

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403038



膜分离精度对再造烟叶 提取液的截留影响

赖傲楠¹, 武士杰^{2,3}, 李淑纯¹, 周树锋¹

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 云南中烟再造烟叶有限责任公司, 云南 昆明 650202;

3. 天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 为实现对再造烟叶提取液成分的精确调控,将不同过滤精度膜依次用于提取液的分离,考察不同孔径膜及相应膜组合对提取液化学成分的截留效果影响。结果表明:孔径为200 nm的微滤(MF)膜主要截留悬浮物,孔径为20~30 nm的超滤(UF)膜可进一步截留可溶性蛋白质和果胶等大分子物质,孔径为5~10 nm的纳滤膜(NF1)能够对烟碱和碳原子数介于10~13的烟草中性致香成分进行有效分离,而孔径为3~5 nm的纳滤膜(NF2)则对糖类物质和碳原子数6~8的中性致香成分具有较强的截留作用,孔径为1~2 nm的纳滤膜(NF3)可以截留有机酸盐和碳原子数超过4的中性致香成分;采用MF+UF+NF1+NF2+NF3膜分离组合方式能够实现对再造烟叶提取液主要化学成分的调控。

关键词: 烟草提取液; 膜分离; 化学成分; 纳滤

中图分类号: TQ 028

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)05-0681-07

Interception Effects of Membranes With Different Pore Sizes for Reconstituted Tobacco Extract

LAI Aonan¹, WU Shijie^{2,3}, LI Shuchun¹, ZHOU Shufeng¹

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Yunnan China Tobacco Remanufactured Tobacco Leaf Limited Company, Kunming 650202, China;

3. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To achieve precise control of the components of the extracted liquid from reconstituted tobacco leaves, different filtration precision membranes were sequentially used for the separation of the extracted liquid, and the effects of different pore size membranes and corresponding membrane combinations on the retention of chemical components in the extracted liquid were investigated. The results showed that microfiltration (MF) membranes with a pore size of 200 nm mainly retained suspended solids, ultrafiltration (UF) membranes with a pore size of 20-30 nm could further retain macromolecular substances such as soluble proteins and pectin, nanofiltration membranes (NF1) with a pore size of 5-10 nm could effectively separate nicotine and tobacco neutral aroma components with carbon atom numbers ranging from 10 to 13, while nanofiltration membranes (NF2) with a pore size of 3-5 nm had strong retention effects on sugars and neutral aroma components with carbon atom numbers ranging from 6 to 8, and nanofiltration membranes (NF3) with a pore size of

收稿日期: 2024-03-26

通信作者: 武士杰(1985-),男,工程师,博士,主要从事再造烟叶工艺技术的研究。E-mail:wushi20082009@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(201706032); 云南中烟再造烟叶有限责任公司科技项目(GYJS2021-2)

1-2 nm could retain organic acid salts and tobacco neutral odorant components with more than 4 carbon atoms. The combination of MF + UF + NF1 + NF2 + NF3 membrane separation could be used to regulate the main chemical components of the reconstituted tobacco extract.

Keywords: tobacco extract; membrane separation; chemical composition; nanofiltration

再造烟叶提取液是烟草的水溶性成分,为再造烟叶提供糖类、烟碱、有机/无机酸盐、氨基酸、可溶性大分子物质、脂溶性致香成分和糖苷类物质^[1-3]。因此,提取液的组成和含量影响着再造烟叶的品质^[4-5]。按化学成分类别对提取液组分进行分离,再以重组的方式精准调控各类物质的相对含量,可实现对再造烟叶组分的精确调控,有利于提高其品质^[6-8]。

膜分离技术是一种基于膜的筛分效应、对不同粒径的分子或离子进行选择分离的技术,具有分离和浓缩同步进行的优点^[9-11]。根据过滤精度的差异,膜材料可以分为微滤(MF)膜、超滤(UF)膜和纳滤(NF)膜等^[12-13]。再造烟叶提取液化学成分复杂,粒径各有差异,因此,可以选择不同过滤精度的多级膜组合方式对其进行分离。多级膜组合技术应用广泛,如饮用水和工业用水的净化与循环利用^[14-16]、细菌和热原的去除^[17-18]、天然产物的分离纯化和富集^[19-22]等。但目前该技术在烟草提取液的分离和浓缩方面的研究还比较少^[23-25]。

为明确膜分离精度对再造烟叶提取液各化学成分的截留影响,实现对提取液化学成分的调控,本文将微滤、超滤和不同孔径纳滤膜依次用于提取液的分离工序,考察不同孔径分离膜对提取液主要化学成分的分离效果,研究相应膜组合技术对提取液的截留影响。

1 实验部分

1.1 材料与设备

经沉降处理的再造烟叶提取液由云南昆明烟叶产区生产,可溶性固形物的质量分数为 8.45%,悬浮物质量分数为 0.92%。

仪器:旋转蒸发仪(瑞士 Buchi 公司);6890GC-5975MS 型气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司);AA3 型流动分析仪(德国 SEAL 公司);白利糖度仪、TG328B 型电光分析天平(上海天平仪器厂);FED115 型多功能热风循环烘箱(德国 Binder 公司);GCM-S-02 型多功能膜分离实验设备(国初科技(厦门)有限公司);KBF115 型恒温恒湿箱(德国 BINDER 公司)。耗材:打烟器具、烟管和氟化瓶等。

管式微滤膜、超滤膜和不同过滤精度纳滤膜(NF1, NF2, NF3)组件参数,如表 1 所示。

表 1 膜组件参数

Tab. 1 Parameters of membrane components

指标	微滤膜	超滤膜	纳滤膜		
			NF1	NF2	NF3
膜材料	聚四氟乙烯	聚酰胺	聚酰胺	聚酰胺	聚酰胺
膜孔径/nm	200	20~30	5~10	3~5	1~2
膜面积/m ²	64	528	528	528	528
膜长度/mm	3 000	1 016	1 016	1 016	1 016
温度操作范围/℃	20~70	20~50	20~50	20~50	20~50
运行压力/MPa	0.2~0.4	0.5~2.0	0.5~2.5	0.5~4.0	1.0~4.0

1.2 实验和检测方法

1.2.1 提取液的截留实验流程和滤液样品的制备 经沉降处理后的再造烟叶提取液进料量为 5 000 kg,料液温度为 65~70 ℃,经过换热器后料液温度为 50~60 ℃。料液再依次经过 MF, UF, NF1, NF2, NF3 膜处理,各级透过液占该级过滤液量的 90%,各级操作温度≤60 ℃,其工艺流程如图 1 所示。

MF 试验流程:首先,提取液经过 MF 膜组件分离,当透过液质量达到进料液的 90%时,分别对截留液和透过液进行取样分析;随后,将透过液泵入下一级膜分离流程;往截留液中加入等质量水稀释后,继续过滤至原质量;循环 5 次,排出稀释的透过液,对剩余截留液进行取样分析,验证本级膜的截留效果。

UF, NF1, NF2, NF3 试验流程和 MF 试验流程相似,进料均是上一级膜工艺的透过液,经本级膜过

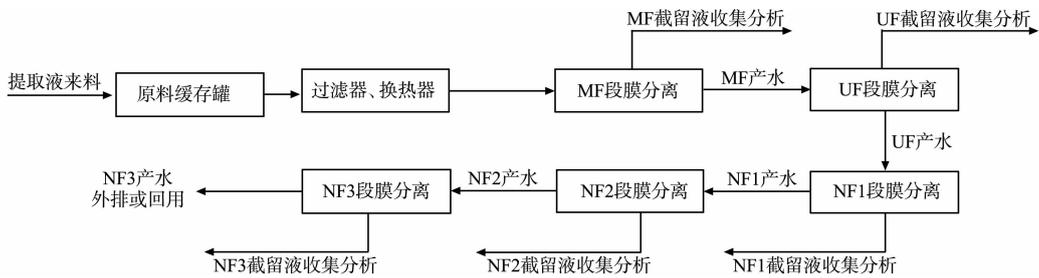


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Flowchart of process

滤后,对截留液和透过液进行取样分析。

1.2.2 主要化学成分的检测方法 1) 采用连续流动法,分别按照 YC/T 159—2002, YC/T 160—2002, YC/T 161—2002, YC/T 162—2002, YC/T 249—2002, YC/T 296—2009 标准测定各级膜截留液的总糖、烟碱、总氮、钾离子、氯离子、蛋白质和硝酸盐的质量分数。

2) 采用 GC-MS 型气相色谱-质谱联用仪分析致香成分的质量分数。气相色谱条件:DB-5MS 型石英毛细管柱(30 mm×0.25 mm, 0.25 μm)。程序升温:初始 60 °C,保持 1 min;以 8 °C·min⁻¹ 的速率升至 170 °C,保持 3 min;再以 12 °C·min⁻¹ 的速率升至 260 °C,保持 18 min。进样口温度为 200 °C,柱箱温度为 60 °C;分流进样,柱流量为 1 mL·min⁻¹;吹扫流量为 3 mL·min⁻¹;分流比为 5:1;载气为高纯氮;进样量为 1 μL;溶剂延迟为 2 min。质谱条件:采用电子轰击电离方式(EI),电子能量为 70 eV。接口温度为 250 °C,离子源温度为 200 °C。采用全扫描离子采集方式(Scan),扫描范围为 40~500 u。标准质谱图库:美国国家标准与技术研究院标准质谱数据库(NIST)。

2 实验结果与讨论

2.1 膜分离精度对悬浮物及可溶性大分子的截留影响

再造烟叶提取液经不同过滤精度膜分离前、后的悬浮物及可溶性大分子质量分数,如表 2 所示。表 2 中:截留液(2)为对应段截留液(1)加水反复循环过滤 5 次时的截留液;“—”表示未检测出相应数据。由表 2 可知:MF 膜过滤后,透过液中悬浮物(含难溶性蛋白质和果胶)质量分数极低,显著低于原液中相应质量分数,表明悬浮物能够被 MF 膜有效截留;透过液中可溶性蛋白质和果胶的质量分数也略低于原液中相应质量分数,表明 MF 膜对这两类物质有一定的截留作用。此外, MF 截留液(1)经 5 次加水循环过滤后, MF 截留液(2)中的悬浮物、可溶性蛋白质和果胶质量分数虽有下降但仍有较多残留,再次证明 MF 微滤膜对提取液的悬浮物、可溶性蛋白质和果胶具有截留作用。

表 2 不同过滤精度膜处理前、后提取液的悬浮物和可溶性大分子质量分数 (单位: %)

Tab. 2 Mass fraction of suspended solids and soluble macromolecules in extracts before and after membrane treatment with different filtration precisions (unit: %)

溶液	悬浮物	蛋白质	果胶
提取液原液	0.92	0.53	0.02
MF 透过液	0.02	0.47	—
MF 截留液(1)	8.32	0.66	0.28
MF 截留液(2)	8.01	0.63	0.13
UF 透过液	—	0.04	—
UF 截留液(1)	—	5.17	0.28
UF 截留液(2)	—	4.56	0.13

将 MF 透过液进一步经 UF 膜分离后, UF 透过液中可溶性蛋白质质量分数仅为 0.04%, 显著低于 MF 透过液(0.47%)。果胶质量分数的变化趋势与此一致,表明提取液中含有的可溶性蛋白质和果胶等大分子能被 UF 膜高效截留。UF 截留液(1),(2)的检测结果进一步证实了该截留作用。

2.2 膜分离精度对常规化学成分截留影响

再造烟叶提取液经过不同过滤精度膜分离前、后的常规化学成分的质量分数,如表 3 所示。由表 3

可知:MF 透过液中烟碱、钾离子、氯离子和硝酸盐的质量分数与原液中相应质量分数一致,表明 MF 膜对提取液中这些组分没有截留作用;而 MF 透过液中总氮和总糖的质量分数略低于原液中相应的值,表明 MF 膜对部分含氮物质和某些糖类物质具有截留作用。对比 MF 截留液的检测结果,进一步证实 MF 膜对常规化学成分具有选择性截留作用。

UF 膜的截留作用与 MF 膜类似,即 UF 膜对提取液中烟碱、钾离子、氯离子和硝酸盐没有截留作用,对部分含氮物质和某些糖类物质具有截留作用。

表 3 不同过滤精度膜处理前、后提取液的常规化学成分的质量分数 (单位:%)
Tab. 3 Mass fraction of conventional chemical components of extracts before and after membrane treatment with different filtration precisions (unit: %)

溶液	烟碱	钾离子	氯离子	硝酸盐	总氮	总糖
提取液原液	0.26	0.32	0.11	0.05	0.13	2.73
MF 透过液	0.26	0.32	0.11	0.05	0.12	2.60
MF 截留液(1)	0.25	0.29	0.10	0.05	0.25	2.87
MF 截留液(2)	0.01	0.01	0.01	—	0.17	0.18
UF 透过液	0.26	0.32	0.11	0.05	0.06	2.57
UF 截留液(1)	0.27	0.37	0.11	0.05	0.87	2.65
UF 截留液(2)	0.01	0.01	0.01	—	0.73	0.12
NF1 透过液	0.04	0.31	0.11	0.05	0.01	2.35
NF1 截留液(1)	2.43	0.35	0.11	0.05	0.49	4.29
NF1 截留液(2)	2.01	0.02	—	—	0.45	0.04
NF2 透过液	—	0.29	0.11	0.05	0.01	0.15
NF2 截留液(1)	0.41	0.44	0.11	0.05	0.10	22.50
NF2 截留液(2)	0.39	0.02	—	—	0.10	12.70
NF3 透过液	—	0.15	0.10	0.04	0.01	—
NF3 截留液(1)	0.02	1.43	0.17	0.09	0.05	1.48
NF3 截留液(2)	0.02	1.31	—	—	0.04	1.41

NF1 纳滤膜的分离结果表明,与 UF 透过液相比,NF1 透过液的烟碱和总氮质量分数明显降低,同时总糖的质量分数也有所降低,表明 NF1 纳滤膜对这些物质具有较好的截留作用。而过滤前、后钾离子、氯离子和硝酸盐的质量分数没有明显变化,表明 NF1 纳滤膜对其截留作用不明显。对比 NF1 截留液的检测结果,进一步证实 NF1 纳滤膜对常规化学成分具有选择性截留作用。

NF2 纳滤膜对 NF1 透过液进行分离后,NF2 透过液中烟碱的质量分数显著降低,仪器未检出,表明其对烟碱有较强的截留作用;总糖的质量分数也明显降低,表明该膜对糖类物质也具有较好的截留作用。总氮和钾离子的质量分数略有降低,表明 NF2 纳滤膜对部分含氮物质和以钾表征的有机酸盐有一定截留作用。而过滤前、后氯离子和硝酸盐的质量分数没有明显变化,表明 NF2 纳滤膜对其截留作用不明显。对比 NF2 截留液的检测结果,进一步证实上述选择性截留作用。

使用 NF3 纳滤膜对 NF2 透过液进一步分离后,NF3 透过液中未检出糖类物质,表明该 NF3 纳滤膜对其具有较强的截留效果;钾离子质量分数显著降低,表明 NF3 纳滤膜对以钾表征的有机酸盐有较好的截留作用。此外,结合 NF2 截留液(1)的检测结果分析可知,NF3 纳滤膜对部分含氮物质和以氯离子和硝酸盐表征的无机酸盐也具有一定的截留作用。

2.3 膜分离精度对中性致香成分的截留影响

再造烟叶提取液经过不同过滤精度膜分离的中性致香成分及质量比,如表 4 所示。表 4 中: t 为保留时间; w 为致香成分质量比; N_c 为碳原子数; w_{tot} 为致香成分总质量比。由表 4 可知:MF 透过液和提取液原液的中性致香成分及质量比接近,表明 MF 膜对中性致香成分的截留作用并不明显。

经过 UF 膜分离后,UF 透过液的中性致香成分总质量比降低到 $4.258 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,比 MF 透过液的相应质量比($8.609 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)降低近 50%,表明 UF 膜对部分中性致香成分具有较好的截留作用。UF 膜对 N_c 为 4~5 的中性致香成分截留作用较弱,对 N_c 为 6~11 的中性致香成分普遍具有一定截留作用,对 N_c 为 13 的中性致香成分具有较好的截留作用。对比相关致香成分在 UF 截留液与 UF 透过液

的质量比,进一步证实了 UF 膜对不同含碳数中性致香成分表现出选择性截留作用。

表 4 不同过滤精度膜处理前、后提取液的中性致香成分及质量比
Tab. 4 Neutral aroma components and mass ratio of extracts before and after membrane treatment with different filtration precisions

成分	N_c	t/min	$w/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$										
			提取液原液	MF 透过液	MF 截留液	UF 透过液	UF 截留液	NF1 透过液	NF1 截留液	NF2 透过液	NF2 截留液	NF3 透过液	NF3 截留液
3-羟基-2-丁酮	4	2.955	0.453	0.396	0.436	0.420	0.470	0.391	0.504	0.208	2.150	—	2.174
3-甲基丁醇	5	3.228	0.044	0.039	0.036	0.040	0.043	0.046	0.516	0.027	0.262	—	0.218
糠醛	5	4.544	0.094	0.063	0.075	0.059	0.084	0.038	0.128	0.025	0.157	—	0.179
2-甲基丁酸	5	4.762	0.032	0.027	0.032	0.023	0.055	0.007	0.117	0.002	0.014	—	0.017
糠醇	5	4.894	0.146	0.093	0.091	0.081	0.101	0.037	0.353	0.029	0.093	—	0.153
4-环戊烯-1,3-二酮	5	5.369	0.049	0.041	0.043	0.038	0.077	0.020	0.121	—	0.011	—	0.025
吡啶-2-甲醛	6	6.651	0.009	0.008	0.021	0.007	0.017	—	—	—	—	—	—
苯甲醛	6	6.931	0.067	0.060	0.043	0.040	0.161	—	0.132	—	—	—	—
2-乙酰基吡咯	6	8.868	0.240	0.192	0.197	0.129	0.874	0.035	1.287	0.002	0.089	—	—
4-甲氧基苯酚	7	9.344	0.045	0.039	0.040	0.013	0.236	0.003	0.106	—	0.008	—	—
苯甲醇	7	8.345	0.863	0.725	0.716	0.615	1.328	0.256	3.025	0.018	1.846	—	0.099
苯乙醛	8	8.517	0.301	0.278	0.253	0.207	0.603	0.064	1.749	0.006	0.163	—	0.014
苯乙醇	8	9.880	0.704	0.628	0.670	0.325	0.975	0.138	1.754	0.002	1.179	—	0.013
苯并噻吩	8	11.487	0.313	0.399	0.419	0.327	0.883	0.077	2.196	0.009	0.526	—	0.021
2,3-二氢苯并咪唑	8	11.979	1.325	1.201	1.582	0.860	1.584	0.225	5.372	—	0.271	—	—
吡啶	8	13.294	0.187	0.143	0.121	0.113	0.162	0.021	0.849	—	0.050	—	—
芳樟醇	10	9.578	0.013	0.015	0.022	0.007	0.094	—	0.055	—	—	—	—
二氢猕猴桃内酯	11	17.782	0.467	0.461	0.494	0.179	2.328	—	1.691	—	0.007	—	—
茄酮	13	14.274	2.139	1.845	1.857	0.382	11.365	0.016	2.853	—	0.091	—	—
β -大马酮	13	14.685	0.562	0.503	0.644	0.085	3.189	—	0.658	—	—	—	—
β -二氢大马酮	13	14.803	0.102	0.096	0.106	0.010	0.835	—	0.124	—	—	—	—
β -紫罗兰酮	13	15.145	0.095	0.075	0.097	0.012	0.662	—	0.131	—	—	—	—
二氢乙位紫罗兰酮	13	15.221	0.114	0.098	0.185	0.014	0.861	—	0.126	—	—	—	—
巨豆三烯酮 B	13	18.663	0.594	0.543	0.863	0.127	4.309	—	1.240	—	—	—	—
巨豆三烯酮 D	13	19.551	0.537	0.488	0.795	0.145	4.172	—	1.532	—	0.002	—	—
3-氧代- α -紫罗兰醇	13	19.867	0.174	0.153	0.191	0.031	1.065	—	0.275	—	—	—	—
$w_{\text{tot}}/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			9.669	8.609	10.029	4.258	32.361	1.514	26.894	0.328	6.917	—	2.913

NF1 纳滤膜对提取液进一步分离后, NF1 透过液的中性致香成分总质量比为 $1.514 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 对比 UF 透过液降低近 65%, 表明 NF1 纳滤膜对提取液中的中性致香成分具有较强的截留作用。此外, 对比 NF1 过滤前、后的致香成分可知, NF1 膜对 N_c 为 4~5 的中性致香成分具有一定截留作用, 对 N_c 为 6~8 的中性致香成分具有较好的截留作用, 对 N_c 为 10~13 的中性致香成分具有较强的截留作用。

使用 NF2 纳滤膜对 NF1 透过液进一步分离后, NF2 透过液的中性致香成分总质量比降低到 $0.328 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 降低了近 78%, 表明 NF2 纳滤膜可以对 N_c 为 4~8 的中性致香成分进一步有效截留。对各组分分析可知, NF2 膜对 N_c 为 4~5 的烟草中性致香成分具有一定的截留作用, 对 N_c 为 6~8 的烟草中性致香成分具有较强的截留作用。

使用 NF3 纳滤膜对 NF2 透过液再分离后, 在透过液中未检出烟草中性致香物质, 且 NF3 截留液富集了 N_c 为 4~8 的中性致香成分, 表明 NF3 纳滤膜对提取液中碳原子数超过 4 的中性致香成分均具有较强的截留作用。

2.4 不同过滤精度膜组合的各段组分

采用 MF+UF+NF1+NF2+NF3 膜组合方式对再造烟叶提取液进行逐级过滤, 提取液进料量为 5 000 kg, 各级透过液占该级过滤液质量的 90%。通过测定各段不挥发物质量分数, 结合各段质量, 可以计算各组分干物质总质量及其占比, 如表 5 所示。由表 5 可知: 提取液经 MF+UF+NF1+NF2+

NF3膜组合方式逐级过滤,形成了5个可用于涂布料化学成分调控的截留液组分,占进料干物质总质量的97.76%。通过计算可知,这5个组分混合后的不挥发物质量分数为20.16%。

表5 提取液在各组分的质量、不挥发物质量分数、干物质总质量及其占比

Tab.5 Quality, nonvolatile matter mass fraction, total dry matter mass and its proportion of extraction in each group segment

溶液	各段质量/kg	不挥发物质量分数/%	干物质总质量/kg	干物质占比/%
提取液原液	5 000	8.45	422.50	—
MF截留液	500	18.31	91.55	21.67
UF截留液	450	23.06	103.77	24.56
NF1截留液	405	24.43	98.94	23.42
NF2截留液	365	24.85	90.70	21.47
NF3截留液	329	8.53	28.06	6.64
NF3排放液	2 951	0.37	10.92	2.58

根据各截留液段主要化学成分的质量和表5中各段质量,可计算出各主要化学成分在各段的质量,并将其与表5中各段的干物质总质量进行对比,计算出每段中各主要化学成分占该段干物质总质量的比例,如表6所示。由表6可知:MF段的主要化学成分是悬浮物,占该段干物质总质量的45.44%;UF段的主要化学成分是可溶性大分子和糖类物质,分别占该段干物质总质量的23.64%和11.49%;NF1段的主要化学成分是糖类物质和烟碱,分别占该段干物质总质量的17.56%和9.95%;NF2段的主要化学成分是糖类物质,占该段干物质总质量的90.55%;NF3段的主要化学成分是有机酸盐,占该段干物质总质量的68.60%。因此,采用MF+UF+NF1+NF2+NF3膜组合方式可以在较为宽泛的范围内实现再造烟草涂布液主要化学成分的调控。

表6 各组分中主要化学成分占干物质总质量的比例 (单位:%)

Tab.6 Ratio of major chemical components to total dry matter mass in each group segment (unit:%)

溶液	悬浮物	可溶性大分子	烟碱	糖类	有机酸盐	无机酸盐	致香成分
MF截留液	45.44	5.13	1.37	15.67	4.17	2.24	0.005
UF截留液	—	23.64	1.17	11.49	4.39	1.57	0.014
NF1截留液	—	—	9.95	17.56	3.89	1.54	0.011
NF2截留液	—	—	1.65	90.55	5.63	1.51	0.003
NF3截留液	—	—	0.23	17.35	68.60	7.63	0.003

3 结论

通过将微滤、超滤和不同孔径纳滤膜依次应用于再造烟叶提取液的分离,研究不同孔径分离膜对提取液主要化学成分的截留影响,实现了对再造烟叶涂布液化学成分的调控。具体有以下2点结论。

1) 孔径为200 nm的MF膜对悬浮物(含难溶性蛋白质和果胶)有良好的截留作用;孔径为20~30 nm的UF膜对可溶性蛋白质和果胶等大分子物质具有较强的截留作用;孔径为5~10 nm的NF1纳滤膜对烟碱和碳原子数为10~13的中性致香成分具有较强的截留作用;孔径为3~5 nm的NF2纳滤膜对糖类物质和碳原子数6~8的烟草中性致香成分具有较强的截留作用;孔径为1~2 nm的NF3纳滤膜对以钾表征的有机酸盐和碳原子数超过4的烟草中性致香成分具有较强的截留作用。

2) 采用MF+UF+NF1+NF2+NF3膜分离组合方式能够将再造烟叶提取液分成相应的5组截留液组分,可以在较为宽泛的范围内实现再造烟叶涂布液主要化学成分的重组和调控。

参考文献:

- [1] 王承福,赵爽,葛永辉,等.烟草综合利用及研究进展[J].贵州农业科学,2016,44(11):37-41.
- [2] 王锐.废弃烟末功能性成分的提取及应用研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [3] 李华雨,薛建中,王毅博,等.再造烟叶生产浓缩过程中挥发性香味成分的变化[J].烟草科技,2018,51(12):52-64. DOI:10.16135/j.issn1002-0861.2018.0128.

- [4] 张翼鹏,张健,曾熠程,等.津巴布韦烟草提取物制备工艺优化及化学成分研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(1):63-69. DOI:10.12101/j.issn.1004-390X(n).201708017.
- [5] 李猛政,李荣华,夏岩石,等.烟草叶蛋白提取技术研究进展[J].中国烟草科学,2021,42(4):85-91. DOI:10.13496/j.issn.1007-5119.2021.04.013.
- [6] 唐蓉,唐向阳,孙旭海,等.再造烟叶连续多级逆流提取工艺试验研究[J].纸和造纸,2018,37(4):17-20. DOI:10.13472/j.ppm.2018.04.005.
- [7] 黄晶.造纸法再造烟叶提取过程中致香成分的溶出规律[J].福建分析测试,2017,26(3):56-62. DOI:10.3969/j.issn.1009-8143.2017.03.12.
- [8] 俞京,庄海涛,袁广翔,等.浓缩工艺对再造烟叶原料醇提液蒸发效果的影响[J].安徽农业科学,2021,49(19):164-169. DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.19.043.
- [9] 时钧,袁权,高从堦.膜技术手册[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [10] 淡俊豪,齐绍武,黎娟,等.新型烟草制品用烟草香味物质提取与分离纯化技术研究进展[J].山东农业科学,2017,49(11):151-156. DOI:10.14083/j.issn.1001-4942.2017.11.031.
- [11] 胡嘉维,吴宇航,樊功博,等.再造烟叶提取工艺优化与应用[J].广州化工,2021,49(3):50-54.
- [12] 祝倩倩.膜分离技术在注射用芪红脉通刺剂工艺中的研究与应用[D].南京:南京中医药大学,2013.
- [13] ZHU Xiaoying,BAI Renbi. Separation of biologically active compounds by membrane operations[J]. Current Pharmaceutical Design,2017,23(2):218-230. DOI:10.2174/1381612822666161027153823.
- [14] WANG Zhuqing,WU Aiguo,CIACCHI L C,*et al.* Recent advances in nanoporous membranes for water purification [J]. Nanomaterials,2018,8(2):65.
- [15] WARSINGER D M,CHAKRABORTY S,TOW E W,*et al.* A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse[J]. Progress in Polymer Science,2018,81:209-237. DOI:10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004.
- [16] REZAKAZEMI M,KHAJEH A,MESBAH M. Membrane filtration of wastewater from gas and oil production[J]. Environmental Chemistry Letters,2018,16(2):367-388.
- [17] NGHIEM L D,SCHÄFER A I,ELIMELECH M. Pharmaceutical retention mechanisms by nanofiltration membranes[J]. Environmental Science & Technology,2005,39(19):7698-7705. DOI:10.1021/es0507665.
- [18] KOZLOV M,MOYA W,TKACIK G. Removal of microorganisms from fluid samples using nanofiber filtration media: US201013257501[P]. 2012-04-19[2024-02-17].
- [19] ALMANASRAH M,BRAZINHA C,KALLIOINEN M,*et al.* Nanofiltration and reverse osmosis as a platform for production of natural botanic extracts: The case study of carob by-products[J]. Separation and Purification Technology,2015,149:389-397. DOI:10.1016/j.seppur.2015.06.008.
- [20] GALANAKIS C M. Separation of functional macromolecules and micromolecules: From ultrafiltration to the border of nanofiltration[J]. Trends in Food Science & Technology,2015,42(1):44-63. DOI:10.1007/s11947-012-0829-2.
- [21] CONIDI C,CASSANO A,CAIAZZO F,*et al.* Separation and purification of phenolic compounds from pomegranate juice by ultrafiltration and nanofiltration membranes[J]. Journal of Food Engineering,2017,195:1-13. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.09.017.
- [22] MONIZ P,SERRALHEIRO C,MATOS C T,*et al.* Membrane separation and characterisation of lignin and its derived products obtained by a mild ethanol organosolv treatment of rice straw[J]. Process Biochemistry,2018,65:136-145.
- [23] 高猛峰.烟草薄片萃取液膜浓缩技术研究[D].上海:华东理工大学,2021.
- [24] 张静楠,张峻松.基于膜分离技术提高碎片浓缩液质量的研究[J].福建分析测试,2015,24(2):27-29. DOI:10.3969/j.issn.1009-8143.2015.02.06.
- [25] 唐向阳,唐蓉,杨斌.造纸法再造烟叶生产中分离浓缩新工艺研究[J].纸和造纸,2019,38(4):33-36. DOI:10.13472/j.ppm.2019.04.009.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)