

超滤膜与不同处理工艺组合处理湖泊水的中试研究

许航¹, 陈卫¹, 袁哲¹, 陈杰², 孙婧¹, 韩志刚¹

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 苏州立升膜分离科技有限公司, 江苏苏州 215152)

摘要:为解决水厂现有净水工艺不能适应水源水质恶化的现状,采用国产超滤膜分别处理水厂的炭后水(工艺1)、滤后水(工艺2)和沉后水(工艺3),将超滤膜和水厂现有工艺结合,形成深度处理系统,研究超滤膜组合工艺的处理效能及超滤膜的过滤性能。研究表明:工艺1、工艺2和工艺3对COD_{Mn}的平均去除率分别为52.86%、39.62%和34.59%;DOC的平均去除率分别为33.08%、23.60%和18.55%,UV₂₅₄去除率分别为57.14%、39.66%和35.34%,藻类平均去除率分别为98.71%、97.84%和98.13%,3种工艺出水浊度均低于0.1 NTU,颗粒物粒径>2 μm的颗粒物控制20个/mL以下。工艺1运行45 d跨膜压差上升6.59%,产水率为98.02%;工艺2膜前加氯0.65 mg/L时,水力冲洗后跨膜压差可有效恢复,稳定运行10 d跨膜压差上升2.91%,产水率为97.63%;工艺3运行20 d跨膜压差上升13.52%,其产水率为97.01%。

关键词:超滤膜;跨膜压差;臭氧生物活性炭;混凝;沉淀;过滤

中图分类号:TU991.1 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2010)03-0149-06

Experimental Investigation of Ultrafiltration Membrane With Different Pretreatment technology for Lake Water

XU Hang¹, CHEN Wei¹, YUAN Zhe¹, CHEN Jie², SUN Jing¹, HanZhi-gang¹

(1. Environmental College of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Suzhou Litree Ultrafiltration Membrane Technology Co Ltd Suzhou, 215152, China)

Abstract: In order to solve the problems that the exiting technologies do not adapt to the deterioration of the water quality in the water plant, the ultrafiltration was used to treat water respectively from ozone-biological activated carbon pool (process 1), sand filtration pool (process 2) and sedimentation tank (process 3) in the region of river network of southern China. It is found that the average DOC removal rate were 33.08%, 23.60%, and 18.55%, and the average alga removal are 98.71%, 97.84%, and 98.13% in the process 1, process2 and process3, respectively. The turbidity of the effluent is lower than 0.1 NTU, and the particles with their size bigger than 2 μm were lower than 20 per milliliter in all the three process. The trans-membrane pressure increased by 6.59% and the water production rate of the UF membrane was 98.02% during 45 days pilot experiment in the process 1. When 0.65mg/L chlorine was added before ultrafiltration membrane, the trans-membrane pressure was recovered effectively after hydraulic flush. And the trans-membrane pressure increased by 2.91% and the water production rate of the UF membrane was 97.63% during 10 days pilot experiment in the process 2. The trans-membrane pressure increased by 13.52% and the water production rate of the UF membrane was 97.01% during 20 days pilot experiment in the process 3.

Key words: ultrafiltration membrane; trans-membrane pressure; ozone-biological activated carbon;

收稿日期:2009-12-25

基金项目:国家自然科学基金(50638020);国家科技重大专项资助(2008ZX07422-005)

作者简介:许航(1981-),男,博士,主要从事水处理研究,(E-mail)xuhang810826@sina.com。

sedimentation, filtration

由于水源水污染加剧,传统工艺渐显处理效能不足,因此迫使人们寻找新的、更加有效的自来水制造方法。此外,人们生活水平的提高和保健意识的增强,对水质要求越来越高,也推动了这种需求。近年来,随着膜技术的成熟和价格的下降,膜技术已广泛应用于水处理领域,其中超滤膜用于自来水的生产发展迅速,它可望取代混凝、沉淀、砂滤和消毒的常规自来水生产工艺,成为水处理领域里最大的技术革新之一^[1-6]。美国科罗拉多州 Columbine 水厂,供水规模 $18.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原有砂滤出水改为超滤膜出水,水回收率高达 99%;加拿大 Lakeview 水厂,供水规模 $26.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是目前最大的臭氧活性炭耦合超滤膜的深度处理系统。美国 Columbia Heights 水厂,供水规模 $26.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,面对美国水质法规的压力,用超滤膜替代传统过滤,以去除两虫,保障饮用水的微生物安全^[7]。董秉直等人^[8]用混凝-砂滤-超滤处理长江水的中试研究,膜出水浊度、 COD_{Mn} 和 DOC 的平均值为 0.68 NTU、1.23 mg/L 和 1.3 mg/L。夏圣骥等人^[9]用混凝-超滤处理北方某水库水,处理后水质全分析结果满足中国标准。天津杨柳青水厂 $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 膜处理示范工程,采用混凝-超滤工艺处理滦河水,其出水浊度始

终低于 0.1 NTU,有机物处理效果好于常规处理,藻类可被完全去除^[10]。由此可见,目前中国针对内压式超滤膜在市政给水领域内的应用,主要是集中在新的组合工艺的研发上,结合水厂现有工艺,超滤膜用来升级和改造现有常规工艺尚无人深入研究。该研究以南方河网地区湖泊水为对象,研究解决微污染源中高藻和高有机物浓度对常规饮用水处理系统冲击,臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)工艺出厂水中细菌超标和活性炭颗粒随水流泄漏等生物安全性问题。采用国产超滤膜,在水厂不同工艺末端分别进行以超滤膜为核心的中试研究,分析其处理效能及影响因子,为南方地区水厂改造或升级提供科学依据。

1 试验装置及方法

1.1 工艺流程

该试验在南方河网地区某水厂内进行。该厂采用预臭氧、混凝、沉淀、砂滤、臭氧和生物活性炭的深度处理工艺。试验期间,水厂所用混凝剂为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,投量 30 mg/L,预臭氧和臭氧投加量分别为 0.5 mg/L 和 1.5 mg/L。

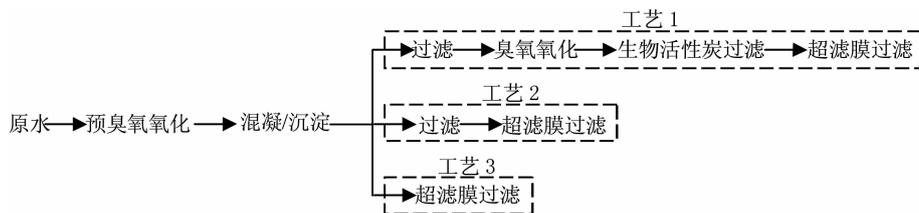


图 1 试验工艺流程图

超滤系统由叠片过滤器、原水泵、反洗泵、超滤膜组件和 PLC 自控系统组成。超滤膜原水泵分别抽取生物活性炭池出水(工艺 1)、砂滤池出水(工艺 2)和沉淀池出水(工艺 3),经 $100 \mu\text{m}$ 的叠片过滤器进入超滤系统。超滤膜的过滤和冲洗由可编程控制器(PLC)自动控制,采用死端式恒流过滤,过滤通量 $100 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$,冲洗用水均用膜过滤水。工艺 1、工艺 2 和工艺 3 种超滤膜每周期过滤时间分别为 60 min、50 min 和 40 min,反洗时间均为 45 s($5 \text{ m}^3/\text{h}$ 正冲 15 s, $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 反冲 20 s, $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 正冲 10 s)。该试验超滤膜为海南立升膜公司提供的 PVC 合金中空纤维膜,切割分子量为 10 万道尔顿,膜有效面积为 40 m^2 。工艺流程见图 1。

1.2 测定方法及检测手段

UV_{254} 、DOC、浊度和颗粒数分别采用岛津 $\text{UV}-2550$ 型紫外可见光分光计、岛津 $\text{TOC}-\text{VCPH}$ 、Hach-2100N 浊度仪和 IBR 颗粒计数器, UV_{254} 和 DOC 检测前均过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜。藻类:采集 1 L 水样,添加鲁格试液固定,沉淀 24 h,将沉淀物混匀定容至 30 ml,制片计数。其它项目测定按《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行。

2 结果与讨论

2.1 对有机物的去除

图 2 为 3 种工艺对 COD_{Mn} 的去除情况,工艺 1 中原水 COD_{Mn} 平均浓度为 4.90 mg/L,沉淀池、砂滤池

和生物活性炭出水平均浓度分别为 3.83 和 3.34 mg/L 和 2.71 mg/L,超滤膜进一步处理后 COD_{Mn} 平均浓度降为 2.31 mg/L,工艺 1 整体上对 COD_{Mn} 的去除率为 52.86%;工艺 2 原水 COD_{Mn} 平均浓度为 4.72 mg/L,沉淀池和砂滤池出水 COD_{Mn} 平均浓度分别为 3.79 mg/L 和 3.40 mg/L,超滤膜出水 COD_{Mn} 平均浓度为 2.85 mg/L,工艺 2 整体上对 COD_{Mn} 的去除率为 39.62%;工艺 3 原水 COD_{Mn} 平均浓度为 4.51 mg/L,沉淀池出水 COD_{Mn} 的平均浓度为 3.83 mg/L,超滤膜出水 COD_{Mn} 平均浓度降为 2.95 mg/L,工艺 3 对 COD_{Mn} 的去除率为 34.59%。

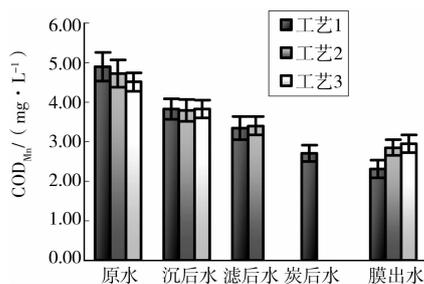


图2 不同工艺对 COD_{Mn} 的去除

图3可知,工艺1原水 DOC 平均浓度为 5.26 mg/L,经沉淀、过滤、臭氧和生物活性炭工艺处理后 DOC 平均浓度降为 3.75 mg/L,超滤膜处理后出水 DOC 平均浓度为 3.52 mg/L,工艺1整体上对 DOC 的去除率为 33.08%;工艺2原水 DOC 平均浓度为 5.17 mg/L,经沉淀和过滤后 DOC 浓度降为 4.31 mg/L,超滤膜出水 DOC 的平均浓度为 3.95 mg/L,工艺2整体上对 DOC 的平均去除率为 23.60%;工艺3原水 DOC 平均浓度为 5.23 mg/L,超滤膜出水 DOC 平均浓度为 4.26 mg/L,工艺3整体上对 DOC 的平均去除率为 18.55%。

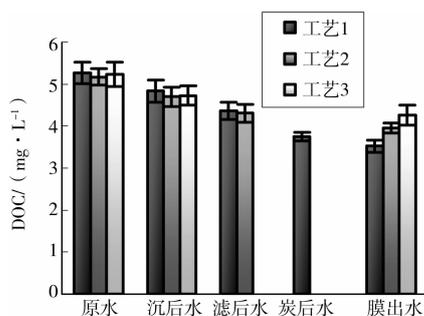


图3 不同工艺对 DOC 的去除

图4可知,工艺1、工艺2和工艺3的进水 UV_{254} 平均值为 0.112 cm^{-1} 、 0.116 cm^{-1} 和 0.116 cm^{-1} ,其出水 UV_{254} 平均值分别为 0.048 cm^{-1} 、 0.060 cm^{-1} 和 0.065 cm^{-1} ,整体上工艺的去除率分

别为 57.14%、48.28% 和 43.97%。混凝、沉淀和砂滤去除分子量相对较大的有机物,对于 UV_{254} 代表部分腐殖酸类有机物,多为亲水性小分子有机物,臭氧活性炭工艺去除优势明显,超滤膜对有机物的截留作用有限。

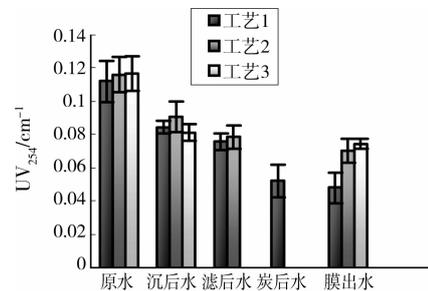


图4 不同工艺对 UV_{254} 的去除

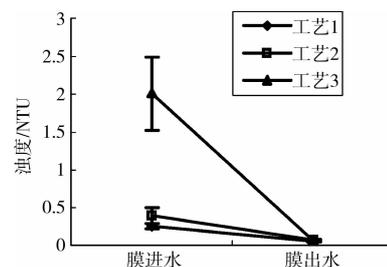


图5 不同工艺膜进出水浊度的对比

2.2 对浊度及颗粒物的去除

试验期间原水浊度较低,原水浊度为 $6.74\sim 14.31\text{ NTU}$,工艺1中超滤膜进水平均浊度 0.25 NTU ,出水平均浊度为 0.06 NTU ;工艺2超滤膜进水平均浊度 0.39 NTU ,超滤膜出水平均浊度 0.07 NTU ;工艺3中超滤膜进水为沉后水,水质波动相对较大,进水平均浊度为 2.01 NTU ,但超滤膜出水浊度稳定,平均浊度为 0.07 NTU 。3组工艺试验期间,超滤膜出水浊度均小于 0.1 NTU 。由此可见,超滤膜进水浊度对超滤膜出水浊度影响较小。进水浊度会影响过滤和反冲洗周期及叠片过滤器的清洗时间,从而最终影响超滤膜的产水率。

表1所知,工艺1、工艺2和工艺3进水颗粒物粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物平均数目为 106 个/mL 、 343 个/mL 和 4188 个/mL ,3种工艺出水中颗粒物粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物控制 20 个/mL 以下,粒径 $>10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物几乎被完全去除。资料表明,当水中粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒数超过 100 个/mL 时,水中存在“两虫”的几率很大,当水中粒径 $>2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物低于 50 个/mL 时,病原体特别是对氯消毒具有抗性的贾第鞭毛虫和隐孢子虫给饮用水带来的风险也较低。因此经过超滤膜处理后出水中存在贾第虫、隐孢子虫等原生动物的可能性极小^[11-12]。

表 1 不同工艺膜进出水颗粒数对比

颗粒粒径/ μm	≥ 2	5~7	7~10	10~15	15~20	20~25	25~50
活性炭池出水	354	62	31	8	3	1	1
超滤膜出水 1	11	7	2	1	1	0	0
砂滤池出水	347	208	73	42	14	5	1
超滤膜出水 2	11	7	4	3	1	0	0
沉淀池出水	3 452	2 238	939	608	221	118	43
超滤膜出水 3	9	5	3	2	1	0	0

2.3 对藻类的去除

超滤过程是机械筛分的过程,PVC 中空纤维膜的平均孔径为 $0.01 \mu\text{m}$ 。超滤能对微生物有很好的截流效果,出水中细菌、粪大肠和总大肠菌群均未检出。工艺 1 出水藻类平均数量 1.83×10^4 个/L,整体工艺对藻类的去除率为 98.71%;工艺 2 出水藻类平均数量为 2.79×10^4 个/L,整体工艺对藻类的去除率为 97.84%;工艺 3 出水藻类数量为 2.25×10^4 个/L,整体工艺对藻类的去除率为 98.13%。当藻类数量在 10^4 个/L 计数时,特别是超滤膜出水,计数板上只有 1~3 个藻个体,存在一定计数误差。超滤膜除藻时不会破坏藻细胞,使其释放细胞内的毒素和有机物,生成副产物。

2.4 跨膜压差的变化及产水率

理论跨膜压差可由公式 1 表示,该试验 3 种工艺试验时均采用恒流过滤运行。

$$p = \mu \cdot J \cdot R_t \quad (1)$$

$$p_{\text{校正}} = p_i \frac{\mu_{\text{校正}}}{\mu_i} \quad (2)$$

温度的变化会引起水中热力学参数的变化,随着温度的降低,水中分子和胶体等物质运动速率降低,水的粘度增大。恒流过滤时,跨膜压差随水温的下降而上升。为了方便比较,通常将测得的跨膜压差换算成基准温度下的跨膜压差。该试验夜间和白天温差变化较大,为真正反应膜污染引起的跨膜压差上升,排除由温度变化带来的干扰,该试验对于跨膜压差的数据均作校正,校正公式如公式 2。

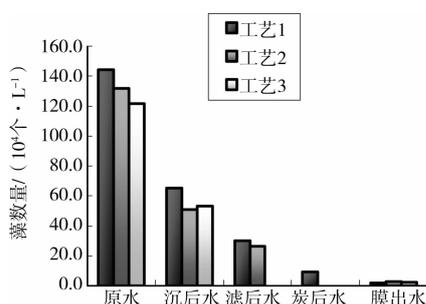


图 6 不同工艺对藻类的去除

图 7 为 3 种工艺运行时超滤膜的跨膜压差变化图。工艺 1、工艺 2 和工艺 3 每周期过滤时间分别为 60 min、50 min 和 40 min,反洗时间均为 45 s,其中 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 正冲 15 s, $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 反冲 20 s, $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 正冲 10 s。工艺 1 运行 45 d,跨膜压差从起始的 23.23 kPa,上升至 24.76 kPa,整体上升 6.59%。工艺 2 运行时,超滤膜直接过滤砂滤出水,46 h 后内超滤膜的跨膜压差由 24.76 kPa 迅速上升至 120 kPa,水力冲洗后,超滤膜跨膜压差无法恢复。为此,配制 0.5% 的 NaOH 和 0.1% 的 NaClO(自由氯计)混合液进行化学清洗。首先,混合液在超滤系统中循环 2 h,停机浸泡 12 h。再用 0.2% 的 HCl 清洗液在超滤系统内循环 2 h,浸泡 6 h。最后,关闭产水阀门,用自来水顺冲和反冲交替冲洗超滤膜,直至进、出水 UV₂₅₄ 无变化,结束清水冲洗。重新启动中试时,采用膜前加氯的方式,加氯量为 0.8 mg/L,20 d 内跨膜压差由起始的 23.46 kPa 上升至 24.89 kPa,上升 6.10%,运行 20 d 后降低加氯量为 0.65 mg/L,10 d 内超滤膜跨膜压差上升 2.91%;继续降低加氯量为 0.35 mg/L,10 d 内超滤膜跨膜压差上升 22.62%。为控制跨膜压差的增长,再次改变膜前加氯量为 0.65 mg/L 运行,跨膜压差有降低的趋势,16 h 后起始跨膜压差由 32.16 kPa 降到 25.66 kPa,随后 10 d 运行数据来看,跨膜压差增长缓慢、平稳。工艺 3 超滤系统进水改为水厂的沉淀池出水,膜前加氯量保持为 0.65 mg/L,20 d 内超滤膜的起始跨膜压差由 26.34 kPa 上升至 29.9 kPa,上升 13.52%。

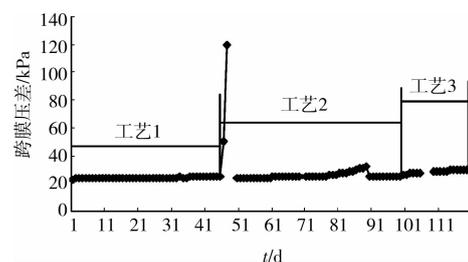


图 7 中试运行跨膜压差

由此可见,不同预处理工艺影响超滤膜运行工

况和跨膜压差的变化。工艺1采用的预处理工艺常规一臭氧生物活性炭工艺,臭氧将疏水性的腐殖酸等有机物降解为亲水性的小分子有机物减缓跨膜压差,同时由于活性炭滤池出水的少量碳粒等颗粒物和有机大分子沉积在超滤膜表面形成滤饼层,起到动态过滤膜的作用,即吸附和过滤的双重作用^[13-15],阻挡膜的表面和孔内污染,延长了过滤时间,当动态膜滤饼层厚度增加、孔隙变小或堵塞时,造成跨膜压差的增大,其产水率为98.02%。工艺2的预处理工艺是常规一预氯化工艺,NaClO作为一种强氧化剂,能有效地氧化覆盖在胶体表面的有机涂层,降低水中胶体颗粒表面 ξ 电位,NaClO氧化作用能影响水中溶解性有机物的亲水性能,从而增加对水中溶解性有机物的去除。超滤膜过滤结束后所截留的颗粒物和溶解性有机物较易被冲洗掉,因而跨膜压差得到很好恢复,此外,NaClO的杀菌作用,可抑制生物在膜内繁殖,防止生物污染,工艺2的产水率为97.63%。工艺3的预处理为混凝/沉淀一预氯化工艺,混凝/沉淀去除大部分大分子疏水性有机物和颗粒物,残留水中的有机物多为小分子,亲水性,沉淀在矾花上,通过正洗和反洗,滤饼层被冲洗干净,从而超滤膜跨膜压差可有效恢复,但是由于混凝沉淀阶段没有被沉淀完全的矾花被超滤膜的叠片过滤器截留,增加了叠片过滤器清洗频率,影响超滤膜产水率。工艺3试验期间每48h冲洗1次叠片过滤器,其产水率为97.01%。

3 结论

1)超滤膜作为臭氧一活性炭深度处理安全保障技术,能将水中微粒、胶体、细菌和部分病毒能彻底去除,出水 COD_{Mn} 、DOC、 UV_{254} 、浊度和藻类含量平均值分别为2.31 mg/L、3.52 mg/L、 0.048 cm^{-1} 、0.06 NTU和 1.83×10^4 个/L,颗粒物粒径 $>2\ \mu\text{m}$ 的颗粒数为11个/L。经常规和臭氧一活性炭工艺的预处理,延长了超滤膜周期的过滤时间,而增加了超滤膜的产水率,其产水率为98.02%。中试运行45d,跨膜压差上升6.59%。

2)超滤膜直接作为深度处理工艺,出水 COD_{Mn} 、DOC、 UV_{254} 、浊度和藻类含量平均值分别为2.85 mg/L、3.95 mg/L、 0.060 cm^{-1} 、0.07 NTU和 2.79×10^4 个/L,颗粒物粒径 $>2\ \mu\text{m}$ 的颗粒数为15个/L。膜前投加一定量的NaClO,可有效控制跨膜压差的增大,当NaClO投量为0.65 mg/L时,其产水率为97.63%。

3)超滤膜作为砂滤的替代工艺,出水中

COD_{Mn} 、DOC、 UV_{254} 、浊度和藻类含量平均值分别为2.95 mg/L、4.26 mg/L、 0.065 cm^{-1} 、0.06 NTU和 2.25×10^4 个/L,颗粒物粒径 $>2\ \mu\text{m}$ 的颗粒数为11个/L。混凝沉淀去除大部分大分子疏水性有机物和颗粒物,但没有被沉淀完全的矾花会增加叠片过滤器清洗频率,影响超滤膜产水率,其产水率为97.01%。运行20d跨膜压差上升13.52%。

参考文献:

- [1]李圭白,杨艳.超滤—第三代城市饮用水净化工艺的核心技术[J].供水技术,2007,1(1):1-3.
LI GUI-BAI, YANG YAN-LING. Ultrafiltration—the 3(rd) Generation Key Water Purification Technology for City[J]. Water Technology, 2007,1(1):1-3.
- [2]裴亮,姚秉华,付兴隆.超滤新技术及在饮用水处理中的研究应用新进展[J].水资源及水工程学报,2008,19(2):4-11.
PEI LIANG, YAO BING-HUA, FU XING-LONG. New progress of application of ultrafiltration technology into the drinking water treatment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008,19(2):4-11.
- [3]T. CARROLL, et al. The fouling of microfiltration membrane by NOM after coagulation treatment [J]. Water Research, 2000, 34(11):2861-2868.
- [4]ARNAL JM, SANCHO M, VERDU G. Selection of the most suitable ultrafiltration membrane for water disinfection in developing countries [J]. Desalination Strategies in South Mediterranean Countries, 2004, 168(1-3):265-270.
- [5]LAINE J. M, CAMPOS C, BAUDIN I, et al. Understanding membrane fouling: a review of over a decade of research [J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2003, 3(5/6):155-164.
- [6]孙丽华,李星,等.浸没式超滤膜处理地表水的膜污染影响因素试验研究[J].给水排水,2009,35(4):18-22.
SUN UN LIHUA, LIL XING, YANG ANG YANLING, LIL GUIBAI. Pilot study on influential factors on membrane pollution of surface water treatment by immersed ultra filtration membrane[J]. Water & Wastewater Engineering. 2009, 35(4):18-22.
- [7]Plant based on GE's UF technology[J]. Membrane technology, 2005, 12(10):2.
- [8]董秉直.用超滤膜处理长江水[J].膜科学与技术, 2005, 25(1):34-37.
DONG BINZHI, LI WEIYING, QIN ZUQUN, et al. Ultrafiltration of Yangtze river water [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 25(1):34-37.

- [9] 夏圣骥,李圭白,彭剑峰. 超滤膜水净化水库水试验研究[J]. 膜科学与技术,2005,26(2):54-57.
XIA SHENGJI, LI GUIBA, PENG Jianfeng. Study of reservoir water treatment by ultrafiltration [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 26(2): 54-57.
- [10] 韩宏大. 天津市杨柳青水厂超滤膜法饮用水处理技术示范工程[J]. 给水排水,2008,34(9):14-16.
HAN HONG-DA. demonstration project of UF in TianJin YangLiuQing water plant [J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(9):14-16.
- [11] LECHEVALLIER W, WILIAM DN. Examining Relationships between particle counts and giardia, cryptosporidium, and turbidity[J]. AWWA, 1992, 84(12):54-60.
- [12] 崔红梅. 颗粒计数仪在北京第九水厂水处理中的应用[J]. 净水技术,2004,23(3):32-37.
CUIUI HONGMEI. Application of Particle Counter for the Water Treatment in Beijing No. 9 Water Plant[J]. Water Purification Technology, 2004,23(3):32-37.
- [13] SHON HK, VIGNESWARAN S, KIM I S. The effect of pretreatment to ultrafiltration on biologically treated sewage effluent; a detailed effluent organic matter characterization[J]. Water Research, 2004, 38: 1933-1939.
- [14] NILSON J A, DIGIANO F A. 1996. Influence of NOM composition on nanofiltration [J]. Jour of AWWA, 2005,88(5): 53-66.
- [15] 董秉直,张庆元,冯晶. 粉末活性炭预处理对超滤膜通量的影响[J]. 环境科学学报,2008, 28(10):1981-1982.
DONG BINGZHI, ZHANG QINGYUAN, FENG JING. Influence of powered activated carbon (PAC) pretreatment on ultrafiltration membrane flux [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(10): 1981-1982.

(编辑 胡 玲)

(上接第 148 页)

- [4] PARK W, NAMYOUN-KU, LEE MYUN-JOO, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in a CEM (cation exchange membrane)-bounded two chamber system[J]. Water Research,2009,43(15):3820-3826.
- [5] SARIOGLU M, INSEL G, ARIAN N, et al. Model evaluation of simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor operated without an anoxic reactor[J]. Journal of Membrane Science,2009,337(1/2):17-27.
- [6] SEUNG H B, KRISHNA R P. Simultaneous nitrification and denitrification of municipal wastewater in aerobic membrane bioreactors [J]. Water Environment Research, 2008, 80(2): 109-117.
- [7] 左金龙,王淑莹,姜安玺,等. 低溶解氧污泥微膨胀前后污泥硝化活性的对比研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2009,31(4): 117-122
ZUO JIN-LONG, WANG SHU-YING, JIANG AN-XI, et al. Study on comparison of sludge nitrification activity before and after micro-bulking sludge with low DO [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009,31(4): 117-122.
- [8] LONG TENGRUI, CAO YANXIAO, ZHANG HONGJING, et al. Performance of simultaneous nitrification and denitrification in lateral flow biological aerated filter [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 5(4): 223-228
- [9] CHIU YING-CHIH, LEE LI-LING, CHANG CHENG-NAN, et al. Control of carbon and ammonium ratio for simultaneous nitrification and denitrification in a sequencing batch bioreactor [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, 59(1): 1-7
- [10] BAKTI N A K, DICK R I. A Model for a nitrifying suspended-growth reactor incorporating intraparticle diffusional limitation [J]. Water Research, 1992, 26: 1681-1690.
- [11] BACCARI M, PINTO D, RAMADORI A C, et al. Effects of dissolved oxygen and diffusion resistance on nitrificatioin kinetics [J]. Water Researach, 1992, 26: 1099-1104.
- [12] 国家环境保护总局. 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, 53-74
- [13] MUNCH E V, LANT P, KELLER J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench scale sequencing batch reactors[J]. Water Research, 1996, 30(2):277-284

(编辑 胡 玲)