

# 提高 MBR 工艺反硝化碳源利用率的研究

薛涛, 车淑娟, 张朋川, 袁璐璐, 俞开昌  
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

**摘要:** 为挖掘膜生物反应器(MBR)工艺的脱氮潜力,在 MBR 实际应用工程中开展了近 1 年的试验。在进水 COD/TN 值=4.0 时,将污泥龄(SRT)从 28~35 d 延长至 70~80 d,总氮去除率从 61% 提高至 80%,出水总氮浓度从 13 mg/L 左右下降至 6~8 mg/L,化学除磷费用仅增加了约 0.02 元/m<sup>3</sup>,剩余污泥明显减量。MBR 工艺释放了 SRT 作为工艺参数的调节自由度,拓展了生化系统的运行工况范围,在提高反硝化碳源利用率、强化污水脱氮效果方面具有独特优势。

**关键词:** 膜生物反应器; 脱氮; 碳源; 污泥龄

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0097-04

## Improvement of Carbon Source Utilization Rate for Denitrification in MBR Process

XUE Tao, CHE Shu-juan, ZHANG Peng-chuan, YUAN Lu-lu, YU Kai-chang  
(Beijing Origin Water Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** To further exploit the potential of nitrogen removal ability of MBR process, a full-scale experiment was conducted in a municipal wastewater treatment plant for nearly one year. On the condition of COD/TN=4.0, as sludge retention time (SRT) was extended from 28-35 d to 70-80 d, the TN removal rate increased from 61% to 80% and the TN concentration in effluent decreased from around 13 mg/L to 6-8 mg/L. The cost of chemical phosphorus removal increased only 0.02 yuan/m<sup>3</sup>, and the excess sludge production decreased significantly. MBR process fully releases SRT as an adjustable parameter, expands the operational status of the biochemical system, and thus has special advantage on raising carbon source utilization rate for denitrification and enhancing nitrogen removal effect.

**Key words:** membrane bio-reactor (MBR); nitrogen removal; carbon source; sludge retention time (SRT)

城镇污水强化脱氮的关键在于优化碳源分配,提高反硝化碳源利用率。①碳源一次分配:进水中有机物转化为净增殖微生物和 CO<sub>2</sub> 两部分,占比为表观产率系数  $Y_0$  和  $1 - Y_0$ 。 $Y_0 = Y / (1 + K_d \times SRT)$ ,理论产率系数  $Y$  和衰减系数  $K_d$  均为与温度相关的常数,延长 SRT 可降低  $Y_0$ ,将更多碳源用作电子供体。MBR 工艺中 SRT 与 HRT 完全分离,为降低  $Y_0$

提供了空间。②碳源二次分配: $1 - Y_0$  部分的碳源主要被 O<sub>2</sub> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 两种电子受体氧化,为促进 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 氧化并避免 O<sub>2</sub> 氧化,需保证缺氧池中微生物量及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 量不成为限制性因素,严控好氧池的 DO 浓度,保证硝化即可,减轻好氧内源衰减并减少回流 DO 量。MBR 工艺的污泥浓度高,有膜池作末端保障,为调控缺氧池微生物量 and 好氧池 DO 浓度提供

了灵活性。可见,MBR 工艺在强化脱氮上具有其独特优势,实践中部分 MBR 工程脱氮效果不理想的原因主要是系统 DO 浓度偏高而消耗了碳源,即碳源二次分配不当,优化曝气方式后出水总氮和能耗均能降低<sup>[1]</sup>。

目前关于优化碳源一次分配以提高反硝化碳源利用率的研究很少,这是探索和挖掘 MBR 工艺潜力的重要方向之一。为此,笔者在实际 MBR 工程中开展了近 1 年的试验研究,以期能促进 MBR 工艺技术的进一步完善和推广。

## 1 工程概况与分析方法

### 1.1 工程概况

北京市某污水处理厂的设计规模为  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,实际处理水量约为  $7\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,工艺流程为:厌氧—前缺氧—好氧—后缺氧—MBR, HRT 分别为 1.8、4.6、6.5、4.5、1.2 h,合计 18.6 h。进水 COD、氨氮、总氮、总磷浓度分别为  $(147 \pm 51)$ 、 $(33.1 \pm 6.0)$ 、 $(36.5 \pm 6.1)$ 、 $(3.4 \pm 1.1) \text{ mg/L}$ ,平均进水 COD/TN 值仅为 4.0。

### 1.2 分析方法

试验中的主要分析指标为 TN 去除率和反硝化碳源利用率,其中,反硝化碳源利用率  $\eta$  的计算方法如下:

$$\eta = \frac{2.86 [Q(TN_i - TN_e) - 0.12 \Delta X_v]}{Q(C_i - C_e)} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $TN_i$ 、 $TN_e$  分别为进、出水 TN 浓度; $Q$  为日处理水量; $\Delta X_v$  为每日污泥增量(VSS); $C_i$ 、 $C_e$  分别为进、出水 COD 浓度。

COD、TN、TP、MLSS 等指标均采用国家标准方法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 总体脱氮效果

基于该 MBR 工程的沿程水质和污泥性质,调节回流比及污泥浓度分布,控制好氧池 DO 浓度低于  $0.3 \text{ mg/L}$ ,在碳源二次分配得到优化的前提下研究碳源一次分配的优化。通过投加化学除磷药剂,保证出水总磷浓度低于  $0.3 \text{ mg/L}$ 。试验分为三个阶段,污泥浓度和 TN 去除效果的变化如图 1 和 2 所示。第 I 阶段为 1~141 d,正常排放剩余污泥,SRT 为 28~35 d,膜池污泥浓度基本在  $4 \sim 6 \text{ g/L}$ ,出水 TN 浓度均值为  $13.3 \text{ mg/L}$ ,总氮去除率平均为

61%。

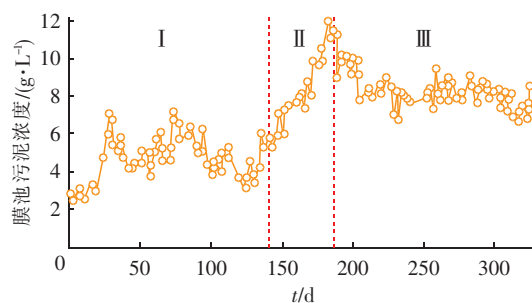


图1 膜池污泥浓度的变化

Fig.1 Change of MLSS in MBR

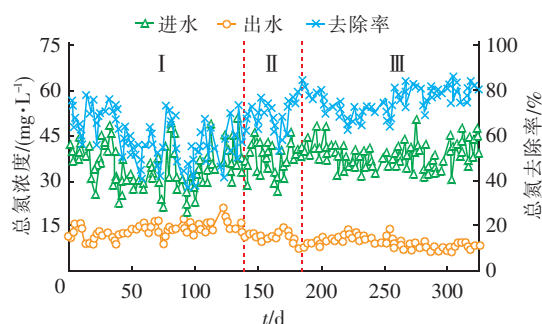


图2 总氮去除效果的变化

Fig.2 Change of TN removal effect by MBR

第 II 阶段为 142~184 d,停止排放剩余污泥,使 SRT 持续延长,最终膜池污泥浓度升高至约  $12 \text{ g/L}$ ,出水总氮浓度下降至  $6 \text{ mg/L}$  左右,总氮去除率升高至 80% 以上。本阶段除磷加药量不断升高,最终比第 I 阶段增加 60% 以上。

第 III 阶段为 185~324 d,兼顾脱氮效果和化学除磷成本,适量排放剩余污泥控制 SRT 在 70~80 d,最终膜池污泥浓度稳定在  $7 \sim 9 \text{ g/L}$ ,出水总氮浓度在  $6 \sim 8 \text{ mg/L}$ ,总氮去除率约为 80%。与第 I 阶段相比,出水总氮浓度下降约  $5 \sim 7 \text{ mg/L}$ ,相当于节省碳源费用约  $0.1 \text{ 元}/\text{m}^3$ ;出水总磷浓度不变,除磷加药量增加约 30%,费用增加约  $0.02 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

### 2.2 数据分析

第 II 阶段为非稳态阶段,共 43 d,以两周为间隔再细分为三段,数据统计结果如表 1 所示。其中,SRT 是在任意时刻,假定通过排泥使总污泥量稳定在当前值时的理论计算值,实际未排泥。由表 1 可知,随着 SRT 的延长,剩余污泥产量减少, $Y_0$  值降低。TN 去除率变化无规律,这是因为其计算方法受进水水质波动的影响较大,短期数据可比性差。反硝化碳源利用率的计算综合考虑了总氮去除、微生

物增殖及有机物去除,评价脱氮效率更合理。城镇污水处理厂不外加碳源时的典型反硝化碳源利用率在15%~25%,表1中的反硝化碳源利用率随SRT的延长而升高至33%~34%。

表1 第Ⅱ阶段的数据统计结果

Tab.1 Statistical data of second stage

| 项 目   | 142~155<br>d | 156~169<br>d | 170~184<br>d |
|---|--------------|--------------|--------------|
| SRT/d   | 38           | 75           | 141          |
| 剩余污泥产量/(t·d <sup>-1</sup> )                       | 0.68         | 0.48         | 0.30         |
| $Y_0$ /(kgVSS·kg <sup>-1</sup> BOD <sub>5</sub> ) | 0.37         | 0.25         | 0.16         |
| 膜池 MLSS/(g·L <sup>-1</sup> )                      | 5~7          | 7~9          | 9~12         |
| TN 去除率均值/%  | 70.5         | 65.2         | 76.4         |
| 反硝化碳源利用率/%  | 26.5         | 33.1         | 34.0         |
| 除磷药剂费用/(元·m <sup>-3</sup> )                       | 0.06         | 0.07         | 0.09         |
| 化学污泥占比/%  | 9.2          | 9.3          | 9.6          |
| MLVSS/MLSS 值                                      | 0.50~0.51    |              |              |

另外,随着SRT的延长,膜池MLSS值升高。由于本工程进水COD浓度低,MLSS最高仅为12 g/L,未发现膜污染加重现象。SRT的延长导致除磷加药量增加,第Ⅱ阶段中未观察到MLVSS/MLSS值的明显变化,但依据除磷加药量计算的化学污泥产量及其在总污泥量中的占比呈现加速升高趋势。

综合考虑反硝化碳源利用率和化学除磷影响,第Ⅱ阶段中第二小段的SRT较适宜,并在第Ⅲ阶段作了进一步验证。

### 2.3 拓展讨论

本研究工程中的进水COD浓度过低,为更具代表意义地讨论SRT对污水处理工艺系统的影响,按典型城镇污水水质及设计规范中的计算公式和参数值<sup>[2]</sup>,计算了不同SRT下的系统平均污泥浓度、二沉池固体负荷、每处理1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>污水的剩余污泥产量、表观产率系数 $Y_0$ ,结果如图3所示。为便于作图,二沉池固体负荷是除以10以后的值。

传统工艺的SRT取值受限于二沉池固体负荷,SRT一般不能超过30 d,此时图3中的 $Y_0$ 值在0.38~0.5 kgVSS/kgBOD<sub>5</sub>。MBR工艺的SRT取值受限于膜污染控制和污泥活性维持需求,典型SRT在30~60 d,系统平均污泥浓度在5~8 g/L,膜池污泥浓度在6~12 g/L, $Y_0$ 值在0.27~0.38 kgVSS/kgBOD<sub>5</sub>。近年来,MBR的预处理技术、化学除磷技术、膜污染控制技术得到快速发展,使得SRT延

长至图3中60~100 d的区间成为可能。该长SRT区间的表观产率系数可进一步降低至0.2~0.27 kgVSS/kgBOD<sub>5</sub>,为优化碳源一次分配,提高反硝化碳源利用率并减少剩余污泥产量提供了更多空间。

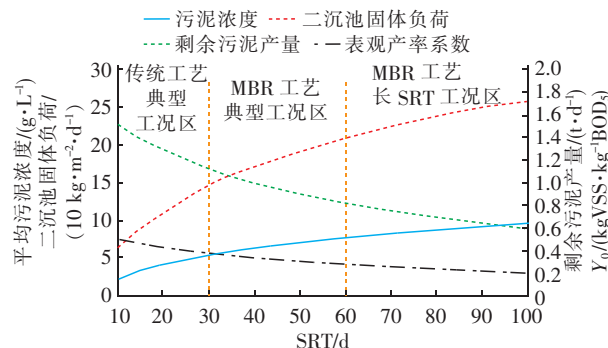


图3 SRT对污水生化处理系统的影响

Fig.3 Influence of SRT on biological wastewater treatment system

MBR工艺中SRT与HRT完全分离,其实质意义在于释放了SRT作为工艺参数的调节自由度。即MBR的优势不仅在于依靠高精度膜分离去除出水悬浮物、提高污泥浓度、减少占地等,而且可较大幅度地改变生化系统中同化/异化的工作平衡点,拓展了生化系统工况范围,使得超常规地提升脱氮效果和减少剩余污泥产量成为可能。实际上,笔者认为部分MBR研究文献中报道的高污泥浓度、内源反硝化等促进脱氮并减少剩余污泥量的现象<sup>[3,4]</sup>是长SRT优化碳源一次分配的不同表现形式。

需注意的是,最优SRT与进水水质有关,进水有机物、氮、磷浓度越高,SRT受膜污染、化学除磷费用等的约束越显著,可通过试验确定适宜的SRT。具体方法可参考本研究的第Ⅱ阶段试验,在优化碳源二次分配的前提下不断延长SRT,基于产水水质、污泥性质和运行成本确定最优SRT。

### 3 结论

为提高MBR工艺的反硝化碳源利用率,本研究提出了充分挖掘SRT参数作用的思路,并在实际MBR工程中开展了近1年的试验研究,获得以下结论:

① 在进水COD/TN值仅为4.0时,将SRT从28~35 d延长至70~80 d,总氮去除率从61%提高至80%,出水总氮浓度从13 mg/L左右下降至6~8 mg/L,化学除磷费用仅增加约0.02元/m<sup>3</sup>。

(下转第104页)