

回流对间歇式 A/O-MBR 脱氮除磷影响的中试研究

丁 安¹, 梁 恒¹, 郭五珍², 叶挺进², 陈 杰³, 饶欠平², 李圭白¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨;

2. 佛山市水业集团有限公司, 528305 广东 佛山; 3. 苏州立升膜分离科技有限公司, 215152 江苏 苏州)

摘 要: 为进一步提高佛山某污水厂(CASS工艺)出水水质使其达到中水回用标准,以该厂污水为对象进行中试规模研究,探讨回流比和回流方式对间歇式缺氧/好氧膜生物反应器(A/O-MBR)脱氮除磷的影响. 结果表明:回流方式和回流比对间歇式 A/O-MBR 去除 COD_{Cr} 和 NH_4^+-N 效果无显著性影响,出水 COD_{Cr} 和 NH_4^+-N 均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)一级 A 标准;回流比和回流方式对系统去除 TN 和 TP 的效果均有显著影响,连续回流且回流比较大(350%)时,系统对 TN 和 TP 的去除效果均较差;回流比为 130% 时,连续回流有利于系统对 TN 的去除,去除率可达 $(48.00 \pm 10.05)\%$,出水 TN 可达一级 A 标准;回流比为 130% 时,间歇回流更有利于系统对 TP 的去除,去除率可达 $(78.27 \pm 23.41)\%$,出水 TP 满足一级 B 标准.

关键词: 缺氧/好氧膜生物反应器;回流比;回流方式;脱氮除磷

中图分类号: TU992.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)04-0033-05

Impact of reflux on nitrogen and phosphorus removal performance of a pilot scale of intermittent A/O-MBR

DING An¹, LIANG Heng¹, GUO Wuzhen², YE Tingjin², CHEN Jie³, RAO Qianping², LI Guibai¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. Foshan Water Group Co. Ltd., 528305 Foshan, Guangdong, China; 3. Suzhou Litree Ultrafiltration Membrane Technology Co. Ltd., 215152 Suzhou, Jiangsu, China)

Abstract: To enhance the quality of wastewater treatment plant's (CASS process) effluent in Foshan to satisfy the water reuse standards, the impact of reflux ratios and reflux modes on nitrogen and phosphorus removal performance of a pilot scale of intermittent A/O-MBR fed with municipal wastewater was studied in this paper. The results showed that the reflux ratios and reflux modes had no remarkable influence on removal of COD_{Cr} and NH_4^+-N , and the concentrations of COD_{Cr} and NH_4^+-N in the effluent both reached the primary standard A of < Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant > (GB18918—2002). The reflux ratios and reflux modes had significant influence on removal of TN and TP. The removal efficiencies of TN and TP were poor with a continuous reflux and a larger reflux ratio (350%); When the reflux ratio was 130%, the continuous mode was propitious to TN removal, and the removal efficiency could reach $(48.00 \pm 10.05)\%$, what's more, the concentration of TN in the effluent reached the primary standard A, while the intermittent mode was also propitious to TP removal, the removal efficiency could reach $(78.27 \pm 23.41)\%$, and the concentration of TP in the effluent reached the primary standard B.

Key words: A/O-MBR; reflux ratios; reflux modes; nitrogen and phosphorus removal

收稿日期: 2012-05-03.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038003);佛山市科技专项项目(2011AA10331);禅城区产学研项目(2011B1031).

作者简介: 丁 安(1986—),男,博士研究生;

李圭白(1931—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 梁 恒, hitliangheng@163.com.

与传统的活性污泥法相比,膜生物反应器(MBR)具有出水水质好,高效截留水中的颗粒物、细菌、大分子有机物等,反应器内生物量高,污泥产率低,占地面积小和结构紧凑等优点^[1-3],成为污水处理厂升级改造的较好选择. 佛山市某污

水处理厂现运行工艺为循环活性污泥 (Cyclic Activated Sludge System, CASS) 工艺, 处理能力为 8 万 t/d, 考虑对该污水厂进行升级改造, 即将浸没式超滤膜组件放入 CASS 工艺的主反应区. 膜过滤本身对污水总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的去除贡献较小, 提高 MBR 工艺脱氮除磷的效率主要取决于污水工艺自身, 因此, 如何将膜分离技术与活性污泥技术更好地有机结合并达到较好的出水水质仍需进一步研究.

回流作为活性污泥法工艺的重要控制参数之一, 对脱氮除磷起重要的作用^[4]. 与膜过滤技术结合后, 膜组件取代了二沉池, 回流也有了新的特点, 即污泥外回流和混合液内回流是相同的. 目前研究连续回流对污水脱氮除磷影响的报道较多^[4-7], 而有关间歇回流的报道相对较少. 本文通过建立处理能力为 24 m³/d 的间歇进水 A/O-MBR 工艺, 以污水处理厂的实际进水为原水, 系统研究回流比以及回流方式 (间歇式和连续式) 对间歇进水 A/O-MBR 工艺脱氮除磷的影响, 为污水厂对现有 CASS 工艺升级改造提供指导.

1 实 验

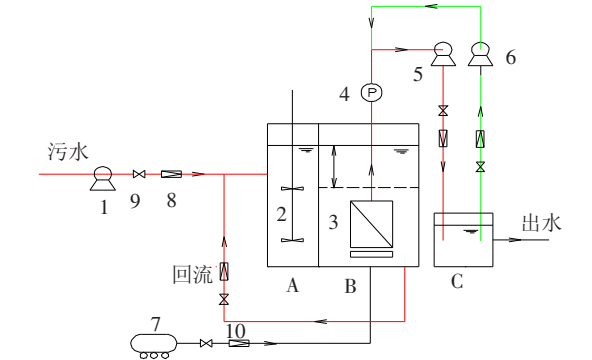
1.1 中试实验装置

中试装置位于佛山市某污水处理厂厂区内, 装置由钢板构成, 间歇式 A/O-MBR 工艺 (如图 1) 的总有效容积为 15 m³, 其中厌氧池 6 m³, 好氧池 9 m³, 有效深度 3 m, 处理规模为 24 m³/d. 浸没式超滤膜组件位于好氧池内, 膜材质为聚偏氟乙烯 (PVDF), 膜孔径 0.01 μm, 膜组件高度 2.2 m, 膜面积 150 m².

1.2 系统运行条件

系统采用间歇式进水, 每个运行周期为 3 h,

具体参数设置见表 1. 膜组件运行参数: 每个运行周期为 12 min, 即产水泵每运行 11 min 停止 1 min, 产水膜通量为 13.3 L/(m² · h); 产水泵停止 1 min 的同时开启反洗泵, 反洗通量为 40 L/(m² · h). 反洗水为系统的出水.



A—厌氧池; B—好氧池; C—清水池; 1—进水泵; 2—搅拌器; 3—膜组件; 4—压力传感器; 5—产水泵; 6—反洗泵; 7—鼓风机; 8—液体流量计; 9—阀门; 10—气体流量计.

图 1 间歇式 A/O-MBR 工艺中试流程图

表 1 间歇式 A/O-MBR 运行条件

阶段	t/min	流量/(m ³ · h ⁻¹)	曝气/(m ³ · h ⁻¹)
进水	30	6	—
抽吸	120	2	15
沉淀	30	—	—

1.3 进水水质

3 个月实验期间污水厂进水水质指标见表 2.

表 2 进水水质指标 mg · L⁻¹

指标	COD _{Cr}	ρ(TP)	ρ(TN)	ρ(NH ₄ ⁺ -N)
平均值	172.88 ± 60.43	3.87 ± 1.55	25.75 ± 4.40	20.37 ± 4.86

1.4 实验方案

分 3 个阶段考察回流方式以及回流比大小对间歇式 A/O-MBR 工艺脱氮除磷的影响, 每个阶段运行时间约为 30 d, 具体操作见表 3.

表 3 工艺的运行方式

阶段/d	回流比/%	回流方式	回流时段
1 ~ 33	350	连续	全程 180 min
33 ~ 63	130	连续	全程 180 min
63 ~ 95	130	间歇	进水阶段 30 min + 抽吸阶段前 60 min

1.5 分析方法

水质监测项目包括 COD_{Cr}、氨氮 (NH₄⁺-N)、亚硝氮 (NO₂⁻-N)、硝氮 (NO₃⁻-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、温度、pH、溶解氧 (DO)、混合液悬浮固体 (MLSS) 和混合液挥发性悬浮固体 (MLVSS) 的浓度. 其中, 温度、pH、DO 采用便携式测定仪 (WTW Oxi 340i) 测定; 其他化学类指标采用标准方法^[8]

进行测定, 一式 3 份. 数据统计分析采用 SPSS 软件, 数据作图采用 Origin 软件.

2 结果与讨论

回流比和回流方式对间歇式 A/O-MBR 工艺去除 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN、TP 的影响以及对厌氧区 DO 质量浓度的影响见表 4.

表4 回流比和回流方式对系统去除污染物和厌氧区DO质量浓度影响的单因素方差检验($\alpha=0.05$)					
项目	COD _{Cr} 去除	NH ₄ ⁺ -N去除	TN去除	TP去除	厌氧区DO
回流比	0.099	0.018	0	0	0
回流方式	0.189	0.664	0	0	0.214

2.1 回流比对间歇式A/O-MBR除污染的影响

2.1.1 回流比对COD_{Cr}和NH₄⁺-N去除的影响

从表4可以看出,采用连续回流的情况下,回流比对COD_{Cr}去除没有显著影响($P>0.05$),对NH₄⁺-N去除略有影响.从图2可见,回流比为130%和350%时,COD_{Cr}去除率分别为(86.92±5.24)%和(83.91±4.94)%,NH₄⁺-N去除率分别为(97.19±1.06)%和(98.04±0.90)%;此时,出水COD_{Cr}和NH₄⁺-N分别为(20±2)和(23±5)mg/L,(0.51±0.19)和(0.35±0.15)mg/L.

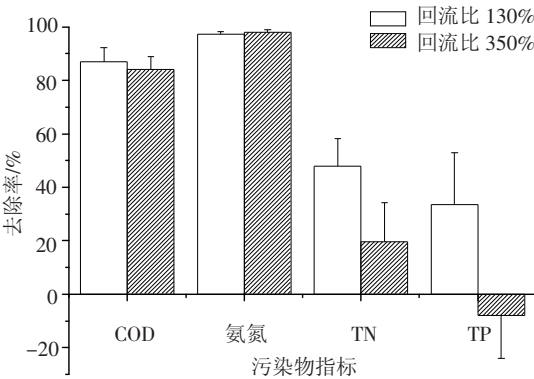


图2 不同回流比与各污染物指标去除率的关系

2.1.2 回流比对TN和TP去除的影响

从表4可以看出,采用连续回流的情况下,回流比对TN和TP去除均有显著性影响($P<0.05$).从图2可见,回流比为130%和350%时,TN去除率分别为(48.00±10.05)%和(19.65±14.45)%,TP去除率分别为(33.40±19.47)%和(-7.92±16.26)%;此时,出水TN和TP分别为(12.41±2.46)和(19.41±2.06)mg/L,(2.79±1.26)和(3.45±0.85)mg/L.

2.1.3 回流比对厌氧区DO、TP和NO₃⁻-N质量浓度的影响

厌氧区DO质量浓度、释磷情况以及NO₃⁻-N质量浓度都会直接影响系统出水TN和TP的去除效果^[9],回流比和回流方式与上述3个指标的关系见图3、4.从表4可以看出,回流比对厌氧区的DO质量浓度有显著性影响($P<0.05$).从图3可知,当回流比为130%和350%时,厌氧区的DO分别为(0.11±0.01)和(0.86±0.20)mg/L.

从图4可知,当回流比130%和350%时,厌氧区的TP质量浓度分别为(4.13±0.62)和(3.65±0.80)mg/L;厌氧区NO₃⁻-N质量浓度为(4.50±1.33)和(11.25±3.99)mg/L.

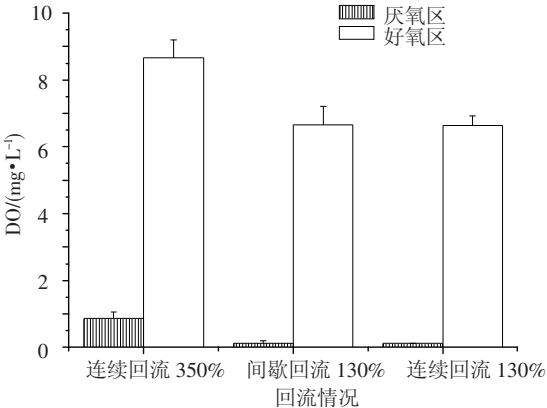


图3 回流比和回流方式与系统不同区域中DO的关系

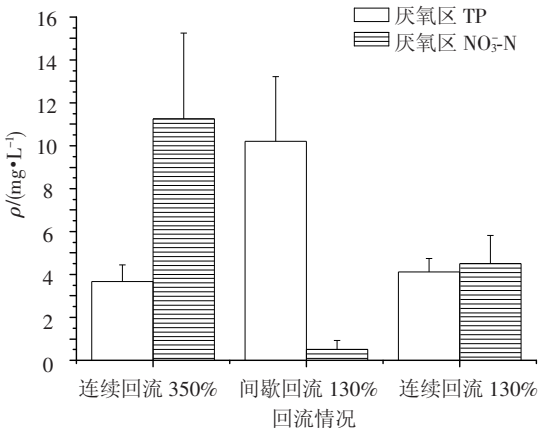


图4 不同回流比和回流方式与厌氧区TP和NO₃⁻-N质量浓度关系

2.1.4 讨论

回流比的大小对系统除COD_{Cr}和NH₄⁺-N的影响较小,系统出水COD_{Cr}小于50 mg/L,出水NH₄⁺-N远小于5 mg/L,完全达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级A标准.较多研究也表明,膜生物反应器对有机物的去除率可达90%^[10-11].同时,膜的高效截留作用使得世代较长的硝化细菌在膜生物反应器工艺中充分发挥作用,达到较好的硝化过程^[12].

回流比大小对系统去除TN有较大影响.根据文献[13]的报道,系统反硝化能力与回流比有如下关系:

$$N_{DRecycle} = \frac{R}{1+R} \times S_{TN,IN} \times Q_{IN} \quad (1)$$

式中: $N_{DRecycle}$ 为系统反硝化能力; R 为内回流比;

$S_{\text{TN, IN}}$ 为进水 TN 质量浓度; Q_{IN} 为进水水量. 当回流比为 130%, TN 理论去除率为 56.5%, 实际去除率为 $(48.00 \pm 10.05)\%$, 略小于理论值, 出水 TN 为 $(12.41 \pm 2.46) \text{ mg/L}$, 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 A 标准; 当回流比为 350% 时, TN 理论去除率为 77.8%, 而实际去除率仅为 $(19.65 \pm 14.45)\%$. 理论上, 随着回流比的增加系统去除 TN 的效率会增加, 本研究的结果却恰恰相反, 回流比为 130% 的情况好于 350%, 原因可能是回流比过大且是连续回流操作方式, 破坏了厌氧池内的反硝化环境, 抑制了反硝化细菌的活性. 在连续回流、回流比为 350% 的情况下, 系统厌氧池的 DO 为 $(0.86 \pm 0.20) \text{ mg/L}$, 大于反硝化最佳条件 $\text{DO} < 0.5 \text{ mg/L}^{[9]}$, 这可能是导致在较大回流比情况下 TN 去除率反而较低的原因.

回流比大小对 TP 的去除也有较大影响. 总体上, 两种回流比下, TP 的去除效果都不理想. 回流比为 130% 时的厌氧区释磷情况稍好于回流比为 350% 时, 原因是厌氧区的硝酸盐质量浓度较高, 反硝化细菌与聚磷菌竞争碳源, 影响了聚磷菌的释磷作用, 进而影响到后续好氧吸磷作用^[14].

2.2 回流方式对间歇式 A/O-MBR 除污染的影响

2.2.1 回流方式对 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除的影响

从表 4 可以看出, 在回流比为 130% 的情况下, 回流方式对 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除没有显著影响 ($P > 0.05$). 从图 5 可见, 间歇回流和连续回流对 COD_{Cr} 去除率分别为 $(89.06 \pm 3.40)\%$ 和 $(86.92 \pm 5.24)\%$, 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为 $(97.42 \pm 1.81)\%$ 和 $(97.19 \pm 1.06)\%$; 此时, 出水 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 (20 ± 4) 和 $(20 \pm 2) \text{ mg/L}$, (0.61 ± 0.45) 和 $(0.51 \pm 0.19) \text{ mg/L}$.

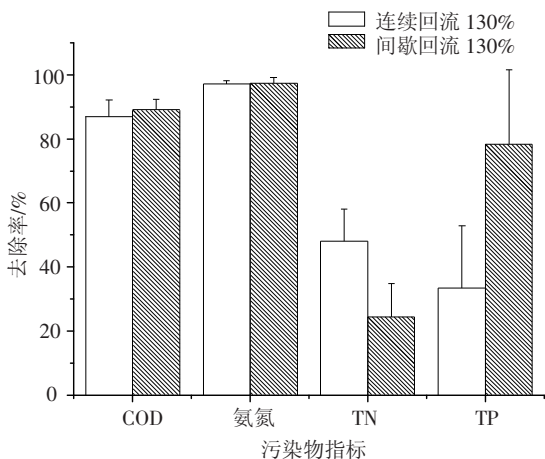


图5 回流方式与各污染物指标去除的关系

2.2.2 回流方式对 TN 和 TP 去除的影响

从表 4 可以看出, 在回流比为 130% 的情况

下, 回流方式对 TN 和 TP 去除有显著性影响 ($P < 0.01$). 从图 5 可见, 间歇回流和连续回流对 TN 去除率分别为 $(24.49 \pm 10.35)\%$ 和 $(48.00 \pm 10.05)\%$, 对 TP 去除率分别为 $(78.27 \pm 23.41)\%$ 和 $(33.40 \pm 19.47)\%$; 此时, 出水 TN 和 TP 分别为 (20.76 ± 2.54) 和 $(12.41 \pm 2.46) \text{ mg/L}$, (0.87 ± 1.04) 和 $(2.79 \pm 1.26) \text{ mg/L}$.

2.2.3 回流方式对厌氧区 DO、TP 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度的影响

从表 4 看出, 在回流比为 130% 时, 回流方式对系统厌氧区的 DO 质量浓度没有显著性影响. 从图 3 可以看出, 间歇回流和连续回流时厌氧区 DO 质量浓度分别为 (0.13 ± 0.06) 和 $(0.11 \pm 0.11) \text{ mg/L}$. 从图 4 可知, 间歇回流和连续回流情况下, 厌氧区 TP 质量浓度分别为 (10.20 ± 3.03) 和 $(4.13 \pm 0.62) \text{ mg/L}$; 厌氧区 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度分别为 (0.51 ± 0.42) 和 $(4.50 \pm 1.33) \text{ mg/L}$.

2.2.4 讨论

回流方式对系统去除 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响较小, 出水 COD_{Cr} 小于 50 mg/L , 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 小于 5 mg/L . 全部达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)中的一级 A 标准. 该结果与回流比大小的分析相似, 当曝气充足时, 膜生物反应器具有较好的去除有机物和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的能力.

回流方式对系统 TN 的去除有显著性的影响. 连续回流对 TN 的去除效果明显好于间歇回流的情况. 原因是间歇回流时, 回流时间占整个周期的 50%, 间歇时的实际系统回流比为 130% 的一半, 即 65%. 基于式 (1), 系统理论的 TN 去除率为 39.4%, 而实际 TN 去除率为 $(24.49 \pm 10.35)\%$, 具有一定的偏差, 原因可能是存在聚磷菌与反硝化细菌竞争碳源的情况^[14], 造成碳源不足.

回流方式对系统去除 TP 同样有显著性的影响. 间歇回流时系统对 TP 的去除远远好于连续回流的情况. 同时, 厌氧区的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度在间歇回流的情况下很低, 厌氧区的释磷效果也好于连续回流时. 原因可能是间歇回流时, 从好氧膜池回流的污泥混合液中含有的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度在整个运行周期内比连续回流时要少, 厌氧池的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度较低, 污水中的碳源大部分提供给聚磷菌进行厌氧释磷^[9], 进而更有利于聚磷菌在好氧段的吸磷. 因此, 间歇回流时, 间歇式 A/O-MBR 有更好的 TP 去除效果, 出水 TP 为 $(0.87 \pm 1.04) \text{ mg/L}$, 可达一级 B 的标准.

3 结 论

1) 回流方式和回流比对间歇式 A/O-MBR 去除 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的效果无显著性影响,出水 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的效果均达到一级 A 标准。

2) 连续回流且回流比过大时,间歇式 A/O-MBR 对 TN 和 TP 的去除效果较差。

3) 回流比适中情况下,连续回流有利于间歇式 A/O-MBR 对 TN 的去除,而间歇回流更有利于系统对 TP 的去除。

4) 应根据进水的水质情况适当改变回流方式和调节回流比大小,如果以去除 TN 为主要目标,推荐采用连续回流的操作方式;如果以去除 TP 为主要目标,推荐采用间歇式的回流方式。

参考文献

- [1] ROEST H F van der, LANWRENCE D P, BENTEM van A G N. Membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [M]. London: IWA Publishing, 2002.
- [2] KIMURA K, HARA H, WATANABE Y. Removal of pharmaceutical compounds by submerged membrane bioreactors (MBRs) [J]. Desalination, 2005, 178 (1/2/3): 135 - 140.
- [3] ROSENBERGER S, KÜGER U, WITZIG R, *et al.* Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water [J]. Wat Res, 2002, 36 (2): 413 - 420.
- [4] BAEZA J A, GABRIEL D, LAFUENTE J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. Process Biochem, 2004, 39 (1): 1615 - 1624.
- [5] TAN T W, NG H Y. Influence of mixed liquor recycle ratio and dissolved oxygen on performance of pre-denitrification submerged membrane bioreactors [J]. Wat Res, 2008, 42 (4/5): 1122 - 1132.

- [6] AHN Y T, KANG S T, CHAE S R, *et al.* Simultaneous high-strength organic and nitrogen removal with combined anaerobic upflow bed filter and aerobic membrane bioreactor [J]. Desalination, 2007, 202 (1/2/3): 114 - 121.
- [7] HIRAS D N, MANARIOTIS I D, GRIGOROPOULOS S G. Organic and nitrogen removal in a two-stage rotating biological contactor treating municipal wastewater [J]. Bioresour Technol, 2004, 93 (1): 91 - 98.
- [8] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 张自杰. 排水工程下册 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [10] MONCLÚS H, SIPMA J, FERRERO G, *et al.* Biological nutrient removal in an MBR treating municipal wastewater with special focus on biological phosphorus removal [J]. Bioresour Technol, 2010, 101 (11): 3984 - 3991.
- [11] XIA S Q, GUO J F, WWANG R C. Performance of a pilot-scale submerged membrane bioreactor (MBR) in treating bathing wastewater [J]. Bioresour Technol, 2008, 99 (15): 6834 - 6843.
- [12] GANDER M, JEFFERSON B, JUDD S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations [J]. Sep Purif Technol, 2000, 18 (2): 119 - 130.
- [13] HILL M. Biological nutrient removal (BNR) operation in wastewater treatment plants [M]. New York: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers/Environmental and Water Resources Institute, 2006.
- [14] OEHMEN A, LEMOS P C, CARVLHO G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. Wat Res, 2007, 41 (11): 2271 - 2300.

(编辑 刘 彤)