

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.011

正渗透去除单宁酸的影响因素分析

魏永^{1,2}, 吴宏^{1,2}, 罗政博^{1,2}, 李贤建^{1,2}, 魏勤政^{1,2}

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 以单宁酸溶液作为原料液、NaCl溶液作为汲取液,在不同的膜朝向、汲取液和原料液浓度、膜面流速、原料液温度、pH值条件下,研究正渗透膜对单宁酸的去除效果。结果表明,汲取液浓度越高、原料液浓度越低、原料液温度越高、错流流速越大、膜活性层朝向汲取液运行模式均有助于提高膜通量,盐通量与膜通量呈正相关;不同影响因素条件下,正渗透膜对单宁酸的截留率均在97%以上,而在膜活性层朝向原料液模式下运行,对单宁酸的截留率更高。

关键词: 正渗透; 汲取液; 单宁酸; 膜通量; 截留率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0070-07

Influence Factors of Forward Osmosis on Tannic Acid Removal

WEI Yong^{1,2}, WU Hong^{1,2}, LUO Zheng-bo^{1,2}, LI Xian-jian^{1,2}, WEI Qin-zheng^{1,2}

(1. School of Environment and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The removal of tannic acid by forward osmosis membrane under different membrane orientation, concentration of draw solution and feed solution, membrane surface velocity, temperature of feed solution and pH was investigated by using tannic acid solution and NaCl solution as the feed solution and draw solution. The higher concentration of draw solution, lower concentration of feed solution, higher temperature of feed solution, higher cross flow velocity, and operation mode of the membrane active layer towards the draw solution were all beneficial to improve the membrane flux, and the salt flux was positively correlated with the membrane flux. The rejection rates of tannic acid by the forward osmosis membrane were all above 97% under different influencing factors, while the rejection rate was higher when the membrane active layer was running towards the feed solution.

Key words: forward osmosis; draw solution; tannic acid; membrane flux; rejection rate

正渗透(FO)技术是近年来逐渐兴起的一种膜处理技术,不同于反渗透技术,它无需外加压力驱动且膜污染较低。凭借自身的优势,正渗透在海水脱盐、废水净化、垃圾渗滤液处理、食品浓缩和药物释放等领域均有较好的潜力,已成为膜法水处理技术

的热点^[1-5]。

国内外学者对于正渗透已有一些研究,Li等^[6]用三醋酸纤维素(CTA)膜和水通道蛋白薄膜复合膜分别进行粪便浓缩物的浓缩,与后者相比,在CTA膜表面上形成了一层黏性污垢层,污染物可逆性较

基金项目: 常州市社会发展科技支撑计划项目(CE20195032)

通信作者: 魏永 E-mail: weiyong@cczu.edu.cn

差,导致膜通量下降更大,但两种 FO 膜对大量有机物、总磷和重金属均有较高的截留效率。Li 等^[7]研究了以药物为污染物时膜朝向对正渗透的影响,发现由于药物长期积累引起的内部浓差极化或支撑层中的膜污染,压力延迟渗透(PRO)模式下对于药物的去除效果要比正渗透模式下的差。李志浩^[8]研究了以蔗糖、葡聚糖等糖类有机物作为原料液,在汲取液浓度、膜朝向、操作条件、污染物性质等因素变化下对正渗透去除效能的影响,发现正渗透在不同因素下对糖类有机物均有较高的去除率。解一君等^[9]研究了 FO 膜以奎宁和腐殖酸作为目标污染物的去除效能,发现膜通量随着原料液与汲取液的渗透压差、温度的提高而增加,FO 对奎宁和腐殖酸均有很好的截留效果。Zou 等^[10]研究了盐质反向通量(以下称盐通量)对正渗透的影响,发现它可能引起浓度梯度降低和溶质损失等问题。

单宁酸是印染、制革、制药和食品等行业的原料之一,属于难降解多酚类溶解性有机物,不仅会对水体中的颜色产生一定影响,还具有毒性。此外,单宁酸与水体中的生物碱、重金属离子均会发生反应,形成不溶性复合污染物,严重影响饮用水环境的安全^[11]。常规工艺无法有效去除水体中的单宁酸,需要进一步依靠膜技术、活性炭吸附、高级氧化等深度处理工艺,正渗透技术在这类溶解性有机物去除方面具有截留率高、能耗低等显著优势^[9]。但目前关于正渗透去除单宁酸的效果及影响因素方面的研究较少,笔者以 NaCl 作为汲取液、单宁酸溶液作为原料液,分别在改变膜朝向、汲取液浓度、原料液浓度、错流流速、原料液温度和 pH 值等不同因素条件下运行正渗透一体化装置,考察正渗透膜通量及其对单宁酸的截留性能,并分析原因。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

试验仪器:电子天平、电导率仪、温控器、便携式 pH 计、蠕动泵、荧光分光光度计、紫外分光光度计、扫描电镜。

试验材料:正渗透膜片,单宁酸、氯化钠、氢氧化钠、盐酸均为分析纯。

1.2 装置及运行

1.2.1 运行方法

试验装置如图 1 所示。在汲取液和原料液容器

中分别放入一定浓度的 NaCl 溶液和单宁酸溶液,调整蠕动泵流量后运行装置。运行 3 min 待装置平稳后,打开温控开关,设定温度为 20~30 ℃,待温度稳定后,将天平数据和电导率数据传输至计算机中。试验过程中,每隔 1 h 移取 20 mL 样品保存在 4 ℃冰箱中冷藏,便于水质测试与分析,每个试验周期运行 8 h,每种工况条件下重复进行 3 次试验,以消除偶然性误差。

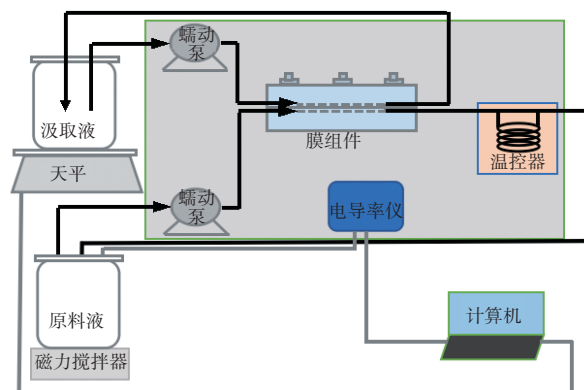


图1 正渗透装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of forward osmosis equipment

1.2.2 运行模式

试验选用三醋酸纤维素正渗透膜,孔径为 0.30~0.35 nm,此膜为非对称膜,表面紧凑且致密的为活性层,表面粗糙且疏松的为支撑层^[12],根据膜朝向的不同可将运行模式分为 FO(活性层朝向原料液)模式和 PRO(活性层朝向汲取液)模式^[13]。考虑到 FO 模式更加适合实际运用,试验中除膜朝向会选择不同运行模式外,其余均为 FO 运行模式。

1.3 分析方法

1.3.1 盐通量

原料液中 NaCl 浓度由电导率与 NaCl 浓度的拟合线性关系式算得,通过式(1)可计算盐通量^[14]。

$$J_s = \frac{C_{f(F)} \cdot V_{f(F)} - C_{f(0)} \cdot V_{f(0)}}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中: J_s 为盐通量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $C_{f(F)}$ 和 $C_{f(0)}$ 分别为原料液最终和初始时刻的盐浓度, g/L ; $V_{f(F)}$ 和 $V_{f(0)}$ 分别为原料液的最终和初始体积, L ; A 为膜的有效面积, 24 cm^2 ; t 为试验运行周期, 8 h 。

1.3.2 单宁酸的截留率和吸附量

通过紫外分光光度计测试原料液样品的 UV_{276} ,原料液样品中单宁酸浓度由 UV_{276} 与单宁酸浓度的拟合线性关系式算得,截留率由式(2)计算获得。

$$\text{截留率} = \frac{C_{g(t)} \times V_{g(t)}}{C_{g(0)} \times V_{g(0)}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $C_{g(t)}$ 和 $C_{g(0)}$ 分别为 t 和初始时刻原料液中单宁酸的浓度, mg/L; $V_{g(t)}$ 和 $V_{g(0)}$ 分别为 t 和初始时刻原料液的体积, L。

吸附量由式(3)计算。

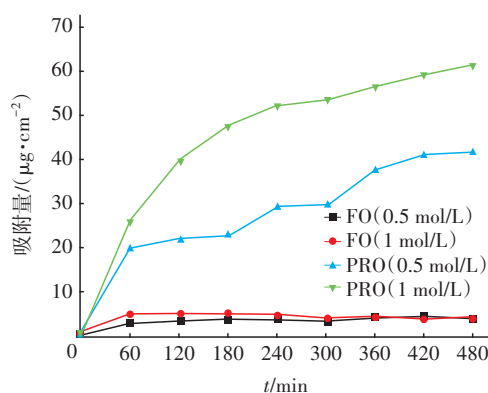
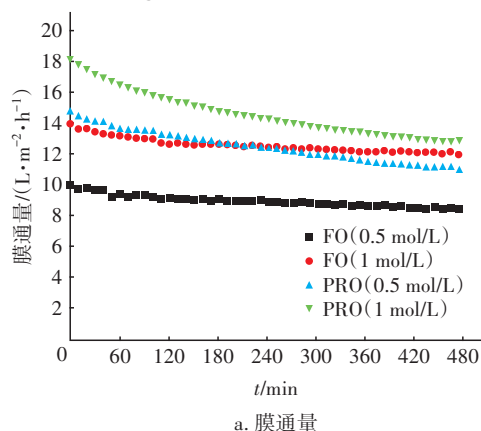
$$\text{吸附量} = \frac{C_{g(0)} \cdot V_{g(0)} - C_{g(t)} \cdot V_{g(t)} - (C_{d(t)} \cdot V_{d(t)} - C_{d(t-1)} \cdot V_{d(t-1)})}{A} \quad (3)$$

式中: $C_{d(t)}$ 和 $C_{d(t-1)}$ 分别为 t 和 $t-1$ 时刻汲取液中单宁酸的浓度, g/L; $V_{d(t)}$ 和 $V_{d(t-1)}$ 分别代表 t 和 $t-1$ 时刻汲取液的体积, L。由于正渗透装置系统(如管路和隔网)对污染物的吸附量很小, 正渗透循环系统对污染物的吸附量可忽略不计^[15]。

2 结果与讨论

2.1 膜朝向的影响

配制 800 mL 浓度分别为 0.5 和 1 mol/L 的 NaCl 溶液作为汲取液, 配制 2 L 浓度为 25 mg/L 的单宁酸溶液作为原料液, 控制原料液温度为 25 ℃、两个蠕动泵的流量均为 300 mL/min、pH 值为 7.0 左右, 分别在 FO 模式和 PRO 模式下运行装置, 考察对膜通量和膜面吸附量的影响, 结果见图 2。可以看出, 汲取液浓度相同时, PRO 模式下的膜通量均高于 FO 模式, 且 PRO 模式下汲取液浓度为 0.5 mol/L 的初始膜通量与 FO 模式下汲取液浓度为 1 mol/L 的相近, 但是前者的膜通量下降速率(25.29%)要高于后者(13.88%)。FO 模式下, 0.5 和 1 mol/L 汲取液浓度下的盐通量分别为 1.698 和 3.064 g/(m²·h), 而 PRO 模式下 0.5 和 1 mol/L 汲取液浓度下的盐通量分别为 2.536 和 3.725 g/(m²·h), 盐通量与膜通量具有正相关性, 这与 Yong 等^[16]得出的结论一致。



b. 膜面吸附量

图2 膜朝向对膜通量和膜面吸附量的影响

Fig.2 Influence of membrane orientation on membrane flux and membrane adsorption capacity

每个运行周期内,在汲取液中未检测出单宁酸的相应数值,说明单宁酸未能透过正渗透膜。FO 模式运行下的截留率均在 99.7% 以上,且基本保持不变。PRO 模式运行下的截留率随时间下降明显,但最低也在 97% 以上,造成截留率降低的主要原因是单宁酸被膜片吸附。由图 2(b)可以看出,PRO 模式运行下膜对单宁酸的吸附量比 FO 模式要多出数倍,这主要是由正渗透膜的非对称结构造成的。图 3 为洁净膜片和污染膜片的 SEM 照片。

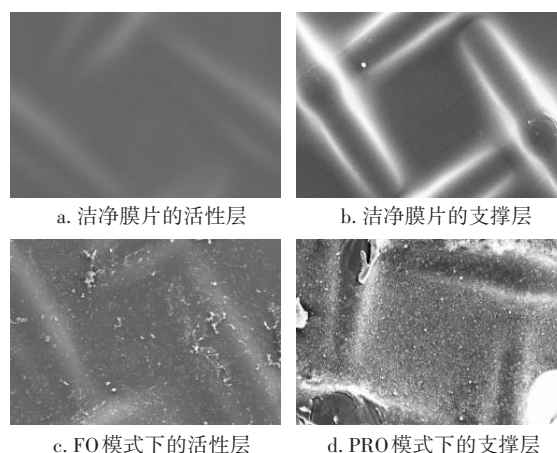


图3 正渗透膜放大500倍的SEM图

Fig.3 SEM image of forward osmosis membrane magnified 500 times

由图 3(a)、(b)可以看出,洁净膜片有致密的光滑活性层与多孔的粗糙支撑层,膜两侧具有不对称结构,膜表面有类似于织物状的结构,其可增加渗透膜的机械强度。由图 3(c)、(d)可以看出,FO 模式运行下,污染膜片活性层只有少许污染物,而 PRO 模式运行下污染膜片的支撑层积聚很多的单宁酸,

这也与图2(b)的结果一致。单宁酸在多孔的支撑层更易被吸附,导致膜孔堵塞,造成膜通量下降,这也是PRO模式运行条件下,膜通量下降速率比FO模式快的主要原因^[15]。

2.2 汲取液浓度的影响

以2 L浓度为25 mg/L的单宁酸溶液作为原料液,控制原料液温度为25℃、两个蠕动泵的流量均为300 mL/min、pH值为7.0左右,FO模式运行下以800 mL浓度分别为0.5、1、2 mol/L的NaCl作为汲取液,考察汲取液浓度对膜通量、截留率和膜面吸附量的影响。结果表明,汲取液浓度越大膜通量越大(见图4),而正渗透的驱动力也正是由于膜两侧的浓度差产生的渗透压,理论上由渗透压差造成的膜通量应远大于实际膜通量,这是由于浓差极化的影响,透过膜的纯水稀释了膜附近的汲取液,降低了膜片两侧的渗透压^[17]。

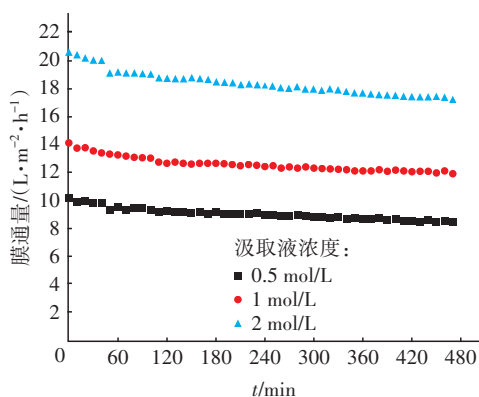


图4 汲取液浓度对膜通量的影响

Fig. 4 Influence of draw solution concentration on membrane flux

0.5、1和2 mol/L的汲取液对应的盐通量分别为1.698、3.064和3.865 g/(m²·h),表明随着汲取液浓度的增加,盐通量也增加,这与2.1节的结论一致。不同汲取液浓度下,装置运行60 min后截留率和吸附量基本稳定,截留率均保持在99.7%以上,吸附量均在6 μg/cm²以下,说明汲取液浓度对截留率和吸附量的影响较小。

2.3 原料液浓度的影响

以800 mL浓度为1 mol/L的NaCl作为汲取液,控制原料液温度为25℃、两个蠕动泵的流量均为300 mL/min、pH值为7.0左右,FO模式运行下以2 L浓度分别为10、25和40 mg/L的单宁酸溶液作为原料液,考察原料液浓度对膜通量和膜面吸附量的影响,结果如图5所示。

影响,结果如图5所示。

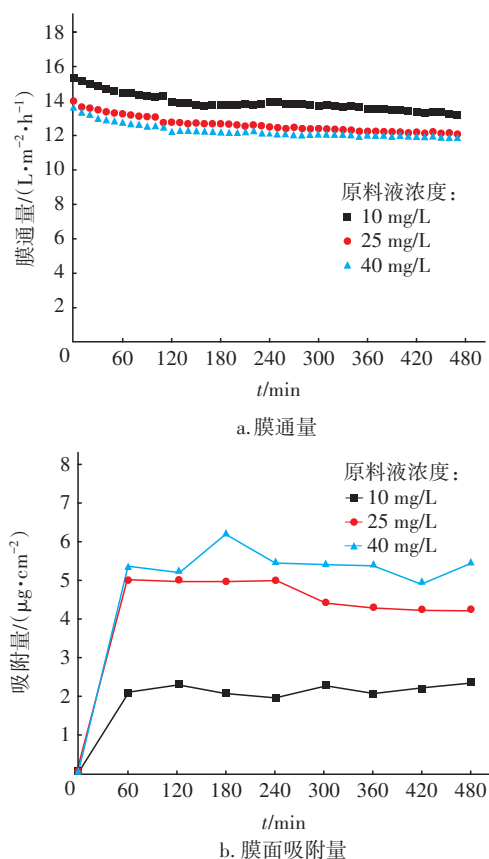


图5 原料液浓度对膜通量和膜面吸附量的影响

Fig. 5 Influence of feed solution concentration on membrane flux and membrane adsorption capacity

由图5(a)可以看出,膜通量随着原料液浓度的增加而减小,一方面是由于渗透压差随原料液浓度的增加而减小,另一方面是较低的原料液浓度会减少单宁酸在膜表面的吸附量,降低膜污染。原料液浓度为10、25和40 mg/L时,对应的盐通量分别为3.364、3.064和2.878 g/(m²·h),盐通量与膜通量具有正相关性,与2.1节结论一致。装置运行60 min后,截留率与吸附量均较稳定,较低的原料液浓度其吸附量也较低,如图5(b)所示,且截留率也相对较低,不过截留率均能保持在99.7%以上。

2.4 膜面流速的影响

以800 mL浓度为1 mol/L的NaCl作为汲取液,以2 L浓度为25 mg/L的单宁酸溶液作为原料液,控制原料液温度为25℃、pH值为7.0左右,FO模式运行下调整蠕动泵流量分别为300、450和600 mL/min(对应的膜面错流流速分别为8.3、12.5、16.7 cm/s),考察膜面流速对膜通量和膜面吸附量的影响,结

果如图6所示。

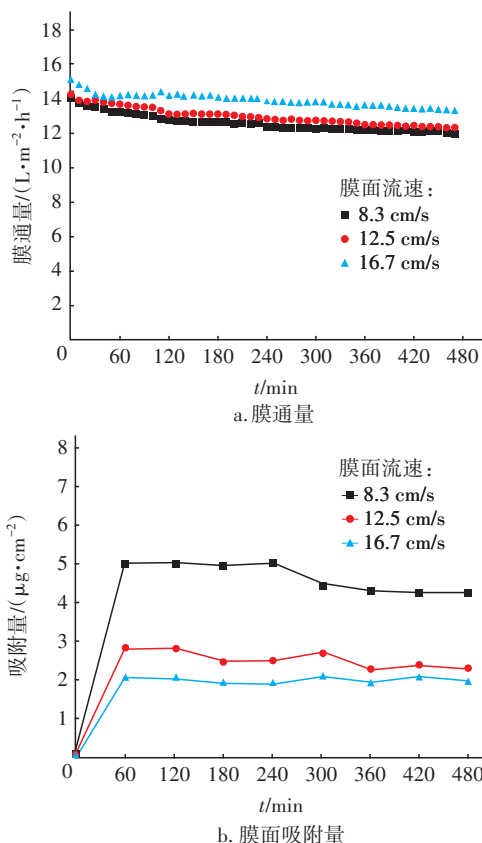


图6 膜面流速对膜通量和膜面吸附量的影响

Fig. 6 Influence of membrane surface velocity on membrane flux and membrane adsorption capacity

从图6(a)可以看出,膜面错流流速越高膜通量越大,主要是由于在高流速下光滑的活性层表面的吸附量较低,因此会产生较高的膜通量;其次是较低的流速会减小膜表面的水力剪切力,使膜表面的截留粒子不易与主体溶液混合,导致浓差极化降低了膜通量^[18]。流速为8.3、12.5和16.7 cm/s时对应的盐通量分别为3.064、3.654和4.616 $g/(m^2 \cdot h)$,盐通量随着膜通量的增加而增大,这与2.1节结论一致。由图6(b)可知,当膜面流速较高时,膜面吸附量较小,但截留率较高,这主要是因为较大的错流速度会降低膜吸附量,减缓膜孔堵塞,但不同流速下截留率均维持在99.7%以上。

2.5 原料液温度的影响

以800 mL、1 mol/L的NaCl为汲取液,以2 L、25 mg/L的单宁酸溶液为原料液,两个蠕动泵流速均为300 mL/min, pH值为7.0左右,FO模式运行下控制原料液温度分别为20、25和30 $^{\circ}C$,考察原料液温度

对膜通量的影响,结果如图7所示。

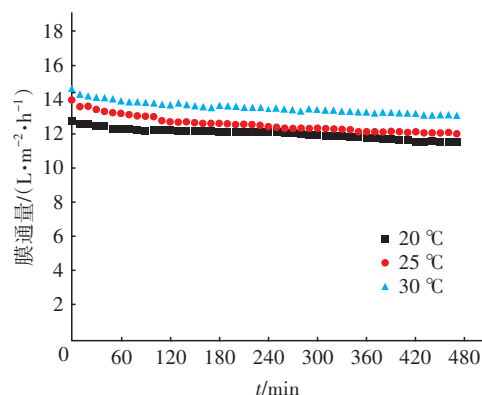


图7 原料液温度对膜通量的影响

Fig. 7 Influence of temperature of feed solution on membrane flux

从图7可以看出,膜通量随着原料液温度的升高而增加,这是因为温度改变了溶液的热动力学性质,随着温度的升高溶液的黏度减小、扩散系数变大,水分子更加容易通过膜,温度为20、25和30 $^{\circ}C$ 时对应的盐通量分别为3.065、3.064和4.024 $g/(m^2 \cdot h)$,盐通量也随着原料液温度的升高而增加,这也与膜通量随原料液温度的变化趋势一致。不同原料液温度下截留率均维持在99.7%以上,膜面的吸附量维持在4~6 $\mu g/cm^2$,可见原料液温度对截留率的影响不大,对膜面吸附量的影响也很小^[19]。

2.6 pH值的影响

以800 mL浓度为1 mol/L的NaCl作为汲取液,以2 L浓度为25 mg/L的单宁酸溶液作为原料液,控制原料液温度为25 $^{\circ}C$ 、两个蠕动泵的流量为300 mL/min,FO模式运行下考察pH值分别为3.1、5.6和7.0时对膜通量的影响,结果如图8所示。

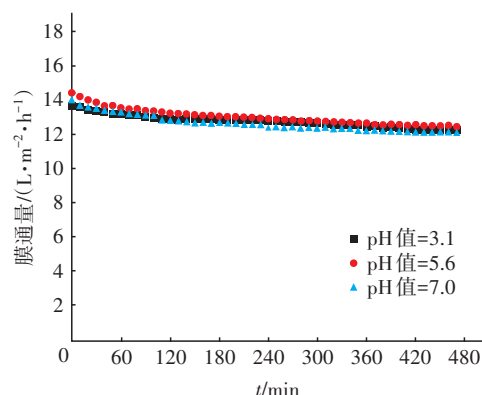


图8 pH值对膜通量的影响

Fig.8 Influence of pH on membrane flux

由图8可知,pH值为5.6时的膜通量大于pH值为3.1和7.0时的膜通量,但增幅不明显,所以pH值对膜通量的影响不大^[20]。pH值为3.1、5.6和7.0时盐通量分别为3.127、3.223和3.064 g/(m²·h)。另外,不同pH值条件下正渗透膜对单宁酸均有很好的去除效果,截留率一直维持在99.7%以上,膜面吸附量维持在6 μg/cm²以下。

2.7 三维荧光光谱分析

采用25 mg/L的单宁酸原料液和1 mol/L的NaCl汲取液进行8 h试验,分别对试验初始时刻与最终时刻的原料液和汲取液进行三维荧光分析,结果见图9。初始时刻的单宁酸溶液在Em为330~370 nm、Ex为240~260 nm区域内出现特征峰,为单宁酸的特征峰,属于色氨酸范围^[21]。图9(d)中相同区域内出现了荧光强度更高的特征峰,表示单宁酸在原料液桶内被不断浓缩。但图9(a)、(b)中并未出现单宁酸特征峰,可以推断正渗透对单宁酸具有极佳的截留效果,几乎没有任何单宁酸透过正渗透膜,进一步验证了上述试验结果。

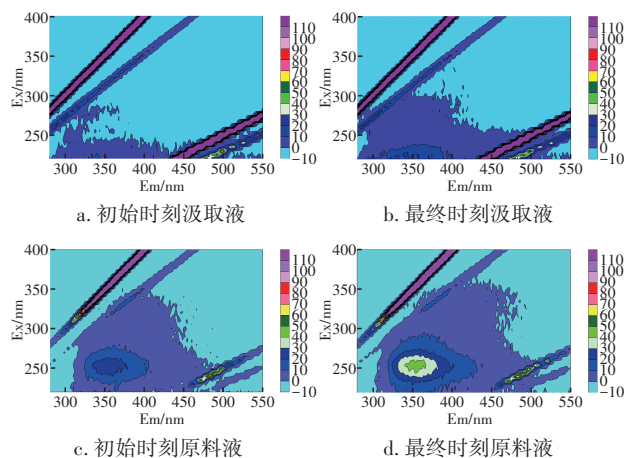


图9 三维荧光光谱图

Fig. 9 Three-dimensional fluorescence graph

3 结论

① 膜的活性层朝向汲取液、较高的汲取液浓度、较低的原料液浓度、较高的膜面流速、较高的原料液温度均会增加膜通量,且膜朝向对膜通量的影响很大,拥有高通量的PRO模式同样也伴随着膜通量下降的速率更快;盐通量的增加与膜通量保持正相关,膜朝向、汲取液与原料液浓度、膜面流速、原料液温度等因素均会对其产生影响。

② FO模式下,活性层较光滑的表面导致膜面

有较少的吸附量,而粗糙的支撑层会导致PRO模式下有较多的吸附量,造成严重的膜污染,这也是PRO模式下膜通量急速下降的原因;同时,膜面吸附量多也会造成更严重的膜污染,导致截留率下降。

③ 在PRO模式下,正渗透膜对单宁酸的截留率达到97%以上,而在FO模式下,截留率达到99.7%以上。三维荧光光谱分析表明,单宁酸几乎未能通过正渗透膜,其在原料液一侧被浓缩,而纯净的水会渗透到汲取液一侧,正渗透膜对单宁酸的去除效果极佳。

参考文献:

- [1] 刘晓静, 吴金玲, 刘春, 等. 正渗透技术在水和废水处理中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2701-2713.
LIU Xiaojing, WU Jinling, LIU Chun, et al. Forward osmosis technology applied for water and wastewater treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (8): 2701-2713 (in Chinese).
- [2] ROY D, RAHNI M, PIERRE P, et al. Forward osmosis for the concentration and reuse of process saline wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 287: 277-284.
- [3] HEIKKINEN J, KYLLÖNEN H, JÄRVELÄ E, et al. Ultrasound-assisted forward osmosis for mitigating internal concentration polarization [J]. Journal of Membrane Science, 2017, 528: 147-154.
- [4] CHANUKYA B S, RASTOGI N K. Ultrasound assisted forward osmosis concentration of fruit juice and natural colorant [J]. Ultrason Sonochem, 2017, 34: 426-435.
- [5] DUONG P H H, CHUNG T. Application of thin film composite membranes with forward osmosis technology for the separation of emulsified oil-water [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 452: 117-126.
- [6] LI Y, XU Z C, XIE M, et al. Resource recovery from digested manure centrate: comparison between conventional and aquaporin thin-film composite forward osmosis membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 593: 117436.
- [7] LI C, LI H Y, YANG Y, et al. Removal of pharmaceuticals by fouled forward osmosis membranes: impact of DOM fractions, Ca²⁺ and real water [J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139757.
- [8] 李志浩. 水体溶解性有机物正向渗透去除特性研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.

- LI Zhihao. Research on the Forward Osmosis Removal Characteristics of Dissolved Organic Matter in Water [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020 (in Chinese).
- [9] 解一君, 马睿, 夏圣骥, 等. 正渗透膜净水试验研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(12): 78-81.
- XIE Yijun, MA Rui, XIA Shengji, *et al.* Experiments of water purification using forward osmosis membrane [J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(12): 78-81 (in Chinese).
- [10] ZOU S Q, QIN M H, HE Z. Tackle reverse solute flux in forward osmosis towards sustainable water recovery: reduction and perspectives [J]. Water Research, 2019, 149: 362-374.
- [11] 石闪闪, 何国庆. 单宁酸及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 410-412, 416.
- SHI Shanshan, HE Guoqing. Tannic acid and the progress of its application [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(4): 410-412, 416 (in Chinese).
- [12] VIET N D, IM S J, JANG A. Characterization and control of membrane fouling during dewatering of activated sludge using a thin film composite forward osmosis membrane [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 122736.
- [13] SEKER M, BUYUKSARI E, TOPCU S, *et al.* Effect of pretreatment and membrane orientation on fluxes for concentration of whey with high foulants by using NH_3/CO_2 in forward osmosis [J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 237-246.
- [14] 杨诗慧. 正渗透-反渗透组合工艺处理城市污水的研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- YANG Shihui. Research on the Treatment of Urban Sewage by the Combined Process of Forward Osmosis and Reverse Osmosis [D]. Jinan: Shandong University, 2019 (in Chinese).
- [15] WANG L, ZHANG W Z, CHU H Q, *et al.* Forward osmosis filtration for removal of organic foulants: effects of combined tannic and alginic acids [J]. Water Research, 2016, 91: 251-263.
- [16] YONG J S, PHILLIP W A, ELIMELECH M. Coupled reverse draw solute permeation and water flux in forward osmosis with neutral draw solutes [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 392/393: 9-17.
- [17] 张彤, 林晓峰, 姚懿娟, 等. 浓差极化对正渗透膜通量影响研究[J]. 山东化工, 2017, 46(12): 7-11.
- ZHANG Tong, LIN Xiaofeng, YAO Yijuan, *et al.* Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis [J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(12): 7-11 (in Chinese).
- [18] WANG Y, ZHANG M K, LIU Y Q, *et al.* Quantitative evaluation of concentration polarization under different operating conditions for forward osmosis process [J]. Desalination, 2016, 398: 106-113.
- [19] 张梦轲, 王越, 刘艳秋, 等. 操作条件对正渗透分离性能的影响[J]. 化学工业与工程, 2018, 35(6): 32-40.
- ZHANG Mengke, WANG Yue, LIU Yanqiu, *et al.* Influence of operating conditions on the separation performance of forward osmosis [J]. Chemical Industry and Engineering, 2018, 35(6): 32-40 (in Chinese).
- [20] ZOU S, GU Y S, XIAO D Z, *et al.* The role of physical and chemical parameters on forward osmosis membrane fouling during algae separation [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 366(1/2): 356-362.
- [21] 陈诗雨, 李燕, 李爱民. 溶解性有机物研究中三维荧光光谱分析的应用[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 64-68, 73.
- CHEN Shiyu, LI Yan, LI Aimin. Application of three-dimensional fluorescence spectroscopy in the study of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(5): 64-68, 73 (in Chinese).

作者简介: 魏永(1975-), 男, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: weiyong@cczu.edu.cn

收稿日期: 2021-01-13

修回日期: 2021-03-29

(编辑: 任莹莹)