

基于乙醇协同作用的柠檬油提取废液中挥发性芳香物的渗透汽化膜分离性能研究

李睿, 杨冬伊, 陈明, 孙芸, 朱本伟, 姚忠*
(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 211816)

摘要: 采用涂布法自制了聚二甲基硅氧烷/聚偏氟乙烯树脂 (Polydimethylsiloxane/Polyvinylidene Fluoride, PDMS/PVDF) 渗透汽化复合膜, 用于柠檬精油加工废液中挥发性芳香物的渗透汽化分离。考察了复合膜对橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇等三种柠檬精油废液中特征性芳香物的渗透汽化分离性能, 结果显示, 复合膜对3种化合物具有很好的分离选择性, 但渗透通量均较低。添加乙醇对芳香物的分离效果有显著影响, 当乙醇添加量为5% V/V时, 橙花醇和芳樟醇的渗透通量较未加乙醇时提高了82.93%和127.76%, 而 α -松油醇的渗透通量则随着乙醇浓度的升高先升高后缓慢下降。测试了PDMS/PVDF复合膜对实际柠檬油废液中挥发性芳香物的分离效果, 经渗透汽化处理6h后, 柠檬油废液中挥发性芳香物的种类及含量均明显降低, 橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇的回收率分别为92.5%、93.37%、60.36%, 应用效果良好。

关键词: 柠檬油提取废液; 挥发性芳香物; 渗透汽化; 分离性能; 乙醇协同效应

文章编号: 1673-9078(2022)11-248-254

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.11.0099

Improving the Pervaporation Separation of Aromatic Components from Lemon Oil Processing Waste Liquid by the Synergistic Effect of Ethanol

LI Rui, YANG Dongyi, CHEN Ming, SUN Yun, ZHU Benwei, YAO Zhong*

(College of Food Science and Light Industry, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, China)

Abstract: A PDMS/PVDF pervaporation composite membrane was self-made via the coating method and used for separating volatile aromatic compounds from the waste liquid of lemon essential oil processing by pervaporation (PV). The PDMS/PVDF membrane was applied in the pervaporation separation of nerol, α -terpineol, and linalool, which are characteristic aroma components in lemon essential oil waste liquid. The results demonstrated that the PDMS/PVDF membrane had good separation selectivity for the three compounds, but the permeation flux was low. Addition of ethanol significantly affects the separation of aromatics. When the amount of ethanol added is 5% v/v, the permeation fluxes of nerol and linalool increase by 82.93% and 127.76% over those without ethanol. The permeation flux of α -terpineol first increased and then decreased slowly with the increase in ethanol concentration. In addition, the performance of the PDMS/PVDF membrane in separating volatile aroma components in actual lemon oil waste liquid was tested. When the experiment was conducted for 6 h, the types and content of volatile aromatic compounds in the lemon oil waste liquid were significantly reduced. The recovery rates of nerol, α -terpineol, and linalool were 92.50%, 93.37%, and 60.36% respectively. The results showed that the PDMS/PVDF membrane achieved better performance.

Key words: lemon oil processing waste liquid; volatile aromatic components; pervaporation; separation performance; synergistic effect of ethanol

引文格式:

李睿, 杨冬伊, 陈明, 等. 基于乙醇协同作用的柠檬油提取废液中挥发性芳香物的渗透汽化膜分离性能研究[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 248-254

LI Rui, YANG Dongyi, CHEN Ming, et al. Improving the pervaporation separation of aromatic components from lemon oil processing waste liquid by the synergistic effect of ethanol [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 248-254

收稿日期: 2022-01-27

作者简介: 李睿 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 分离工程, E-mail: leerrui0628@163.com

通讯作者: 姚忠 (1970-), 男, 教授, 研究方向: 分离工程, E-mail: yaozhong@njtech.edu.cn

柠檬 (*Citrus limon* Burm. F.) 是芸香科柑橘属植物, 有浓郁的芳香气, 富含柠檬酸、苹果酸、多种维生素以及钙磷铁等矿物元素。近年来, 随着人们对柠檬营养、保健价值的认识不断加深, 柠檬在全世界范围内的种植面积迅速扩张。但由于柠檬的酸度高, 鲜食口

感接受度较低,我国消费者没有鲜食习惯。目前,我国超过四分之一的柠檬被用于加工,其中柠檬油就是重要的加工产品。

柠檬油是从柠檬果皮中提取出来的具有浓郁芳香味的提取物,其中富含萜烯类化合物(如柠檬烯、 α -蒎烯、 β -月桂烯等)、芳樟醇、 α -松油醇、橙花醇、乙酸香叶酯等多种功能性物质,在食品、医药和化工等行业中具有广泛用途。目前,柠檬精油的生产工艺主要包括有机溶剂法、水蒸气提馏法和压榨法,其中压榨法工艺简单,不使用有机溶剂,产品安全性高。但由于柠檬皮中存在大量表面活性物质(如磷脂),使得大量油性芳香物残留在提取废液中,导致柠檬油的提取率很低(仅约3%),同时这些挥发性芳香物具有很强的还原性,导致废水的COD值很高(>60 000 mg/L),这样的废液如不加处理直接排放将对环境产生严重影响。因此,建立高效的柠檬油提取废液中挥发性芳香物回收、富集技术对于提升我国柠檬深加工产业的绿色发展具有重要意义。

渗透汽化(Pervaporation)是一种分子尺度的膜分离技术。该技术基于溶液中各组分与膜材料的亲和力差异,在膜两侧组分蒸汽分压差的推动下,通过选择性的溶解-扩散过程实现目标组分的选择性分离^[1]。PV过程以较低的能耗(仅为传统精馏工艺的1/3左右)完成近沸点、恒沸点有机混合物溶液的分离,特别适合于有机物稀溶液的分离,在化工、能源以及环保等领域应用广泛^[2-6]。近年来,随着膜材料设计理论和技术的发展,亲有机物PV复合膜(如PDMS/PVDF)在植物芳香物分离中的应用逐渐引起了研究者的关注^[7-11]。但由于植物挥发性芳香物种类多,其结构和性质各异,且分子量较大(相对于乙醇),在PV分离过程中的扩散阻力大,渗透通量普遍较低。虽然有机-无机杂化的方法可在一定程度上解决芳香物渗透通量低的问题,但纳米粒子易团聚,导致膜表面缺陷,同时杂化膜制备工艺不稳定,尚不具备规模化应用的要求^[12,13]。

乙醇是一种极性小分子有机物,具有增溶破乳的作用,可引起PDMS的溶胀,导致膜结构的改变^[14]。为此,本研究自制了PDMS/PVDF复合PV膜,测试了其对于橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇等三种柠檬精油废液中的典型芳香物的分离效率,并考察了添加乙醇对分离效率的影响;在此基础上,评估了PDMS/PVDF复合膜对柠檬精油废液中挥发性芳香物的分离、富集效果。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

柠檬油提取废液(柠檬品种为尤克力),南京泽朗生物科技有限公司;正硅酸四乙酯(TEO,分析纯),国药集团化学试剂有限公司;二月桂酸二丁基锡(DBTDL,分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;PDMS(3500Cp),美国道康宁有机硅有限公司;PVDF膜(50 μm),苏州工业园区广惠科技有限公司;橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇,上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 仪器与设备

采用HITACHI S-4800扫描电镜(SEM,日本日立公司),观察复合膜表面及断面形貌;以OCA25全自动接触角测试仪(德国Dataphysics公司),测定复合膜的水接触角;采用Mini Flex 600 X射线衍射仪(XRD,日本理学株式会社),分析复合膜的物相组成;用Nicolet 8700傅里叶变换红外光谱仪(赛默飞世尔科技公司),表征复合膜的官能团组成。

1.3 方法

1.3.1 PV膜的制备

PV膜的制备采用涂布法。将PDMS与正硅酸四乙酯按质量比为18:1混合,磁力搅拌30 min;加入100 μL DBTDL,继续搅拌5 min,静置1 h;使用薄膜涂布器将铸膜液均匀涂布在PVDF膜表面(涂膜厚度为10 μm),将复合膜置于常温下交联反应12 h,再转移至在80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干48 h。

1.3.2 渗透汽化实验

所用渗透汽化装置如图1所示。

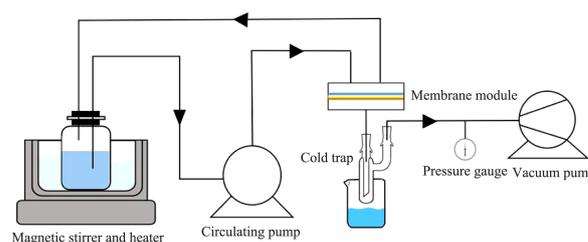


图1 渗透汽化实验装置

Fig.1 Experimental device for pervaporation

渗透通量(J)的定义为单位时间、单位面积上通过的渗透液的质量。可以表现出膜内组分的渗透情况,以及膜材料的渗透性能、分离的效率。公式如下:

$$J = \frac{W}{A \cdot t} \quad (1)$$

$$J_i = \frac{W_i}{A \cdot t} \quad (2)$$

式中:

J ——总通量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;

W ——冷凝侧回收渗透液的质量, g;

A ——膜的有效面积, m^2 ;

t ——渗透汽化的时间, h。

i ——目标化合物种类;

J_i ——目标化合物通量, $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$;

W_i ——渗透侧化合物的质量, g。

分离因子 (α) 的定义为目标分离化合物在经过透

透汽化前后相对含量的比值, 计算公式如下:

$$\alpha = \frac{Y_A / Y_B}{X_A / X_B} \quad (3)$$

1.3.3 分析方法

橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇的定量分析采用液相色谱法 (Ultramate 3000, Thermo Fisher), 色谱柱为 Sapphire C₁₈, 其他色谱条件如表 1 所示。

表 1 橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇的 HPLC 分析条件

Table 1 Parameters of GC analysis for determination of nerol, α -terpineol and linalool

项目	流动相(V/V)	检测波长/nm	标准曲线
橙花醇	甲醇:水=70:30	225	$Y=0.0246X+0.5017, R^2=0.9998$
α -松油醇	甲醇:水=70:30	220	$Y=0.0162X+0.2299, R^2=0.9999$
芳樟醇	甲醇:水=75:25	220	$Y=0.0099X+0.0036, R^2=0.9988$

注: 流速均为 1.0 mL/min; 进样量均为 20 μ L。

1.3.4 柠檬油废液中挥发性成分分析

柠檬精油废液中的挥发性成分分析采用固相微萃取 (SPME)-GC/MS 方法。分别取 5.0 mL 处理前后截留侧的柠檬精油废液加入 20 mL 顶空瓶中, 先将其置于 70 $^{\circ}$ C 水浴锅中平衡十分钟; 将 SPME 探针穿过顶空瓶隔垫, 推出萃取头置于液面上部空间, 震荡速率 250 r/min, 于 70 $^{\circ}$ C 下平衡 50 min; 然后将萃取头缩回探针并取出, 将探针插入 GC 进样口进行热解吸, 10 min 后将探针取出^[15]。

GC-MS 检测条件: 色谱柱为 DB-5MS, 30 $m \times$ 0.25 $m \times$ 0.25 μ m; 进样口温度为 250 $^{\circ}$ C, 分流比为 5:1; 载气为 He 气, 流速 1.2 mL/min; 辅助加热区温度为 300 $^{\circ}$ C; 程序升温条件: 50 $^{\circ}$ C 保持 1.0 min, 以 5 $^{\circ}$ C/min 升温至 240 $^{\circ}$ C 并保持 1.0 min, 再以 5 $^{\circ}$ C/min 升温至 280 $^{\circ}$ C 并保持 5 min, 最后以 5 $^{\circ}$ C/min 升温至 300 $^{\circ}$ C 并保持 10 min; MS 条件: 扫描范围 40~500 m/z 。

1.3.5 数据统计分析

分析结果以平均值 \pm 标准偏差 (Mean \pm SD) 表示, 采用 SPSS 13.0 软件对数据统计, 组间均数采用单因素方差分析, 用 q 检验作两两比较, 以 $p < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 膜的表征

按照 1.2 的方法制备 PDMS/PVDF 复合膜, 并对其表面、断面进行分析。如图 2a, PDMS/PVDF 复合膜表面光滑平整, 没有明显缺陷。PDMS/PVDF 复合膜的表面粗糙度 (S_a 值) 为 0.991 μ m, 与纯 PVDF 膜接近 (图 3)。SEM 分析显示, PDMS 层厚度约为 7.0 μ m 左右 (图 2b), 膜层厚度的减小是因为干燥时 PDMS 收

缩所致。经测定, PDMS/PVDF 复合膜的水接触角为 115 $^{\circ}$ (图 4), 呈较强的疏水性, 这种致密的 PDMS 疏水层有利于隔绝料液中的水分子^[16]。

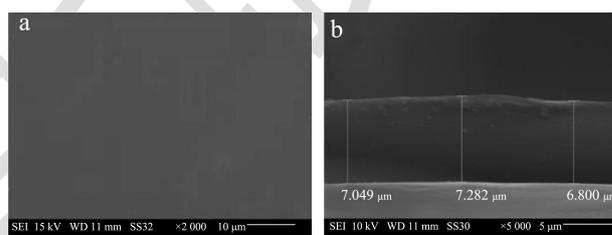


图 2 PDMS/PVDF 复合膜的表面 (a) 和断面 (b) SEM 扫描图

Fig.2 (a) Surface morphology and (b) cross-section of PDMS/PVDF membrane

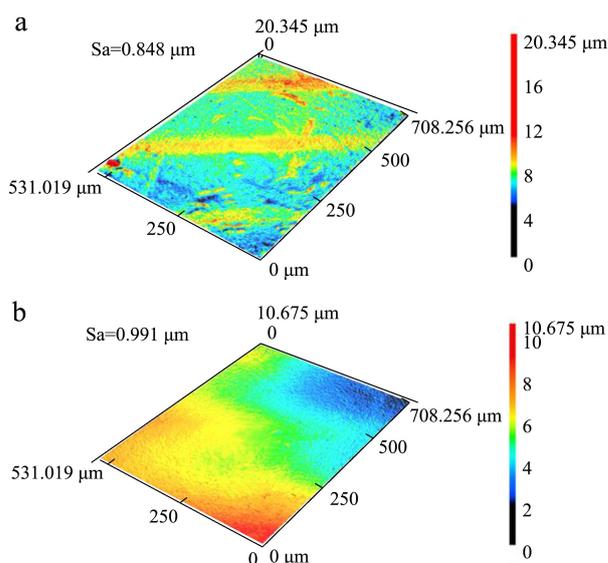


图 3 PVDF 和 PDMS/PVDF 复合膜的表面白光干涉图

Fig.3 White light interferometry for (a) PVDF and (b) PDMS/PVDF membrane

FTIR-ART 分析显示, 在波长 1 173 cm^{-1} 处由 C-F 键的不对称伸缩振动; 1 254 cm^{-1} 处为 PDMS 分子结构

中的-CH₃的变形振动峰,波长 2 963 cm⁻¹处为≡Si-CH₃键中的对称甲基伸缩振动导致的吸收峰,在 1 009 cm⁻¹附近为 Si-O-Si 键典型的双肩峰^[17-19]。XRD 分析表明,PDMS/PVDF 中与 PVDF (α相) 相对应的尖峰 (2θ=20°附近) 消失 (图 6),这是由于 PDMS 的覆盖所致。

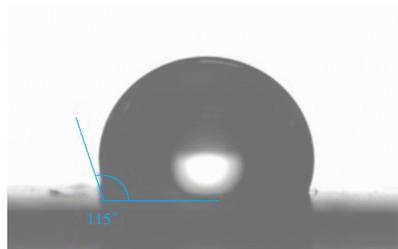


图 4 PDMS/PVDF 复合膜的水接触角分析

Fig.4 Contact angle (water) of PDMS/PVDF membrane

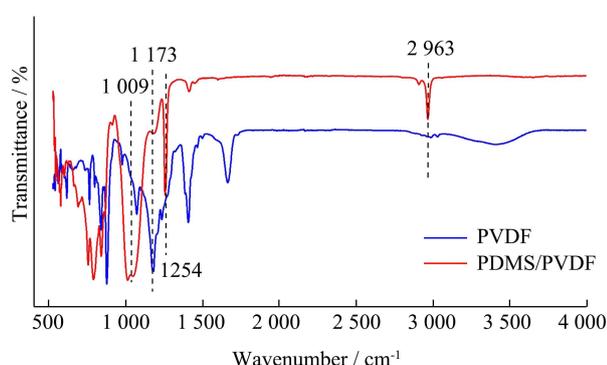


图 5 PVDF 膜和 PDMS/PVDF 复合膜的 FTIR-ART 谱图

Fig.5 FTIR-ART spectra of PVDF and PDMS/PVDF membrane

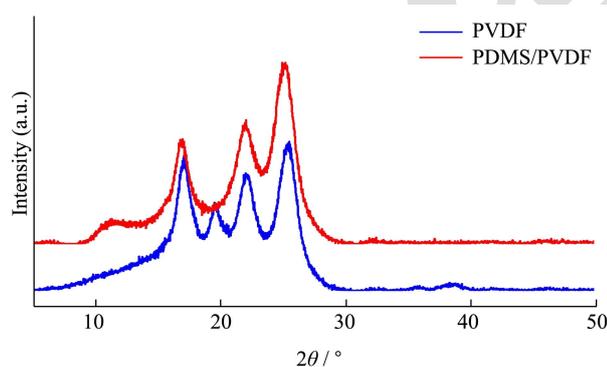


图 6 PVDF 膜和 PDMS/PVDF 复合膜的 XRD 谱图

Fig.6 XRD patterns of PVDF and PDMS/PVDF membrane

2.2 PDMS/PVDF 复合膜对橙花醇、α-松油醇

及芳樟醇的渗透汽化性能

2.2.1 浓度对渗透通量和分离因子的影响

以 PDMS/PVDF 复合膜为分离介质,分别配置浓度为 20、50、100 mg/L 的橙花醇、α-松油醇、芳樟醇单组份标准品溶液,在料液温度 50 °C,循环流速 0.32 L/min 条件下循环分离 3.5 h。分别量取冷凝管中冷

凝液的质量,并测定冷凝液中化合物的浓度,考查渗透侧浓度对三种物质单组份渗透汽化过程的影响。

如图 7 所示,随着进料侧化合物浓度的提高,三种芳香物的渗透通量也随之增加。这是由于料液中芳香物浓度的增加促进了其在膜表面的吸附,可导致膜结构的溶胀,使得芳香物在分离层中的传质阻力降低^[20-22];同时,膜两侧的蒸汽分压差增大,也提高了传质速率。当质量浓度为 100 mg/L 时,橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的渗透通量分别为 135.12、273.46 和 223.89 mg·m⁻²·h⁻¹。

此外,PDMS/PVDF 复合膜对橙花醇、α-松油醇和芳樟醇均表现出很高的分离选择性。当进料侧浓度为 20 mg/L 时,橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的分离因子分别为 18.73、43.82 和 16.74。其中,PDMS 对α-松油醇的选择性明显高于其他两种芳香物,这可能与其环烯烃结构有关。

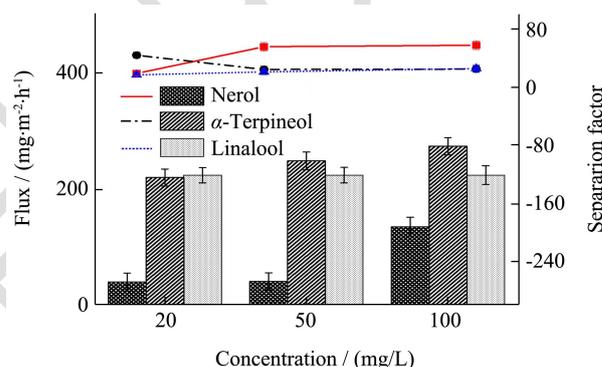


图 7 浓度对 3 种物质单组分渗透通量和分离因子的影响

Fig.7 Effect of feeding concentration on the separation performance for aromatic components

表 2 橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of nerol, α-terpineol and linalool

化合物	分子结构	分子量	沸点/°C	log P
橙花醇	<chem>CC(C)=CC=C(O)C</chem>	154.25	225~227	3.28
α-松油醇	<chem>CC(C)(O)C1=CC=CC=C1C</chem>	154.24	217	2.79
芳樟醇	<chem>CC(C)=CC(O)C</chem>	154.25	198~199	3.28

随着进料侧浓度的增大,橙花醇和芳樟醇的分离因子呈逐渐升高的趋势 (图 7),这可能是由于这两种化合物的 log P 值较大 (表 2),疏水性更强,随着膜结构溶胀和传质阻力的降低,二者的渗透汽化速率也随

之增大,并导致分离因子的增加。与之相反,α-松油醇的分离因子随浓度的升高呈一定的下降趋势,这可能是由于α-松油醇的极性相较于橙花醇和芳樟醇略强,随着总通量的上升,虽然α-松油醇的渗透通量也有上升,但水通量也相应上升,因此在高进料浓度下表现为分离因子的下降。

2.2.2 温度对渗透通量和分离因子的影响

分别配置浓度为 100 mg/L 的橙花醇、α-松油醇、芳樟醇水溶液,在不同进料侧温度(30、40、50 °C)下测试 PDMS/PVDF 复合膜对分离效果的影响。循环流速为 0.32 L/min,循环时间为 3.5 h。

由图 8 可知,三种化合物的渗透通量均随温度的升高均呈上升趋势。温度的升高不仅使得芳香物在进料侧的蒸汽分压增大,传质推动力上升,而且还会导致聚合物结构单元的活度增加,膜中分子链段间的间隙增大,从而引起渗透通量的增加。此外,随着温度的增加,三种化合物的分离因子也表现出了上升的趋势,这是由于温度的升高有利于芳香物的溶解,促进了芳香物在膜相中的渗透扩散。

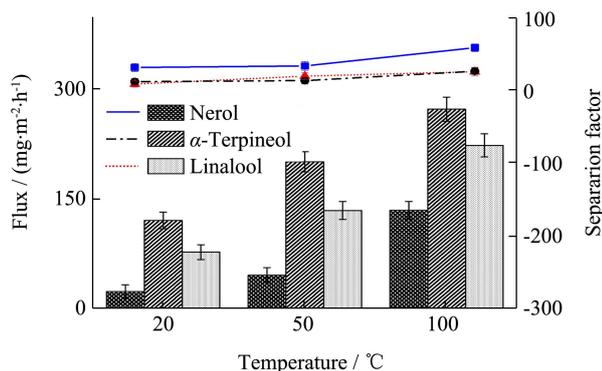


图 8 温度对 3 种物质单组分渗透通量和分离因子的影响

Fig.8 Effect of temperature on the separation performance for aromatic components

温度和渗透通量的关系通常能用 Arrhenius 方程来表示:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

式中:

J ——渗透通量;

J_0 ——本征通量;

E_a ——渗透活化能;

R ——气体常数;

T ——料液温度。

根据以上数据对 3 种物质的渗透活化能进行了拟合,结果如图 9 所示。橙花醇、α-松油醇、芳樟醇的渗透活化能分别是 10.51、14.25、17.54 kJ/mol。芳樟醇的 E_a 值高于橙花醇和α-松油醇,这可能与其沸点较低有关。

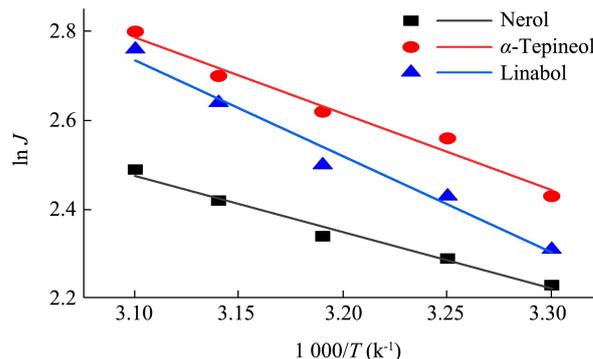


图 9 橙花醇、α-松油醇、芳樟醇的渗透活化能拟合图

Fig.9 Fitness for the E_a of nerol, α-terpineol and linalool in PDMS/PVDF membrane

2.3 乙醇浓度对橙花醇、α-松油醇、芳樟醇的渗透通量的影响

如前所述,虽然 PDMS/PVDF 复合膜对橙花醇、α-松油醇、芳樟醇的分离选择性较高,但渗透通量很低,其原因一方面是由于芳香物的分子量较大,在致密的 PDMS 层中的渗透阻力大,另一方面则是 PDMS 对芳香物的强烈吸附,抑制了其在膜内的渗透扩散。为此本研究尝试在进料侧添加不同浓度的乙醇,考察其对芳香物分离效果的影响。

分别以体积分数 1%、2%、5% 的乙醇溶液为溶剂配置橙花醇、α-松油醇、芳樟醇单组份标准品溶液(质量浓度均为 100 mg/L),在进料侧温度 50 °C,循环流速 0.32 L/min 条件下,循环分离 3.5 h,结果如图 10 所示。

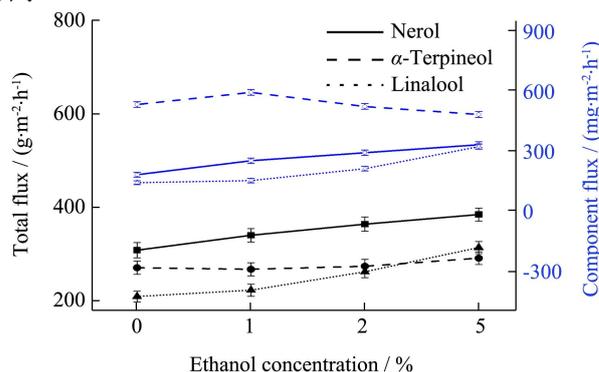


图 10 乙醇浓度对 3 种化合物渗透通量的影响

Fig.10 Effect of ethanol concentration on the fluxes of nerol, α-terpineol and linalool

随着乙醇浓度的增大,不同芳香物体系的渗透总通量均随之增大(图 10)。乙醇作为一种弱极性小分子,可以快速渗透进 PDMS 相并引起膜结构溶胀,PDMS 链之间的间隙增大,从而导致了渗透通量的上升。进一步分析可知,芳樟醇和橙花醇的渗透通量也随乙醇

浓度的增大而呈逐渐增加的趋势,这可能由于乙醇的加入减弱了芳香物在膜相中的吸附,这有助于提高芳香物在膜内的渗透扩散。当乙醇添加量为5%时,橙花醇、芳樟醇的渗透通量可达330.18、320.52 mg·m⁻²·h⁻¹,较未添加乙醇提高了82.93%和127.76%。

与橙花醇和芳樟醇不同,α-松油醇的渗透通量随乙醇浓度的增大呈先上升后下降的趋势。这可能是由于α-松油醇与PDMS的亲合力高,较低的乙醇浓度并不能显著影响α-松油醇在渗透侧的吸附,因而此时的渗透通量呈上升的趋势;随着乙醇浓度的升高,α-松油醇的吸附被削弱,同时由于α-松油醇的极性较强,水通量的增大将竞争性地抑制α-松油醇的渗透扩散,从而导致了通量的降低。

2.4 PDMS/PVDF 复合膜对柠檬油废液中挥发性芳香物的分离效果

以PDMS/PVDF复合膜为分离介质,在50℃,流速0.32 L/min条件下对实际柠檬精油废液中的挥发性芳香物进行分离,每隔2h量取渗透侧冷阱收集样品的质量。如图11所示,在实验0~6h期间,渗透通量没有明显变化,表明PDMS/PVDF复合膜在实际体系中的性能稳定;添加5%(V/V)的乙醇可显著提高渗透通量,提高的幅度在18.62%~22.81%之间。

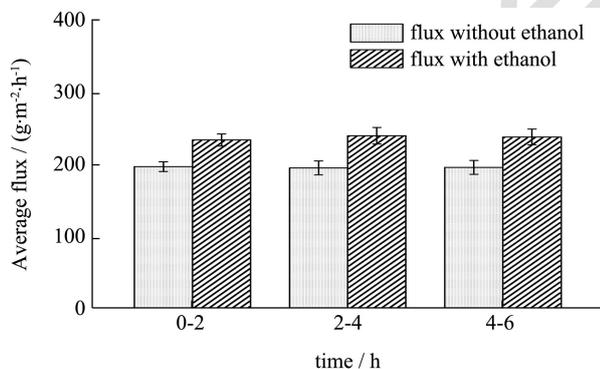


图11 添加乙醇(5%, V/V)对实际柠檬油废液渗透通量的影响
Fig.11 Effect of ethanol (5%, V/V) on the permeation flux of lemon oil waste

进一步以SPME-GC/MS分析了渗透汽化处理前后截留侧柠檬油废液中的挥发性芳香物组成,结果如图12所示。

由图12可知,经过渗透汽化6h后,柠檬精油废液中挥发性芳香物的种类和含量均明显下降。根据峰面积估算可得到橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的回收率分别为92.5%、93.37%和60.36%,表明PDMS/PVDF复合膜在回收实际柠檬精油废液中挥发性芳香物的应用效果良好。

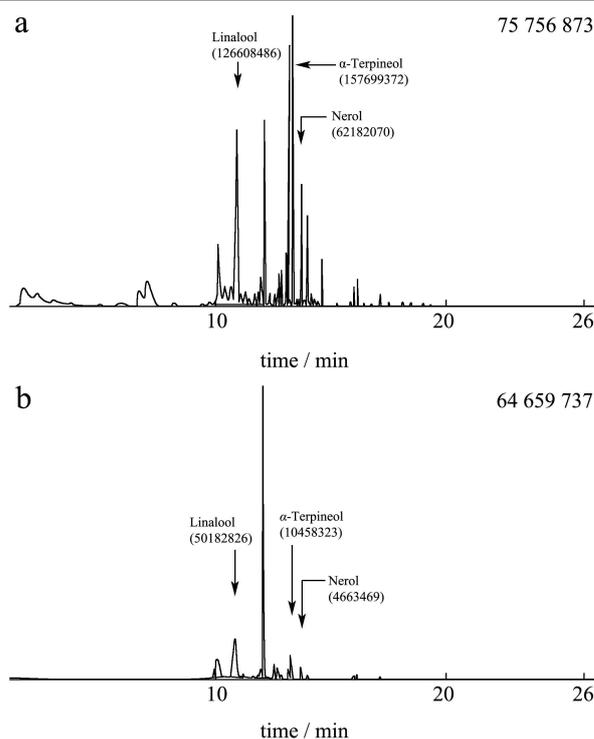


图12 渗透汽化分离前(a)后(b)柠檬精油废液挥发性物质GC/MS总离子流图

Fig.12 SPME-GC/MS analysis of lemon oil waste (a) before and (b) after pervaporation

3 结论

本研究采用涂布法制备了PDMS/PVDF复合膜,测试了复合膜对橙花醇、α-松油醇和芳樟醇等三种柠檬精油废液中典型挥发性芳香物的渗透汽化分离性能;同时,以提高芳香物渗透通量为目标,考察了添加乙醇对PDMS/PVDF复合膜分离性能的影响;在此基础上,评估了PDMS/PVDF复合膜对实际柠檬油废水中挥发性芳香物的分离效果。结果表明,PDMS/PVDF复合膜对橙花醇、α-松油醇和芳樟醇具有良好的分离选择性。随着进料侧浓度的提高,橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的渗透通量均稳定增大。温度的升高有利于芳香物在膜表面的溶解、汽化。随着进料侧温度的升高,三种芳香物的渗透通量和分离因子均随之上升。经测定,橙花醇、α-松油醇和芳樟醇的渗透活化能(E_a)分别为10.51、14.25和17.54 kJ/mol。

添加乙醇可有效改善橙花醇和芳樟醇分离效率。当乙醇浓度为5%(V/V)时,橙花醇和芳樟醇的渗透通量分别为330.18 mg·m⁻²·h⁻¹和320.52 mg·m⁻²·h⁻¹,较未添加乙醇提高了82.93%和127.76%。在实际柠檬精油提取液中的应用显示,PDMS/PVDF复合膜性能稳定并且对废液中的挥发性芳香物具有良好的分离富集性能。添加5%(V/V)乙醇可提高渗透通量约20%。在

50 ℃、循环体积流量 0.32 L/min 条件下连续分离 6 h, 橙花醇、 α -松油醇和芳樟醇的回收率分别为 92.5%、93.37%和 60.36%。

参考文献

- [1] 朱春华,周先艳,李进学,等.中国柠檬主要营养功效及产品开
发研究进展[J].包装与食品机械,2018,36(3):48-53
- [2] 高从塔.膜分离技术与海水淡化和水再用[J].水处理信息报
导,2010,5:1-3,25
- [3] 徐南平,李卫星,赵宜江,等.面向过程的陶瓷膜材料设计理论
与方法(I)膜性能与微观结构关系模型的建立[J].化工学报,
2003,54(9):1284-1289
- [4] 侯立安,高鑫,赵兰.纳滤膜技术净化饮用水的应用研究进展
[J].膜科学与技术,2012,32(5):1-7
- [5] Raffin M, Germain E, Judd S. Wastewater polishing using
membrane technology: a review of existing installations [J].
Cheminform, 2013, 34(5-8): 617-627
- [6] 丁建武,张伟东.渗透汽化膜分离技术的工业应用进展[J].船
电技术,2017,37(10):68-72
- [7] Witek-Krowiak A, Podstawczyk D, Dawiec A. Pervaporative
membranes for separation of aroma compounds from aqueous
solutions [C]\ International Proceedings of Chemical
Biological & Environmental, 2012
- [8] Pereira C, Ribeiro C P, Nobrega R, et al. Pervaporative
recovery of volatile aroma compounds from fruit juices [J].
Journal of Membrane Science, 2006, 274(1/2): 1-23
- [9] Lipnizki F, Olsson J, Trgrdh G. Scale-up of pervaporation for
the recovery of natural aroma compounds in the food industry.
Part 1: simulation and performance - Science Direct [J].
Journal of Food Engineering, 2002, 54(3): 183-195
- [10] Lipnizki F, Olsson J, Tragardh G. Scale-up of pervaporation
for the recovery of natural aroma compounds in the food
industry Part 2: optimisation and integration [J]. Journal of
Food Engineering, 2002, 54(3): 197-205
- [11] Raisi A, Aroujalian A, Kaghazchi T. Multicomponent
pervaporation process for volatile aroma compounds recovery
from pomegranate juice [J]. Journal of Membrane Science,
2008, 322(2): 339-348
- [12] 周玲玲,牛照栋,汤立红,等.MOFs 有机-无机杂化膜的制备及
应用研究进展[J].膜科学与技术,2018,38(6):111-120,128
- [13] 徐又一.高分子膜材料[M].化学工业出版社,2005
- [14] Alade L, Al-Shehri D, Mahmoud M, et al. A novel technique
for heavy oil recovery using poly vinyl alcohol (PVA) and
PVA-NaOH with ethanol additive [J]. Fuel, 2020, 285: Article
119128
- [15] 张婧涵,倪芳,于俊雅,等.Silicalite-1/PDMS 杂化膜对红茶特
征挥发性芳香物的分离性能[J].食品与发酵工业,2018,44(9):
84-90
- [16] Guo J, Zhang G, Wei W, et al. Dynamically formed inner skin
hollow fiber polydimethylsiloxane/polysulfone composite
membrane for alcohol permselective pervaporation [J].
Chemical Engineering Journal, 2010, 158(3): 558-565
- [17] 姜彦,史红岩,蔡敏,等.PBMA-b-PDMS-b-PBMA 嵌段聚合物的
合成与表征[J].功能材料,2013,44(5):693-696
- [18] Lipnizki, F, Trägårdh, et al. Modelling of pervaporation:
models to analyze and predict the mass transport in
pervaporation [J]. Separation & Purification Methods, 2001,
30(1): 49-125
- [19] Kedem O. The role of coupling in pervaporation [J]. Journal of
Membrane Science, 1989, 47(3): 277-284
- [20] Kachhadiya D D, Murthy Z V P. Preparation and
characterization of ZIF-8 and ZIF-67 incorporated poly
(vinylidene fluoride) membranes for pervaporative separation
of methanol/ water mixtures [J]. Materials Today Chemistry,
2021, 22: 100591
- [21] Zhang G, Li J, Wang N, et al. Enhanced flux of
polydimethylsiloxane membrane for ethanol permselective
pervaporation via incorporation of MIL-53 particles [J].
Journal of Membrane Science, 2015, 492: 322-330
- [22] Rao Y, Ni F, Sun Y, et al. Efficient recovery of the volatile
aroma components from blackberry juice using a ZIF-8/PDMS
hybrid membrane [J]. Separation and Purification Technology,
2020, 230: 115844