

膜生物反应器处理低温低浊水的工艺研究

左金龙¹, 崔福义¹, 杨威¹, 王欢², 张海龙¹

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨绍和供水有限公司, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对低温低浊水处理的难题, 采用膜生物反应器(MBR)工艺对松花江冬季原水进行处理试验研究, 考察 MBR 工艺对浑浊度和有机污染物的去除效果及膜过滤周期. 试验结果表明, MBR 工艺对浑浊度的去除率在 90% 以上, 出水浑浊度低于 1NTU. 对高锰酸盐指数和 UV_{254} 的去除率分别可达 40% ~ 50% 和 30% ~ 45%. 膜过滤周期较长, 可达 60 ~ 70 h. 投加 PAC 可提高对有机物的去除率, 但对膜过滤性能的影响不显著. MBR 工艺可有效处理低温低浊水, 出水水质优于常规工艺出水水质. 在原水有机物污染严重时, 可投加 PAC 形成 PAC-MBR 组合工艺, 增强对有机污染物的去除效果.

关键词: 低温低浊; 污染物去除; 淹没式膜生物反应器; 粉末活性炭

中图分类号: X522; TU991.25 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0377-05

Study on the Technology of Treating Low Temperature and Low Turbidity Water by Membrane Bioreactor

ZUO Jin-long¹, CUI Fu-yi¹, YANG Wei¹, WANG Huan², ZHANG Hai-long¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Harbin Saur Water Supply Co. Ltd., Harbin 150080, China)

Abstract: For the purpose of solving the problem of low temperature and low turbidity water treatment, a pilot study was made on the treatment of Songhuajiang River raw water with low temperature and low turbidity by using membrane bioreactor (MBR) process, and the removal effects of organic pollutants and turbidity and membrane filtration period were also investigated. The results showed that the effluent turbidity was lower than 1 NTU and its removal efficiency was over 90%. The removal efficiency of permanganate index and UV_{254} were about 40% ~ 50% and 30% ~ 45%, respectively. The operation time of the MBR was as long as 60 ~ 70 hours. Adding powder activated carbon (PAC) has increased the organic pollutant removal efficiency but it has no significant influence on the membrane permeability. Therefore, the MBR was capable of effectively treating waters typically used for drinking water supplies, particularly when the low temperature and low turbidity water are treated. The effluent water quality of MBR was better than that of conventional process. PAC-MBR combined process can be used to enhance organic pollutants removal efficiency when raw water was polluted severely.

Key words: low temperature and low turbidity; pollutants removal; membrane bioreactor (MBR); powder activated carbon (PAC)

膜分离与生物处理相结合的工艺称为膜生物反应器工艺(membrane bioreactor, MBR). MBR 工艺在废水处理工艺中研究较广泛^[1~3], 近年来, 膜生物反应器在饮用水中的研究逐渐增多, 研究多集中于脱氮^[4~8]、处理微污染水中有机物^[9~12]等方面, 对低温低浊饮用水的应用研究较少. 而我国北方地区每年有 3 ~ 5 个月的冰冻期, 地表水水源在这一时期呈现低温低浊特性: 水温 0 ~ 5℃, 浊度 10 ~ 30 NTU (有时在 10 NTU 以下). 此时水中胶体颗粒电位升高, 稳定性增强; 颗粒的布朗运动减弱; 水体中无机胶体颗粒含量减少, 有机胶体颗粒含量增加; 动力粘滞系数变大, 颗粒的极限沉降速度变小, 因而浊度去除率降低. 受低温低浊的影响, 我国北方地表水厂水量、水质很难达到设计负荷, 经常采用降低负荷的方法以保证用水需求, 供水形势趋于紧张.

对于低温低浊水, 一些研究采用新型絮凝剂或采用直接过滤、浮沉池等工艺, 取得了较好的效

果^[13~16]. 本研究采用膜生物反应器(MBR)工艺处理低温低浊水源水, 考察了 MBR 工艺对浊度和有机污染物的去除效果, 与地表水厂的常规处理工艺出水水质进行比较. 并在反应器中进一步投加粉末活性炭(powdered activated carbon, PAC)形成 PAC-MBR 组合工艺, 进一步探讨对水源水中的污染物去除效果和膜过滤性能的影响.

1 材料与方法

1.1 原水水质

以哈尔滨冬季松花江的低温低浊水为研究对象, 原水水质具体参数如下: 水温 3 ~ 5℃, 浊度 5 ~ 15 NTU, 色度 10 ~ 30 度, 高锰酸盐指数 4.6 ~ 6

收稿日期: 2006-01-27; 修订日期: 2006-04-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601120)

作者简介: 左金龙(1970 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为饮用水处理技术, E-mail: mdjzl@163.com

mg/L, UV_{254} : $0.08 \sim 0.18 \text{ cm}^{-1}$, pH 值 $6.9 \sim 7.2$. MBR 试验装置设在哈尔滨某水厂内, 该水厂工艺为絮凝、沉淀、过滤、消毒常规水处理工艺. MBR 工艺和常规水处理工艺均采用同一原水.

1.2 试验装置及参数

试验反应装置如图 1 所示, 反应器材质为有机玻璃, 有效容积 200 L. 膜组件采用聚丙烯平板式中空纤维膜, 截留相对分子质量 5×10^4 , 膜孔径 $0.1 \mu\text{m}$, 膜片尺寸为 $800 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. 膜面积 8 m^2 , 生物反应器的水力停留时间(HRT)控制在 3 h 左右. 生物固体平均停留时间(SRT)控制在 60 d 左右.

原水由进水泵送入高位水箱, 重力流入平衡水箱, 平衡水箱内设置浮球阀, 可根据反应器出水的多

少, 自动调节进水量, 保持水位恒定, 维持系统稳定运行. 膜组件淹没于反应器内, 曝气形式采用穿孔管连续曝气, 以提供微生物降解有机物所需的氧, 并在膜表面形成剪切流, 减轻污泥在膜表面的沉积, 增强反应器内混合液的扰动. 气源来自于曝气泵, 气体在进入反应器之前先进入气体流量计, 以便调节和控制曝气量. 膜出水采用间歇抽吸方式运行, 由时间继电器控制, 抽吸 10 min, 停 5 min. 出水管路上设置真空表和流量计, 同时并联设置反冲洗水管. 试验后期在反应器内加入 100 mg/L 的粉末活性炭(PAC), PAC 的材质为木质炭, 型号 ICT200, 粒度 96.9% 过 200 目, 平均粒径 $55 \mu\text{m}$, 碘值 900 mg/g, 亚甲基蓝值 180 mg/g, 比表面积为 $800 \sim 1\,200 \text{ m}^2/\text{g}$.

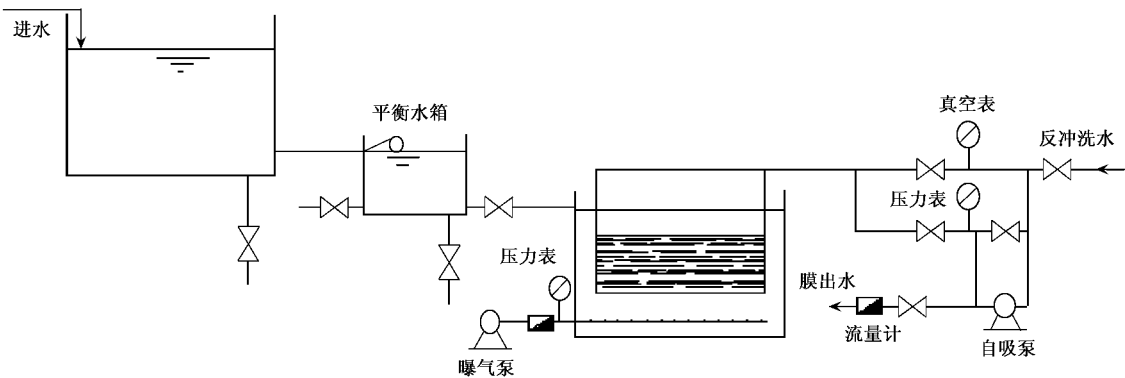


图 1 MBR 试验装置
Fig.1 Experimental apparatus of MBR

1.3 分析项目与方法

试验分析的指标为进出水的浊度、高锰酸盐指数、 UV_{254} . 高锰酸盐指数采用标准酸性高锰酸钾法. UV_{254} 为紫外光在 254 nm 下的吸光度, 采用日本岛津 UV-2550 紫外分光光度计测定, 比色皿为 1 cm. 浊度采用 HACH 2100A 数字浊度仪测定.

2 结果与讨论

2.1 对浊度的去除效果

对于饮用水来说, 浊度降低, 水的色度、嗅味、有机物含量也相应降低, 并可进一步提高病原微生物的去除率. 试验中 MBR 对低温低浊水处理的效果如图 2 所示. 从图 2 可看出, 对于低温低浊水, 常规处理工艺滤后水浊度在 $1 \sim 2.1 \text{ NTU}$, 且滤后水浊度随着原水浊度的增加而缓慢增加. 尽管原水的浊度波动较大, 但 MBR 出水的浊度一直小于 1 NTU, 稳定在 $0.2 \sim 0.5 \text{ NTU}$, 去除率大于 90%, 出水浊度不随原水浊度的增加而增加.

控制出水浊度 $< 0.3 \text{ NTU}$, 隐孢子虫和贾第虫含量在检测限以下. 国外采用膜工艺的水厂, 其出水浊度均在 0.2 NTU 以下, 细菌含量为 0^[17]. 膜工艺能够有效地去除水中的微粒, 直径在 $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 范围的微粒的平均对数去除率为 3.3 ~ 4.4, 而粒径范围在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的颗粒的对数去除率为 2.3 ~ 5.5^[9]. 对于原水浊度的去除, 超滤膜的工作机理是以物理截留作用为主.

因此, 对于低温低浊水, MBR 对浊度具有较好的去除率. 依靠膜孔径的强制截留作用, 出水浊度一直稳定在 $0.2 \sim 0.5 \text{ NTU}$, 不受原水浊度波动的影响.

2.2 对有机污染物的去除效果

有机污染物是饮用水中一项重要指标. 以除油和消毒为主的传统常规水处理工艺, 不能有效去除水中的有机污染物. 试验重点考察 MBR 对有机污染物综合指标(高锰酸盐指数和 UV_{254})的去除效果.

2.2.1 对高锰酸盐指数的去除效果

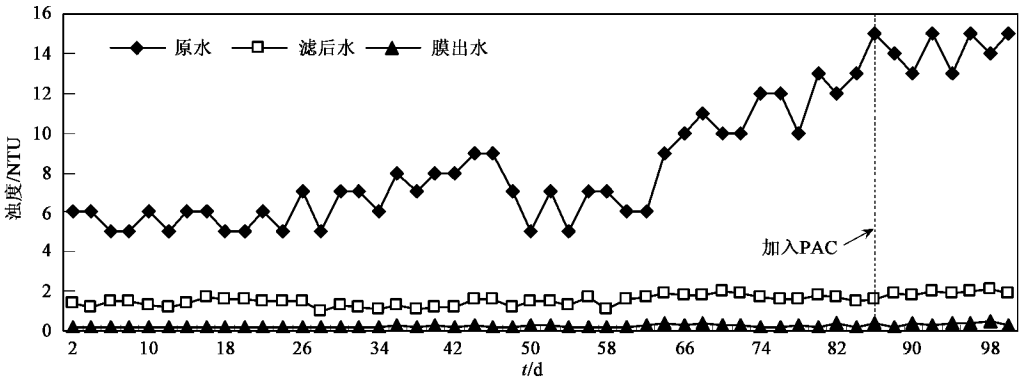


图 2 滤池出水和膜生物反应器出水浊度比较

Fig.2 Comparison of the effluent turbidity of filter and MBR process

由于东北地区冬季江河径流量小,而污水排放量并没有减少,因此水源水中有机物污染较为严重.如图 3 所示,原水的高锰酸盐指数值较高.对于常规水处理工艺,进水高锰酸盐指数浓度变化时,滤后水高锰酸盐指数浓度波动较大,去除率也较有限,一般

在 25% ~ 30%.而 MBR 工艺出水高锰酸盐指数浓度波动较小,去除率较高,一般在 40% ~ 50%.因此,MBR 对高锰酸盐指数去除效果稳定且优于常规工艺滤后水水质.

2.2.2 对 UV_{254} 的去除效果

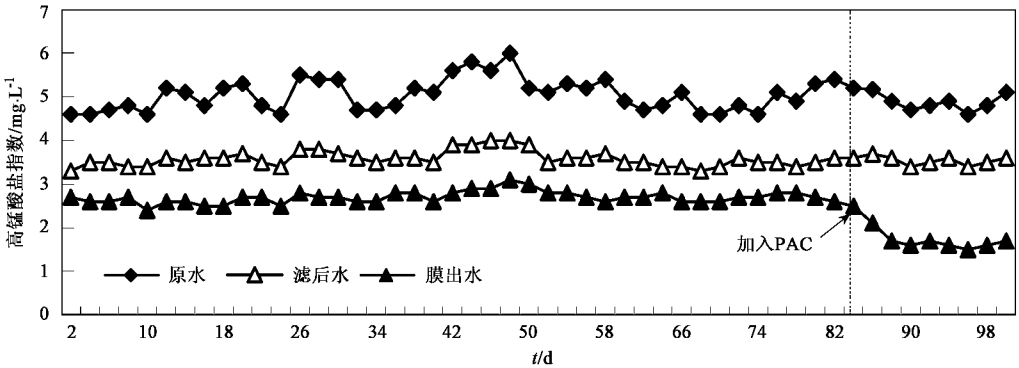


图 3 滤池出水和膜生物反应器出水高锰酸盐指数比较

Fig.3 Comparison of the effluent permanganate index of filter and MBR process

UV_{254} 的数值代表了水中具有苯环和共轭双键结构有机物的相对多少,可以作为三卤甲烷前体物 (THMFP) 的替代参数,与高锰酸盐指数所代表的有机物有一定区别.在 254 nm 处紫外吸收强的有机物,一般来说相对分子质量较大,不易生物降解.滤池出水和膜出水的 UV_{254} 比较如图 4 所示,试验期间进水 UV_{254} 值在 $0.08 \sim 0.15 \text{ cm}^{-1}$,常规工艺和 MBR 工艺出水 UV_{254} 值均波动较大.常规工艺去除率在 0 ~ 23%,MBR 工艺去除率平均在 30% ~ 45%.MBR 依靠膜组件的强制截留作用和反应器内微生物降解有机物的双重作用,保证对水中 UV_{254} 的稳定去除效果.

2.3 投加 PAC 对 MBR 的影响

2.3.1 投加 PAC 对浊度、有机物的影响

投加 PAC 对浊度的影响如图 2 所示,MBR 系统加入 PAC 后,对浊度的去除几乎没有影响.常规工艺投加 PAC,由于一部分 PAC 会穿透滤池随水流出,出水浊度反而会上升^[18].而 MBR 依靠膜组件的强制截留作用,将 PAC 全部截留在反应器内,出水浊度始终低于 1 NTU.这样就避免了常规工艺投加 PAC 带来的出水浊度升高的缺点.

投加 PAC 对有机物的影响如图 3 和图 4 所示.由图 3 可见,加入 PAC 后,MBR 对高锰酸盐指数去除率有明显的提高,在投加 PAC 后的前几日内,保持较高的高锰酸盐指数去除率,之后出水高锰酸盐指数较稳定,去除率保持在 45% ~ 60%.一般认为: PAC 对小分子量的有机物去除效果较好,对大分子量有机物去除效果较差, PAC 与 MBR 组合有较强的互补性,对高锰酸盐指数去除率较高^[19].

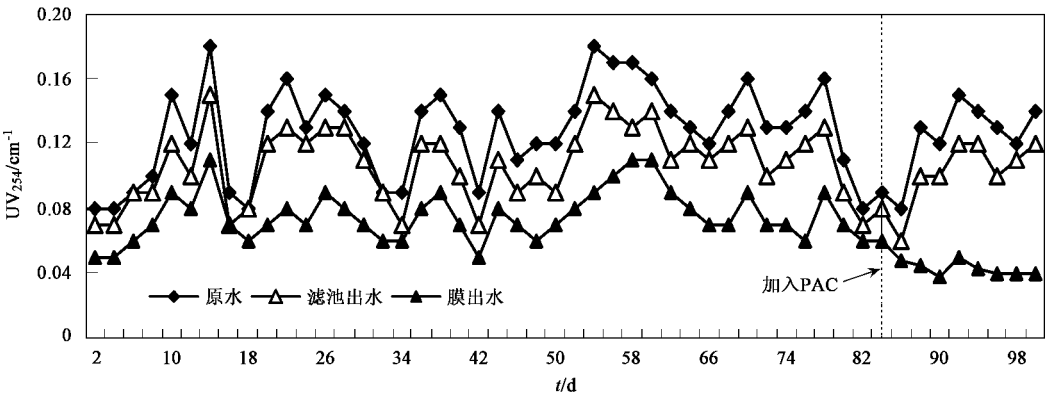


图 4 滤池出水和膜生物反应器出水 UV_{254} 比较

Fig.4 Comparison of the effluent UV_{254} of filter and MBR process

由图 4 可见,加入 PAC 后,MBR 对 UV_{254} 去除率有所提高,但与高锰酸盐指数去除率相比,提高的幅度相对较小,这与其他文献报道相一致,原因可能是 UV_{254} 代表的物质较难生物降解的缘故^[19].

2.3.2 投加 PAC 对膜通量、膜压力的影响

膜生物反应器具有污染物去除效率高、产生剩余污泥少、出水水质好等特点,但膜污染问题的存在,限制了膜生物反应器技术推广应用^[20].膜污染就是颗粒杂质在膜表面和膜孔内吸附沉积,使水通过膜的阻力增加,影响了膜的产水量,试验过程中采用 2 种方法保持一定的膜通量.

(1)采用间歇出水的运行方式 以往的研究表明,当膜组件工作一段时间以后,膜的过滤阻力急剧上升,说明膜组件连续工作不能超过一定的时间,否则很快会造成膜的污染.因此,膜组件在工作一定时间后,应停止出水,进行空曝气以减小膜的污染.本试验采用条件为:膜组件工作 10 min,空曝气 5 min,在试验运行中起到了较好的效果.

(2)投加粉末活性炭(PAC) 向反应器中投加 PAC,有助于改善混合液的特性,提高膜生物反应器的处理效率.在反应器内加入 PAC 后,可有效地吸附水中的有机物,并且 PAC 上吸附的有机物又会被微生物降解,再利用膜截留去除微粒的特性,提高了有机物的去除效率.同时,减少了有机物在膜表面和膜孔内吸附沉积,从而减轻了膜污染.PAC 吸附在膜的表面,形成一层多孔膜,这层膜较为松软,容易被去除,降低了膜清洗的难度.

由图 5 可知,MBR 开始运行时,膜通量快速下降,在 1 d 后稳定在 $5 \sim 6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. MBR 运行 2 个周期后加入 PAC,但膜通量几乎没有变化.随着运行时间的增加,膜过滤压力逐渐升高.为控制 MBR 在低压条件下运行,设定抽吸压力在 $0.028 \sim 0.042 \text{ MPa}$,到达高限时,自动进行反冲洗.反冲洗压力 0.1 MPa ,反洗 1 min,膜通量可恢复 $90\% \sim 98\%$.

膜组件的过滤周期较长,一般在 $60 \sim 70 \text{ h}$.从图 5 中可看出,投加 PAC 对膜过滤性能没有显著影响.

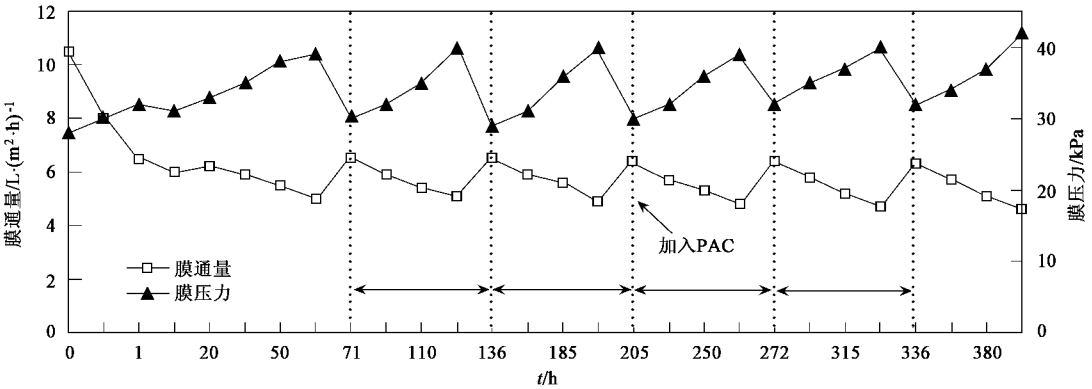


图 5 投加 PAC 对 MBR 的膜通量和膜压力的影响

Fig.5 Influence on MBR flux and operation pressure by adding PAC

3 结论

(1)采用 MBR 处理低温低浊水,出水浊度低于 1 NTU,去除率稳定在 90% 以上.对高锰酸盐指数和 UV₂₅₄ 的去除率为 40% ~ 50% 和 30% ~ 45%.与常规工艺出水水质相比,MBR 出水水质较好.

(2)MBR 的运行周期较长,达 60 ~ 70 h.加入 PAC 后,形成 PAC-MBR 组合工艺,对浊度去除效果、膜通量和膜压力、运行周期均无显著影响,但有机物去除率有较大提高.

(3)当原水有机物污染严重时,可采用 PAC-MBR 组合工艺,增强对有机污染物的去除效果.

参考文献:

[1] Lee J M, Ahn W Y. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor[J]. Water Research, 2001, 35(10): 2435 ~ 2445.

[2] Shim J K, Yoo I K, Lee Y M. Design and operation consideration for wastewater treatment using a flat submerged membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2002, 38(2): 279 ~ 285.

[3] Witzig R, Manz W, Rosenberg S, *et al.* Microbiological aspects of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater[J]. Water Research, 2002, 36(2): 394 ~ 402.

[4] Buttiglieri G, Malpei F, Daverio E, *et al.* Denitrification of drinking water sources by advanced biological treatment using a membrane bioreactor[J]. Desalination, 2005, 178(1-3): 211 ~ 218.

[5] Ergas S J, Rheinheimer D E. Drinking water denitrification using a membrane bioreactor [J]. Water Research, 2004, 38(14-15): 3225 ~ 3232.

[6] Nuhoglu A, Pekdemir T, Yildiz E, *et al.* Drinking water denitrification by a membrane bio-reactor[J]. Water Research, 2002, 36(5): 1155 ~ 1166.

[7] Smith R L, Buckwalter S P, Repert D A, *et al.* Small-scale, hydrogen-oxidizing-denitrifying bioreactor for treatment of nitrate-contaminated drinking water [J]. Water Research, 2005, 39(10):

2014 ~ 2023.

[8] Matos C T, Velizarov S, Crespo J G, *et al.* Simultaneous removal of perchlorate and nitrate from drinking water using the ion exchange membrane bioreactor concept[J]. Water Research, 2006, 40(2): 231 ~ 240.

[9] Karimil A A. Microfiltration goes to Hollywoods the Los Angeles experience [J]. Journal of American Water Works Association, 1999, 91(6): 90 ~ 103.

[10] Li X Y, Chu H P. Membrane bioreactor for the drinking water treatment of polluted surface water supplies [J]. Water Research, 2003, 37(19): 4781 ~ 4791.

[11] Tomaszewska M, Mozia S. Removal of organic matter from water by PAC/UF system [J]. Water Research, 2002, 36(16): 4137 ~ 4143.

[12] Dosoretz C G, B ddeker K W. Removal of trace organics from water using a pumped bed-membrane bioreactor with powdered activated carbon [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 239(1): 81 ~ 90.

[13] 王毅力, 汤鸿霄, 宋乔健, 等. 絮凝-DAF 中试工艺处理密云水库低温低浊水的影响因素 [J]. 环境科学, 2001, 22(1): 27 ~ 31.

[14] 孙志民, 赵洪宾, 马军. 新型侧向流斜板浮沉池处理低温低浊水的试验研究[J]. 给水排水, 2004, 30(11): 19 ~ 21.

[15] 刘洋, 张声, 张晓健. 活性炭深床浮滤池以直接过滤方式运行处理低温低浊水研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(12): 101 ~ 104.

[16] 王红宇, 李久义, 栾兆坤, 等. 聚合氯化铁絮凝处理低温低浊水的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(12): 25 ~ 27.

[17] 杨艳玲, 李星, 丛丽, 等. 优化监测与净水工艺提高致病原生物去除率[J]. 给水排水, 2003, 29(6): 22 ~ 27.

[18] 安东. 活性炭吸附和生物作用除污染效能与机理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[19] 迪莉拜尔·苏力坦, 莫罹, 黄霞. PAC-MBR 组合工艺处理微污染源水的研究[J]. 水处理技术, 2003, 29(3): 143 ~ 146.

[20] Yang W B, Cicek N, Ilg J, *et al.* 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.