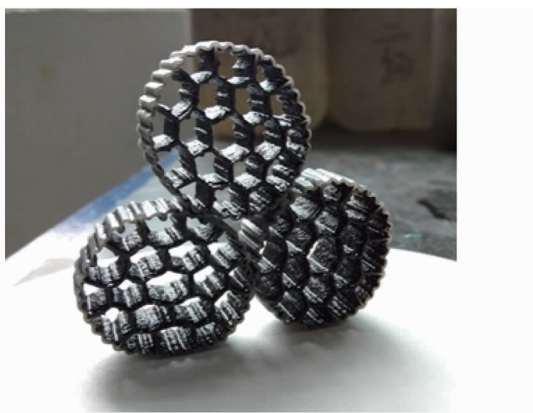


图 8 悬浮载体挂膜效果

Fig. 8 Biofilm on suspended carriers

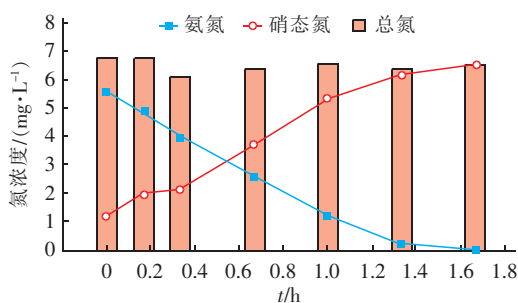


图 9 纯膜硝化速率小试结果

Fig. 9 Result of lab-scale test on nitrification rate of MBBR

## 2.4 系统内的功能微生物分析

分别取 MBBR 区挂膜悬浮载体和好氧池污泥进行高通量测序,属水平菌种相对丰度如图 10 所示。悬浮载体和污泥中相对丰度较高的微生物包括 *Nitrospira* (硝化螺菌属)、*Nitrosomonas* (亚硝化单胞菌属)、*Pseudonocardia* (假诺卡菌属)、*Mycobacterium*

(分枝杆菌属)、*Hyphomicrobium* (生丝微菌属)、*Rhodococcus* (红球菌属)、*Dechloromonas* (脱氯单胞菌)、*Terrimonas*、*Ferruginibacter*、*Bradyrhizobium* (慢生根瘤菌) 和 *Bdellovibrio* (蛭弧菌) 等。

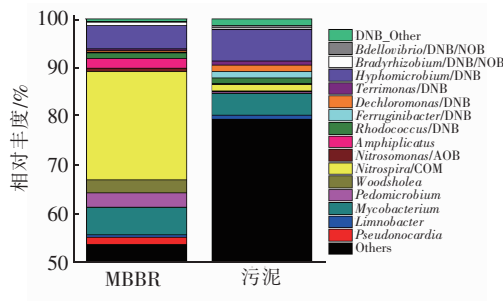


图 10 属水平菌种相对丰度

Fig. 10 Relative abundance distribution at genus level

*Nitrosomonas* 在悬浮载体生物膜和好氧污泥中的相对丰度分别为 0.80% 和 0.05%, 而 *Nitrospira* 的相对丰度则分别为 22.22% 和 1.35%。该结果表明,与活性污泥相比,悬浮载体更利于富集硝化菌属,且对 *Nitrospira* 的富集作用更加明显。研究表明,*Nitrospira* 的比增长速率虽然较低,但对基质的亲和力大,在氨氮浓度较低的环境中更具竞争优势,因此 *Nitrospira* 通常出现在氨氮浓度相对较低的情况下<sup>[3]</sup>。在悬浮载体存在的情况下,*Nitrospira* 成为主要的硝化菌属,其相对丰度是活性污泥中的 16 倍,这也从微观角度反映了悬浮载体对系统硝化性能的强化作用。

*Pseudonocardia* 属在悬浮载体生物膜和污泥中的相对丰度分别为 1.55% 和 0.12%,对底物的转化较为稳定<sup>[4]</sup>。该菌属在污水处理当中,能够在有氧条件下降解四氢呋喃<sup>[5]</sup>。*Mycobacterium* 属是一类无芽孢、不运动、细胞呈分枝并具抗酸性的杆菌,其能够抵抗并分解污水中的多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, 简称 PAHs)<sup>[6]</sup>,在悬浮载体生物膜和污泥中的相对丰度分别达到 5.60% 和 4.49%。*Rhodococcus* 属为革兰氏阳性、多形态菌,不游动,部分抗酸,无气丝,能够降解污水中腈类物质<sup>[7]</sup>,在悬浮载体生物膜和污泥中相对丰度分别达到 1.31% 和 1.06%。上述三种菌属的出现表明,在进水中存在难降解有机物,该结果是由于进水中工业废水占比较大所致,而以上菌属的存在降低了有毒物质对于硝化菌的不利影响,保证了系统的正常运行。

*Hyphomicrobium* 属在悬浮载体生物膜和污泥中的相对丰度分别为4.90%和6.61%,其具有好氧反硝化的性能<sup>[8]</sup>。该菌属广泛存在于生活污水处理过程中,田海龙的研究也证实了该菌属在溶解氧充足环境中具有的好氧反硝化能力<sup>[9]</sup>。此外,该菌属对二氯甲烷、甲胺磷、二甲基硫醚和甲醇等的降解能力也已被证实,李继兵利用稳定同位素探针技术发现了该菌属可参与PAHs污染水体中菲的降解,并验证了该菌属具有降解菲的功能<sup>[10]</sup>。*Hyphomicrobium* 属相对丰度较高,可能与进水中工业废水组分相关。

*Dechloromonas*、*Terrimonas*、*Ferruginibacter*、*Bradyrhizobium* 属为污水处理系统中常见的反硝化菌属<sup>[11]</sup>,其中*Dechloromonas* 属具备反硝化除磷和铁还原功能<sup>[12-13]</sup>,在悬浮载体和活性污泥中的相对丰度分别为0.25%和1.25%。*Terrimonas*、*Ferruginibacter* 和*Bradyrhizobium* 在悬浮载体中的相对丰度分别为0.41%、0.10%和0.62%,在活性污泥中的相对丰度分别为0.81%、1.46%和0.27%。

### 3 经济分析

本次改造工程总投资为8 497.93万元,其中建安工程概算费为7 081.70万元。经改造后,新建了二沉池、配水井、污泥泵房、加砂高速沉淀池等,使全厂的运行电耗由 $0.480 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 增至 $0.610 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,其中生化池的电耗为 $0.417 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。由于进水碳源严重不足,因此通过投加醋酸钠维持反硝化所需的碳源量,全厂总药剂投加成本约0.9元/ $\text{m}^3$ 。本项目的悬浮载体使用寿命高于15年,且使用过程中无流失和破损,无需额外补充。

### 4 结论

将MSBR改为三级A/O-MBBR工艺,改造后出水COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN和TP的均值分别为27.8、5.4、0.41、7.16和0.04 mg/L,稳定达到一级A标准;TN在一级缺氧区、二级缺氧区、三级缺氧区中的去除率分别为43.9%、29.2%、10.5%;在温度为25℃、载体填充率为25%的情况下,悬浮载体的容积负荷达到 $0.114 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,生物量达到 $15.75 \text{ g}/\text{m}^2$ ;悬浮载体上硝化菌占比为23.02%,是活性污泥系统占比的16倍;*Hyphomicrobium* 属在悬浮载体生物膜和污泥中的相对丰度分别为4.90%和6.61%,与进水中工业废水组分相关。经改造后全厂电耗均值为 $0.610 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,药剂投加成本约

0.9元/ $\text{m}^3$ 。MBBR工艺实现了MSBR工艺的原池、镶嵌式改造,且处理效果稳定,显示了MBBR在MSBR工艺升级改造中应用的可行性。

### 参考文献:

- [1] MCQUARRIE J P, BOLTZ J P. Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance[J]. Water Environment Research, 2011, 83(6): 560-575.
- [2] 吴迪. MBBR在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 22-31.  
WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31 (in Chinese).
- [3] 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 等. 活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5201-5207.  
YAO Qian, PENG Dangcong, ZHAO Qiaodi, et al. Enrichment of *Nitrospira* in activated sludge and kinetic characterization [J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5201-5207 (in Chinese).
- [4] 栗飞红, 陈向东, 汪辉, 等. 利用*Pseudonocardia* sp. 微生物转化制备骨化醇类化合物[J]. 微生物学通报, 2018, 45(10): 2164-2173.  
LI Feihong, CHEN Xiangdong, WANG Hui, et al. Preparation of calcified alcohols analogues by bioconversion using *Pseudonocardia* sp. [J]. Microbiology China, 2018, 45(10): 2164-2173 (in Chinese).
- [5] 姚燕来. 四氢呋喃的微生物降解研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.  
YAO Yanlai. Studies on Microbial Degradation of Tetrahydrofuran [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009 (in Chinese).
- [6] ALBERTS J F, ENGELBRECHT Y, STEYN P S, et al. Biological degradation of aflatoxin B<sub>1</sub> by *Rhodococcus erythropolis* cultures [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 109(1/2): 121-126.
- [7] 伍凤姬, 张梦露, 郭楚玲, 等. 菌源对多环芳烃降解菌的筛选及降解性能的影响[J]. 环境工程学报, 2004, 8(8): 3511-3518.  
WU Fengji, ZHANG Menglu, GUO Chuling, et al. Effect of sources on screening and degradation ability of PAHs-degrading bacteria [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2004, 8(8): 3511-3518 (in Chinese).

- [8] MEIBERG J B M, BRUINENBERG P M, HARDER W. Effect of dissolved oxygen tension on the metabolism of methylated amines in *Hyphomicrobium X* in the absence and presence of nitrate: evidence for aerobic denitrification [J]. *Journal of General and Applied Microbiology*, 1980, 120(2): 453–463.
- [9] 田海龙. MABR 脱氮除碳效能及微生物膜特性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.  
TIAN Hailong. Study on Carbon & Nitrogen Removal Performance and Biofilm Characteristics of MABR for Municipal Wastewater Treatment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [10] 李继兵. 基于稳定同位素探针技术的多环芳烃降解微生物研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
LI Jibing. Study on Stable-isotope Probing of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Degrading Bacteria [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese).
- [11] 侯洁. 生物炭对潜流人工湿地生物脱氮影响机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.  
HOU Jie. Influences of Biochar on Biological Nitrogen Removal in Subsurface Flow Constructed Wetland [D]. Chongqing: Southwest University, 2017 (in Chinese).
- [12] 李哥. 活性污泥-生物膜复合系统脱氮除磷试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.  
LI Ge. An Experimental Study on Nitrogen and Phosphorus Removal of the Hybrid Activated Sludge and Biofilm System [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011 (in Chinese).
- [13] CHAKRABORTY A, PICARDAL F. Neutrophilic, nitrate-dependent, Fe(II) oxidation by a *Dechloromonas* species [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2013, 29: 617–623.

作者简介: 陈如勇 (1970 – ), 男, 浙江丽水人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事污水厂项目建设和运行管理工作。

E-mail: qdsprsch@163.com

收稿日期: 2019-06-03

修回日期: 2020-03-13

(编辑: 衣春敏)

(上接第 107 页)

- HUANG Wenxian, QIN Dequan. Discussion on anti-corrosion measures of wastewater discharge pipeline [J]. *Science & Technology Information*, 2012 (18): 58 (in Chinese).
- [3] 孙守蒙. 海底输油管道防腐设计研究 [J]. *化工设计通讯*, 2017, 43(8): 36.  
SUN Shoumeng. Study on anticorrosion design of submarine oil pipeline [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, 43(8): 36 (in Chinese).
- [4] 张剑波, 袁超红. 海底管道检测与维修技术 [J]. *石油矿场机械*, 2005, 34(5): 6–10.  
ZHANG Jianbo, YUAN Chaohong. Inspection and maintenance technique for submarine pipeline [J]. *Oil Field Equipment*, 2005, 34(5): 6–10 (in Chinese).

作者简介: 宋晓阳 (1991 – ), 女, 河北沧州人, 硕士, 工程师, 主要从事尾水排放管道设计工作。

E-mail: sxy0814@126.com

收稿日期: 2020-08-10

修回日期: 2021-03-03

(编辑: 衣春敏)