

## 膜分离技术在中药绿色制造中的应用与展望

董治国<sup>1</sup>, 周容<sup>1</sup>, 何金凤<sup>1,2,3</sup>, 刘文龙<sup>1</sup>, 陈雨晴<sup>1</sup>, 王虎传<sup>1,2,3</sup>, 李传润<sup>1,2,3\*</sup>, 颜海洋<sup>1,2,3\*</sup>

1. 安徽中医药大学药学院, 安徽 合肥 230012

2. 安徽中医药大学 制药工程技术研究中心, 安徽 合肥 230012

3. 药物制剂技术与应用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230012

**摘要:** 膜分离技术由于其独特的分离机制, 能够实现中药制药的高效分离与纯化, 从而实现中药绿色制造, 推动中药行业绿色、高质量发展。通过对近年来微滤、超滤、纳滤、膜蒸馏、集成膜技术及其他膜分离技术在中药绿色制造中的应用进行综述, 并探讨膜分离技术在中药制药中的应用前景, 可为中药绿色制造提供新思路, 推动膜分离技术在中药制药过程中的新应用和新发展。

**关键词:** 膜分离; 中药; 绿色制造; 微滤; 超滤; 纳滤; 膜蒸馏; 集成膜技术; 反渗透; 电渗析

中图分类号: R283 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2024)12-4225-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.12.029

## Application and prospect of membrane separation technology in green manufacturing of traditional Chinese medicine

DONG Zhiguo<sup>1</sup>, ZHOU Rong<sup>1</sup>, HE Jinfeng<sup>1,2,3</sup>, LIU Wenlong<sup>1</sup>, CHEN Yuqing<sup>1</sup>, WANG Huchuan<sup>1,2,3</sup>, LI Chuanrun<sup>1,2,3</sup>, YAN Haiyang<sup>1,2,3</sup>

1. School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China

2. Pharmaceutical Engineering Technology Research Center, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China

3. Anhui Province Key Laboratory of Pharmaceutical Preparation Technology and Application, Hefei 230012, China

**Abstract:** Membrane separation technology, due to its unique separation mechanism, is capable of realizing efficient separation and purification of traditional Chinese medicine (TCM) pharmaceuticals, thus realizing the green manufacturing of TCM and promoting the green and high-quality development of the TCM industry. In this paper, we summarized the progress of the application of microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, membrane distillation, integrated membrane technology, and the other membrane separation technology in the green manufacturing of TCM in recent years, and discussed the prospect of the application of membrane separation technology in TCM pharmaceuticals. The above insights will provide new ideas for the green manufacturing of TCM, and promote the new application and development of membrane separation technology in the pharmaceutical process of TCM.

**Key words:** membrane separation; traditional Chinese medicine; green manufacturing; microfiltration; ultrafiltration; nanofiltration; membrane distillation; integrated membrane technology; reverse osmosis; electro dialysis

中药作为中华民族传统文化的瑰宝, 在疾病预防、治疗、保健中具有重要作用。国务院在《中医药发展战略规划纲要(2016—2030年)》中明确指出, 中医药是我国为数不多具有原创优势的科技领

域, 是我国医药卫生领域科技竞争力的重要体现。同时, 该纲要也明确将建立中药绿色制造体系制定为重点任务, 促进中药制药向绿色制造转型, 以促进中药产业的高速发展, 这对国家经济发展也具有

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3805103); 国家重点研发计划项目(2022YFB3805102); 国家自然科学基金资助项目(22008226); 安徽省高校优秀青年科研项目(2022AH030063); 安徽中医药大学人才支持计划项目重大项目(2022rcZD005); 烟草化学安徽省重点实验室开放课题(2022302)

作者简介: 董治国, 男, 硕士研究生, 研究方向为中药膜分离过程开发及应用。E-mail: d446410389@163.com

\*通信作者: 颜海洋, 教授, 从事中药膜分离过程研究。E-mail: oceanyan@ustc.edu.cn

李传润, 教授, 从事中药提取分离过程研究。E-mail: crli@ahctm.edu.cn

重大意义。

中药组成十分复杂，一味中药可能含有成百上千种不同的成分，如生物碱、有机酸、黄酮、挥发油和萜类化合物及蛋白质、淀粉、多糖等，且其相对分子质量大小不一<sup>[1]</sup>。一般来说，中药有效成分如生物碱、有机酸和黄酮等的相对分子质量往往小于 1 000，具有多靶向作用，被称为天然组合化学库 (natural combinatorial chemical libraries, NCCL)<sup>[2]</sup>。如何在中药中获得 NCCL 及如何对 NCCL 中成分进行选择分离，使其可以达到世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 对传统医药“安全、有效、稳定、均一、经济”的要求，是实现中药绿色制造的重点和难点。

分离是中药生产过程中的共性关键技术<sup>[3]</sup>，中药传统的分离方法主要有吸附法、萃取法、醇沉法、离子交换法和重结晶法等，这些方法大多存在以下问题：有机试剂消耗量大、污染严重；生产周期长、能耗高；有效成分损失多，非有效成分去除率低，药效不能充分利用；过于注重单个成分的作用，不符合中药“整体、多元”特征<sup>[4]</sup>。传统分离工艺的诸多缺点使承载了中华民族几千年智慧结晶的中药难以达到 WHO 对传统医药的要求，降低了中药在国际医药市场的竞争力。据统计，2018 年全球中药市场容量为 800 亿美元，我国中药出口总额为 36.24 亿美元，中成药出口总额仅为 2.64 亿美元，而日韩中药产品占全球市场的 80%<sup>[5]</sup>。日本占据了大量的中药国际市场，与其应用膜分离技术生产中药产品密切相关，如小柴胡汤作为日本药典中首个被认可的中药汉方制剂，就使用了超滤工艺生产<sup>[6-7]</sup>。因此，当前亟需开发新型的分离技术用于中药绿色生产及资源化利用，推动中药绿色制造。

膜分离技术是以选择透过性薄膜为载体，在膜两侧施加驱动力（压力场、电场、浓度场等）对混合物进行分离、纯化和浓缩，从而获得目标产品的过程，常用的膜分离技术有微滤、超滤、纳滤、膜蒸馏等<sup>[8-9]</sup>。目前，膜分离技术已广泛用于食品、医药、生物、能源、石油、化工和水处理等领域，是当今分离科学中最重要的新型分离技术之一，也是国际公认的 21 世纪最有发展前途的高新技术之一<sup>[10]</sup>。膜分离技术以水为基本溶剂的特点，符合千百年来中医用药的要求，其高效率、低能耗、无污染的分离特点，也符合中药绿色制造的标准<sup>[11]</sup>。因此，本文将详细介绍膜分离技术在中药绿色制造中的应

用，并展望未来膜分离技术在中药绿色制造中的发展方向，推动实现中药绿色制造。

## 1 微滤

千百年来，以水煎煮是中药最常用的使用方法，但是以水煎煮得到的药液杂质含量较高、药液浑浊，对药效会产生一定的影响。微滤膜孔径为 0.1~5.0 μm，几乎允许所有中药有效成分通过，同时可以有效截留中药提取液中固形物、颗粒、微生物等杂质，降低溶液黏度，使溶液变得澄清透明，减少服用剂量、提高用药安全性<sup>[12-13]</sup>。因此，现阶段微滤技术主要用于中药提取液的预处理（表 1）<sup>[14-23]</sup>，如山茱萸水提液、三七水提液、黄柏提取液等，实验装置见图 1（超滤、纳滤和反渗透实验装置同此图）。李国龙等<sup>[14]</sup>使用无机陶瓷微滤膜精制山茱萸水提液，

表 1 微滤在中药提取液预处理中的应用

Table 1 Application of microfiltration in pretreatment of traditional Chinese medicine extracts

中药提取液	有效成分	透过率/%	文献
山茱萸	马钱苷	75.3	14
三七	总皂苷	84.8	15
槐米	芦丁	78.3	16
川芎	阿魏酸	88~96	17
苦楝	苦楝素	99.4	18
黄柏	盐酸小檗碱	74.2	19
枳实	辛弗林	81.9	20
小儿健脾平肝剂	芍药苷	69.5	21
复方咽舒宁	哈巴俄苷、表告依春	82.7、93.8	22
田基黄	槲皮苷、总黄酮	80~87、79~85	23

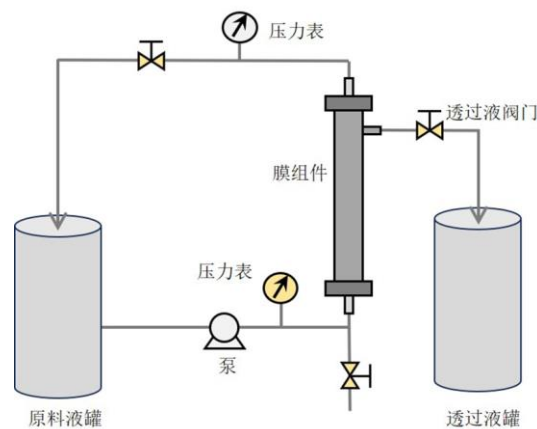


图 1 压力驱动膜技术装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure-driven membrane technology device

主要成分马钱苷的透过率达 75.3%。锶景希等<sup>[17]</sup>采用 50、200 和 500 nm 的无机陶瓷膜精制川芎水提液, 其有效成分阿魏酸透过率分别高达 88%、94% 和 96%。王龙德等<sup>[18]</sup>使用聚醚砜微滤膜分离提纯苦楝素, 苦楝素的透过率达到 99.4%, 通量达到 147.2 L/(m<sup>2</sup>·h)。姜淑等<sup>[15-16,19]</sup>用陶瓷膜微滤过程对三七、槐米、黄柏提取液进行了精制处理, 3 种提取液有效成分透过率均大于 70%, 与提取液相比, 陶瓷膜微滤透过液变得澄清透明、有效成分含量高。在后续清洗过程中, 膜清洗方便、通量恢复率高, 可再生使用。罗友华<sup>[22]</sup>使用陶瓷膜微滤技术精制复方咽舒宁水提液, 其有效成分表告依春和哈巴俄昔在微滤液中的透过率分别达到 93.8%和 82.7%, 且与水提液相比, 微滤液对 5 种咽炎致病菌的最低抑菌浓度和最低杀菌浓度无明显差异。

微滤预处理效果好、能耗低、无污染等特点也使其与其他分离技术(如醇沉法)相比有更大的应用前景。金万勤等<sup>[20]</sup>使用无机微滤膜精制枳实水煎液, 并与醇沉法精制效果进行对比。微滤透过液中辛弗林得率为 81.9%, 醇沉上清液辛弗林得率为 80%, 二者相当, 但醇沉法消耗大量有机试剂, 安全性较差。姜淑等<sup>[21]</sup>用陶瓷膜微滤精制小儿健脾平肝水提液, 与醇沉法相比, 微滤液中固形物去除率为 44.6%, 醇沉液中固形物去除率为 45.5%, 固形物去除率相当; 微滤液中芍药苷透过率为 69.5%, 而醇沉液中芍药苷透过率仅为 38.0%, 在有效成分透过率方面微滤法显著优于醇沉法。因此, 相比于其他预处理工艺, 微滤是一种安全、有效、无污染的工艺。

## 2 超滤

超滤核心为超滤膜, 超滤膜截留相对分子质量为  $1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$ , 相比于微滤, 超滤适用范围更广。中药中低分子量有效成分的相对分子质量一般小于 1 000, 称为 NCCL。同时, 中药中还含有大量的高相对分子质量有效成分, 如中药多糖, 其相对分子质量为  $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$ 。因此, 超滤膜广阔的使用范围可实现中药有效成分的分离和纯化。

在中药有效成分分离、纯化方面, 李路军等<sup>[24]</sup>使用不同孔径的超滤膜对山麦冬多糖提取液进行了分离纯化。经分离后的多糖中相对分子质量在  $3 \times 10^4$  以上的质量分数为 50.3%, 在  $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$  的质量分数为 19.6%, 在  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$  的质量分数为 13.8%, 相对分子质量小于 1 000 的低聚糖和单

糖质量分数为 16.3%, 各级多糖干物质质量分数均大于 90%, 表明使用超滤获得高纯度多糖的同时实现了多糖的分级和分离。朱应怀等<sup>[25]</sup>使用陶瓷膜超滤技术对甘草中甘草酸和甘草苷进行了同步提取纯化处理。在最优条件下, 甘草酸和甘草苷的超滤平均透过率分别高达 99.3%和 98.9%。这种方法生产成本低、污染小、效率高, 适用于工业化应用。

中药制剂是中医药行业的重要组成部分, 是走向中药现代化的关键一步。但是, 近年来中药制剂安全成了人们所关注的问题, 中药制剂生产工艺也存在着一些不足, 如分离技术不成熟、制剂疗效不稳定等<sup>[26]</sup>。就分离技术而言, 超滤工艺因其具有常温操作、不使用有机溶剂、无相变等特点, 适用于中药制剂中液体制剂(如注射剂和口服液等)的生产, 同时选择合适的超滤膜可除去中药制剂中热源等大分子物质, 提高中药液体制剂的稳定性和安全性<sup>[27]</sup>。如表 2 所述, 超滤已应用于多种中药液体制剂的生产<sup>[28-39]</sup>, 如脉络宁注射液、热毒宁注射液、舒血宁注射液、苦参素注射液等。

缪菊连等<sup>[28]</sup>优化超滤工艺用于三七总皂苷注射液的分离纯化, 在最优工艺条件下, 人参皂苷 R<sub>g1</sub>、R<sub>b1</sub> 及三七皂苷 R<sub>1</sub> 各组分透过率均超过 90%。杨琴等<sup>[29]</sup>使用响应面法对参麦注射液的超滤工艺进行了优化, 总固体和总皂苷的平均透过率分别达到了 94.0%和 89.2%, 内毒素截留率达到了 95.6%。姜国志等<sup>[30]</sup>采用正交实验法优化了舒血宁注射液的超滤工艺, 研究结果显示药液温度、密度和进出口压差 3 个因素对总黄酮醇苷、银杏内酯 A~C 的透过率、总固体的降低率无显著影响, 而超滤膜孔径对其有显著的影响 ( $P < 0.01$ )。宫凯敏等<sup>[33]</sup>用超滤技术去除苦参素注射液中细菌内毒素, 结果表明经超滤处理后的苦参素注射液细菌内毒素去除率为 96.2%, 有效成分氧化苦参碱的透过率为 96%。支兴蕾等<sup>[34]</sup>使用超滤法去除生脉注射液中细菌内毒素, 结果表明截留相对分子质量为  $1 \times 10^5$  复合超滤膜对各有效成分透过率均大于 99%, 对细菌内毒素去除率达 97.8%。朱明岩等<sup>[37]</sup>使用不同超滤膜组件对热毒宁注射液进行了处理, 结果发现中空纤维膜、板式膜在固含物减少率及提高澄明度方面较卷式膜有优势, 3 种膜组件均适合热毒宁注射液脱炭液的超滤, 其中以板式膜为最佳, 说明使用不同孔径超滤膜及膜组件处理中药注射剂可以提高临床使用安全性。王永香等<sup>[38]</sup>研究了不同截留相对分子质量膜

表 2 超滤在中药制剂中的应用

Table 2 Application of ultrafiltration in traditional Chinese medicine preparation

中药制剂	有效成分	有效成分透过率/%	内毒素截留率/%	文献
三七注射液	总皂苷	>90	—	28
参麦注射液	总皂苷	89.2	95.6	29
舒血宁注射液	总黄酮醇苷	67.0~97.5	—	30
菟杞强肾口服液	淫羊藿苷	93.9~94.1	—	31
香丹注射液	原儿茶醛	99.1	—	32
苦参素注射液	氧化苦参碱	96	96.2	33
生脉注射液	五味子醇甲等	>99	97.8	34
刺五加注射液	—	—	94.4~95.7	35
丹参注射液	丹参素、原儿茶醛	100、90	68.8~99.78	36
热毒宁注射液	栀子苷、绿原酸	65.7~99.8、69.9~95.4	100	37-38
痰热清注射液	黄芩苷、氨基酸、熊去氧胆酸	92.3、96.7、93.8	符合注射用水内毒素标准	39

和膜组件对热毒宁注射液脱碳液的精制效果，研究发现截留相对分子质量为 1 000 的聚砜中空纤维膜对草酸盐和树脂有明显的去除效果，截留相对分子质量为 5 000 的聚砜板式膜能 100% 去除细菌内毒素。薛东升等<sup>[39]</sup>使用超滤工艺制备痰热清注射液，经超滤处理后其指标性成分黄芩苷、氨基酸和熊去氧胆酸的透过率分别达到 92.3%、96.7% 和 93.8%，内毒素去除率达到了注射用水的标准要求。说明超滤可以有效去除中药制剂中的内毒素，保留有效成分，提高中药制剂的用药安全性，推动中药绿色制造。

### 3 纳滤

纳滤膜孔径为 0.5~1.0 nm，推动力压差为 0~4 MPa，分离性能介于反渗透和超滤，允许无机盐、小分子有机物质和溶剂透过膜，从而达到分离浓缩的效果<sup>[40]</sup>。在制药和医疗中，纳滤多用于抗生素、维生素、氨基酸等发酵液的澄清滤过，中成药、保健品口服液的除菌浓缩等<sup>[41]</sup>。同时，纳滤具有筛分效应、溶解-扩散效应和道南效应等<sup>[42-43]</sup>。因此，在中药行业中，纳滤更多的用于具有多种存在形式的酚酸和生物碱浓缩分离，如阿魏酸、京尼平苷酸、苦参碱等。

李存玉等<sup>[44-45]</sup>使用响应面法对川芎水提液和苦参提取液的纳滤分离工艺进行了优化，在最优工艺条件下，川芎指标性成分阿魏酸的截留率达到 93.0%，接近实测值 91.2%；苦参中苦参碱的截留率为 94.4%，总生物碱截留率达到 97.6%。陈晓鹏等<sup>[46]</sup>对比了减压浓缩和纳滤浓缩 2 种工艺对杜仲叶中京尼平苷酸的精制效果，发现在最佳纳滤工艺条件下

(膜截留相对分子质量为 400、跨膜压差为 1.40 MPa、pH 6.80)，京尼平苷酸平均截留率约为 93.7%，而减压浓缩在最优温度 70 °C 下为 86% 左右，在温度高于 80 °C 时透过率低于 75%，成分损失明显。纳滤在常温下运行，可以有效避免热敏性成分的损失，相比于其他浓缩工艺（如蒸发浓缩），纳滤更适用于中药活性成分的浓缩处理。

如上所述，纳滤原理不是简单的“筛分”，是多种效应共同作用的结果，解决纳滤分离机制不清晰这一问题有助于推进纳滤工艺在中药行业中的应用。李存玉等<sup>[47]</sup>研究了枳实中辛弗林存在状态与其纳滤传质过程的相关性。通过测定辛弗林 pKa (8.25~8.84) 分析溶液中辛弗林的存在状态，设计了 3 种不同 pH 溶液 (4.0、8.5、10.0)，然后测定 3 种不同 pH 溶液纳滤过程的膜通量，发现当辛弗林处于完全解离状态时膜通量最低，这是由于以解离态存在的辛弗林因电荷排斥难以接近膜表面从而保持了高截留率，而游离态辛弗林不受电荷排斥影响从而更容易接近膜进而扩散通过膜。表明通过控制 pH 可以调控中药活性成分的存在状态，从而提高纳滤分离浓缩效率。Huang 等<sup>[48]</sup>研究了竞争效应在纳滤膜分离苦参碱和氧化苦参碱中的作用。通过研究发现苦参碱和氧化苦参碱单体溶液截留率相似，当二者处于混合溶液时，苦参碱截留率无明显变化，而氧化苦参碱的截留率却明显增加。因为当二者溶液混合时，苦参碱呈解离态，氧化苦参碱呈游离态，此时纳滤膜表面带负电，解离态苦参碱会优先占据纳滤膜表面膜孔，从而增加氧化苦参碱截留率，表明控制合适的 pH，可以实现结构相似中药活性成分

的分离。

此外,针对适用于中药活性成分分离的纳滤膜开发,Tan等<sup>[49]</sup>成功研发了一种具有超亲水性的新型中性电荷纳滤膜。该纳滤膜对中药中具有药理活性的代表性小分子化合物如小檗碱(生物碱)、栀子苷(糖苷)、辛弗林(生物碱)、阿魏酸(有机酸)等具有不同电荷的有机分子具有良好的分离性能,对相对分子质量<400的分子透过率高于90%,对相对分子质量>800的分子截留率达到90%。同时,在较宽的pH范围和不同的盐溶液中,该纳滤膜能保持稳定的电中性,并且由于超亲水性和中性电荷的协同作用,该纳滤膜也具有优异的防污染性能。该研究为设计具有特定表面性能的亚纳米多孔膜用于分子的分离提供了新思路,这对具有复杂溶液体系的中药提取液的浓缩无疑是巨大的利好。

综上,纳滤在常温下即可达到浓缩的目的、运行过程中无相变、无化学反应,能耗低、操作简便,符合中药绿色制造的要求,尤其适用于中药热敏性有效成分的浓缩处理。同时,大量高性能纳滤膜的问世,将会促进中药有效成分浓缩的发展,加快中药现代化转型的脚步。

#### 4 膜蒸馏

膜蒸馏是膜技术与蒸发相结合的过程,可在较低温度下物质的浓缩分离。膜蒸馏技术在中药行业中一般用于中药有效物质的浓缩、中药废水的循环利用等领域<sup>[50]</sup>。

在中药有效成分的浓缩方面,黄荣荣等<sup>[51]</sup>探讨了真空膜蒸馏技术浓缩枇杷叶提取液的可行性,结果表明浓缩后的提取液中有效成分熊果酸没有损失,且膜通量保持稳定,无明显膜污染。石飞燕等<sup>[52]</sup>使用真空膜蒸馏法对黄芩提取液进行了浓缩处理,通过优化进料温度、真空度等参数,黄芩苷的截留率可达100%。表明膜蒸馏技术可以实现中药提取液有效成分的高效浓缩。

在中药废水循环利用方面,课题组前期使用真空膜蒸馏技术回收中药清洗废水,对进料温度、流量、渗透侧真空度和膜材料进行了参数优化并考察了化学清洗对膜污染的去除效果<sup>[53]</sup>。结果表明,使用真空膜蒸馏法回收中药加工清洗废水是可行的。与进料溶液相比,馏出液化学需氧量降低了99%。通过化学清洗,特别是碱作为清洗剂,能有效去除污垢层,增加膜使用寿命。同时,课题组前期还进行了真空膜蒸馏处理中药姜黄清洗废水工艺研究,

通过优化工艺条件,膜通量最高可达51.35 kg/(m<sup>2</sup>·h),馏出液水质完全符合《中药类制药工业水污染物排放标准(GB/T 21096-2008)》中所规定的排放限值,同时达到《城市污水再生利用工业用水水质(GB/T 19923-2005)》中所规定的再生用水标准<sup>[54]</sup>。表明在中药废水循环利用方面,膜蒸馏技术表现出较大的应用空间,有望成为推动中药现代化的关键技术。

#### 5 集成膜技术

如上文所述,中药组成成分复杂,一味中药通常含有多种有效成分,仅使用一种膜分离技术难以有效实现中药有效成分的分离、纯化和浓缩。郭立玮等<sup>[55]</sup>2016年中国-欧盟医药生物膜科学与技术研讨会中提到,膜分离及其集成技术适应中药药效物质整体、多元的优势,可充分实现中药资源的核心价值,并具有高效、节能和无污染等特点,是体现中药资源的“潜在价值”与“间接价值”的共性关键技术。

目前,集成膜技术形式多样,微滤膜孔径最大,一般作为第1步用于中药提取液预处理来除去细菌、胶体、不溶性颗粒等物质;超滤膜孔径范围广,既可用于微滤液的进一步处理,除去大分子蛋白质、细菌、胶体等物质,也可用于中药有效成分如多糖的分级分离及其他小分子成分的分离和精制;纳滤、膜蒸馏等由于膜孔径较小,一般用于经微滤、超滤后中药提取液的分离和浓缩。在以上膜分离技术中,以微滤、超滤、纳滤互为组合的膜集成技术应用范围最广且最为常用,如微滤-超滤、微滤-纳滤、超滤-纳滤、微滤-超滤-纳滤等,见表3<sup>[56-63]</sup>。

张丽等<sup>[56]</sup>使用微滤-超滤精制淫羊藿水提液,以总黄酮透过率、溶液固溶物去除率为评价指标。结果表明经微滤-超滤技术处理后的淫羊藿水提液中总黄酮透过率可达90%以上。Pi等<sup>[57]</sup>用膜技术清洁化生产麻黄中的麻黄碱,首先用0.45 μm微滤膜预处理,麻黄碱透过率达到97.9%;然后用截留相对分子质量为160的纳滤膜浓缩微滤渗透液中麻黄碱,麻黄碱的截留率达到99.9%。此时纳滤透过液化学需氧量仅为110 mg/L,可回收至萃取工序。与传统工艺相比,水耗降低了59.4%,废水产生量降低了75.8%。宋晓春等<sup>[59]</sup>通过超滤-纳滤证实了膜集成技术用于当归水提液纯化和浓缩的可行性。在最优工艺条件下,阿魏酸超滤透过率>90%、纳滤泄露率仅为1%。韩伟等<sup>[60]</sup>使用超滤-纳滤分离浓缩金

表3 集成膜技术在中药有效成分分离浓缩中的应用

Table 3 Application of integrated membrane technology in separation and concentration of active ingredients of traditional Chinese medicine

集成工艺	膜参数	工艺效果	文献
微滤-超滤	氧化铝无机陶瓷膜: 0.05 $\mu\text{m}$ ; 超滤膜: 800	总黄酮透过率 >90%	56
微滤-纳滤	微滤膜: 0.45 $\mu\text{m}$ ; 纳滤膜: 160	微滤: 麻黄碱透过率 97.9%; 纳滤: 麻黄碱截留率 99.9%	57
超滤-纳滤	聚醚砜超滤膜: $3 \times 10^4$ ; 聚酰胺纳滤膜: 400	甜菊糖苷截留率: 60%	58
超滤-纳滤	陶瓷超滤膜: 50 nm; 纳滤膜: 200	超滤: 阿魏酸透过率 >90%; 纳滤: 阿魏酸截留率 99.9%	59
超滤-纳滤	聚偏氟乙烯超滤膜: 5 000; 聚醚砜纳滤膜: 500	超滤: 黄酮透过率 61.3%; 纳滤: 黄酮截留率 68.3%	60
超滤-纳滤	聚偏氟乙烯超滤膜: $1 \times 10^4$ ; 聚醚砜纳滤膜: 500	超滤: 西贝母碱透过率 98.6%; 纳滤: 西贝母碱截留率 93.6%	61
超滤-纳滤	聚偏氟乙烯超滤膜: $1 \times 10^4$ ; 聚醚砜纳滤膜: 350	超滤: 6-姜辣素透过率 98.6%; 纳滤: 6-姜辣素截留率 95.6%	62
微滤-超滤-纳滤	聚丙烯微滤膜: 0.5 $\mu\text{m}$ ; 聚丙烯腈/聚砜共混超滤膜: 1 000; 芳香族酰胺纳滤膜 NW2040	黄芩苷的总回收率 96%	63

毛狗脊中的黄酮类成分,经超滤分离后,总黄酮透过率为 61.3%;然后经纳滤浓缩后,总黄酮回收率达到 68.3%。并且与大孔吸附树脂法相比,纳滤只需要 90 min 就可以将超滤透过液浓缩 2.19 倍,回收率为 68.3%,而大孔吸附树脂法经 283 min 只能浓缩 1.63 倍,回收率为 61.8%。骆灵敏等<sup>[61]</sup>用超滤-纳滤分离浓缩川贝母生物碱。实验结果表明截留相对分子质量为  $1 \times 10^4$  的超滤膜,允许 98.6% 的西贝母碱的透过率,同时可除去 98.6% 的蛋白质;截留相对分子质量为 500 的纳滤膜可截留 93.6% 的西贝母碱。薛盛剑等<sup>[62]</sup>采用超滤-纳滤浓缩干姜有效成分,在最佳工艺下,其指标性成分 6-姜辣素超滤透过率达到 98.6%,纳滤截留率达 95.6%,总蛋白去除率为 98.9%。袁亮等<sup>[63]</sup>采用多级膜技术(微滤-超滤-纳滤)浓缩黄芩苷提取液,有效成分黄芩苷的总回收率高达 96%。微滤、超滤、纳滤在常温下运行,反应无相变,可实现中药提取液中有效成分的分离、纯化和浓缩,特别适用中药有效成分中某些具有热不稳定性物质的分离、纯化和浓缩,是推动中药产业现代化的关键技术。

随着科技的进步,中医药产业发展迅速,中药废水的排放量也越来越大。中药废水成分复杂、有机物含量高、色度重、气味大等特点也使它成为行业公认的难处理废水之一<sup>[64]</sup>。中药废水处理方式多种多样,膜分离法便是其中之一。Zhong 等<sup>[65]</sup>讨论

了用超滤-膜蒸馏技术实现中药废水资源化利用的可行性。经超滤处理后,废水中咖啡酸、绿原酸、迷迭香酸、甘草酸铵的透过率分别为 87%、76%、67%、99%,有机物去除率达到 64%,并且选择具有抗污染和抗湿性的聚偏氟乙烯膜进行膜蒸馏。此研究表明超滤-膜蒸馏技术能有效分离大分子和生物活性化合物,实现中药废水的资源化利用。

Li 等<sup>[66]</sup>针对上述超滤-膜蒸馏集成技术在中药废水处理中的不足,设计了超滤-正渗透-膜蒸馏集成技术系统进行中药废水资源化利用研究。在超滤和膜蒸馏之间增加正渗透工艺,有效去除超滤透过液中天然表面活性剂甘草酸等,避免了之前超滤-膜蒸馏处理中药废水时出现的膜润湿问题。膜集成技术将微滤、超滤、纳滤等膜技术优点集结为一体,充分发挥各种膜技术的优点,避其不足,对于实现现代中药绿色制药的目标具有重大意义。

## 6 其他膜分离技术

### 6.1 反渗透

反渗透原理是借助半透膜对溶液中溶质的截留作用,以高于溶液渗透压的压差为推动力,使溶剂渗透通过半透膜,溶质不能透过半透膜,从而达到分离浓缩的目的<sup>[67]</sup>。目前,在中药行业中反渗透主要用于药液的浓缩、澄清、制药用水等。

严滨等<sup>[68]</sup>用反渗透技术对鼻炎康等中药提取液进行了浓缩研究。结果表明,反渗透工艺可有效

脱水 60%以上, 中药的主要有效成分保留率达 90%, 膜通量稳定在 14 L/(m<sup>2</sup>·h), 膜清洗后通量可恢复至 80%以上。李光等<sup>[69]</sup>用反渗透技术对五味子保健酒进行了澄清处理, 经过反渗透处理后, 五味子保健酒的澄清度和稳定性得到了大幅度的提高。金唐慧<sup>[70]</sup>考察了反渗透浓缩对四逆汤物料体系理化参数的影响, 并进行了相关性研究。实验结果表明各样品体系的电导、盐度和溶解性固体总量 (total dissolved solids, TDS) 3 种理化参数与渗透压存在显著的相关性, 盐度、电导、TDS 三者之间亦显著线性相关。同时, 四逆汤物料体系经过反渗透浓缩后, 浓缩液中原化学成分组成得到了很好的保留, 证明了反渗透用于中药提取液浓缩的可行性。

## 6.2 电渗析

通过压力驱动膜技术可以成功从中药水提液中分离获得 NCCL, NCCL 由生物碱、有机酸、黄酮等多种活性成分构成, 具有多靶点的作用效果。然而 NCCL 中不同类成分的药理活性、作用机制不同, 如生物碱类和黄酮类化合物是传统中药莲子心中 2 种重要的活性成分, 连心碱类具有抗炎、抗心律失常、抗血栓、调血脂等药理活性<sup>[71-72]</sup>, 而黄酮类化合物则具有对过敏、感染、高血压、肿瘤等疾病的辅助治疗作用<sup>[73-74]</sup>。因此, 中药活性成分的高效、高质量分离对于提高中药临床疗效、减少临床服用剂量具有重大意义。同时, 中药有效成分如生物碱、有机酸等在传统分离纯化过程中, 一般会使用离子交换树脂吸附、洗脱, 这会导致中药洗脱液中含有大量的离子化成分, 难以实现精细分离。

电渗析技术核心为离子交换膜, 电渗析膜堆单元中离子交换膜可根据实际情况选择合适的排列方式, 在直流电场的作用下, 溶液中阳离子通过阳离子交换膜向阴极移动, 阴离子通过阴离子交换膜向阳极移动, 进而实现溶液中荷电物质与荷电物质、荷电物质与非荷电物质的高效筛分、分级分离<sup>[75-76]</sup>。因此, 电渗析技术在中药有效成分的选择性分离及中药树脂洗脱液精细分离方面具有广泛的应用前景。

课题组前期采用电渗析技术, 从含盐洗脱液中同时回收盐和纯化两性离子水苏碱<sup>[77]</sup>。电渗析分离装置淡化室为含盐洗脱液, 含有两性离子水苏碱和高浓度的氯化钠, 通过调节 pH, 水苏碱以游离态形式存在, 此时淡化室中钠离子和氯离子会在电场作用下通过阳离子交换膜和阴离子交换膜迁移至浓缩室, 同时实现回收盐和纯化两性离子水苏碱的目的。

经电渗析工艺处理后, 副产物氯化钠溶液的浓度高达 2.9 mol/L, 可以直接回收利用; 氯化钠的回收率可达 99.8%, 质量分数可达 99.6%; 水苏碱的回收率和质量分数分别可达 95.6%和 99.3%, 且能耗仅为 8.34 kWh/m<sup>3</sup>。此外, 课题组还设计了多种电渗析装置用于中药有效成分的分离纯化, 分别为一种电渗析用于益母草总碱洗脱液脱盐的方法, 益母草总碱溶液的脱盐率达到了 99%以上<sup>[78]</sup>; 一种电渗析去除芦笋皂苷提取液中重金属离子的方法, 重金属离子的去除率达 99%以上<sup>[79]</sup>; 一种超滤膜辅助电渗析装置用于苦参生物碱的分离纯化的方法, 苦参生物碱中氧化苦参碱回收率达到了 97.0%, 氧化苦参碱质量分数达到 98.7%<sup>[80]</sup>。

综上, 电渗析工艺以外加电场为推动力, 利用离子交换膜对荷电物质的选择性筛分功能, 可实现中药提取液中荷电物质与荷电物质、荷电物质与非荷电物质的高效筛分、分级分离。基于该技术高效率、低能耗、高选择性分离等优势, 电渗析将在中药有效成分 (特别是生物碱、有机酸等荷电有机物质) 分离中将体现出较大的潜力, 并有望实现规模化应用。

## 7 膜分离技术在中药绿色制造中的展望

膜分离作为一种新兴跨学科的高新技术, 已成为当今世界最重要的分离手段之一。中药有效成分多数为小分子有机化合物, 对温度、pH 等外界因素较为敏感, 膜分离技术具有的常温操作、低能耗、无相变分离和相变分离等特性, 既不改变中药有效成分的理化性质, 也切实符合中药绿色制造的要求。

目前, 膜分离技术在中药有效成分的分离、中药制剂的除杂和中药废水的资源化利用等已经取得了一定规模的应用, 并且取得了一定的成效。然而, 由于中药溶液体系的复杂性, 膜污染成为了制约中药绿色制造的一大挑战, 使当前应用最多的膜分离技术还是以无机陶瓷膜为主的微滤技术, 如云南白药集团股份有限公司推出的“宫血宁胶囊”就采用陶瓷膜微滤技术生产, 并成功入选了《中国药典》2020 年版<sup>[81]</sup>。相比与有机高分子膜, 无机陶瓷膜以二氧化锆或三氧化二铝等无机材料为基质, 具有耐高温、机械强度高、化学稳定性好和使用寿命长等优点, 适合体系复杂中药提取液的分离, 其中三氧化二铝膜约占膜应用总量的 22%<sup>[9]</sup>。其他膜分离技术还需结合中药产业的特点继续发展, 如有研究表明中药某些活性成分如生物碱对不同材质的超滤膜

具有较强的选择性,截留相对分子质量为  $1 \times 10^4$  的醋酸纤维素超滤膜对辛弗林的透过率可达 99.0%,而截留相对分子质量同样为  $1 \times 10^4$  的聚苯乙烯超滤膜对辛弗林的透过率只有 33.3%<sup>[82]</sup>。因此,使用超滤分离中药活性成分时,应根据待分离成分的特性选择合适的超滤膜。而纳滤膜具有溶解-扩散和道南效应等多种效应,适合中药小分子有机物的分离和浓缩;电渗析在直流电场作用下运行,可用于荷电物质与荷电物质、荷电物质与非荷电物质的分离,而传统离子交换膜孔径较小,中药有效成分难以通过离子交换膜迁移,故可将孔径较大的超滤或纳滤膜组装至电渗析装置中,从而实现荷电中药有效成分(如有机酸、生物碱)的纯化和浓缩。

此外,中药溶液体系的复杂性导致人们对中药作用机制不清晰、对各种有效成分间的关系不够明确。因此,要推动膜分离技术实现中药绿色制造,还需从以下几方面入手:(1)膜污染的防治、面向中药绿色制造的膜材料开发等;(2)膜分离处理后中药物质基础的研究,包括化学成分的组成、不同化学成分的药理药效是否改变等;(3)先进膜设备及膜工艺的研发,实现中药药效物质的定向精准分离,通过明确不同药效物质的作用机制,对中药有效成分进行协同配伍,以期实现改良型新药的开发。综上,在膜污染的防治、膜材料开发、先进膜设备和膜工艺研发、中药物质基础研究等方面亟需中药和膜分离等领域的学者做出更多的努力,为中药绿色制造奠定科学和技术基础,促进中药行业绿色、高质量发展。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 姜忠义,吴洪.超滤膜分离技术在中药制剂生产中的应用[J].化学工业与工程,2003,20(1):39-44.
- [2] 周俊.中药复方:天然组合化学库与多靶作用机理[J].中国中西医结合杂志,1998,18(2):67.
- [3] 郭立玮,党建兵,陈顺权,等.关于构建中药绿色制造理论与技术体系的思考和实践[J].中草药,2019,50(8):1745-1758.
- [4] 姜忠义,吴洪.超滤技术在现代中药生产中的应用[J].化工进展,2002,21(2):122-126.
- [5] 朱蕾.我国中药产业国际化发展的挑战、机遇及推进策略[J].对外经贸实务,2020(11):57-60.
- [6] 孙嘉麟.日本汉方制剂专利技术[J].中成药研究,1982,4(8):44-45.
- [7] 薛姣,李黎,齐洁.日本企业围绕小柴胡复方的专利布局研究[J].广东化工,2017,44(16):162-163.
- [8] 邓麦村,金万勤.膜技术手册[M].第2版.北京:化学工业出版社,2020:12-19.
- [9] 郭立玮,朱华旭.基于膜过程的中药制药分离技术:基础与应用[M].北京:科学出版社,2019:26-29.
- [10] 郭立玮,王永香,钟文蔚,等.基于膜科技创新中药制药分离工程原理的“低碳流程再造”[J].中草药,2023,54(13):4385-4394.
- [11] 朱华旭,唐志书,潘林梅,等.面向中药产业新型分离过程的特种膜材料与装备设计、集成及应用[J].中草药,2019,50(8):1776-1784.
- [12] Viegas R M C, Mesquita E, Campinas M, et al. Pilot studies and cost analysis of hybrid powdered activated carbon/ceramic microfiltration for controlling pharmaceutical compounds and organic matter in water reclamation[J].Water,2019,12(1):33.
- [13] Fischer K, Grimm M, Meyers J, et al. Photoactive microfiltration membranes via directed synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the polymer surface for removal of drugs from water[J].J Membr Sci,2015,478:49-57.
- [14] 李国龙,唐志书,宋忠兴,等.无机陶瓷膜微滤精制山茱萸水提液的实验研究[J].西北药学杂志,2015,30(3):224-227.
- [15] 姜淑.陶瓷膜微滤澄清三七提取液的研究[J].中成药,2008,30(5):664-666.
- [16] 姜淑,马银海,古昆.无机陶瓷膜精制槐米提取液的研究[J].中成药,2005,27(6):643-645.
- [17] 锶景希,彭中芳,刘声波.无机陶瓷膜精制川芎水提液的实验研究[J].中药新药与临床药理,2010,21(1):80-82.
- [18] 王龙德,崔鹏,路绪旺,等.微滤膜分离提纯苦楝素的研究[J].天然产物研究与开发,2011,23(4):742-746.
- [19] 姜淑.陶瓷膜微滤法精制黄柏提取液的研究[J].中成药,2009,31(5):787-789.
- [20] 金万勤,郭立玮,文红梅,等.无机微滤膜澄清枳实水煎液的工艺研究[J].南京中医药大学学报:自然科学版,2000,16(6):347-348.
- [21] 姜淑,马银海,古昆.陶瓷膜微滤法澄清小儿健脾平肝水提液的研究[J].中成药,2006,28(6):796-798.
- [22] 罗友华.咽舒宁颗粒剂制备工艺及质量标准研究[D].沈阳:沈阳药科大学,2009.
- [23] 王永刚,谭穗懿,苏薇薇.田基黄水提液的陶瓷膜微滤工艺研究[J].南方医科大学学报,2008,28(10):1888-1890.
- [24] 李路军,喻世涛,李宇,等.超滤膜分离纯化山麦冬多糖的研究[J].湖北大学学报:自然科学版,2006,28(3):299-301.
- [25] 朱应怀,刘晓霞,王继龙,等.基于陶瓷膜超滤技术的



- 甘草酸和甘草苷同步提取纯化工艺研究 [J]. 中草药, 2016, 47(23): 4173-4178.
- [26] 张丁倩. 中药制剂生产工艺存在的问题与对策分析 [J]. 当代化工研究, 2023(18): 152-154.
- [27] 瞿其扬, 李存玉, 郑云枫, 等. 不同溶液体系中甘草酸的超滤分离规律研究 [J]. 中成药, 2015, 37(12): 2775-2778.
- [28] 缪菊连, 黄照昌. 三七总皂苷注射液的超滤工艺考察 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(2): 35-37.
- [29] 杨琴, 辛翠娟, 汲同伟, 等. 响应曲面法优化参麦注射液超滤工艺研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2016, 30(4): 51-54.
- [30] 姜国志, 丁艳谱, 赵玉欣, 等. 舒血宁注射液超滤工艺的优化研究 [J]. 中医药学报, 2017, 45(2): 89-93.
- [31] 陶松, 刘玲, 魏筱华, 等. 多指标正交试验优选菟杞强肾口服液超滤工艺研究 [J]. 海峡药学, 2020, 32(8): 4-8.
- [32] 王正宽, 曹光环, 曹苗苗, 等. 香丹注射液超滤工艺的优化研究 [J]. 中草药, 2013, 44(21): 2988-2991.
- [33] 宫凯敏, 李红阳, 尹楠, 等. 超滤技术去除苦参素注射液的细菌内毒素 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2010, 12(2): 18-19.
- [34] 支兴蕾, 李存玉, 陈颖, 等. 超滤法去除生脉注射液中细菌内毒素的应用分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(23): 21-24.
- [35] 范能全, 陈光春, 彭兰. 超滤技术去除刺五加注射液中细菌内毒素 [J]. 中国药师, 2010, 13(3): 446-447.
- [36] 周奇, 纪亚楠, 刘将. 超滤在丹参注射液生产中除热原的应用考察 [J]. 机电信息, 2014(20): 45-48.
- [37] 朱明岩, 凌娅, 范庆龙, 等. 不同超滤膜组件处理热毒宁注射液脱炭液的效果比较 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(11): 20-23.
- [38] 王永香, 张卫平, 张庆芬, 等. 聚砜超滤膜对热毒宁注射液脱炭液的纯化工艺研究 [J]. 中草药, 2013, 44(14): 1905-1910.
- [39] 薛东升, 张小利, 王国明, 等. 超滤在痰热清注射液制备中的应用研究 [J]. 中成药, 2012, 34(8): 1479-1483.
- [40] Salehi F. Current and future applications for nanofiltration technology in the food processing [J]. *Food Bioprod Process*, 2014, 92(2): 161-177.
- [41] 丁礼琴, 刘力, 徐德生. 纳滤在制药及食品中的应用进展 [J]. 中成药, 2008, 30(8): 1199-1202.
- [42] Nicolini J V, Borges C P, Ferraz H C. Selective rejection of ions and correlation with surface properties of nanofiltration membranes [J]. *Sep Purif Technol*, 2016, 171: 238-247.
- [43] Zhu Y J, Zhu H C, Li G M, *et al.* The effect of dielectric exclusion on the rejection performance of inhomogeneously charged polyamide nanofiltration membranes [J]. *J Nanopart Res*, 2019, 21(10): 217.
- [44] 李存玉, 马赟, 刘奕洲, 等. Box-Behnken 响应面法优化川芎水提液纳滤工艺 [J]. 中成药, 2017, 39(2): 296-300.
- [45] 李存玉, 马赟, 龚柔佳, 等. 响应面分析法耦合调节 Donnan 效应优化苦参提取液的纳滤浓缩工艺 [J]. 中草药, 2016, 47(19): 3395-3400.
- [46] 陈骁鹏, 吴芸, 叶慧. 杜仲中京尼平甘酸的精制工艺对比 [J]. 中国现代中药, 2020, 22(12): 2080-2084.
- [47] 李存玉, 马赟, 刘莉成, 等. 中药枳实中辛弗林存在状态与其纳滤传质过程的相关性 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(23): 4598-4603.
- [48] Huang M C, Han Q Y, Chen Y X, *et al.* Role of competitive effect in the separation mechanism of matrine and oxymatrine using commercial NF membranes [J]. *Sep Purif Technol*, 2023, 323: 124384.
- [49] Tan L, Gong L, Wang S Y, *et al.* Superhydrophilic sub-1-nm porous membrane with electroneutral surface for nonselective transport of small organic molecules [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(34): 38778-38787.
- [50] 潘林梅, 石飞燕, 郭立玮. 基于膜蒸馏的中药水提液浓缩技术应用前景及问题探讨 [J]. 南京中医药大学学报, 2014, 30(1): 97-100.
- [51] 黄荣荣, 贾琰, 周全生, 等. 真空膜蒸馏浓缩枇杷叶提取液的可行性研究 [J]. 江苏工业学院学报, 2007, 19(4): 25-28.
- [52] 石飞燕, 李博, 潘林梅, 等. 真空膜蒸馏法浓缩黄芩提取液的工艺研究 [J]. 中成药, 2015, 37(1): 95-99.
- [53] Zhang Y S, Ji Z, Yan H Y, *et al.* Water recovery from cleaning wastewater of traditional Chinese medicine processing via vacuum membrane distillation: Parameters optimization and membrane fouling investigation [J]. *Chem Eng Res Des*, 2022, 188: 555-563.
- [54] 张岩松, 赵艳, 纪政, 等. 真空膜蒸馏处理中药姜黄清洗废水工艺研究 [J]. 膜科学与技术, 2023, 43(1): 133-138.
- [55] 郭立玮, 唐志书, 朱华旭, 等. 膜分离及其集成技术对中药资源产业化过程的战略作用与核心价值 [A] // 2016 年中国-欧盟医药生物膜科学与技术研讨会论文集 [C]. 威海: 中国蓝星(集团)总公司膜科学与技术编辑部, 2016: 16-27.
- [56] 张丽, 王艳, 常青, 等. 微滤-超滤联用精制淫羊藿水提液的初步研究 [J]. 临床医学研究与实践, 2018, 3(22): 145-146.
- [57] Pi K W, Li Z, Wan D J, *et al.* Cleaner production of ephedrine from *Ephedra sinica* Stapf by membrane separation technology [J]. *Chem Eng Res Des*, 2011, 89(12): 2598-2605.

- [58] Chhaya, Mondal S, Majumdar G C, *et al.* Clarifications of stevia extract using cross flow ultrafiltration and concentration by nanofiltration [J]. *Sep Purif Technol*, 2012, 89: 125-134.
- [59] 宋晓春, 王继龙, 魏舒畅, 等. 超滤-纳滤集成技术纯化、浓缩当归水提取液的工艺考察 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(3): 13-15.
- [60] 韩伟, 蒋一帅, 魏雨恬. 超滤-纳滤技术在金毛狗脊黄酮分离纯化中的应用 [J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2015, 37(1): 1-7.
- [61] 骆灵敏, 郑敏霞. 超滤-纳滤联合用于川贝母生物碱的浓缩工艺 [J]. 实用药物与临床, 2019, 22(1): 60-64.
- [62] 薛盛剑, 郑敏霞. 超滤-纳滤联用于干姜中指标性成分 6-姜辣素的浓缩 [J]. 中国药师, 2019, 22(9): 1613-1617.
- [63] 袁亮, 周显宏, 肖凯军, 等. 多级膜浓缩黄芩苷提取液的研究 [J]. 现代食品科技, 2008, 24(3): 237-240.
- [64] 殷勤, 年跃刚, 周岳溪, 等. 中药制药行业水资源再利用途径及可行性分析 [J]. 工业水处理, 2018, 38(11): 6-9.
- [65] Zhong W W, Zhao Y N, Chen S Q, *et al.* Resources recycle of traditional Chinese medicine (TCM) wastewater 1: Effectiveness of the UF-MD hybrid system and MD process optimization [J]. *Desalination*, 2021, 504: 114953.
- [66] Li G H, Li S. Resources recycle of traditional Chinese medicine (TCM) wastewater 2: The UF-FO-MD hybrid system and wetting prevention [J]. *Desalination*, 2022, 540: 115968.
- [67] Shenvi S S, Isloor A M, Ismail A F. A review on RO membrane technology: Developments and challenges [J]. *Desalination*, 2015, 368: 10-26.
- [68] 严滨, 林丽华, 叶茜, 等. 反渗透技术在鼻炎康等中药提取液浓缩中的应用 [J]. 膜科学与技术, 2012, 32(4): 70-74.
- [69] 李光, 常江, 王莹, 等. 反渗透技术在五味子保健酒澄清方面的研究 [J]. 粮油加工: 电子版, 2014(9): 75-77.
- [70] 金唐慧. 反渗透浓缩对中药物料体系渗透压等理化参数的影响及其膜动力学研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2015.
- [71] 赵秀玲, 党亚丽. 莲子心化学成分及其提取、药理作用的研究进展 [J]. 食品科学, 2018, 39(23): 329-336.
- [72] Jun M Y, Karki R, Paudel K R, *et al.* Liensinine prevents vascular inflammation by attenuating inflammatory mediators and modulating VSMC function [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(1): 386.
- [73] 蔡定建, 柳茶花, 钟鸿鸣, 等. 莲子心中黄酮类物质的提取和测定 [J]. 中国酿造, 2010, 29(1): 132-135.
- [74] Chen G L, Fan M X, Wu J L, *et al.* Antioxidant and anti-inflammatory properties of flavonoids from lotus plumule [J]. *Food Chem*, 2019, 277: 706-712.
- [75] Xu T W, Huang C H. Electrodialysis-based separation technologies: A critical review [J]. *AIChE J*, 2008, 54(12): 3147-3159.
- [76] Yan H Y, Wu C M, Wu Y H. Separation of alumina alkaline solution by electrodialysis: Membrane stack configuration optimization and repeated batch experiments [J]. *Sep Purif Technol*, 2015, 139: 78-87.
- [77] Liu W L, He J F, Yan J Y, *et al.* Simultaneous salt recovery and zwitterionic stachydrine purification from saline eluent via two-stage electrodialysis system [J]. *Sep Purif Technol*, 2023, 310: 123142.
- [78] 汪耀明, 颜海洋, 王晓林, 等. 一种益母草总碱洗脱液脱盐的方法: 中国, CN 109180534 B [P]. 2021-04-23.
- [79] 汪耀明, 李为, 吴亮, 等. 一种去除芦笋皂苷提取液中重金属离子的方法: 中国, CN 105617867 B [P]. 2018-04-20.
- [80] 颜海洋, 董治国, 郝建蓉, 等. 从氧化苦参碱洗脱液中分离纯化氧化苦参碱的方法及装置: 中国, CN 117000051 A [P]. 2023-11-07.
- [81] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 1405.
- [82] 彭国平, 郭立玮, 徐丽华, 等. 超滤技术应用对中药成分的影响 [J]. 南京中医药大学学报: 自然科学版, 2002, 18(6): 339-341.

[责任编辑 赵慧亮]