

论述与研究

# MBBR 镶嵌氧化沟在某污水处理厂的提标效果分析

周祯领<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>, 韩文杰<sup>2</sup>, 殷建文<sup>2</sup>

(1. 北控水务黄岩江口污水处理厂, 浙江 台州 318000; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 浙江某污水处理厂将 MBBR 镶嵌于卡鲁塞尔氧化沟进行一级 A 提标改造, 在好氧段设置 MBBR 区域, 投加 SPR-Ⅱ 型悬浮载体强化脱氮除磷。改造后, 系统的抗冲击负荷能力得以强化, 生化段出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN、TP 均值分别为 26.04、4.72、2.42、10.46、0.26 mg/L, 稳定达到了一级 A 标准; 生化段沿程测试和小试结果显示, 好氧区存在稳定的同步硝化反硝化 (SND) 作用, 平均去除了 4.29 mg/L 的 TN, 约占进水 TN 的 12.05%, 降低了运行能耗和药耗。高通量测序结果显示, 悬浮载体对硝化菌的筛选和富集具有重要作用, 硝化菌在悬浮载体中的丰度为 6.08%, 是其在污泥中的 6 倍; 反硝化菌在悬浮载体中的丰度为 13.40%, 为 SND 的发生提供了微观保证; 系统中超过 64% 的硝化过程来自悬浮载体生物膜。改造后运行电耗降至 0.256 kW·h/m<sup>3</sup>, 较改造前节约了 17%。

**关键词:** 移动床生物膜工艺; 卡鲁塞尔氧化沟; 同步硝化反硝化; 高通量测序; 提标改造; 悬浮载体

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0001-06

## Retrofitting Effect of Oxidation Ditch Embedded with MBBR in a Wastewater Treatment Plant

ZHOU Zhen-ling<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>, HAN Wen-jie<sup>2</sup>, YIN Jian-wen<sup>2</sup>

(1. Huangyan Jiangkou WWTP, Taizhou 318000, China; 2. Qingdao Spring Water-treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A wastewater treatment plant in Zhejiang Province was upgraded to first level A standard by embedding a moving-bed biofilm reactor (MBBR) in the Carrousel oxidation ditch, in which MBBR was set up in the aerobic section and SPR-Ⅱ suspended carrier was added to strengthen the removal effect of nitrogen and phosphorus. After retrofitting, the anti-shock capacity of the system was strengthened. Average effluent COD, BOD<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP of the biochemical section were 26.04 mg/L, 4.72 mg/L, 2.42 mg/L, 10.46 mg/L and 0.26 mg/L, respectively, which stably reached the first level A standard. According to test results along the biochemical section and trial results, it was found that there existed stable simultaneous nitrification and denitrification (SND) in the aerobic zone, and the average removal amount of TN was 4.29 mg/L, accounting for about 12.05% of the influent TN, which eventually reduced the energy consumption and chemicals consumption. The high-throughput sequencing results showed that the suspended carrier played an important role in screening and enrichment of nitrifying bacteria, and the abundance of nitrifying bacteria in the suspended carrier was

6.08%, which was 6 times of that in sludge. The abundance of denitrifying bacteria in the suspended carrier was 13.40%, which provided a micro-environment for SND. More than 64% of the nitrification process in the system took place in the suspended carrier. After retrofitting, the operation power consumption was reduced to  $0.256 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , which was 17% less than before retrofitting.

**Key words:** MBBR; Carrousel oxidation ditch; simultaneous nitrification and denitrification; high-throughput sequencing; upgrading and reconstruction; suspended carrier

氧化沟凭借良好的抗冲击能力和脱氮除磷效果得以迅速传播应用,并出现了多种变形工艺,但氧化沟容易因污泥膨胀、泡沫以及污泥上浮等问题而导致处理效果不够稳定,出水水质易超标<sup>[1]</sup>。随着国家一级A提标改造的进行,氧化沟的升级改造是热点也是难点,而移动床生物膜工艺(MBBR)嵌合是解决途径之一。MBBR工艺通过向反应器中投加悬浮载体,使系统形成悬浮态-附着态双泥龄结构,同步强化脱氮除磷,具有处理负荷高、抗冲击能力强、处理效果稳定、运行管理简单、工艺设计及运行灵活等优点,被较多污水处理厂作为提标改造中生物强化的首选工艺<sup>[2-3]</sup>。笔者以浙江省某污水处理厂一级A提标改造工程为例,分析了MBBR工艺镶嵌于卡鲁塞尔氧化沟的应用效果,以期采用氧化沟相关工艺的污水厂一级A提标改造提供参考。

## 1 项目背景

### 1.1 项目简介

浙江省某污水处理厂设计规模为  $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 进水主要为生活污水,并且季节性地混合一定工业废水,生化池原工艺为卡鲁塞尔氧化沟,原设计标准为《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的二级标准。2014年该污水厂进行提标改造,要求在设计进水量不变的情况下,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,污水厂提标改造的设计进水  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{SS}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  分别为 250、600、300、40、60、5  $\text{mg/L}$ ,设计出水  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{SS}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  分别为 10、50、10、5、15、0.5  $\text{mg/L}$ 。

### 1.2 改造难点

该污水厂提标改造所面临的主要问题有:①进水中含有工业废水(电镀、制药、化工、食品),约占进水的20%~30%,且含有一定的重金属、苯胺等,对微生物具有一定的抑制作用;②进水中季节性橘子罐头生产废水冲击强;③进水浓度高且波动较大;④出水水质标准大幅提高,由GB 8978—1996的二

级标准直接提高到GB 18918—2002的一级A标准。

### 1.3 改造方案

在综合考虑进、出水水质及预留用地等情况后,决定在原池基础上嵌入MBBR工艺。生化段原有卡鲁塞尔氧化沟池形不变,优先保证反硝化池容,好氧区通过镶嵌MBBR以增加功能微生物量,进而增强硝化能力。将部分好氧区作为MBBR悬浮载体区,投加SPR-II型悬浮载体形成MBBR-活性污泥复合工艺。SPR-II型悬浮载体直径为  $(25 \pm 0.5) \text{ mm}$ 、高为  $(10 \pm 1) \text{ mm}$ ,挂膜后密度与水接近,有效比表面积  $> 620 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)标准<sup>[4]</sup>。好氧MBBR区采用循环流动池型,利用原有氧化沟廊道使悬浮载体在池内循环流动,为防止悬浮载体在末端堆积,通过加装推流器与曝气产生的剪切力共同实现悬浮载体流化,该池型具有水力条件好、无水力死角等特点。好氧MBBR区域采用底部穿孔曝气以加强流化,MBBR区域以外的好氧区仍维持表面曝气不变。采取逐池改造的方式,不影响污水厂的正常生产。生化段设计外回流比为100%,内回流比为160%~200%。生化池有并列两组,单组改造设计参数如下:总有效池容为  $24\,500 \text{ m}^3$ ,总水力停留时间(HRT)为14.7 h;缺氧池的有效池容为  $13\,300 \text{ m}^3$ ,HRT为7.98 h;好氧池有效池容为  $11\,200 \text{ m}^3$ ,HRT为6.72 h,其中,MBBR段的有效池容为  $5\,500 \text{ m}^3$ 、HRT为3.30 h、有效生物膜面积为  $1.36 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。深度处理采用高效沉淀池和转盘滤池,保证SS和TP去除效果。

## 2 改造后的运行效果分析

### 2.1 生化系统对有机物的去除效果

对比分析了改造前一年及改造运行3年后生化段对污水的处理效果。改造前生化段进水COD和 $\text{BOD}_5$ 均值分别为336.98、155.43  $\text{mg/L}$ ,出水均值分别为45.53、5.23  $\text{mg/L}$ ,平均去除率分别达到了86.49%、96.64%。进水COD和 $\text{BOD}_5$ 浓度虽然波

动较大但均值未达到设计值,所以提升 COD 和  $BOD_5$  的去除效果不是本项目的难点和重点,改造前出水 COD 和  $BOD_5$  浓度即已达标。改造后生化段进水 COD 和  $BOD_5$  均值分别为 331.68、143.91 mg/L,出水均值分别为 26.04、4.72 mg/L,平均去除率分别达到了 92.15%、96.72% (见图 1),可见 MBBR 的镶嵌进一步提高了对有机物的去除效果。

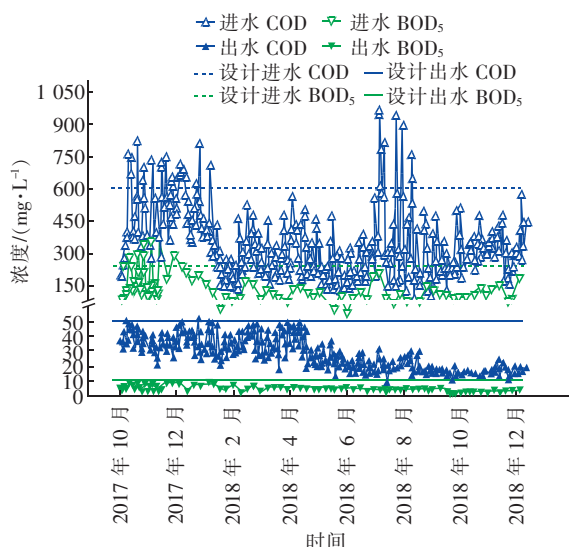


图 1 改造后生化系统对有机物的去除效果

Fig. 1 Removal efficiency of organics after retrofitting

## 2.2 生化系统对氮和磷的去除效果

改造前生化段进水 TN 和  $NH_4^+ - N$  均值分别为 50.05、31.99 mg/L,出水均值分别为 31.87、18.74 mg/L,平均去除率分别为 36.32%、41.42%。改造后生化系统对 TN 和  $NH_4^+ - N$  的去除效果如图 2 所示,进水 TN 和  $NH_4^+ - N$  均值分别为 40.11、29.38 mg/L,虽然进水浓度均值较改造前有所降低,但水质波动极大;出水 TN 和  $NH_4^+ - N$  均值分别为 10.46、2.42 mg/L,平均去除率分别达到了 73.92%、91.76%,出水浓度稳定达标,并未受到水质冲击的影响,可见 MBBR-活性污泥复合工艺对水质冲击具有较强的抵抗力。

改造前污水厂进水 TP 均值为 3.78 mg/L,出水均值为 0.94 mg/L,平均去除率达到 75.13%。改造后生化系统对 TP 的去除效果如图 3 所示,进水 TP 均值为 4.12 mg/L,出水均值为 0.26 mg/L,平均去除率达到了 93.69%。改造完成后进水 TP 浓度有一定升高且波动较大,但出水水质并未受到明显影响,出水 TP 浓度一直稳定在 0.5 mg/L 以下。除磷

效果的提升主要在于生化段生物除磷的强化,改造前,为保证系统的硝化效果,一般运行中污泥浓度较高、泥龄较长,以确保硝化菌群在污泥中的占比;改造后,好氧区投加悬浮载体,实现了硝化菌群的固定区域富集,保证了硝化菌群的长泥龄,这样在一定程度上可以降低悬浮态污泥的泥龄,强化生物除磷,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。

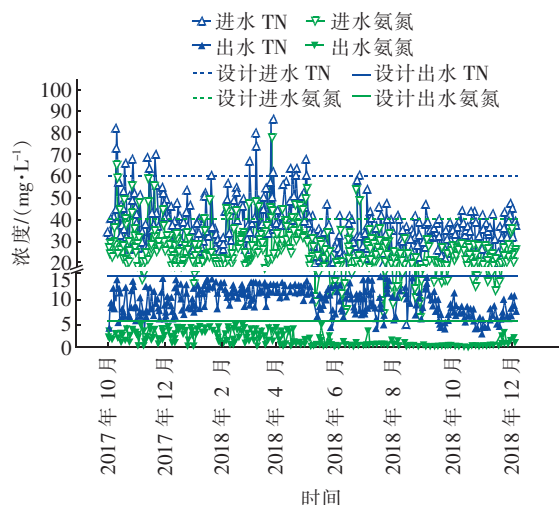


图 2 改造后生化系统对 TN 及  $NH_4^+ - N$  的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of TN and  $NH_4^+ - N$  after retrofitting

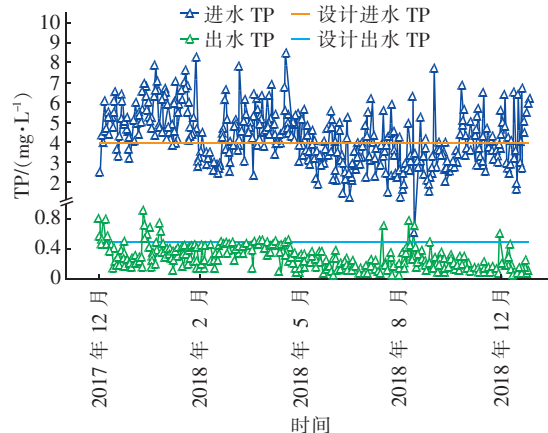


图 3 改造后生化系统对 TP 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of TP after retrofitting

## 2.3 系统各功能区的脱氮除磷性能

改造完成后测定整个生化段沿程断面的氮素浓度,系统的总回流比为 260%,结果如图 4 所示。可以看出,厌、缺氧区共去除了 56.15% 的 TN,明显优于改造前,主要是扩大了缺氧池容使反硝化进行得更加充分。同时,在好氧区发现了 TN 去除现象,核



算去除了 12.05% 的 TN, 去除氮素为 4.29 mg/L, 推测是悬浮载体上的生物膜发生了同步硝化反硝化 (SND) 现象。MBBR 悬浮载体生物膜上存在典型的缺/好氧微环境, 使得膜外层形成以硝化细菌为主的好氧生物膜, 内层则以具备反硝化功能的菌群形成缺氧生物膜, 促进了 SND 的进行, 使得在好氧区仍能对 TN 进一步去除。由于好氧 MBBR 区的有机物含量已经很低, 进一步推测 SND 的碳源可能与生物膜的内碳源相关。

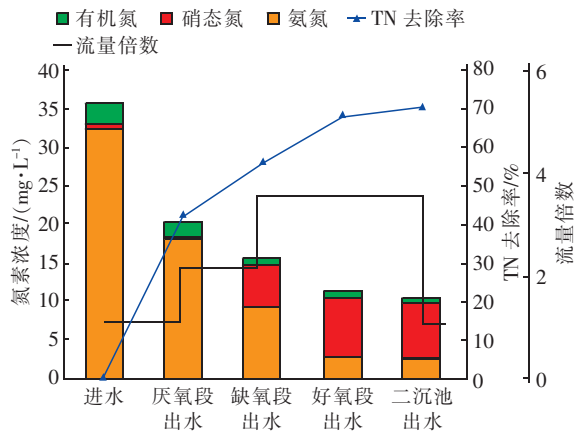


图4 氧化沟沿程断面氮素变化

Fig. 4 Change of nitrogen along with the oxidation ditch

观察发现, 悬浮载体表面附着一层薄薄的生物膜, 厚度在 100 ~ 140  $\mu\text{m}$ , 呈黑褐色。悬浮载体的生物量与其投加区域及功能设计密切相关。当悬浮载体投加在好氧区, 以富集自养硝化菌群为目的, 此类菌群比生长速率低, 污泥产量低, 形成的生物膜较薄, 有利于传质传氧。系统正常运行条件下, 有机物经过厌氧段、缺氧段被大量消耗, 好氧区的有机物含量已经较低, 悬浮载体主要承担脱氮功能, 生物膜较薄; 若系统反硝化性能受到影响, 有机物未能在厌氧段、缺氧段充分利用而大量进入好氧悬浮载体区, 则经过长期运行后悬浮载体生物膜有增厚的趋势, 此时预示着系统异常, 应及时调整。

为进一步确定悬浮载体的硝化性能, 取好氧 MBBR 区的悬浮载体进行硝化速率测定<sup>[5]</sup>。试验温度为 13  $^{\circ}\text{C}$ , 与好氧池冬季实际水温相同, 试验结果见图 5。整个试验过程氨氮去除负荷稳定在 0.12 ~ 0.14  $\text{kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。值得注意的是, 硝态氮的生成速率低于氨氮的消耗速率, 导致试验前后总氮降低了 3.57 mg/L, 验证了 SND 现象主要发生在悬浮载体生物膜上的推测, 与沿程测试结果一致。

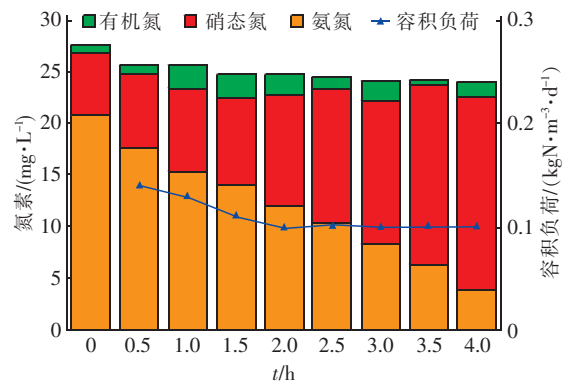


图5 悬浮载体生物膜的硝化速率测试结果

Fig. 5 Results of lab-scale test on nitrification rate of biofilm in suspended carrier

### 3 MBBR 工艺对功能微生物的选择作用

在冬季低温期分别取好氧 MBBR 区挂膜悬浮载体和好氧池污泥进行微生物高通量分类测序, 优势微生物组成见图 6, 微生物分布差异见图 7。

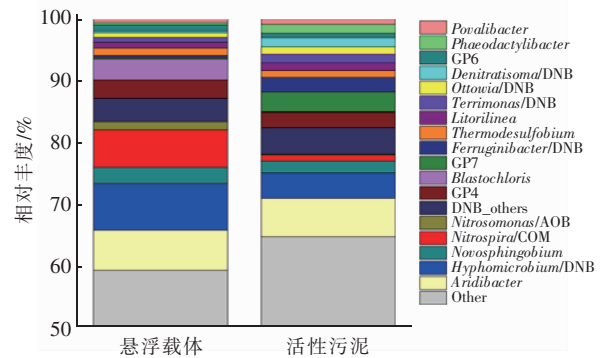


图6 属水平下物种的相对丰度

Fig. 6 Relative abundance distribution at genus level

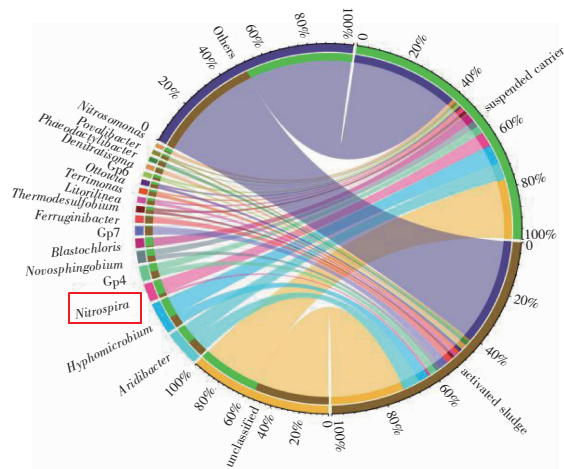


图7 优势菌群在污泥与悬浮载体上的占比

Fig. 7 Abundance of dominant bacteria in sludge and suspended carrier

悬浮载体和污泥中丰度较高的微生物包括 *Aridibacter* (旱杆菌属)、*Hyphomicrobium* (生丝微菌属)、*Nitrospira* (硝化螺旋菌属)、Gp4、*Novosphingobium* (新鞘氨醇杆菌)、*Blastochloris*、*Ferruginibacter*、*Litorilinea*、*Nitrosomonas* (亚硝化单胞菌属)等。

*Aridibacter* 在悬浮载体生物膜和污泥中的丰度分别为 6.53%、6.21%,其作为污水处理中常见的微生物,对 pH 值和温度有较强的耐受性<sup>[6]</sup>,对高分子聚合物有特殊降解能力,部分菌种除了能利用氨基酸、多糖、有机酸外,还能在缺氧条件下以硝酸盐为电子受体进行反硝化,但一般没有除磷能力<sup>[7]</sup>。

*Hyphomicrobium* 在悬浮载体生物膜和污泥中的丰度分别为 7.56%、4.13%,其能够在好氧条件下进行反硝化作用<sup>[8]</sup>,田海龙在采用 MABR 工艺处理生活污水过程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>[9]</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、二甲基硫醚和甲醇等,李继兵在进行多环芳烃(PAHs)降解微生物研究中证实了该菌属具有降解菲的功能<sup>[10]</sup>。

*Novosphingobium* 在悬浮载体生物膜和污泥中的丰度分别为 2.58%、1.94%,部分文献报道该菌属可高效降解 PAHs,如分离自韩国近海的 *N. pentaromativorans* US6-1 T 能够降解芘、苯并芘等多种高分子质量 PAHs<sup>[11]</sup>,另有分离自美国内陆地下 410 m 深土样中的 *N. aromaticivorans* DSM 12444T 可以降解联苯<sup>[12]</sup>。

综合来看,系统中的优势硝化菌群为亚硝化单胞菌属 *Nitrosomonas* (AOB) 和硝化螺旋菌属 *Nitrospira* (NOB),其中,*Nitrosomonas* 在悬浮载体生物膜和好氧污泥中的丰度分别为 1.35%、0.15%,而 *Nitrospira* 的丰度则分别为 6.08%、0.97%,该菌属兼具 AOB 和 NOB 功能,相比其他硝化细菌具有一定独特优势,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,因此 *Nitrospira* 通常出现在氨氮浓度水平相对较低的情况下,并且其作为优势菌属也反映了污水厂处理效果较为良好<sup>[13]</sup>。

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,确定系统中超过 64% 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。另外,悬浮载体生物膜上也检测到较大丰度具备反硝化功能的菌属,如 *Hyphomicrobium*、*Ferruginibacter* 等,反硝化菌群在悬浮载体上的占比达到 13.40%,从微观上证实了好氧区悬浮载体上存在 SND。

另外,系统中存在部分能够降解 PAHs 的菌属,如 *Hyphomicrobium*、*Novosphingobium* 等,这可能和该污水厂进水中存在一定含苯胺的工业废水有关。该类菌属的存在降低了苯胺类有害物质对系统中硝化菌的不利影响,保证了系统的处理效果。

#### 4 改造前后污水厂能耗分析

改造完成后,系统处理效果得以强化,回流比降低,节省了能耗,另外,好氧段 MBBR 改造使表面曝气改为底部穿孔曝气,提高了氧气的利用效率,将原先的 8 台表曝机改为 4 台风机,也在一定程度节省了电耗,改造前电耗为 0.308 kW·h/m<sup>3</sup>,改造后降至 0.256 kW·h/m<sup>3</sup>,节约了 17% 的电耗。

#### 5 结论

① 采用 MBBR 对卡鲁塞尔氧化沟进行提标改造,系统的抗冲击负荷能力得以强化,改造完成后生化段出水 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、TN、TP 均值分别为 26.04、4.72、2.42、10.46、0.26 mg/L,稳定达到了一级 A 标准。

② 采用 MBBR 改造后,好氧区有稳定的同步硝化反硝化效果,平均去除了 4.29 mg/L 的 TN,约占进水 TN 的 12.05%,降低了运行能耗和药耗。

③ 悬浮载体对硝化菌的筛选和富集具有重要作用,硝化菌在悬浮载体中的丰度为 6.08%,是其在污泥中的 6 倍;反硝化菌在悬浮载体中的丰度为 13.40%,为 SND 的发生提供了微观保证;系统中超过 64% 的硝化过程来自悬浮载体生物膜。

④ 将 MBBR 工艺镶嵌于氧化沟进行提标改造,运行电耗可降至 0.256 kW·h/m<sup>3</sup>,较改造前节约了 17%。

#### 参考文献:

- [1] 李勇. 改良型卡鲁塞尔氧化沟脱氮效能提升及其生物微环境的研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.  
Li Yong. Enhanced Denitrification Efficiency and Biological Micro-environment Response in Modified

- Carrousel Oxidation Ditch [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [2] McQuarrie J P, Boltz J P. Moving bed biofilm reactor technology: process applications, design, and performance [J]. Water Environ Res, 2011, 83(6): 560–575.
- [3] 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).
- [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] 周小红. MBBR 及组合工艺氮磷的去除规律和污泥性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Zhou Xiaohong. Research on Denitrification and Phosphorous Removal and Sludge of CEPT – MBBR Process [D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (in Chinese).
- [6] 王桂君. 生物炭和有机肥对松嫩平原沙化土壤的改良效应及其机制研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.  
Wang Guijun. Improvement Effects and Mechanisms of Biochar and Compost on Sandy Soil in the Songnen Plains [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018 (in Chinese).
- [7] Huber K J, Geppert A M, Groß U, et al. *Aridibacter nitratreducens* sp. nov., a member of the family *Blastocatellaceae*, class *Blastocatellia*, isolated from an African soil [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2017, 67(11): 4487–4493.
- [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]. 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(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.  
Li Jibing. Study on Stable-isotope Probing of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-degrading Bacteria [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2018 (in Chinese).
- [11] Sohn J H, Kwon K K, Kang J H, et al. *Novosphingobium pentaromativorans* sp. nov., a high-molecular-mass polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium isolated from estuarine sediment [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2004, 54(5): 1483–1487.
- [12] Romine M F, Fredrickson J K, Li S M W. Induction of aromatic catabolic activity in *Sphingomonas aromaticivorans* strain F199 [J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 1999, 23(4/5): 303–313.
- [13] 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).



作者简介: 周祯领(1977–), 男, 浙江台州人, 大学本科, 工程师, 主要从事给排水工程设计与运行等工作。

E-mail: hitwudi@126.com

收稿日期: 2019–03–22