

基于植物精油的抗菌活性包装在食品保鲜中的研究进展

赵亚珠¹, 刘光发², 魏娜¹, 郝晓秀¹, 高翔³

(1.天津职业大学 包装与印刷工程学院, 天津 300410; 2.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457; 3.宏观世纪(天津)科技股份有限公司, 天津 301700)

摘要: **目的** 通过总结现有植物精油抗菌活性包装最新研究成果, 为促进食品活性包装的进一步研究和应用提供指导。**方法** 介绍对食源性致病菌具有抑制作用的代表性植物精油及其主要化学成分; 从破坏/影响细胞膜的结构及功能、遗传物质的复制、酶的活性和代谢功能等方面归纳总结植物精油对食源性致病菌的抑菌作用机制; 分析总结植物精油活性包装材料的主要制备工艺; 并介绍植物精油活性包装材料在食品保鲜中的最新应用成果; 针对目前植物精油活性包装领域存在的问题提出解决方案。**结论** 部分具有抑菌作用的植物精油可作为化学合成防腐保鲜剂的有效替代品, 随着精油在活性包装应用过程中存在的易挥发、有气味及食品安全风险等问题不断解决, 植物精油活性包装将在食品保鲜领域具有良好的应用前景。

关键词: 植物精油; 抑菌活性; 抑菌机制; 活性包装; 食品保鲜

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)11-0055-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.007

A Review of Antimicrobial Active Packaging Based on Plant Essential Oils and Its Application in Food Preservation

ZHAO Ya-zhu¹, LIU Guang-fa², WEI Na¹, HAO Xiao-xiu¹, GAO Xiang³

(1. College of Packaging and Printing Engineering, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China;
2. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
3. Hongguanshiji (Tianjin) Technologies Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the latest research achievements in antimicrobial active packaging based on plant essential oils (EOs), and provide reference for promoting further researches and applications of active packaging for food preservation. Typical EOs having inhibitory activity on food-borne microbial pathogens and their main chemical components were introduced. In particular, the possible antimicrobial mechanism of EOs against food-borne microbial pathogens was summarized from the structure and function of cell membrane, the replication of hereditary material, the enzymatic activity and metabolic functionalities. The main preparation process of active packaging materials based on EOs were analyzed and summarized. The innovative food packaging applications based on EOs were introduced. Finally, a series of solutions were proposed for the current problems existing in the active packaging based on EOs. EOs have gradually emerged as being the most promising ecological alternatives to synthetic bactericides and fungicides due to their strong antimicrobial activities, and active packaging based on EOs will show an optimistic application prospect in food preservation with the volatile, odorous, food safety risk and other problems of EOs being continuously solved in the

收稿日期: 2023-01-14

基金项目: 天津市科技计划项目(22YDTPJC00800); 天津市教委科研计划项目(2020KJ068)

作者简介: 赵亚珠(1985—), 女, 讲师, 主要研究方向为抗菌包装材料。

packaging process.

KEY WORDS: plant essential oils; antimicrobial activity; antimicrobial mechanism; active packaging; food preservation

由于食品含有丰富的营养物质,在生产、加工、物流及贮藏过程中极易遭受食源性致病菌的污染而腐败变质,其中水果、蔬菜和肉类等生鲜食品极易腐烂^[1]。近年来,食品流通更加频繁,对食品的货架期提出了更高的要求。为了控制食品的腐烂变质,抗菌剂被广泛应用于食品保鲜中。将防腐剂直接添加到食品中,可有效延长食品的货架期。然而,部分化学防腐剂可能存在一定的毒性,会影响消费者的健康^[2]。食品包装可在一定程度上保护食品免受外界因素影响,在食品包装体系中加入活性成分(如抗菌剂、抗氧化剂、乙烯吸收剂等),不仅可以延长食品的货架期,而且还有助于维持其品质^[3]。

抗菌剂作一类主要活性成分,被广泛应用于食品保鲜中,目前应用较多的有无机抗菌剂、有机合成抗菌剂和天然抗菌剂。使用化学防腐剂控制食品腐败具有一定的局限性,其可能会给消费者带来致癌、致毒、致畸等不良影响,并且降解缓慢还可能引起环境污染的问题^[4]。来源于动物、植物或微生物的天然抗菌剂不仅可用于抑制食品中病原微生物的生长,而且对人体安全性较高,在食品防腐保鲜应用方面显示出巨大潜力。随着近年来食品安全受到越来越多的关注,食品行业对天然抗菌剂的需求逐渐增加。植物精油作为一种天然抗菌剂,具有广谱抗菌活性^[5],可认为是化学防腐剂的潜在替代品。然而,植物精油在食品防腐保鲜应用方面也存在一些问题,例如大多植物精油不溶于水、易挥发、在光热条件下稳定性较差,并且容

易氧化分解。如何提升植物精油在应用过程中的稳定性和持久性一直是人们研究的重点。

目前,人们在利用植物精油对食品进行防腐保鲜方面做了很多研究,但这些成果距离产业化仍有一段距离。本文系统总结植物精油的抑菌效果及抑菌机制,介绍植物精油在食品包装领域的最新研究成果,综合分析其存在的问题并提出有效的解决方案,为植物精油在食品活性包装领域的技术研究及产业化应用提供参考和指导。

1 植物精油的抑菌活性

据统计,约有 1 000 多种植物具有抑菌作用,其抑菌成分主要为酚类化合物、黄酮类化合物、萜类化合物、生物碱和多糖等^[6]。植物精油通常为芳香族化合物的混合物,主要采用水蒸气蒸馏,超临界二氧化碳萃取,冷压、浸渍提取等工艺从植物中提取制得。近年来,使用植物精油(EOs)抑制生鲜食品的腐烂受到人们关注,植物精油对食源性致病菌的抑菌作用得到了广泛研究。在具有抑菌效果的植物精油中,其主要来源多为药草类烹饪原料和天然调料等。多种植物精油对食源性致病菌(如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、李斯特氏菌等)具有较强的抑制作用,主要有百里香精油、牛至精油、肉桂精油、丁香精油、柠檬草精油、大蒜精油、孜然精油等,其主要抑菌成分及含量见表 1。植物精油的抑菌活性可归因于精油中的化

表 1 具有抑菌作用的代表性植物精油
Tab.1 Representative EOs with antimicrobial activity

精油名称	主要抑菌成分	抑菌成分含量/%	抑菌效果	参考文献
百里香精油	百里香酚	13~55	对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的最 低抑菌浓度(MIC)均为 0.49 mg/mL。	[9-12]
	香芹酚	6~28		
牛至精油	香芹酚	10~43	对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的 MIC 分别为 1.25 和 2.5 μ L/mL。	[13-15]
	百里香酚	6~44		
肉桂精油	肉桂醛	52~87	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌的 MIC 分别为 1.25、0.62 和 0.31 g/L。	[16-18]
丁香精油	丁香酚	56~90	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的 MIC 分别为 1、0.5 和 0.25 g/L。	[19-20]
柠檬草精油	柠檬醛	68~71	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌的 MIC 分别为 0.2、0.1 和 0.1 μ L/mL。	[21-22]
大蒜精油	大蒜素	37~60	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、板栗疫菌、苹果霉 心病的 MIC 分别为 0.5、0.5、1 和 0.25 mg/mL	[23-24]
孜然精油	枯茗醛	22~40	对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、李斯特菌的 MIC 分 别为 32、2 和 4 mg/mL。	[25-26]

注:含量为抑菌成分在气相色谱中的峰面积相对百分比。

合物,其中酚类和醛类物质是植物精油中常见的具有显著抑菌作用的活性成分,其次是萜烯和酮类物质,其抑菌作用相对较弱^[7]。研究发现,同一种植物的精油成分也可能存在很大的差异,可归因于遗传变异、纬度位置、气候因素、植物采摘时间和提取工艺等因素存在差异^[8]。

2 植物精油对食源性细菌的抑菌机理

由于植物精油主要化学成分的分子结构和构型不同,它们之间的抑菌效果存在很大差异^[27]。鉴于植物精油化学成分的多样性,精油对微生物细胞的作用机制也大相径庭。植物精油抑菌机制可归纳为以下几个方面:

1) 影响或破坏细胞膜的结构和功能。由于植物精油具有亲脂性特征,可促进胞质膜中目标物质和细胞内成分向细胞外扩散。精油会引起细胞膜通透性增加,从而引起细胞膜内一些物质外渗,最终导致细胞死亡^[28]。有研究表明,肉桂精油可以引起大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的菌体形态发生变化,从而导致菌体内电解质、蛋白质和核酸外渗,其渗透量随着肉桂精油浓度的增加而升高^[29]。肉桂精油还可使腐生葡萄球菌的菌体表面发生明显皱缩现象,并导致部分菌体出现溶解和破裂^[30]。百里香精油纳米乳液可导致细胞膜发生降解并引起细胞质膜损伤,对细菌细胞的完整性造成了明显破坏,进而致使细胞内物质泄漏^[31]。

2) 作用于遗传物质。DNA 是微生物的重要遗传

物质,一些植物精油可以破坏菌体的 DNA 结构,阻碍其 DNA 复制^[32]。丁香精油可以阻碍细菌的 DNA 转录为 mRNA,还可以抑制 mRNA 的翻译,进而影响细菌 DNA 的复制^[33]。Liu 等^[34]发现百里香可引起绿脓杆菌细胞内活性氧(ROS)的积累,导致氧化应激介导的 DNA 损伤,百里香还可以嵌入绿脓杆菌基因组的 DNA 中,影响 DNA 的正常功能,最终导致细菌死亡。DNA 拓扑异构酶是介入 DNA 复制、转录、重组和修复,以及染色质组装所需的拓扑调整酶,可以参与或影响 DNA 的代谢。Cui 等^[35]研究发现菊花精油可有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的拓扑异构酶 I 和拓扑异构酶 II 的活性,导致其生成更高比例的超螺旋 DNA。

3) 影响酶的活性和代谢功能。酚类化合物中携带的羟基会损害微生物体内酶在三羧酸循环中的活性。山胡椒精油可有效诱导福氏志贺氏菌细胞中的氧化应激、脂质过氧化和 H_2O_2 的积累,引起能量和呼吸代谢中断,从而导致细胞氧化还原发生紊乱^[36]。三磷酸腺苷酶(ATP 酶)和碱性磷酸酶(ALP 酶)对细菌的生长具有重要作用,菊花精油可以大幅降低 2 种供试细菌中 ATP 酶和 ALP 酶的活性。菊花精油还可以通过戊糖磷酸途径(HMP 途径)抑制大肠杆菌的呼吸代谢^[35]。肉桂醛在处理大肠杆菌、单核细胞增生性李斯特菌等细菌后,菌体细胞内的 ATP 水平显著降低,肉桂醛的作用部位可能是菌体细胞中的 ATP 合成酶中的 α 链蛋白^[37]。

植物精油对细菌的主要抑菌机制见图 1。

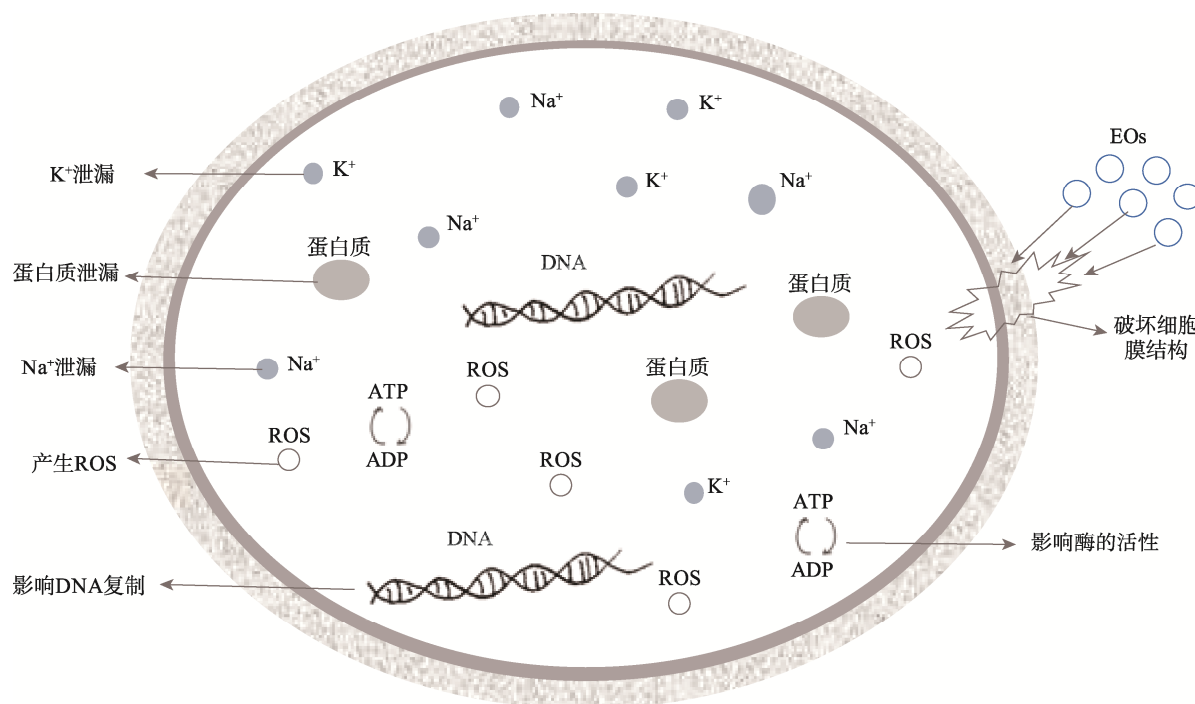


图 1 植物精油对细菌的抑菌机制
Fig.1 Action mechanisms of EOs against bacteria

3 植物精油抗菌活性包装最新研究成果

将植物精油与天然材料或合成聚合物等材料结合制备成食品包装材料,是延长食品货架寿命的有效途径。然而,由于植物精油具有高挥发性、气味刺激性、化学不稳定性和低水溶性等缺点,在制备食品活性包装材料时受到很多限制。此外,活性材料中释放的抗菌剂浓度过高可能会对被包装食品的感官和毒理特性产生不利的影响。为了克服这些缺点,人们已采用很多工艺来调控植物精油,制备出了基于植物精油的抗菌活性材料。

3.1 植物精油抗菌活性包装的主要制备工艺

近年来,国内外研究人员在精油活性包装的制备方面进行了研究,精油活性包装的主要制备方法及其抗菌效果见表 2。制备具有抗菌功能的植物精油活性材料主要有以下 4 种方式。

1) 将植物精油加入到包装材料中。将抗菌剂与包装材料的基材进行物理混合,通过控制一定的工艺条件来制备活性包装材料。此类方法是目前利用植物精油制备抗菌材料的常用方法,主要有以下 3 种方式:采用流延/浇注法制备抗菌膜,一般先将抗菌剂分散于成膜材料制成抗菌涂料,然后采用溶液浇注或流延的方法制成抗菌膜;制备可食用活性涂膜,将精油与淀粉、壳聚糖、大豆蛋白等成膜材料配制涂膜液,然后采用浸渍或喷洒等方式处理果蔬等食品;采

用静电纺丝的方法制备抗菌纤维,该制备方法主要有如下 3 种^[38]。

①将精油与聚合物溶液混合,然后对混合物进行静电纺丝来制备精油与聚合物(E/O)混合的纳米纤维(NFs)。

②首先将 E/O 负载到载体中,然后进行静电纺丝制得包含 E/O 载体的 NFs。

③制备具有核壳结构(E/O 和聚合物)的 NFs。

2) 将植物精油涂布于包装材料表面。涂布工序在纸和塑料包装领域中广泛应用,将植物精油与多孔介质材料等制备成抗菌涂料,涂布于纸张、纸箱和塑料薄膜等材料的表面,可制备涂布抗菌纸、抗菌纸箱和抗菌膜。

3) 将植物精油微胶囊化后制成抗菌小袋。植物精油的抑菌效果显著,部分植物精油的最低抑菌浓度(质量分数)可达到千分之一。然而植物精油易挥发,其抑菌效果通常会随着时间的延长而降低。为解决植物精油易挥发的问题,部分科研人员采用离子凝胶化反应、逐层组装法、喷雾干燥法等方法可将植物精油制成具有缓释效果的抗菌微胶囊。

4) 将植物精油制成抗菌衬垫后放于包装内部。一些冷鲜肉在贮藏过程中会渗出汁水,为了更好地维持冷鲜肉的品质,衬垫在一些冷鲜肉包装领域被广泛使用。将精油与纤维素衬垫等材料制备成活性衬垫,不仅对很多食源性致腐微生物具有很好的抑制作用,还能有效维持被包装食品的品质。

表 2 精油活性包装的主要制备方法及抑菌效果

Tab.2 Main preparation process of active packaging based on EOs and its antimicrobial activity

活性包装的制备方式	主要制备工艺	抑菌效果	参考文献
将植物精油加入包装材料中	使用埃洛石纳米管(HNT)封装香芹酚,将其掺入水性聚氨酯分散体中,制得缓释抗菌涂料,浇铸成膜	该抗菌膜对金黄色葡萄球菌、李斯特菌具有明显抑菌作用,并且香芹酚表现出持续释放的特性	[39]
	将超声分散后的罗勒精油乳液在高速剪切条件下分散至壳聚糖溶液中,制成抗菌涂膜液	当罗勒精油浓度为 8%时(质量分数),涂膜材料对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径分别为 12.85 mm 和 13.44 mm	[40]
	对水包油乳液进行静电纺丝,制备抗菌聚乙烯吡咯烷酮/肉桂精油(PVP/CEO)纳米纤维	肉桂精油质量分数为 2%~4%时,该抗菌纤维具有良好的抑菌性能	[41]
将植物精油涂布于包装材料表面	将百里香精油与蜂蜡、壳聚糖、多孔沸石等制成抗菌涂料,涂布于原纸,制成一种涂布抗菌纸	该抗菌纸对青霉、灰霉、根霉、交链孢霉的抑菌圈直径分别为 62、61、55 和 43 mm	[42]
	将含有牛至精油、丁香精油的壳聚糖溶液涂布于聚丙烯薄膜表面制得抗菌膜	该抗菌膜对奶酪样品中单核细胞增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌 O157:H7 具有抗菌功效	[43]
将植物精油微胶囊化后制成抗菌小袋	以壳聚糖和海藻酸钠为壳材,采用逐层组装法制备百里香精油微胶囊	微胶囊对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有良好的抑制作用,并可通过调整微胶囊的层数来调控其抑菌效果	[44]
将植物精油与衬垫结合制备抗菌衬垫	将含有百里香精油和牛至精油的乳液对纤维素垫进行处理,制得抗菌纤维素垫	该抗菌纤维素衬垫对恶臭假单胞菌、荧光假单胞菌、金黄色葡萄球菌等具有较强的抑菌作用	[45]

3.2 植物精油抗菌活性包装在食品保鲜中的应用研究

随着人们对食品安全需求的增加, 开发天然、环保、健康的食品活性包装已成为食品科学领域的一个研发方向, 植物精油活性包装被认为具有很大的应用潜力。由于植物精油良好的抑菌性能, 国内外一些科研人员将植物精油制备成抗菌膜、抗菌纸、抗菌纸箱、可食用涂膜、微胶囊小袋、抗菌衬垫、纳米抗菌纤维等活性包装材料, 在肉类 (如猪肉、鸡肉、去皮淡水虾)、水果类 (如草莓、桃), 以及汉堡、面包等食品中进行了防腐保鲜应用 (见表 3), 并取得了一些成效。

然而, 由于食品成分复杂, 精油活性包装的研发需要充分考虑食品的风味特征、贮藏和销售环境等因素。在提升食品货架寿命的同时不对食品的风味造成影响, 更不能带来食品安全隐患。虽然国内外的一

些科研人员在使用植物精油活性包装对食品保鲜方面做了一些研究, 但是这些研究距离产业化应用仍存在一定的距离。

4 植物精油抗菌活性包装存在的问题及解决方案

目前, 国内外一些科研人员在植物精油活性包装的研究方面取得了诸多成果, 为实现食品的绿色防腐保鲜探索了新的方向。总体来说, 国内外关于精油活性包装的研究成果多处于实验阶段, 还存在以下问题: 在食品安全评估方面缺乏深入研究; 有些精油活性包装存在气味和刺激性, 对食品风味可能存在影响; 部分精油活性包装的抑菌效果不够持久; 精油活性包装的生产成本较高。为了解决植物精油活性包装存在的问题, 可从以下几个方面努力。

表 3 精油活性包装在食品保鲜中的应用研究
Tab.3 Application research of active packaging based on EOs in food preservation

活性包装形式	植物精油	主要制备方法	被包装食品	应用效果	参考文献
抗菌膜	肉桂精油	离子凝胶化反应制备负载肉桂精油的壳聚糖纳米粒子 (CE-NPs), 将其涂布于低密度聚乙烯薄膜表面	冷鲜猪肉	该活性包装膜在冷藏条件下包装猪肉时表现出良好的抑菌性能, 其中 CE-NPs 粒径为 527 nm 时抑菌效果最佳	[46]
	丁香精油	线性低密度聚乙烯表面通过铬酸处理进行化学改性, 再涂布丁香精油	碎鸡肉	该抗菌膜可有效抑制碎鸡肉样品中的沙门氏菌和李斯特菌	[47]
抗菌纸	孜然籽精油	将纸浸入孜然精油的分散体中, 干燥制得抗菌纸	牛肉汉堡	该抗菌纸可延长牛肉汉堡的保质期	[48]
	肉桂精油	肉桂精油通过淀粉与纸纤维结合	食用菌	该抗菌纸具有良好的渗透性和抑菌性, 适合于高水分产品 (如双孢蘑菇) 的包装, 可减少其腐烂, 并避免水分凝结	[49]
抗菌纸箱	百里香精油	抗菌乳液涂布于瓦楞纸箱	草莓	抗菌纸箱可减少草莓腐烂, 维持其感官品质, 延长草莓货架寿命 1~2 d	[50]
可食用涂膜	百里香精油	将海藻酸钠、甘油、吐温 80 和百里香精油制成可食用涂料	桃子	该涂膜可有效地保持桃子的品质, 并延长其货架寿命 13 d	[51]
微胶囊小袋	丁香酚、柠檬醛	丁香酚和柠檬醛以渗透和扩散的方式进入多孔淀粉内部, 真空干燥后形成微胶囊	面包	含有 1 g 微胶囊的小袋可有效抑制切片面包中霉菌和酵母菌的生长, 且未影响面包的感官特性	[52]
抗菌衬垫	肉桂醛	以脱乙酰基蟹壳粉为交联剂, 以肉桂醛为抑菌剂, 制备一种负载肉桂醛的抑菌吸水衬垫	猪里脊肉	在 4℃贮藏条件下, 该抗菌衬垫能有效延缓冷却肉挥发性盐基氮值和菌落总数的上升, 可延长猪里脊肉贮藏期 4 d	[53]
纳米抗菌纤维膜	长叶薄荷精油	采用静电纺丝的方法将长叶薄荷精油包封到羧甲基纤维素明胶纳米纤维中, 制备抗菌纤维膜	去皮淡水虾	经该纳米纤维膜包装的淡水虾在气味、颜色、质地和口感方面具有最高的感官评分; 淡水虾在冷冻条件下的保质期从 6 d 延长至 14 d	[54]

4.1 针对精油活性包装开展食品安全风险研究

与食品直接接触的活性包装材料及制品必须满足国家相关法律和标准。植物精油大多来自食药同源植物,其安全性似乎在前人千百年的生活实践中已经得到证实。然而,摄入较高剂量的这些天然化合物也可能引起口服毒性问题,有必要在精油的有效剂量和毒性风险之间找到平衡点。在目前的一些研究中,关于抗菌剂在包装材料中的迁移规律研究相对较少。此外,有部分活性包装材料在制备过程中使用了植物精油和纳米材料,可能存在食品安全风险。在今后的研究中,需对精油活性包装开展食品安全风险研究,开发出对人体健康安全的抗菌活性包装产品。

4.2 降低活性包装中精油对食品感官品质的不利影响

部分研究表明,当植物精油超过一定的剂量时会对被包装产品的口感、风味、外观品质存在一定的不利影响^[55]。一些基于植物精油的抗菌材料在与水果接触时可能会产生一些负面作用,例如可能会改变水果原有的色泽,当精油使用剂量过高时甚至会加速水果腐烂。如何避免植物精油在食品包装过程中带来的负面作用,可通过对植物精油活性包装的制备工艺进行改进,例如在食品接触部位进行隔离,研究精油缓释技术,探索气相抑菌方式等。

4.3 提升活性包装中精油抑菌成分的稳定性

部分植物精油中的有效抑菌成分属于易挥发性物质,在食品防腐保鲜过程中容易损失^[56],有些植物精油抑菌成分暴露于空气、温度、光照、不同pH值和湿度等不同因素时稳定性较差^[57]。有效控制抗菌剂的释放速率一直是抗菌材料研发领域亟待解决的难题。在今后的工作中,应探索实现植物精油有效抑菌成分的可控释放,探明使用/加工环境对其性质的影响,并建立相应的理论基础,在微生物生长动力学和受控释放速率之间寻找到平衡点,以保证活性包装在贮藏期内具有适当的保护功能。为实现精油活性包装的推广应用,还应在产业化应用研究和降低生产成本等方面进一步深入研究。

5 结语

近年来,消费者对食品安全和饮食健康日益关注,推动了食品防腐保鲜技术必将朝着安全和绿色方向发展。由于目前食品防腐保鲜过程中常用的化学防腐剂存在一系列潜在危害,具有抗菌作用的植物精油将成为化学防腐剂在食品保鲜领域的有效替代者。然而,植物精油存在易挥发、气味性、刺激性等问题,

其化学稳定性和食品安全性也有待进一步研究,这些因素限制了植物精油在食品防腐保鲜中的应用。今后,在精油缓释控制技术、精油最佳剂量调控、活性包装材料应用方式、食品安全风险等方面仍需进行深入研究。此外,还可将植物精油与其他保鲜技术(如气调、低温、高压等)联合使用,通过产生协同作用,最大程度地延长被包装食品的货架寿命,并减少精油带来的气味和刺激性等负面影响,最终实现食品的绿色防腐保鲜。

参考文献:

- [1] KHETABI A, LAHLALI R, EZRARI S, et al. Role of Plant Extracts and Essential Oils in Fighting against Postharvest Fruit Pathogens and Extending Fruit Shelf Life: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 402-417.
- [2] JU Jian, WANG Chao, QIAO Yu, et al. Effects of Tea Polyphenol Combined with Nisin on the Quality of Weever (*Lateolabrax Japonicus*) in the Initial Stage of Fresh-Frozen or Chilled Storage State[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2017, 26(5): 543-552.
- [3] ZANETTI M, CARNIEL T K, DALCANTON F, et al. Use of Encapsulated Natural Compounds as Antimicrobial Additives in Food Packaging: A Brief Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 51-60.
- [4] CALO J R, CRANDALL P G, O'BRYAN C A, et al. Essential Oils as Antimicrobials in Food Systems - A Review[J]. Food Control, 2015, 54: 111-119.
- [5] JU Jian, XIE Yun-fei, GUO Ya-hui, et al. The Inhibitory Effect of Plant Essential Oils on Foodborne Pathogenic Bacteria in Food[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(20): 3281-3292.
- [6] 陈志迪, 王新宇, 李晴雯, 等. 植物源抑菌剂的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7433-7439. CHEN Zhi-di, WANG Xin-yu, LI Qing-wen, et al. Research Progress of Plant-Derived Antimicrobial Agents[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(18): 7433-7439.
- [7] BHAVANIRAMYA S, VANAJOTHI R, VISHNUPRIYA S, et al. Computational Characterization of Deleterious SNPs in Toll-like Receptor Gene that Potentially Cause Mastitis in Dairy Cattle[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 19: 101151.
- [8] LIU Guang-fa, SONG Hai-yan, ZHANG Qian, et al. Cellulose-Based Absorbent Pad Loaded with *Carum Copticum* Essential Oil for Shelf Life Extension of Re-

- frigerated Chicken Meat[J]. Packaging Technology and Science, 2022, 35(5): 425-433.
- [9] 陈悦, 胡璇, 于福来, 等. 18种芳香植物精油抑菌活性的比较研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 169-173.
CHEN Yue, HU Xuan, YU Fu-lai, et al. Comparative Study on the Antibacterial Activity of 18 Kinds of Aromatic Plant Essential Oils[J]. China Condiment, 2021, 46(4): 169-173.
- [10] REZAEI A, KHAVARI S, SAMI M. Incorporation of Thyme Essential Oil into the B-Cyclodextrin Nanosponges: Preparation, Characterization and Antibacterial Activity[J]. Journal of Molecular Structure, 2021, 1241: 130610.
- [11] 刘欢, 赵巨堂, 罗海涛, 等. 提取方法对百里香精油化学成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 331-339.
LIU Huan, ZHAO Ju-tang, LUO Hai-tao, et al. Effect of Extraction Methods on Chemical Constituents and Antioxidant Activity of Essential Oil from Thymus Vulgaris L[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 331-339.
- [12] RADÜNZ M, CAMARGO T M, HACKBART H C S, et al. Chemical Composition and in Vitro Antioxidant and Antihyperglycemic Activities of Clove, Thyme, Oregano, and Sweet Orange Essential Oils[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110632.
- [13] BOUYAHYA A, DAKKA N, TALBAOUI A, et al. Correlation between Phenological Changes, Chemical Composition and Biological Activities of the Essential Oil from Moroccan Endemic Oregano (*Origanum Compactum Benth*)[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 108: 729-737.
- [14] 朱晓富, 卢圣鄂, 卓维, 等. 不同产地牛至化学成分比较研究[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(7): 26-31.
ZHU Xiao-fu, LU Sheng-e, ZHUO Wei, et al. To Study and Compare the Chemical Constituents of Origanum Vulgare L. from Different Habitats[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(7): 26-31.
- [15] ZHAO Yun, YANG Yun-hai, YE Min, et al. Chemical Composition and Antifungal Activity of Essential Oil from Origanum Vulgare Against Botrytis Cinerea[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130506.
- [16] LEE J E, JUNG M, LEE S C, et al. Antibacterial Mode of Action of Trans-Cinnamaldehyde Derived from Cinnamon Bark (*Cinnamomum Verum*) Essential Oil Against *Agrobacterium Tumefaciens*[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2020, 165: 104546.
- [17] 陈珏锡, 张俊丰, 李源栋, 等. 无溶剂微波萃取肉桂精油及成分分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 258-265.
- CHEN Jue-xi, ZHANG Jun-feng, LI Yuan-dong, et al. Solvent-Free Microwave Extraction and Composition of Cinnamon Essential Oil[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(8): 258-265.
- [18] 路露, 束成杰, 葛翎, 等. 肉桂精油和肉桂醛的抑菌、抗氧化和酪氨酸酶抑制活性研究[J]. 林产化学与工业, 2022, 42(3): 105-110.
LU Lu, SHU Cheng-jie, GE Ling, et al. The Antibacterial Activity, Antioxidant and Antityrosinase Activities of Cinnamon Essential Oil and Cinnamaldehyde[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2022, 42(3): 105-110.
- [19] HADIDI M, POURAMIN S, ADINEPOUR F, et al. Chitosan Nanoparticles Loaded with Clove Essential Oil: Characterization, Antioxidant and Antibacterial Activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 236: 116075.
- [20] 于芯宜, 徐家延, 陈方圆, 等. 5种植物精油抗菌性能研究及特征成分分析[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(10): 1-9.
YU Xin-yi, XU Jia-yan, CHEN Fang-yuan, et al. Investigation on Antibacterial Properties and Characteristic Components of Five Kinds of Plant Essential Oils[J]. Storage and Process, 2022, 22(10): 1-9.
- [21] SOLTANZADEH M, PEIGHAMBARDoust S H, GHANBARZADEH B, et al. Chitosan Nanoparticles Encapsulating Lemongrass (*Cymbopogon Commutatus*) Essential Oil: Physicochemical, Structural, Antimicrobial and In-Vitro Release Properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 1084-1097.
- [22] 许泽文, 李环通, 王绮潼, 等. 柠檬草精油成分分析、抑菌性及对巨峰葡萄保鲜研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 51-59.
XU Ze-wen, LI Huan-tong, WANG Qi-tong, et al. Analysis of Volatile Components, Antibacterial Activity and Perseveration on Kyoho Grapes of Lemongrass Essential Oil[J]. Food Research and Development, 2020, 41(1): 51-59.
- [23] SOWBHAGYA H B, PURNIMA K T, FLORENCE S P, et al. Evaluation of Enzyme-Assisted Extraction on Quality of Garlic Volatile Oil[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1234-1238.
- [24] 伍燕, 何元琴, 易君明, 等. 不同大蒜精油成分及生物活性对比分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 75-81.
WU Yan, HE Yuan-qin, YI Jun-ming, et al. Comparative Analysis of Components and Biological Activities of

- Different Garlic Essential Oils[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 75-81.
- [25] ALIZADEH B B, NOSHAD M, FALAH F. Cumin Essential Oil: Phytochemical Analysis, Antimicrobial Activity and Investigation of Its Mechanism of Action through Scanning Electron Microscopy[J]. Microbial Pathogenesis, 2019, 136: 103716.
- [26] 权美平. 国产孜然精油化学成分分析研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(5): 178-181.
- QUAN Mei-ping. Research Progress on Chemical Composition Analysis of Domestic Cumin Essential Oil[J]. China Condiment, 2018, 43(5): 178-181.
- [27] SILVA B D, ROSÁRIO D K A, WEITZ D A, et al. Essential Oil Nanoemulsions: Properties, Development, and Application in Meat and Meat Products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 1-13.
- [28] 王梦如, 乔海颜, 柯梦雨, 等. 植物源精油的抑菌机制及其在食品保鲜包装中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 439-444.
- WANG Meng-ru, QIAO Hai-yan, KE Meng-yu, et al. The Antibacterial Effect of Plant-Originated Essential Oils on Food Preservation and Its Application on Packaging[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 439-444.
- [29] ZHANG Yun-bin, LIU Xiao-yu, WANG Yi-fei, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Cinnamon Essential Oil against *Escherichia Coli* and *Staphylococcus Aureus*[J]. Food Control, 2016, 59: 282-289.
- [30] 蓝蔚青, 刘嘉莉, 翁忠铭, 等. 10 种植物精油对腐生葡萄球菌抑制效果比较及肉桂精油抑菌机制分析[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 38-44.
- LAN Wei-qing, LIU Jia-li, WENG Zhong-ming, et al. Effects of Ten Plant Essential Oils and Antimicrobial Mechanism of Cinnamon Essential Oil Against *Staphylococcus Saprophyticus*[J]. Food Science, 2020, 41(19): 38-44.
- [31] HE Qiao, ZHANG Lian-jiao, YANG Zhe-hao, et al. Antibacterial Mechanisms of Thyme Essential Oil Nanoemulsions against *Escherichia Coli* O157:H7 and *Staphylococcus Aureus*: Alterations in Membrane Compositions and Characteristics[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102902.
- [32] 萨仁高娃, 胡文忠, 冯可, 等. 植物精油及其成分对病原微生物抗菌机理的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 285-294.
- SA Ren-gao-wa, HU Wen-zhong, FENG Ke, et al. Research Progress on Antibacterial Mechanism of Plant Essential Oil and Its Components Against Pathogenic Microorganisms[J]. Food Science, 2020, 41(11): 285-294.
- [33] XU Jian-guo, LIU Ting, HU Qing-ping, et al. Chemical Composition, Antibacterial Properties and Mechanism of Action of Essential Oil from Clove Buds Against *Staphylococcus Aureus*[J]. Molecules, 2016, 21(9): 1194.
- [34] LIU Ting, KANG Jia-mu, LIU Liu. Thymol as a Critical Component of *Thymus Vulgaris* L. Essential Oil Combats *Pseudomonas Aeruginosa* by Intercalating DNA and Inactivating Biofilm[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110354.
- [35] CUI Hai-ying, BAI Mei, SUN Yan-hui, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Chuzhou Chrysanthemum Essential Oil[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48:159-166.
- [36] CHEN Feng, MIAO Xiang, LIN Zi-xin, et al. Disruption of Metabolic Function and Redox Homeostasis as Antibacterial Mechanism of *Lindera Glauca* Fruit Essential Oil against *Shigella Flexneri*[J]. Food Control, 2021, 130: 108282.
- [37] DOYLE A A, STEPHENS J C. A Review of Cinnamaldehyde and Its Derivatives as Antibacterial Agents[J]. Fitoterapia, 2019, 139: 104405.
- [38] OSANLOO M, ARISH J, SERESHTI H. Developed Methods for the Preparation of Electrospun Nanofibers Containing Plant-Derived Oil or Essential Oil: A Systematic Review[J]. Polymer Bulletin, 2019, 77(11): 6085-6104.
- [39] HENDESSI S, SEVINIS E B, UNAL S, et al. Antibacterial Sustained-release Coatings from Halloysite Nanotubes/Waterborne Polyurethanes[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 101:253-261.
- [40] 吴秀华, 罗欣, 何鹏. 壳聚糖精油复合涂膜对生鲜猪肉的保鲜效果研究[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 140-145.
- WU Xiu-hua, LUO Xin, HE Peng. Effect of Coating Treatment by Chitosan-Basil Oil Solution on Preservation of Fresh Pork[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 140-145.
- [41] KESICI G H, CENGİZ Ç F, SESLİ Ç E. Antibacterial PVP/Cinnamon Essential Oil Nanofibers by Emulsion Electrospinning[J]. The Journal of The Textile Institute, 2018, 110(2): 302-310.
- [42] 杨玉函, 刘光发, 高文华, 等. 百里香精油-蜂蜡抗菌纸的制备及其性能研究[J]. 数字印刷, 2020(2): 69-76.
- YANG Yu-han, LIU Guang-fa, GAO Wen-hua, et al. Preparation of Antimicrobial Active Paper Based on

- Thyme Essential Oil and Beeswax and Its Properties Analysis[J]. Digital Printing, 2020(2): 69-76.
- [43] TORLAK E, NIZAMLIOĞLU M. Antimicrobial Effectiveness of Chitosan-Essential Oil Coated Plastic Films against Foodborne Pathogens[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2011, 27(3): 235-248.
- [44] ZHANG Zhao, ZHANG Shan-shan, SU Rong-rong, et al. Controlled Release Mechanism and Antibacterial Effect of Layer-by-Layer Self-Assembly Thyme Oil Microcapsule[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(6): 1427-1438.
- [45] AGRIMONTI C, WHITE J C, TONETTI S, et al. Antimicrobial Activity of Cellulosic Pads Amended with Emulsions of Essential Oils of Oregano, Thyme and Cinnamon Against Microorganisms in Minced Beef Meat[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 305: 108246.
- [46] HU Jing, WANG Xu-ge, XIAO Zuo-bing, et al. Effect of Chitosan Nanoparticles Loaded with Cinnamon Essential Oil on the Quality of Chilled Pork[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 519-526.
- [47] MULLA M, AHMED J, AL-ATTAR H, et al. Antimicrobial Efficacy of Clove Essential Oil Infused into Chemically Modified LLDPE Film for Chicken Meat Packaging[J]. Food Control, 2017, 73: 663-671.
- [48] HEMMATKHAH F, ZEYNALI F, ALMASI H. Encapsulated Cumin Seed Essential Oil-loaded Active Papers: Characterization and Evaluation of the Effect on Quality Attributes of Beef Hamburger[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(3): 533-547.
- [49] SHAO Ping, YU Jiang, CHEN Hang-jun, et al. Development of Microcapsule Bioactive Paper Loaded with Cinnamon Essential Oil to Improve the Quality of Edible Fungi[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 27: 100617.
- [50] 赵亚珠, 郝晓秀, 孟婕, 等. 百里香精油抗菌包装纸箱对草莓保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 258-263.
- ZHAO Ya-zhu, HAO Xiao-xiu, MENG Jie, et al. Effect of Antimicrobial Packaging Cartons Coated with Thyme Essential Oil on Quality and Shelf Life of Strawberries[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(11): 258-263.
- [51] AYUB H, AHMAD A, AMIR R M, et al. Multivariate Analysis of Peach Quality Treated with Essential Oil Coatings[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): 1-7.
- [52] JU Jian, XIE Yun-fei, YU Hang, et al. A Novel Method to Prolong Bread Shelf Life: Sachets Containing Essential Oils Components[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109744.
- [53] 刘金铭, 范旭, 孔保华, 等. 添加肉桂醛的海藻酸钠/蟹壳粉双交联水凝胶吸水衬垫对冷却肉的保鲜效果[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(4): 148-158.
- LIU Jin-ming, FAN Xu, KONG Bao-hua, et al. Effect of Sodium Alginate/Crab Shell Powder Bi-Crosslinked Water Absorbent Pad Added with Cinnamaldehyde on Preservation of Chilled Meat[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(4): 148-158.
- [54] SHAHBAZI Y, SHAVISI N, KARAMI N, et al. Electrospun Carboxymethyl Cellulose-Gelatin Nanofibrous Films Encapsulated with *Mentha Longifolia* L. Essential Oil for Active Packaging of Peeled Giant Freshwater Prawn[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112322.
- [55] YOUSUF B, WU S, SIDDIQUI M W. Incorporating Essential Oils or Compounds Derived Thereof into Edible Coatings: Effect on Quality and Shelf Life of Fresh/Fresh-Cut Produce[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 108: 245-257.
- [56] MUÑOZ-SHUGULÍ C, VIDAL C P, CANTERO-LÓPEZ P, et al. Encapsulation of Plant Extract Compounds Using Cyclodextrin Inclusion Complexes, Liposomes, Electrospinning and Their Combinations for Food Purposes[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 108: 177-186.
- [57] KFOURY M, AUEZOVA L, GREIGE-GERGES H, et al. Encapsulation in Cyclodextrins to Widen the Applications of Essential Oils[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 17(1): 129-143.

责任编辑: 曾钰婵