

超重力强化泡沫分离皂苷的过程与提纯效果

傅丹丹^{1,2}, 刘有智^{1,2*}, 张程前^{1,2}, 李佳宇^{1,2}, 王菽菲^{1,2}, 李雪凡^{1,2}

(1. 中北大学 化学与化工学院, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 化工过程强化山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 天然表面活性剂具有可生物降解、无毒且易获得的显著优势, 其提取工艺与技术成为关注热点。本文采用超重力泡沫分离技术, 以无患子皂苷为提取物, 研究了高效分离与纯化工艺, 探索了不同操作条件对分离效果的影响。结果表明: 在超重力因子30、进料质量浓度 $0.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、气体流量 $150\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 、持液量4 L以及液体流量 $250\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 超重力泡沫分离无患子皂苷的回收率达到90%, 富集比达到6.38, 单程纯度从65%提纯到95%, 与传统泡沫分离方法相比, 回收率提高了36个百分点, 富集比提高了2倍, 纯度提高了30个百分点。此外, 对比了市售皂苷与自制品皂苷的结构和纯度, 结果表明两种皂苷的结构一致且自制皂苷的纯度高于市售皂苷。本文采用的超重力泡沫分离技术能够实现皂苷的高效分离, 主要归因于超重力场强化了泡沫分离的界面吸附过程, 改变了泡沫的形貌、尺寸与分布, 增强了皂苷物质与气泡的有效接触面积, 从而实现了无患子皂苷的高效分离与提纯。本文采用的超重力泡沫分离提取无患子皂苷工艺具备无任何新物质添加、绿色环保的显著优势, 解决了当前提取工艺分离效率低及环境污染的问题, 为天然表面活性剂的高性能分离与提纯提供新思路与新方法。

关键词: 超重力; 泡沫分离; 天然表面活性剂; 无患子皂苷

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0007

引用格式: 傅丹丹, 刘有智, 张程前, 等. 超重力强化泡沫分离皂苷的过程与提纯效果[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(3): 344-352.

FU Dandan, LIU Youzhi, ZHANG Chengqian, et al. High-gravity enhanced foam separation process of saponins and its purification effect[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(3): 344-352.

High-Gravity Enhanced Foam Separation Process of Saponins and Its Purification Effect

FU Dandan^{1,2}, LIU Youzhi^{1,2*}, ZHANG Chengqian^{1,2}, LI Jiayu^{1,2}, WANG Shufei^{1,2}, LI Xuefan^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Province Key Laboratory of Chemical Process Intensification, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Natural surfactants have significant advantages such as biodegradability, non-toxicity, and easy availability, making their extraction processes and technologies a focus of research. This study employed the high-gravity foam separation technology to extract saponins from *Sapindus mukorossi*, aiming to develop an efficient separation and purification process. The effects of different operating conditions on the separation efficiency were investigated. The results indicate that under the optimal conditions of high-

收稿日期: 2025-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22378370); 山西省高等学校科技创新项目(2025L056)

作者简介: 傅丹丹(2000—), 女, 硕士生, 主要从事超重力泡沫分离的研究。

* 通信作者: 刘有智(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事超重力技术的研究。E-mail: lyzzhongxin@126.com。

gravity factor of 30, feed mass concentration of $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, gas flow rate of $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, liquid loading volume of 4 L, and liquid flow rate of $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, the recovery rate of saponin from *Sapindus mukorossi* by high-gravity foam separation reaches 90%, the enrichment ratio reaches 6.38, and the purity is increased from 65% to 95% in a single pass. Compared with traditional foam separation methods, the recovery rate is increased by 36 percentage points, the enrichment ratio is improved by twofold, and the purity is increased by 30 percentage points. Furthermore, the structure and purity of commercially available saponins were compared with those of the self-prepared saponins. The results indicate that the structures of the two types of saponins are consistent, and the purity of the self-prepared saponins is higher than that of the commercially available ones. The high-efficiency separation of saponins achieved in this study using high-gravity foam separation technology is primarily attributed to the intensification of the interfacial adsorption process in foam separation by the high-gravity field. This process alters the morphology, size, and distribution of the foam, enhances the effective contact area between saponins and bubbles, and thereby enables the efficient separation and purification of saponins from *Sapindus mukorossi*. The high-gravity foam separation extraction process employed in this study offers significant advantages, including the absence of any new chemical additives, and environmental friendliness. This approach addresses the issues of low separation efficiency and environmental pollution associated with current extraction methods, providing new insights and techniques for the high-performance separation and purification of natural surfactants.

Key words: high-gravity; foam separation; natural surfactants; saponin from *Sapindus mukorossi*

0 引言

近年来,随着人们环境保护意识的提高和对健康生活需求的日益增强,绿色化学品的发展受到广泛重视^[1]。天然表面活性剂来源于植物、动物或微生物代谢产物,与传统的合成表面活性剂相比,具有毒性低、易生物降解等显著优势,在洗涤、农药、医药等各个领域展现出巨大的潜力^[2]。天然表面活性剂(如皂苷、烷基糖苷、鼠李糖脂等)不仅能够降低表面张力,而且具备抗菌、抗病毒、抗氧化等独特功能,符合可持续发展理念^[3]。然而,天然表面活性剂的分离与提取仍然存在提

取效率低、环境污染等问题亟待解决^[4]。

提取天然表面活性剂的方法有很多,包括水提法^[5]、有机溶剂提取^[6]、泡沫分离法^[7]、大孔树脂吸附法^[8]、膜分离^[9]、酶法^[10]、微波辅助^[11]等。以上方法展示了从植物当中提取天然表面活性物质的完整工艺过程(见图1),主要分为三个部分,粗提取、纯化以及成品制备。研究者们主要通过强化第二阶段的纯化来实现高纯度的提取效果。相比其他纯化方法,泡沫分离技术作为一种基于界面吸附的分离纯化方法,具有设备结构简单、无污染等优点,但传统泡沫分离工艺存在气泡尺寸大、易破裂、分离效果低等问题。

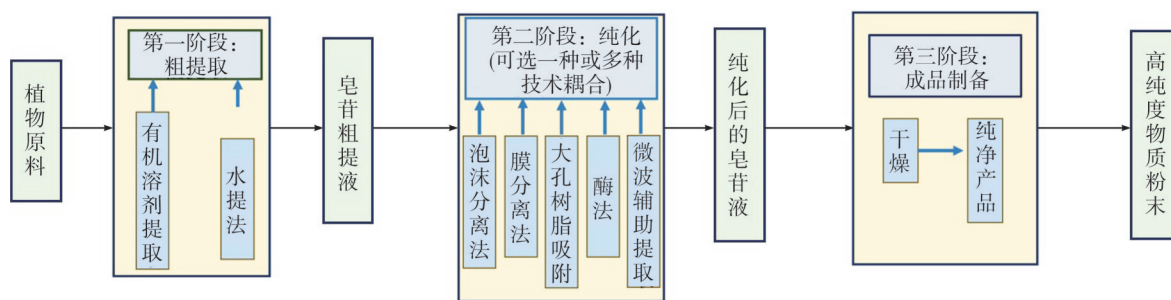


图1 天然表面活性物质提取工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram for the extraction of natural surfactants

超重力技术的核心设备是旋转填料床,也被称为超重力反应器(Rotating Packed Bed, RPB)。旋转

填料床高速旋转产生强离心力场^[12],原料液在高剪切力的作用下能够将其撕裂为液丝、液滴、液膜,进

入的气体能够与液体充分接触,显著增强了气液界面吸附过程,为泡沫分离技术提供了新思路。近期,课题组李佳宇^[13-14]报道的超重力泡沫分离技术能够很好地实现气液界面吸附的增强,通过旋转填料床与泡沫柱的组合,实现了气液界面的充分吸附,提升目标物质的富集比和回收率。

基于此,本文系统性地将超重力泡沫分离技术应用用于高效分离与提取天然表面活性剂,解决天然表面活性剂提取工艺存在的分离效率低、环境污染的核心难题。以无患子皂苷为提取物,探讨无患子皂苷进料质量浓度、气体流量、持液量、液体流量以及超重力因子等参数对天然表面活性剂富集效率和回收率的影响,实现高纯度皂苷提取,以为天然表面活性剂的高性能分离、绿色环保提取工艺提供新思路。

1 实验药品与材料

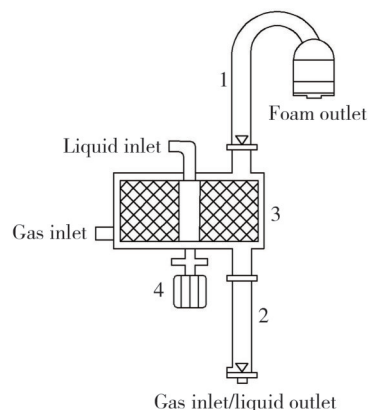
1.1 实验药品

无患子果皮(市售)。

1.2 实验装置

图 2 为超重力泡沫分离装置示意图,由泡沫精馏塔 1、泡沫提馏塔 2 和超重力旋转填料床 3 组成。本装置中泡沫精馏塔和泡沫提馏塔均为高 500 mm、外径 50 mm 的聚甲基丙烯酸甲酯管。超重力旋转填料床中装有丝网填料,旋转填料床下方装有电机 4。旋转填料床左侧为气体进口,上方为液体进口;泡沫由泡沫精馏塔上方出口收集;泡沫提馏塔为实验开

始前的气体进口和实验停止后的液体出口。该装置借助超重力技术,强化泡沫分离过程中的界面吸附过程,增大气液有效接触面积,实现高效、连续发泡,提升分离纯化效果。



1—泡沫精馏塔; 2—泡沫提馏塔; 3—超重力旋转填料床; 4—电机

图 2 超重力泡沫分离装置

Fig. 2 High-gravity foam separation equipment

2 提取工艺流程

2.1 原料液制备

利用水提法制备水提液作为原料液,方法如图 3: 将无患子果皮洗净放在烘箱中烘干 24 h 后磨粉、过筛,将去离子水与无患子果皮粉末以一定的料液比进行混合,放入水浴锅中恒温搅拌一段时间。待提取完毕,所得到的溶液冷却、沉淀一晚上,再进行过滤、离心,最后得到无患子皂苷纯度为 35% 的水提液原料,放置在 4℃ 下储存并使用。整个提取过程未使用防腐剂。

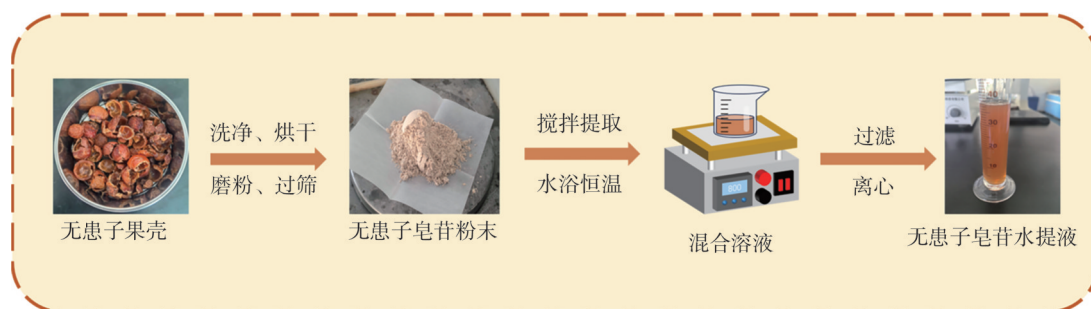


图 3 水提液制备过程

Fig. 3 Aqueous extract preparation process

2.2 超重力泡沫分离提取皂苷工艺

将得到的水提液作为原料液,采用超重力泡沫分离设备进行提取。图 4 为超重力泡沫分离工艺流程示意图。启动装置,气体由空气压缩机 5

经缓冲罐 6 输入,由气体流量计 7 控制气体流量,原料液置于储液槽 1 中,由蠕动泵 2 持续输送至超重力泡沫分离装置 4 中,在超重力的作用下,产生离心力,气液充分混合,产生大量气泡,在气体压力作用下带出泡沫并由泡沫收集槽 8 收集,消泡

后得到消泡液, 剩余溶液由残液收集槽 9 收集。

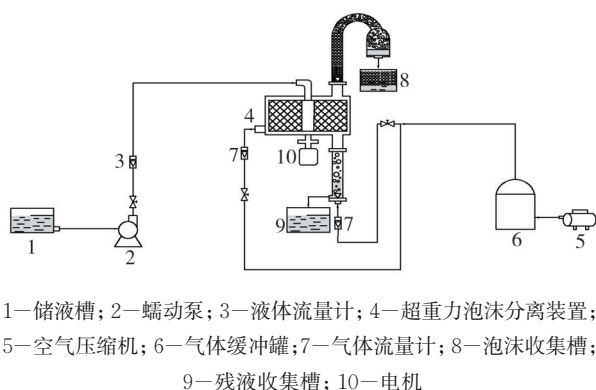


图 4 超重力泡沫分离流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high-gravity foam separation process

2.3 成品制备

将超重力泡沫分离提取得到的消泡液进行干燥处理, 去除水分, 得到的白色粉末为无患子皂苷成品。

2.4 回收率、富集比及纯度计算

通过富集率 E 、回收率 R 以及纯度 P 评估超重力泡沫分离装置的分离性能, 其公式为

$$R = \frac{C_f V_f}{C_0 V_0}, E = \frac{C_f}{C_0}, P = \frac{C_f V_f}{m} \quad (1)$$

式中: V_0 和 V_f 分别为原料液体积和所收集的泡沫消泡之后得到的消泡液体积, L; C_0 和 C_f 分别为原料液和消泡液中无患子皂苷的质量浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 采用重量法^[15]计算成品质量, 即式(1)中的 m , 以消泡液中皂苷的含量为分子, 成品质量为分母, 即可算出样品纯度。

3 分析测试与表征

3.1 无患子皂苷质量浓度测量

要计算回收率以及富集比等分离效率, 需要对无患子皂苷质量浓度进行测量。以齐墩果酸作为对照品, 采用香草酸-高氯酸^[16]的方法对无患子皂苷质量浓度进行测量, 线性拟合方程得到标准曲线: $A = 49.206C + 0.05437$, 其中, A 和 C 分别为吸光度和无患子皂苷的质量浓度, 线性相关系数为 0.99086。

3.2 傅里叶变换红外光谱测试皂苷成品

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)能够快速、简便和直接检测提取物中的皂苷。使用 Nicolet iN10&iZ10 FTIR 光谱仪(美国 SEMER Fisher 公司)进行了测试,

以确定提取物是否为皂苷^[17]。

3.3 高效液相色谱仪测试皂苷成品

采用赛默飞 UltiMate 3000 高效液相色谱仪将自制皂苷成品与市售皂苷进行纯度对比分析^[18]。

3.4 表面张力测试

使用 JQ03E PRO27 型表面张力仪测定样品溶液的表面张力 r , 单位 $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在 25°C 下测量不同质量浓度的无患子皂苷水提液的表面张力^[19]。

4 结果与讨论

4.1 工艺条件探索

4.1.1 无患子皂苷的质量浓度

进料质量浓度指的是原料液中无患子皂苷的质量浓度。本文探究了无患子皂苷质量浓度在 $0.5 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间的分离效率, 如图 5 所示, 在超重力因子 25、风速 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、持液量 3 L 以及液体流量 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下进行超重力泡沫分离无患子皂苷, 随着进料质量浓度的增加, 回收率(R)不断上升后趋于稳定, 富集比(E)先上升后下降。

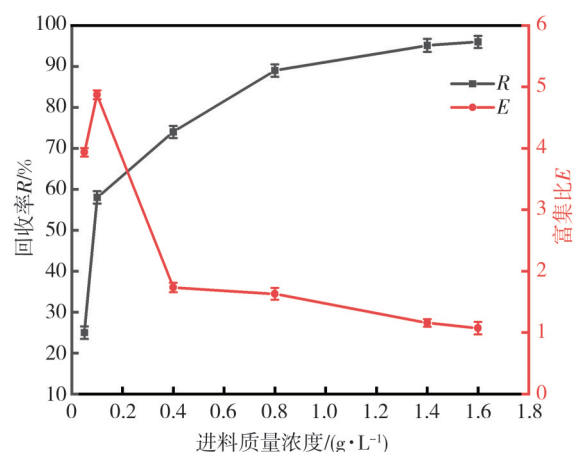


图 5 无患子皂苷质量浓度对超重力泡沫分离皂苷的影响

Fig. 5 Effect of feed mass concentration on saponins by high-gravity foam separation

当进料液质量浓度增大时, 超重力旋转填料床高速旋转产生离心力, 使得无患子皂苷在气液相界面的吸附量随质量浓度上升而大量增加, 泡沫相夹带液的增速超过回流速度, 促使回收率提高。富集比与进料质量浓度的关系曲线出现峰值, 根本原因在于皂苷在气液界面的吸附行为与其表面活性及其临界胶束质量浓度(CMC)密切相关^[20]。根据表面张力仪测得皂苷的临界胶束质量浓度为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (如

图6)。质量浓度低于临界胶束质量浓度(CMC)时,皂苷分子倾向于吸附在气液界面,其吸附量随质量浓度增加而线性上升,此过程显著降低表面张力,富集比得以提升;当质量浓度达到CMC时,气液界面吸附达到饱和状态,此时界面性质最优,富集效率最高,对应富集比的峰值;质量浓度继续增加超过CMC,体相中形成过量胶束,这不仅无法进一步降低表面张力,反而因夹带液粘度增强阻碍了泡沫排液,过高的持液率对产物产生了稀释作用,从而导致富集比衰退。

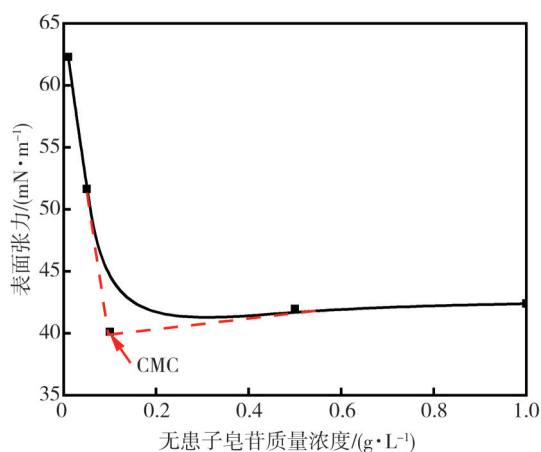


图6 表面张力与无患子皂苷提取物质量浓度曲线

Fig. 6 Curve of surface tension versus the mass concentration of saponin extract from *Sapindus mukorossi*

实验结果表明,无患子皂苷的质量浓度存在临界值;超过该值后界面吸附饱和,新增溶质无法被捕获,富集比下降。为获得高回收率及富集比,选择进料质量浓度为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为以下实验的固定质量浓度。

4.1.2 气体流量

本文探究了不同气体流量($50 \sim 250 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$)的分离效率,如图7所示,在进料质量浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、超重因子25、气速 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、持液量3 L以及液体流量 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下进行超重泡沫分离无患子皂苷,随着气体流量的不断上升,回收率不断上升,富集比逐渐下降。这是由于随着气体流量的升高,气泡在分离柱中停留时间较短,使得泡沫间隙中的液体在分离之前就收集起来进入消泡液当中,夹带液增多,回收率上升,富集比下降。

实验结果表明,气体流量不断增大会减少泡沫排液时间,泡沫夹带液增多的同时会导致消泡液里总皂苷的相对质量浓度减少,这是回收率与富集比反向变化的本质原因。为保证富集比和回收率的同时上升,选择气体流量 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 进行下

一步实验探究。

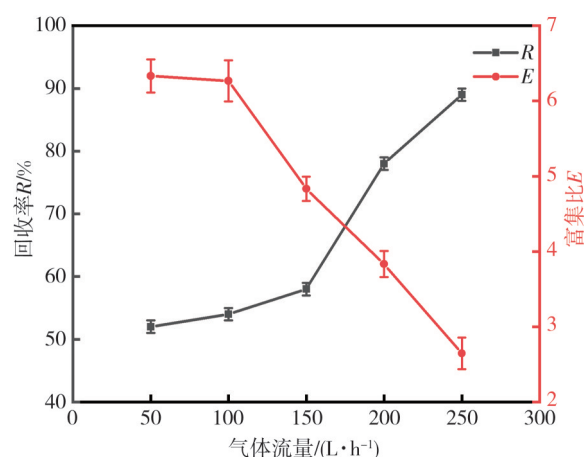


图7 气体流量对超重泡沫分离皂苷的影响

Fig. 7 Influence of gas flow rate on the separation effect of saponins by high-gravity foam

4.1.3 持液量

在进料质量浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、超重因子25、气体流量 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 和液体流量 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下,探究了不同持液量(2, 3, 4, 5, 6 L)的分离效率。如图8所示,随着持液量的增加,呈现回收率不断升高且富集比下降的趋势。

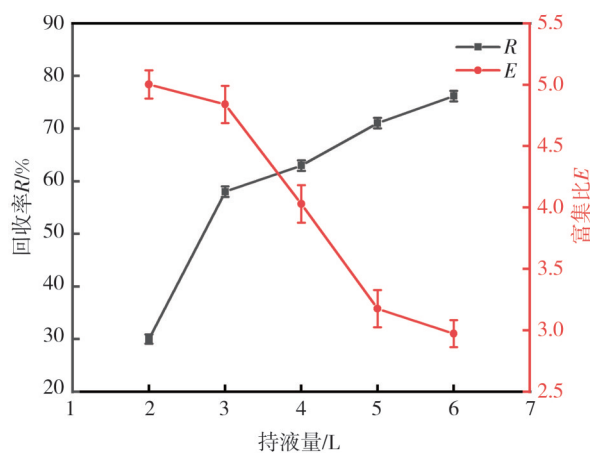


图8 持液量对超重泡沫分离皂苷的影响

Fig. 8 Influence of the liquid loading volume on the separation effect of saponins by high-gravity foam

当持液量不足时,气液接触时间缩短,泡沫层极其不稳定,导致目标物质吸附不充分,回收率较低;尽管此时因液体夹带较少可能出现较高的富集比,但该值通常不稳定。相反,持液量过大则使泡沫持液率显著升高,造成消泡液中的皂苷物质被稀释,富集比下降。适中的持液量(4 L)能够提供充足的气液接触时间,提高气液接触面积,在提高皂苷吸附效率(或回收率)的同时,兼顾泡沫中皂苷的质量浓度(富集比),两者实现了

良好的平衡。

实验结果表明,持液量的不断升高影响着气液接触时间,出现了回收率不断提高而富集比不断下降的现象。以下实验将持液量 4 L 作为操作条件。

4.1.4 液体流量

在质量浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 超重力因子 25、气体流量 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 和持液量 4 L 的条件下,探究了不同液体流量($150 \sim 350 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)对超重力泡沫分离无患子皂苷的分离效率,实验结果如图 9 所示。液体流量对回收率与富集比的影响均呈现先升后降的趋势。液体流量低造成单位时间内输入的无患子皂苷总量不足,会出现皂苷吸附不充分,回收率与富集比均处于较低水平。当液体流量增加至适宜范围(如 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$),系统内的湍流程度增强,提升了皂苷分子向气泡表面的传质效率,使恒定的气液接触面积能够得到充分利用;同时,有助于形成稳定的泡沫层,从而回收率与富集比同步升高。然而,当液体流量过高时,在超重力的作用下,形成大量泡沫,导致泡沫夹带液收集过多,稀释了皂苷质量浓度,导致富集比急剧下降;同时,过快的流速也可能破坏泡沫稳定性,致使已吸附的皂苷脱附重返液相,造成回收率出现下降然后趋于稳定。

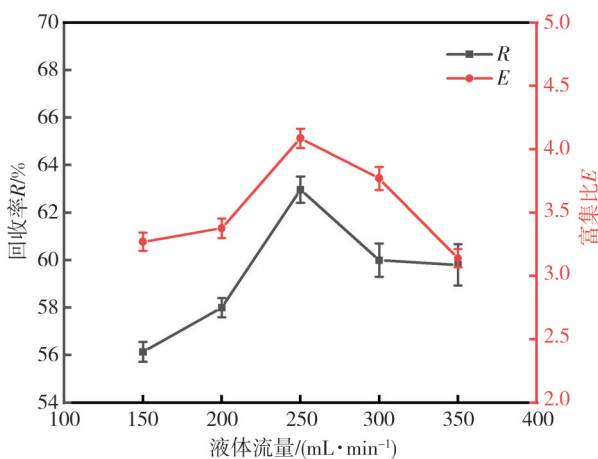


图9 液体流量对超重力泡沫分离皂苷的影响

Fig. 9 Influence of liquid flow rate on the separation effect of saponins by high-gravity foam

实验结果表明,液体流量能够通过调控单位时间内皂苷的供给量与泡沫持液量,影响皂苷的回收率和富集比。以下实验将 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 液体流量作为操作条件。

4.1.5 超重力因子

由图 10 可知,回收率和富集比都随超重力因子的增大而呈现出先增大后降低的趋势。主要原因是

高剪切的作用能够促进气液有效接触吸附,但过高的剪切力也能够加快气泡的破裂,减少皂苷物质的获取而出现富集比与回收率先后下跌。当超重力因子逐渐增大时,液体所受的离心力不断变大,表面更新速率加快,气液的有效接触面积增多^[21],更多的无患子皂苷吸附到气泡表面,生成更多的泡沫,增大了消泡液中无患子皂苷的质量浓度,因此,富集比增大,回收率增大;当超重力因子超过 30 时,过高的剪切力会加剧气泡破裂,泡沫稳定性变差,原本吸附到泡沫上的无患子皂苷与液体又回到液相中,降低了皂苷质量浓度,减少了泡沫夹带的液体量,出现富集比和回收率下降的现象。

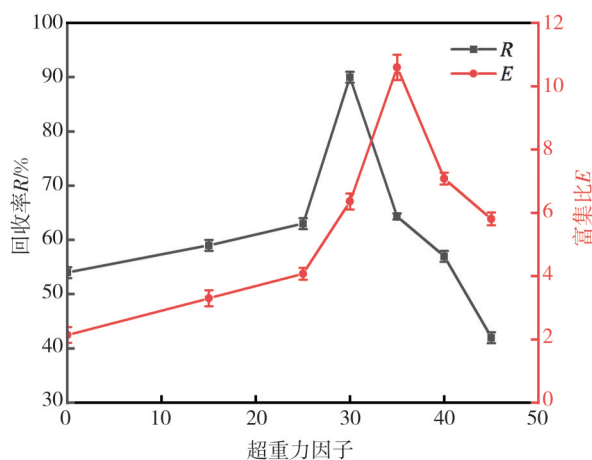


图10 超重力因子对超重力泡沫分离皂苷的影响

Fig. 10 Influence of high-gravity factor on the separation effect of saponins by high-gravity foam

实验结果表明超重力因子能够通过增强剪切力实现皂苷回收率与富集比的上升,提高皂苷的分离效率。在质量浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 超重力因子 30、气体流量 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、液体流量 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 和持液量 4 L 的条件下,得到了 90% 的回收率和 6.38 的富集比。

4.2 成品制备结果对比分析

将水提液得到的原料液,以及采用超重力泡沫分离提取得到的消泡液均进行干燥后处理,蒸发掉溶液中的水分即可得到水提液成品皂苷和自制品皂苷粉末,计算测得水提液皂苷纯度(P)为 35%,超重力泡沫分离工艺纯化后的无患子皂苷纯度(P)为 95%。分别通过红外光谱(FTIR)以及高效液相色谱(HPLC)对成品结构以及纯度进行分析。

4.2.1 市售与自制皂苷结构分析

为了确认提取物是否为皂苷,图 11 对比了市售皂苷与超重力泡沫分离纯化后的无患子皂苷的红外光谱图。从图中可以清晰的看出这 4 种物质的官能

团十分相似,在 $3\,250\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 处存在O—H的伸缩振动峰;烷烃基团的伸缩振动出现在 $2\,920\sim 2\,927\text{ cm}^{-1}$ 处;在 $1\,627\sim 1\,632\text{ cm}^{-1}$ 处出现C=O的伸缩振动峰;在 $1\,377\sim 1\,340\text{ cm}^{-1}$ 处出现了C=C的伸缩振动峰;在 $1\,043\sim 1\,051\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰表示R—O伸缩振动。这一结果与无患子皂苷的特征带相符^[22]。

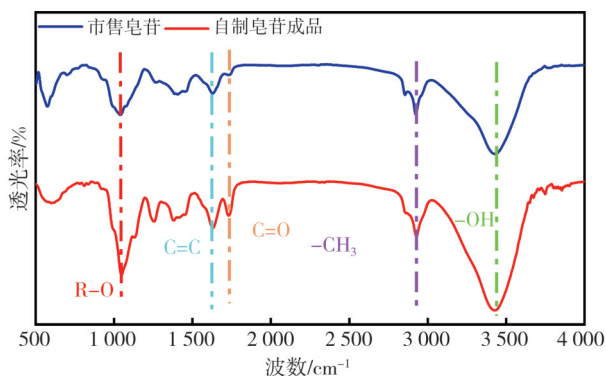


图 11 皂苷的 FTIR 分析图及官能团

Fig. 11 FTIR spectra and functional group identification of saponins

实验结果表明市售皂苷与自制皂苷成品的结构一致,傅里叶红外光谱测试结果不仅证实了采用超重力泡沫分离纯化后的成品是皂苷的结构,还证明了超重力泡沫分离工艺能够提取出无患子皂苷这类天然表面活性剂。

4.2.2 市售与成品皂苷纯度分析

图 12 展示了市场上售卖的无患子皂苷、水提液皂苷成品与采用超重力泡沫分离纯化后的自制皂苷成品的 HPLC 曲线。在 3 条曲线中的 1.6~3.4 min 的保留时间内观察到相似的峰,与文献[23]中类似。

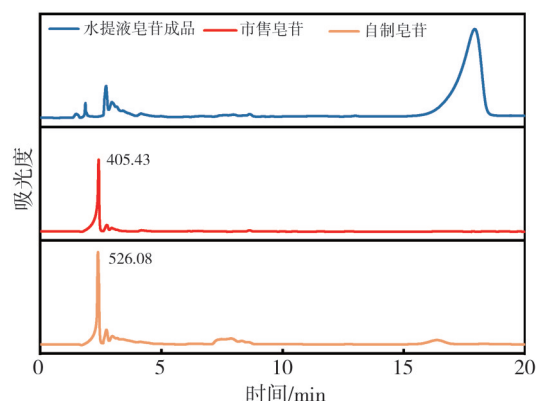


图 12 无患子皂苷液相色谱对比图

Fig. 12 HPLC comparison chart of saponins from *Sapindus mukorossi*

结果显示在保留时间范围内,自制成品皂苷相比市售皂苷(纯度80%)在液相色谱图中显示出更高更窄的峰,这表明其纯度比市场上售卖的皂苷纯度

高。此外,由图可以看出水提液皂苷存在大量杂质,经过超重力泡沫分离纯化后得到的自制皂苷成品能够去除大量杂质。表明采用超重力泡沫分离工艺能够对无患子皂苷进行提纯^[24]。

4.3 传统泡沫分离与超重力泡沫分离工艺结果对比分析

图 13 对比分析了传统泡沫分离条件与超重力场条件下无患子皂苷的分离效果,结果显示,超重力场条件下皂苷的回收率、富集比以及纯度均高于传统泡沫分离设备。相比传统泡沫分离设备,超重力泡沫分离得到的皂苷回收率从54%增加到90%,提高了36个百分点;富集比从2.12提高至6.38,提高了2倍;纯度从65%提高到95%,提高了30个百分点。

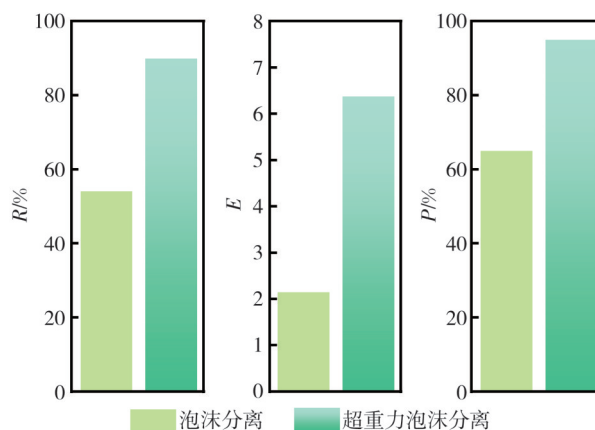
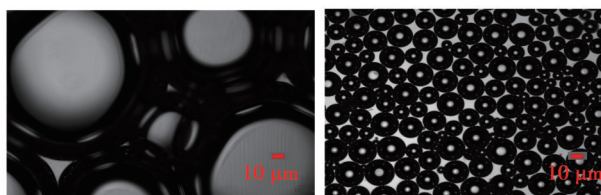


图 13 传统泡沫分离与超重力泡沫分离工艺结果对比

Fig. 13 Performance comparison (R , E , P) of traditional and high-gravity foam separation under identical condition

对皂苷分离效率的极大提升主要归因于超重力场对泡沫分离过程中界面吸附过程的强化。在高速旋转的填料作用下,液体不断被撕裂为液膜或液丝,使得气体能够与液体充分接触,影响着气泡的形貌与分布。通过电子显微镜图像对比了传统泡沫分离与超重力泡沫分离无患子皂苷的泡沫形貌、分布与尺寸大小,如图 14 和图 15 所示。可以明显看出,采用超重力泡沫分离产生的气泡分布更加均匀、形态更稳定,泡沫的平均尺寸为 $95.35\text{ }\mu\text{m}$,明显小于传统泡沫过程中的泡沫尺寸,且泡沫直径呈正分布。该技术通过形成尺寸均匀、形态一致、稳定性高的微气泡,有效克服了传统泡沫分离过程中常见的气泡尺寸偏大、易破裂与分布不均等问题。由此,超重力泡沫分离技术促进了皂苷的高效成泡,强化了其在气液界面的吸附过程,从而显著提升了分离性能。

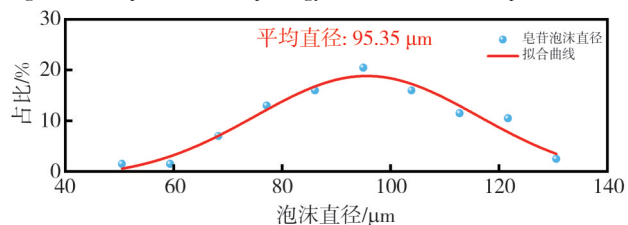


(a) 传统泡沫分离

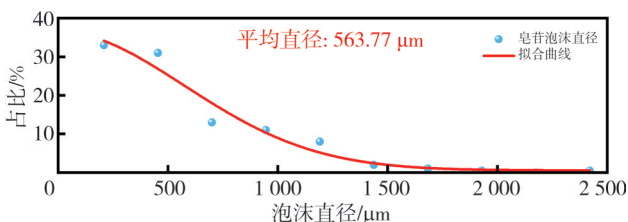
(b) 超重力泡沫分离

图 14 皂苷泡沫形貌与分布对比

Fig. 14 Comparison of morphology and distribution of saponin foam



(a) 超重力泡沫分离



(b) 传统泡沫分离

图 15 皂苷泡沫直径分布图

Fig. 15 Diameter distribution diagram of saponin foam

5 结 论

本文采用课题组提出的超重力泡沫分离技术对天然表面活性剂无患子皂苷进行了分离与提纯研究, 结论如下:

1) 探索了不同工艺条件, 得出在超重力因子 30、进料质量浓度 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、气体流量 $150 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、持液量 4 L 以及液体流量 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 回收率达到 90%, 富集比达到 6.38, 单程纯度从 65% 提纯到 95%。

2) 纯化后的皂苷成品与市售皂苷结构一致, 纯度更高。

3) 与传统的泡沫分离方法相比, 超重力泡沫分离工艺对无患子皂苷的回收率提高了 36 个百分点, 富集比提高了 2 倍, 纯度提升了 30 个百分点。这一成果的极大提升主要归因于超重力场对泡沫分离过程中界面吸附过程的强化, 从而实现无患子皂苷的高效分离与提纯, 为天然表面活性剂的高性能分离提取工艺提供新方法。

4) 本文采用的超重力泡沫分离提取无患子皂苷工艺具备无任何新物质添加、绿色环保、无任何环境污染的优势, 为当前提取工艺存在的分离

效率低以及环境污染问题提供了新思路。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] SINGH A, SHARMA T, ABDULLAH M M S, et al. Stable nano-enhanced phase change material emulsions of natural surfactant and silica nanoparticles for thermal energy storage applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 270: 126236.
- [2] SETHURAJAPERUMAL A, SRIVASTAVA S, GANESH G, et al. Natural surfactant stabilized aqueous MoS_2 nano-lubricants for reducing friction and wear [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 154080.
- [3] SOCHACKI M, VOGT O. Triterpenoid saponins from washnut (*sapindus mukorossi* gaertn.)—a source of natural surfactants and other active components [J]. Plants, 2022, 11(18): 2355.
- [4] ROJAS M, ORTIZ Y, ARTURO D, et al. Saponins: Natural surfactants and their alternative sustainability in the formulation of bio-based detergents to mitigate environmental pollution [J]. Waste and Biomass Valorization, 2024, 15(10): 5965-5982.
- [5] CHEN C, LI R, LI D, et al. Extraction and purification of saponins from *Sapindus mukorossi* [J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(2): 952-960.
- [6] CANTERO-BAHILLO E, DE LAS NIEVES SILES-SÁNCHEZ M, JAIME L, et al. Ultrasound-assisted co-extraction and characterization of saponin-rich co-extracts from fenugreek seeds (*Trigonella foenum-graecum* L.) and quinoa husk (*Chenopodium quinoa* Willd.) and their hydrolysates [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105275.
- [7] LI R, WU Z L, WANG Y J, et al. Separation of total saponins from the pericarp of *Sapindus mukorossi* Gaerten. by foam fractionation [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 51: 163-170.
- [8] LIU F, MA N, XIA F B, et al. Preparative separation of minor saponins from *Panax notoginseng* leaves using biotransformation, macroporous resins, and preparative high-performance liquid chromatography [J]. Journal of Ginseng Research, 2019, 43(1): 105-115.
- [9] ARYANTI N, NAFIUNISA A, GIRALDI V F, et al. Separation of organic compounds and metal ions by micellar-enhanced ultrafiltration using plant-based

- natural surfactant (saponin) [J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2023, 8: 100367.
- [10] LI C, YU L, MIAO W, et al. Cellulase hyperproduction *Trichoderma reesei* mutant strain BB8 for the bio-extraction and bioconversion of ginsenoside from *Panax notoginseng* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318: 144984.
- [11] WANG Z, PAN H, XU J, et al. A sustainable and integrated natural surfactant mediated microwave-assisted extraction technique enhances the extraction of phytochemicals from plants [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 184: 115043.
- [12] LU J M, ZHU Y G, LI Y B, et al. New advance in application research of high-gravity process intensification technology [J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2025, 47: 101057.
- [13] LI J, LIU Y, ZHANG C, et al. Study of the high-gravity foam fractionation device and its fractionation performance [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, 64(22): 10989-10999.
- [14] 李佳宇, 张程前, 马瑛, 等. 新型超重力泡沫分离装置去除制药废水中痕量茶碱的工艺研究 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 460-468.
LI Jiayu, ZHANG Chengqian, MA Ying, et al. Research on the process of a new high gravity foam separation device for the removal of trace theophylline in pharmaceutical wastewater [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(4): 460-468. (in Chinese)
- [15] 魏凤玉, 张静, 解辉. 泡沫分离法纯化无患子皂苷 [J]. 中成药, 2009, 31(7): 1021-1024.
WEI Fengyu, ZHANG Jing, XIE Hui. Purification of sapindus-saponin by foam separation [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2009, 31(7): 1021-1024. (in Chinese)
- [16] LI L, WEI M P, YU H, et al. Antifungal activity of *Sapindus* saponins against *Candida albicans*: Interruption of biofilm formation [J]. Journal of Herbal Medicine, 2023, 42: 100776.
- [17] ARYANTI N, NAFIUNISA A, KUSWORO T D, et al. Dye solubilization ability of plant derived surfactant from *Sapindus rarak* DC. extracted with the assistance of ultrasonic waves [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22: 101450.
- [18] YU G R, KIM D H, KIM H, et al. Evaluation of saponin-rich callus from *saponaria officinalis* L. as a novel scrub material with significant exfoliating and anti-inflammatory effects [J]. Plants, 2025, 14(10): 1535.
- [19] 魏宣彪, 刘桂敏, 吴兆亮, 等. pH对酪蛋白/十二烷基硫酸钠体系泡沫性能及泡沫分离酪蛋白的影响 [J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(6): 949-953.
WEI Xuanbiao, LIU Guimin, WU Zhaoliang, et al. The effect of pH on foam properties of casein/sodium dodecyl sulfate system and on foam separation of casein [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2010, 24(6): 949-953. (in Chinese)
- [20] JURADO GONZALEZ P, SÖRENSEN P M. Characterization of saponin foam from *Saponaria officinalis* for food applications [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105541.
- [21] YEKEEN N, MALIK A A, IDRIS A K, et al. Foaming properties, wettability alteration and interfacial tension reduction by saponin extracted from soapnut (*Sapindus Mukorossi*) at room and reservoir conditions [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107591.
- [22] ALMUTAIRI M S, ALI M. Direct detection of saponins in crude extracts of soapnuts by FTIR [J]. Natural Product Research, 2015, 29(13): 1271-1275.
- [23] CHEN C, LI R, LI D, et al. Extraction and purification of saponins from *Sapindus mukorossi* [J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(2): 952-960.
- [24] WEI M P, QIU J D, LI L, et al. Saponin fraction from *Sapindus mukorossi* Gaertn as a novel cosmetic additive: Extraction, biological evaluation, analysis of anti-acne mechanism and toxicity prediction [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 268: 113552.