

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

王梦如, 乔海颜, 柯梦雨, 戴瑜禧, 李 萌, 秦 泰, 于 航, 谢云飞, 姚卫蓉

The Antibacterial Effect of Plant-originated Essential Oils on Food Preservation and Its Application on Packaging

WANG Mengru, QIAO Haiyan, KE Mengyu, DAI Yuxi, LI Meng, QIN Tai, YU Hang, XIE Yunfei, and YAO Weirong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

植物精油对果蔬霉菌的抑制及在果蔬保鲜中的应用

Inhibition of Plant Essential Oils on Mold of Fruits and Vegetables and Its Application in Preservation of Fruits and Vegetables

食品工业科技. 2020, 41(6): 311-317

乳酸链球菌素抑菌机理及在食品保鲜中的研究进展

Research Progress on the Bacteriostatic Mechanism of Nisin and Its Application in Food Preservation

食品工业科技. 2021, 42(3): 346-350

植物精油稳定性的改善及其在食品中应用研究进展

Research Progress on Stability Improvement of Plant Essential Oil and Its Application in Food

食品工业科技. 2020, 41(7): 353-357

超临界溶液浸渍法及其在食品活性包装材料中的应用研究进展

Advances in Research on Supercritical Solution Impregnation and Its Application in Active Food Packaging

食品工业科技. 2018, 39(22): 309-313.327

活性包装薄膜的功能特性表征及对食品保鲜作用的研究进展

Research Progress on Characterization of Functional Properties of Active Packaging Films and Its Preservation Effect on Food

食品工业科技. 2020, 41(3): 339-344

植物精油纳米包埋技术的作用机制及其在肉品保鲜中的应用

Mechanism of Nano-embedding Technology of Plant Essential Oil and Its Application in Meat Preservation

食品工业科技. 2020, 41(21): 345-350



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040037

WANG Mengru, QIAO Haiyan, KE Mengyu, 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. (in Chinese with English abstract).
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040037

· 专题综述 ·

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

王梦如, 乔海颜, 柯梦雨, 戴瑜禧, 李 萌, 秦 泰, 于 航*, 谢云飞, 姚卫蓉
(江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学食品学院食品安全与
质量控制研究所, 江苏无锡 214122)

摘 要:随着人们生活水平的不断提高, 对饮食结构的要求随之提高, 食品安全问题已成为关注焦点之一。而目前在食品生产与包装中使用最广泛的化学防腐剂已不足以满足人们对于安全、健康、绿色的需求。因此, 植物源精油的抗菌保鲜方式因其显著的抗菌效果与无毒无残留的特性受到越来越多的关注, 其在食品保鲜上的应用已成为研究热点。本文就植物源精油的抑菌活性、作用机理及其在食品保鲜中的应用进行综述, 以期天然食品防腐保鲜剂的开发及植物源精油在食品保鲜中的应用提供参考。

关键词:植物源精油, 食品保鲜, 抑菌作用, 抑菌机理, 活性包装

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)07-0439-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040037

本文网刊:



The Antibacterial Effect of Plant-originated Essential Oils on Food Preservation and Its Application on Packaging

WANG Mengru, QIAO Haiyan, KE Mengyu, DAI Yuxi, LI Meng, QIN Tai, YU Hang*,
XIE Yunfei, YAO Weirong

(National Key Laboratory of Food Science and Technology, Food Safety and Quality Control Research Center, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Nowadays, the requirements of dietary structure are improved with the continuous improvement of people's living standard, and the food safety problem has become one of the focal point. However, chemical preservatives are no longer sufficient to meet needs of consumers regarding their safety, health, and greenness. Antimicrobial properties of plant-originated essential oils have attracted more and more attention due to their remarkably antimicrobial effects, non-toxic and non-residue characteristics. Therefore, application of essential oils in fruit preservation has become a hot topic. This article first reviews antimicrobial performance of plant-originated essential oils incorporating with their antimicrobial mechanisms. Subsequently, applications of essential oils in the preservation of foods are summarized. Limitations of essential oils were listed and corresponding potential solutions are lastly provided, in order to provide reference for the development of natural food preservatives and the application of plant-originated essential oils in food preservation.

Key words: plant-originated essential oils; preservation of foods; antimicrobial performance; antimicrobial mechanisms; active packaging

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1602300); 国家自然科学基金 (32001627); 江苏省科技厅面上项目 (BE2019362); 大学生创新创业训练计划项目 (202010295047Z)。

作者简介: 王梦如 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 食品安全与质量控制, E-mail: 1369429385@qq.com。

* 通信作者: 于航 (1991-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品安全与质量控制, E-mail: hangyu@jiangnan.edu.cn。

如今,大剂量化学抑菌剂的使用在一定程度上提升了易腐败食品的货架期,但同时导致环境恶化,对人体健康造成损害,所以化学杀菌剂的使用受到了严格的限制。因此,研究和开发新型天然植物源抑菌剂成了食品保鲜发展的重要方向。其中,植物源精油为天然植物源抑菌剂中不可或缺的一部分,其无毒、无残留的特性可满足人们对绿色饮食的需求。其化学组成十分复杂,可分为萜烯类化合物、芳香族化合物、小分子脂肪族化合物以及其它化合物四类^[1](如图 1 所示)。然而,植物源精油由于其易被氧化、易挥发、难溶于水等特性^[2],限制了其在食品抑菌保鲜中的广泛应用。因此,需通过包埋、涂膜等处理方式将液体的植物源精油与缓释材料相结合,以控制植物源精油的释放,并增强其抗真菌活性,由此提高植物源精油的稳定性^[3]。精油成分还适合与活性包装材料结合,进一步拓展植物源精油在实际包装中的应用前景。本文综述了植物源精油的抑菌性能和机制,及其在食品保鲜中的应用和局限性,以期天然食品防腐保鲜剂的开发及植物源精油在食品保鲜中的应用提供参考。

1 植物源精油的抑菌机制

植物源精油是指从植物的根、茎、叶和果等部位通过蒸馏、压榨等方式提取出来的具有一定气味的挥发性油状液体的生物活性物质^[4]。植物源精油中普遍含有多种抗菌成分,能有效降低食品中微生物和酶的活性,使易腐败食品的生理活性下降,延长其保鲜周期^[5]。

植物源精油普遍具有较好的抑菌活性。图 2 总结了植物源精油主要的抑菌机理,包括破坏菌体细胞壁和细胞膜体系,破坏干扰细胞内能量代谢过程的蛋白质和遗传物质结构,以及干扰菌体内能量的代谢过程。

1.1 破坏细胞壁和细胞膜体系

微生物的细胞壁和细胞膜可以控制细胞内外营养物质和代谢产物的运输,维持细胞的正常生命活动。植物源精油所含有的活性成分可对微生物的细胞壁与细胞膜产生直接或间接作用,破坏细胞壁的完整性、细胞膜的通透性与流动性,使营养物质和代谢产物无法正常穿过细胞膜,导致微生物失去营养而停滞生长,进而导致微生物细胞膜结构的破坏,其内部诸多细胞器等成分的渗出,并最终导致细胞失活死亡^[6]。研究表明,精油中含有的冰片成分能够改变细胞膜的通透性,促进了其他抑菌成分进入细胞质,引起细胞裂解;肉桂醛^[7]、桉叶精油^[8]、茶多酚^[9]等均可作用于细菌的细胞膜,改变其通透性,导致细胞内容物的大量外泄,致使细菌死亡,从而达到抑菌效果。

此外,精油本身的物理性质也加强了其对细胞膜的破坏效果。研究表明,一定浓度的丁香酚可以利用其疏水性引起微生物膜系统结构破坏,抑制真菌菌丝体生长和孢子萌发^[10];香樟精油可以通过降低质膜中麦角固醇的含量,改变细胞膜通透性,抑制灰绿曲霉生长^[11]。

1.2 破坏蛋白质和遗传物质结构

植物源精油可通过破坏微生物细胞膜的结构,使得精油中小分子物质穿过细胞膜与细胞内的极性物质结合,阻碍蛋白质合成,导致 DNA 无法复制,或遗传物质及遗传因子的合成改变,从而影响微生物体内功能性蛋白或酶的活性,抑制其生长^[12]。研究表明,公丁香精油对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌作用后, DNA 条带开始出现弥散,说明公丁香精油在抑菌过程中引起了基因组 DNA 的断裂^[13];此外,丁香酚对单核增生李斯特菌的 DNA 有嵌合作用,导致胞内大分子(DNA、蛋白质)的浓度均呈下降趋势,影响菌体正常的复制转录过程^[14]。1,8-桉叶素作用于沙门

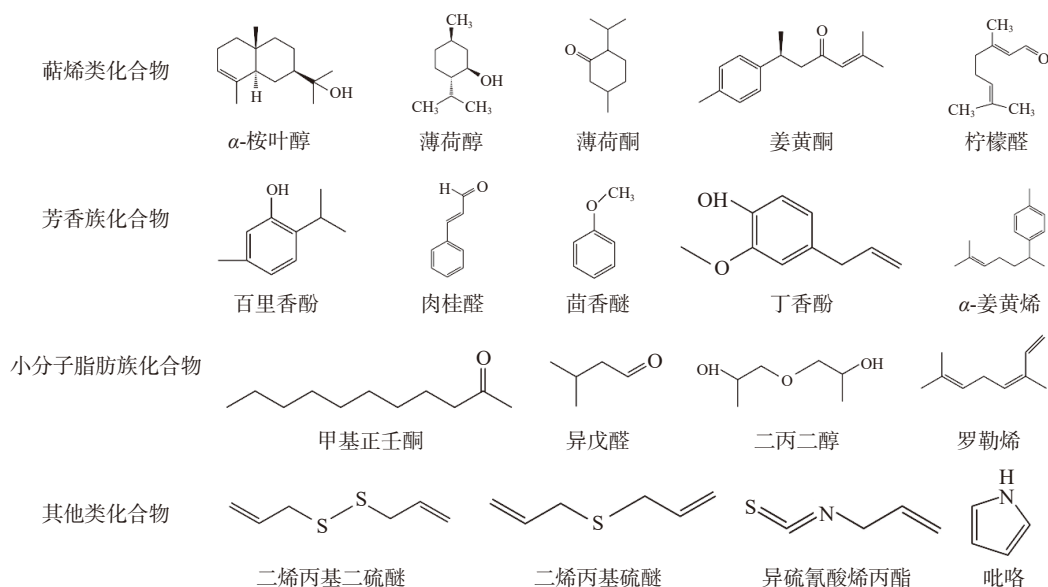


图 1 植物源精油中主要成分及其化学结构

Fig.1 Major components in plant-originated essential oils and their chemical structure

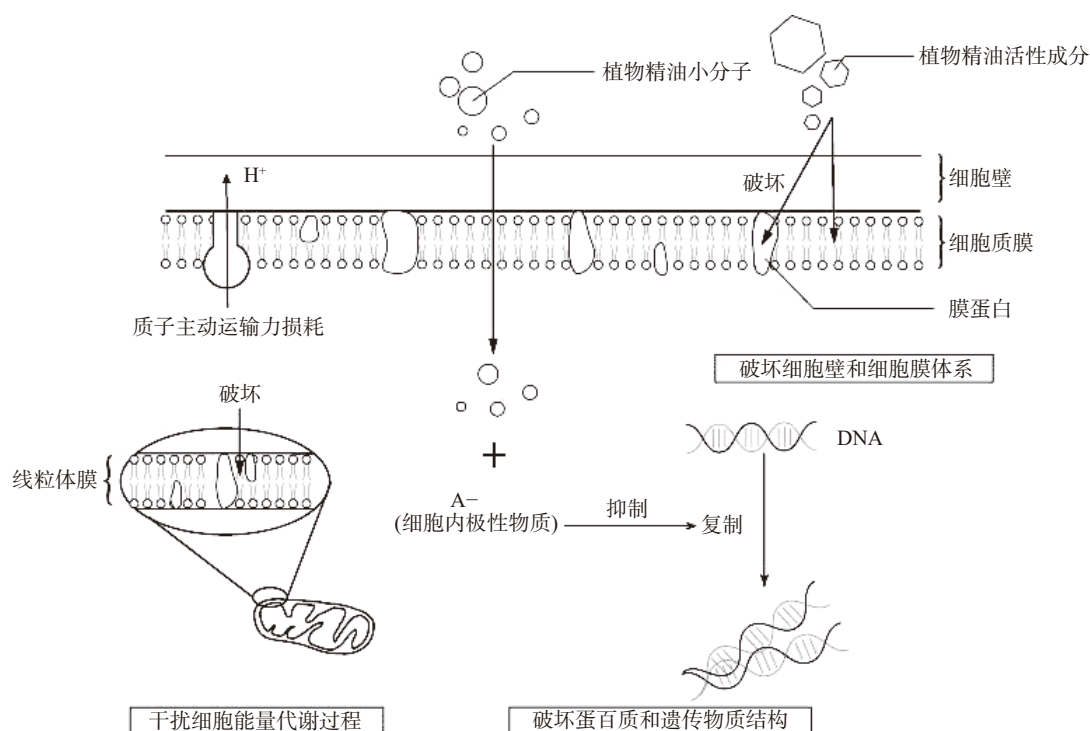


图 2 植物源精油抑菌机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the antibacterial mechanism of plant-originated essential oils

氏菌时,在检测到的 3011 个蛋白质中,435 个蛋白质 (14.45%) 有显著差异表达,这些蛋白质参与了 935 个细胞内生物过程、477 个分子功能,其中包括与碳水化合物、核苷酸、氨基酸、脂质和能量代谢相关的蛋白,影响了细胞的生理生化能力^[15]。

1.3 干扰细胞内能量代谢过程

植物源精油可以破坏微生物细胞内的线粒体膜,使细胞丧失供氧功能,抑制微生物的呼吸作用,使所有的合成代谢活动受阻,动态膜结构不能维持,代谢方向趋于水解,最终导致细胞自溶^[16]。如胜红蓟 (*Ageratum conyzoides*) 精油可以作用于黄曲霉毒素内膜系统^[17];柠檬醛影响黄曲霉氧化还原系统及能量代谢途径的正常运行,抑制其生长^[18]。

2 植物源精油在包装中的应用

植物源精油普遍存在易挥发、易氧化、稳定性差、气味独特等特性,制约其在水果保鲜中的应用。基于此,现有研究致力于开发基于植物源精油的活性包装,进一步拓展其在水果保鲜中的应用。植物源精油在活性包装中的构建形式如图 3 所示,主要包括:将精油混入基质材料、精油结合载体形成抗菌体和将精油直接充入气调包装三种形式。

2.1 将精油混入基质材料

将精油直接混入基质材料,是目前构建活性包装的最常用的方法之一。根据应用方式可分为三种形式。

第一种是直接将植物源精油加入载体中,通过共混成型或者溶剂流延制成抗菌材料。采用浇铸法所制备的含有花椒精油的玉米淀粉基薄膜表现出较

强的抗菌活性、较高的断裂伸长率及不透明度^[19]。采用逐层组装技术,结合百里香精油纳米乳液所制备的聚电解质结冷胶—壳聚糖多层膜亦表现出较强的抗菌活性及机械柔韧性^[20]。此类保鲜膜均有望成为一种潜在的、具有持续释放植物源精油抑菌活性的食品抗菌包装材料。

第二种是将植物源精油混入可食用膜基质中,通过包裹、浸渍、涂布、喷洒等方式覆盖在食品的表面或内部。例如:1% 的肉桂精油与 10% 的阿拉伯树胶构建的可食用涂层,在处理番石榴时表现出较强抗氧化及抗菌性能,且可显著降低番石榴的成熟速度,有效保持番石榴果实品质特征^[21]。在羟丙基- β -环糊精浓度为 2.8%、包合时间 67.6 h、包合温度为 27.0 °C 条件下构建的八角茴香精油/环糊精包合物的活性复合膜体系对鲜切山药具有良好的护色保鲜作用^[22]。

第三种是以涂膜方式在成型的包装材料上吸附植物源精油成分。这种方式主要应用于具有一定吸附性的纸质包装和聚合物材料包装上。例如,将 20% 浓度的柠檬醛和山苍子精油聚乙酸乙烯酯(PVA)涂覆在食品包装膜上,其对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有显著的杀菌效果,且对酵母菌和霉菌微生物群的生长具有抑制作用^[23]。将 3.5% 浓度的柠檬草精油与聚乙烯醇复配成涂膜液,涂布于低密度聚乙烯薄膜(LDPE)上所制备的复合膜可延长葡萄的货架寿命^[24]。

在此类方法中,植物精油可以提高可食性膜的物理特性,同时有效阻挠致病菌的侵入及生长,两者协同,对食品有良好的保鲜效果^[25]。而由于植物精油的不稳定性,膜基质中的精油对光、热敏感,导致精

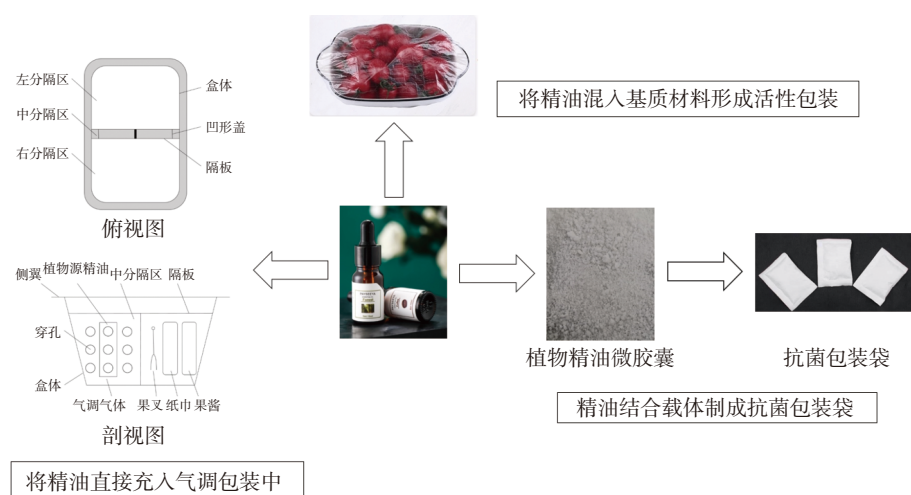


图3 植物源精油在活性包装中的构建形式

Fig.3 Active packaging combined with plant-originated essential oils

油的性能发生改变,从而影响膜的包装特性及抗菌性。后续研究应重点提高精油的稳定性,如采用静电纺丝技术将肉桂醛/ β -环糊精包合物引入聚乳酸纳米纤维中制得聚乳酸/肉桂醛/ β -环糊精纳米膜,与传统的铸膜法相比,温和的电纺丝工艺更有利于保持薄膜中肉桂醛的含量^[26]。

2.2 精油结合载体形成抗菌体

基于精油成分构建的抗菌体是另一种常用的活性包装形式。首先通过将精油吸附或包埋进载体材料制成抗菌体,随后将其装入食品包装袋中实现防腐保鲜的功效。

多孔淀粉、 β -环糊精(β -CD)和壳聚糖均为良好的精油缓释载体。在羧甲基壳聚糖和海藻酸钠的质量分数分别为1.2%和2.4%时制得的羧甲基壳聚糖-海藻酸钠-多孔淀粉/百里香精油微胶囊中,其封闭体系可以延长麝香草酚在室温下的释放时间^[27]。在肉桂醛- β -CD复合物中,随着微胶囊的形成,肉桂醛显示出更高的水溶性、温度稳定性和抑菌活性^[28]。

微胶囊化的植物源精油可以降低精油的免疫原性和毒副作用,且提高精油的氧化稳定性、耐热性、抑菌活性及其在包装体系中的保留率,使其长期保持稳定的生物活性,实现食品保鲜包装功能化^[29]。如将丁香精油负载于壳聚糖纳米粒中,相较于游离的丁香精油,其复合体系的氧化性、保留率及对单增李斯特菌和金黄色葡萄球菌的抑菌活性均显著提高^[30]。

然而,此法在应用过程中涉及到有效成分释放扩散规律及与包装材料协同抗菌的优化等还需进一步研究,后续研究可重点解析植物源精油与载体的作用方式及其在不同环境中的释放动力学规律^[31]。亦可构建新型的缓释体系,开发具有高效抗菌活性的新型生物基控释包装材料。其中,纳米纤维作为食品包装材料受到了越来越多的关注^[32]。例如,在水溶液中将 β -CD连接于TEMPO-氧化纤维素纳米纤维的羧基上,此缓释体系对香芹酚具有良好的控释作用,且香芹酚对枯草芽孢杆菌的抗菌活性大大提高^[33];将百

里香酚/ γ -环糊精包合物包埋在电纺玉米醇溶蛋白纳米纤维网中制成食品包装材料,百里香酚-玉米醇溶蛋白/ γ -环糊精-包合物-纳米纤维网复合体系对食品中细菌的生长具有良好的抑制作用^[34]。

2.3 将精油直接充入气调包装

植物源精油因其具有挥发性,可以气体形式应用于气调包装。充入的精油成分在缝隙、膜材料和食品中的蒸发迁移达到平衡分布,形成一个良好的抑菌氛围。如在1℃和90%的相对湿度下,甜樱桃经丁香酚、麝香草酚、薄荷醇联合气调包装后,其重量损失、颜色、硬度变化、梗褐变均有所改善,且细菌、霉菌和酵母菌的总数均显著降低^[35]。将一定配比的复合精油充入冷却牛肉的气调包装盒中进行保鲜包装,随后在0~4℃低温下保藏,可使牛肉保鲜期达到24d^[36]。气调包装利用植物源精油易挥发的特性,将其作为特种气体充入气调体系,以实现直接、高效地抑菌。

而许多精油成分虽已列入对人体无害组分或批准为食品香料添加剂^[37],但其中的某些成分仍具有一定刺激性或毒性,使用时需控制其用量。后续研究还应进一步探究植物源精油的抑菌机理及进入人体的活性成分的确定,必要时确定其LD₅₀值,降低植物源精油对人体的刺激性或毒性,有助于行业进一步发展进步。

在气调包装的应用过程中,植物源精油与食品直接接触,其中的独特气味会迁移进入食品中,从而影响食品本身的风味,对食品的感官产生负面影响^[38]。此外,植物源精油亦可能与食品中的成分相互作用,使其营养成分或功能成分发生改变^[39]。为此,可以将气调包装与其它方式协同使用。如在0℃下贮藏时,肉桂精油-壳聚糖涂膜协同聚偏二氯乙烯低氧气调(50% CO₂+35% O₂+15% N₂)包装可以对黑猪肉起到良好的保鲜效果^[40]。

3 展望

随着人们生活水平的不断提高和消费观念的不

停转变以及安全意识的日益增强,市场的目光也逐渐从传统的化学抗菌防腐剂转向安全、无公害的天然防腐剂。植物源精油来源天然、分布广泛,具有良好的环境兼容性,加之广谱、高效的抗菌活性,使其成为了开发无公害天然消毒剂、防腐保鲜剂的一个重要资源,具有巨大的潜在应用价值和广阔的市场前景。

然而,不同种类、不同浓度的植物源精油呈现的抑菌机制亦不尽相同。植物精油对细胞其他结构和功能的影响如 DNA、能量代谢等尚处于初步研究阶段,其明确靶位点和作用方式还不能确定,需要进行植物精油对生物分子水平如氨基酸、碱基等和基因水平的更深一步的研究,明确精油的作用方式。除此之外,精油的成分十分复杂,现有的研究多将精油作为一个整体或选择精油中某一主要成分来进行研究,进而忽略了植物精油中不同成分的共同作用或多种精油协同作用机理的深入研究。

制约植物源精油在食品防腐保鲜中的广泛应用的因素仍有很多。在研究天然的植物源精油在食品的抑菌保鲜过程中,应首先分析目标食品中标志性腐败菌,科学地筛选具有良好抑菌活性的天然植物源精油,以期实现高效抑菌。同时,还应选择合适的保鲜形式,构建稳定的植物精油活性包装,综合评价其保鲜效果,以期提高植物源精油的抗菌效率,延长其货架期。最后在基础研究领域,应进一步对植物源精油在稳定性、安全性、缓释规律及抗菌抗氧化机理等方面有更为深入全面的研究,扩展其在抗菌包装中的应用前景。

参考文献

[1] 李文茹,施庆珊,谢小保,等.植物精油化学成分及其抗菌活性的研究进展[J].微生物学通报,2016,43(6):1339-1344. [LI W R, SHI Q S, XIE X B, et al. Progress on the antimicrobial properties of essential oils[J]. Microbiology, 2016, 43(6): 1339-1344.]

[2] ZHONG X, WANG X, ZHOU N, et al. Chemical characterization of the polar antibacterial fraction of the ethanol extract from *Rosmarinus officinalis*[J]. Food Chemistry, 2020, 344(1): 128674.

[3] ZHU Y, LI C, CUI H, et al. Encapsulation strategies to enhance the antibacterial properties of essential oils in food system[J]. Food Control, 2020, 123(5): 107856.

[4] FILHO J, SILVA G, EGEA M, et al. Essential oils as natural fungicides to control *Rhizopus stolonifer*-induced spoiled of strawberries[J]. Biointerface Research in Applied Chemistry, 2021, 11(5): 13244-13251.

[5] 汤乐金,杨钦沾,屈杰光.水果贮藏保鲜技术研究现状及前景展望[J].食品安全质量检测学报,2019,10(9):42-8. [TANG L J, YANG Q Z, QU J G. Research status and prospects of fruit storage and preservation technology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(9): 42-8.]

[6] 张庆霞.植物源防腐剂的抑菌机理及其在生鲜湿面保鲜中的应用[J].食品与发酵工业,2020,417(21):314-20. [ZHANG Q X. Antimicrobial mechanism and application of plant preservatives in fresh wet noodles preservation[J]. Food and Fermentation

Industries, 2020, 417(21): 314-20.]

[7] DIAO W R, HU Q P, ZHANG H, et al. Chemical composition, antibacterial activity and mechanism of action of essential oil from seeds of fennel(*Foeniculum vulgare* Mill)[J]. Food Control, 2014, 35(1): 109-116.

[8] 答春兰,汤海青,欧昌荣,等.桉叶精油对水产品中4种微生物的抑菌效果及抑菌机理[J].食品工业科技,2018,39(19):26-32. [ZAN C L, TANG H Q, OU C R, et al. Antibacterial activity and mechanism of the eucalyptus oil against four microorganism in aquatic products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(19): 26-32.]

[9] 陈琛,徐尤美,蔺蓓蓓,等.秦岭绿茶茶多酚抑菌活性及其机理研究[J].四川农业大学学报,2019,37(6):821-827. [CHEN C, XU Y M, LIN B B, et al. Antibacterial activity and mechanism of green tea polyphenols from Qinling Mountains[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(6): 821-827.]

[10] 王丹,张静,贾晓曼,等.丁香精油对甜樱桃采后优势致腐真菌的控制及其抑菌机理[J].核农学报,2020,34(6):1221-1229. [WANG D, ZHANG J, JIA X M, et al. Antifungal activity and possible mechanism of clove essential oil on dominant pathogens of postharvest sweet cherries[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(6): 1221-1229.]

[11] 陈可欣,骆郑航,李玲,等.香樟精油抑制灰绿曲霉的活性与机理研究[J].中国粮油学报,2021,36(3):71-8. [CHEN K X, LUO Z H, LI L, et al. Antimicrobial effect and mechanism of cinnamon camphora essential oil on *Aspergillus glaucus*[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 71-8.]

[12] 李元政,胡文忠,萨仁高娃,等.天然植物提取物的抑菌机理及其在果蔬保鲜中的应用[J].食品与发酵工业,2019,45(14):239-244. [LI Y Z, HU W Z, SAREN G W, et al. Antimicrobial mechanisms of natural plant extracts and applications in preserving fruits and vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 239-244.]

[13] 刁文睿.公丁香油脂的体外抗氧化、抑菌活性及抑菌机理研究[D].临汾:山西师范大学,2015. [DIAO W R. Antioxidant activity, antibacterial activity and mechanism of action of the essential oil and oleoresin from clove buds[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2015].

[14] 张承慧.丁香精油对单核细胞增生李斯特菌及其生物膜的抑制研究[D].镇江:江苏大学,2020. [ZHANG C H. Inhibition of clove essential oil on *Listeria monocytogenes* and its biofilm[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020].

[15] SUN Y, CAI X, CAO J, et al. Effects of 1, 8-cineole on carbohydrate metabolism related cell structure changes of Salmonella[J]. Frontiers in Microbiology, 2018(9): 1078.

[16] 张媛媛,李艳利,李书国.植物源食品防腐剂抑菌机理和效果及在食品保鲜中的应用[J].粮油食品科技,2014(4):48-53. [ZHANG Y Y, LI Y L, LI S G. Antibacterial mechanism and effects of botanical food preservatives and their application in food fresh-keeping[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014(4): 48-53.]

[17] NOGUEIRA J H C, GONÇALEZ E, GALLETTI S R, et al.

- Ageratum conyzoides* essential oil as aflatoxin suppressor of *Aspergillus flavus* [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 137(1): 55–60.
- [18] 罗曼, 蒋立科, 戴向荣. 柠檬醛胁迫环境下黄曲霉线粒体的畸变[J]. *微生物学报*, 2006, 46(6): 1011–3. [LUO M, JIANG L K, DAI X R. Mitochondria aberration of *Aspergillus flavus* under citral stress circumstance. [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2006, 46(6): 1011–3.]
- [19] BWAB C, JIE S D, BYB C, et al. Physicochemical properties and antibacterial activity of corn starch-based films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 254(4): 117314.
- [20] ZHANG X, LIU D, JIN T Z, et al. Preparation and characterization of gellan gum-chitosan polyelectrolyte complex films with the incorporation of thyme essential oil nanoemulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 114(1): 106570.
- [21] ETEMADIPOOR R, RAMEZANIAN A, DASTJERDI A M, et al. The potential of gum arabic enriched with cinnamon essential oil for improving the qualitative characteristics and storability of guava(*Psidium guajava* L.) fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 251: 101–107.
- [22] 张光杰. 基于八角茴香精油/环糊精包合物的活性复合膜体系构建及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020. [ZHANG G J. Construction and properties of a active composite film system based on star anise essential oil/cyclodextrinInclusion complex[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [23] JTA B, MTA B, AWB C, et al. Litsea cubeba fruit essential oil and its major constituent citral as volatile agents in an antimicrobial packaging material[J]. *Food Microbiology*, 2021, 96: 103725.
- [24] 周斌, 王建清. 柠檬草精油涂膜包装袋对葡萄保鲜效果的研究[J]. *包装工程*, 2013, 34(9): 14–17, 46. [ZHOU B, WANG J Q. Study on fresh-keeping effect of grape stored in bag coated with oregano oil[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(9): 14–17, 46.]
- [25] MOGHIMI R, ALIAHMADI A, RAFATI H. Antibacterial hydroxypropyl methyl cellulose edible films containing nanoemulsions of *Thymus daenensis* essential oil for food packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 175(18): 241–248.
- [26] WEN P, ZHU D H, FENG K, et al. Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for antimicrobial packaging[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 996–1004.
- [27] 付秋莹, 宋海燕. 百里香精油/多孔淀粉微胶囊的制备及性能研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(7): 77–82. [FU Q Y, SONG H Y. Preparation and properties of thyme essential oil/porous starch microcapsules[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(7): 77–82.]
- [28] YILDIZ Z I, KILIC M E, DURGUN E, et al. Molecular encapsulation of cinnamaldehyde within cyclodextrin inclusion complex electrospun nanofibers: Fast-dissolution, enhanced water solubility, high temperature stability, and antibacterial activity of cinnamaldehyde[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2019, 67(40): 11066–76.
- [29] 邱夕兰, 彭善丽, 程磊, 等. 植物精油微胶囊的制备及在食品保鲜中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(6): 205–210. [QIU X L, PENG S L, CHENG L, et al. Preparation of microencapsulation of plant essential oil and its application in food preservation[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(6): 205–210.]
- [30] HADIDI M, POURAMIN S, ADINEPOUR F, et al. Chitosan nanoparticles loaded with clove essential oil: Characterization, antioxidant and antibacterial activities[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020: 116075.
- [31] 李青青, 刘桂伶, 任田. 肉桂醛在食品活性包装中的抗菌应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(4): 161–168. [LI Q Q, LIU J L, REN T. Research progress on antimicrobial applications of cinnamaldehyde in food active packaging[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(4): 161–168.]
- [32] JAYARAJ K, CHRISTY J S, PIUS A. Green composite film for food packaging applications[J]. *Advances and Applications in Mathematical Sciences*, 2020, 20(2): 245–260.
- [33] SAINI S, QUINOT D, LAVOINE N, et al. β -Cyclodextrin-grafted TEMPO-oxidized cellulose nanofibers for sustained release of essential oil[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(7): 1–13.
- [34] ZEYNEP A, SEMRAN I, ENGIN D, et al. Antibacterial electrospun zein nanofibrous web encapsulating thymol/cyclodextrin-inclusion complex for food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 117–124.
- [35] SERRANO M, MARTÍNEZ R D, CASTILLO S, et al. The use of natural antifungal compounds improves the beneficial effect of MAP in sweet cherry storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2005, 6(1): 115–123.
- [36] 张慤, 冯蕾, 张卫明, 等. 一种复合精油与气调包装联合保鲜调理牛肉的方法[P]. 2019. [ZHANG M, FENG L, ZHANG W M, et al. A method of combining compound essential oils with air-conditioning packaging to preserve freshly conditioned beef[P]. 2019.]
- [37] 国家食品药品监督管理局食品安全监管司. 食品添加剂使用标准[M]. 中国医药科技出版社, 2011. [Department of Food Safety Supervision, State Food and Drug Administration. Standards for the use of food additives[M]. China Medical Science and Technology Press, 2011.]
- [38] SHARMA S, BARKAUSKAITE S, JAISWAL A K, et al. Essential oils as additives in active food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343(8): 128403.
- [39] 王卉, 张明凯, 胡锐. 精油在食品抗菌包装中的应用研究进展[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 219–222. [WANG H, ZHANG M K, HU R. Application research development of plant essential oil in food antibacterial packaging[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(7): 219–222.]
- [40] 周强, 刘蒙佳, 张宝善, 等. 肉桂精油-壳聚糖涂膜协同气调包装对冷鲜肉品质的影响[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2019(6): 723–735. [ZHOU Q, LIU M J, ZHANG B S, et al. Combined effect of cinnamon essential oil-chitosan coating and modified atmosphere packaging on the quality of chilled meat[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences)*, 2019(6): 723–735.]