

运行与管理

## 基于节能降耗的 MBR 工艺优化运行措施

叶 亮<sup>1</sup>, 郭亚琼<sup>2</sup>, 封 峰<sup>1</sup>, 景 婧<sup>1</sup>, 李鹏峰<sup>2</sup>, 陈 虎<sup>1</sup>, 华 家<sup>1</sup>

(1. 无锡太湖水务有限公司, 江苏 无锡 214000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘 要:** 基于 MBR 系统膜污染控制和节能降耗管理, 提出通过优化控制膜池污泥浓度 (MLSS)、离线清洗与膜池底部清淤相结合、曝气系统改造三种措施对 MBR 系统进行优化运行, 并结合 2017 年实际应用情况分析了对节能降耗及出水稳定达标的贡献。结果表明, 控制膜池 MLSS 在 6 000 ~ 9 000 mg/L 之间, 对膜池进行彻底清淤, 有利于减缓膜污染进程, 提高产水量并降低膜擦洗风量, 同时结合后续曝气系统改造应用, MBR 系统总曝气量大幅下降, 2017 年电耗年均值仅为  $0.42 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , 较 2016 年降低 17.7%; 优化后在线清洗次氯酸钠用量可降至  $232.14 \text{ g}/\text{m}^2$  膜, 较优化前降低 18.75%; 出水水质优于一级 A 排放标准, 除 TN 外, 其他出水指标全年 70% 以上天数可达太湖新地标要求。

**关键词:** MBR 工艺; 优化运行; 节能降耗; MLSS 控制; 膜池清淤

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)04-0118-05

## Study on Optimizing Operation for MBR Progress Based on Energy Saving and Consumption Reduction

YE Liang<sup>1</sup>, GUO Ya-qiong<sup>2</sup>, FENG Feng<sup>1</sup>, JING Jing<sup>1</sup>, LI Peng-feng<sup>2</sup>, CHEN Hu<sup>1</sup>,  
HUA Jia<sup>1</sup>

(1. Wuxi Taihu Water Co. Ltd., Wuxi 214000, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** In order to control membrane fouling, save energy and reduce consumption, three measures to optimize MBR operation such as optimizing MLSS control of membrane tank, offline cleaning combined with sludge dredging at the bottom of membrane tank and modification of aeration system were proposed. Combined with the actual application in 2017, the contributions of optimizing operation measures to energy saving, consumption reduction and effluent stability were analyzed. The results showed that controlling MLSS between 6 000 - 9 000 mg/L and thoroughly dredging of sludge in membrane tank both helped to slow down the process of membrane fouling, to increase water yield and reduce membrane scrubbing air volume. After aeration system modification, the total aeration volume of the MBR system declined significantly. The annual average power consumption in 2017 was only  $0.42 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , which was 17.7% lower than that in 2016. The sodium hypochlorite consumption for online cleaning of unit membrane could be reduced to  $232.14 \text{ g}/\text{m}^2$ , which was 18.75% lower than that before

optimization. The effluent quality was superior to the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). Except TN, the other effluent indexes could reach *Discharge Standard of Main Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant & Key Industries of Taihu Area* (DB 32/1072 - 2018) in over 70% days of the year.

**Key words:** MBR; optimizing operation; energy saving and consumption reduction; MLSS control; sludge dredging of membrane tank

膜生物反应器(MBR)是一种由膜分离单元与生物处理单元相结合的新一代水处理技术,具有更高的处理效率、更好的出水水质、更小的占地面积,近年来在城镇污水处理厂中被广泛应用,但也出现了膜污染显著、能耗过高等问题<sup>[1-2]</sup>。膜污染与能耗之间存在直接的相关性,可通过有效控制膜污染实现MBR系统节能降耗<sup>[3]</sup>。膜污染控制方法主要包括水力控制、化学控制和生物控制。目前该方面的研究绝大部分基于实验室和中试展开,与实际应用存在差异<sup>[4-5]</sup>。

以无锡某污水处理厂四期工程为例,对MBR系统膜污染控制经验进行总结,探讨了基于节能降耗的MBR系统优化运行管理措施,并结合2017年实际应用情况分析了其对于节能降耗及出水稳定达标的贡献,以期为MBR工程设计与运行管理提供参考。

## 1 工程概况

该工程设计规模为 $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $K_{\text{总}} = 1.20$ ,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。工艺流程见图1。

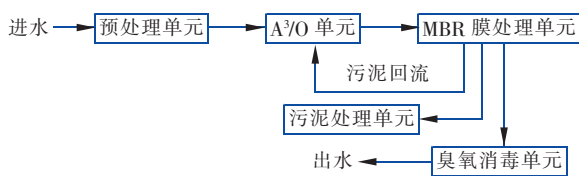


图1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

预处理单元采用曝气沉砂池和四级格栅(20 mm耙齿式粗格栅、6 mm网板阶梯式细格栅、3 mm转鼓精细格栅和1 mm转鼓膜格栅)强化措施,对进水悬浮物进行有效筛分,高效截留进水中颗粒、毛发、纤维类等大颗粒、易缠绕物质,保证了MBR膜系统的安全稳定运行。尾水处理采用臭氧接触消毒工艺,污泥处理采用重力浓缩+离心脱水工艺。

膜池总共分为8组,每个膜池内设置8个膜组器,共64个膜组器。采用中空纤维膜,其膜丝长度

为1 850 mm,公称膜孔径为 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。单个膜组器有效过滤面积为 $2\ 100 \text{ m}^2$ ,设计膜通量为 $19 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,设计产水量为 $40.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。膜池设计运行污泥浓度(MLSS)为 $8\ 000 \sim 12\ 000 \text{ mg/L}$ ,跨膜压差(TMP)为 $8 \sim 10 \text{ kPa}$ 。清洗方式包括在线清洗和离线清洗,其中在线清洗以10%次氯酸钠溶液药洗为主,一周一次,药剂用量约为 $333 \text{ g}/\text{m}^2$ 膜;离线清洗以草酸药洗为主,一年一次。

## 2 MBR系统优化运行管理措施

MBR工艺主要耗能设备为污水提升泵、回流泵、抽吸泵、A³/O生物单元曝气鼓风机、膜擦洗鼓风机和污泥处理设备。MBR系统电耗以膜处理单元为主,而膜处理单元电耗主要来自于膜擦洗鼓风机<sup>[3]</sup>。正常运行状态下,除膜擦洗鼓风机外,其他各设备均处于开启状态,设备用电量差异不大,电耗的差异主要取决于产水量和膜擦洗风量。

因此,可通过对MBR系统进行优化运行管理,降低膜污染速率,保证TMP,提高产水量,降低膜擦洗风量,从而有效降低吨水电耗和在线清洗药剂用量,实现MBR工艺的节能降耗。

### 2.1 优化控制膜池MLSS

以2016年1#膜池为例,对膜池MLSS和膜污染状况之间的相关性进行分析,结果见图2。

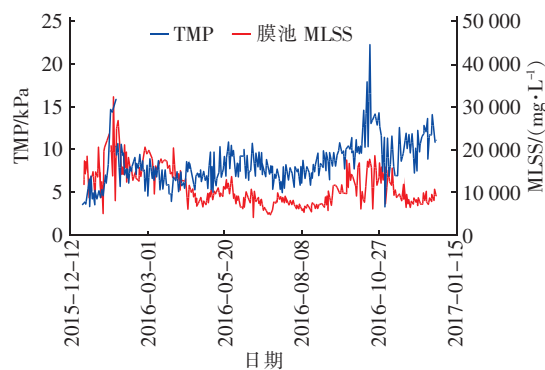


图2 2016年膜池MLSS与TMP变化情况

Fig. 2 MLSS and TMP of membrane tank in 2016

可以看出,膜池 MLSS 和 TMP 之间呈正相关性,MLSS 越高,TMP 越大,说明膜污染越严重。

2016 年膜池 MLSS 为 5 288 ~ 32 662 mg/L,平均值为 11 000 mg/L。经统计分析,膜池 MLSS 超过设计高值(12 000 mg/L)的运行天数占到 36% 以上。提高膜池 MLSS,可以降低污泥负荷率,提高活性污泥硝化效能和吸磷效能,有利于膜池的出水氮磷稳定达标。但 MLSS 过高,会加速污染物在膜表面的沉积吸附,形成较厚的污泥层,导致过滤阻力增加,产水量下降<sup>[4]</sup>,膜污染加重,这与图 2 中 2016 年 1 月—3 月和 10 月 TMP 升高表现一致。而 5 月—8 月 MLSS 基本在 5 000 ~ 10 000 mg/L 之间,TMP 保持在 10 kPa 以下,膜污染控制良好。此外,膜池 MLSS 过高导致需要更高的曝气量才能满足 DO 需求。因此,在高 MLSS 条件下,为保证膜池的正常运行,MBR 系统需增加膜擦洗风量,导致运行能耗大幅增加。

2017 年对膜池 MLSS 进行优化控制,全年膜池污泥浓度控制在 2 472 ~ 15 592 mg/L,平均为 8 326 mg/L,结果如图 3 所示。冬季低水温条件下 MLSS 保持在 8 000 ~ 16 000 mg/L,优先进行除磷脱氮,保证了出水水质的稳定达标;其他温度适宜的月份,在进水负荷稳定的工况下,降低 MLSS 至 6 000 ~ 9 000 mg/L,膜污染情况有所缓解,膜擦洗风量从 18 000 m<sup>3</sup>/h 降至 15 000 m<sup>3</sup>/h,达到节能降耗的目的。

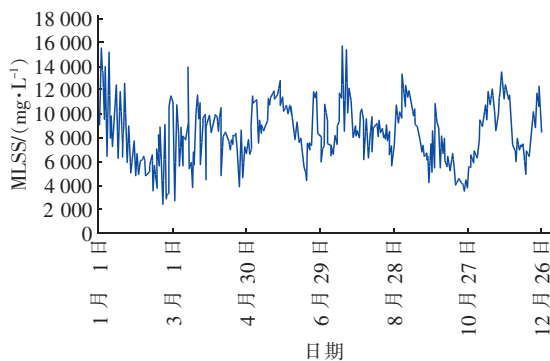


图3 2017年膜池 MLSS 变化情况

Fig. 3 MLSS of membrane tank in 2017

## 2.2 离线清洗与膜池底部清淤相结合

在 2017 年 5 月膜组件离线清洗作业中,增加了膜池底部检查,发现底部积沙、积泥严重。经观测,沉积淤泥呈炭黑色并散发恶臭,缠绕物和泥沙清晰可见,平均深度达到 0.7 m。膜池积淤严重会使得

淤泥盖住膜组件底部曝气口,曝气不畅甚至减少,导致无法进行有效膜擦洗,膜组件下部将失去曝气和水流的冲刷擦洗,加速膜丝污堵、缠绕甚至板结,导致膜通量迅速衰减。此外,淤泥中缠绕物和泥沙容易在膜丝和仪器仪表等设备上缠绕堆积,导致膜通量降低,结构受损,影响 MBR 工艺的整体运行效果。

因此,此次离线清洗对膜池进行彻底清淤,清淤后膜池底部没有积泥,短时期不会对曝气管造成影响,且由于清除积泥,曝气畅通,膜擦洗效率升高,遂将膜擦洗风量从 17 350 m<sup>3</sup>/h 降低至 16 125 m<sup>3</sup>/h,以减少不必要的电耗。如何防止底部污泥淤积,也是今后运行管理中需考虑解决的问题。

## 2.3 曝气系统改造

考虑离线清洗膜池清淤后膜擦洗效率大幅提高,污水厂从节能降耗角度出发,应用清华大学“十二五”水专项研究课题成果“MBR 工艺的节能降耗与优化运行技术”对生化池—膜池联动曝气。该 MBR 系统实际运行 1 台 315 kW 的曝气池风机及 2 台 280 kW 的膜擦洗风机。曝气池风机开度最小条件下供风量约为 4 937.5 m<sup>3</sup>/h,单台膜池风机供风量约为 9 848 m<sup>3</sup>/h。本次改造关闭一台膜擦洗风机,但将生物池曝气风机风量从 5 300 m<sup>3</sup>/h 增大至 8 500 m<sup>3</sup>/h,并打开生化池—膜池联通风管,将约 4 000 m<sup>3</sup>/h 风量导入至膜池曝气管,将生物池富余的风量补充为膜擦洗风量,如图 4 所示。计算可知,生物池曝气风机与膜擦洗风机总供风量较改造前降低 22.5%。

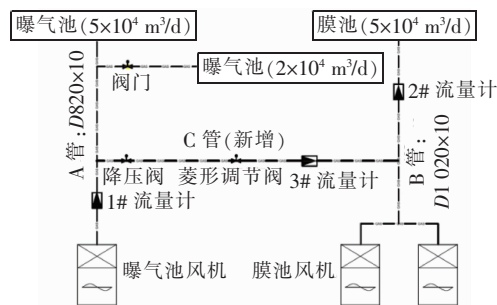


图4 生化池—膜池联动曝气

Fig. 4 Schematic diagram of linkage aeration of biochemical tank and membrane tank

## 3 MBR 优化运行对节能降耗的影响

### 3.1 降低膜系统能耗

为考察上述 MBR 系统优化运行管理对膜系统能耗的影响,对 2016 年和 2017 年的月均吨水电耗

进行对比分析,结果如图5所示。

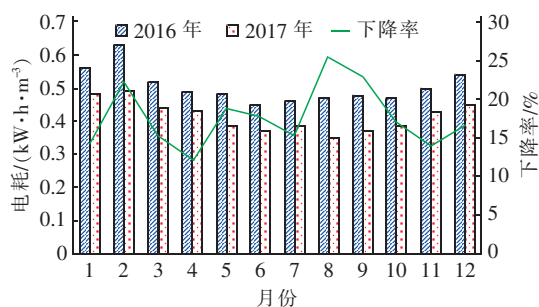


图5 MBR曝气系统优化前后能耗对比

Fig.5 Energy consumption before and after aeration system optimization

可以看出,与优化前2016年相比,2017年月均吨水电耗整体大幅下降,年均值从 $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 降至 $0.42 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,下降率为17.7%。5月份底泥清淤和曝气系统改造之后,吨水电耗下降率较年初有所提高,说明底泥清淤和曝气系统改造对膜系统节能降耗贡献较明显。此外,2月份吨水电耗下降率高达22.2%。分析数据可知,2017年2月MLSS为 $5943 \text{ mg/L}$ ,较2016年同月的 $16239 \text{ mg/L}$ 下降63.4%,MLSS大幅下降,膜擦洗风量随之大幅降低,节能降耗效果显著。

### 3.2 优化在线清洗药剂用量

由于清淤完成,改善了膜池曝气流态,提高了膜擦洗效能,在线药洗效果也得以强化。因此,在保证清洗效果的前提下,对在线膜清洗药剂用量进行优化,以降低药耗。以4#膜池为研究对象,保持产水流量为 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ,当跨膜压差达到 $15 \text{ kPa}$ 左右时开启膜池在线清洗,清洗药剂为次氯酸钠,优化前单位膜药剂量为 $285.71 \text{ g/m}^2$ ,逐渐减少每次在线清洗次氯酸钠用量,考察膜池清洗效果变化情况,分析膜池清洗后在线清洗单位膜药剂量的变化(见图6)。

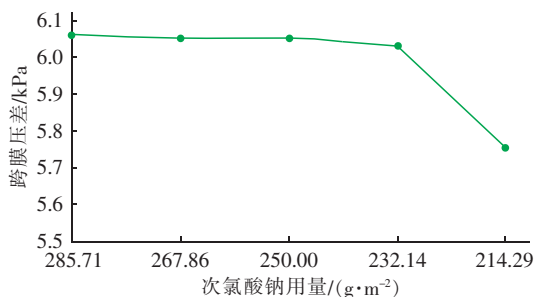


图6 不同药量下的膜清洗效果比较

Fig.6 Membrane cleaning effect at different  $\text{NaClO}$  dosage

可见,在相同初始跨膜压差下,单位膜药剂从 $285.71 \text{ g/m}^2$ 降低至 $232.14 \text{ g/m}^2$ 时,在线清洗后跨膜压差均可恢复至 $6.05 \text{ kPa}$ 左右,洗膜效果相差不大,但如果继续降低单位膜药剂,跨膜压差仅恢复至 $5.75 \text{ kPa}$ ,洗膜效果大幅降低。因此可将在线清洗单位膜药剂由原 $285.71 \text{ g/m}^2$ 降至 $232.14 \text{ g/m}^2$ ,药剂可节约18.75%。

### 4 优化运行管理对出水水质的影响

对该污水厂四期MBR系统2017年出水 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{SS}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{TP}$ 指标进行统计分析,结果如图7所示。

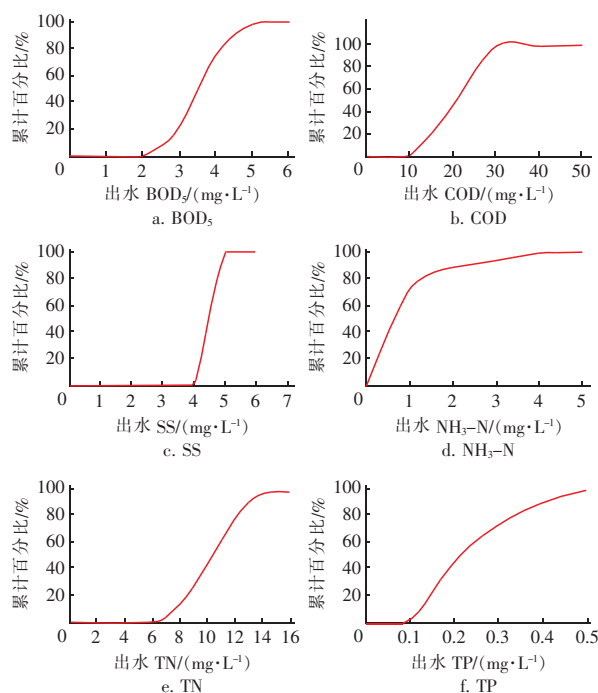


图7 四期MBR系统2017年出水水质

Fig.7 Effluent quality of MBR system in 2017

可以看出,MBR系统对有机污染物去除效果稳定,出水 $\text{BOD}_5$ 和 $\text{COD}$ 分别达到 $6 \text{ mg/L}$ 和 $30 \text{ mg/L}$ 以下,平均值分别为 $3.6 \text{ mg/L}$ 和 $20.8 \text{ mg/L}$ ,均能稳定达到一级A标准,基本能够满足《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)(以下简称太湖新地标)要求。MBR工艺对 $\text{SS}$ 的截留效果比较稳定,出水 $\text{SS}$ 均为 $5 \text{ mg/L}$ ,稳定达到一级A及太湖新地标要求。

MBR系统脱氮效果较好,出水 $\text{TN}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别达到 $14 \text{ mg/L}$ 和 $5 \text{ mg/L}$ 以下,平均值分别为 $10 \text{ mg/L}$ 和 $0.94 \text{ mg/L}$ ,稳定达到一级A标准,但难以满足太湖新地标要求。其中, $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 3 \text{ mg/L}$



的累计百分比为93.6%,TN浓度 $<10\text{ mg/L}$ 的累计百分比仅为44.6%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 进一步去除难度较小,TN进一步去除难度较大,其主要原因在于进水碳源严重不足。据统计,2017年进水 $\text{BOD}_5/\text{TN}$ 仅为4.1,难以保证反硝化脱氮效果。此外,出水TN波动季节性特征明显,在冬季低温条件下出水TN浓度偏高,其主要原因在于低温活性污泥硝化速率较低,需通过提高MLSS、延长停留时间等措施强化硝化,以保证系统脱氮效能。进水碳源不足和冬季低温出水TN偏高的问题,在下一步提标改造过程中将作为研究重点。

MBR系统除磷效果良好,全年出水 $\text{TP} < 0.5\text{ mg/L}$ ,平均值为 $0.24\text{ mg/L}$ ,稳定达到一级A标准,无超标风险,但未满足太湖新地标要求。据统计,TP浓度 $<0.3\text{ mg/L}$ 的累计百分比为73.3%。考虑到MBR工艺的特殊性,结合实践经验,为减少膜污染,该系统采用生物除磷,在全年运行中未投加化学除磷药剂。若采用合适的除磷药剂,既能满足除磷要求,又能尽量减少膜表面的无机污染,基本可满足 $0.3\text{ mg/L}$ 的出水TP要求。

## 5 结论

① 在城镇污水处理厂MBR系统中,在水温合适、进水负荷稳定的工况下,可以考虑控制MBR系统膜池MLSS在 $6\,000 \sim 9\,000\text{ mg/L}$ 范围内,在保证出水水质稳定达标的同时,有效控制膜系统擦洗风量,达到节能降耗的目的。

② 离线清洗过程进行膜池清淤有利于延长膜使用寿命,降低膜擦洗风量,实现节能降耗。2017年5月膜池清淤之后,膜擦洗风量从 $17\,350\text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $16\,125\text{ m}^3/\text{h}$ 。

③ 对MBR曝气系统进行生化池-膜池联通改造,关闭一台膜擦洗风机,将生物池富余的风量补充为膜擦洗风量,改造后生物池曝气风机与膜擦洗风机总供风量较改造前降低26.6%。

④ MBR系统优化运行之后,膜污染进程减缓,膜擦洗风量大幅降低,实现了节能降耗。2017年电耗年均值仅为 $0.42\text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,较2016年降低17.7%;优化后在线清洗次氯酸钠用量可降至 $232.14\text{ g}/\text{m}^2$ ,较优化前降低18.75%。

⑤ 2017年该MBR系统运行良好稳定,各项水质指标均优于一级A排放标准,除TN外,其他出水水质指标全年70%以上可达到太湖新地标。

## 参考文献:

- [1] 石宝强. 膜生物反应器膜污染行为研究与预测控制[D]. 大连:大连理工大学,2006.  
Shi Baoqiang. Membrane Fouling Behavior Research and Optimum Control of MBR[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese).
- [2] 徐荣乐,樊耀波,张晴,等.  $\text{A}^2\text{O} - \text{MBR}$  研究与应用进展[J]. 膜科学与技术,2013,33(6):111-118.  
Xu Rongle, Fan Yaobo, Zhang Qing, et al.  $\text{A}^2\text{O} - \text{MBR}$  research and application progress[J]. Membrane Science and Technology, 2013, 33(6): 111-118 (in Chinese).
- [3] 孙剑宇. 膜生物反应器城市污水处理工艺优化运行与节能降耗研究[D]. 北京:清华大学,2016.  
Sun Jianyu. Energy Saving and Operation Optimization of Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [4] 葛元新,朱志良. MBR膜的污染及其清洗技术研究进展[J]. 清洗世界,2005,21(8):24-29.  
Ge Yuanxin, Zhu Zhiliang. Source of membrane fouling of MBR and its cleaning technology progress[J]. Cleaning World, 2005, 21(8): 24-29 (in Chinese).
- [5] 周小玲,陈建荣,余根英,等. 膜生物反应器中膜污染机理和控制研究新进展[J]. 环境科学与技术,2012,35(10):86-91.  
Zhou Xiaoling, Chen Jianrong, Yu Genying, et al. Review on mechanism and control of membrane fouling in membrane bioreactor [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 86-91 (in Chinese).



作者简介:叶亮(1970—),男,江苏无锡人,大学本科,工程师,主要从事污水厂运行管理工作。

E-mail: yulin218@163.com

收稿日期:2018-10-15