

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.014

活性炭海绵动态膜生物反应器用于 污水处理提标改造中试研究

杨小丽, 洪凯, 张雷, 傅大放, 马金霞

(东南大学 a. 土木工程学院; b. 江苏省水处理与生态修复工程技术研究中心, 南京 210096)

摘要:自行设计研发了以活性炭海绵作为膜基材的动态膜生物反应器,为污水处理的提标排放及资源化利用提供了科学依据及实际参考价值。详细考察了该反应器对污染物的去除效果和运行特性,通过和现有污水处理厂处理效果比较,探索活性炭海绵基材动态膜生物反应器用于城市污水提标改造的可行性。结果表明,在水力停留时间 8 h、污泥浓度 8 000 mg/L 的条件下,活性炭海绵动态膜生物反应器出水 COD、NH₃-N、TN 和 TP 浓度分别 ≤35.0 mg/L、≤1.4 mg/L、≤10.2 mg/L 和 ≤0.3 mg/L,出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918-2002 一级 A 标准。活性炭的吸附性能和海绵的空间结构特征协同作用强化了系统对污染物的去除效果,活性炭海绵动态膜生物反应器可完全取代现有污水厂深度处理工艺应用于提标改造。曝气反冲洗可有效减缓出水通量下降,使系统出水通量稳定在 30 L/(m²·h) 左右。

关键词:活性炭海绵;动态膜生物反应器;污水处理;提标改造

中图分类号:X 703.1;Q 503 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)02-0089-05

Application of Activated Carbon Sponge-Dynamic Membrane Bioreactor in Transformation of Wastewater Treatment

Yang Xiaoli, Hong Kai, Zhang Lei, Fu Dafang, Ma Jinxia

(a. School of Civil Engineering; b. Jiangsu Province Engineering Research Center for Water Treatment and Ecological Restoration, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Dynamic membrane bioreactor (DMBR) based on activated carbon sponge materials was studied and developed independently. The pollutant removal efficiency and operational characteristics were investigated in detail, and the feasibility of DMBR application in transformation of real wastewater treatment plant (WWTP) was discussed by comparing the effluents. Results showed that the concentrations of COD, NH₃-N, TN and TP in effluents were below 35.0 mg/L, 1.4 mg/L, 10.2 mg/L and 0.3 mg/L, respectively, with the HRT of 8 h and MLSS of 8 000 mg/L. The ultimate effluent was qualified to standard A of "Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant" (GB 18918-2002). Adsorption of activated carbon and the spatial structure of sponge synergistically strengthen the pollutant removal. DMBR can be used in upgrading and transformation of WWTP by replacing the existing advanced treatment process. The flux of the DMBR was recovered by intensified aeration backwashing and maintained steadily at the level of 30 L/(m²·h).

Key words: Activated carbon sponge; Dynamic membrane bioreactor; Wastewater treatment; Upgrading and reconstruction

收稿日期:2013-11-16

基金项目:国家自然科学基金(51008064);江苏省太湖治理科研课题(TH2011205, TH2011306);教育部博士点基金(20110092120016)

作者简介:杨小丽(1977-),女,副教授,主要从事水处理研究,(E-mail) yangxiaoli@seu.edu.cn。

膜生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)因其出水水质好、剩余污泥少、占地面积省在污水深度处理及提标改造中日益得到广泛关注和推广^[1-7],但膜材料价格和膜污染仍然是限制该技术大范围应用的瓶颈^[8-10]。为解决传统 MBR 的不足,动态膜生物反应器(Dynamic membrane bioreactor, DMBR)应运而生。DMBR 是建立在传统 MBR 基础之上的新型生物反应器,以无纺布、筛网等粗孔材料为膜基材,通过活性污泥过滤过程中形成的生物动态膜实现近似于微滤膜的过滤效果,该技术具有基建及运行费用低、膜污染易控制等优点^[11-12]。Seo 等^[13]、Hong^[14]等研究发现,DMBR 在处理效果和悬浮物截留均表现出很好的效果。武小鹰等^[15]认为 DMBR 的工作压力更小,膜材料具有再生性,通过水力冲洗可使膜通量恢复 90% 以上。

膜基材是 DMBR 的重要组成部分,会直接影响系统运行特性和污染物去除效果。国内外学者分别对筛网^[16-20]、无纺布^[21-23]、织物^[24]、陶瓷^[25]等作为膜基材进行了广泛的研究。本课题组前期分别考察了以聚酯无纺布、聚丙烯无纺布、聚酯筛网、聚酰胺筛网、海绵等作为膜基材,发现所构成的 DMBR 对有机物和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均有较好的去除效果^[26-27]。

为了进一步改善出水水质,结合既往研究成果,将活性炭海绵作为 DMBR 的膜基材。活性炭海绵作为 DMBR 的膜基材,可将活性炭的吸附性能和海绵的过滤性能有机结合。活性炭海绵是采用高分子粘结材料将优质、吸附性能较强粉状催化活性炭负载于聚氨酯发泡载体上制成的过滤材料,其含炭量在 30%~50%,具有良好的吸附性能;同时,活性炭海绵具有海绵的一些特性,如较高的孔隙率、良好的过滤性能等,使得抗膜污染能力得到增强。主要考察以活性炭海绵作为膜基材的 DMBR 的处理效果和运行特性,并将其处理效果和现有污水处理厂深度处理出水对比,探索该 DMBR 应用于实际污水处理厂提标改造的可行性。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

中试装置位于江苏常州某城市污水处理厂,中试处理规模 50 t/d,停留时间 8 h,进水为该厂缺氧池出水,中试装置通过回转式鼓风机提供氧气,曝气系统采用穿孔布气,气水比控制在 10:1。接种污泥取自污水厂好氧池,稳定运行过程中控制污泥浓度在 8 000 mg/L 左右。出水采用重力出流,水头压差约 1 m。

实验采用 80 块面积和构造相同的平板膜组件,每块膜组件尺寸为 1.0 m×0.5 m,总有效过水面积约

70 m²。膜材料采用活性炭海绵,孔径约为 500 μm,厚 1 cm;膜组件的排列方式为横向、纵向各 2 排,每排单独出水。

1.2 原水水质

实验原水为污水处理厂缺氧池出水,其水质条件见表 1。

表 1 中试装置进水水质(样本数 $n=35$)

指标	mg·L ⁻¹			
	COD	氨氮	总氮	总磷
范围	60.0~141.0	7.0~14.8	11.6~22.5	0.5~0.8
均值	86.5±17.1	8.8±1.7	14.8±2.2	0.6±0.1

注:括号内数据为平均值±均方差

现有污水处理厂采用 A²O 工艺,工艺流程如图 1 所示。

进水→粗格栅→细格栅→曝气沉砂池→调节池→厌氧池→缺氧池→好氧池→二沉池→转盘滤池→出水

图 1 污水处理厂污水处理工艺流程

1.3 分析项目与方法

定期分别对 DMBR 进出水、膜池上清液、污水厂二沉池出水、转盘滤池出水进行采样分析。测定项目包括 pH 值、温度、浊度、MLSS、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN、TP 等,均采用中国标准方法^[28]。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果

2.1.1 COD 去除效果 图 2 为中试装置对 COD 的去除效果。由图可知,进水 COD 在 60.0~141.0 mg/L 变化时,出水 COD 浓度稳定在 35.0 mg/L 以下,对应平均去除率为 73.2%。由图还可发现,膜池上清液 COD 浓度高于出水,基本稳定在 22.0~58.0 mg/L。经计算,动态膜组件对 COD 去除的平均贡献率约为 11.3%(出水去除率与上清液去除率之差值)。COD 去除率较既往研究略低。分析认为,主要是由原水水质浓度波动较大和进水含有部分工业废水两方面原因所致。

2.1.2 氮去除效果 DMBR 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 的去除效果见图 3、4。

由图 3 可知,系统取得了优良的硝化效果,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 稳定在 1.4 mg/L 以下,对应平均去除率为 91.3%。上清液 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度比出水更低,基本稳定在 0~0.65 mg/L。从结果来看,动态膜组件对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 并没有去除效果,分析认为,一方面 DMBR 好氧膜池本身较强的硝化作用,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度已经比较低;另一方面也与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较小的分子量

不易被膜截留相吻合。

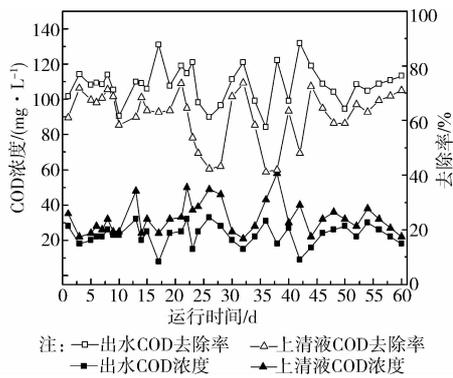


图2 DMBR对COD的去除效果

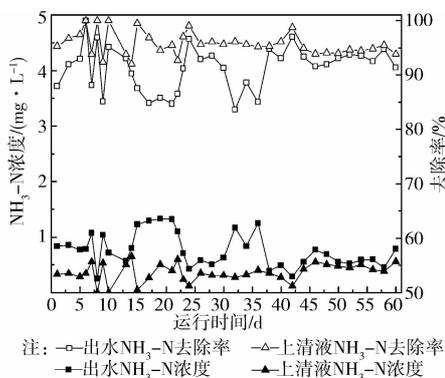


图3 DMBR对NH₃-N的去除效果

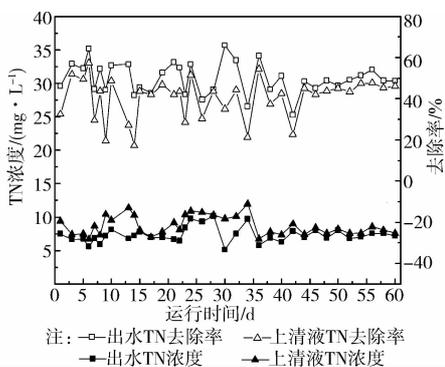


图4 DMBR对TN的去除效果

由图4可知,当进水TN在11.6~22.5 mg/L波动时,出水TN浓度稳定在10.2 mg/L以下,平均去除率约为50.3%;膜池上清液TN浓度略高于出水浓度,计算得出动态膜组件对TN的去除贡献约为11.1%(出水去除率与上清液去除率之差值)。分析认为,活性炭海绵基材具有一定的厚度及吸附性能,使得膜内部形成一个厌氧/缺氧空间,促进了反硝化的进行。

进一步比较发现,系统硝化效率较高,但反硝化效率并不高,分析认为这可能是由于进水有机物浓度较低、不能满足反硝化所需碳源所致。

为了进一步探讨氮元素在DMBR中的迁移转化,详细考察了系统进水、膜池上清液和出水中不同形态氮的浓度分布,其平均值见表2。

表2 DMBR中不同形态氮的浓度分布(样本数n=14) mg·L⁻¹

水样	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₃ -N	TN
进水	0.04	3.0	8.3	15.3
膜池上清液	0.02	8.2	0.3	9.3
DMBR出水	0.1	6.8	0.7	7.6

由2表可见,进水氮主要以NH₃-N、NO₃⁻-N形态存在,膜池上清液和DMBR出水中氮主要以NO₃⁻-N形态存在,DMBR取得了较好的硝化效果。比较上清液和出水中氮的浓度分布,可以发现出水TN和NO₃⁻-N低于上清液,说明膜组件内部存在一定的缺氧环境,促进了反硝化的进行。由表2还可发现,NH₃-N浓度由8.3 mg/L降至0.7 mg/L,TN浓度却由15.3 mg/L降至7.6 mg/L,表明系统存在同步硝化反硝化现象。

2.1.3 TP去除效果

图5为DMBR对TP的去除效果。由于该污水厂进水中含有部分工业废水,进水TP浓度较低(1.5~2.0 mg/L),故缺氧池出水TP浓度仅为0.5~0.8 mg/L。

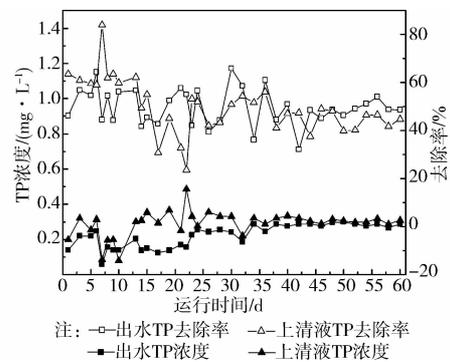


图5 DMBR对TP的去除效果

由图5可见,系统出水TP稳定在0.3 mg/L以下,平均去除率约60.7%。分析认为,系统中磷的去除主要得益于微生物的生理作用、活性炭的吸附作用以及少量的剩余污泥排放。进一步比较发现,系统上清液TP基本稳定在0.09~0.5 mg/L,高于出水浓度,计算得出动态膜组件对TP去除的平均贡献率为10.7%。由于活性炭吸附和微生物的作用,使得海绵基材DMBR的TP去除效果优于其他类型的动态膜生物反应器。

2.2 DMBR与污水厂处理效果比较

将DMBR出水分别与污水处理厂二沉池出水和转盘滤池出水进行效果比较,结果见表3。

表 3 DMBR 与污水处理厂处理效果比较(样本数 $n=35$)

指标	mg · L ⁻¹		
	DMBR 出水	二沉出水	转盘滤池出水
COD	8.0~33.0 (22.9±6.0)	17.0~52.0 (31.5±7.2)	12.0~45.0 (25.6±7.0)
NH ₃ -N	0.3~1.3 (0.8±0.3)	0.08~2.1 (0.4±0.4)	0~2.6 (0.4±0.4)
TN	5.1~10.12 (7.4±1.1)	6.6~10.6 (8.5±1.0)	6.3~10.1 (7.9±0.9)
TP	0.06~0.3 (0.2±0.1)	0.2~0.4 (0.3±0)	0.02~0.3 (0.2±0.1)

注:括号内数据为平均值±均方差

由表 3 可以看出,相对于二沉池和转盘滤池出水,DMBR 对 COD 和 TN 具有一定的去除优势。分析认为,DMBR 中较高的污泥浓度使得系统具有较强的有机物去除能力。而活性炭的巨大表面积和吸附作用可将有机物富集浓缩在活性炭海绵基材的表面和周围,为微生物的代谢活动营造了良好的微环境,加快了有机物的降解过程。并且,酶可以进入活性炭海绵的微孔中,将吸附的有机物降解,而空出的吸附位可以重新吸附有机物,这样就同时实现了活性炭的再生,整个系统就在吸附-降解-再生-重吸附这种协同作用下运行,最终提高出水水质。DMBR 对 TN 的去除优势主要是得益于活性炭海绵内部所形成的反硝化空间。就 NH₃-N 和 TP 去除效果而言,DMBR 和现有污水处理厂均取得了较好的去除效果,经统计学分析,两者之间没有显著性差异 ($P>0.05$)。

综上,活性炭海绵 DMBR 对污染物的去除效果优于污水厂二沉池出水,可完全取代现有污水厂深度处理工艺,可望应用于污水厂的提标改造。

2.3 DMBR 的稳定运行

为了保持 DMBR 稳定的通量,本研究通过加大曝气反冲洗的方式来稳定出水通量。具体操作方式为:系统运行一个月左右,每天每隔 8 h 关闭进水和出水,同时打开两台风机反冲洗 30~45 min,之后重新打开进水和出水。试验过程中发现,当重新打开出水阀门的初始阶段,出水浑浊,但 5~10 min 以后,出水水质恢复,通量也得到一定程度的恢复。具体通量变化见图 6 所示。

由图可见,运行前期出水通量呈缓慢下降趋势,通量由最初的 48 L/(m² · h) 下降至第 40 d 的 20 L/(m² · h),第 10 d 出水通量急剧降低是由于进水泵损坏导致水位下降,作用水头降低。此后通过加大曝气反冲洗,通量得到了一定的恢复,最终稳定在 30 L/(m² · h) 左右,表明曝气反冲洗可用于维持 DMBR 的稳定运行。

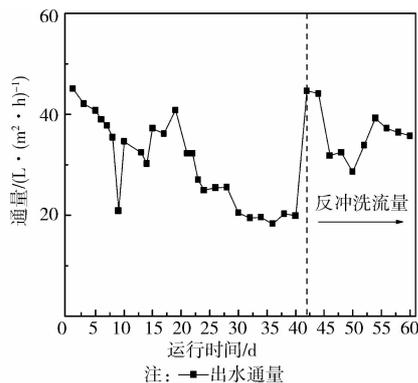


图 6 出水通量随运行时间的变化

3 结论

1) 以活性炭海绵为膜基材的 DMBR 将活性炭的吸附性能和海绵的空间结构特征有机结合,取得了较好的污染物去除效果,系统出水 COD、NH₃-N、TN 和 TP 浓度分别 ≤ 35.0 mg/L、≤ 1.4 mg/L、≤ 10.2 mg/L 和 ≤ 0.3 mg/L,出水达到 GB18918—2002(一级 A) 标准;对应平均去除率分别为 73.2%、91.3%、50.3% 和 60.7%。其中,膜基材及其表面附着的微生物对 COD、TN 和 TP 等污染物具有较大去除贡献,平均贡献率分别为 11.3%、11.1% 和 10.7%。

2) 与现有污水处理厂处理效果比较,活性炭海绵 DMBR 对 COD 和 TN 具有一定的去除优势;就 NH₃-N 和 TP 而言,DMBR 和污水处理厂均取得了较好的去除效果。活性炭海绵 DMBR 对污染物的去除效果优于污水处理厂二沉池出水,可完全取代现有污水厂深度处理工艺。

3) 活性炭海绵 DMBR 运行一个月左右,其膜通量由启动初期的 48 L/(m² · h) 下降至 20 L/(m² · h),此后通过加大曝气反冲洗使通量得到一定恢复,并最终稳定在 30 L/(m² · h) 左右。

参考文献:

- [1] 刘锐,黄霞,刘若鹏,等.膜-生物反应器和传统活性污泥工艺的比较[J].环境科学,2001,22(3):20-24.
Liu R, Huang X, Liu R P, et al. A comparison between a submerged membrane bioreactor a conventional activated sludge process [J]. Environmental Science, 2001, 22(3): 20-24.
- [2] Guoa W S, Vigneswarana S. The role of a membrane performance enhancer in a membrane bioreactor: a comparison with other submerged membrane hybrid systems [J]. Desalination, 2008, 231(1/2/3): 305-313.
- [3] Liu Z Q, Zhang X M. A pilot study on domestic wastewater treatment with A/O-MBR systems [C]//

- The 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE 2010); Chengdu, June 18-20, 2010.
- [4] 董良飞,薛涛,郝晓敏. A²/O/A/MBR 中试装置的除污效能研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(23): 6-11.
Dong L F, Xue T, Xi X M. Study on pollutants removal efficiency of A²/O/A/MBR pilot device [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(23): 6-11.
- [5] 张传政,宋爽. 平板膜生物反应器用于生活污水处理工程改造[J]. 中国给水排水, 2010, 26(20): 100-103.
Zhang C Z, Song S. Reconstruction of domestic sewage treatment project using flat-sheet membrane bioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(20): 100-103.
- [6] 周慧,徐得潜,马常仁,等. A/O-膜生物反应器工艺运用于城市污水处理厂出水提标改造的研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(12): 13-22.
Zhou H, Xu D Q, Ma C R, et al. Research on the application of A/O-MBR process in transformation of wasted water treatment plant [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(12): 13-22.
- [7] Lesjean B, Huisjeslow E H. Survey of the European MBR market: trends and perspectives [J]. Desalination, 2008, 231(1-3): 71-81.
- [8] Khan M T, Takizawa S, Lewandowski Z, et al. Membrane fouling due to dynamic particle size changes in the aerated hybrid PAC MF system [J]. Journal of Membrane science, 2011, 366(1): 17-24.
- [9] Mishima I, Nakajima J. Control of membrane fouling in membrane bioreactor process by coagulant addition [J]. Water Science and Technology, 2009, 59(6): 1255-1262.
- [10] Tian Y, Chen I, Zhang S, et al. Correlating membrane fouling with sludge characteristics in membrane bioreactors: an especial interest in EPS and sludge morphology analysis [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(19): 8820-8827.
- [11] 范彬,黄霞,文湘华,等. 动态膜-生物反应器对城市污水的处理[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 51-56.
Fan B, Huang X, Wen X H, et al. A submerged dynamic membrane bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. Environmental Science, 2002, 23(6): 51-56.
- [12] Wu Y, Huang X, Wen X, et al. Fuction of dynamic membrane in self-forming dynamic membrane coupled with bioreactor [J]. Water Science and Technology, 2005, 51(6/7): 107-114.
- [13] Seo G T, Moon B H. Filtration characteristics of immersed coarse pore filters in an activated sludge system for domestic wastewater reclamation [J]. Water Science and Technology, 2007, 55(1/2): 51-58.
- [14] Hong S K, IN S S. Full-scale study on dynamic state membrane bio-reactor with modified intermittent aeration [J]. Desalination, 2007, 202(1/2/3): 99-105.
- [15] 武小鹰,郑平,徐红亮. 动态膜技术及其在环境工程中的应用[J]. 膜科学与技术, 2003, 23(6): 49-53.
Wu X Y, Zheng P, Xu H L. Dynamic membrane and its application in environment engineering [J]. Membrane Science and Technology, 2003, 23(6): 49-53.
- [16] Chu L, Li S. Filtration capability and operational characteristics of dynamic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 51(2): 173-179.
- [17] Satyawali Y, Balakrishnan M. Treatment of distillery effluent in a membrane bioreactor (MBR) equipped with mesh filter [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(2): 278-286.
- [18] Jeison D, Diaz I, Lier J B. Anaerobic membrane bioreactors; are membranes really necessary [J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2008, 11(4): 1-7.
- [19] Walker M, Banks C J, Heaven S. Development of a coarse membrane bioreactor for two-stage anaerobic digestion of biodegradable municipal solid waste [J]. Water Science and Technology, 2009, 259(4): 729-735.
- [20] Zhang X, Wang Z, Wu Z, et al. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 165(1): 175-183.
- [21] Seo G T, Moon B H, Park Y M K, et al. Filtration characteristics of immersed coarse pore filters in an activated sludge system for domestic wastewater reclamation [J]. Water Science and Technology, 2007, 55(1/2): 51-58.
- [22] An Y, Wang Z, Wu Z, et al. Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 155(3): 709-715.
- [23] Ren X, Shon H K, Jang N, et al. Novel membrane bioreactor(MBR) coupled with a non-woven fabric filter for household wastewater treatment [J]. Water Research, 2010, 44(3): 751-760.
- [24] Liu H, Yang C, Pu W, et al. Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 148(2/3): 1290-1295.
- [25] Li F, Chen J, Deng C. The kinetics of crossflow dynamic membrane bioreactor [J]. Water SA, 2006, 32(2): 199-203.
- [26] 傅大放,林玉娇. 几种不同基材动态膜生物反应器污泥层性质分析[J]. 化工学报, 2008, 59(10): 2596-2600.
Fu D F, Ling Y J. Analysis of sludge layer on different filter materials in dynamic membrane bioreactor [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(10): 2596-2600.
- [27] 李澄. 海绵基材动态膜生物反应器及其对二氯酚降解性能[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [28] 魏复盛. 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.