

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20212007044

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



薰衣草精油微胶囊制备及其性能研究

学 位 申 请 人	苗 慧
指 导 教 师	党 艳 艳 (教 授)
申 请 学 位 类 别	理 学 硕 士
专 业 名 称	化 学
研 究 方 向	农 林 废 弃 物 资 源 化 利 用
所 在 学 院	化 学 化 工 学 院

中国·新疆·石河子

2025 年 6 月

分类号:

密 级: 公开

学 号: 20212007044

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



薰衣草精油微胶囊制备及其性能研究

学 位 申 请 人	苗 慧
指 导 教 师	党 艳 艳 (教 授)
申 请 学 位 类 别	理 学 硕 士
专 业 名 称	化 学
研 究 方 向	农 林 废 弃 物 资 源 化 利 用
所 在 学 院	化 学 化 工 学 院

中国 · 新疆 · 石河子

2025 年 6 月

**Preparation and Characterization of Lavender Essential Oil
Microcapsules**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Natural Science

By

Hui Miao

(Resource utilization of agricultural and forestry wastes)

Dissertation Supervisor: Prof. Yanyan Dang

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：苗慧

时间：2025年5月29日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：苗慧

时间：2025年5月29日

导师签名：



时间：2025年5月29日

摘要

薰衣草精油 (Lavender Essential Oil, LEO) 作为一种天然活性成分, 具有抗氧化、抑菌及神经调节等多种生物活性。然而, 由于其易挥发、水溶性差以及化学性质不稳定等问题, 限制了其在食品、医药等领域的广泛应用。同时, 薰衣草渣作为 LEO 提取后的主要副产物, 其果胶成分尚未得到充分利用, 导致了资源浪费。研究表明, 通过微胶囊化技术可以显著提高精油的稳定性, 为此, 本研究以薰衣草渣为原料, 研究了果胶的提取工艺, 并以果胶、蛋白、多糖为壁材, 采用复合凝聚法制备薰衣草精油微胶囊, 并对微胶囊的性能及应用进行研究。具体研究内容如下:

(1) 薰衣草果胶提取及薰衣草精油微胶囊的制备研究。采用超声辅助法从薰衣草渣中提取果胶, 当提取温度为 60°C、提取时间 60 min、料液比 1:35 时, 果胶得率为 22.22%。在此基础上, 考察酪蛋白酸钠 (SC)-果胶 (LP)-薰衣草精油微胶囊 (SPL mps) 的制备工艺, 当壁材浓度 2.5% (SC 与 LP 的质量比为 5:1), 芯壁比 1:1, pH 为 4.44, 反应温度 45°C 时, LEO 的包埋率和载油率分别为 76.11% 和 37.41%。分析表明 SPL mps 平均粒径为 9.2 μm , 壁材与精油通过静电和强氢键作用结合。SPL mps 的性能测试表明, 25°C 储藏 14 天, LEO 的累积释放率为 30.92%, 在 100°C 保持 60 min 后, LEO 的保留率达 58.49%。SPL mps 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 均具有较好的抑菌效果, 较 LEO 的抑菌能力分别提升了 15.9% 和 11.7%。

(2) 酪蛋白酸钠-果胶-壳聚糖 (CS)-薰衣草精油微胶囊 (SPCL mps) 的制备及性能研究。为了进一步提高精油的稳定性和抑菌效果, 添加 CS 制备 SPCL mps。当 CS 添加量为 30%、pH 为 4.5、温度为 50°C, 转速为 450 r/min 时, LEO 的包埋率和载油率为 78.67% 和 38.71%。分析表明 SPCL mps 平均粒径为 14.4 μm , CS 通过静电作用进一步增强了壁材间的相互作用。SPCL mps 的性能测试表明, SPCL mps 在 25°C 储存 14 d 后的释放率较 SPL mps 降低 4.39%, 在 100°C 保持 60 min 后, LEO 的保留率高达 69.24%, 较 SPL mps 提高了 18.4%。一级动力学模型 ($R^2 > 0.99$) 拟合表明其缓释行为符合扩散控制机制。SPCL mps 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌效果较 SPL mps 分别提高了 6.8% 和 9.5%。

(3) 薰衣草精油微胶囊在蟠桃保鲜和纺织品抑菌中的应用。将 SPL mps 和 SPCL mps 应用于蟠桃保鲜和棉织物整理。蟠桃保鲜实验结果表明, SPL mps 和 SPCL mps 能够有效延长蟠桃的贮藏时间: 在室温条件下延长 4~8 天, 在冷藏条件下延长 10~20 天。棉织物抗菌测试结果表明: SPCL mps 整理后的棉织物对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为 85.9% 和 89.1%, 且透气性 (降低 18.3%) 和透湿性 (降低 12.7%) 变化均在标准范围内。

关键词: 薰衣草精油; 果胶; 微胶囊; 抑菌; 保鲜

Abstract

Lavender Essential Oil (LEO), as a natural bioactive component, exhibits diverse biological activities including antioxidant, antibacterial, and neuroregulatory properties. However, its broad application in food, pharmaceutical, and related fields is limited by challenges such as high volatility, poor water solubility, and chemical instability. Additionally, lavender residues, the primary byproduct of LEO extraction, contain underutilized pectin components, leading to resource waste. Studies indicate that microencapsulation technology can significantly enhance the stability of essential oils. This research utilizes lavender residues as raw material to investigate pectin extraction and employs complex coacervation with pectin, protein, and polysaccharide as wall materials to prepare LEO microcapsules, followed by an evaluation of their performance and applications. The specific research contents are as follows:

(1) Extraction of Lavender Pectin and Preparation of LEO Microcapsules. Pectin was extracted from lavender residues using ultrasound-assisted methods under optimal conditions (60°C, 60 min, solid-to-liquid ratio of 1:35), yielding a pectin extraction rate of 22.22%. Sodium caseinate (SC)-pectin (LP)-LEO microcapsules (SPL mps) were prepared by optimizing process parameters: wall material concentration of 2.5% (SC:LP mass ratio = 5:1), core-to-wall ratio of 1:1, pH 4.44, and reaction temperature of 45°C. Under these conditions, the encapsulation efficiency and oil loading capacity of LEO reached 76.11% and 37.41%, respectively. Characterization revealed an average particle size of 9.2 μm for SPL mps, with wall materials and LEO bound via electrostatic interactions and strong hydrogen bonding. Stability tests demonstrated that SPL mps achieved a cumulative LEO release rate of 30.92% after 14 days of storage at 25°C and retained 58.49% of LEO after 60 min at 100°C. SPL mps exhibited enhanced antibacterial activity against *E. coli* and *S. aureus*, with efficacy improvements of 15.9% and 11.7%, respectively, compared to free LEO.

(2) Preparation and Performance of Sodium Caseinate-Pectin-Chitosan (CS)-LEO Microcapsules (SPCL mps). To further improve stability and antibacterial efficacy, chitosan (CS) was incorporated into the wall materials. SPCL mps were optimized at 30% CS addition, pH 4.5, 50°C, and 450 r/min, achieving EE and OLC values of 78.67% and 38.71%, respectively. The average particle size increased to 14.4 μm , attributed to enhanced electrostatic interactions between CS and other wall materials. SPCL mps showed superior performance: LEO release rate decreased by 4.39% compared to SPL mps after 14 days at 25°C, and LEO retention reached 69.24% after 60 min at 100°C, representing an 18.4% improvement over SPL mps. Release kinetics fitting to a first-order model ($R^2 > 0.99$) indicated a diffusion-controlled mechanism. Antibacterial efficacy against *E. coli* and *S. aureus* increased by 6.8% and 9.5%, respectively, compared to SPL mps.

(3) Application of LEO Microcapsules in Flat Peach Preservation and Textile Antibacterial Treatment. SPL mps and SPCL mps were applied to flat peach preservation and cotton fabric modification. Preservation tests demonstrated that both microcapsules effectively extended shelf life: by 4–8 days at room temperature and 10–20 days under refrigeration. Antibacterial cotton fabric treated with SPCL mps achieved inhibition rates of 85.9% and 89.1% against *E. coli* and *S. aureus*, respectively, while maintaining acceptable changes in air permeability (18.3% reduction) and moisture permeability (12.7% reduction) within standard limits.

Key words: Lavender essential oil; pectin; microcapsule; antibacterial; preservation

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 文献综述.....	1
1.1 薰衣草概述.....	1
1.1.1 薰衣草资源分布与产业现状.....	1
1.1.2 薰衣草活性成分及其功能特性.....	1
1.1.3 薰衣草副产物资源化利用现状.....	3
1.2 果胶概述.....	3
1.2.1 果胶的提取方法.....	4
1.2.2 薰衣草果胶利用现状.....	6
1.3 精油微胶囊化技术研究现状.....	6
1.3.1 微胶囊技术制备方法.....	6
1.3.2 复合凝聚法制备精油微胶囊壁材的选择.....	8
1.3.3 精油微胶囊应用.....	10
1.4 研究内容与意义.....	12
第 2 章 薰衣草果胶提取、SPL mps 的制备及性能研究.....	13
2.1 材料与仪器.....	13
2.2 实验方法.....	14
2.2.1 薰衣草果胶理化指标测定.....	14
2.2.2 薰衣草果胶的提取.....	15
2.2.3 超声辅助法提取薰衣草果胶工艺优化.....	16
2.2.4 复合壁材的筛选.....	16
2.2.5 SPL mps 的制备及影响因素考察.....	17
2.2.6 SPL mps 的分析表征.....	18
2.2.7 SPL mps 的性能测试.....	19
2.3 结果与讨论.....	20
2.3.1 薰衣草果胶的提取及工艺优化.....	20
2.3.2 SPL mps 的制备及影响因素考察.....	24
2.3.3 SPL mps 的结构表征.....	28
2.3.4 SPL mps 的性能分析.....	33
2.4 小结.....	35

第 3 章 SPCL mps 的制备及性能研究	36
3.1 材料与仪器	36
3.2 实验方法	37
3.2.1 SPCL mps 的制备及影响因素考察	37
3.2.2 SPCL mps 的结构表征	37
3.2.3 SPCL mps 的性能测试分析	38
3.3 结果与讨论	38
3.3.1 SPCL mps 的制备及影响因素考察	38
3.3.2 SPCL mps 的结构表征	39
3.3.3 SPCL mps 的缓释性能及释放动力学分析	44
3.3.4 SPCL mps 的高温保存率分析	47
3.3.5 SPCL mps 的抑菌性能分析	47
3.4 小结	48
第 4 章 薰衣草精油微胶囊的抑菌应用	49
4.1 材料与仪器	49
4.2 实验方法	50
4.2.1 蟠桃保鲜剂的制备	50
4.2.2 抗菌棉织物的制备	50
4.3 分析方法	50
4.3.1 蟠桃保鲜指标的测定	50
4.3.2 抗菌棉织物的测试和性能分析	50
4.4 结果与讨论	52
4.4.1 薰衣草精油微胶囊对蟠桃的保鲜效果	52
4.4.2 薰衣草精油微胶囊在纺织品中的应用	56
4.5 小结	60
第 5 章 结论与展望	61
5.1 结论	61
5.2 展望	62
参考文献	63
致谢	73
作者简介	74

第1章 文献综述

1.1 薰衣草概述

1.1.1 薰衣草资源分布与产业现状

薰衣草 (*Lavandula angustifolia* Mill.) 又名香水植物、灵香草、香草、黄香草、拉文德, 属多年生唇形科薰衣草属亚灌木植物。薰衣草广泛分布于温带及地中海地区, 法国、英国、美国、澳大利亚和中国等国家为其主产区^[1,2]。中国新疆伊犁地区凭借其独特的自然条件, 适宜的气候、肥沃的土壤、丰富的水资源和充足的阳光与规模化种植技术, 现已成为全球最大的薰衣草生产基地之一。经相关统计数据显示, 薰衣草的种植面积超过 8 万亩, 而其精油的年产量约为 10 万公斤, 占据了全国总产量的 95% 以上^[3]。然而, 当前薰衣草产业仍面临两大挑战: 一是精油提取率低 (仅占干花质量的 1.5%), 资源利用率不足; 二是副产物 (薰衣草渣) 处理低效, 年产生量超百万吨, 多以焚烧或填埋为主, 造成严重的环境压力与经济浪费^[4]。因此, 开发薰衣草全组分高值化利用技术, 已成为推动产业可持续发展的关键。

薰衣草的主要用途之一是提取精油, 具有缓解压力、改善睡眠、舒缓焦虑和紧张情绪的效果。此外, 薰衣草还具有一定的药用价值, 如抗菌、抗氧化、消炎和促进血液循环等功效, 常用于治疗头痛、失眠和消化不良等问题。薰衣草的花朵也可以用于制作茶、糖果、饼干等食品, 赋予其独特风味。同时, 薰衣草因其美丽的紫色花朵和浓郁香气, 广泛用于花坛和花园的观赏种植。干燥后的薰衣草常被用来制作香包、干花等装饰品。此外, 薰衣草的香气对一些害虫, 尤其是蚊子, 具有显著的驱除效果。总之, 薰衣草作为一种多功能植物, 已广泛应用于香料、精油、药品、食品和观赏等多个领域^[5,6]。随着国内种植面积的不断扩大, 薰衣草产业在中国的经济价值逐渐凸显, 尤其在新疆等地, 已成为农民增收的重要来源之一。

1.1.2 薰衣草活性成分及其功能特性

薰衣草富含精油、黄酮类化合物、酚酸类物质以及多糖等多种活性成分, 这些成分的协同作用赋予了薰衣草抗氧化、抗菌、抗炎以及神经调节等多种生物活性^[7]。

(1) 薰衣草精油

薰衣草精油 (Lavender Essential Oil, LEO) 是一种从薰衣草的不同部分 (包括花、

茎、叶和种子等)中提取的油性物质,通常其浓度在2~3%之间,且精油的颜色为明亮的黄色^[7]。主要成分为芳樟醇(30~50%)和乙酸薰衣草酯(20~40%),并含薰衣草醇、香叶醇、1,8-桉叶素、樟脑、罗勒烯等成分^[8]。这些成分赋予LEO多种生物活性功能,包括杀菌、清除自由基^[9]、预防心血管疾病、抗动脉粥样硬化、改善心血管健康、抗肿瘤^[10]等作用。

LEO具有显著的抗菌活性及抗氧化活性。研究显示,LEO通过破坏微生物细胞膜完整性,对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)表现出强抑制作用^[11],MIC为0.5 $\mu\text{L/mL}$,抑菌圈直径为(29.2 \pm 0.1) mm,优于庆大霉素(26.5 \pm 0.3) mm; Kwiatkowski等^[12]进一步发现,LEO可增强盐酸奥替尼啶对MRSA菌株的敏感性,其有作为抗生素增效剂的潜力。此外,LEO在抗氧化方面也表现出显著的效果,当LEO浓度是100 mg/mL时,清除DPPH自由基率达70.33%,其机制涉及酚羟基对自由基的直接中和及Nrf2-ARE通路介导的抗氧化酶(SOD、CAT)激活^[13]。动物实验表明,LEO可恢复肾缺血再灌注损伤大鼠的抗氧化酶活性,使肾组织MDA水平降低45%,病理损伤减轻^[14]。此外,临床研究证实LEO的还具有多维生物活性。如,Bradley等^[14]发现LEO在抗焦虑方面的功效与地西洋相当;Dehkordi等^[15]报道吸入LEO可使原发性痛经患者疼痛评分降低52%,经血量减少30%。

(2) 薰衣草中黄酮类化合物

薰衣草中的黄酮类化合物主要以槲皮素、山奈酚及其糖苷衍生物为主。黄梅桂等^[16]以薰衣草残渣为原料提取黄酮,黄酮纯化物总抗氧化能力最大值为86.32%。此外,黄酮化合物还具有抗血栓、抗光损伤、降糖等生物活性^[17,18],槲皮素可通过抑制 α -葡萄糖苷酶(IC_{50} =12.3 μM)延缓碳水化合物吸收,并阻断血小板P2Y₁₂受体减少血栓形成^[19]。研究还发现,蒸馏提取精油后薰衣草秸秆与青贮混合,类黄酮含量显著提高,动物生长发育有积极效果^[14]。

(3) 薰衣草中酚酸类化合物

薰衣草中的酚酸类化合物以绿原酸、迷迭香酸和咖啡酸为主要代表,其中绿原酸与迷迭香酸经实验验证具有显著的多重生物效应,具体体现在抑制炎症反应、清除自由基导致的氧化损伤以及调节过敏反应机制等方面^[20]。李紫薇等^[16]发现薰衣草中绿原酸可以通过抑制NF- κ B核转位及MAPK磷酸化,使LPS诱导的巨噬细胞TNF- α 分泌量下降58%,起到抗炎效果;谭为等^[21]发现薰衣草迷迭香酸可降低高脂血症大鼠血清LDL-C水平35%,主动脉斑块面积减少42%,具有预防心血管疾病的作用。

(4) 薰衣草中糖类化合物

植物源性多糖作为重要的生物活性成分，其免疫调节与抗炎功能已受到广泛关注。Georgiev 等^[22]研究发现薰衣草多糖 L1 和 L2 组分能增强中性粒细胞 β_2 -整合素的表达，诱导 ROS 和巨噬细胞 NO 的生成，具有调节免疫的功能。Cao L 等^[23]采用超声辅助法低温提取薰衣草多糖，基于斑马鱼胚胎炎症模型开展功能验证，表明斑马鱼中性粒细胞显著减少并证实其潜在的抗炎活性^[24]。Yordan 等^[24]从薰衣草废渣中分离出多糖化合物，发现该多糖具有免疫调节功能，能够刺激全血吞噬细胞离体产生 ROS，并显示出对正常细胞和 A549、HeLa 和 LS180 肿瘤细胞的非特异性体外抗增殖活性，可用于支持免疫系统受损。

1.1.3 薰衣草副产物资源化利用现状

为了高效提取精油，目前最常使用的提取方式有水蒸气蒸馏法、超临界 CO₂ 萃取法、有机溶剂萃取法、超声波辅助萃取法、微波辅助萃取法等^[25]。传统水蒸气蒸馏法因高温条件（100~120℃）会导致废渣中热敏性成分降解，进而加剧副产物的成分损失；超临界 CO₂ 萃取法（40~60℃、20~30 MPa）可保留更多活性物质（如薰衣草醇、乙酸芳樟酯等）^[26]。Liu 等^[27]采用微波辅助法从薰衣草中提取精油，精油收率为 3.19%。与传统蒸馏法相比，微波辅助法具有节省能源和提取时间的优势。

尽管目前 LEO 提取技术已较为成熟，但不可避免还是会产生较多副产物，比如黄梅桂等^[16]发现每提取 1 kg 精油约产生 100 kg 固体废渣。在我国主要薰衣草产区伊犁州，年均可产生废弃秸秆超百万吨^[28]。薰衣草副产物中富含黄酮类、多酚及果胶等生物活性物质，但大多数仍被当作废弃物处理^[29]，少部分被用作饲料或肥料，造成资源的浪费。因此，亟需探索更加高效和可持续的利用途径，以最大化这些副产物的经济和环境效益。

1.2 果胶概述

果胶是一种从植物细胞壁和中间层中提取的天然的阴离子水溶性线性多糖。果胶中主要包含 4 种结构区域，分别是聚半乳糖醛酸聚糖（HG）、鼠李半乳糖醛酸聚糖 I（RG-I）、鼠李半乳糖醛酸聚糖 II（RG-II）和木糖半乳糖醛酸聚糖（XGA）^[30-34]，如图 1-1 所示。

果胶通常通过酯化程度（Degree of Esterification, DE）或甲氧基的取代数量来区分。DE 值是甲酯化的半乳糖醛酸残基在总半乳糖醛酸残基中的比例，影响果胶的凝胶化能力。DE 值超过 50%的为高甲氧基果胶，低于 50%的为低甲氧基果胶^[35]。高甲基果胶的胶凝机制基于疏水作用和氢键^[36]。低甲基果胶在钙离子存在下形成凝胶^[37]。DE 值

决定了果胶的凝胶化机制、分子构象及流变学特性^[38]。通过调节 DE 值，可根据需求选择合适的果胶类型，广泛应用于食品、药物传递和其他领域。

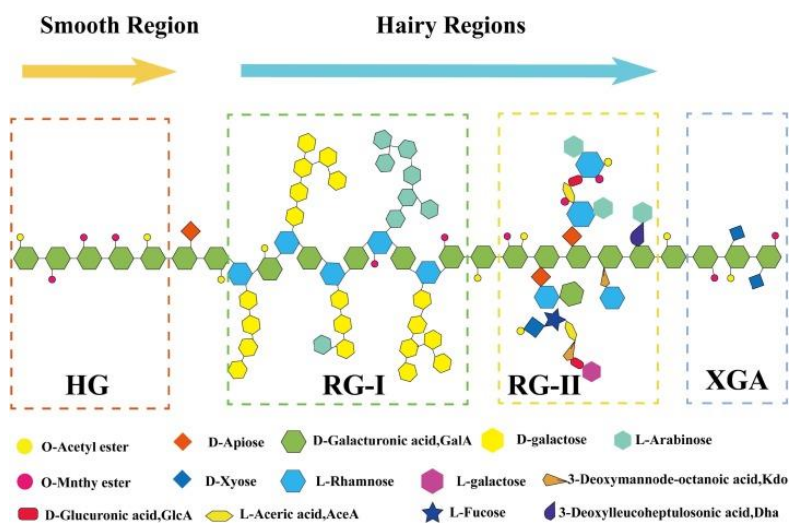


图 1-1 果胶结构图^[39]

Fig. 1-1 Structure of pectin

果胶通常在食品工业中用作胶凝剂、增稠剂、稳定剂和乳化剂，可以添加到果酱、果汁、甜点、乳制品和果冻等食品中改良质地和口感。果胶可以用作食品添加剂服用不存在安全问题，也不受可接受每日摄入量数值限制^[40]。

果胶是一种具有良好健康效应的多糖，果胶具有成膜的特性可作为生物材料用于药物输送、伤口愈合等方面。Mohammad 等^[41]发现具有果胶寡糖涂层的复合材料表现出显著的细胞毒性，在 48°C 下暴露 2 h 内能破坏高达 98.8% 的癌细胞。这种具有抗癌特性的多功能生物活性玻璃基涂料可应用于生物医学领域。Nešić 等^[42]研究了与海藻酸盐混合并与铜离子交联的果胶基薄膜，该薄膜能抑制镰刀菌和曲霉植物病原体的生长，并对小麦的发芽和生长表现出无植物毒性，可作为植物保护可生物降解叶面喷雾应用于在农业领域。

此外，果胶还具有较好的重金属吸附作用，常被用作重金属吸附剂，Diana 等^[43]把果胶用作絮凝剂处理被金属离子污染的合成废水，测定出 0.019 mg/mL 的剂量已去除废水中 99% 金属离子，果胶表现出优异的去除重金属的能力。随着研究的不断深入，果胶越来越多的用途被发现，其发展潜力巨大，具有广阔的市场前景。

1.2.1 果胶的提取方法

果胶的物理、化学和功能特性受到原料来源、品种及提取方法的影响，因此不同类型的果胶具有不同性能。主要提取方法包括酸提取法、微波辅助提取法、酶提取法和超声波辅助提取法，这些方法对果胶的溶解度、凝胶特性及生物活性有不同影响。

(1) 酸提取法 (CE)

酸提取法的原理是利用果胶在酸性溶液中的可溶性,用稀酸将果皮细胞中的非水溶性原果胶转化成水溶性果胶,再加入乙醇或多价金属盐类,使果胶沉淀析出[39]。常用的酸有盐酸、硫酸、硝酸等无机强酸。酸法提取工艺操作简单、条件易控制。但无机强酸的酸性和腐蚀性都较强,提取时果胶分子被降解,且产生的大量提取废液对污染环境危害较大,易造成农业面源污染。Cristiane 等^[44]用 HNO₃ 和柠檬酸从刺槐果皮中提取果胶,以 HNO₃ 为溶剂在 pH 1.5 下提取 2 h 的果胶产率最高为 14.2%。

(2) 超声辅助提取法 (UAE)

利用超声波的空化效应对组织细胞产生瞬时破坏作用从而实现果胶的有效提取,与酸法结合时效果更好,能够实现低耗能的果胶高效提取。酸提取法需要大量的提取溶剂和提取时间,而 UAE 具有提取时间短、提取效率高和提取溶剂用量少等优点^[45]。Divyani 等^[46]采用 UAE 从柑橘中提取果胶,在 40℃、pH 1.9、超声 24 min 的条件下,果胶产率为 28.82%,并表现出高抗氧化性和热稳定性。Wang 等^[47]采用 UAE 和 CE 两种不同方法提取柚子皮果胶,与 CE 相比,UAE 表现出较低且分布更集中的分子量,其抗氧化活性和脂肪酶抑制能力都显著增强。

(3) 微波辅助提取法 (MAE)

微波属于非电离辐射,频率在 300 MHz 至 300 GHz 之间。微波辅助提取法是一种新型的提取技术,是将微波与传统提取方法结合,将所需的化合物从样品中分离出来并进入溶剂,然后再进行分离等其他步骤。此方法具有操作时间短、能耗低、所需溶剂少等特点。Lefsih 等人^[48]使用 MAE 方法从无花果中提取果胶,在提取时间 16 min, pH 值为 2.26,微波功率为 517 W,信噪比为 2 g/30.66 mL 时,果胶收率最高为 12.56%。Sarah 等^[49]采用 MAE 从可可豆壳中提取果胶,最佳条件为时间 30 min、微波功率 450 W、温度为 104℃,测得果胶产率为 21.10%。

(4) 酶提取法 (EAE)

酶提取法是利用酶的专一性及高效性进行果胶提取的方法。植物细胞中,原果胶与纤维素等物质紧密结合,利用酶分解植物细胞中的纤维素、半纤维素等物质,使原果胶从植物细胞中分离出来,有利于原果胶转化为水溶性果胶。此方法提取条件温和,无污染、获得的果胶质量高,是一种绿色环保的提取方式。Yang 等^[50]用酶法超声联合高效提取剑麻废料中的果胶,先用酶后超声处理的果胶产率达到了 31.1%,比超声后用酶处理的果胶产量高得多,为 14.6%。且使用酶法超声联合提取获得的果胶表现出更高的半乳糖醛酸含量 (62.88%) 和更高的酯化程度 (49.64%)。Yuliarti 等^[51]比较了从黄

金猕猴桃果渣中提取果胶的不同方法。结果表明，猕猴桃果渣的酶法提取果胶产量最高为4.5%。

1.2.2 薰衣草果胶利用现状

果胶存在于所有植物中，在柑橘皮、柠檬皮和柚子皮中最为丰富，其中，柑橘皮和苹果渣是商业果胶的主要来源^[52]。然而，随着对果胶需求的不断增长及对资源可持续利用的重视，探索新的果胶来源变得尤为重要。来自其他水果和蔬菜的加工废料，如甜菜浆、香蕉皮^[53]、西瓜皮^[54]等水果果皮和蔬菜副产品中提取果胶。一方面，有助于提高果皮废渣资源利用率，减少环境污染，符合循环经济和绿色发展的理念；另一方面，有助于拓宽果胶的原料来源，减少对柑橘皮和苹果渣等传统原料的依赖，从而增强果胶市场的稳定性和可持续性。

目前，薰衣草渣果胶的研究较少，而其作为薰衣草利用完精油仍能有效的从薰衣草渣中提出取来的副产物，如果能够开发并加以利用，不仅能够提高薰衣草工业生产副产物的经济价值和缓解薰衣草渣废弃物对环境的污染，而且能够实现资源化利用。

1.3 精油微胶囊化技术研究现状

微胶囊技术旨在封装活性成分，解决有效组分流失问题。有效的包封有利于控制挥发速率和降解，延长感官特性，提高活性物质的稳定性^[55]。将薰衣草油微胶囊化处理，能提高其稳定性，同时，薰衣草果胶作为壁材还可使薰衣草成分得到充分利用，解决薰衣草资源浪费问题，提升薰衣草废渣的附加值，拓宽其应用宽度和深度^[56]。

1.3.1 微胶囊技术制备方法

微胶囊技术（Microcapsule）是一种通过高分子成膜物质将固体、液体或气体包裹在微米级保护壳内的封装技术。这种技术有效地隔离芯材与外界环境，减少外界因素对芯材的影响，特别适用于保护敏感物质，提高生物利用度。

微胶囊技术可实现芯材的智能控释，通过感知外界环境变化触发释放机制，从而确保芯材在特定刺激条件下实现可控的持续释放。如温敏型^[57]、pH 响应型^[58]、生物响应型^[59]等响应机制型微胶囊。此外，微胶囊还能将物质从液态或气态转为固态，便于存储与运输，同时改善芯材的溶解性和流动性。Yousaf 等^[60]以乙醇为溶剂，采用溶剂蒸发法和喷雾干燥技术制备了一种新型自由流动的载有非诺贝特的明胶微胶囊制剂，与疏水性药物粉末相比，所有制剂都表现出良好的水溶性和溶出度。通过选择合适的

制备方法，可以满足不同需求。微胶囊的制备方法分为物理法、化学法和物理化学法^[61]，常见微胶囊制备方法的优缺点见表 1-1。

1-1 常见微胶囊制备方法及其优缺点

1-1 Advantages and disadvantages of common microcapsule preparation methods

分类	制备方法	优点	缺点
物理法	喷雾干燥法	操作简单、重复性好且易于放大	设备要求较高，生产成本较高，并且形成的微胶囊粒径较大，难以控制释药率 ^[62]
	静电结合法		
	乳液聚合法		
化学法	分子包埋法	操作简单、工艺条件成熟，影响因素多且可控性强	受限于温度，对于芯材的选择严格
	界面聚合法		
	锐孔-凝固浴法		
物理化学法	溶剂法	制备过程简单，且微胶囊化程度高	复合凝聚层对 pH 值和离子强度较为敏感 ^[63]
	凝聚法		

鉴于精油成分复杂且易受光、热、氧等因素影响，现有包埋技术主要围绕提高包埋率与稳定性展开。精油微胶囊制备方法主要包括：（1）喷雾干燥法：精油与壁材混合均匀后通过喷雾干燥设备将混合物喷雾成微小液滴，液滴中的溶剂迅速蒸发，形成微胶囊，具有设备简单、易于大规模生产、成本较低等优点，是目前最常用的精油包埋方法之一^[64]；（2）分子包埋法：利用 β -环糊精等分子对精油进行包埋，形成分子包合物。这种方法可以较好地保留精油的香气和生物活性成分；（3）复合凝聚法：一种简单、温和且低成本的微胶囊化技术，通过复合凝聚使活性成分被封装在聚合物中，增强了被封装物质在加工贮藏过程中的化学稳定性，有效减少挥发性物质逸散及氧化降解。相较于其他微胶囊化方法，复合凝聚法适用于热敏性和氧化敏感性成分的封装。Bertrand 等^[65]采用明胶-果胶体系包埋肉桂醛，显著提升其热稳定性；Qiu 等人^[66]采用绿豆蛋白-杏仁胶复凝聚包埋玫瑰精油，不仅使抗氧化活性保留率达 89.2%，提高了其抗氧化性和缓释特性。

复合凝聚法通过带相反电荷的分子在特定 pH 下的静电中和作用形成致密凝聚相，实现芯材包埋。其驱动力还包括氢键和疏水作用^[67-69]。复合凝聚微胶囊的制备工艺如图 1-2，通常包括四个主要步骤：（1）制备生物聚合物水溶液。将至少两种生物聚合物（如蛋白质和多糖）溶解于水溶液中，溶液的温度一般高于蛋白质的凝胶温度，pH 值高于蛋白质的等电点^[70]。pH 值对蛋白质和多糖的电荷特性至关重要，促使复聚物形成；（2）混合疏水性芯材与生物聚合物水溶液。将疏水性核心物质与生物聚合物水溶液混合，通过均质化形成稳定乳液，确保微胶囊的结构完整性和核心物质的保护；（3）