

# 长三角地区某污水处理厂准Ⅳ类水提标改造分析

方 土<sup>1</sup>, 周家中<sup>2</sup>, 吴 迪<sup>2</sup>, 郑志佳<sup>2</sup>

(1. 三门县住房和城乡建设规划局, 浙江 台州 317100; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 对长三角地区某污水处理厂进行升级改造,综合考虑该污水处理厂用地紧张的现状,并结合工程投资、运行费用以及出水水质等因素,选用 MSBR - MBBR 工艺进行改造。在不新增用地的情况下,改造后的工艺强化了对 C、N、P 的去除。在进水水质波动较大的条件下,COD、TP、氨氮和 TN 出水均值分别为 $(18.40 \pm 3.07)$ 、 $(0.13 \pm 0.04)$ 、0.23 和 $(6.80 \pm 2.00)$  mg/L,出水水质稳定达到地表准Ⅳ类水的要求。经过一个低温运行周期后,出水水质没有受到影响。通过投加填料,优势硝化菌属得到了富集,强化了处理效果,进一步提高了系统运行的稳定性。在 MBBR 区,可能发生了同步硝化反硝化(SND)过程,并且在 SBR 区发生了利用微生物内碳源的反硝化过程,强化了对 TN 的去除,降低了回流比和碳源的投加量,减少了运行费用。MSBR - MBBR 工艺建设和运行费用较低,改造过程实施较快,后期管理简单,出水水质可以满足较高的排放标准,并且可为进一步的水质提升预留空间。

**关键词:** 提标改造; MBBR; MSBR; 准Ⅳ类水; 脱氮除磷

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2018)17 - 0094 - 06

## Analysis on Upgrading and Reconstruction of Class IV Surface Water in a Wastewater Treatment Plant in Yangtze River Delta Region

FANG Tu<sup>1</sup>, ZHOU Jia-zhong<sup>2</sup>, WU Di<sup>2</sup>, ZHENG Zhi-jia<sup>2</sup>

(1. Sanmen County Housing and Urban - Rural Development Planning Bureau, Taizhou 317100, China; 2. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant (WWTP) in the Yangtze River Delta was upgraded. By overall considering the actual situation of the WWTP, such as shortage of land, construction investment, operation cost, effluent quality and other factors, MSBR - MBBR process was selected for the modification of the WWTP. Under the situation of no new land, the removal of C, N and P were enhanced after upgrading of the process. Under the condition of large fluctuation of influent water quality, average values of effluent COD, TP,  $\text{NH}_3 - \text{N}$  and TN were  $(18.40 \pm 3.07)$ ,  $(0.13 \pm 0.04)$ , 0.23 and  $(6.80 \pm 2.00)$  mg/L respectively, which stably met the standard of class IV surface water. After a low temperature cycle operation, the effluent quality had not been affected. By adding fillers, the enrichment of dominant nitrifying bacteria enhanced the treatment effect, and the stability of the system was further improved. Simultaneous nitrification and denitrification (SND) might take place in the MBBR, and utilization of microbial internal carbon for denitrification was occurred in the SBR, which improved the removal

of TN, reduced the reflux ratio and the dosage of carbon source, and saved the operation costs. The MSBR – MBBR process, which has lower investment cost and energy consumption, faster construction cycle and simpler management, can meet higher discharge standard, and it provides space for further improvement of water quality.

**Key words:** upgrading and reconstruction; MBBR; MSBR; class Ⅳ surface water; nitrogen and phosphorus removal

长三角地区某污水厂设计规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 生化段主体工艺为 SBR 的变形工艺——MSBR, 出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 B 要求。2014 年进行过一次提标改造, 其在原工艺基础上, 在生物处理前增加初沉池, 在 SBR 工艺后新增反硝化滤池, 并通过前端投加聚合氯化铝(PAC)的方式辅助化学除磷, 使出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 要求。2017 年, 要求进一步提高出水水质, 达到地表准Ⅳ类水要求, 其在一级 A 的基础上, 对营养元素的出水浓度进行了限定。由于该污水处理厂进水含有工业废水, 并且存在造纸废水和垃圾填埋场渗滤液纳入污水处理厂的情况, 进水水质波动较大, 使污水处理厂提标改造面临巨大的考验和挑战。笔者根据该污水处理厂的实际情况, 选用 MSBR – MBBR 工艺进行升级改造, 旨在为其他类似污水处理厂的提标改造提供参考。

1 技术路线

根据污水处理厂的实际运行情况, 确定了提标改造的重点对象包括  $\text{BOD}_5$ 、氨氮、总氮, 其次是 COD、SS 和 TP。可见, 工作目标是提高生化处理单元对 C、N 的去除能力。设计进水水质: COD、 $\text{BOD}_5$ 、SS、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP 分别为 350、200、220、35、40 和  $4 \text{ mg/L}$ ; 相应的设计出水水质: 30、6、5、1.5 (水温  $< 12 \text{ }^\circ\text{C}$  时为  $2.5 \text{ mg/L}$ )、12 (水温  $< 12 \text{ }^\circ\text{C}$  时为  $15 \text{ mg/L}$ ) 和  $0.3 \text{ mg/L}$ , 设计进、出水 pH 值均为 6~9。

结合以上分析, 提出以下两条改造路线:

① 生化池提标改造法(方案一)。该方案是通过向 MSBR 池的主曝气区投加一定数量的悬浮填料, 形成 MSBR – MBBR 工艺, 以提高反应器中的微生物种类和优势种群数量, 从而提高反应器的处理效率<sup>[1~4]</sup>。由于填料密度接近于水, 所以在曝气的时候, 填料与水呈完全混合状态, 微生物的生长环境包括气、液、固三相。并且载体在水中的碰撞和剪切作用使空气气泡变得更加细小, 增加了氧气的利用

率<sup>[5]</sup>。另外, MBBR 的微生物学本质为生物膜工艺, 每个载体内外均具有不同的生物种类, 内部生长一些厌氧菌或兼氧菌, 外部为好氧菌, 这样每个载体都为一个小反应器, 会发生同步硝化反硝化(SND)过程, 从而强化对 TN 的去除<sup>[6]</sup>。经过对 MSBR 的改造, 生化段设计的主要污染物出水指标:  $\text{COD} < 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5 < 6 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} < 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} < 12 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} < 1.0 \text{ mg/L}$ 。此外, 对原有反硝化滤池进行改造, 将原设计的 4 个滤池增至 5 个, 从而强化 SS 和 TP 的去除效果, 保证后续出水水质稳定达标。

② 增设深度处理设施法(方案二)。该方案在考虑处理效果稳定、工程投资省的基础上, 按工艺可靠性高、占地省的组合池形式, 采用的方案具有大规模、同类型工程实用案例的“曝气生物流化池 + 平流式沉淀池”工艺。该工艺能稳定降解目标污染物, 且能确保主要污染因子  $\text{COD} < 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5 < 6 \text{ mg/L}$ 、氨氮  $< 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} < 12 \text{ mg/L}$  的控制目标, 除磷主要依赖化学除磷。同时将深床反硝化滤池作为普通砂滤池使用, 以去除 SS、TP 为主要目的。

两组方案的比较结果见表 1。

表 1 改造实施方案比较

Tab. 1 Comparison of retrofitting projects

项 目	方案一	方案二
方案措施	SBR 池主曝气区增加填料, 以提高优势种群数量, 增强处理能力, 同时强化反硝化滤池去除 SS 的功能	新增深度处理系统和沉淀池(曝气生物流化池 + 平流式沉淀池), 将深床反硝化滤池作为普通砂滤池使用
典型工程案例	具有较多成功典型案例	具有成功典型案例
处理效果	对 SS 的去除率取决于深床反硝化滤池	对 SS 的去除率取决于深床反硝化滤池
主要工程措施	SBR 池主曝气区投加填料, 并改造曝气系统; 增设 1 台鼓风机	新建“曝气生物流化池(ABFT) + 平流式沉淀池”
工程费用	较低	较高
占地	不新增用地	需新增用地

续表1 (Continued)

项 目	方案一	方案二
施工难度	对施工要求高,改造实施较快	受实施场地的限制,具有一定的施工难度
运行费用	需适当增加 SBR 池好氧区曝气量,能耗增加较少	需二次提升及脱氮系统生化曝气,新增能耗高,且运行费用高
运行管理	与现状系统相当,可不增加管理人员	具有一定的管理要求,运行管理需要积累经验
对远期扩建的影响	不新增工程用地,不影响远期规划	组合池将占用远期用地

根据污水厂用地紧张的现状,并结合工程投资和后期运行费用等,选用生化池提标改造法,该方法投资费用低、不新增用地、改造过程实施快、运行费用低、后期管理简单,可以满足较高的排放标准,并且为进一步的水质提高预留了空间,是一种可靠、高效节能、效果稳定的改造方案。

## 2 方案设计

根据 MSBR - MBBR 改造的“镶嵌”理念,不扩建、不新建,通过对池容进行切割,合理分配,以满足不同功能区需求,具体改造内容包括:

① 原有缺氧 A 区作为厌氧区,现有污泥回流泵保持不变,回流污泥补充系统的活性污泥浓度;

② 原有厌氧 A、厌氧 B、好氧 A 和缺氧 B 区共同作为新的缺氧区,充分利用原水的碳源进行反硝化作用,其中好氧 A 区需拆除现有曝气器并新增隔墙及 2 台搅拌器;

③ 原有好氧 B 和好氧 C 区投加悬浮填料,设置进、出水拦截筛网和部分辅助曝气系统,利用生物膜和活性污泥的共同作用去除有机物和氨氮,同时在拦截筛网后端设置回流至缺氧区前端的内回流系统(泵及管道);

④ 原有 SBR 池 A、B 区运行方式不变,必要时调整运行顺序,以保证 TN 达标。

本次主要对生化段主体进行 MSBR - MBBR 改造,没有扩建。通过对主体池容的切割,扩大了缺氧池,满足了反硝化的需求,硝化不足的部分通过投加悬浮填料进行补足,以强化硝化过程。MBBR 区采用微动力混合池型,无需使用推流器,仅通过曝气系统及水力条件的优化设计来实现填料的良好流化。所投加的填料为 SPR - 2 型悬浮载体,有效比表面积  $>620 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。填料直径为  $(25 \pm 0.5) \text{ mm}$ ,高为

$(10 \pm 1) \text{ mm}$ ,挂膜后密度与水接近,可以形成良好的悬浮效果,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)标准。MBBR 好氧区设计停留时间为 5.44 h,总回流比为 150%,设计污泥浓度为  $3\,500 \sim 4\,000 \text{ mg/L}$ 。在曝气方面,MBBR 区需新铺设曝气系统,根据污水厂的实际情况,增设一台变频风机,用于为新增的穿孔曝气系统单独供气。

## 3 处理效果分析

污水厂自 2017 年 6 月开始施工,到 8 月,投加的悬浮载体已经挂膜,分析 2017 年 9 月 1 日—2018 年 3 月 31 日共计 212 d 的水质数据(含一个冬季运行时间段)。

### 3.1 对 COD 和 TP 的去除效果

工程改造前,进水 COD 均值为  $(202.31 \pm 65.58) \text{ mg/L}$ ,出水 COD 均值为  $(16.57 \pm 9.14) \text{ mg/L}$ 。工程改造后,进水 COD 均值为  $(239.65 \pm 97.91) \text{ mg/L}$ (见图 1),进水 COD 浓度明显增大,且波动大于改造前,并偶有超标,但出水 COD 均值稳定在  $(18.40 \pm 3.07) \text{ mg/L}$ ,与改造前相比,出水 COD 变化不大,但稳定性进一步增强。

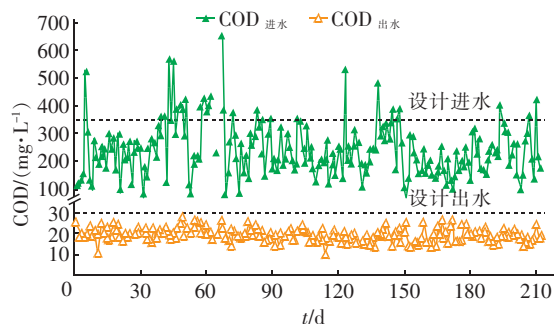


图1 对 COD 的去除效果

Fig. 1 Removal effect of COD

工程改造前,进水 TP 均值为  $(1.77 \pm 0.52) \text{ mg/L}$ ,出水 TP 均值为  $(0.26 \pm 0.18) \text{ mg/L}$ 。工程改造后,进水 TP 均值为  $(2.04 \pm 0.54) \text{ mg/L}$ ,进水 TP 略有增加,出水均值稳定在  $(0.13 \pm 0.04) \text{ mg/L}$ (见图 2)。与改造前相比,在未增加混凝剂投加量的情况下,改造后出水 TP 浓度进一步降低,这主要是由于生化段的除磷效果得到进一步增强,尤其是溶解性磷酸盐的去除率较改造前提高了近 20%。分析原因,这是由于加入悬浮填料后,在一定程度上释放了系统的悬浮态污泥,适当减小污泥龄,有助于强化生物作用的除磷效果。

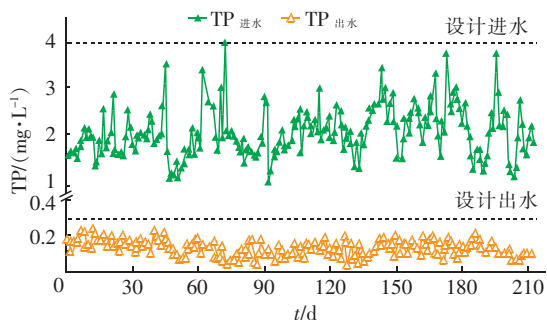


图 2 对 TP 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of TP

### 3.2 对氨氮的去除效果

工程改造前,系统的出水氨氮均值虽然较低,但波动较大,冬季经常出现出水氨氮  $> 3 \text{ mg/L}$  的情况。冬季系统的硝化能力处于临界状态,所能承受波动的能力较弱,难以保证出水水质持续、稳定达标。工程改造后,即使系统经历了一个冬天,在水温低于  $12^\circ\text{C}$  时,出水氨氮均值也仅为  $0.23 \text{ mg/L}$ ,远低于设计要求的  $2.5 \text{ mg/L}$ ,且稳定性较强,受进水波动影响较小(见图 3)。

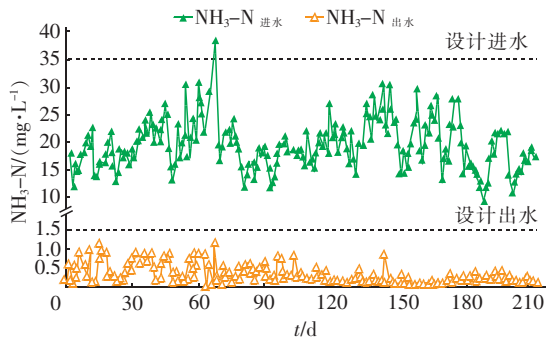


图 3 对氨氮的去除效果

Fig. 3 Removal effect of  $\text{NH}_3-\text{N}$ 

在  $0 \sim 60 \text{ d}$ , 悬浮载体虽然已经挂膜,但处理效果并不稳定,尽管能够达标,但仍在一定范围内波动,说明系统未达到稳定状态。 $60 \text{ d}$  以后,随着悬浮载体生物膜的进一步成熟,系统出水氨氮稳定性增强。悬浮填料上的泥龄一般大于  $30 \text{ d}$ ,有利于长泥龄的硝化菌群富集<sup>[7]</sup>。对于活性污泥法,通过增大污泥浓度可以提高硝化细菌的总量,但长污泥龄导致微生物活性降低,系统抗冲击负荷能力较弱,高污泥浓度同时还会引起耗氧量增加,较高的污泥浓度对沉淀阶段造成了较大的压力<sup>[8]</sup>。悬浮填料富集硝化菌群与活性污泥增大污泥浓度的方式不同,填料挂膜主要依赖于 EPS 的粘附,微生物活性强,

胞外聚合物分泌旺盛,因此容易挂膜且不易脱落。当微生物活性降低、EPS 分泌减少时,在流化的带动下,实现了生物膜的自然更新,填料上的微生物能保持较高的活性。运行过程中,检测污泥和填料上的污泥组分发现,活性污泥中 VSS/SS 值仅为  $0.56 \pm 0.11$ ,悬浮载体上 VSS/SS 值为  $0.89 \pm 0.07$ ,悬浮载体的 VSS/SS 值远高于活性污泥的,进一步证明了 MBBR 对微生物的活性筛选功能。

### 3.3 对 TN 的去除效果

系统对 TN 的去除率从改造前的 58% 增大至改造后的 70%。在进水水质相当的情况下,改造后出水 TN 均值为  $(6.80 \pm 2.00) \text{ mg/L}$  (见图 4)。分析原因,一是运行污泥浓度不受硝化菌群长泥龄要求的限制而得以降低,整个污泥活性较改造前明显提升;二是扩大了缺氧区池容后使反硝化作用更加充分,原水碳源被最大化利用,缺氧区反硝化的 TN 去除率提高了约 5%;三是填料区出现了显著的同步硝化反硝化现象,好氧区的 TN 去除率占系统 TN 去除率的 6% ~ 8%。虽然 SND 作用的 TN 去除量占比较其他报道的略低<sup>[7]</sup>,但考虑本工程进水 TN 较低,进入好氧区的 COD 亦较低,也在一定程度上限制了 SND 的发生。随着填料的进一步成熟,填料上的好氧、缺氧层逐渐稳定,通过优化控制可进一步提高填料的 SND 作用。实际运行中,深床反硝化滤池可作为保障性工艺,一般按普通滤池运行,以保证出水 SS 和 TP,对 TN 的去除可全部在生化段完成。

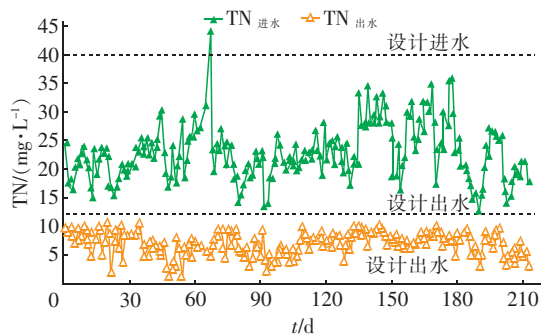


图 4 对 TN 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TN

### 3.4 系统内微生物的菌落分布

取生化池好氧段的悬浮载体及活性污泥分别进行高通量测序,结果如图 5 所示。可知,未投加填料时,污泥中的优势硝化细菌为 *Nitrosomonas*,属于常见的 AOB,占比近 2%。投加填料后,污泥中硝化细

菌占比呈现先降低后升高的趋势,运行至212 d时,硝化细菌占比为1.68%,整个过程中,*Nitrosomonas*的占比逐渐减少,*Nitrospira*的占比逐步增大,并且逐步成为优势硝化菌群。填料上,*Nitrospira*为主要优势硝化菌群,运行至212 d时,硝化菌群占比超过13.17%。系统中还检测到少量 *Brevundimonas*、*Nitrobacter*、*Nitrolancea*、*Rhodopseudomonas*、*Terrimonas*等具有硝化功能的细菌,但占比合计不超过0.2%,且整个过程其含量相对稳定。

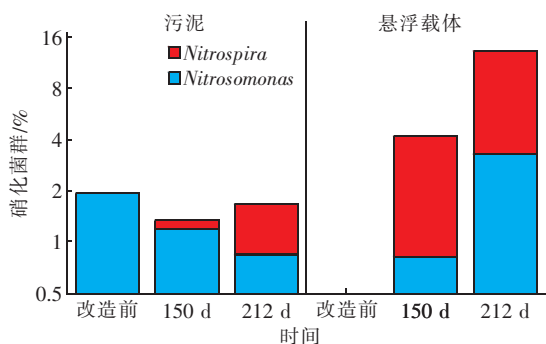


图5 填料和污泥上的优势硝化菌群占比

Fig. 5 Comparison of AOB and NOB between carrier and sludge

工程运行过程中,*Nitrospira*的比增长速率较低,但其对基质的亲和力较大,在氨氮浓度较低的环境中更具竞争优势,属于生活污水水质范围内的优势NOB菌群。但系统的处理效果较改造前更好,且更稳定,而AOB(*Nitrosomonas*)的占比下降,推测*Nitrospira*可能兼有AOB和NOB两种功能,这与最新的研究相符<sup>[9,10]</sup>。

悬浮载体的加入,不仅增加了生物量,也进一步改变了活性污泥-生物膜的菌落分布,优势硝化菌种发生改变,系统的处理效果增强、稳定性提高。

#### 4 结论

① 采用MSBR-MBBR工艺对污水处理厂进行提标改造后,在进水水质波动的情况下,出水水质可以稳定达标。COD、TP、氨氮、TN出水均值分别为 $(18.40 \pm 3.07)$ 、 $(0.13 \pm 0.04)$ 、0.23、 $(6.80 \pm 2.00)$  mg/L。

② 采用MSBR-MBBR工艺后,强化了系统的硝化作用,冬季运行时出水氨氮浓度远低于设计值。改造后对TN的去除率提高了12%,并且强化了对TN的去除,推测在好氧MBBR区发生了同步硝化反硝化过程,以及在SBR区发生了利用微生物

内碳源的反硝化过程。

③ 投加填料后改变了活性污泥-生物膜的菌落分布,优势硝化菌属得到富集,强化了系统的处理效果,并且提高了系统的稳定性。

④ MBBR工艺处理效果稳定,能满足高排放标准并且不新建、不扩建,适用于污水处理厂准IV类水提标和提量改造。

#### 参考文献:

- [1] 郑志佳,吴迪,宋美芹,等. 移动床生物膜反应器两种不同工艺形式的性能对比[J]. 中国给水排水,2017,33(11):16-21.  
Zheng Zhijia, Wu Di, Song Meiqin, et al. Comparison between two forms of moving bed biofilm reactor[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 16-21 (in Chinese).
- [2] 杨宇星,吴迪,宋美芹,等. 新型MBBR用于类地表IV类水排放标准升级改造[J]. 中国给水排水,2017,33(14):93-98.  
Yang Yuxing, Wu Di, Song Meiqin, et al. Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class IV surface water standard[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 93-98 (in Chinese).
- [3] 杨晓美,宋美芹,吴迪,等. 新型悬浮载体强化脱氮除磷技术用于高标准污水处理[J]. 中国给水排水,2017,33(16):97-102.  
Yang Xiaomei, Song Meiqin, Wu Di, et al. Application of new style suspended carriers enhancing nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment for high standard[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 97-102 (in Chinese).
- [4] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. 中国给水排水,2017,33(16):13-17.  
Wu Di. Interpretation of high density polyethylene suspended carrier for water treatment and calculation of added amount of suspended carrier[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 13-17 (in Chinese).
- [5] 李佳,陈畅,平文凯. 移动床生物膜反应器(MBBR)技术解决方案及其应用[J]. 中国给水排水,2009,25(20):63-66.  
Li Jia, Chen Chang, Ping Wenkai. MBBR technical solution and its application[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(20): 63-66 (in Chinese).
- [6] 白晓慧. 利用好氧颗粒污泥实现同步硝化反硝化[J]. 中国给水排水,2002,18(2):26-28.

- Bai Xiaohui. Applicatin of aerobic granular sludge for simultaneous nitrification and denitrification[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(2): 26 – 28 (in Chinese).
- [7] 杨小梅,张月,潘丹华,等. SRT 对  $A^2/O$  – MBBR 工艺中聚磷菌特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 256 – 261.
- Yang Xiaomei, Zhang Yue, Pan Danhua, *et al.* Effect of sludge age on the behaviors of phosphorus accumulating organisms in processing  $A^2/O$  – MBBR[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(1): 256 – 261 (in Chinese).
- [8] 许小平,陶晓武,杜敬,等. 污泥龄对  $A^2/O$  工艺脱氮除磷的影响分析[J]. 中国给水排水, 2013, 29(21): 69 – 71.
- Xu Xiaoping, Tao Xiaowu, Du Jing, *et al.* Effect of SRT on nitrogen and phosphorus removal in  $A^2/O$  process[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 69 – 71 (in Chinese).
- [9] van Kesse M A, Speth D R, Albertsen M, *et al.* Complete nitrification by a single microorganism[J]. Nature, 2015, 528(7583): 555 – 559.
- [10] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. Nature, 2015, 528(7583): 504 – 509.



作者简介:方土(1983 – ), 男, 浙江温岭人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为污水处理建设和管理。

E – mail: 18563979729@163. com

收稿日期: 2018 – 05 – 22

(上接第 93 页)

- istics of anoxic reactor in biofilm  $A^2/O^2$  system treating coking wastewater[J]. Industrial Water & Wastewater, 2008, 39(1): 15 – 19 (in Chinese).
- [3] 董春娟,吕炳南,马立,等. 采用微氧产甲烷技术降解水中的毒性物质[J]. 中国给水排水, 2003, 19(8): 19 – 22.
- Dong Chunjuan, Lv Bingnan, Ma Li, *et al.* Biodegradation of toxicants using oxygen-limited methanogenous technique[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(8): 19 – 22 (in Chinese).
- [4] Chan Y J, Chong M F, Law C L, *et al.* A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater[J]. Chem Eng J, 2009, 155(1): 1 – 18.
- [5] Jeong Y S, Chung J S. Simultaneous removal of COD, thiocyanate, cyanide and nitrogen from coal process wastewater using fluidized biofilm process[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(5): 1141 – 1147.
- [6] 董春娟,翟伟,冯美荣,等. 硅藻土—颗粒污泥协同处理焦化废水研究[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(5): 766 – 771.
- Dong Chunjuan, Zhai Wei, Feng Meirong, *et al.* Coordinated treatment of actual coking wastewater with diatomite and granular sludge[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(5): 766 – 771 (in Chinese).
- [7] Rice E W, Baird R B, Eaton A D, *et al.* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (22nd ed) [M]. Washington D C: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012.



作者简介:董春娟(1970 – ), 女, 山西临汾人, 博士, 教授, 研究方向为水污染控制。

E – mail: chunjuand@126. com

收稿日期: 2018 – 02 – 12