

# MBR 中影响同步硝化反硝化的生态因子

邹联沛<sup>1</sup>, 刘旭东<sup>2</sup>, 王宝贞<sup>1</sup>, 范延臻<sup>1</sup> (1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090, E-mail: lpzou@china.com; 2. 哈尔滨市水利局, 哈尔滨 150000)

**摘要:**研究了 DO、C/N、pH 等生态因子对膜生物反应器同步硝化反硝化的影响. 结果表明, 只有在各生态因子保持得当的条件下, 同步硝化反硝化才能顺利地进行. DO 为 1mg/L 左右、C/N 比为 30 左右、进水 pH 值约 7.2 左右时 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、TN 的去除率分别为 96%、95% 和 92%.

**关键词:**膜生物反应器; 污水处理; DO; C/N 比; 生态因子; 同步硝化反硝化

**中图分类号:**X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2001)04-05-0051

## The Influence of Ecological Factors on Simultaneous Nitrification and Denitrification in MBR

Zou Lianpei<sup>1</sup>, Liu Xudong<sup>2</sup>, Wang Baozhen<sup>1</sup>, Fan Yanzhen<sup>1</sup> (1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China E-mail: lpzou@china.com; 2. Harbin Bureau of Water Conservancy, Harbin 150000, China)

**Abstract:** The influence of dissolved oxygen (DO), C/N and pH on simultaneous nitrification and denitrification in the membrane bioreactor was studied. The experimental results showed that only under condition that each ecological factor was maintained relative steady, simultaneous nitrification and denitrification might proceed smoothly. When DO, C/N and pH of feed water was 1mg/L, 30 and 7.2, the removal rate of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, and TN were 96%, 95% and 92% respectively.

**Keywords:** membrane bioreactor; wastewater treatment; dissolved oxygen (DO); C/N; ecological factors; simultaneous nitrification and denitrification

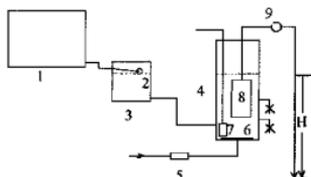
同步硝化反硝化与很多因素有关, 如污泥的絮体结构、大小、密度、污泥浓度的高低、DO、F/M、C/N、pH 值等. 本文在膜生物反应器能维持高活性污泥浓度的条件下着重研究了 DO、C/N、pH 值等生态因子对膜生物反应器生态系统中同步硝化反硝化功能的影响. 试验通过排泥使 MLSS 稳定在 8000~9000mg/L. 表明膜生物反应器在一定的 DO、C/N、pH 条件下能很好地进行同步硝化反硝化.

### 1 试验装置

如图 1 所示, 8 为中空纤维膜组件, 膜材质为聚砜, 膜孔径为 0.05 $\mu$ m, 膜组件长度为 0.35m, 膜的表面积为 1.5m<sup>2</sup>. 反应器 4 的有效

体积为 18L, 反应器内温度由养鱼用的加热器控制在 24℃ 左右, 反应器的液位由液位平衡箱中的浮球阀 2 进行控制, 随出水流量的变化, 由浮球阀 2 进行自动控制, 可同步保持出水流量与进水流量平衡. 本装置采用微孔曝气器进行曝气, 曝气量可由空气流量计 5 进行调节. 出水动力由净水头压差 H 提供. 以上为装置 1 的配置情况, 类似的装置还有装置 2 和装置 3, 只是这 2 个装置的有效反应器体积为 5.4L. 以上 3 套装置的 HRT 均为 5h, 只是在不同的 DO 下运行.

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-909-01-02-04)  
作者简介: 邹联沛(1969~), 男, 博士研究生.  
收稿日期: 2000-12-04



高位水箱 2. 浮球阀 3. 液位平衡箱 4. 反应器 5. 空气流量计 6. 曝气装置 7. 加热器 8. 中空纤维膜 9. 真空表  
图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental configuration

## 2 试验配水

试验用水采用人工配水,由淀粉、蔗糖、氯化铵、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、食用碱等配制而成,COD在600mg/L左右, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在20mg/L左右,总磷为2.47~5.1mg/L左右。

## 3 DO对同步硝化反硝化的影响

### 3.1 DO对COD去除的影响

膜生物反应器在DO分别为6mg/L、3mg/L、1mg/L、0.5mg/L左右微小波动的情况下对COD的去除情况如图2所示。

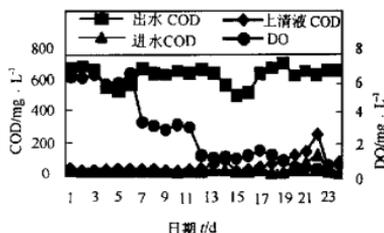


图 2 DO对COD去除的影响

Fig. 2 Effect of DO concentration on COD removal efficiency

从图2可以看出,DO为6mg/L左右时,COD的去除率为98%左右,DO为3mg/L左右时对COD的去除率在96.5%左右。DO在3mg/L以上时,膜生物反应器能对COD进行很好的降解,上清液COD(将污泥混合液经滤纸过滤后测得的COD)和膜出水COD都很低。

当DO为1mg/L时,上清液COD略有上升,但膜出水COD仍可维持很低,这说明膜起到很好的稳定作用,COD的去除率为96%左右。但当DO在0.5mg/L左右时,上清液COD和膜出水COD都迅速上升,COD的去除率为90%左右,且有很大的波动性。

### 3.2 DO对去除氨氮的影响

从图3可以看出,DO对氨氮的去除在3mg/L以上时基本无影响,出水氨氮都能保持在1mg/L以下,氨氮的去除率可达98%~99%。DO在1mg/L左右时,上清液氨氮略有上升,一般都在2mg/L左右,但出水氨氮还是可以维持很低,氨氮的去除率在95%左右。但DO在0.5mg/L时,对氨氮的去除影响很大。氨氮的去除率一般都在40%~50%。

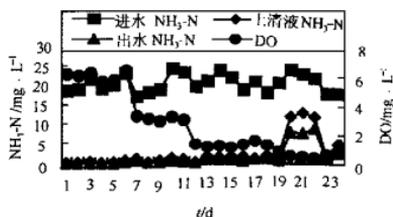


图 3 DO对氨氮去除的影响

Fig. 3 Effect of DO concentration on  $\text{NH}_3\text{-N}$  removal efficiency

### 3.3 DO对去除总氮(TN)的影响

从图4看出DO对TN的去除影响很大,当DO为6mg/L时,TN的去除率在60%左右,这是因为DO很高时,DO能穿透到污泥絮体内部,使其内部难以形成缺氧区,大量的 $\text{NH}_4^+$ 被氧化为硝酸盐和亚硝酸盐,使得上清液TN和出水TN仍然很高。根据微环境理论,在膜生物反应器中污泥浓度很高的情况下,即使DO很高,仍可使部分污泥絮体内部形成缺氧区,从而具有部分的反硝化能力。DO为3mg/L时,TN的去除率上升,是因为能形成缺氧区的污泥絮体增加,但出水TN仍然在7mg/L左右,去除率维持在75%左右。DO为1mg/L时,TN的去除效果非常好,出水TN可维持在3mg/L

以下,对 TN 的去除率可达 92%. DO 为 0.5mg/L 时,由于 DO 供应不足,硝化效果下降,使得出水  $\text{NH}_4^+$  上升,从而导致出水 TN 上升.

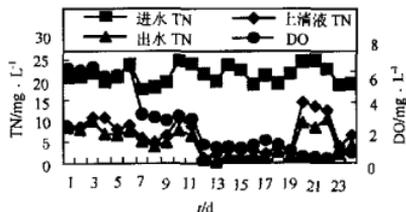


图 4 DO 对 TN 去除的影响

Fig. 4 Effect of DO concentration on TN removal efficiency

### 3.4 DO 保持 1mg/L 左右时 C/N 对膜生物反应器同步硝化反硝化的影响

表 1 DO 恒定在 1mg/L 左右时 C/N 对膜生物反应器同步硝化反硝化的影响/mg·L<sup>-1</sup>

Table 1 Effect of ratio of C and N on simultaneous nitrification and denitrification in MBR with 1mg/L of DO

COD/N	COD			氨氮			TN		
	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
31.54	661.34	21.4	96.76	20.97	0	100	22	0.9	95.91
20.59	403.6	16.4	95.96	19.65	0.03	99.85	18.7	2.1	88.77
9.69	412.3	19.94	95.16	42.8	5.56	87	39.56	11.2	71.69
5	198.54	14.6	92.65	43.2	15.93	63.13	42.5	33.73	20.64

### 3.5 DO 保持 1mg/L 左右时 pH 值对膜生物反应器同步硝化反硝化的影响

从表 2 可以看出,进水 pH 在 4.76~9.7 对 COD 的去除影响不是很大,但对  $\text{NH}_4^+$  和 TN 的去除影响很大.进水 pH 为 4.8 左右时对  $\text{NH}_4^+$  的去除率为 60% 左右,对 TN 的去除率为 45% 左右;进水 pH 为 7.2 左右时对  $\text{NH}_4^+$  的去除率为 99% 左右,对 TN 的去除率为 90% 左右;进水 pH 为 9.6 左右时对  $\text{NH}_4^+$  的去除率为

从表 1 可以看出,随着 C/N 的下降,膜生物反应器出水  $\text{NH}_4^+$  将上升,因为本试验是通过提高进水  $\text{NH}_4^+$  和降低进水 COD 来降低 C/N,而  $\text{NH}_4^+$  负荷的提高对反应器的冲击本身就很大,氨的硝化反应进行得不彻底,所以出水  $\text{NH}_4^+$  上升.出水 TN 上升的原因有 2 方面,一是出水  $\text{NH}_4^+$  的上升造成的;二是进水 COD 的降低无法保证反硝化时有机物的需要.当然,一开始就在相同的 C/N(如 5 左右)条件下培养污泥, $\text{NH}_4^+$  可能被完全硝化,而本试验是在 C/N 为 30 左右的条件下长期运行的.所以,要发生同步硝化反硝化,必须在相对稳定的条件下进行.本试验只能说明 C/N 发生较大变化时会影响同步硝化反硝化,并不能说明要发生同步硝化反硝化至少需要多大的 C/N 比值.

75% 左右,对 TN 的去除率为 59% 左右. pH 为 5 时会严重抑制硝化反应,实际上在连续流反应器中,当进水 pH 为 5 时,反应器中由于污泥混合液的稀释作用,反应器中污泥混合液的 pH 值应大于 5,经实测 pH 值一般为 6.3 左右,当进水 pH 值为 9.6 左右时,反应器中 pH 值大约为 8.9 左右,但都不在最佳 pH 值范围.由此可以认为,pH 是影响膜生物反应器同步硝化反硝化的重要因素.

表 2 DO 恒定在 1mg/L 左右时 pH 值对膜生物反应器同步硝化反硝化的影响/mg·L<sup>-1</sup>

Table 2 Effect of pH value on simultaneous nitrification and denitrification in MBR with 1mg/L of DO

pH	COD			$\text{NH}_4^+$			TN		
	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
4.8	639.9	58.61	90.84	21.53	5.38	75.01	19.27	8.83	54.18
4.76	628.6	23.5	96.26	20.67	11.75	43.15	21.1	13.4	36.49
7.1	624	12.54	97.99	22.62	0	100	23.21	2.39	89.7
7.3	631	15.6	97.53	21.8	0.06	99.73	20.63	1.98	90.4
9.6	621.64	46.8	92.87	20.35	4.98	75.53	21.2	9.4	55.67
9.7	630.2	50.64	91.97	22.37	5.5	75.41	23.06	8.78	61.93

#### 4 膜生物反应器同步硝化反硝化的机理探讨

在菌胶团这样一个微生态系统中,细菌种群数量繁多,各种群之间存在互惠互利、拮抗、捕食等多种复杂的相互关系,各种群都具有自己独特的生理生化机能,有些是共同的,有些是特有的,有些在某些生理生化反应进行的基础上才能进行。

如图 5 所示<sup>[1]</sup>,要维持菌胶团具有同步硝化和反硝化的机能,就要使菌胶团这个微生态系统同时具有好氧区和缺氧区,要保持这样一个稳定状态,就得使这个微生态系统各生态因子保持稳定.影响同步硝化反硝化的生态因子有 pH、温度、DO、F/M、C/N 等.硝化反应的最适 pH 为 8.0~8.4,而反硝化最适 pH 在 6.5~7.5,所以同步硝化反硝化的最适 pH 应在 7.5 左右.本试验基本证实了这一点.硝化反应的最适温度为 20℃~30℃,而反硝化的最适温度为 20℃~40℃.温度低于 15℃时,反硝化菌的增殖速率降低,代谢速率也降低,从而降低了反硝化速率.本试验的反应温度控制在 24℃.发生硝化反应的 DO 不应低于 1mg/L,低于这一值硝化反应将受到严重抑制,本试验也很好地证实了这一点,DO 在 1~1.5mg/L 时,就能很好地发生硝化反应,而 DO 在 0.5~0.7mg/L 时,硝化反应受到严重抑制.而反硝化反应的 DO 应控制在 0.5mg/L 以下,高于此值,反硝化反应将严重受到抑制<sup>[2]</sup>.但要同时发生硝化和反硝化反应,DO 不应太高,否则,菌胶团内部就

会处于好氧状态.

在底物方面,好氧区的异养好氧菌和缺氧区的反硝化菌之间存在生态位的重叠,即为了生存将竞争共同的有机物.由于好氧区的异养好氧菌处于污泥絮体的外层空间,更易从主体区获得食物.而缺氧区的反硝化菌由于处于外层的异养好氧菌的包围之中,要获得有机物,有机物必须由主体区通过好氧区扩散至缺氧区,在这一过程中,有机物就会被好氧区的异养好氧菌大量吸收,从而减少了扩散至缺氧区的有机物量,这便会抑制反硝化作用.

为了解决这一矛盾,可由 3 方面的因素加以调节,①有机物的量不应太少,也就是 F/M 不应太小,当有机物充足 DO 又受控时,污泥絮体的好氧区细菌活性不是太高,有机物会剩下许多从而扩散至缺氧区;②DO 不应太高,DO 太高,氧的穿透能力增强,使得污泥絮体的内部难以形成缺氧区,或者是形成的缺氧区总体积减少,DO 太高还可使污泥絮体好氧区的异养好氧菌活性增强,有机物的氧化速率提高,污泥絮体内部即使有缺氧区,也因无碳源或碳源不足使反硝化能力下降.另外,DO 受控在 1mg/L 左右时,上清液 COD 会略有上升,这样主体区的有机物浓度就高一些,利于扩散至污泥絮体内部的缺氧区,为反硝化提供有机物;③短程硝化-反硝化生物脱氮. Laanbroek<sup>[3]</sup>的研究表明,低 DO 下亚硝酸大量积累是由于亚硝酸菌对氧的亲合力较硝酸菌强.亚硝酸菌饱和常数一般为 0.2~0.4 mg/L,硝酸菌为 1.2~1.5mg/L.根据这一理论,本试验在 DO 控制在 1mg/L 左右时,氨应经亚硝化产生大量的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,而实际上 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 在反应器中积累很少,这是因为,在如此低的 DO 条件下,在污泥絮体内部很容易形成缺氧区,形成的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 可直接扩散至缺氧区被反硝化掉.短程硝化-反硝化生物脱氮可减少对有机物和氧的需要,因为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 不需氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,所以减少了对氧的需求.

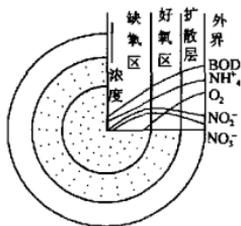
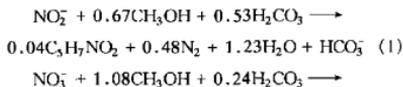


图 5 污泥体内 DO 和基质浓度的分布示意图

Fig. 5 Pattern of DO and substrate concentration in sludge



$0.056C_2H_7NO_2 + 0.47N_2 + 1.68H_2O + HCO_3^-$  (2)  
由(1)和(2)式中可以计算出,每还原 1g  $NO_2^-$  和 1g  $NO_3^-$  为  $N_2$  时,分别需要甲醇 1.53g 和 2.47g<sup>[4]</sup>。在 MBR 中,同步硝化反硝化的实现是在各生态因子的协调下发生的,各因子之间相互联系、相互制约,某一生态因子总是在其它生态因子满足条件的情况下,才能发挥其应有的作用。

膜生物反应器中,在各生态因子较稳定的条件下,即使某一生态因子发生微小的变动,污泥絮体也能自身进行调节,保证同步硝化反硝化的正常进行。如 DO 略有上升,则会使污泥絮体好氧区的异养好氧菌活性增强,消耗掉多余的 DO,但这会使污泥絮体的缺氧区体积缩小。另外,有机物也会消耗得较多,供应缺氧区反硝化菌的有机物减少,从而降低反硝化能力,但至少经过这些变化还是能保证一定的同步硝化反硝化能力。有机物的略有上升或下降,也会使异养好氧菌、亚硝酸菌、硝酸菌、反硝化菌的活性作用相应地改变,从而相互协调以便更好地进行同步硝化反硝化。膜生物反应器对 pH 也有很好的协调作用,虽然硝化反应每氧化 1g 氨氮要消耗碱度 7.14g (CaCO<sub>3</sub> 计),而反硝化时每还原 1g  $NO_3^-$  产生 3.5g 的碱度,即使是在短程硝化-反硝化即由  $NO_2^-$  直接传至缺氧区进行反硝化也能产生碱度,从而可补偿硝化反应带来的碱度降低。正是因为反应器中的生态系统具有自身调节的能力,所以各因素有一定的波动对同步硝化反硝化没有太大的影响,这也便于在生产上进行灵活的控制。

在同步硝化反硝化中还存在“食物链”的关系,异养好氧菌氧化有机物时通过氨化作用产生的氨为亚硝酸菌和硝酸菌提供了底物,而亚硝酸菌产生的  $NO_2^-$  又为硝酸菌提供了底物,同时,亚硝酸菌和硝酸菌产生的  $NO_2^-$  和  $NO_3^-$  又为反硝化菌提供了底物。所以各种群之间存在互生的相互关系。

## 5 结论

(1)膜生物反应器中,MLSS 为 8000 ~

9000mg/L,反应器温度为 24℃,进水 COD、 $NH_4^+$  分别为 523~700mg/L 和 17.24~24mg/L 的相对稳定条件下,当 DO 为 6mg/L、3mg/L、1mg/L、0.5mg/L 左右时,对 COD、 $NH_4^+$ 、TN 的去除率分别为 98%、99%、60%;96.5%、98%、75%;96%、95%、92%;90%、70%、60%。从以上可以看出,当 DO 在 1mg/L 以上时,随着 DO 的下降,MBR 对 COD、 $NH_4^+$  的去除率略有下降,但对 TN 的去除效果却有较大的提高。

(2)MBR 在 DO 为 1mg/L、C/N 比在 20~30 左右时对 COD、 $NH_4^+$ 、TN 的去除率都很高;C/N 比为 10 左右时对 COD 的去除率仍很高,但对  $NH_4^+$ 、TN 的去除率都有较大的下降;C/N 比为 5 左右时对 COD 的去除率无多大的影响,但  $NH_4^+$ 、TN 的去除率下降很多。所以要获得较好的同步硝化反硝化效果,各生态因子都要保持相对的稳定,若某一生态因子变化太大,将破坏同步硝化反硝化良好的效果。本试验是在 C/N 比为 30 左右长期运行的,所以 C/N 比的改变只能说明抗冲击负荷的影响,并不能说明在某一 C/N 比下不能达到较好的效果。

(3)进水 pH 在 4.76~9.7 之间对 COD 的去除影响不是很大,但对  $NH_4^+$ 、TN 的去除影响很大,说明 pH 值也是影响 MBR 同步硝化反硝化的重要生态因子。

(4)当生态因子 C/N 比约 30、进水 pH 约 7.2 左右、反应器温度为 24℃、DO 为 1mg/L 左右时,对 COD、 $NH_4^+$ 、TN 的去除率都很高,同步硝化反硝化在反应器中起到了很好的作用,这一条件为本试验的最佳条件。

## 参考文献:

- 1 高廷耀,周增炎等.生物脱氮工艺中反硝化现象[J].城市给排水,1998,24(12):6~9.
- 2 张自杰主编.排水工程下册[M],第三版.中国建筑工业出版社出版,1996.276~279.
- 3 Laanbroek H J, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacteria* winogradskyi grown in mixed continuous cultures[J]. Arch Microbiology, 1993, 159:453~459.
- 4 郑兴灿,李亚新编著.污水脱磷除氮技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.51.