

食源性乳化剂对植物精油稳定性作用的研究进展

杨沁妮¹, 李德海^{1,2*}, 王璐¹, 王鹏³, 窦艳华¹

(1. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

(2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

(3. 华迪集团有限公司, 北京 100195)

摘要: 植物精油具有良好的抑菌和抗氧化等生物活性, 是天然保鲜剂、抗氧化剂等绿色添加剂的优质来源。但植物精油由于分子量小、非极性结构占比大等特点而存在易挥发、难溶于水等缺点, 导致其在实际应用中受到限制。目前, 乳化和包埋等技术手段为解决上述问题提供了研究方向, 但在研究过程中筛选具有良好乳化性、成膜性和安全性的材料是解决植物精油问题的关键点。研究发现蛋白质、淀粉、纤维素、脂质等食源性的大分子物质在改善植物精油挥发性和弱亲水性方面具有潜在优势。因此本文综述了植物精油来源及主要活性成分, 重点阐述了食源性的大分子物质对植物精油的乳化机制及其应用, 总结了食源性乳化剂改善植物精油稳定性研究存在的问题和研究方向, 为开发植物精油保鲜剂和抗氧化剂提供参考。

关键词: 植物精油; 食源性乳化剂; 稳定性; 机制; 溶解性

文章编号: 1673-9078(2025)02-395-406

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.1323

Research Progress on the Effects of Food-based Emulsifiers on the Stability of Plant Essential Oils

YANG Qinni¹, LI Dehai^{1,2*}, WANG Lu¹, WANG Peng³, DOU Yanhua¹

(1. School of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

(2. Key Laboratory of Forest Food Resource Utilization in Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

(3. Huadi Group Co. Ltd., Beijing 100195, China)

Abstract: Plant essential oils have good biological activities such as antibacterial and antioxidant activities, and are an excellent source of green additives such as natural preservatives and antioxidants. However, due to the characteristics of small molecular weight and large proportion of non-polar structure, plant essential oils have drawbacks such as highly volatile nature and insolubility in water, which limits their practical uses. Currently, technical techniques like emulsification and encapsulation provide research directions for solving the above-mentioned issues; Nevertheless, the crucial step in resolving the problems of plant essential oils is to screen materials with good emulsifying property, film-forming capacity, and safety in the research process. It was found that food-derived macromolecules, including proteins, starch, cellulose,

引文格式:

杨沁妮, 李德海, 王璐, 等. 食源性乳化剂对植物精油稳定性作用的研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 395-406.

YANG Qinni, LI Dehai, WANG Lu, et al. Research progress on the effects of food-based emulsifiers on the stability of plant essential oils [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 395-406.

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 国家级大学生创新创业训练项目(202310225165); 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2022C007, C2015062); 黑龙江省高等教育教学改革项目(SJGY20210021)

作者简介: 杨沁妮(2003-), 女, 本科, 研究方向: 植物有效成分的应用, Email: 15956550963@163.com

通讯作者: 李德海(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品化学及植物有效成分, Email: lidehaineau@163.com

and lipids, have potential advantages in improving the volatility and weak hydrophilicity of essential oils. Therefore, this paper reviews the sources and major active components of plant essential oils, focuses on the emulsification mechanism and applications of food-derived macromolecules on plant essential oils, and summarizes the existing problems and research directions for improving the stability of plant essential oils by using food-derived emulsifiers, so as to provide a reference for the development of plant essential oil preservatives and antioxidants.

Key words: plant essential oils; food-borne emulsifiers; stability; mechanism; solubility

植物精油是从花、果实、种子、茎和叶等芳香植物材料中提取的具有特征气味的各种挥发性化合物的混合物^[1]。植物精油中含有环氧乙烷、丰富的萜烯类等成分,具有延缓氧化反应、减少自由基形成和抑制食源性致病菌生长的作用^[2,3]。因此植物精油作为天然抗菌剂和抗氧化剂在食品中的研究日渐广泛,市场价值逐年稳步增长。根据中研普华产业研究院 (<https://zeropower.chinairm.com/>) 发布的《2024-2029年精油行业风险投资态势及投融资策略指引报告》显示:我国精油行业处于快速发展阶段,行业发展前景良好,预计2023年精油产业总体产能规模达到12.73万t,同比增长7.51%,市场潜力表现巨大,预计2028年中国精油行业产量规模达到17.14万t,同比增长8.75%。预计2028年中国精油行业消费量达到19.01万t,同比增长9.12%。

植物精油应用前景虽广阔,但其高挥发性、难溶于水、对光和氧的敏感性等缺点限制了其应用^[4]。目前,植物精油所存在的问题可以通过使用乳化剂、微胶囊等克服^[5]。在常用的食品乳化剂大多为吐温、司班等添加剂,在一定范围内使用对人体无害,但

过量食用对健康有很大影响,可能会导致肠道功能障碍^[6]。食源性乳化剂能够满足消费者对天然、可持续、健康的乳化剂的需求,其可作为人体必需的营养素被利用。与合成乳化剂能够自发形成乳液不同,食源性乳化剂由于分子量大,一般采用高能方法形成乳液^[7],如在植物精油乳化和包埋过程中,通常使用超声波、高压均质、高速均质和微射流等高能乳化方法^[8]。此外为了提高食源性乳化剂对植物精油的稳定效果,将食源性物质改性或复合后对植物精油进行乳化或包埋。本文概述了食源性乳化剂的来源、作用机理及在植物精油领域的具体应用为缩小植物精油和普通乳化剂的局限性提供理论依据。

1 植物精油的来源与应用

作为植物香气主要来源的植物精油是挥发性的天然复杂化合物,具有强烈的气味,广泛分布在自然界的植物中,是芳香植物形成的次级代谢产物^[9]。植物精油中的活性成分一般是植物生长过程中合成的次生代谢产物,主要是萜类化合物、醇类化合物、醛类、酮体和酚类等^[10],这些植物精油被广泛运用于食品、化妆品和医疗等领域^[11]。具体见表1所示。

表1 部分植物精油研究现状

Table 1 Current status of research on essential oils of selected plants

精油种类	来源	主要部位	主要成分	应用	参考文献
牛至精油 [Essential Oil form <i>Origanum vulgare</i> L.]	牛至全草		香芹酚、百里香酚、丁香酚、 γ -松油烯、 α -蒎烯、D-柠檬烯、石竹烯等	牛至精油加入牛肉,改善牛肉质量,提高了肌肉的保水能力和抗氧化能力并保持肉色,改善了脂肪酸的组成和比例。	[12,13]
百里香精油 [Essential Oil form <i>Thymus mongolicus</i> (Ronniger)]	百里香茎叶		百里香酚、香荆酚、对-聚伞花素、桉树脑等	百里香精油多用于肉制品、新鲜果蔬、奶酪等食品中,含有百里香精油的纤维膜可抑制耐高温大肠菌群在冷藏托盘上肉类中的生长,且抗氧化能力强。	[13-16]
紫苏精油 [Essential Oil form <i>Perilla frutescens</i> (L.) Britt.]	紫苏叶		紫苏酮、4-(2-甲基环己-1-烯)-2-丁烯醛、乙酸冰片酯、 β -芳樟醇、 β -石竹烯等	紫苏精油广泛运用于色素、调味品、茶、饮料等食品行业,添加紫苏精油提高了马铃薯蓝莓酸奶的pH值、持水能力和抗氧化性,改善酸奶中脂肪酸的组成,提高其营养价值。	[17-19]

续表 1

精油种类	来源	主要部位	主要成分	应用	参考文献
薄荷精油 (Essential Oil form <i>Mentha canadensis</i> Linnaeus)	薄荷茎叶		薄荷醇、薄荷酮、异薄荷酮、柠檬烯、 α -蒎烯、桂皮酸等	薄荷精油在保护食品和饲料免受黄曲霉毒素污染和黄曲霉菌侵染方面的巨大潜力。在果蔬保鲜中，薄荷精油可以抑制蓝莓腐烂，同时对果实的营养成分有一定的保护作用。	[20-22]
肉桂精油 [Essential Oil form <i>Cinnamomum cassia</i> (L.) D. Don]	肉桂皮、桂枝、桂叶等		肉桂醛、邻苯二甲酸二乙酯、丁香酚、氧化石竹烯等	肉桂精油在食品的防腐防霉保鲜中发挥着重要的作用，肉桂精油复合保鲜膜在吸水性、热稳定性、抗菌活性和抗氧化性方面都具有卓越的性能，有效保持肉的颜色，并将肉的保质期从4 d延长到10 d。	[23,24]
胡椒精油 (Essential Oil form <i>Piper nigrum</i> L.)	胡椒鲜果		β -石竹烯、3-萜烯、D-柠檬烯、 β -蒎烯、-榄香烯、(-)- α -胡椒烯、 β -月桂烯等	胡椒精油具有抗炎活性，可以抑制腌肉类制品水分损失；通过抑制色素和脂质氧化，改善了产品色泽；会破坏细胞膜的通透性，导致线粒体功能障碍抑制腐败微生物的生长。	[25-27]
花椒精油 (Essential Oil form <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.)	干燥成熟果皮		β -芳樟醇、D-柠檬烯、 β -月桂烯、4-萜品醇等	花椒精油保鲜液能有效抑制肉类腐败微生物的生长，从而延长冷却猪肉的保质期，且保鲜效果随花椒精油浓度的增大而加强。	[28,29]
柠檬草精油 [Essential Oil form <i>Cymbopogon citratus</i> (D. C.) Stapf]	晒干的柠檬草		香叶醛、橙花醛、香叶醇、芳樟醇、香叶酸等	柠檬草精油对果蔬病原菌具有良好的抑制活性，还可作为肉类的保鲜剂，柠檬草精油保鲜剂可显著降低木瓜果实采后两种主要病原体，保持水果采后的货架期	[30,31]
甘牛至精油 (Essential Oil form <i>Origanum majorana</i> L.)	甘牛至干花序及茎叶		4-萜烯醇、4-侧柏醇、 γ -萜品烯、(+)-4-萜烯、桉烯等	甘牛由于含有丁香酚、百里酚等物质，能减少肉中病原微生物的数量，延长货架期，同时还具有改善肉的颜色和风味的功能。	[32]
迷迭香精油 (Essential Oil form <i>Rosmarinus officinalis</i> L.)	迷迭香干茎叶		樟脑、桉叶油醇、 α -蒎烯、蒎烯、2-茨醇等	迷迭香是西餐中经常使用的香料，在牛排、土豆等料理以及烤制品中经常使用。迷迭香精油微乳液在番茄酱中具有抗真菌和抗细菌作用，且具有抗氧化性。	[32,33]
茴香精油 (<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.)	茴香果实		茴香脑、对烯丙基茴香醚、小茴香酮、柠檬烯等	茴香精油应用于酱卤制品可抑制腐败菌乳酸菌和葡萄球菌；可减缓pH值下降，提高酱卤制品在贮藏期间的品质，对贮藏期间的菌落总数有明显抑制作用。	[34,35]
丁香精油 (Essential Oil form <i>Syringa oblata</i> Lindl.)	丁香叶和花蕾		丁香酚、桉叶油醇、丁香烯和 α -毕橙茄醇、1-乙基-3-硝基苯和苯甲酸、3-(1-甲基乙基)等	丁香精油具有抗氧化活性，在保鲜方面也发挥了重要作用。丁香精油活性包装延长面包的保质期，对食源性微生物具有卓越的抗菌活性。	[36,37]
薰衣草精油 (Essential Oil form <i>Lavandula angustifolia</i> Mill.)	薰衣草全草		芳樟醇、乙酸芳樟酯、桉叶油醇、石竹烯、甲基庚烯酮、蘑菇醇、仲辛酮等	薰衣草精油被广泛应用于医药、化妆、保健等领域。可以治疗皮肤疾病，减轻焦虑，杀菌消炎，薰衣草精油有通气效力的作用，内服可用于治疗胃胀气和胃绞痛。	[38,39]
玫瑰精油 (Essential Oil form <i>Rosa</i> spp.)	玫瑰鲜花		苯甲醇、丁香酚、2-十三烷酮、 β -苯乙醇、香茅醇、香叶醇等	玫瑰精油可作为防腐剂原料使用，具有抗菌消炎、抗血栓、抗氧化活性等功效，玫瑰精油可作为食用菌行业化学添加剂的有效替代品。	[40,41]

续表 1

精油种类	来源	主要部位	主要成分	应用	参考文献
香草兰 (Essential Oil form <i>Vanilla planifolia</i>)	香草兰 豆荚		香兰素、3-羟基茴香酸、苯甲醛、茴香醇、茴香醛、葡萄香兰素、原儿茶醛、原儿茶酸、胡椒醛、乙醛、丙酮醛等	缓解疲劳、改善情绪，减轻化疗患者的恶心和呕吐症状。作为抗菌剂香草对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、酵母菌和霉菌都有抗菌作用，香兰素具有抗氧化能力，它能捕捉自由基，抑制蛋白质氧化和光敏引起的过氧化反应。	[42]
互叶白千层精油 (Essential Oil form <i>Melaleuca alternifolia</i> Cheel)	新鲜 枝叶		γ -松油烯、松油烯、 α -蒎烯、 α -松油醇、香树烯等	茶树精油具有真菌、抗细菌、抗病毒和抗寄生虫的特性，能使皮肤组织恢复活力，防治蚊虫叮咬、皮肤损伤、烧伤、真菌感染等。	[43,44]

表 2 食源性乳化剂在植物精油中的应用

Table 2 Food-derived emulsifiers in essential oils of plants

乳化剂种类	植物精油种类	应用	文献
辣木籽渣蛋白	茶树精油	辣木籽渣蛋白 Pickering 乳液负载茶树精油可以提高茶树精油稳定性，并且原材料均为天然植物来源，可以很好的应用于食品保鲜。	[45]
蛋白质	大豆分离蛋白	制备了具有合适粒径、高储存稳定性和盐溶液稳定性的负载山苍子精油的大豆分离蛋白纳米粒子，山苍子精油的大豆分离蛋白纳米粒子薄膜可以延长食品的保质期。	[46]
	乳清蛋白、绿豆蛋白	工业大麻精油作为一种新型纳米载体，在乳清蛋白纳米和绿豆蛋白纳米颗粒的络合中得到增强。将工业大麻精油增强的乳清蛋白纳米和绿豆蛋白纳米颗粒的络合掺入活性材料涂层中，对总活细菌和耐冷细菌具有可接受的抑制活性。	[47]
	鸡肉蛋白	百里香丁香精油 含有百里香和丁香精油的机械去骨鸡肉蛋白涂层溶液可用于切片牛肉 sucuk 样品，以延缓氧化、物理和微生物恶化。	[48]
多糖	淀粉	百里香精油 当将百里香精油装入淀粉纳米纤维中时，其热稳定性会增加。	
	海藻酸钠	薰衣草精油 载有薰衣草精油的海藻酸钠-薰衣草纳米纤维对大肠杆菌表现出高抑制区。	[49]
	海藻酸钠	丁香精油、肉桂精油或薰衣草精油 载有丁香、肉桂或薰衣草的海藻酸钠/PVA 纳米纤维对金黄色葡萄球菌的抗菌作用，在多种食品应用中使用多糖中的精油具有广阔的前景。	
	壳聚糖	肉桂精油 有研究开发了一种载有肉桂精油的壳聚糖可食用涂层，用于菠萝的保鲜在 5 ± 1 °C 下储存 15 d 后，涂层有效地降低了菠萝的呼吸速率和质量损失。	[50]
	壳聚糖、琼脂	薰衣草精油 通过将薰衣草精油与乳液形式的壳聚糖、琼脂混合来获得化妆品乳液配方，并将其中一些配方应用于纺织品支撑物，以获得具有抗菌和保湿特性的贴片。	[51]
	大豆多糖、羧甲基壳聚糖	薰衣草精油 薰衣草精油乳液成功地掺入大豆多糖、羧甲基壳聚糖共混物中，以制造用于水果保鲜的可食用涂层材料。	[52]
脂质	大豆卵磷脂	百里香精油 大豆卵磷脂是另一种源自植物的天然乳化剂。它属于复杂脂质类，包含一个极性头基和两个非极性尾基，可以从卵磷脂中去除一个非极性尾巴改性。与散装百里香油相比，当百里香油嵌入纳米乳液液滴中时，其真菌毒素抑制活性有所提高	[53]
	蛋黄卵磷脂和胆固醇	茶树精油 卵磷脂和胆固醇质量比 3.7:1，在茶树精油质量分数 0.5% 条件下，精油被脂质体包封后，其溶解性增加，挥发性降低，因此抑制和杀灭微生物的效果都有所提高。	[54]
	大豆磷脂	肉桂精油 (肉桂醛) 以大豆磷脂为乳化剂，制备肉桂醛乳液，研究了乳剂对蘑菇贮藏过程质量的影响。实验结果表明，乳液涂料延迟金蘑菇的颜色变化，增加抗氧化活性从而提高去除氧的能力，保持金蘑菇的高食用品质，延长其保质期。	[53]

续表 2

乳化剂种类	植物精油种类	应用	文献	
其他食源性物质	皂树皂苷	松树精油 (- 松油醇)	纳米乳液由 - 松油醇和皂树皂苷配制而成, 在 5 或 25 °C 下放置 280 d 后, 最初添加的 79% 的 - 松油醇仍然存在, 说明皂苷具有优良的乳化效果。	[55]
	鼠李糖脂	—	鼠李糖脂是植物精油乳化非常合适的表面活性剂, 它们的表面特性促进了植物精油的分散, 从而增加了它们的可用性和对微生物的抗菌活性。	[56]
	皂苷	百里香精油	使用亚临界水作为安全无毒溶剂和皂苷作为天然乳化剂的自下而上的绿色方法用于制备百里香必需的 O/W 纳米乳液, 成功的优化了百里香 O/W 纳米乳液制备工艺条件, 形成的纳米乳液更稳定, 纳米液滴尺寸最小, 从而在乳液中形成的百里香油纳米液滴的表面积与体积比高, 进而增加抗氧化和使用预测的最佳制备条件制备的纳米乳液的抗菌活性。	[57]
复合食源性物质	大豆分离蛋白、壳聚糖	薄荷精油	大豆分离蛋白 - 壳聚糖季铵盐复合溶液形成的薄荷精油乳液, 乳液还显着延长了薄荷精油的释放持续时间, 并且增强了其抑制三种植物病原真菌生长的能力。因此, 本研究表明壳聚糖季铵盐可以大大提高乳化效果和与大豆分离蛋白的稳定性。大豆分离蛋白 / 壳聚糖季铵盐 1:1 复合时精油乳剂的缓释效果最好。	[58]
	大豆分离蛋白、柑橘果胶	大蒜精油	使用大豆分离蛋白 - 柑橘果胶 - 微波干热络合物制备的大蒜精油乳液显示出控制亚硝酸盐含量。这些结果表明微波干热可作为一种有前途的技术来缩短糖基化反应的时间。	[59]
	壳聚糖、豌豆分离蛋白	牛膝草精油	负载牛膝草精油的壳聚糖 - 豌豆分离蛋白纳米复合物对灰霉菌菌具有很强的抗真菌活性以及抗氧化活性。	[60]
	支链淀粉、大豆磷脂	肉桂精油 (肉桂醛)	用支链淀粉 - 大豆磷脂 - 肉桂醛乳液涂覆蘑菇是一种有效的处理方法, 可以在储存期间保持蘑菇的高质量, 且被认为是一种安全有效的方法, 也是一种环境友好的技术。	[61]

2 食源性乳化剂在植物精油中的应用

食源性乳化剂原材料普遍存在于自然界动植物体中, 能改善乳状液的稳定性, 因此具有研究价值和广阔的应用前景。植物精油取自天然, 有抑菌抗氧化等多种作用。目前将食源性乳化剂运用于植物精油已经有很多研究, 在食品领域的应用具有广阔前景, 本文将介绍食源性乳化剂在植物精油中的应用, 如表 2。

3 食源性乳化剂分类及对植物精油的乳化机制

植物精油是从植物中提取的天然物质, 具有优异的抗氧化、抗菌、抗炎等生物活性。但植物精油的稳定性受到原料来源、提取工艺、成分组成等多种因素影响, 在高温、强光、潮湿等环境下, 植物精油的稳定性会受到影响, 导致活性成分降解、生物活性降低, 且植物精油存在的特殊味道可能会对农产品本身的味道产生不利影响^[62]。食源性乳化剂是一类从天然食材中提取的乳化剂, 具有良好的生物相容性和生物降解性, 能够提高产品的稳定

性、口感和质地。与植物精油相比, 食源性乳化剂的稳定性较高, 且能一定程度的掩蔽植物精油的气味, 但在高温、高湿条件下, 其稳定性也会受到影响^[63,64]。化学合成乳化剂是通过化学合成方法制备的一类乳化剂, 具有较高的稳定性和效率。然而, 化学合成乳化剂具有一定的毒性, 长时间接触对人体和环境可能造成危害, 应用受到一定限制^[65]。物理乳化技术具有操作简便、能耗低、无化学残留等优点, 能够有效提高乳化体系的稳定性。然而, 物理乳化技术的效果受到原料性质、设备性能等因素的影响, 稳定性相对较低^[66]。选择食源性乳化剂, 且配合物理乳化技术, 可以使植物精油稳定性得到提升的同时保证其安全性和乳化效果。

乳化作用可以有效改善植物精油易挥发不溶于水的缺点, 但是植物精油乳化效果的关键在于选择合适的乳化剂, 包括乳化剂的乳化能力、乳化稳定性、成膜性等。近年来更加重视乳化剂的食用安全性。因此食源性乳化剂被广泛研究和应用, 其中蛋白质、多糖、磷脂等成为研究的热点, 此外, 研究人员还对这些乳化剂进行了复合应用, 以获得更好的乳化效果和稳定性。下面, 分类探讨这些食源性乳化剂在植物精油稳定性研究中的应用和乳化机制。

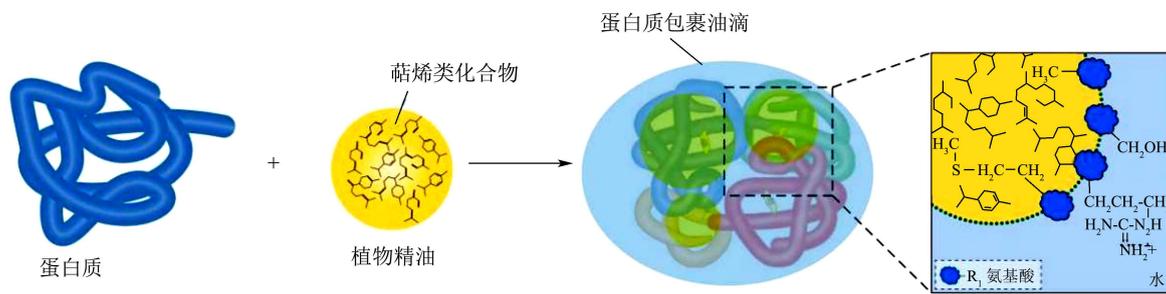


图 1 蛋白质对植物精油的乳化机理

Fig.1 Mechanism of protein emulsification of plant essential oils

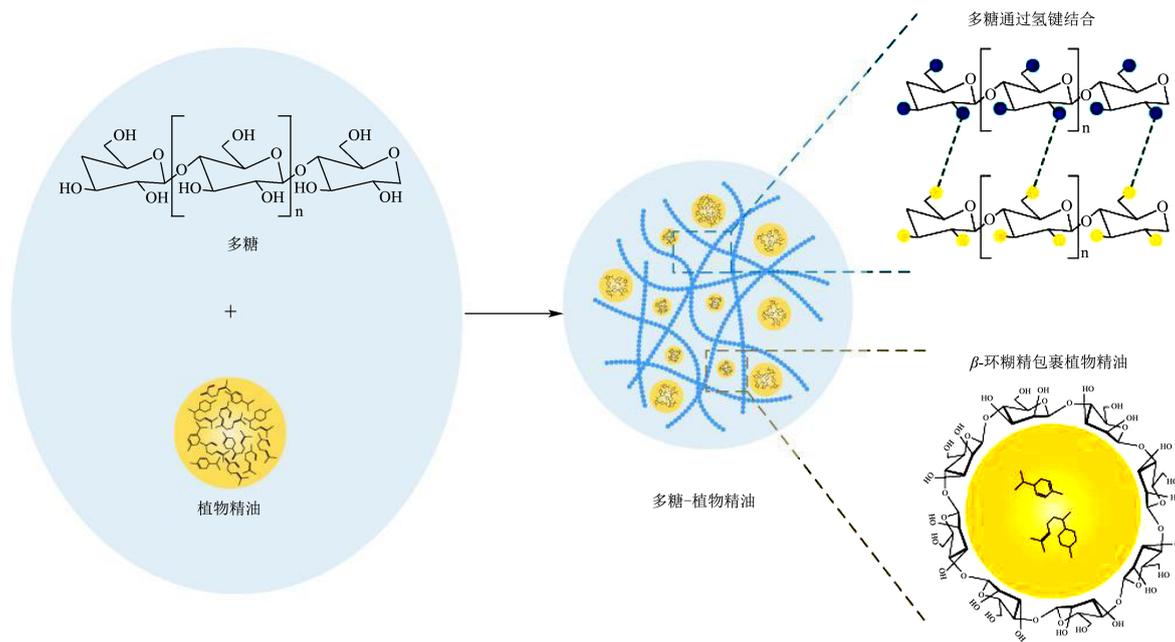


图 2 多糖对植物精油的乳化机理

Fig.2 Emulsification mechanism of polysaccharides on essential oils of plants

3.1 蛋白质对植物精油的乳化作用

目前食品工业使用的具有乳化能力的蛋白质主要来自玉米、大豆、小麦等，这些蛋白质因其商业可用性、高营养价值和出色的功能特性而被广泛使用^[67]。蛋白质因其氨基酸残基部分亲水，部分亲油，可作为乳化剂降低油水界面之间的界面张力。蛋白质乳化大多数为水包油型，乳化后蛋白质包裹油滴，大大增加了乳液的稳定性^[68]。在乳化过程中，蛋白质可以有效地吸附到新产生的液滴表面，并通过降低界面张力促进液滴进一步破裂，从而通过空间和静电相互作用有利于所得乳液的稳定性^[69]。一般来说，更多暴露的疏水残基会促进水溶性蛋白质更好地在水油界面相互作用，提高乳化性能，但疏水表面的过度暴露可能会导致聚集并降低乳液的稳定性^[67]。将肉桂精油封装于大豆分离蛋白通过共价

键、氢键、静电相互作用、范德华力和疏水相互作用络合形成的壳状结构中，精油能够受控和持续释放^[70]。蛋白质乳化植物精油与水相的原理图 1 所示，蛋白质亲水氨基酸与水相结合，疏水氨基酸与油相结合，将油相包裹，形成水包油稳定体系。

3.2 多糖对植物精油的乳化作用

多糖主要包括淀粉及改性淀粉、纤维素、果胶、壳聚糖等，多糖分子中含有许多羟基、羧基等亲水基团，使整个多糖分子具有可溶性。与亲水性相比，大多数多糖的疏水性有限。因此，多糖分子结构中疏水基团的含量是限制多糖乳化能力的重要因素。在保证溶解度的前提下，疏水基团含量越高，多糖的乳化性能越好^[71]。多糖作为乳化剂的优势一方面在于其良好的乳化稳定性，另一方面，多糖乳化剂的应用可以大大减少合成小分子乳化剂的用量，降

低潜在的食品安全隐患^[72]。可溶性大豆多糖主要从豆渣或豆粕中提取,符合绿色发展的要求。其无毒、可生物降解、生物相容性,并具有抗氧化活性可用于食品。大豆多糖因良好的成膜性能,很容易地开发成具有可接受机械性能的薄膜。茶树精油的加入显著提高了大豆多糖薄膜的紫外线阻隔和水蒸气阻隔性能,增加了抗菌活性,为食品保鲜提供有前途的活性包装材料^[73]。多糖乳化植物精油与水相原理如图2,多糖亲水基团与水相结合,疏水基团与油相结合,多糖间以氢键结合,如 β -环糊精,大多形成水包油稳定体系。

3.3 脂质对植物精油的乳化作用

由于脂质是人类营养的一部分,也是许多生理和生化过程不可或缺的一部分,因此基于脂质的纳米颗粒系统被认为是最安全、最具生物相容性、最通用且经济实惠的化合物递送方式之一^[74]。卵磷脂是天然存在于植物中的中性表面活性剂,由于其广泛存在,它们被认为是具有生产乳液潜力的低成本乳化剂^[75]。磷脂的组成,因其原料不同而有很大差异。卵磷脂是提取的天然两亲性分子,由磷脂酰胆碱(PC)、磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰肌醇(PI)和磷脂酸(PA)组成,作为一种常见的被广泛应用的物质食品工业中使用的乳化剂,PC/PE比例较低的天然卵磷脂在稳定W/O乳液方面更有效^[76]。植物卵磷脂在食品工业中广泛用作乳化剂,是一种天然存在的脂质混合物,含有超过50%的磷脂。磷脂发挥许多重要的生理作用。它们的两亲性使它们能够稳定内源性脂滴,赋予它们在脂蛋白转运、功

能和代谢中的重要作用。商业卵磷脂可以从广泛的来源获得,最常见的是鸡蛋、牛奶、鱼或含油种子(尤其是大豆)^[77]。大豆磷脂是一种两亲性化合物,一端由磷酸组成的亲水头,另一端由脂肪酸组成的疏水尾,使其成为一种更环保、更安全的天然乳化剂。肉桂醛大豆磷脂乳液涂层延缓了金针菇的变色,增加了金针菇的抗氧化活性,从而提高了去除氧离子的能力保持金针菇的高食用品质,延长其保质期^[53]。如图3,磷脂与脂肪包裹植物精油形成水包油乳液,亲水的头部与外部水结合,疏水的尾部与内部油结合,使油溶于水,形成稳定乳液。

3.4 其他食源性物质对植物精油的乳化作用

皂苷是以三萜类化合物形式存在的次级代谢产物,目前,从植物的不同部分(种子、叶子、花朵和根)中已提取和表征约有60多种不同的三萜皂苷。它们含有以共价连接到三萜主链或疏水类固醇的亲水糖部分而具表面活性。因此,它在食品和制药工业中作为天然乳化剂、发泡剂、稳定剂和药物递送剂具有良好前景^[39]。皂苷以三萜苷或类固醇的形式存在于植物性食品中。三萜皂苷存在于豆类中,葵花籽、人参根、七叶树、茶叶等也有存在,而甾体皂苷存在于丝兰、番茄种子、人参根、山药、茄子、葫芦巴种子、芦笋、辣椒中^[77]。皂苷含有疏水性三萜环和亲水性碳水化合物基团,可以形成相对较小的乳液液滴,皂苷与百里香油纳米乳液具有相对较高的储存稳定性,且具抑制大肠杆菌的生长并具有调节微生物生长的潜力,与百里香精油相比,纳米乳液滴包裹的百里香精油显示出更强的微生物抑制活性^[49]。

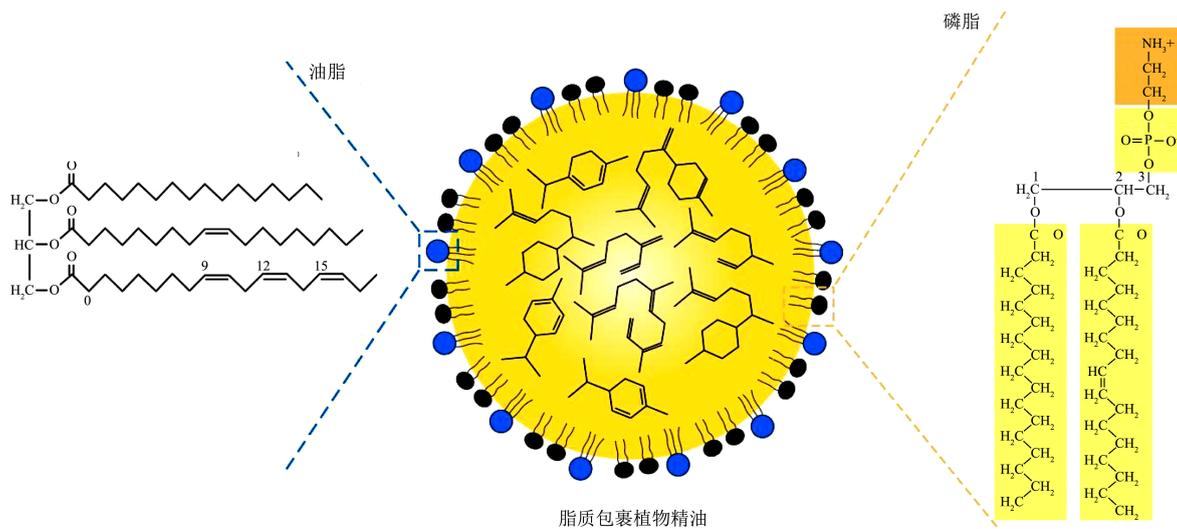


图3 脂质对植物精油的乳化机理

Fig.3 Emulsification mechanism of lipids on plant essential oils

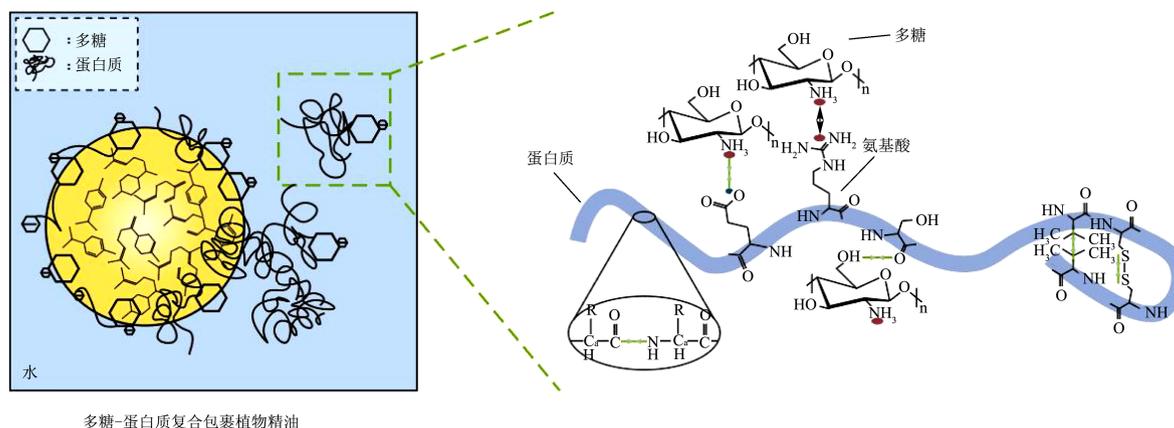


图4 蛋白质与多糖复合对植物精油的乳化机理

Fig.4 Mechanism of emulsification of plant essential oils by protein-polysaccharide complexes

鼠李糖脂是通过某些微生物（如铜绿假单胞菌和其他假单胞菌属）的发酵过程获得的糖脂，这种生物表面活性剂的组成和性质可以通过改变菌株、底物和发酵条件来控制。它们由一个或两个亲水鼠李糖单元和一个疏水 β -羟基链烷酸酯的非极性脂肪酸链组成^[78]。鼠李糖脂表面特性促进了多种植物精油（牛至精油、肉桂精油、薰衣草精油等）的分散，从而提高了它们对白色念珠菌和金黄色葡萄球菌的可用性和抗菌活性^[57]。

3.5 复合乳化剂

越来越多天然食源性物质作为乳化剂被研究、运用，但一般食源性物质的亲水性或疏水性有限，稳定性较差。所以研究更加偏向复合的乳化剂，可使乳化剂的亲水疏水基团达到平衡，乳液更加稳定。多糖疏水基团含量较高，可以选用亲水性较好的物质使乳化剂增效，并且表现出更高效果，如：对于某些天然植物多糖（阿拉伯树胶、甜菜果胶、柑橘果胶等），这些多糖含有少量通过共价或非共价键连接的蛋白质片段，使其具有更好的乳化特性。蛋白质分子具有天然的两亲性，通常比多糖具有更好的表面活性。对于蛋白质片段与多糖分子共价键合的聚合物，乳化过程中蛋白质片段优先吸附在油水界面，显著降低油水界面张力，而多糖片段则指向水相，形成稠密的水化层膜，使乳液具有一定的乳化稳定性。当蛋白质片段与多糖分子以非共价键形式共存时，乳化时蛋白质分子首先吸附在油水界面，而多糖分子主要存在于连续相中，提高连续相的粘度，增加液滴不易聚集，从而达到乳液稳定的目的^[79]。等电点（PI）蛋白质可以很好地吸附在油

水界面上，从而稳定乳液。然而，当pH值接近pI或高离子强度时，蛋白质聚集可能发生在油水界面。当多糖添加到油水界面的蛋白质聚集体中时，它们会形成厚厚的带电表面层，从而增加液滴表面之间的空间排斥和静电排斥。静电相互作用使多糖能够吸附在蛋白质包被的油滴表面。通过同时使用蛋白质和多糖，可以提高乳化效率。因此，蛋白质和多糖复合物可以作为有效的乳化剂来稳定乳液^[80]。胡泽斯坦是一种唇形科特有植物，广泛分布于伊朗西南部，以其镇痛和防腐剂的医疗用途而闻名，其精油（SKEO）富含多酚化合物，特别是百里香酚和香芹酚，乳清分离蛋白与麦芽糊精通过美拉德反应结合，可用于增强SKEO微胶囊的理化性质^[81]。如图4，蛋白质与多糖结合形成复合物对植物精油乳化原理。在含有卵磷脂的乳液中，凝胶网络是由不同的多糖分子以及多糖和磷脂分子通过氢键相互作用形成的，这种更致密和更强的凝胶网络结构非常适合增加含有卵磷脂的W/O乳液的稳定性^[76]。

另外，还有很多复合乳化剂被研究：当羧甲基纤维素被添加到水相中时，含有卵磷脂的W/O乳液的稳定性得到改善，这归因于羧甲基纤维素与磷脂单层之间的相互作用以及水相中粘度的增加；天然卵磷脂和玉米醇溶蛋白纳米粒子在稳定W/O/W双乳液方面也表现出协同效应。卵磷脂可以通过疏水相互作用与蛋白质相互作用，在水/油界面形成卵磷脂/蛋白质复合物，与纯卵磷脂或纯蛋白质相比，这些复合物显示出非常不同的乳液形成能力^[76]。皂树皂苷和卵磷脂组成的二元乳化剂混合物可用于形成亚微米大小的乳化液滴；乳液二元乳化剂混合物在其他二元混合物的物理稳定性中随着时间的推

移稳定乳液和抵抗环境变化方面表现良好^[82]。将茶皂苷吸附到杏仁蛋白包被的脂滴上可以提高它们的物理和化学稳定性，并且混合蛋白质/皂苷涂层会比单独的蛋白质涂层更有效地抑制脂质和蛋白质氧化^[83]。

4 存在的问题及解决方案

4.1 存在的问题

目前食品中添加的乳化剂大多是人工合成，食源性乳化剂具有天然、环保、可生物降解等优点，符合可持续发展的理念，为食品领域提供更多的可能，以满足消费者对健康、绿色、美味的需求，但由于其自身性质作为乳化剂存在部分缺点：

①食源性乳化剂在制备过程中，可能受到原料自身的差异性，季节性、产地差异等因素影响，导致其乳化性不稳定。如从不同豆类中提取大豆蛋白作为乳化剂，最有前景的是从扁豆和大豆中提取的，具有更强的稳定性^[84]；

②大多食源性乳化剂亲水亲油效果偏向一端，两亲性表现不突出，这导致制备的乳液随时间延长，稳定性降低较快；

③目前研究发现，一种食源性乳化剂仅对一种或几种精油具有乳化作用，使用范围较为狭窄，不具有普适性，在实际应用过程中，需要根据不同产品的需求，选择适宜的食源性乳化剂类型和浓度。如不同乳化剂对月见草精油乳液稳定效果存在差异，通过物理乳化基础降低局限性^[64]；

④食源性乳化剂来源于食物原料的分离，乳化效果受到温度和工艺的影响较大，大多需借助现代技术改善和提高其乳化性质，制备工艺相对复杂，进行大规模生产具有一定的难度且相较化学合成乳化剂成本高；

⑤不同酸碱条件下选用的食源性乳化剂的氧化稳定性也存在差异，部分食源性物质带有苦味或者其他对感官评价有负面影响的味感。

4.2 解决方案

基于食源性乳化剂存在的上述问题，在未来的研究中可以从以下几个方面进行改进和优化：

①优化原料来源和提取工艺，对食源性物质进行筛选，选择受环境因素影响较小的物质作为原材料，通过对比不同季节、不同产地的原料特性，寻找适宜的原料来源，以保证乳化剂制备的稳定性；

②开发绿色环保的食源性乳化剂的制备工艺，采用生物和物理等环保型制备技术^[64]，如从食品生产废料提取原材料，即简化生产过程、提高生产效率、降低成本、减少浪费，又保证食品安全、健康的同时，将资源更大限度利用；

③针对广泛的食源性原料提取物进行试验研究，筛选出对多种精油具有良好乳化作用的食源性乳化剂，发现新型乳化剂，以扩大其应用范围，提高普适性。收集和整理不同类型乳化剂在不同乳液中的使用效果和适用范围，建立一个全面的乳化剂数据库，为生产运用提供参考和指导；

④采用化学技术（纤维化、磷酸化和烷基化等）对食源性乳化剂进行改性，同时可以将不同乳化剂进行复合，改善两亲性，使其具有更广泛的适用范围和更好的乳化稳定性，并采用适当的新型技术，如超声波处理、高压均质、酶水解，酶交联等^[85,86]，改善乳液的结构，增强其稳定性，延长乳液的稳定时间，进一步提升食源性乳化剂在大规模乳液生产中的竞争力；

⑤加强对不同酸碱条件下食源性乳化剂的氧化稳定性研究，评估其在不同环境下的稳定性，以便在食品生产中选择更稳定的乳化剂。避免使用具有不良口感（如酸、苦、涩等）的物质，建立完善的感官评估体系，对不同酸碱条件下产生的感官影响进行评价，减少感官的负面影响。

5 结论

目前在食品加工、应用等领域中，天然、绿色、安全和功能性等意识已经在消费者心目中与日俱增，植物精油和食源性乳化剂的天然来源与功能性符合人们的消费观念。蛋白质、淀粉、纤维素、其他类多糖以及脂质等食源性大分子具有优良的乳化能力、乳化稳定性和安全性，经过进一步研究与开发，有望解决植物精油的易挥发性、水不溶性和气味性等问题，从而进一步拓展植物精油在新型抗氧剂、保鲜剂和防腐剂领域中的应用。

参考文献

- [1] TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S. Essential oils: extraction, bioactivities, and their uses for food preservation [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(7): R1231-R1249.
- [2] HOU T, SANA S S, LI H, et al. Essential oils and its antibacterial, antifungal and anti-oxidant activity applications:

- A review [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101716.
- [3] YANG S, HE M, LI D, et al. Antifungal activity of 40 plant essential oil components against *Diaporthe fusicola* from postharvest kiwifruits and their possible action mode [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 194: 116102.
- [4] TIAN X, WANG D, LI Y, et al. Preparation and characterization of emulsions of soy protein isolate-chitosan quaternary ammonium salt complexes and peppermint essential oil with extended release effect [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 142: 108779.
- [5] GUO X, WANG X, WEI Y, et al. Preparation and properties of films loaded with cellulose nanocrystals stabilized Thymus vulgaris essential oil Pickering emulsion based on modified tapioca starch/polyvinyl alcohol [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137597.
- [6] GROH K J, GEUEKE B, MUNCKE J. Food contact materials and gut health: Implications for toxicity assessment and relevance of high molecular weight migrants [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 109: 1-18.
- [7] ZHOU L, FENG X, YANG Y, et al. Effects of high-speed shear homogenization on properties and structure of the chicken myofibrillar protein and low-fat mixed gel [J]. LWT, 2019, 110: 19-24.
- [8] ZHOU L, ZHANG J, XING L, et al. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 493-512.
- [9] BAKKALI F, AVERBECK S, AVERBECK D, et al. Biological effects of essential oils—a review [J]. Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(2): 446-475.
- [10] PANDEY A K, KUMAR P, SINGH P, et al. Essential oils: Sources of antimicrobials and food preservatives [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 7: 2161.
- [11] KANT R, KUMAR A. Advancements in steam distillation system for oil extraction from peppermint leaves [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 5794-5799.
- [12] 许巧欣,柯怡欣,陈咏琪,等.牛至精油对常见致病菌的抗菌活性及作用机制研究进展[J].饲料研究,2022,45(3): 149-153.
- [13] HE P, LEI Y, ZHANG K, et al. Dietary oregano essential oil supplementation alters meat quality, oxidative stability, and fatty acid profiles of beef cattle [J]. Meat Science, 2023, 205: 109317.
- [14] 裴海闰,韩笑,曹学丽.百里香精油的成分分析及其抗氧化和抑菌活性评价[J].中国食品学报,2011,11(5):182-188
- [15] 李玉邯,陈宇飞,杨柳,等.百里香精油在食品中开发应用的研究进展[J].粮食与油脂,2017,30(12): 1-3.
- [16] PEIXOTO E C, FONSECA L M, DA ROSA ZAVAREZE E, et al. Antimicrobial active packaging for meat using thyme essential oil (*Thymus vulgaris*) encapsulated on zein ultrafine fibers membranes [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 51: 102778.
- [17] 薛山.不同提取方法下紫苏叶精油成分组成及抗氧化功效研究[J].食品工业科技,2016,37(19):67-74.
- [18] 薛山.紫苏精油的研究新趋势[J].中国食品添加剂,2011, 1:199-204.
- [19] ZHENG S, HE Z, HE L, et al. Influence of adding *Perilla* seed oil on potato blueberry yogurt quality during storage at 4 °C [J]. LWT, 2022, 168: 113921.
- [20] 陈硕,徐马俊坤,张赟彬,等.薄荷精油微乳体系的构建及其抑菌性[J].现代食品科技,2014,30(11):139-144,104.
- [21] 代金龙.美国薄荷精油在蓝莓采后保鲜防腐中的应用研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [22] ABD EL-HACK M E, KAMAL M, ALTAIE H A A, et al. Peppermint essential oil and its nano-emulsion: Potential against aflatoxigenic fungus *Aspergillus flavus* in food and feed [J]. Toxicon, 2023, 234: 107309.
- [23] 王秋亚,马艳阳.肉桂精油的成分分析、抑菌和抗氧化活性及在食品保鲜中的应用进展[J].中国调味品,2020, 45(3):183-187.
- [24] CHEN C, DENG S, TIAN H, et al. Novel bioactive sponge mats composed of oxidized bacterial cellulose and chitosan-gum Arabic microcapsules loaded with cinnamon essential oil for enhancing meat preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109496.
- [25] 段梦雅.胡椒精油提取及其功能活性研究[D].上海:上海应用技术大学,2022.
- [26] 常红,毕耀,王颖,等.黑胡椒精油复合涂层对金华火腿理化特性及食用品质安全的影响[J].食品科学,2020, 41(13):193-198.
- [27] ZHANG C, ZHAO J, FAMOUS E, et al. Antioxidant, hepatoprotective and antifungal activities of black pepper (*Piper nigrum* L.) essential oil [J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128845.
- [28] 王友峰,罗忠圣,黎浪,等.黔产青花椒精油成分分析及抑菌、抗氧化活性研究[J].中国食品添加剂,2023,34(4): 285-292.
- [29] 江洁芳,周海钰.花椒精油用于猪肉保鲜的研究[J].中国调味品,2012,37(5):70-71,74.
- [30] 王秋亚,王勇森.香茅精油的提取方法、抑菌活性及在食品保鲜中的应用进展[J].中国调味品,2021,46(9):181-184.
- [31] DHARINI V, SELVAM P, JAYARAMUDU J, et al. Effect of functionalized hybrid chitosan/gum Arabic bilayer coatings with lemongrass essential oil on the postharvest disease control and the physicochemical properties of papaya (*Carica papaya*) fruits [J]. South African Journal of Botany, 2023, 160: 602-612.
- [32] 王有娣,姚小丽,肖青林,等.迷迭香精油和马郁兰精油化学成分及抗氧化活性研究[J].中国调味品,2021,46(1): 135-141.
- [33] BRANDT C C M, LOBO V S, FIAMETTI K G, et al.

- Rosemary essential oil microemulsions as antimicrobial and antioxidant agent in tomato paste [J]. *Food Chemistry Advances*, 2023, 2: 100295.
- [34] 王芳. 几种植物精油成分分析、抑菌及其应用工艺优化[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [35] 徐若滢, 吴婷, 刘文浩, 等. 八角茴香精油纳米乳液的制备及其对酱卤鸭翅贮藏品质的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 8-12, 27.
- [36] 郭杰, 陶蕾, 邱倩, 等. 茶树精油及其生物学功能研究进展[J]. *生物化工*, 2022, 8(3): 152-155.
- [37] 赵永田, 王兴娥, 黄煜, 等. 丁香化学成分及生物活性研究进展[J]. *热带农业科技*, 2022, 45(4): 41-46.
- [38] MITTAL M, AHUJA S, YADAV A, et al. Development of poly (hydroxybutyrate) film incorporated with nano silica and clove essential oil intended for active packaging of brown bread [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233: 123512.
- [39] 胡坤. 薰衣草精油化学成分及抗菌活性研究[J]. *黑河学院学报*, 2018, 9(1): 215-216.
- [40] 杨懿涵. 薰衣草精油的提取工艺及应用研究进展[J]. *当代化工研究*, 2018, 11: 152-153.
- [41] 梁向平, 谢惠春. 玫瑰精油研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(23): 24-25.
- [42] BAQUEIRO-PEÑA I, GUERRERO-BELTRÁN J Á. Vanilla (*Vanilla planifolia* Andr.), its residues and other industrial by-products for recovering high value flavor molecules: A review [J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2017, 6: 1-9.
- [43] 吴克刚. 精油植物互叶白千层[J]. *生命世界*, 2021, 9: 28-29.
- [44] 都宏霞, 石巾艺, 王冬娥. 绿色低共熔溶剂提取互叶白千层精油及成分分析[J]. *广西植物*, 2022, 42(5): 762-771.
- [45] 邹颖, 李密, 周伟, 等. 负载茶树精油的辣木籽渣蛋白乳液在槟榔保鲜中的应用[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(8): 1696-1702.
- [46] CUI H, XU R, HU W, et al. Effect of soy protein isolate nanoparticles loaded with litsea cubeba essential oil on performance of lentinan edible films [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124686.
- [47] MAJIDIYAN N, HADIDI M, AZADIKHAH D, et al. Protein complex nanoparticles reinforced with industrial hemp essential oil: Characterization and application for shelf-life extension of Rainbow trout fillets [J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 13: 100202.
- [48] SARICA OGLU F T, TURHAN S. Performance of mechanically deboned chicken meat protein coatings containing thyme or clove essential oil for storage quality improvement of beef sucuks [J]. *Meat Science*, 2019, 158: 107912.
- [49] WAN J, ZHONG S, SCHWARZ P, et al. Enhancement of antifungal and mycotoxin inhibitory activities of food-grade thyme oil nanoemulsions with natural emulsifiers [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106709.
- [50] SHEN C, CHEN W, LI C, et al. Topical advances of edible coating based on the nanoemulsions encapsulated with plant essential oils for foodborne pathogen control [J]. *Food Control*, 2023, 145: 109419.
- [51] XIA Z W, ZHANG J G, NI Z J, et al. Functional and emulsification characteristics of phospholipids and derived o/w emulsions from peony seed meal [J]. *Food Chemistry*, 2022, 389: 133112.
- [52] LIU J, LIU Y, SHAO S, et al. Soluble soybean polysaccharide/carboxymethyl chitosan coatings incorporated with lavender essential oil: Structure, properties and application in fruit preservation [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 173: 107178.
- [53] ROBERT C, COUÉDELO L, VAYSSE C, et al. Vegetable lecithins: A review of their compositional diversity, impact on lipid metabolism and potential in cardiometabolic disease prevention [J]. *Biochimie*, 2020, 169: 121-132.
- [54] 詹轶雯, 李金贵. Box-behnken响应面法优化茶树精油纳米脂质体的制备及其表征与抑菌活性分析[J]. *中国兽医学报*, 2023, 43(1): 144-151.
- [55] DE OLIVEIRA FELIPE L, BICAS J L, BOUHOUTE M, et al. Formulation and physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsion loaded with α -terpineol as flavor oil using Quillaja saponins as natural emulsifier [J]. *Food Research International*, 2022, 153: 110894.
- [56] HABA E, BOUHDID S, TORREGO-SOLANA N, et al. Rhamnolipids as emulsifying agents for essential oil formulations: antimicrobial effect against *Candida albicans* and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2014, 476(1-2): 134-141.
- [57] AHMADI O, JAFARIZADEH-MALMIRI H. Green approach in food nanotechnology based on subcritical water: effects of thyme oil and saponin on characteristics of the prepared oil in water nanoemulsions [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2020, 29(6): 783-792.
- [58] TIAN X, WANG D, LI Y, et al. Preparation and characterization of emulsions of soy protein isolate-chitosan quaternary ammonium salt complexes and peppermint essential oil with extended release effect [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108779.
- [59] TENG X, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Garlic essential oil emulsions stabilized by microwave dry-heating induced protein-pectin conjugates and their application in controlling nitrite content in prepared vegetable dishes [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108277.
- [60] HADIDI M, MOTAMEDZADEGAN A, JELYANI A Z, et al. Nanoencapsulation of hyssop essential oil in chitosan-pea protein isolate nano-complex [J]. *LWT*, 2021, 144: 111254.
- [61] SHAO X, NIU B, FANG X, et al. Pullulan-stabilized Soybean Phospholipids/Cinnamaldehyde emulsion for *Flammulina*

- velutipes* preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246(15): 125425.
- [62] LIANG W, GE X, LIN Q, et al. pH-responsive liposomes for controlled release of *Alpinia galanga* essential oil: Investigating characteristics, stability, control release behavior, and functionality [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117978.
- [63] LI H, ZHANG L, JIA Y, et al. Application of whey protein emulsion gel microparticles as fat replacers in low-fat yogurt: Applicability of vegetable oil as the oil phase [J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(12): 9404-9416.
- [64] TENG X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Garlic essential oil microcapsules prepared using gallic acid grafted chitosan: Effect on nitrite control of prepared vegetable dishes during storage [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132945.
- [65] YUAN D, LONG Y, LIU D, et al. Ecological impact of surfactant Tween-80 on plankton: High-scale analyses reveal deeper hazards [J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 169176.
- [66] HSIEH I T, CHOU T H, CHANG J S. Development, characterization, and *in vitro* biocompatibility of evening primrose oil nanoemulsions using ultrasonic nano-emulsification technology [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2024, 160: 105311.
- [67] WANG L S, TAO X, PAN R L, et al. Pharmacokinetics of cajanin stilbene acid and its main glucuronide metabolite in rats [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(20): 4066-4073.
- [68] LOW L E, SIVA S P, HO Y K, et al. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 277: 102117.
- [69] TANG C H. Globular proteins as soft particles for stabilizing emulsions: Concepts and strategies [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105664.
- [70] RAN R, ZHENG T, TANG P, et al. Antioxidant and antimicrobial collagen films incorporating Pickering emulsions of cinnamon essential oil for pork preservation [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136108.
- [71] TANG Q, HUANG G. Improving method, properties and application of polysaccharide as emulsifier [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131937.
- [72] 李安琪, 杨曦, 张茵, 等. 多糖的乳化特性及其在乳液食品品质属性调控方面的研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(23): 322-328.
- [73] LIU J, WANG Y, LIU Y, et al. Synergistic effect of nano zinc oxide and tea tree essential oil on the properties of soluble soybean polysaccharide films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124361.
- [74] ATTAMA A A, MOMOH M A, BUILGERS P F. Lipid nanoparticulate drug delivery systems: a revolution in dosage form design and development [J]. Recent Advances in Novel Drug Carrier Systems, 2012, 5: 107-140.
- [75] LÜDTKE F L, STAHL M A, GRIMALDI R, et al. Optimization of high pressure homogenization conditions to produce nanostructured lipid carriers using natural and synthetic emulsifiers [J]. Food Research International, 2022, 160: 111746.
- [76] WANG M, YAN W, ZHOU Y, et al. Progress in the application of lecithins in water-in-oil emulsions [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 388-398.
- [77] WAN J, ZHONG S, SCHWARZ P, et al. Enhancement of antifungal and mycotoxin inhibitory activities of food-grade thyme oil nanoemulsions with natural emulsifiers [J]. Food Control, 2019, 106: 106709.
- [78] KOPALLE P, POTHANA S A, MADDILA S. Structural and physicochemical characterization of a rhamnolipid biosurfactant [J]. Chemical Data Collections, 2022, 41: 100905.
- [79] DE SOUZA E J D, KRINGEL D H, DIAS A R G, et al. Polysaccharides as wall material for the encapsulation of essential oils by electrospun technique [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 265: 118068.
- [80] YANG Y, GUPTA V K, DU Y, et al. Potential application of polysaccharide mucilages as a substitute for emulsifiers: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(2): 124800.
- [81] AMINIKHAH N, MIRMOGHTADAIE L, SHOJAE-ALIABADI S, et al. Investigation of structural and physicochemical properties of microcapsules obtained from protein-polysaccharide conjugate via the Maillard reaction containing *Satureja khuzestanica* essential oil [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126468.
- [82] SALMINEN H, BISCHOFF S, WEISS J. Formation and stability of emulsions stabilized by *Quillaja* saponin-egg lecithin mixtures [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1213-1222.
- [83] ZHANG S, TIAN L, YI J, et al. Mixed plant-based emulsifiers inhibit the oxidation of proteins and lipids in walnut oil-in-water emulsions: Almond protein isolate-camellia saponin [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106136.
- [84] PERINELLI D R, MUSTAFA A M, ANGELONI S, et al. Surface and emulsifying properties of raw ethanolic extracts from legumes containing soyasaponins and proteins [J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 30: 100872.
- [85] ZHANG X, WANG Q, LIU Z, et al. Plant protein-based emulsifiers: Mechanisms, techniques for emulsification enhancement and applications [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109008.
- [86] SHAO P, FENG J, SUN P, et al. Recent advances in improving stability of food emulsion by plant polysaccharides [J]. Food Research International, 2020, 137: 109376.