

MBBR 用于山西某污水厂提标改造效果分析

吴迪¹, 周家中¹, 郑志佳¹, 管满²

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555; 2. 太原市市政工程设计研究院, 山西 太原 030002)

摘要: 在不新增占地的情况下,山西某污水厂采用改良 A^2/O -MBBR 工艺进行一级 A 提标改造;采用“镶嵌”理念,将原厌氧区分割为预缺氧区和厌氧区,同时将原好氧区分割为缺氧区和好氧区,并在好氧区投加 SPR-2 型悬浮填料,悬浮填料符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体》(CJ/T 461—2014)行业标准。改造后,污水厂经历了冬季低温、进水水质剧烈波动等阶段,但出水水质能够稳定达到一级 A 标准,部分指标达到了地表水Ⅳ类水平,COD、氨氮、TN 和 TP 平均出水浓度分别为 19.66、0.87、11.37、0.24 mg/L,平均去除率分别为 93.1%、97.9%、76.8%、93.3%,表现出良好的耐低温及抗冲击性能,并实现了同步强化脱氮除磷。经改造后,能耗未有显著增加,且合理的工艺布局及好氧区 SND 现象的出现,使碳源投加量仅为设计值的一半。高通量测序以及生物量测定表明,加入悬浮填料后形成了泥膜复合工艺,优化了系统的菌落分布,增加了菌群的多样性;悬浮填料对硝化菌群富集具有重要作用,冬季低温时填料对硝化的贡献率达到了 79%;悬浮载体上存在一定量的反硝化菌群,这为进行 SND 提供了微观保障,有效降低了碳源投加量,提高了 TN 去除效率。MBBR 工艺占地省、负荷高、抗冲击能力强,能够优化和改善微生物菌落结构,适合于污水厂提标改造。

关键词: 提标改造; MBBR; 一级 A 标准; 硝化螺旋菌属; 亚硝化单胞菌属

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)15-0006-06

Application of MBBR Process to Upgrading and Reconstruction of WWTP in Shanxi Province

WU Di¹, ZHOU Jia-zhong¹, ZHENG Zhi-jia¹, GUAN Man²

(1. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China; 2. Taiyuan Municipal Engineering Design & Research Institute, Taiyuan 030002, China)

Abstract: A wastewater treatment plant (WWTP) in Shanxi Province was upgraded and retrofitted in the absence of new land added, where modified A^2/O -MBBR process was used to ensure the effluent quality stably meeting the first level A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (GB 18918-2002). Using the concept of “mosaic”, the anaerobic zone was divided into pre-anoxic and anaerobic zones and the aerobic zone was divided into anoxic and aerobic zones. The SPR-2 suspended fillers were added into aerobic zone, which met the standard of *High Density Polyethylene Suspended Carrier for Water Treatment* (CJ/T 461-2014). After upgrading, the WWTP successively experienced the low temperature in winter and influent quality fluctuation, but the effluent quality was still superior to level A standard, even some indicators had reached class IV of *Environmental Quality Standards for Surface Water*. The average concentrations of COD, NH_3-N , TN and TP in effluent were 19.66 mg/L, 0.87 mg/L, 11.37 mg/L, 0.24 mg/L, and the average removal rates were 93.1%,

97.9%, 76.8% and 93.3%, respectively, showing a good low temperature resistance, impact resistance and synchronized enhanced nitrogen and phosphorus removal. The total energy consumption did not change substantially after upgrading. The amount of carbon source added was only half of the design value through the reasonable process layout and appearance of SND phenomenon in aerobic zone. High-throughput sequencing and biomass measurement indicated that the sludge – biofilm composite process had formed by adding the fillers, which optimized colony distribution and increased the diversity of flora in the system. Suspended filler played an important role in the enrichment of nitrifying bacteria and the contribution of the fillers to nitrification accounted for 79% in winter. The presence of a amount of denitrifying bacteria on the suspended carrier provided a microscopic guarantee for the SND phenomenon, effectively reducing the consumption of carbon source and increasing the TN removal. MBBR process has the advantages of less land occupation, high load, strong shock loading resistance, which is suitable for upgrading and retrofitting of WWTP.

Key words: upgrading and reconstruction; MBBR; first level A standard; *Nitrospira*; *Nitrosomonas*

我国城镇污水处理厂已经开启大规模提标改造,出水水质普遍提升至一级 A 甚至准Ⅳ类地表水标准。但我国市政污水存在碳氮比例失衡、进水悬浮物浓度高、水质和水量波动大、冬季出水氨氮不达标及用地紧张等问题。因此容积负荷高、抗冲击且脱氮能力强的移动床生物膜工艺(MBBR)逐渐被接受,成为市政污水处理厂提标提量改造的主要工艺之一。2008年无锡芦村污水处理厂成功进行了MBBR升级改造^[1]。近10年来,国内采用MBBR的市政污水厂处理规模已超过 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,涵盖各类工艺、池型、标准的改造。

采用MBBR法改造多采用“镶嵌”理念,即将MBBR系统嵌入原活性污泥系统中,以强化处理效果。悬浮填料为微生物生长繁殖及性能发挥提供场所,尤其富集专性细菌如硝化、反硝化菌群等。笔者以山西某污水厂MBBR升级改造为例,分析改良 A^2/O -MBBR对城市污水的处理效果,以期为同类型污水厂的升级改造提供技术参考。

1 工程概况及升级改造方案

山西某污水处理厂设计规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水以生活污水为主,同时包含部分工业废水。原采用 A/O 工艺,设计水温为 10°C ,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)二级标准。随着城市的发展,2016年该厂对出水水质进行提标,在设计进水水量不变的情况下,要求出水水质达到一级 A 标准。

原工艺在运行过程中,出水 COD 基本能够达到

一级 A 标准,但处理效果不稳定,受来水水质影响较大,进水中的煤洗废水含有大量难降解有机物,影响 COD 的稳定达标;由于系统未设置缺氧区,对 TN 的去除效果较差,去除率不足 50%,同时氨氮的去除效果亦不稳定。

该污水厂进行一级 A 提标的主要原则和关键问题包括:①原池改造。由于污水厂无扩建用地,只能在原池实现从二级标准向一级 A 标准的提标改造。②强化 TN 去除。由于原工艺为 A/O 除磷工艺,TN 去除率不足 50%,提标后需使 TN 去除率达到 77% 以上。③提高抗冲击性。污水处理厂改造前,存在较频繁的煤洗废水的汇入,虽然当地政府加强了对煤洗废水的排放监管,实现单独处理,但进水水质波动的威胁依然没有完全消除,这就要求改造后的工艺应具有较强的抗冲击能力。④工艺运行简单。升级改造所选工艺应尽量与原工艺相近,保证运行人员能够快速掌握运行方法,提高运行管理水平。

经过对改良 A^2/O 、JSBC、MBBR等工艺性能和特点的分析比较,结合该工程进水水质特点、工艺设施现状及厂地情况,要求尽可能选择占地省、运行稳定、运行管理方便的工艺。鉴于 MBBR 容积负荷高、占地省、可实现同步脱氮除磷、适用于污水处理厂升级改造的立体扩容等特点,最终选用 MBBR 工艺进行升级改造。

改造内容包括:

①重新核定设计进水水质,如表 1 所示。

表1 设计进出水水质

Tab.1 Design water quality of influent and effluent

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
进水	530	150	51	65	4.5	460
出水	≤50	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5	≤10

② 功能区域重构,在原池基础上,重新进行功能区域的划分(如图1所示),将原厌氧区改造为预缺氧区及厌氧区,将原好氧区划分为缺氧区和好氧区,以形成改良 A²/O-MBBR 工艺。

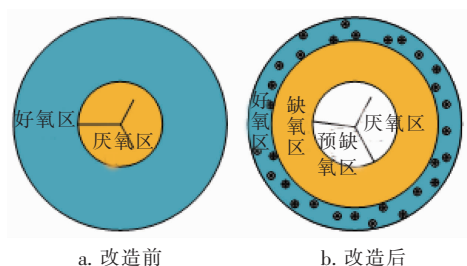


图1 生物池改造前后示意

Fig.1 Schematic of bio-reactor before and after upgrading

③ 分段进水,进水的 10% ~ 30% 进入预缺氧段,另 70% ~ 90% 进入厌氧池。

④ 好氧池全池投加 SPR-2 型悬浮填料,填料直径为(25 ± 0.5) mm,高为(10 ± 1) mm,挂膜后密度与水接近,有效比表面积大于 620 m²/m³,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体》(CJ/T 461—2014)行业标准。

2 系统运行效果分析

2.1 对COD 的去除效果

污水处理厂改造前后的进出水 COD 浓度变化见图2。提标改造前,进水 COD 平均为 448 mg/L,出水 COD 平均为 30 mg/L,平均去除率为 91.6%;改造后进水 COD 平均为 310 mg/L,出水 COD 平均为 19.66 mg/L,平均去除率为 93.1%,出水水质稳定达到一级 A 标准。

改造前由于存在煤洗废水汇入,虽然好氧池一直维持着较高的活性污泥浓度(6 000 mg/L),但出水 COD 浓度依然较高,并且波动幅度较大,处理效果极不稳定。经 MBBR 改造后,虽然好氧段 HRT 有大幅度的缩短,但系统对 COD 的去除效果得以进一步强化。对 COD 去除效果的增强,分析原因可能与增设缺氧区有关。主体工艺的厌氧、缺氧和好氧环境交替及填料表面的厌氧、缺氧和好氧微环境可以

通过共代谢作用促进 COD 的降解以及多环或杂环化合物、卤代烃等难降解有机物的去除^[2]。

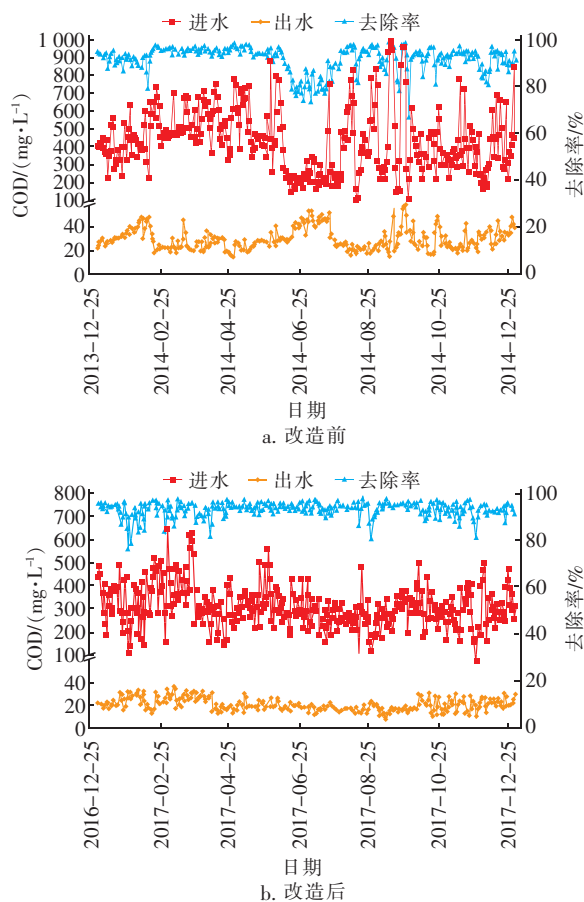


图2 生物池改造前后对 COD 的去除效果

Fig.2 COD removal efficiency of bio-reactor before and after upgrading

2.2 对NH₃-N 的去除效果

提标改造前,进水 NH₃-N 平均为 39.58 mg/L,出水 NH₃-N 平均为 4.83 mg/L,平均去除率为 87.8%;经改造后,进水 NH₃-N 平均为 40.21 mg/L,出水 NH₃-N 平均为 0.87 mg/L,且稳定小于 1.5 mg/L,平均去除率为 97.9%。出水水质稳定达到一级 A 标准,甚至能够达到准IV类水标准。

改造前对氨氮的去除效果并不稳定,尤其是冬季,波动较大,且当发生进水氨氮冲击时,出水氨氮浓度会随之提高,系统抗冲击能力较差。提标改造后,为了兼顾脱氮除磷,将好氧池进行分割,大幅度削减了好氧池容,但通过在好氧池投加悬浮填料,利用悬浮填料固定并富集优势硝化细菌,保证硝化细菌可以较好地持留在填料上,进而强化硝化性能,且填料表面存在多层水流可以维持微观温度,保证了

低温下污泥活性较低时填料可以发挥所需要的硝化功能。填料对特定菌种的长期筛选和驯化使得即使在冬季低温($8 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,出水氨氮浓度也一直稳定低于一级A标准。

有研究表明^[3],当温度小于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时硝化速率明显下降,硝化细菌的活性也大幅度降低;当温度低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硝化细菌的生命活动几乎停止。硝化作用会受到温度的严重影响,尤其是温度冲击的影响更加明显。为了进一步确定低温条件下悬浮填料的作用,进行了低温($6 \sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的硝化速率小试。当采用活性污泥法、MLSS在 $4\,000\text{ mg/L}$ 时,在 3 h 后可以将氨氮从 61 mg/L 降低到 54 mg/L ,在 6 h 后降低至 45 mg/L ,硝化负荷仅为 $0.064\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;而单纯的MBBR工艺(填充率为 50% 左右), 3 h 就可将氨氮从 62 mg/L 降低至 37 mg/L , 6 h 后可降低至 25 mg/L ,硝化负荷高达 $0.202\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,是活性污泥的 3.15 倍。邵曙海等^[4]采用MBBR工艺处理生活污水,在温度低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硝化负荷可达 $0.4\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。顾升波等^[5]在 $13.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时采用A/O-MBBR工艺处理生活污水,获得了更高的硝化负荷。内蒙古某污水厂,在超低温($4 \sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下可实现氨氮的稳定达标,硝化负荷高达 $0.15 \sim 0.20\text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。众多研究及实践均表明了悬浮填料富集硝化细菌对低温的耐受性以及较强的处理能力。

2.3 对TN的去除效果

提标改造前,进水TN平均为 54.59 mg/L ,出水TN平均为 17.98 mg/L ,平均去除率为 66.3% ;提标改造后,进水TN平均为 50.58 mg/L ,出水TN平均为 11.37 mg/L ,平均去除率为 76.8% ,可稳定达到一级A标准(见图3)。

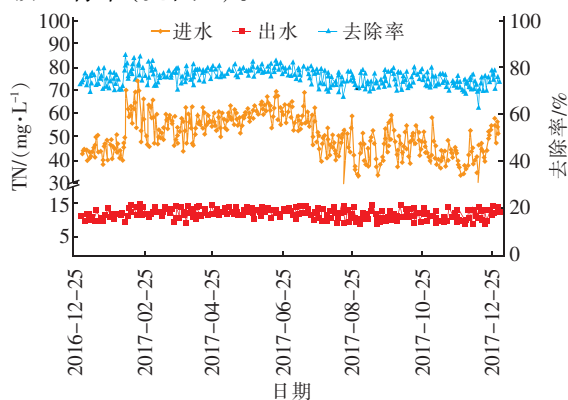


图3 改造后生物池对TN的去除效果

Fig.3 TN removal efficiency of bio-reactor after upgrading

虽然进水COD较高,但由于煤洗废水的汇入, BOD_5 占比较低,仅为COD的 $0.2 \sim 0.3$, BOD_5/TN 仅为 $2.43 \sim 3.66$,此时TN的去除更多地受限于进水碳源不足,去除率随进水COD同步变化。经改造后,根据进水浓度,需外投碳源去除 6 mg/L 的TN,设计乙酸钠投加量为 50 mg/L 。实际运行中,按设计值的 50% 投加碳源,实现了TN的稳定达标。分析原因,一方面好氧池末端的脱气区降低了回流硝化液中的溶解氧,减轻了碳源消耗,且维持了缺氧区的缺氧环境,保证了反硝化作用的进行^[6];另一方面,在好氧区观测到了显著的TN去除,一般去除 $3 \sim 6\text{ mg/L}$ 的TN。悬浮填料上存在特定的生物膜分层结构,外层为好氧区,内层为缺氧区,故生物膜上会发生同步硝化反硝化(SND)过程,强化了对TN的去除^[7]。

2.4 对TP的去除效果

提标改造前,AOC工艺的厌氧区 and 好氧区分别用于释磷和过度吸磷,进水TP平均为 3.72 mg/L ,出水TP平均为 0.52 mg/L ,平均去除率为 86.0% ;提标改造后,进水TP平均为 3.61 mg/L ,出水TP平均为 0.24 mg/L ,平均去除率为 93.3% ,出水稳定达到一级A标准(如图4所示)。

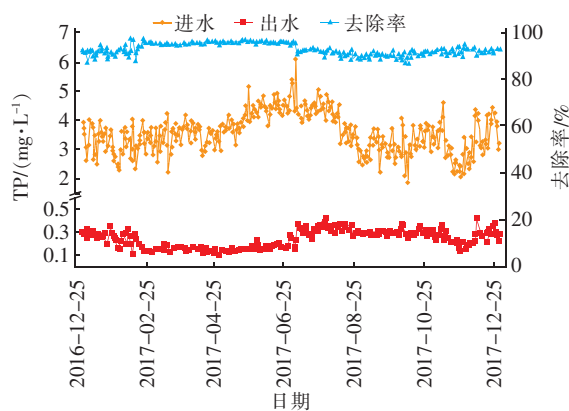


图4 改造后生物池对TP的去除效果

Fig.4 TP removal efficiency of bio-reactor after upgrading

在提标改造后,一方面,将厌氧区分割出一部分作为预缺氧区,对部分进水及回流污泥中的硝酸盐氮进行反硝化,不仅减少了反硝化菌对VFA的竞争,而且保证了厌氧区的厌氧条件,促进了TP的去除^[8]。厌氧段的TP浓度高达 10.8 mg/L ,是进水TP的近3倍,充分的厌氧释磷为生物除磷奠定了良好基础。另一方面,由于悬浮填料可以富集并固定泥龄较长的硝化细菌,通过MBBR的泥龄分置功能

保证了系统以短泥龄运行,强化排泥保证除磷效果,仅生化出水便可达标,大大地减轻了后续高效沉淀池除磷的负担。

3 改造前后能耗分析

污水厂生化系统经过改造后,能耗未见明显增加。改造前,出水水质执行二级标准,运行平均能耗为 $0.375\ 2\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;改造后,出水水质执行一级 A 标准,运行平均能耗为 $0.380\ 8\ \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。虽然系统需要兼顾脱氮除磷,增设了预缺氧区及缺氧区,增加了推流器,且高效沉淀池深度处理单元需要搅拌,也增加了电耗,但最终能耗变化不大,且出水水质得到了提高。

4 MBBR 工艺中细菌种类及数量分析

在实际工程中悬浮填料表现出高效的硝化能力和 SND 现象,为了进一步研究相关性能,从微观角度出发,于 2017 年 12 月底对该污水处理厂 A 组池子好氧池末端污泥及填料进行高通量测序。取样时,测得系统内污泥浓度为 $5.23\ \text{g/L}$, $\text{VSS}/\text{SS} = 0.45$,悬浮载体上的污泥量为 $12.6\ \text{g}/\text{m}^2$, $\text{VSS}/\text{SS} = 0.86$ 。系统内好氧区悬浮态生物总量为 $3.8 \times 10^7\ \text{g}$,附着态生物总量为 $2.8 \times 10^7\ \text{g}$ 。

从多样性指数分析结果可知(见表 2),尽管系统内悬浮态生物总量是附着态的 1.36 倍,但填料仍然表现出较高的生物多样性。共鉴别出 295 个菌属(舍去序列数 $<0.01\%$ 的菌属),污泥中有 213 个菌属,填料中有 233 个菌属,且填料中独占菌属为 82 个,大大增加了系统的生物多样性。主要原因在于,悬浮载体的污泥龄更长,一般在 30 d 左右,为微生物的进化提供了空间和时间。

表 2 污泥和填料的多样性指数

Tab. 2 Diversity index of sludge and filler

项目	序列数	Shannon 指数	Chao1 指数	Coverage 指数	Simpson 指数
污泥	35 347	7.16	78 601	0.79	0.003 6
填料	47 941	7.14	74 959	0.83	0.004 6

系统内的优势菌群,包括 GP10、GP6、GP4、*Nitrosomonas*、*Nitrospira* 等。GP10、GP6、GP4 属酸杆菌门,检测出的几乎全部来自于填料(见图 5),说明其更适合附着态生长,但对于这些菌群的研究较少,其功能需进一步探索。*Nitrosomonas* 是主要的 AOB 菌属,填料和污泥上的占比分别为 5.16% 和 0.8%;*Nitrospira* 是主要的 NOB 菌属,填料和污泥上的占比

分别为 6.54% 和 1.52%。*Nitrospira* 更容易以附着态形式存在,污泥中发现的推测是生物膜脱落后,对污泥进行了接种,使之在污泥中也能够维持一定的比例。同时,研究发现 *Nitrospira* 兼具 AOB 和 NOB 功能,适宜生存在低氨氮环境中,可以作为出水水质较好和稳定的指示性微生物^[9~11]。填料和污泥中硝化菌群总占比分别为 11.7% 和 2.3%。

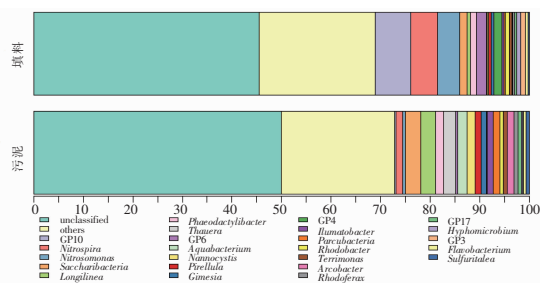


图 5 活性污泥及悬浮填料生物膜菌群分析

Fig. 5 Analysis of bacteria in activated sludge and suspended carrier biofilm

填料上的主要反硝化菌种包括 *Rhodobacter*、*Hyphomicrobium*、*Terrimonas*、*Flavobacterium*, 占比分别为 0.85%、0.81%、0.55%、0.54%,反硝化菌总占比为 5.89%;污泥中的主要反硝化菌种包括 *Thauera*、*Aquabacterium*、*Arcobacter*, 占比分别为 2.45%、1.89%、1.25%,反硝化菌总占比为 12.5%。填料上反硝化菌的存在,为 SND 现象提供了微观证据。

结合高通量测序及生物量测定,分析冬季低温时,系统的硝化贡献率,填料约 79%,污泥约 21%,MBBR 在维持系统硝化稳定方面起到了重要作用。

5 结论

① 采用 MBBR 工艺提标改造后,出水 COD、氨氮、TN 和 TP 浓度分别为 19.66、0.87、11.37 和 0.24 mg/L,均稳定达到一级 A 标准,且部分指标可达到准 IV 类水标准。

② 经 MBBR 改造后,能耗未见明显增加;合理的工艺布局及好氧区 SND 的出现,使得碳源投加量仅为设计值的一半,实现了节能降耗。

③ 加入悬浮填料后形成了泥膜复合工艺,优化了系统的菌落分布,增加了系统内菌群的多样性;悬浮填料对硝化菌群富集具有重要作用,填料对硝化的贡献率达到 79%;悬浮载体上存在的反硝化菌群,为进行 SND 提供了微观保障,有效降低了碳源

投加量,提高了 TN 去除效率。

④ MBBR 工艺可实现原工艺、原池的镶嵌式改造,且处理效果稳定,适合于污水厂一级 A 提标及提量改造。

参考文献:

- [1] 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).
- [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] Mauret M, Paulion E, Peutch-Costes E, *et al.* Application of experimental research methodology to the study of nitrification in mixed culture[J]. Water Sci Technol, 1996, 34(1/2):245-252.
- [4] 邵曙海,崔崇威,张爱,等. 低温下两段式 MBBR 处理城市污水的中试研究[J]. 中国给水排水,2008,24(9):93-96.
Shao Shuhai, Cui Chongwei, Zhang Ai, *et al.* Pilot-scale research on treatment of municipal wastewater by two-stage MBBR at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(9): 93-96 (in Chinese).
- [5] 顾升波,李振川,李艺. A/O-MBBR 组合工艺和 A/O 工艺处理市政污水的影响因素研究[J]. 给水排水,2017,43(2):49-55.
Gu Shengbo, Li Zhenchuan, Li Yi. Study on influencing factors on the performance of A/O-MBBR and A/O processes in municipal wastewater treatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2): 49-55 (in Chinese).
- [6] 韩萍,许斌,宋美芹,等. 团岛污水厂 MBBR 工艺的升级改造及运行效果[J]. 中国给水排水,2014,30(12):110-114.
Han Ping, Xu Bin, Song Meiqin, *et al.* Design features and operational effect of Tuandao WWTP upgrading by MBBR in Qingdao[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12): 110-114 (in Chinese).
- [7] 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. Realization of simultaneous nitrification and denitrification using aerobic granular sludge[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(2): 26-28 (in Chinese).
- [8] Abzazou T, Araujo R M, Auset M, *et al.* Tracking and quantification of nitrifying bacteria in biofilm and mixed liquor of a partial nitrification MBBR pilot plant using fluorescence in situ hybridization[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541:1115-1123.
- [9] van Kessel M, Speth D R, Albertsen M, *et al.* Complete nitrification by a single microorganism[J]. Nature, 2015, 528:555-559.
- [10] Holger D, Lebedeva E V, Petra P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. Nature, 2015, 528:504-509.
- [11] Bartosch S, Wolgast I, Spieck E, *et al.* Identification of nitrite-oxidizing bacteria with monoclonal antibodies recognizing the nitrite oxidoreductase[J]. Appl Environ Microbiol, 1999, 65(9):4126-4133.



作者简介:吴迪(1985-),男,黑龙江伊春人,博士,高级工程师,主要从事水环境恢复理论与技术研究以及自养脱氮、MBBR 工艺研发等。

E-mail: hitwudi@126.com

收稿日期:2018-06-01