

两级序批式 MBR 与单级好氧 MBR 对比试验研究

元新艳¹, 沈恒根¹, 孙磊³, 王琳², 李世峰²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266003; 3. 宜兴台兴环保有限公司, 宜兴 214204)

摘要:针对 MBR 在应用中存在的脱氮除磷效率低、膜污染严重等问题, 提出两级序批式 MBR 工艺, 并与单级好氧 MBR 进行了对比试验研究. 结果表明, 两级序批式 MBR 不但具有 SBR 脱氮除磷的优势, 而且解决了单泥工艺存在的脱氮除磷矛盾问题, 在稳定运行阶段, 膜出水 NH_4^+-N 、TN、TP 平均值分别为 2.83 mg/L、12.20 mg/L、0.42 mg/L, 满足国内城市景观环境用水水质要求; 在控制膜污染方面, 两级序批式 MBR 的膜前混合液 SMP 值、EPS 值、膜比流量下降速率、膜污染阻力均明显低于单级好氧 MBR, 尤以外部沉积阻力降低最为显著, 仅为单级好氧 MBR 的 6.5%, 其次是凝胶极化阻力, 为单级好氧 MBR 的 33.12%. 这说明, 两级序批式 MBR 不但具有高效的去除氮、磷等污染物的能力, 而且可以有效降低沉积污染及凝胶层污染, 与单级好氧 MBR 相比, 可以在更高的膜通量下运行, 保持更低的膜污染速率, 达到更优的污染物去除效果.

关键词: 两级序批式 MBR; 单级好氧 MBR; 脱氮; 除磷; 膜污染

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)01-0206-06

Comparison Research on Two-stage Sequencing Batch MBR and One-stage MBR

YUAN Xin-yan¹, SHEN Heng-gen¹, SUN Lei³, WANG Lin², LI Shi-feng²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 3. Taixing Environtech Co. Ltd., Yixing 214204, China)

Abstract: Aiming at resolving problems in MBR operation, like low nitrogen and phosphorous removal efficiency, severe membrane fouling and etc, comparison research on two-stage sequencing batch MBR (TSBMBR) and one-stage aerobic MBR has been done in this paper. The results indicated that TSBMBR owned advantages of SBR in removing nitrogen and phosphorous, which could make up the deficiency of traditional one-stage aerobic MBR in nitrogen and phosphorous removal. During steady operation period, effluent average NH_4^+-N , TN and TP concentration is 2.83, 12.20, 0.42 mg/L, which could reach domestic scenic environment use. From membrane fouling control point of view, TSBMBR has lower SMP in supernatant, specific trans-membrane flux deduction rate, membrane fouling resistant than one-stage aerobic MBR. The sedimentation and gel layer resistant of TSBMBR was only 6.5% and 33.12% of one-stage aerobic MBR. Besides high efficiency in removing nitrogen and phosphorous, TSBMBR could effectively reduce sedimentation and gel layer pollution on membrane surface. Comparing with one-stage MBR, TSBMBR could operate with higher trans-membrane flux, lower membrane fouling rate and better pollutants removal effects.

Key words: two-stage sequencing batch MBR; one-stage aerobic MBR; nitrogen removal; phosphorous removal; membrane fouling

膜生物反应器 (membrane bioreactor, MBR) 以其高品质出水在中水回用领域有着广阔的应用前景, 是一种先进的污水处理回用技术^[1]. 但在实际应用过程中, 存在着同步脱氮除磷效果不佳、膜污染严重^[2, 3]等问题. 为此研究者们提出了很多改进工艺类型^[4, 5]. 序批式 MBR 可以改善膜过滤过程的水力条件, 改变混合液特性, 与单级好氧 MBR 相比, 可以保持更低的膜污染速率^[6, 7]. 但目前提出的序批式 MBR, 存在着多种微生物在同一反应器中混合培养所导致的脱氮与除磷之间矛盾问题, 如泥龄不同、碳源之争、硝酸盐的影响, 使得脱氮除磷无法同时优化完成^[8]. 基于两级 SBR (sequencing batch reactor)

串联运行的双泥工艺-两级序批式 MBR^[9], 将脱氮与除磷分别控制在 2 个反应器中进行, 可以解决脱氮除磷矛盾问题、膜污染问题. 本试验就两级序批式 MBR 与单级好氧 MBR 进行对比研究, 以揭示两级序批式 MBR 在脱氮除磷及控制膜污染方面的优化性, 以为工程应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置及工艺流程

收稿日期: 2010-01-19; 修订日期: 2010-04-23

基金项目: 上海市教委重点学科建设项目 (B604)

作者简介: 元新艳 (1969 ~), 女, 博士, 主要研究方向为水污染控制及大气污染控制, E-mail: pjxyxy@163.com

两级序批式 MBR (two stage sequencing batch MBR, TSBMBR) 由 2 套反应器 (SBR1 和 SBMBR2) 串联组成, 分别按照所设定工况序批式运行. SBR1 以瞬时进水、厌氧搅拌 45 min, 好氧曝气 45 min, 沉淀 20 min, 排上清液至 SBMBR2、闲置 10 min, 完成每个周期运行; SBMBR2 以瞬时进水 (SBR1 上清液 + 外加碳源)、缺氧搅拌 60 min, 空曝 10 min, 曝气间歇抽滤出水 50 min, 完成每个周期运行. 系统每 2 h 为 1 个运行周期, 每天运行 12 个周期. 试验装置如图 1 所示.

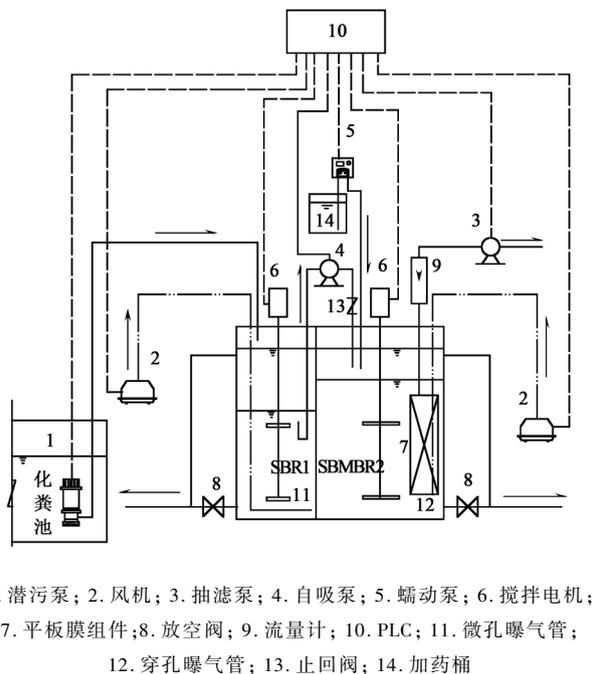


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

单级好氧 MBR 由 1 套反应器构成, 反应器尺寸同 SBMBR2, 连续进水、连续曝气、间歇抽滤出水, 进水工艺装置同 SBR1, 曝气、出水、排泥等工艺装置同 SBMBR2.

1.2 主要工艺参数

TSBMBR 总有效容积 0.546 m^3 , 其中 SBR1 有效容积 0.189 m^3 , SBMBR2 有效容积 0.357 m^3 . 运行初始膜通量 100 L/h , 初始产水量 $0.99 \text{ m}^3/\text{d}$, 初始水力停留时间 15 h . SBR1 以除磷为主要目的 (同时去除大部分有机物), 高负荷低泥龄运行, 有机负荷 (COD/MLSS, 下同) 为 $0.3 \sim 0.7$, 泥龄 $5 \sim 7 \text{ d}$, 运行期间污泥质量浓度 $3.5 \sim 4.1 \text{ g/L}$; SBMBR2 以脱氮为主要目的, 低负荷高泥龄运行, 有机负荷 $0.1 \sim 0.2$, 泥龄 25 d , 运行期间污泥质量浓度 $5.9 \sim 15.1 \text{ g/L}$.

单级好氧 MBR 有效容积 0.357 m^3 , 运行初始膜通量 61 L/h , 初始产水量 $1.32 \text{ m}^3/\text{d}$, 初始水力停留时间 6.5 h , 泥龄 25 d , 运行期间污泥质量浓度 $5.9 \sim 16.1 \text{ g/L}$.

采用改性聚醚砜平板超滤膜组件, 膜孔径 $0.038 \mu\text{m}$, 膜有效面积 4 m^2 . 抽滤泵开: 停 = 270 s : 30 s .

试验用水取自社区生活污水. COD $160.5 \sim 331.3 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ $41.2 \sim 68.3 \text{ mg/L}$, TN $60.3 \sim 79.0 \text{ mg/L}$, TP $4.2 \sim 6.7 \text{ mg/L}$, pH $6.5 \sim 8.2$, 水温 $20 \sim 25^\circ\text{C}$. 接种污泥取自城市污水处理厂曝气池回流污泥.

1.3 分析方法

COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 采用颁布的标准方法进行测定^[10].

活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的提取采用蒸气法^[11]: 将活性污泥样品放入高压灭菌锅中, 在 80°C 、 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 压力下蒸 10 min , 以 8000 r/min 离心 10 min , 在离心过程中, 温度降至 15°C . 用孔径的滤膜过滤, 测定滤液中的蛋白、多糖含量.

溶解性微生物产物 (SMP) 的测定^[12]: 将反应器中的污泥混合液离心后用 $0.22 \mu\text{m}$ 孔径的滤膜过滤, 测定滤液中的蛋白、多糖含量.

多糖采用苯酚-硫酸法^[13]、蛋白质采用考马斯亮蓝法测定^[14].

2 结果与讨论

2.1 污染物处理效果

TSBMBR 通过运行条件的控制, 在 2 个反应器内分别培养出适合于各自生境的优势菌群, 形成先除磷后脱氮的运行模式. SBR1 以高负荷低泥龄运行, 抑制和淘汰生长缓慢的硝化菌, 培养聚磷菌成为优势菌群, 实现高效除磷的同时去除有机污染物; SBMBR2 以低负荷高泥龄运行, 培养硝化反硝化菌成为优势菌群, 实现高效脱氮. 经过 2 个月的运行, 系统脱氮除磷效果好, COD 亦得到了同步去除. 而单级好氧 MBR, 由于曝气及长泥龄的作用, 有机物氧化及生物硝化作用进行较彻底, 仅能高效去除 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 但不能同步脱除 TN、TP.

如图 2、图 3 所示, TSBMBR 的脱氮除磷效果明显好于单级好氧 MBR. TSBMBR 在运行 52 d 之后, TSBMBR 最终出水 TN 平均浓度 12.20 mg/L , TP 平均浓度 0.42 mg/L , 平均去除率分别达 81.20% 和 92.85% , 满足城市污水再生利用景观环境用水对

TN、TP 浓度的要求^[15]. TP 的去除主要是在 SBR1 反应器内完成, SBR1 出水 TP 平均浓度为 1.5 mg/L; SBMBR2 反应器内因生物同化作用及超滤膜的高效截留作用使得 TP 进一步得到去除. TN 的去除主要是在 SBMBR2 反应器内完成. 而单级好氧 MBR 在整个试验期间,膜出水 TN、TP 浓度仅有少量下降,平均去除率分别为 12%、5.32%,主要是生物同化作用的结果.

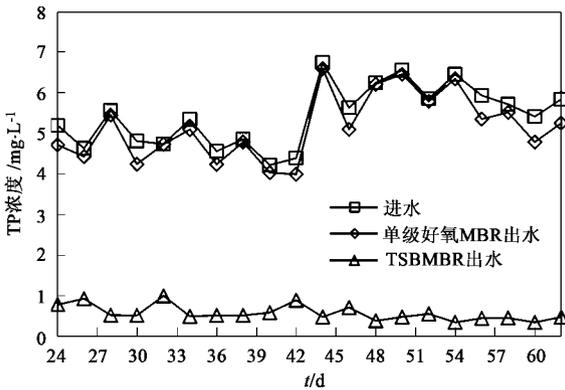


图 2 TP 处理效果

Fig. 2 TP removal efficiency

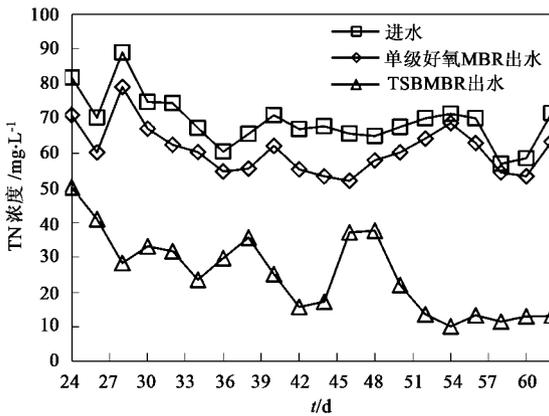


图 3 TN 处理效果

Fig. 3 TN removal efficiency

如图 4、图 5 所示,2 套系统均取得了良好的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 脱除效果. 在运行 52 d 之后, TSBMBR、单级好氧 MBR 最终出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度分别达 2.83 mg/L、3.73 mg/L,满足城市污水再生利用景观环境用水对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的要求^[15];最终出水 COD 平均值分别达 24.81 mg/L、39.47 mg/L. 本试验所采用的超滤膜截留相对分子质量为 15×10^4 . 对有机污染物的高效降解及超滤膜对大分子有机污染物的高效截流,保证了 2 套 MBR 系统的高品质出水. TSBMBR 中, COD 的去除主要是在 SBR1 反

应器内完成,平均去除率达 85.46%,在 SBMBR2 内进一步得到去除,平均总去除率达 90.36%; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 SBR1 内仅有少量下降(下降幅度 $< 10 \text{ mg/L}$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除主要是在 SBMBR2 内好氧硝化阶段完成.

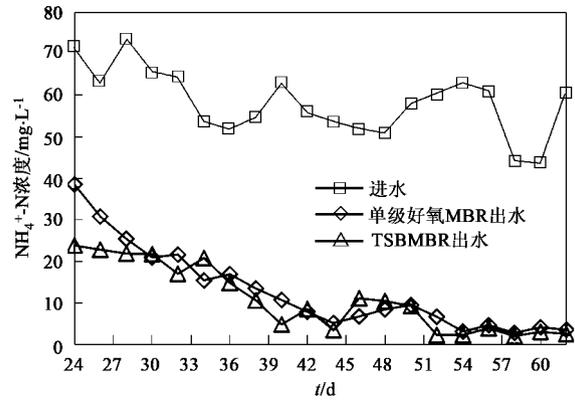


图 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理效果

Fig. 4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency

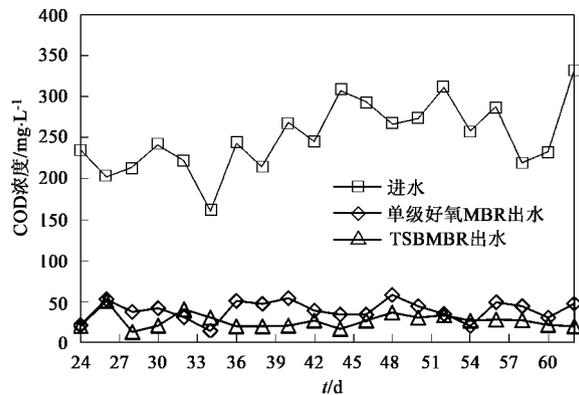


图 5 COD 处理效果

Fig. 5 COD removal efficiency

2.2 膜污染

2.2.1 膜污染阻力分布

膜污染阻力模型为:

$$J = \frac{\Delta p}{\mu R_t} = \frac{\Delta p}{\mu(R_m + R_p + R_{ef} + R_{if})} \quad (1)$$

式中, J 为膜通量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Δp 为膜两侧压差, Pa; μ 为透过液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_t 为过滤总阻力, m^{-1} ; R_m 为清洁膜固有的阻力; R_p 为凝胶极化阻力; R_{ef} 为外部沉积阻力; R_{if} 为内部污染阻力.

在对比运行 42 d 之后,2 个系统的膜污染阻力分布如图 6 所示. 单级好氧 MBR 的膜污染阻力值明显高于 TSBMBR,且以外部污染阻力 ($R_{ef} + R_p$) 为主,占到了自身总阻力的 75.39%. TSBMBR 的各污

染阻力值均明显低于单级好氧 MBR, 以外部沉积阻力 R_{ef} 最为显著, 仅为单级好氧 MBR 的 6.5%; 其次

是凝胶极化阻力 R_p , 为单级好氧 MBR 的 33.12%。这说明, 序批式运行方式可以有效降低膜污染。

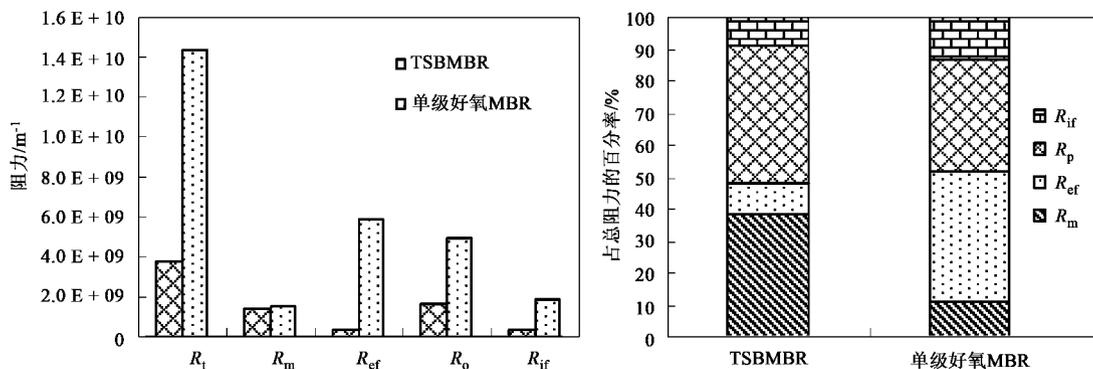


图 6 平板膜污染阻力分布

Fig. 6 Resistance distribution of flat-sheets membrane

有研究表明, 胞外多聚物 (soluble microbial products, EPS)、溶解性微生物代谢产物 (extracellular polymeric substances, SMP) 及细微胶体对形成凝胶层、导致膜通量下降有重要影响^[16, 17]. 2 个系统的凝胶极化阻力 R_p 均占有较大比重, TSBMBR 的 R_p 占总阻力的 43.09%, 单级好氧 MBR 的 R_p 占总阻力的 34.64%。这说明, 随着超滤的进行, 微生物代谢产生的蛋白质、多糖类黏性物质和一些胶体在膜表面形成了结构致密的凝胶层, 正是这种凝胶层增加了过滤阻力, 降低了过膜通量。

2.2.2 膜比流量变化

两级系统中的 SBMBR2 反应器以 A/O = 60 min/60 min 序批式运行, 且在好氧抽滤开始的前 10 min 为空曝。这种序批式间歇运行与空曝相结合的运行方式, 可以减缓浓差极化, 有效降低沉积污染及凝胶层污染。由图 7 可以看出, SBMBR2 的膜比流量下降速率明显小于单级好氧 MBR, 系统在运行 42 d 之后, 膜比流量从 $6.60 \times 10^{-3} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{Pa})$ 下降至 $3.83 \times 10^{-3} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{Pa})$, 降低了 42%; 而单级好氧 MBR, 膜比流量从 $6.04 \times 10^{-3} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{Pa})$ 下降至 $1.49 \times 10^{-3} \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{Pa})$, 降低了 75%。可见, 序批式间歇运行与空曝结合的运行方式可以使 MBR 在更高膜通量下运行, 而膜污染速率却更低。

2.2.3 微生物代谢产物的影响

EPS、SMP 是微生物正常代谢产生的黏性物质, 产生于微生物的基质分解和内源呼吸过程, 主要成分是多糖、蛋白质等聚合物^[18, 19], 这些含有活性基团的大分子物质沉积并吸附在膜表面, 形成黏结性很强的凝胶层, 对膜污染有重要影响。

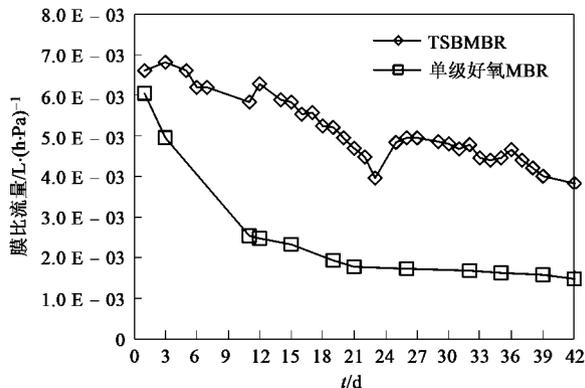


图 7 膜比流量的变化

Fig. 7 Variation of specific membrane flux

EPS、SMP 中, 多糖和蛋白质约占 EPS 总量的 70% ~ 80%^[20]. 本试验以测定 MBR 混合液中的多糖和蛋白总量来表征 SMP、EPS 含量。由图 8、图 9 可见, 2 个系统的混合液中 SMP、EPS 值均出现积累。但 TSBMBR 的 SMP、EPS 值要低于单级好氧 MBR, 且增长速度缓慢, 比较稳定; 单级好氧 MBR 的 SMP、EPS 值在试验后期增长较快, SMP 值的增长速度要高于 EPS 的增长。这也正是 TSBMBR 的凝胶极化阻力远低于单级好氧 MBR 的主要原因。

一般 (从微生物学角度) 将 SMP 分为两类: 一类是基质分解过程中产生的微生物产物 (UAP), 另一类是微生物细胞内源呼吸过程中产生的微生物产物 (BAP)^[22]. 有学者将 EPS 分为两类: 束缚性 EPS 和溶解性 EPS^[21]. SMP 与 EPS 有一种动态平衡的关系。微生物内源呼吸过程中, 束缚性 EPS 水解成 BAP^[18]. 造成膜污染的 SMP 中, 数千分子量的肽类

有机物主要吸附于膜孔内,造成膜孔堵塞;数百万分子量的多糖、蛋白质类主要吸附于膜表面,形成凝胶层^[22]. SMP 的可生物降解性较差,但在经过长时间的运行后可以被微生物部分降解^[23]. 伴随着污泥浓度的提高以及污泥的驯化,污泥对 SMP 的降解能力逐步增强. 由 EPS 水解产生的 SMP 可以很好地被微生物作为营养基质所降解^[24]. TSBMBR 的上清液 SMP 值比较稳定,是因为 SBMBR2 在好氧过程中,异养菌只有少量难生物降解的有机底物可供利用,经过反复周期性的培养驯化,可使 SBMBR2 内的异养菌适应于难降解的有机物,提高了 SMP 的降解速率.

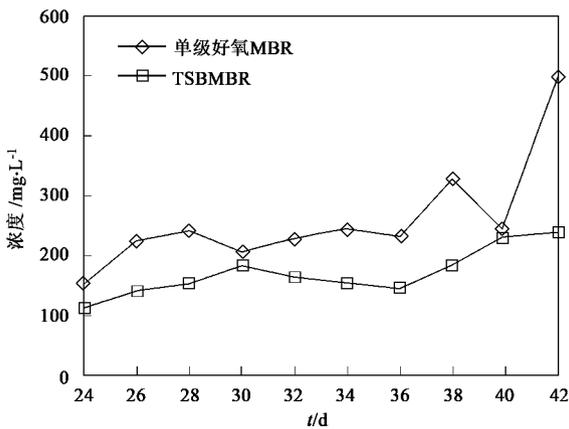


图 8 上清液中 SMP 的变化

Fig. 8 Variation of SMP in the supernatant with time

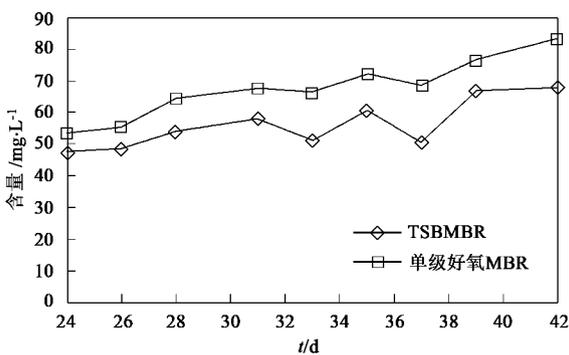


图 9 混合液中 EPS 的变化

Fig. 9 Variation of EPS in the mixed liquid with time

3 TSBMBR 工艺优势分析

TSBMBR 在脱氮除磷及控制膜污染方面均明显好于单级好氧 MBR, 可以从以下 4 个方面进行分析.

(1) 试验所采用的膜组件的临界膜通量为

120 L/h, TSBMBR 以接近临界值的较高膜通量运行, 是为了保证高的产水量. 如表 1 所示, 运行初期, 单级好氧 MBR 的膜通量是 TSBMBR 的 61%, 产水量是 TSBMBR 的 1.33 倍, 但在运行 42 d 之后, 2 套系统的产水量已接近, 单级好氧 MBR 的膜通量下降较快, 不足 TSBMBR 的一半, 过膜压差却高于 TSBMBR, 膜比流量仅为 TSBMBR 的 38.85% (如图 7). 这说明, 两级序批式运行模式可以使 MBR 在更高的膜通量下运行, 保持更低的膜污染速率, 更稳定的产水量.

表 1 运行参数对比

Table 1 Comparison of operating parameters

项目	膜通量		过膜压差		产水量	
	/L·h ⁻¹		/Pa		m ³ ·d ⁻¹	
	初始	42 d 后	初始	42 d 后	初始	42 d 后
TSBMBR	100	85	1.21 × 10 ⁴	2.22 × 10 ⁴	0.99	0.77
单级好氧 MBR	61	39	1.01 × 10 ⁴	2.63 × 10 ⁴	1.32	0.84

(2) 在单级好氧 MBR 中, 由于连续曝气的作用, 生物硝化作用进行较彻底, 但无法实现同步脱氮除磷. 如需要提高脱氮除磷效率, 需要设置缺氧厌氧段, 延长水力停留时间, 那么池容必定会大于 TSBMBR. 而 TSBMBR 不但具有 SBR 脱氮除磷的优势, 而且解决了单级 SBR 中存在的多种微生物在同一反应器中混合培养所导致的脱氮除磷之间矛盾问题, 如泥龄不同、碳源之争、硝酸盐的影响等问题, 从而可以更好地实现同时脱氮除磷的目标; 序批式运行模式, 可以保持更低的耗氧成本.

(3) 随着污泥浓度的增加, 2 套 MBR 系统的污泥负荷 (F/M) 值逐渐降低. 较低的 F/M 值导致微生物处于贫营养状态, 强化微生物进入内源代谢过程^[25], 引起微生物加速释放微生物代谢产物, 导致 EPS 加速向生物生长相关产物 BAP 转化, SMP 浓度增加并在膜前积累. SBMBR2 异养菌在好氧过程中只有难生物降解的有机底物可供利用, 经过反复周期性的培养驯化, 已适应于难降解的有机物, 一些难被单级好氧 MBR 微生物降解的 SMP 可以被部分降解. 由于 SMP 对膜污染起了非常重要的作用^[26], 因此 TSBMBR 较单级好氧 MBR 有利于减缓膜污染.

(4) SBMBR2 在好氧出水阶段, 因抽滤作用, 膜表面的污泥浓度大于混合液的污泥浓度; 在缺氧混合阶段, 膜面抽滤作用消失, 在搅拌器混合作用下, 因浓度梯度的存在产生了反向扩散现象, 即在膜表面形成的滤饼层开始变得疏松并向混合液主体扩

散.因此 TSBMBR 的外部污染阻力要低于单级好氧 MBR.同时,SBMBR2 在每个运行周期内均有 10 min 的空曝时间,这种自清洗功能可以减缓浓差极化现象,有效降低沉积层污染及凝胶层污染.因此,TSBMBR 可以有效延缓膜污染,是序批式间歇运行与空曝的结合起到了关键性作用.

4 结论

(1) TSBMBR 不但具有 SBR 脱氮除磷的优势,而且解决了单泥工艺中存在的脱氮除磷之间矛盾问题,从而可以更好地实现同时脱氮除磷的目标.在稳定运行阶段,膜出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、TP 平均值分别为 2.83、12.20、0.42 mg/L,满足国内城市景观环境用水水质标准.

(2) 序批式、膜间歇运行与空曝相结合的运行方式可以减缓浓差极化,有效降低沉积污染及凝胶层污染.与单级好氧 MBR 相比,TSBMBR 可以在更高的膜通量下运行,保持更低的膜污染速率.

参考文献:

[1] 刘爱萍,李开明,陈中颖,等.一体式膜生物反应器污水资源化技术研究[J].环境科学与技术,2006,29(8):5-8.

[2] Yang W, Cicek N, Ilg J. State-of-the-art of membrane bioreactors worldwide research and commercial applications in North America [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 270 (1/2): 201-211.

[3] Meng F, Zhang H, Yang F. Characterization of cake layer in submerged membrane bioreactor[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(11):4065-4070.

[4] 欧阳雄文,谌建宇,余健.MBR 在脱氮除磷方面的最新研究与进展[J].工业水处理,2005,25(6):9-12.

[5] 张岩颖,刘志强,苗群.MBR 处理工艺的新发展[J].环境科学导刊,2007,26(2):41-43.

[6] Seo G T, Lee T S, Moon B H, et al. Two stage intermittent aeration membrane bioreactor for simultaneous organic, nitrogen and phosphorus removal [J]. Water Science and Technology, 2000, 41(10/11):217-225.

[7] 张捍民,肖景霓,成英俊,等.强化膜生物反应器脱氮除磷性能对比试验研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 242-248.

[8] 龙北生,孙大群,边德军,等.采用两级 SBR 工艺优化除磷脱氮[J].给水排水,2003,29(11):34-37.

[9] 元新艳,沈恒根,王琳,等.两级序批式 MBR 除磷特性实验研究[J].环境工程学报,2010,4(3):558-560.

[10] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版)北京:中国环境科学出版社,2002.

[11] Bouhabila E H, Aïm R B, Buisson H. Microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling (application to wastewater treatment) [J]. Desalination, 1998, 118 (1-3): 315-322.

[12] Huang H, Liu R, Qian Y. Behavior of soluble microbial products membrane bioreactor[J]. Process Biochemistry, 2000, 36(5): 401-406.

[13] 付焱,郭毅,张嫡群,等.欧亚旋覆花中多糖的苯酚-硫酸法测定[J].中草药,2006, 37(4): 544-546.

[14] 王孝平,邢树礼.考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究[J].天津化工,2009,23(3):40-41.

[15] GB/T18921-2002,城市污水再生利用景观环境用水标准[S].

[16] 李绍峰,崔崇威,黄君礼.胞外聚合物 EPS 对 MBR 膜污染的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2):266-269.

[17] 张海丰,孙宝盛,赵新华,等.膜生物反应器中溶解性微生物代谢产物的产出 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 539-542.

[18] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products and active and inert biomass[J]. Water Research, 2002, 36:2711-2720.

[19] Gao M C, Yang M, Li H Y, et al. Nitrification and sludge characteristics in a submerged membrane bioreactor on synthetic inorganic wastewater [J]. Desalination, 2004, 170(2): 177-185.

[20] Houghton J I, Stephenson T. Effect of influent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability [J]. Water Research, 2002, 36:3620-3628.

[21] 王金翠,孙宝盛.污水生物处理中微生物次级代谢产物的研究进展 [J]. 给水排水, 2007, 33:170-174.

[22] 刘锐,黄霞,范彬,等.膜-生物反应器中溶解性微生物产物的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(1):1-7.

[23] Lee W, Kang S, Shin H. Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors [J]. Journal of Membrane Science, 2003, 216(1/2): 217-227.

[24] 齐庚申,陈谊,孙宝盛,等.膜生物反应器中贫营养条件下 SMP 的产出研究[J].环境科学与技术,2010,33(2):52-56.

[25] Rosenberger S, Laabs C, Lesjean B, et al. Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [J]. Water Research, 2006, 40(4): 710-720.

[26] 张海丰,孙宝盛,赵新华,等.溶解性微生物产物对浸没式膜生物反应器运行的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29(1): 82-86.