

基于 MBBR 工艺的污水处理厂生物脱氮除磷特征

尚菊红¹, 宋美芹²

(1. 长治市环境监控中心, 山西 长治 046000; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 以长治市某污水处理厂生物处理单元为研究对象, 对比了改造前工艺(氧化沟)和改造后工艺(MBBR)的生物脱氮除磷效果, 并剖析了新工艺脱氮除磷的生物增效特征。结果表明, 改造后总排放口出水中 TN、氨氮、TP 的月均值分别为 12.0 ~ 14.3、0.28 ~ 1.33 和 0.150 ~ 0.243 mg/L, TN 浓度满足一级 A 标准, 氨氮和 TP 浓度满足地表水准Ⅳ类水质标准, 且可以实现污水处理的全过程控制。与氧化沟工艺相比, MBBR 工艺生物增效特征显著, 出水中 TN、氨氮、TP 的年均值分别为 13.3、0.61 和 0.215 mg/L, 分别降低了 5.20、2.57 和 0.518 mg/L。污水处理厂各工艺单元中生物处理单元对去除 TN、氨氮和 TP 的贡献率分别为 92.8%、100% 和 85.1%, 深度处理单元中混凝沉淀作用对去除 TP 的贡献比对 TN 的大。

关键词: 脱氮除磷; MBBR 工艺; 提标改造; 贡献率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0100-06

Characteristics of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal in a Wastewater Treatment Plant Based on MBBR Process

SHANG Ju-hong¹, SONG Mei-qin²

(1. Monitoring Center of Changzhi Environmental Protection Agency, Changzhi 046000, China;
2. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: The effects of biological nitrogen and phosphorus removal of oxidation ditch process (old process) and MBBR process (new process) in a wastewater treatment plant in Changzhi were compared, and the enhanced biological characteristics of the new process were analyzed. The results indicated that the monthly average values of effluent TN, ammonia nitrogen and TP of the ending discharge port were 12.0 - 14.3 mg/L, 0.28 - 1.33 mg/L and 0.150 - 0.243 mg/L respectively. Among them, the effluent TN met the first level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002), and the ammonia nitrogen and TP met the level Ⅳ criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). And the whole process control of the wastewater treatment was realized. Compared with the oxidation ditch process, the MBBR process showed significant biological synergistic characteristics. The annual average values of effluent TN, ammonia nitrogen and TP of the MBBR were 13.3 mg/L, 0.61 mg/L and 0.215 mg/L, which decreased by 5.20 mg/L, 2.57 mg/L and 0.518 mg/L respectively. In the wastewater treatment plant, 92.8% of TN, 100% of ammonia nitrogen and 85.1% of TP were removed by the biological treatment unit respectively, and coagulation precipitation in the advanced treatment procedure contributed more TP removal rate than that of TN.

Key words: nitrogen and phosphorus removal; MBBR process; upgrading and reconstruction;

contribution rate

随着我国社会经济的发展和城镇化进程的加快,生活污水的排放量逐年增加,氮、磷浓度逐渐升高,水体富营养化问题增多,这对新时期水污染防治工作提出了更高的要求。山西省要求城镇污水处理厂出水 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 浓度必须达到地表水 V 类标准,为此很多污水处理厂对现有工艺进行优化改造或者增设深度处理单元以确保出水水质达标排放^[1]。

近年来 MBBR 工艺被广泛应用于污水处理厂提标改造过程中^[2-4],即将 MBBR 系统嵌入原活性污泥系统中,在原有梯度复氧的基础上通过水流和曝气提供“厌氧/缺氧/好氧”的条件,填料表面生长的微生物种类丰富、生物量高且能够与污水充分接触,实现降解污染物的目的^[5-7]。此外,由于每个载体内外均有不同的生物种类,内部生长一些厌氧菌或者兼氧菌,外部为好氧菌,这样每个载体都是一个微型反应器,使硝化反应和反硝化反应同时存在,从而优化了处理效果^[8]。

载体上附着生长的微生物可以达到很高的生物量,因此反应池内生物浓度是悬浮生长活性污泥工艺的 2~4 倍,可达 8~12 g/L,降解效率随之成倍提高。由于采用生物膜法和活性污泥法组合形成厌氧/缺氧/好氧反复交替循环脱氮除磷过程,因此可以有效提升生物脱氮除磷的效率。在生化系统后增加深度处理工艺,通过化学除磷进一步去除磷和悬浮物,该方法投资低、不需要新增用地、实施快捷、后期管理简单,既可以用于新建的污水处理厂,又可以用于现有污水处理厂的工艺改造和升级换代。除了可以满足较高排放标准的要求外,还可以有效实现污水处理的全过程控制。

笔者以长治市某大型城市污水厂生物处理单元为研究对象,对比了改造前工艺(氧化沟)和改造后工艺(MBBR)长期运行过程中生物脱氮除磷的效果,并且剖析了提标改造后新工艺运行中脱氮除磷的生物增效特征,旨在为同类型污水处理厂升级优化提供技术支撑。

1 工艺流程与分析方法

1.1 工艺流程

该污水处理厂为合流制排水系统,主要污染源为低浓度生活污水,1 个总排放口,以氧化沟为主体工艺,生活污水经粗细格栅分离悬浮物后,进入旋流沉砂池分离有机物和细砂,同时对水质进行均化,出水进入一体化氧化沟,利用曝气和推流形成富氧区和缺氧区,以实现去除有机物和脱氮除磷的目的。

改造后的主体工艺如图 1 所示,其采用活性污泥-生物膜复合工艺,由中国市政工程中南设计研究总院设计,生物填料为高密度聚乙烯圆柱状悬浮填料。该工艺单座的有效生物膜面积为 $5.976 \times 10^5 \text{ m}^2$,生物悬浮填料规格为 $\varnothing 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$;底部设 1 套辅助流化系统,MBBR 区采用穿孔管曝气,位置从池底至池底以上 1 m,材质为 ABS 塑料;进出水拦截系统 1 套,型式为与悬浮填料配套的筛网,材质为不锈钢;填料区设置 2 台推流器,形成循环流动的跑道式池型。该工艺以 2 座空间隔离的“厌氧池+缺氧池+好氧池 MBBR”改良型生物池系统代替原“氧化沟”,具体设计参数如下:污泥龄 $\geq 15 \text{ d}$,有效水深为 6.0 m,单座生物池的有效容积为 $40\,810 \text{ m}^3$ (厌氧区 $3\,150 \text{ m}^3$ + 前缺氧区 $13\,100 \text{ m}^3$ + 前好氧区 $17\,500 \text{ m}^3$ + 后缺氧区 $4\,160 \text{ m}^3$ + 后好氧区 $2\,900 \text{ m}^3$),内回流比 $\geq 200\%$,外回流比 $\leq 100\%$ 。

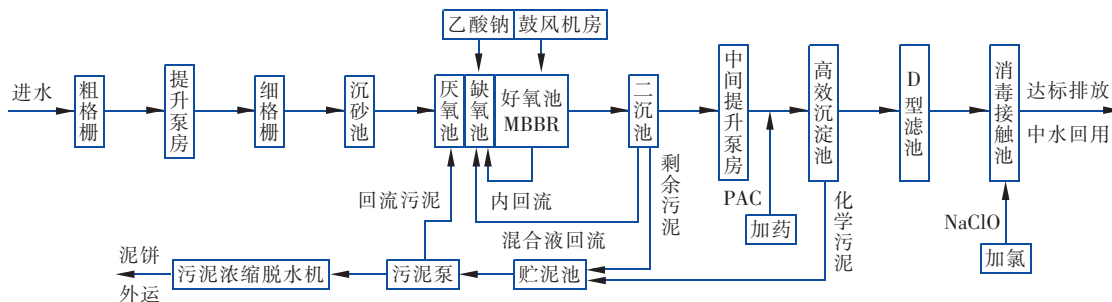


图 1 新污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of new wastewater treatment process

设置厌氧池的目的是为生物池的生化处理提供适宜的菌群,新池型中有明确的缺氧段,好氧段中投加一定数量的生物填料,可为硝化细菌的生长提供载体。在好氧区中,采用适当的穿孔管曝气系统进行曝气,以确保生物载体流化填料在水中做上下、前后的流动并促进填料的生物膜更新,使填料与污水充分混合、碰撞、接触,有效完成污染物、水、气三相的接触、交换、吸附等过程,从而达到污染物通过吸附和扩散作用进入生物膜内被微生物降解的目的。由于填料密度为 $0.94 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$,在培菌期间,填料表面会慢慢附着大量的生物膜,附着量越大,密度越大,当填料上的生物膜达到一定厚度时,其密度略大于 1 g/cm^3 ,填料从非曝气区下沉到水池底部,由于曝气区底部的冲击力最强,因此能迅速冲洗掉填料上的残余生物膜,脱膜后的填料密度也随之降低到 1 g/cm^3 以下,并在曝气区上升。根据挂膜前后的密度变化,填料可以随水流在曝气区和非曝气区翻腾,从而交替完成了生物膜的生长和脱落过程,保证了生物膜数量的稳定和活性,使工艺稳定运行。为了防止流化悬浮填料随混合液进入下一个环节,在好氧区内适当位置采用筛网进行简单拦截和分隔。在好氧池和缺氧池之间设置内回流,将部分硝酸盐回流至缺氧池作为电子受体,同时在缺氧池投加乙酸钠为反硝化过程提供碳源,有效提高脱氮效果。增设的深度处理单元采用“高效沉淀池-D型滤池-消毒池”工艺,除达到化学除磷、去除水中残余的SS、脱色、除臭的目的外,还可以进一步降低 BOD_5 和TN。

1.2 分析项目及方法

总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,总磷采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 脱氮除磷效果分析

2.1.1 脱氮效果

改造前、后污水厂出水TN的变化如图2所示。可以看出,改造前出水TN月均值在 $16.1 \sim 19.7 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 18.5 mg/L ;改造后出水TN月均值在 $12.0 \sim 14.3 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 13.3 mg/L 。另外,改造前出水氨氮月均值在 $0.67 \sim 10.5 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 3.18 mg/L ;改造后出水氨氮月均值在 $0.28 \sim 1.33 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 0.61

mg/L 。改造前出水TN和氨氮满足一级B标准,改造后出水TN和氨氮满足一级A标准,并且氨氮浓度甚至接近《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准。污水处理工艺中,去除总氮主要通过异养反硝化和厌氧氨氧化两种途径,相对于氧化沟,MBBR工艺增设了缺氧区,同时好氧池内产生的 NO_3^- 回流至缺氧池,能够以投加的乙酸钠为碳源利用兼性反硝化菌的异化作用将 NO_2^- 、 NO_3^- 还原成 NO 、 N_2O 和 N_2 ,从而提高了对TN和氨氮的去除效果。此外,有研究表明^[9],在MBBR工艺缺氧区的生物膜和填料表面还存在大量厌氧氨氧化菌,能够将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原为 N_2 ,有利于TN和氨氮的去除。从图2还可以看出,改造前、后7月和8月出水中TN的浓度相差较小,而改造后2018年10月—12月对TN的去除效果显著高于2013年10月—12月的去除效果,说明即使在水温较低的秋季和冬季,MBBR工艺仍能实现较好的脱氮效果,这与吴迪等^[10]的研究结果一致。虽然水温低会抑制兼性反硝化菌和厌氧氨氧化菌的活性,但通过选择合适的反应器类型及生长工艺也可以有效抵抗低温带来的影响。Laureni等^[11]采用MBBR工艺处理城市生活污水,即使在 15°C 下对TN的去除率也可达到70%,出水TN浓度低于 10 mg/L 。

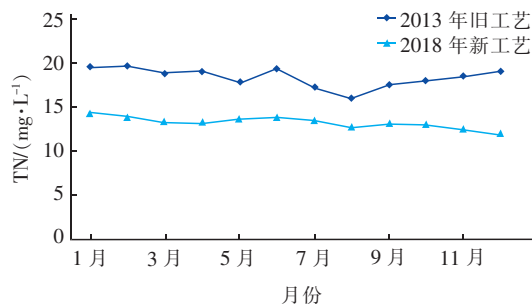


图2 改造前、后污水厂出水TN的变化

Fig. 2 Variation of effluent TN in wastewater treatment plant before and after upgrading

2.1.2 生物除磷效果

改造前、后污水厂出水TP的变化如图3所示。可以看出,改造前出水TP月均值在 $0.350 \sim 1.100 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 0.733 mg/L ,出水TP满足一级B标准;改造后出水TP月均值在 $0.150 \sim 0.243 \text{ mg/L}$ 之间,年均值为 0.215 mg/L ,出水TP满足一级A标准,甚至可以达到准Ⅳ类水标准。通过对比可以发现,5月—7月改造后出水TP略低于改造

前,其他月份改造后出水 TP 显著低于改造前。改造前,对 TP 的去除主要依靠好氧聚磷菌在有氧条件下以 O_2 为电子受体吸收磷,而改造后的生物单元增加了缺氧区,其中的反硝化聚磷菌也能以硝酸盐为电子受体吸收磷,通过两级除磷增加了除磷效果。尤其是采用硝化液内回流的方式能够显著提高反硝化除磷效果。杨小梅等^[12]发现,当回流比由 100% 增加到 200% 时,缺氧吸磷量由 16.02 mg/L 增加到 20.20 mg/L。张森等^[13]通过观察 MBBR 工艺长期稳定运行时的除磷效果发现,在以乙酸钠作为碳源的情况下,当 $NO_3^- - N$ 浓度为 30 ~ 40 mg/L 时,对 $PO_4^{3-} - P$ 的去除率在 99% 以上。此外,由于悬浮填料的比表面积较大,适于长泥龄自养菌的生长(超过 30 d),而悬浮态污泥的泥龄可相应缩短(不超过 20 d),从而强化了生物除磷效果^[14]。与 TN 的变化类似,夏季水温高时出水 TP 含量较低,改造前与改造后出水 TP 含量差异不大;冬季水温低时,改造前出水中 TP 含量较高,去除率低,改造后出水 TP 含量仍较低,且可保持较高的去除率。

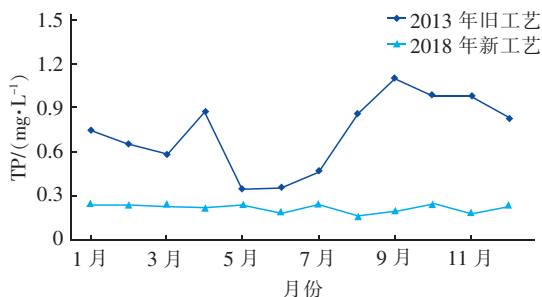


图 3 改造前、后污水厂出水 TP 的变化

Fig. 3 Variation of effluent TP in wastewater treatment plant before and after upgrading

综上所述,采用 MBBR 工艺进行生物脱氮除磷的效果优于氧化沟,这是由于 MBBR 工艺增加了空间隔离的缺氧段,有利于缺氧微生物主导的反硝化作用、厌氧氨氧化作用、吸附除磷作用的发生;在缺氧段投加碳源能够有效促进反硝化反应的发生;通过将好氧段的污泥以一定比例回流至缺氧段能够为反硝化过程提供 NO_3^- 作为电子受体;MBBR 系统内生长着不同污泥龄的微生物,适用于多种微生物反应的发生。

2.2 MBBR 工艺脱氮除磷的生物增效特征

选取改造后 2018 年全年进水口、二沉池出水口、总排放口 3 个监测点位的 TN、氨氮和 TP 监测

值。根据 Wasche 等^[15]的研究结果,并运用物料衡算和图形分析方法得出 MBBR 工艺脱氮除磷的生物增效特征,结果如图 4 所示。

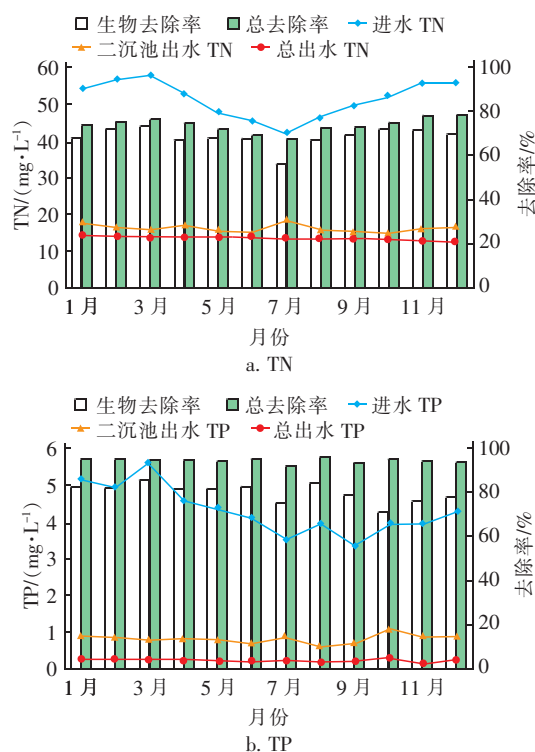


图 4 MBBR 工艺中 TN 和 TP 的变化

Fig. 4 Variation of TN and TP in MBBR process

从图 4(a)可知,总排放口出水中 TN 在 10 ~ 15 mg/L 之间,略低于二沉池出水 TN 浓度。该工艺对 TN 的平均生物去除率为 68.8%,平均总去除率为 74.1%,生物处理的贡献率为 92.8%。总排放口出水中氨氮在 0.281 ~ 1.33 mg/L 之间,基本和二沉池出水氨氮浓度相同。该工艺对氨氮的平均生物去除率为 98.0%,平均总去除率为 98.0%,生物处理的贡献率为 100%。可见,生物处理单元是去除污水中 TN 和氨氮的主要阶段,与前面的结果一致,MBBR 工艺在较短的水力停留时间下可取得较好的硝化和反硝化效果。从图 4(b)可以看出,总排放口出水中 TP 浓度显著低于二沉池出水的 TP 浓度,对 TP 的平均生物去除率为 80.8%,平均总去除率为 95.0%,生物处理的贡献率为 85.1%。该工艺除磷仍以生物除磷为主、化学除磷为辅,但相比于 TN,三级深度处理单元对 TP 的削减贡献更大。这是因为污水经生物处理后,去除了大部分氨氮和 TN,深度处理阶段主要针对的是二沉池出水中的悬浮物、溶解态有机物、溶解性磷和微生物等,在高效沉淀池内

投加 PAC 的作用下,出水 TP 浓度在 0.3 mg/L 以下,能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准。

3 结论

① 以 MBBR 为核心的污水处理工艺中,出水总氮、氨氮和总磷的月均值分别在 12.0 ~ 14.3、0.28 ~ 1.33 和 0.150 ~ 0.243 mg/L 之间,年均值分别为 13.3、0.61 和 0.215 mg/L,3 项水质指标分别稳定在 15、1.5 和 0.3 mg/L 以下,最终出水中 TN 浓度满足一级 A 标准,TP 和氨氮浓度满足地表水Ⅳ类水标准。

② 与改造前氧化沟工艺相比,改造后的 MBBR 工艺设置缺氧区、投加碳源和采取污泥内回流等方式,出水中 TN 平均值降低了 5.20 mg/L,氨氮平均值降低了 2.57 mg/L,TP 平均值降低了 0.518 mg/L。

③ 生物处理单元是 MBBR 工艺提高脱氮除磷效率的主要阶段,该单元对去除 TN、氨氮和 TP 的贡献率分别为 92.8%、100% 和 85.1%。深度处理单元中的混凝沉淀作用使出水 TP 浓度稳定在 0.3 mg/L 以下,对去除 TP 的贡献比对 TN 的大。

参考文献:

- [1] 宋连朋,魏连雨,赵乐军. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析[J]. 给水排水,2013,39(3):39-44.
Song Lianpeng, Wei Lianyu, Zhao Lejun. Analysis of construction and operation status and existing problems of municipal wastewater treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(3):39-44 (in Chinese).
- [2] 杨文焕,唐若凯,肖作义,等. 多级 MBBR 与 A²O 工艺处理低 C/N 生活污水对比分析[J]. 环境科学与技术,2017,40(9):131-135.
Yang Wenhuan, Tang Ruokai, Xiao Zuoyi, et al. Comparative analysis of multi-level MBBR process and A²O process treating low C/N ratio domestic sewage[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(9):131-135(in Chinese).
- [3] 杨祝平,郭淑琴. 改良 AAO 及污泥深度脱水工艺用于城镇污水厂迁建提标[J]. 中国给水排水,2019,35(2):61-66.
Yang Zhuping, Guo Shuqin. Application of improved AAO and sludge deep dewatering process in the relocation and upgrading of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):61-66(in Chinese).
- [4] 王翥田,叶亮,张新彦,等. MBBR 工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. 中国给水排水,2010,26(2):71-73.
Wang Zhutian, Ye Liang, Zhang Xinyan, et al. Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2):71-73(in Chinese).
- [5] Regni P, Holgate B, Miller M W, et al. Nitrogen polishing in a fully anoxic anammox MBBR treating mainstream nitrification - denitrification effluent [J]. Biotechnol Bioeng, 2016, 113(3):635-642.
- [6] Yuan Q, Wang Q, Hang Q Y, et al. Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(18):13970-13979.
- [7] Zinatizadeh A A L, Ghaytooli E. Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): Process modeling and optimization [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 53:98-111.
- [8] Hoang V, Delatolla R, Abujamel T, et al. Nitrifying moving bed biofilm reactor (MBBR) biofilm and biomass response to long term exposure to 1 °C [J]. Water Res, 2013, 49:215-224.
- [9] 杨岚,彭永臻,李健伟,等. 缺氧 MBBR 耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮[J]. 环境科学, 2019. DOI:10.13227/j. hjkx. 201901015.
Yang Lan, Peng Yongzhen, Li Jianwei, et al. Advanced denitrification from municipal wastewater achieved via partial ANAMMOX in anoxic MBBR[J]. Environmental Science, 2019. DOI: 10.13227/j. hjkx. 201901015 (in Chinese).
- [10] 吴迪,周家中,郑志佳,等. MBBR 用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. 中国给水排水,2018,34(15):6-11.
Wu Di, Zhou Jiazhong, Zheng Zhijia, et al. Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP in Shanxi Province [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(15):6-11(in Chinese).
- [11] Lauren M, Falas P, Robin O, et al. Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures [J]. Water Res, 2016, 101:628-639.

- [12] 杨小梅,邓猛,王羽华,等. 硝化液回流比对 A^2/O - MBBR 工艺反硝化除磷效果的影响[J]. 环境工程, 2015,33(8):13-16,41.
Yang Xiaomei, Deng Meng, Wang Yuhua, *et al.* Effect of nitrification liquid reflux ratio on denitrification phosphorus removal in an A^2/O - MBBR process [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(8):13-16, 41 (in Chinese).
- [13] 张森,袁庆,黄棚兰,等. 不同电子受体浓度对反硝化除磷的影响及动力学特性[J]. 环境工程学报, 2018, 12(3):830-838.
Zhang Miao, Yuan Qing, Huang Penglan, *et al.* Effect of different electron acceptor concentrations on denitrifying phosphorus removal and dynamic characteristic [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(3):830-838 (in Chinese).
- [14] 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.
Wudi. Application and development prospect of MBBR in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16):22-31 (in Chinese).

- [15] Wasche S, Horn H, Hempel D C. Influence of growth conditions on biofilm development and mass transfer at the bulk/biofilm interface [J]. Water Res, 2002, 36(19):4775-4784.



作者简介:尚菊红(1965 -),女,山西武乡人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为废水、废气污染源自动在线监测。

E-mail:sjhbj@163.com

收稿日期:2019-05-04

(上接第 99 页)

- 氧化研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13):19-22, 26.
Tan Chong, Qiu Shan, Ma Fang, *et al.* Study on anaerobic ammonia oxidation in polyurethane biofilm reactor [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(13):19-22, 26 (in Chinese).
- [10] 郑照明,李军,杨京月,等. 不同 C/N 比和碳源种类条件下的 SNAD 生物膜脱氮性能[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4):1331-1338.
Zheng Zhaoming, Li Jun, Yang Jingyue, *et al.* The nitrogen removal performance of the SNAD biofilm with different C/N ratios and carbon sources [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4):1331-1338 (in Chinese).
- [11] Vázquez-Padin J R, Fernandez I, Morales N, *et al.* Autotrophic nitrogen removal at low temperature [J]. Water Sci Technol, 2011, 63(6):1282-1288.
- [12] 吕锡武. 氨与氨氮硝化需氧量问题的诠释[J]. 江苏环境科技, 1997(1):37-38.
Lü Xiwu. Interpretation of nitrification oxygen demand of

ammonia and ammonia nitrogen [J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 1997(1):37-38 (in Chinese).



作者简介:李思敏(1968 -),男,陕西乾县人,博士,教授,主要从事水及废水处理、水生态改善等领域的工作。

E-mail:chyeli@126.com

收稿日期:2019-01-15