

· 专题 ·

基于资源循环经济的中药脉络宁注射液废弃物资源化循环利用中的共性关键问题[△]

朱华旭^{1,2}, 唐志书³, 段金廛^{1*}, 邢卫红^{4*}, 郭立玮^{1,2}, 杨积衡⁵, 何成华¹,
李博^{1,2}, 潘永兰^{1,2}, 张启春^{1,2}, 徐雪松¹, 郭东艳³, 刘双双¹, 肖秋萍¹

(1. 南京中医药大学 江苏省中药资源产业化过程协同创新中心, 江苏 南京 210023;

2. 南京中医药大学 江苏省植物药深加工工程研究中心, 江苏 南京 210023;

3. 陕西中医药大学 陕西省中药资源产业化协同创新中心, 陕西 咸阳 712046;

4. 南京工业大学, 江苏 南京 211800;

5. 江苏久吾高科技股份有限公司 无机膜国家地方联合工程研究中心, 江苏 南京 211808)

[摘要] 中药废弃物为组成与性质十分复杂的物料体系,“分离”过程的科学、有效是其再利用研究的技术关键。膜科学技术以先进分离材料为载体,特别适合现代工业对节能、低品位原材料再利用和消除环境污染的需要。同时,膜分离技术具有的节约、清洁、安全等优势,符合循环经济的发展思路,当然也是中药废弃物资源化过程的重要选择之一。本文通过分析膜分离及其集成技术应用于中药产业的基本特征,提出特种分离膜的研制是该技术应用用于中药资源循环经济所亟待解决的共性关键问题;通过本课题组在中药脉络宁注射液废弃物资源化过程中的实践应用,为中药特种分离膜的研制提供实验依据。

[关键词] 膜科学技术;废弃物资源化;筛分机理;溶解-扩散机理;脉络宁注射液

Common Keyissues of Resource Recycling on TCM Waste of Mai-luo-ning Injection According to Recycling Economy

ZHU Huaxu^{1,2}, TANG Zhishu³, DUAN Jin'ao^{1*}, XING Weihong^{4*}, GUO Liwei^{1,2}, YANG Jiheng⁵, HE Chenghua¹,
LI Bo^{1,2}, PAN Yonglan^{1,2}, ZHANG Qichun^{1,2}, XU Xuesong¹, GUO Dongyan³, LIU Shuangshuang¹, XIAO Qiuping¹

(1. Nanjing University of Chinese Medicine Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization of Jiangsu Province, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China;

2. Plant Medicine Research and Development Center, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China;

3. Shaanxi University of Chinese Medicine Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization of Shanxi Province, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China;

4. Nanjing Technology University, Nanjing 211800, China;

5. Inorganic membrane Engineering Research Center built by state and local combined, Jiangsu Jiuyu high-tech Limited by Share Ltd, Nanjing 210023, China)

[Abstract] Traditional Chinese medicine waste is a complex material system. The scientific and effective separation process is the key technology in the field of resource recycling. With advanced separation materials as the carrier, membrane science and technology is especially suitable for modern industry to meet the needs of energy saving, low-grade raw material reuse and environmental pollution elimination. Furthermore, because membrane separation technology has the advantages of saving, clean and safe, it is especially suitable for the development of circular economy ideas. Therefore, membrane science and technology is one of the most important choice is of course of Chinese medicine recycling. In our present study, the basic ap-

[△] **[基金项目]** 中国工程院咨询研究项目(2017-XZ-08);国家自然科学基金面上项目(81673610, 81773919);江苏省科技厅重点研发计划—社会发展面上项目(BE2016754);江苏省六大人才高峰项目(2014-YY-014);江苏省中药资源产业化过程协同创新中心重点项目(ZDXM-6, ZDXM-8);江苏高校优势学科建设工程资助项目

^{*} **[通信作者]** 段金廛, 教授, 博士生导师, 中国自然资源学会中药及天然药物资源研究专业委员会主任委员, 中国中药协会中药资源循环利用专业委员会主任委员, 研究方向: 中药资源化学与资源循环利用, E-mail: duanja@163.com; 邢卫红, 教授, 博士生导师, 国家特种分离膜工程技术研究中心主任, 研究方向: 膜材料及其应用开发, E-mail: xingwh@njtech.edu.cn

plied characteristics of membrane separation and integration technology was summarized and investigated according to the application in the traditional Chinese medicine industry. The development of special separation membrane was put forward as the key-issues and this would be a common key problem of membrane separation and its application in traditional Chinese medicine of circular economy. In accordance with the practice of Mai-luo-ning injection in waste recycling, this study would provide experimental basis for the development of special separation membrane.

[**Keywords**] Membrane science and technology; waste resources; screening mechanism; dissolution-diffusion mechanism; Mai-luo-ning injection

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.2017.12.003

膜科学技术以先进分离材料为载体,是当今分离科学中最重要的新型分离技术之一,因其节约能源和环境友好的特征而成为解决全球能源、环境、水资源等重大问题的共性支撑技术^[1]。中药废弃物为组成与性质十分复杂的物料体系,“分离”过程的科学、有效是其再利用研究的技术关键。膜分离技术所具有的节约、清洁、安全等优势,特别适合现代工业对节能、低品位原材料再利用和消除环境污染的需要,符合循环经济的发展思路,当然也是中药废弃物资源化过程的重要选择之一^[2-3]。

膜技术适用于均相液体混合物的分离,兼有浓缩、纯化和精制的功能,又具有高效、节能、环保、分子级过滤及过滤过程简单、易于控制等特征,已成功应用于食品、医药、生物、环保、化工、冶金、能源、石油、水处理、电子、仿生等领域,并产生了巨大的经济效益和社会效益。近年来,膜分离技术与反应过程进行集成^[3-4],如膜生物反应器,是将膜分离与酶促反应技术进行集成,在制药工业废水回收中得到广泛应用。然而,膜分离及其集成技术应用于中药这一新的物料体系时,由于缺乏膜材料、性能(应用)与制备(生产)三者之间的相关基础数据,尚未形成传质、传热等在化学工程应用中进行参数优化与设计的计算模型,所用设备大多简单套用已成熟应用于化学工程的现有设备,因此,该技术应用于中药产业的技术优势尚不明显,在中药资源产业链中的经济效益和社会效益还远未显现^[5-7]。

本论文通过分析膜分离及其集成技术应用于中药产业的基本特征,提出特种分离膜的研制是该技术应用于中药循环经济所亟待解决的共性关键问题;通过总结本课题组在中药脉络宁注射液废弃物资源化过程中的实践应用,为中药特种分离膜的研制提供实验依据。

1 膜分离及其集成技术应用于中药产业的基本特征

膜分离现象广泛存在于自然界中,特别是生物

体内,但人类对它的认识和研究却经过了漫长而曲折的道路。1748 年,耐尔特(A. Nelkt)发现酒精中的水自发地透过猪膀胱的半渗透现象;1861 年,施密特(A. Schmidt)首先提出了超过滤的概念。1960 年,洛布(Loeb)和索里拉金(Sourirajan)研制出第一张高通量和高脱盐率的醋酸纤维素反渗透膜,膜分离技术自此进入了装置研制阶段;1967 年, DuPont 公司研制成功了以尼龙-66 为主要组分的中空纤维反渗透膜组件;上述 20 世纪 60 年代的两项突破标志着膜技术真正实现了工业化。目前已经成熟和不断研发出来的微滤(MF)、超滤(UF)、反渗透(RO)、纳滤(NF)、电渗析(ED)、气体分离(GS)、渗透汽化(PV)、无机膜等技术逐渐实现设备与工艺过程优化,并随着信息技术的应用和计算流体力学的发展,逐渐倾向于利用与工程有关的复杂流动进行模拟,进而实现高选择性与高渗透性相统一的高效分离^[8-9]。

千百年来,以水煎服为主的中药汤剂等用药剂型,显示了自中药水提液中获取药效物质最能体现中医临床治疗的安全性与有效性。迄今为止,国内绝大多数中药厂家仍以水煎煮为中成药生产的基本提取工艺。因此,中药水提液是创新药物研究的重要载体,通过中药水提液的精准分离获取小剂量有效部位是创制新型给药系统和新型制剂的关键环节。陶瓷膜作为膜家族的重要成员,经过多年的发展,在过程工业中获得了成功应用,成为膜领域发展最为迅速、也是最有发展前景的品种之一^[10]。陶瓷膜因其构成基质为 Al_2O_3 、 ZrO_2 等无机材料及其特殊的结构特征,具有高的机械强度和化学稳定性,在高温、腐蚀性、强极性溶剂等环境体系中具有明显的技术优势,尤其适合于中药水提液的精制,在我国中药行业具有普遍的适用性^[11]。

然而,现有的建立在既有化工工程分离技术基础上的陶瓷膜分离技术,在推广应用过程中如何确

保分离过程的性能稳定已经成为制约该技术产业化推广的核心关键问题,而影响其性能稳定的主要因素有^[6-12]:一是由于水作为提取溶媒对于中药(含复方)中多种大分子无效物质具有较大溶解度,水提液即膜分离前体物料中含有较大量需分离去除的大分子物质及微细粒子,又由于上述两类物质无法准确定性、定量检测,导致分离过程中膜污染难以预测,膜通量的变化尚无可以进行模拟和计算的数学模型,从而使得分离过程难以稳定进行;二是由于中药体系的多样性和待分离获得组分的不确定性,长期以来对于分离过程的工艺设计主要采用经验方式估算或用部分可标识的药效成分的转移率高低来判断,导致工艺技术选择、设计与优化的“失真”甚至失败,使得分离过程难以稳定进行。膜分离的性能主要包括分离、透过性能和物理、化学性能两个方面。衡量膜材料有无实用价值,主要从分离性、透过性、物理/化学稳定性和经济性四个基本方面考虑^[6,9]。由此可见,上述两个影响因素已经成为陶瓷膜分离及其集成技术在中药行业推广应用的瓶颈问题,使得该技术多年来仍然停留在以微滤为主的对中药(含复方)水提液的澄清除杂,远未发挥其独特的技术优势。

随着膜分离技术在化学工业不同领域的不断成熟和扩展,该技术从微滤、超滤、纳滤、反渗透、电渗析、膜电解(ME)、扩散渗析(DD)等第一代膜分离过程逐渐向气体分离、蒸气渗透(VP)、全蒸发(PV)、膜蒸馏(MD)、膜接触器(MC)等第二代、第三代膜分离过程过渡。膜材料的研制也从最早的纤维素及其衍生物拓展到各种高性能纤维素及高分子有机聚合物膜材料,并出现了新型的陶瓷、多孔玻璃、氧化铝等无机膜材料和有机无机膜材料^[13]。21世纪70年代起,超滤、纳滤等技术逐步应用于中药生产的不同工艺过程,如将超滤技术应用于中药注射剂热源去除、中药挥发油的截留富集等^[7],将纳滤技术用于中药乙醇提取液($12\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)及水提液($24\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)的浓缩等^[14];特别是在中药有效部位的纯化过程中,超滤、纳滤等技术通过截留大分子无效物质而发挥了其可实现中药药效物质“集群筛选”的独特优势^[4]。然而,由于中药物料体系的多样性,膜材料、性能(应用)与制备(生产)三者之间的相关基础数据尚未建立,膜分离及其集成技术的高效拆分、超滤分离、膜蒸馏、催化反应等高性能分离的应用还鲜见报道。

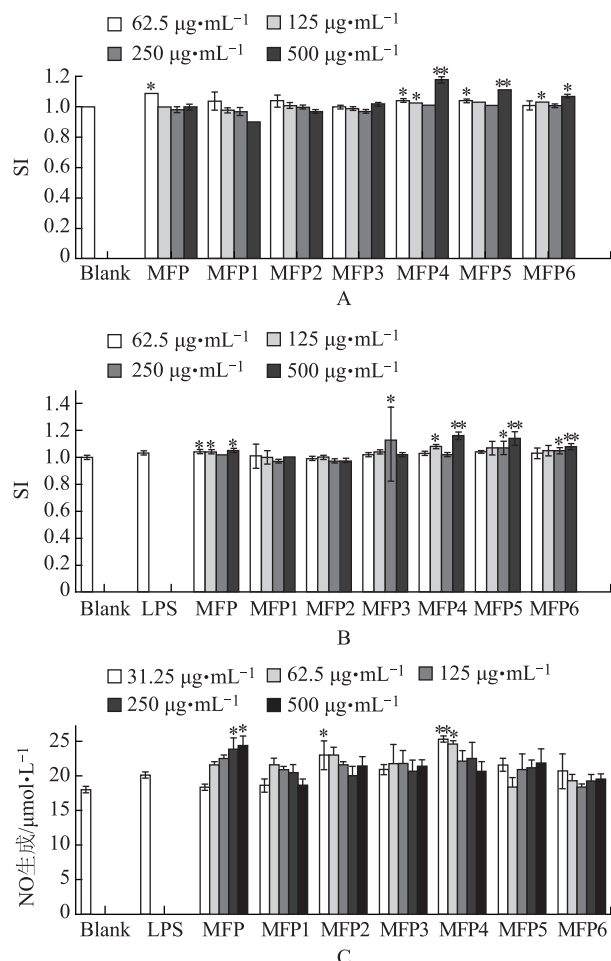
2 膜分离及其集成技术用于脉络宁注射剂废弃物资源化循环利用的应用实践

中药脉络宁注射液由牛膝、玄参、石斛、银花4味中药组成,采用水煎煮提取药效物质,经乙醇沉淀、乙酸乙酯萃取等精制方法去除大量无效成分,再经浓缩后制得。该生产过程产生的废弃物主要有:水提取后四味药的混合药渣、乙醇沉淀物、乙酸乙酯萃取后剩余物,及制药过程产生的大量废水。本项目在前期研究中已发现,混合药渣富含上述4味投料中药中的药效成分,如石斛因质地坚硬,水提取后剩余石斛碱、多糖等有效物质;混合药渣可用作饲料、菌类培养基、生物质能源、造纸原料等使用;废水中残留水溶性药效成分,如不进行资源化利用,不仅造成浪费,作为废水排放还会造成二次污染。

如何采用膜分离及其集成技术对上述生产过程废弃物进行资源化利用是本课题组研究的重点。在研究中本课题组首次采用不同孔径超滤膜将废弃乙醇沉淀物分离为6个粗多糖部位,分子量分别为 $<3\text{ kDa}$, $3\sim10\text{ kDa}$, $10\sim30\text{ kDa}$, $30\sim100\text{ kDa}$, $100\sim300\text{ kDa}$, $>300\text{ kDa}$ (命名为MFP1, MFP2, MFP3, MFP4, MFP5, MFP6);利用苯酚-硫酸比色法和BCA法检测了MFP1~MFP6中多糖和蛋白质含量,结果见表1;通过小鼠脾淋巴细胞增殖、转化和小鼠单核巨噬细胞RAW264.7释放NO实验对MFP1~MFP6进行免疫活性筛选,结果见图1;研究结果确定了MFP4部位(分子量 $30\sim100\text{ kDa}$)免疫活性最强。该实验研究表明^[15],超滤膜技术可用于脉络宁注射液废弃物中多糖资源化利用;该工艺过程简便易行,成本低廉,在循环经济利用中具有独特优势。

表1 中药脉络宁注射液生产中的废弃乙醇沉淀物
各分离部位的成分对比研究结果

部 位	多糖得率(%)	多糖含量(%)	蛋白质含量(%)
MFP1	2.14	54.39	5.12
MFP2	6.74	71.08	13.62
MFP3	14.06	74.81	19.92
MFP4	10.81	76.80	13.25
MFP5	14.73	73.23	20.20
MFP6	6.74	52.55	14.96



注: A. 不同浓度 MFP1 ~ MFP6 对小鼠脾淋巴细胞增殖的影响; B. 不同浓度 MFP1 ~ MFP6 对小鼠脾脏细胞转化的影响; C. 不同浓度 MFP 各区段对小鼠单核巨噬细胞 RAW264.7 释放 NO 能力的影响。

图 1 不同浓度 MFP 各区段活性筛选结果

在成功自乙醇沉淀废弃物中获得多糖类药效组分的研究中我们亦发现, 药材作为中药工业原料, 经水提、醇提等工艺环节, 进入口服制剂或标准提取物等阶段, 药材原料的利用率平均低于 30%, 约 70% 的剩余物被作为废物排放或简单转化为低附加值产品利用。例如中药注射剂, 其资源性化学物质的量仅占药材原料量的 1% ~ 10%。对于中药循环经济而言, 以中药药效物质回收利用为目标的中药废弃物资源化循环利用过程, 其分离原料液中待分离获取的有效组分浓度低、组成复杂, 对于回收率要求高, 因此常规的应用于化工工程中的单一分离方法往往难以满足这类分离任务的要求, 必须利用各种分离技术进行有效组合, 以达到提高产品选择性和收率、实现过程优化的目的^[7,16]。基于上述研究和分析, 本课题组完善了采用膜分离及其集成技术

进行中药脉络宁注射液废弃物资源化利用的技术路线, 见图 2, 并已从废水中获得甾酮等小分子化合物, 自半固体废弃物中分离得到具有免疫活性的多糖有效部位, 将固体药渣用于灵芝培养基制备等^[17-19]。

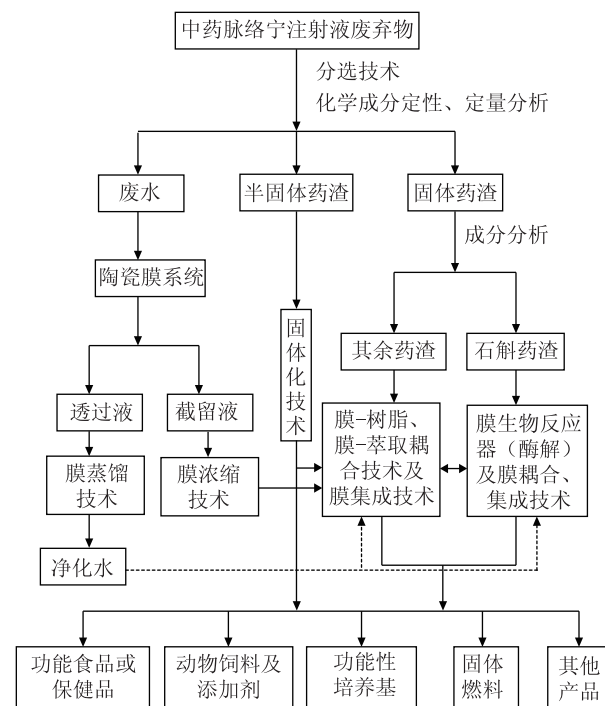


图 2 中药脉络宁注射液废弃物资源化循环利用的技术路线

由图 2 的技术路线设计可知, 中药废弃物资源化过程所追求的目标是实现有限资源的最大化利用。中药废弃物主体为可再生物质, 尤其是废弃的植物组织器官废渣、废水等是一类可转化利用的生物原料。通过转化实现废弃物的资源化, 提升其利用价值、发现其潜在利用价值, 该过程主要包括生物、化学、物理转化三大技术体系^[16]。在分离过程中, 本课题组同时采用 UPLC、HPLC、GC 等分析手段对分离过程的前后物料进行了指纹图谱检测, 如图 3、4 所示, 通过 UPLC 分析废水样品经过 0.2 µm 陶瓷膜处理前后的化学成分变化。

综上所述, 以脉络宁注射液的生产过程为例, 其水煎液中所含的除各种不同的活性有效成分外, 无一例外的均有大量构成各组织、器官细胞壁的成分及所贮藏的营养物质, 如淀粉、果胶、鞣质和蛋白质等, 该类物质分子量较大 (>50 000D), 不易被人体吸收、利用, 通常被视为无效高分子物质, 在生产过程中通过乙醇沉淀、乙酸乙酯萃取分离等工艺被去除, 因此该类大分子物质大量存在于废弃物

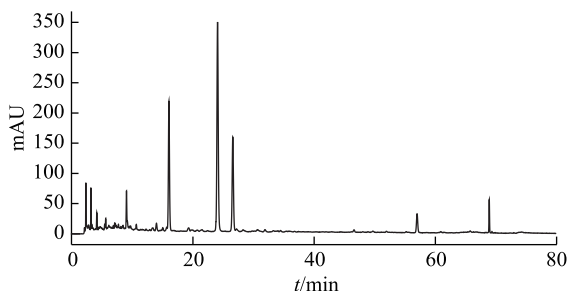


图3 中药脉络宁注射液生产中的废水过膜后指纹图谱

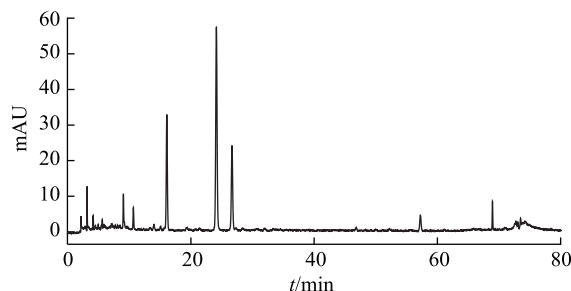


图4 中药脉络宁注射液生产中的废水过膜前指纹图谱

中。采用膜生物反应器、膜-树脂集成等集成技术,一方面可对废弃物中大分子进行降解,另一方面在对待分离物料进行化学成分跟踪分析的基础上,可选用合适的分离材料富集药效成分,实现对待分离组分的分离过程和分离效率的预测和监控。

众所周知,膜分离及其集成技术的核心是膜的性能,膜性能又与膜材料的性质密切相关,在上述研究的基础上,本课题组总结出分离过程需要优先解决的共性问题是资源化产品的稳定性和资源化过程的经济性。因此,中药特种分离膜的研制是膜分离及其集成技术应用于中药资源循环经济所亟待解决的共性关键问题。针对中药体系多样性、复杂性的特点,本课题组以中药脉络宁废弃物物料体系为例,建立分离材料、性能(应用)与制备(生产)三者之间的化学成分的传质、传热模型,对分离过程材料与设备进行优化,进而实现分离过程的稳定、可控和高效。上述研究结果将为中药特种分离膜材料及其相应分离设备的研制奠定实验基础。

3 膜分离及其集成技术在中药资源循环经济中的产业价值

吴庸烈等^[20]采用膜蒸馏技术对洗参水进行浓缩处理,成功回收了其中 90% 以上的皂苷,而其中主要微量元素和氨基酸的含量也提高了近 10 倍。李博等^[21]采用 PVDF 超滤膜自制药废水中富集青皮挥发油,精油的截留率可达到 67.5%;通过 GC-FID 对膜过程前后样品化学成分的比较发现,超滤法富集的挥发油与原挥发油近乎一致。上述两个应用实例提示我们,利用中药的目标成分和非目标成分相对分子质量的差异,可用截留分子质量适宜的超滤膜将两者分开;利用膜蒸馏技术对水分子的气化作用,可从制药废水中精制药效成分。膜科学技术在中药废弃物资源化领域的应用模式研究成果对于中药产

业具有普遍适用性,广泛适用于中药加工的各个单元操作。

全球膜市场以每年 8% ~ 10% 的增长率扩大,其中用于制水和污水处理的微滤、超滤和反渗透占膜分离技术市场总额的 40% 左右。膜分离技术应用于制药废水处理具有以下优点:对杂质的去除效率高,产水水质大大好于传统方法;彻底消除或是大大减少化学药剂的使用,避免二次污染;系统占地面积小,易于自动化,可靠性高,运行简易^[22]。由此可见,膜科学技术用于中药废弃物资源化过程具有广阔的前景,随着中药现代化进程的深入开展,膜技术的战略转型升级作用日益彰显,必然在中药废弃物资源化过程中扮演越来越重要的角色。

参考文献

- [1] 孙嘉麟. 日本汉方制剂专利技术[J]. 中成药研究, 1982, 4(8): 44-45.
- [2] 王绍堃, 孙晖, 王喜军. 膜分离技术及其在中药提取分离中的应用[J]. 世界中西医结合杂志, 2011, 6(12): 1093-1096.
- [3] 漆虹, 曹义鸣. 2014 年我国陶瓷膜应用新进展[J]. 膜科学与技术, 2015, 35(3): 131-133.
- [4] 郭立玮. 中药分离原理与技术[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 298-364.
- [5] 陆小华. 材料化学工程中的热力学与分子模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-23.
- [6] 刘家祺. 分离过程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 388-424.
- [7] 朱华旭, 段金康, 郭立玮, 等. 基于膜科学技术的中药废弃物资源化原理及其应用实践[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(9): 34-38.
- [8] 大矢晴彦, 张谨, 译. 分离的科学与技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 92-119.
- [9] 徐南平, 高从堦, 时钧. 我国膜领域的重大需求与关键问题[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(1): 327-331.

(下转第 1687 页)

- [4] 杨廷桢,高敬东,杨明霞,等. 栝楼的经济价值及栽培技术要点[J]. 甘肃农业科技,2003(10):48-49.
- [5] 刘金娜,温春秀,刘铭,等. 瓜蒌的化学成分和药理活性研究进展[J]. 中药材,2013,36(5):843-848.
- [6] 万丽娟,卢金清,许俊洁,等. 瓜蒌子化学成分和药理作用的研究进展[J]. 中国药房,2015,26(31):4440-4443.
- [7] 侯宗坤,高振秋,杨丽,等. 瓜蒌籽油提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技,2017,38(6):261-265.
- [8] 段金廛. 中药废弃物的资源化利用[M]. 北京:化学工业出版社,2013:18-22.
- [9] 段金廛. 中药资源化学:理论基础与资源循环利用[M]. 北京:科学出版社,2015:23-30.
- [10] Huang X L,Zhang K K,Deng M,et al. Effect of arginine on the growth and biofilm formation of oral bacteria[J]. Arch Oral Biol,2017,82:256-258.
- [11] 孙红暖,杨海明,王志跃,等. 精氨酸对动物的营养生理及免疫作用[J]. 动物营养学报,2014,26(1):54-62.
- [12] Li Y H,Bai Z Z,Tang F,et al. L-arginine attenuates hypobaric hypoxia-induced increase in ornithine decarboxylase 1 [J]. Wilderness Environ Med,2017,28(4):285-290.
- [13] Bahri S,Zerrouk N,Aussel C,et al. Citrulline:from metabolism to therapeutic use [J]. Nutrition, 2013, 29 (3): 479-484.
- [14] 戴芳萍,王箴,李倩. 瓜氨酸与临床相关疾病的研究进展[J]. 沈阳医学院学报,2016,18(5):385-387.
- [15] Song W,Sun X,Chen X L,et al. Enzymatic production of l-citrulline by hydrolysis of the guanidinium group of l-arginine with recombinant arginine deiminase[J]. J Biotechnol, 2015,208:37-43.
- [16] Mori A,Morita M,Morishita K,et al. l-Citrulline dilates rat retinal arterioles via nitric oxide and prostaglandin-dependent pathways in vivo[J]. J Pharmacol Sci,2015,127(4):419-423.
- [17] Tabatabaie L,Klomp L W,Berger R,et al. l-Serine synthesis in the central nervous system:A review on serine deficiency disorders[J]. Mol Genet Metab,2010,99(3):256-260.
- [18] Hirabayashi Y,Furuya S. Roles of l-serine and sphingolipid synthesis in brain development and neuronal survival. [J]. Progr Lipid Res,2008,47(3):188-192.

(收稿日期 2017-11-10)

(上接第1676页)

- [10] Hartmann M,Jung D. Biocatalysis with enzymes immobilized on mesoporous hosts:the status quo and future trends. Journal of Membrane Science,2010,20(5):844-857.
- [11] 王北婴,王跃生,王焕魁. 我国中药制药工业中亟需推广的高新技术[J]. 世界科学技术—中药现代化,2000,2(2):18-23.
- [12] 吕建国,何葆华. 膜分离技术在中药研究中的新进展[J]. 化学与生物制药,2012,29(6):14-16.
- [13] 李文国. 壳聚糖渗透汽化膜的制备及性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2006.
- [14] 纪晓声,楼永通,高从增. 膜分离技术在中药制备中的应用[J]. 水处理技术,2006,32(3):11-14.
- [15] 刘双双,刘丽芳,朱华旭,等. 超滤膜技术用于络宁注射液废弃物中多糖分离及其活性筛选研究[J]. 中草药,2016,47(13):2288-2293.
- [16] 段金廛. 中药资源化学——理论基础与资源循环利用[M]. 北京:科学出版社,2015:2-45.
- [17] 刘双双,刘丽芳,朱华旭,等. 超滤膜技术用于络宁注射液废弃物中多糖分离及其活性筛选研究[J]. 中草药,2016,47(13):2288-2293.
- [18] 刘双双,刘丽芳,朱华旭,等. 酶解等4种方法用于中药废弃物资源化研究初探—以络宁注射液生产中石斛药渣的多糖资源化研究为例[J]. 中国实验方剂学杂志,2016,22(22):204-210.
- [19] 朱华旭,郭立玮,段金廛,等. 灵芝固体栽培培养基及其应用络宁注射液生产废弃物在灵芝栽培种的应用:ZL201410831244.4. [P]. 2017-08-22.
- [20] 吴庸烈,卫永弟,刘静芝,等. 膜蒸馏技术处理人参露和洗参水的实验研究[J]. 科学通报,1988,(10):753-756.
- [21] Li B,Han Z F,Cao G P,et al. Enrichment of Citrus reticulate Blanco essential oil from oily wastewater by ultrafiltration membranes [J]. Desalin Water Treat, 2013, 51 (19/21):3768.
- [22] 顾辽萍. 膜法处理高浓度制药发酵废水技术[J]. 水处理技术,2005,31(8):78-79.

(收稿日期 2017-09-01)