

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.002

# MBBR 工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果

刘 强<sup>1</sup>, 王 泰<sup>1</sup>, 沈 淳<sup>1</sup>, 孙庆花<sup>2</sup>, 周家中<sup>2</sup>, 吴 迪<sup>2</sup>, 门艳辉<sup>2</sup>

(1. 天津滨海新区环塘污水处理有限公司, 天津 300270; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 天津市某污水处理厂进行提标改造,出水水质要求达到天津市《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)的 A 类标准,核心生化段采用移动床生物膜反应器(MBBR)工艺进行原位改造,将 AAO 工艺改为 Bardenpho 工艺,增设后缺氧区,增强生化系统的脱氮作用,好氧区投加悬浮载体,保障氨氮的稳定达标;深度处理工艺采用气浮、两级臭氧氧化、曝气活性炭滤池以及 V 型滤池,保障 TP、SS、COD 稳定达标。实际运行效果显示,在冬季 9~11℃ 的低温条件下,污水厂出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN、TP、SS 平均值分别为 24.52、0.88、0.29、6.82、0.08、2.32 mg/L,稳定达到了提标改造目标。生化段沿程检测结果显示,在低温条件下,优势突出,硝化速率是活性污泥的 10 倍,几乎承担了全部硝化作用,Bardenpho 工艺的设计破除了回流比对 TN 去除的限制,后置缺氧区的 TN 去除率为 24.76%,强化了 TN 的去除,生化段出水氮素稳定达标。高通量测序结果显示,系统内主要的硝化菌属为 *Nitrospira*,在 MBBR 区悬浮载体上的相对丰度达到 13.14%,而在活性污泥中仅为 0.68%。采用 MBBR 工艺对生化段进行原位改造,能够有效提高系统的硝化能力,是应对冬季低温、确保出水水质达标的有效措施。

**关键词:** 移动床生物膜反应器; Bardenpho 工艺; 低温; 高通量测序; 提标改造

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0007-07

## Operation Effect of MBBR Applied in Upgrading and Reconstruction of a Wastewater Treatment Plant in Tianjin at Low Temperature

LIU Qiang<sup>1</sup>, WANG Tai<sup>1</sup>, SHEN Bo<sup>1</sup>, SUN Qing-hua<sup>2</sup>, ZHOU Jia-zhong<sup>2</sup>, WU Di<sup>2</sup>, MEN Yan-hui<sup>2</sup>

(1. Tianjin Binhai New Area Huantang Sewage Treatment Co. Ltd., Tianjin 300270, China;

2. Qingdao Spring Water-treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant (WWTP) in Tianjin was upgraded, and the effluent quality was required to meet the level A criteria specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB 12/599 - 2015) in Tianjin City. The biochemical unit was reconstructed in situ by applying moving bed biofilm reactor (MBBR) technology, in which the AAO process was changed into Bardenpho process. An additional anoxic zone was added to enhance the nitrogen removal efficiency of the biochemical system, and suspended carriers were added to the aerobic zone to ensure the ammonia nitrogen always meeting the standard. Advanced treatment technologies

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106005); 青岛市民生科技计划项目(18-6-1-100-nsh)

通信作者: 吴迪 E-mail: wudi@qdspr.com

including air flotation, two-stage ozonation, aerated activated carbon filter and V-type filter were adopted to ensure the TP, SS and COD always meeting the standard. At low temperature of 9 – 11 °C in winter, COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub> – N, TN, TP and SS in the effluent of the WWTP were 24.52 mg/L, 0.88 mg/L, 0.29 mg/L, 6.82 mg/L, 0.08 mg/L and 2.32 mg/L, respectively, which steadily achieved the upgrading target. The suspended carrier had a good performance at low temperature, and the nitrification rate was 10 times that of the activated sludge, indicating that almost all the nitrification was completed by the suspended carrier. The design of Bardenpho process relieved the restriction of reflux ratio to TN removal, and the TN removal efficiency in the post-anaerobic zone was 24.76%, indicating that the TN removal was enhanced and nitrogen in the effluent of the biochemical section reached the standard stably. The main nitrifying bacteria in the system were *Nitrospira*, which had a relative abundance of 13.14% on the suspended carrier in MBBR, but only 0.68% in activated sludge. The in-situ reconstruction of the biochemical section by MBBR process could effectively improve the nitrification capacity of the system, which was an effective measure to cope with low temperature in winter and ensure the effluent quality to meet the standard.

**Key words:** MBBR; Bardenpho process; low temperature; high-throughput sequencing; upgrading and reconstruction

生化工艺是整个污水处理厂的核心工艺,担负着去除绝大多数污染物的任务,而冬季低温将严重影响以生化法为主的污水厂的处理效率,是导致污水厂出水水质不达标的重要原因。有研究表明,低温对活性污泥的沉降性能<sup>[1]</sup>、生物酶活性<sup>[2]</sup>和微生物细胞膜的流动性<sup>[3]</sup>等都有严重影响,进而降低了对污水的处理效率。随着污水处理厂出水水质标准的不断提高,尤其是国家对污水厂出水水质实时达标的严格要求,低温影响的问题亟待解决。在我国北方大部分地区,冬季污水温度低(<6 °C)且持续时间较长,因此急需一种能在低温条件下稳定运行且具有较高处理效率的工艺来实现污水厂出水水质的稳定达标。

移动床生物膜反应器(MBBR)工艺是一种用于污水厂生化段的原位强化技术,通过向反应器内投加悬浮载体为微生物的附着提供场所,其微生物学本质是生物膜,水力学特征是流化床,通过流化实现了微生物的高效附着和动态更新,从而保障了对污染物尤其是对氨氮良好的去除效果。悬浮载体生物膜作为长泥龄菌,在流化的过程中也会对菌种进行筛选,从而使生物膜适应环境,因而在特殊水质环境如高盐、低温等<sup>[4]</sup>条件下也能呈现出良好的处理效果。笔者以天津市某污水处理厂为例,分析了MBBR工艺在低温条件下的运行效果,以期为北方低温地区的污水处理厂提标改造提供技术参考。

## 1 工程概况

天津某市政污水处理厂的设计规模为12 500 m<sup>3</sup>/d,2017年进行提标改造,改造后要求出水水质达到天津市《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 12/599—2015)的A类标准。改造难点包括:①出水水质标准高,尤其是在氮类指标上,出水氨氮要求达到1.5 mg/L以下,出水TN要求在10 mg/L以下;②冬季温度低且持续时间长;③进水含一定量的难降解有机物。经过多方案比选,最终确定采用MBBR工艺对生化段进行原位升级改造,保障氨氮、TN和BOD<sub>5</sub>达标;新增三级深度处理工艺,包括高级氧化、滤池、吸附等工艺,保障COD、TP和SS稳定达标。污水厂的工艺流程见图1。

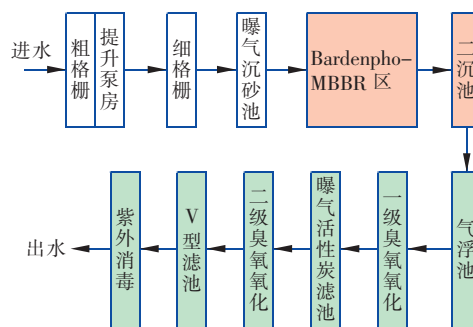


图1 污水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process in WWTP

该污水厂设计C/N值仅为2.5,实际进水C/N

值不足 1,碳源严重不足。而出水 TN 浓度要求严格,需要达到 10 mg/L 以下,此时 TN 去除率需要达到 84%,如果以 AAO 工艺运行,总回流比需要达到 520% 以上,能耗较大,此外如此大的回流势必携带更多的溶解氧,又会造成碳源的极大浪费。鉴于此,根据进出水水质分析,在工艺上,将原 AAO 工艺改为 Bardenpho 工艺,将原好氧区缩减一部分池容改造成后缺氧区和后好氧区,好氧区硝化池容不足的部分通过投加悬浮载体予以强化,最终实现了生化段的原位改造。通过增加后置缺氧区,使 TN 的去除不再受回流比的限制,实现了 TN 的强化去除,并且降低了回流能耗和碳源药剂的损耗。改造后生化段进水依次经过厌氧区→缺氧区→好氧区→后缺氧区→后好氧区,进水也由单点进水改为多点进水,以充分利用原水碳源。生化段设计停留时间为 18 h。好氧区所用悬浮载体为 SPR-Ⅲ型,直径为 25 mm,高度为 10 mm,有效比表面积 $\geq 800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,材质为高密度聚乙烯纯料,填充率为 55%,悬浮载体符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准要求,挂膜前其相对密度略小于水(0.94~0.97),挂膜后相对密度与水接近(1.000~1.003)。另外,针对难降解 COD 和 TP 的问题,强化了三级处理,即采用气浮、V 型滤池强化化学除磷,采用两级臭氧氧化以及曝气活性炭滤池组合工艺强化去除难降解有机物。

改造后,设计进水  $\text{BOD}_5$ 、COD、 $\text{NH}_3-\text{N}$ 、TN、TP、SS 浓度分别为 150、420、54、62、5、300 mg/L,相应的设计出水浓度分别为 6、30、1.5(3)、10、0.3、5 mg/L,生化段设计出水  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_3-\text{N}$ 、TN 浓度分别为 6、1.5(3)、10 mg/L,设计水温为 10~12℃。

## 2 试验方法

### 2.1 沿程分析试验

为了解生化段各功能区对氮、磷的去除效果,对沿程断面进行了监测分析,包括生化池进水、缺氧区出水、好氧 MBBR 区出水、后缺氧区出水和后好氧区出水。为防止测定误差,每间隔 3 h 取样一次,共取 3 次,混合后测定氨氮、TN 和 TP 等指标。

### 2.2 硝化速率测定试验

为了解低温条件下悬浮载体和污泥的硝化速率,模拟实际生化段工艺分别进行了纯膜、污泥和泥膜复合系统的硝化速率测定试验。试验用水为生化池缺氧区出水经沉淀后的上清液。纯膜系统仅投加

MBBR 区的悬浮载体,填充率为 30%;污泥系统不投加悬浮载体,污泥浓度为 3.5 g/L;泥膜复合系统内,污泥浓度为 3.5 g/L,同时投加 MBBR 区的悬浮载体,填充率为 30%。小试在室外进行,不控制系统温度,DO 浓度在 4.0~6.5 mg/L,模拟好氧 MBBR 区实际停留时间共进行 4 h 试验,试验期间定时取样并测定氨氮浓度。

### 2.3 检测项目与方法

常规指标采用国标方法测定,温度和 DO 浓度采用 WTW Multi-3430i 多参数水质分析仪测定。

高通量测序:采用试剂盒提取微生物基因组 DNA,通过 1% 琼脂糖凝胶电泳检测抽提基因组的完整性,利用 Qubit3.0 DNA 试剂盒检测基因组 DNA 浓度。PCR 扩增所用引物为 341F/805R。对 PCR 产物进行琼脂糖电泳,通过 DNA 胶回收试剂盒对 PCR 产物进行回收,利用 Qubit3.0 DNA 检测试剂盒对回收的 DNA 精确定量,按照 1:1 等量混合后测序,等量混合时,每个样品 DNA 量取 10 ng,最终上机测序量为 20 pmol,通过 Illumina MiSeq 测序平台完成对样品的高通量测序。采用 UPARSE 软件根据 97% 的相似度进行 OTU 聚类;使用 UCHIME 软件剔除嵌合体。利用 RDPclassifier 对每条序列进行物种分类注释,比对 Silva 数据库,设置比对阈值为 70%。

## 3 结果与讨论

本研究考察了 2018 年 12 月—2019 年 2 月整个冬季的运行情况,分析了该污水厂在冬季低温期的运行效果,此段时间内生化池实际温度为 9~11℃。

### 3.1 系统对 TN 和氨氮的去除效果

系统对 TN 和氨氮的去除效果如图 2 所示。生化段进水 TN 和氨氮均值分别为 36.30 和 25.60 mg/L,进水水质波动较大,有机氮浓度较高。经过 MBBR 改造后,系统出水 TN 和氨氮均值分别为 6.82 和 0.29 mg/L,去除率分别达到 81.21% 和 98.90%。生化段即可保障污水厂在冬季低温运行条件下的出水氮指标稳定达标,并且不受水质冲击影响,可见 MBBR—活性污泥复合工艺对水质冲击具有较强的抵抗力。

提标改造时为了满足脱氮需求,将好氧池原池进行了分割,大幅度削减了好氧池池容,降低了好氧区的 HRT,仅为 6.51 h。但通过向好氧区内投加悬浮载体,利用悬浮载体的菌种固定化技术以及对长



泥龄菌的高效富集作用,保证了硝化菌在悬浮载体上的持留,长泥龄的特性也能够使悬浮载体驯化出适应于特定环境的功能微生物,使 MBBR 工艺耐低温以及适应其他复杂环境的能力更强,保障了在恶劣条件下氨氮也能稳定达标。通过切割好氧池池容增加后缺氧区,破除了回流比对 TN 去除的限制,实际控制内回流比仅为 150%,好氧 MBBR 出水进入后缺氧区,通过碳源的补足实现了 TN 的二次去除,保障了 TN 的稳定达标。

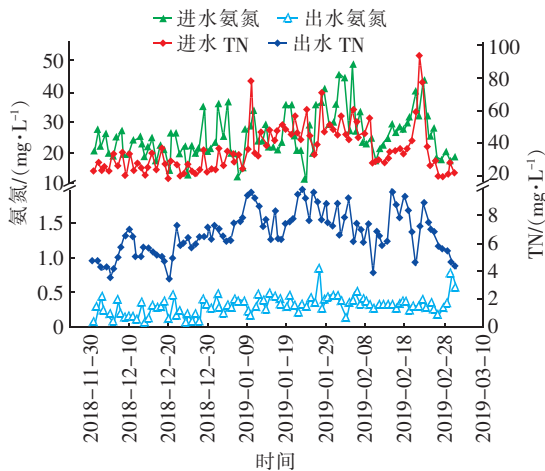
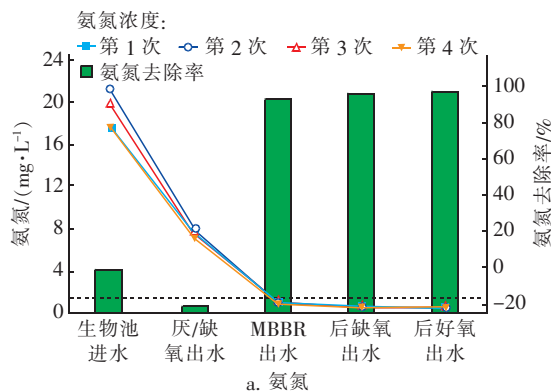


图2 系统对 TN 和氨氮的去除效果

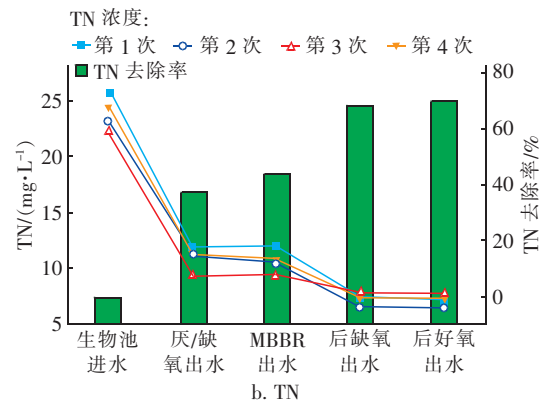
Fig. 2 Removal effect of TN and  $\text{NH}_3\text{-N}$  by the system

### 3.1.1 生化段沿程氮浓度的变化

为进一步研究生化段对氮素的去除过程,对整个生化段沿程断面氮素浓度进行了多次测定,系统的总回流比为 230%,氨氮和 TN 的测定结果如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,几乎所有的氨氮均在 MBBR 区内去除,MBBR 区出水氨氮可以稳定保持在 1 mg/L。该污水厂好氧 MBBR 区实际的硝化负荷达到了  $0.142 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,远高于活性污泥法,有力保障了低温条件下氨氮的稳定达标。



a. 氨氮



b. TN

图3 生化段 TN 和氨氮浓度沿程变化

Fig. 3 Change of TN and  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentrations along biochemical treatment process

从图 3(b)可以看出,前厌/缺氧区的 TN 去除率约为 37.6%,远低于理论去除率(69%),主要限制因素在于碳源,实际进水 C/N 值  $< 1$ ,通过补充一定量的碳源,保障前厌/缺氧区对 TN 的去除。后缺氧区去除了 24.76% 的 TN,由于后缺氧段的设置,并继续补充碳源,使得 TN 的去除不再受回流比的限制,进一步强化 TN 的去除。值得注意的是,在好氧 MBBR 区也有约 1.5 mg/L 的 TN 被去除, TN 去除率为 6.30%,好氧区中 TN 的去除主要通过同步硝化反硝化过程(SND),由于生物膜典型的分层分布状态,为反硝化菌和硝化菌的同时附着提供了条件,保障了 SND 的发生。其他采用 MBBR 工艺的污水厂<sup>[5-6]</sup>也发现了稳定的 SND 过程,不仅强化了 TN 的去除,而且大大节约了碳源投加费用。通过厌氧区的反硝化过程和好氧 MBBR 区的 SND 过程,最终使生化段的 TN 去除率达到了近 70%,保障了出水 TN  $< 10 \text{ mg/L}$ 。

### 3.1.2 悬浮载体和活性污泥的硝化性能

为了进一步探究低温下污泥和悬浮载体的硝化性能,取好氧 MBBR 区悬浮载体和污泥分别进行纯膜、污泥和泥膜复合系统的硝化速率测试,整个反应在冬季室外进行,试验过程中温度呈降低趋势,范围在  $2 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,结果见图 4。可以看出,对氨氮的去除效果:泥膜系统  $\approx$  纯膜系统  $>$  污泥系统,其中污泥几乎没有硝化效果,经过 3 h 曝气,氨氮仅降低 0.70 mg/L,而纯膜和泥膜复合系统在 3 h 内氨氮均降低至 1 mg/L 以下,硝化速率约为  $0.07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,而且随着温度的降低,硝化速率基本不变。在纯膜系统的基础上投加活性污泥形成泥膜复合工艺,并

没有强化硝化过程,由此可见,在低温下活性污泥基本未发挥硝化作用。纯膜系统的硝化速率是污泥系统的 10 倍,悬浮载体在低温下几乎承担了全部氨氮的去除。

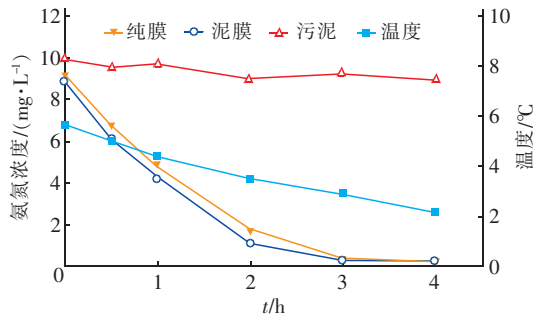


图 4 硝化性能测试结果

Fig. 4 Results of nitrification performance test

### 3.2 系统对有机物的去除效果

系统对 COD 及 BOD<sub>5</sub> 的去除效果如图 5 所示。

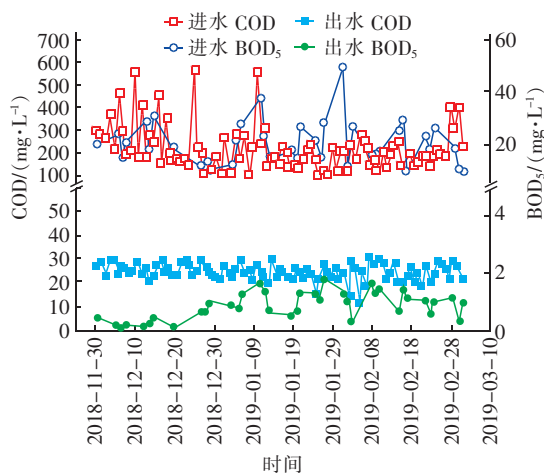


图 5 系统对 COD 及 BOD<sub>5</sub> 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of COD and BOD<sub>5</sub> by the system

生化段进水 COD 和 BOD<sub>5</sub> 波动较大,平均值分别为 216.79 和 20.50 mg/L,系统出水平均值分别为 24.52 和 0.88 mg/L,去除率分别达到 88.69% 和 95.71%,稳定达到排放标准要求。BOD<sub>5</sub> 为可被微生物利用的有机物,该污水厂进水 C/N 值极低,故 BOD<sub>5</sub> 达标不是难题,对于有机物的去除核心在于 COD。由于该污水厂上游有工业废水流入,所以存在较多的难降解有机物,经过 MBBR 改造后,增加了缺氧区的总停留时间,虽然在一定程度上促进了难降解有机物的利用,但是难以保障出水 COD 达到 30 mg/L 以下的标准。经过后续深度处理工艺段后,有效保障了出水 COD 的稳定达标,最优可使

COD 降至 10 mg/L 以下。

### 3.3 系统对 TP 和 SS 的去除效果

系统对 TP 和 SS 的去除效果如图 6 所示。系统进水 TP 均值为 3.71 mg/L,出水均值为 0.08 mg/L,去除率达到 97.89%。系统进水 SS 均值为 157.25 mg/L,出水均值为 2.32 mg/L,去除率达到 98.52%。生化段出水 TP 浓度在 1.22 mg/L 左右,即生化段对 TP 的去除率约为 67.12%。好氧区 MBBR 工艺实现了长泥龄硝化菌群的固定与富集,从而实现了短泥龄的聚磷菌和长泥龄的硝化菌之间的泥龄分置,使生物除磷得以强化,减轻了后续深度处理工艺的负荷。最终通过深度处理单元的气浮和 V 型滤池,保障了出水 TP 稳定达标。

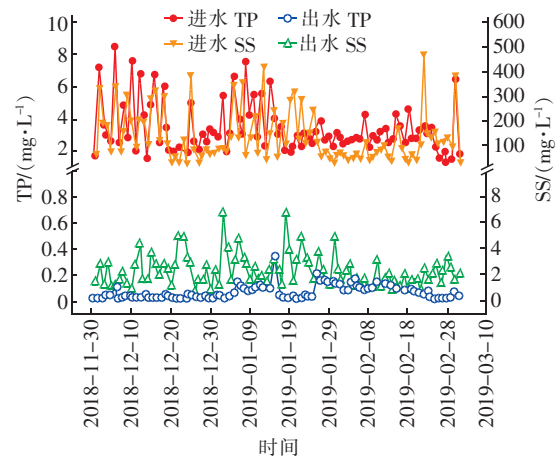


图 6 系统对 TP 和 SS 的去除效果

Fig. 6 Removal effect of TP and SS by the system

### 3.4 MBBR 系统内的菌群结构

分别取好氧 MBBR 区的挂膜悬浮载体和系统内的活性污泥进行微生物高通量分类测序,优势微生物属水平组成如图 7 所示。

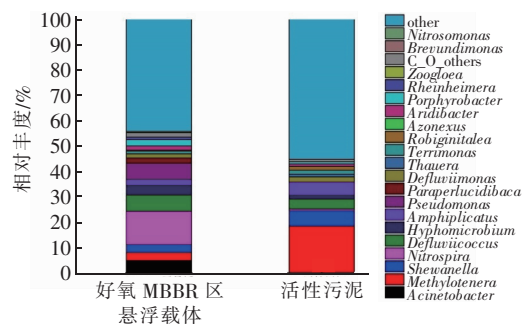


图 7 属水平上微生物菌群的相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of microbial community at genus level

系统中的优势硝化菌群为硝化螺旋菌属

*Nitrospira*,在悬浮载体和污泥中的相对丰度分别为13.14%和0.68%,这也从微生物层面证明了低温条件下好氧 MBBR 区的悬浮载体在系统中承担主要的硝化作用。该菌属兼具 AOB 和 NOB 功能,相比其他硝化细菌具有一定的独特优势,其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<sup>[7-8]</sup>,因此 *Nitrospira* 通常出现在氨氮浓度相对较低的情况下,并且其作为优势种属也反映了污水厂处理效果较为良好。

对悬浮载体生物膜和活性污泥进行了生物量测定,两者的 MLSS 分别为 14.21 g/m<sup>2</sup>、4.60 g/L, MLVSS 分别为 12.79 g/m<sup>2</sup>、2.67 g/L。结合对悬浮载体生物膜和活性污泥中硝化细菌丰度的核算结果,确定系统中超过 95% 的硝化过程来自悬浮载体生物膜,显示了悬浮载体对硝化反应的极大贡献。由于低温抑制,即使高通量测序结果显示污泥中硝化细菌量仍然较多,但是活性不被表达。

分析发现系统中与反硝化作用有关的主要菌属包括: *Acinetobacter*、*Shewanella*、*Hyphomicrobium*、*Pseudomonas*、*Thauera*、*Terrimonas*、*Zoogloea* 等,在悬浮载体和污泥中的综合相对丰度分别为 14.26% 和 7%,悬浮载体上硝化菌和反硝化菌的同时大量附着,也为好氧区 SND 的发生提供了微观保障。不动杆菌属 *Acinetobacter* 在悬浮载体和污泥中的相对丰度分别为 4.81% 和 0.01%,据研究,该菌属同时具有脱氮除磷功能<sup>[9]</sup>。*Hyphomicrobium* 属在悬浮载体和污泥中的相对丰度分别为 3.79% 和 1.56%,其能够在好氧条件下进行反硝化作用,田海龙在采用 MABR 工艺处理生活污水的研究中发现了该菌属的广泛存在,证实了关于生物膜在溶解氧充足环境中出现的好氧反硝化现象<sup>[10]</sup>;另外,该菌属具有多种代谢能力,例如降解二氯甲烷、甲胺磷、二甲基硫醚、甲醇和非等<sup>[11]</sup>。*Zoogloea* 是兼性好氧细菌,在有氧条件下,能够利用氧气作为电子受体,而在无氧环境下,它同样能够利用硝酸盐作为电子受体进行生长繁殖<sup>[12]</sup>;而且, *Zoogloea* 与菌胶团的形成有密切关系,可能会促进系统实现同步硝化反硝化作用<sup>[13]</sup>。

### 3.5 经济指标分析

占地:该污水厂受三级处理流程影响,占地较大,核算预留占地和远期规划进水,整个污水厂单位占地为 1.45 m<sup>2</sup> · d/m<sup>3</sup>,其中,生化池的单位占地为 0.141 m<sup>2</sup> · d/m<sup>3</sup>。

药剂费:该污水厂进水 C/N 值较低,补充碳源进行反硝化,实际投加 18% 的乙酸钠溶液 12 ~ 15 t/d,前后缺氧区投加比例为 6 : 4。深度处理中投加 10% 的聚合氯化铝(PAC)溶液 1 ~ 2 t/d。

电耗:该污水厂实际运行电耗为 1 kW · h/m<sup>3</sup>,电耗偏高,一方面是有 4 台污水提升泵在运行,此外,三级处理流程长,工艺复杂,也会增加电耗。

## 4 结论

① 天津某污水厂进行提标改造,生化段采用 MBBR 工艺进行原位改造,将 AAO 工艺改为 Bardenpho 工艺,深度处理采用“气浮 + 臭氧氧化 + 曝气活性炭滤池 + 臭氧氧化 + V 型滤池”组合工艺,实际运行效果显示,在冬季 9 ~ 11 °C 的低温条件下,污水厂出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN、TP、SS 平均值分别为 24.52、0.88、0.29、6.82、0.08、2.32 mg/L,稳定达到了天津市地方标准的 A 类标准。

② 生化段沿程检测结果表明,几乎全部的氨氮均在好氧 MBBR 区被去除,通过 Bardenpho 工艺设置,后缺氧区的 TN 去除率约为 24.76%,强化了 TN 的去除,生化段出水氮素稳定达标;硝化试验结果表明,在 2 ~ 6 °C 的低温条件下,活性污泥的硝化性能消失殆尽,悬浮载体的硝化速率是活性污泥的 10 倍,确保了低温下氨氮的稳定达标。

③ 高通量测序结果显示,系统内主要的硝化菌属为 *Nitrospira*,在悬浮载体上的相对丰度达到 13.14%,远高于活性污泥中的 0.68%,表明悬浮载体对硝化菌种有着良好的富集效果,微观上进一步解释了悬浮载体生物膜硝化效果良好的原因。

④ 采用 MBBR 工艺对生化段进行原位改造,能够有效提高系统的硝化能力,是应对冬季低温、确保出水水质达标的有效措施。

## 参考文献:

- [1] 王晓东,毕学军,初正崑,等. 反应温度变化对活性污泥沉降性能的影响分析[J]. 中国给水排水,2013,29(23):128-131.  
Wang Xiaodong, Bi Xuejun, Chu Zhengkun, et al. Impact of reaction temperature on settleability of activated sludge [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 128-131 (in Chinese).
- [2] 王帆,任庆凯,田曦,等. 低温城市污水活性污泥脱氮酶活性变化的试验研究[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2014,15(3):58-61.



- Wang Fan, Ren Qingkai, Tian Xi, *et al.* Experimental research on dehydrogenase activity in activated sludge of low temperature urban sewage[J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2014, 15(3): 58 – 61 (in Chinese).
- [ 3 ] 高新新. 活性污泥中耐冷菌的分离、鉴定及其对模拟污水 COD 去除效果[D]. 南京:南京农业大学, 2014. Gao Xinxin. Isolations and Identifications of Efficient Psychrotrophic Bacterium and Research on Its Effect of COD Degradation [ D ]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [ 4 ] 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).
- [ 5 ] 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).
- [ 6 ] 方土, 周家中, 吴迪, 等. 长三角地区某污水处理厂准 IV 类水提标改造分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34 ( 17 ) : 94 – 99. Fang Tu, Zhou Jiazhong, Wu Di, *et al.* Analysis on upgrading and reconstruction of class IV surface water in a wastewater treatment plant in Yangtze River Delta region [ J ]. China Water & Wastewater, 2018, 34 ( 17 ) : 94 – 99 (in Chinese).
- [ 7 ] Daims H, Lebedeva E V, Pjevac P, *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [ J ]. Nature, 2015, 528 ( 7583 ) : 504 – 509.
- [ 8 ] 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).
- [ 9 ] 魏小涵, 毕学军, 尹志轩, 等. 温度和 DO 对 MBBR 系统硝化和反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39 ( 2 ) : 612 – 618. Wei Xiaohan, Bi Xuejun, Yin Zhixuan, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [ J ]. China Environmental Science, 2019, 39 ( 2 ) : 612 – 618 ( in Chinese ).
- [ 10 ] 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).
- [ 11 ] 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).
- [ 12 ] Xie C H, Yokota A. *Zoogloea oryzae* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from rice paddy soil, and reclassification of the strain ATCC 19623 as *Crabtreeella saccharophila* gen. nov., sp. nov [ J ]. Int J System Evolut Microbiol, 2006, 56 ( 3 ) : 619 – 624.
- [ 13 ] Gao P, Xu W, Sontag P, *et al.* Correlating microbial community compositions with environmental factors in activated sludge from four full-scale municipal wastewater treatment plants in Shanghai, China [ J ]. Appl Microbiol Biotechnol, 2016, 100 ( 10 ) : 4663 – 4673.



作者简介:刘强(1986 – ),男,天津人,本科,工程师,主要从事污水处理及回用技术研究以及污水处理厂、再生水厂的生产运营工作。

E – mail: qdsprsch@163.com

收稿日期:2019 – 06 – 24