

微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装中的应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.02.008

孙建明^{1,2} 赵晨慧¹

刘 辉^{1,2}

1. 河南科技大学

包装工程系

河南 洛阳 471000

2. 河南省智能与防护包装设计

工程研究中心

河南 洛阳 471000

摘 要: 植物精油的天然抑菌性和抗氧化活性使其在果蔬保鲜领域有着广泛的应用前景。然而,植物精油具有强烈气味、易挥发等缺点,应用效果不佳。微胶囊技术可以掩盖精油的强烈气味,保持其化学稳定性,且具有缓释效果,可以更好地发挥植物精油在果蔬保鲜包装方面的优良性能。介绍了植物精油的抑菌活性、抗氧化活性以及植物精油微胶囊的芯材、壁材和常用的制备方法,对植物精油微胶囊保鲜剂控释包装、复合保鲜薄膜包装和可食性涂膜包装在果蔬保鲜包装方面的研究现状进行综述,以期对微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装方面的进一步研究与应用提供参考。

关键词: 植物精油;微胶囊技术;芯材;壁材;保鲜包装

中图分类号: TS255.3; TB484.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)02-0056-12

引文格式: 孙建明,赵晨慧,刘 辉.微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装中的应用[J].包装学报,2024,16(2):56-67.

生活水平日益提高,消费者对新鲜高品质果蔬的需求不断增加。然而,生鲜果蔬类产品在采收后依然进行呼吸作用和新陈代谢活动,导致其货架期缩短、商业价值降低。为解决此问题,果蔬保鲜包装产业得到不断发展。传统的化学保鲜包装会导致有害物质残留,对人体的健康产生潜在危害^[1]。植物精油在食用范围内安全且无公害,其特有的化学成分具有广谱抑菌活性和抗氧化活性^[2],对果蔬中的病原微生物有良好的抑制效果,常被作为天然食品保鲜剂,广泛应用于果蔬的保鲜贮藏。但植物精油具有强烈气味、容易挥发且不利于储运等缺陷^[3],在保鲜应用时通常达不到预期效果。因此,高效地保护且控制其释放是扩大植物精油应用范围的关键。

微胶囊技术可以有效地包封活性成分,不仅能达到保护芯材,掩盖其刺鼻气味的效果,而且具有控

制芯材释放、改变物料形态的特性,该技术在医药、食品、农药、纺织、日化等行业应用广泛^[4]。近年来,国内外的研究人员对植物精油微胶囊在果蔬保鲜中的应用进行了诸多探索,并取得了重大进展^[5]。本文将介绍植物精油的抑菌、抗氧化活性以及植物精油微胶囊的芯材、壁材和常用的制备方法,对微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装方面的应用现状进行综述,以期推动微胶囊化植物精油的进一步研究与扩大应用范围。

1 植物精油的特征

植物精油是从植物不同组织中萃取而得到的芳香物质,有独特的气味^[6],分子小,挥发性高,具有多种生物活性功能^[7]。据报道,植物精油大多含有抑

收稿日期:2024-01-16

基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)基金资助项目(222102110161);河南省哲学社会科学规划基金资助项目(2022BYS014);河南科技大学第十一届研究生创新基金资助项目(CCJJ-2022-KJ08)

作者简介:孙建明(1978-),男,山东广饶人,河南科技大学副教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为智能包装和食品保鲜包装, E-mail: sunjianming@haust.edu.cn

菌、防腐的成分,是绿色、天然的防腐保鲜剂,常被广泛应用于生鲜果蔬的保鲜包装领域。

1.1 抑菌活性

植物精油具有抑菌活性的成分,如酚类、醛类、生物碱、类黄酮、异黄酮类和萜类等^[8-9],对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、青霉菌等具有广谱抑制作用^[10]。常用植物精油的抑菌作用如表1所示。

表1 常用植物精油的抑菌作用

Table 1 The bacteriostatic effects of commonly used plant essential oils

植物精油	主要抑菌成分	抑制菌落	参考文献
丁香精油	丁香酚、乙酰基丁香酚	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	[11]
肉桂精油	反式肉桂醛	青霉菌、白地霉菌、毛霉菌	[12]
香茅精油	香叶醛、橙花醛、D-柠檬烯	灰霉菌、大肠杆菌	[13-14]
生姜精油	β -倍半水芹烯、姜烯、芳姜黄酮	黄曲霉、肺炎克雷伯菌	[15]
牛至精油	香芹酚、百里香酚	青霉、腐霉、交链孢霉、李斯特菌	[16]
百里香精油	百里香酚、 γ -松油烯	黑曲霉菌、枯草芽孢杆菌	[3, 17]
山苍子精油	α -蒎烯、柠檬醛	大肠杆菌、黄曲霉菌、青霉菌	[18]

植物精油中有效成分的抑菌机制各不相同^[10],主要抑菌机制如图1^[9]所示。如丁香酚可以引起细胞质聚沉,影响三羧酸(tricarboxylic acid, TCA)循环中琥珀酸脱氢酶(succinate dehydrogenase, SDH)、异柠檬酸脱氢酶(isocitrate dehydrogenase, IDH)等相关基因表达,使菌体凋零^[20];香芹酚主要通过破坏细胞膜结构,导致细胞膜和细胞器内容物外泄,影响菌丝正常生长;百里香酚通过影响真核细胞质膜成分糖鞘脂的生物合成和代谢,影响其调控细胞增殖作用;柠檬醛主要通过破坏微生物的氧化还原反应系统,致使细胞中的脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)和核糖核酸(ribonucleic acid, RNA)含量变少,代谢迟缓^[21]。

马永亮^[22]制备了丁香精油壳聚糖复合涂膜液,并用于鲜银耳的抑菌保鲜。研究表明,复合涂膜液拥有优异的1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl, DPPH)自由基、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)自由基清

除能力和铁还原能力,对唐菖蒲克霍尔德氏菌的抑制率极高。孙畅等^[23]探讨了山苍子精油(litsea cubeba essential oil, LCEO)对意大利青霉的抗菌活性及机制。结果表明,细胞的通透性随LCEO质量浓度的增加而增大,细胞膜及细胞壁的完整性被破坏,造成细胞组分渗出,最终导致细胞衰亡。LCEO可有效阻碍或延缓柑橘意大利青霉的菌丝生长和芽孢萌发^[24]。

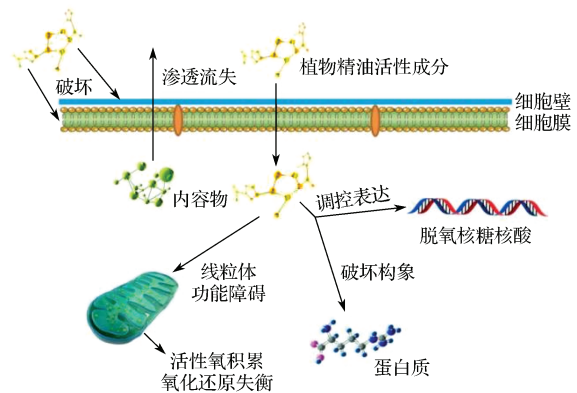


图1 植物精油的抑菌机制

Fig. 1 The diagram of antibacterial mechanisms of plant essential oils

1.2 抗氧化活性

植物精油发挥抗氧化活性的主要成分有含氧单萜烯、倍半萜烯、酚类、酮类。目前,植物精油的抗氧化性能测定方法有物理法、化学法和生物法,其中以化学法为主。DPPH自由基法因其自由基结构简单、性质较为稳定、反应条件容易控制,是应用最广泛的抗氧化活性测定方法之一。DPPH具有孤电子,可以接受一个电子或氢离子,其醇溶液呈紫色,在517 nm处有一强吸收峰。当体系中存在抗氧化剂时,电子或氢离子会发生转移,此时DPPH的孤电子被捕捉配对,其醇溶液从深紫色逐渐变为浅黄色,吸收峰减少,吸光度值相应降低,从而评价样品的抗氧化能力。评定结果常用IC₅₀值(即抗氧化剂对DPPH自由基清除率达50%的质量浓度)来表示,IC₅₀值越低,表示抗氧化能力越强^[25]。作为天然的抗氧化剂,植物精油主要通过两种减缓氧化反应的作用机制延缓果蔬衰变。

1.2.1 直接抗氧化作用

1) 清除自由基。植物精油的酚类成分含有羟基,能给自由基提供氢,使单线态氧淬灭^[26],抑制自由基的链式反应,即利用氢原子转移提供的活性质子清除自由基。陈文丹等^[27]的研究表明,黄花蒿精油

对羟自由基、DPPH 自由基的清除率与添加量呈正相关;当黄花蒿精油质量浓度为 10 g/L 时,羟基自由基、DPPH 自由基的清除率分别高达 92.97%, 40.03%。

2) 与金属离子螯合。有较强氧化还原能力的金属离子(如 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等),是一种促进自由基产生的催化剂^[28]。植物精油中的多酚类物质与金属离子螯合时,金属离子自身引发的氧化反应会被抑制,进而不能诱导自由基的生成。植物精油与 Fe^{3+} 反应化学式见图 2^[29]。S. F. Bi 等^[30]的研究表明,南天竹果实精油能有效清除 ABTS 自由基、DPPH 自由基和 O_2^- 自由基等,并呈现出较高的金属离子螯合能力;南天竹果实精油的抗氧化活性随精油浓度的增加而增强。

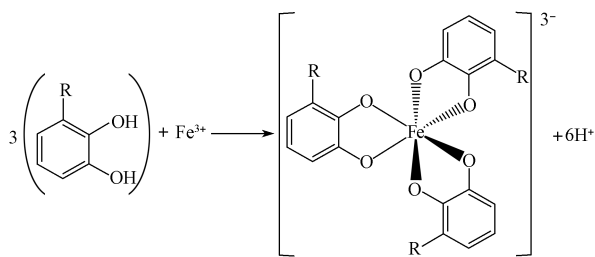


图 2 植物精油与 Fe^{3+} 反应化学式

Fig. 2 Chemical formula of reaction between plant essential oil and Fe^{3+}

1.2.2 间接抗氧化作用

1) 抑制脂质过氧化。酚羟基在脂肪氧化时可充当过氧自由基供养体,阻断过氧化羟基产生以及过氧化链式反应^[31],抑制氧化应激酶活性,并促使抗氧化剂发挥作用,从而抑制脂质过氧化。刘艳灿等^[32]研究发现红葱头精油对抗脂质过氧化能力和超氧阴离子自由基的清除能力均高于 50%,且随着红葱头精油质量浓度的提高,其抗脂质过氧化能力增强。K. Jonušaitė 等^[33]对比了 3 种精油与丁基羟基甲苯的抗氧化能力。结果表明,3 种精油的总酚含量和抗氧化能力均显著较高,其中两种精油对 2,6-二叔丁基对甲酚的 IC_{50} 和脂质过氧化抑制水平相似。

2) 调节氧化酶水平。调节氧化酶(如多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶^[34])水平,是通过氧化还原作用清除过氧化自由基。POD 是一种氧化还原酶^[35],可以催化许多反应,通过氧化还原反应消除过氧化氢以及一些毒性物质。张铁斌等^[36]以壳聚糖-姜精油复合保鲜剂对甜椒进行涂膜保鲜,发现保鲜剂使样品在贮藏期的失重率降低,并激发植物体内防御

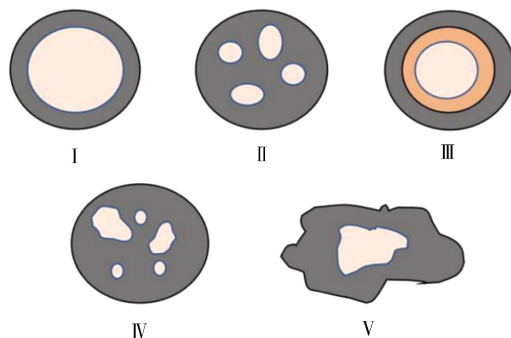
酶 POD 的生成,减少了 VC 的损失,使叶绿素含量保持在一定水平,抑制了细菌繁殖。K. Kraśniewska 等^[37]研究发现添加 1%~10% 牛至精油的普兰士多糖涂膜可有效降低 POD 和 PPO 的活性,保持小洋白菜在贮藏期内的新鲜度,从而延长其货架期。

2 微胶囊化植物精油

2.1 微胶囊技术

微胶囊技术是指利用一种或者多种高分子材料将具有挥发性、不稳定性或者反应活性的固体、液体、甚至是气体包封成微小粒子的技术^[38]。该技术的核心是将活性物质嵌入成膜材料^[13],从而减弱金属离子、 O_2 、水分、pH 与热量等因素的影响,进而保护活性物质的物理化学特性和生物功能。微胶囊化植物精油不仅可以增强精油的稳定性,还可以使其刺激性气味与食品隔离,有效调节活性成分的释放速率,延长果蔬的保鲜期。Yin C. 等^[39]将芒果置于海藻酸钠溶液和含有肉桂精油的微胶囊乳液中,进行交替浸泡、沉淀处理,得到的芒果含有 5 层覆膜,其硬度、pH 值、呼吸速率及 VC 含量等的变化均得到改善。Tian Y. Q. 等^[40]将茶树精油微胶囊化,可有效减少鲜切菠萝营养物质的损失,并能够延长其保质期至 4 d。

在实际应用中,应根据精油的特定成分、性质及添加对象,选择合适的壁材和制备方法^[41]以实现最有效的包埋。根据微胶囊包埋方式和材料的差异,微胶囊可分为不同的结构形态^[42],如囊壁有单层和多层,内核也可单核和双核,外观常为球形,但也有菱形、粒状、块状等。植物精油微胶囊的常见结构见图 3^[43]。



注: I 为单核微胶囊; II 为多核微胶囊; III 为多壳微胶囊; IV 为微珠、微球; V 为无定形微胶囊。

图 3 植物精油微胶囊的结构与形态

Fig. 3 Structure and morphology of plant essential oil microcapsules

2.2 植物精油微胶囊芯材

芯材主要是指微胶囊内部被包埋的物质, 它可以是单一易挥发的液体、气体, 也可以是固液、液液、气液等多种物质的混合体^[44]。植物精油微胶囊的芯材具有较高生物活性, 常用作芯材的有肉桂精油、牛至精油、丁香精油、百里香精油、迷迭香精油、香茅精油、大蒜精油、生姜精油以及各种果皮精油等^[45]。J. H. Ahn 等^[46]把从迷迭香、西兰花芽和柑橘类中提取到的精油同高油酸葵花籽油一起微胶囊化, 发现它可以有效地抑制葵花籽油的氧化, 减缓亚油酸含量的下降速率。Wang H. H. 等^[47]对生姜精油进行了包封, 并制备了含有微胶囊的复合膜。结果表明, 生姜精油微胶囊复合膜的抗氧化能力长时间保持在相对较高水平; 将微胶囊直接添加到薄膜基质中拓宽了微胶囊的应用范围。

2.3 植物精油微胶囊壁材

植物精油微胶囊壁材多为天然、合成或半合成的无机材料及高分子材料, 它们可以有效地隔离、保护芯材, 降低外在环境(如高温、氧化、紫外线)对芯材活性的不良影响。在选用微胶囊壁材时, 还应考虑芯材的性质、应用、制备方法和释放机制等因素。生物降解性强和生物相容性高的天然高分子材料通常被选作壁材^[48-49], 如明胶、壳聚糖、海藻酸盐^[50]、 β -环糊精、多孔淀粉^[51]等。王楠等^[52]将海藻酸钠和多孔淀粉作为壁材, 制备了牛至精油微胶囊。结果表明, 微胶囊表面平整紧密, 在前期释放芯材成分的速率较缓慢, 达到了良好的缓释效果。W. C. Hsieh 等^[53]以壳聚糖为壁材制备香茅精油微胶囊, 结果发现通过调节壳聚糖和NaOH的浓度, 以及热处理的温度和时间, 可以影响微胶囊的粒子大小和香茅精油的释放率。Ren X. L. 等^[54]以 β -环糊精为壁材制备的桉叶精油微胶囊增强了桉叶精油的稳定性, 延长了精油的作用时间, 其释放速率也可由环境温度、湿度和贮存时间调控。

2.4 植物精油微胶囊的制备

植物精油微胶囊的制备方法涉及多种技术领域。根据微胶囊的性质、成囊条件、成壁机理以及包封条件等技术参数的不同, 可将植物精油微胶囊的制备方法分为物理法、化学法和物理化学法三大类, 根据工艺条件的不同又可细分, 具体如表2所示^[55]。其中, 喷雾干燥法、复合凝聚法、层层自组装法为常用的制备方法。

表2 微胶囊的制备方法

Table 2 Preparation method of microcapsules

分 类	具体细分
物理法	喷雾干燥法、物理吸附法、挤压法、包络结合法、空气悬浮法
化学法	复合凝聚法、界面聚合法、原位聚合法、锐孔-凝固法
物理化学法	层层自组装法、油/水相分离法、囊芯交换法、溶剂蒸发法

2.4.1 喷雾干燥法

喷雾干燥法制备微胶囊是将壁材和芯材的乳化液吸入干燥腔, 使其在干燥热气流中雾化成液滴, 其中溶剂通过热气流快速蒸发, 小液滴收缩为固体微胶囊, 然后从旋风收集器分离出干燥空气并收集微胶囊。喷雾干燥法工艺流程如图4^[56]所示。喷雾干燥法优点是成本低、操作简单, 有良好的水溶性和流动性, 适合大规模连续生产。

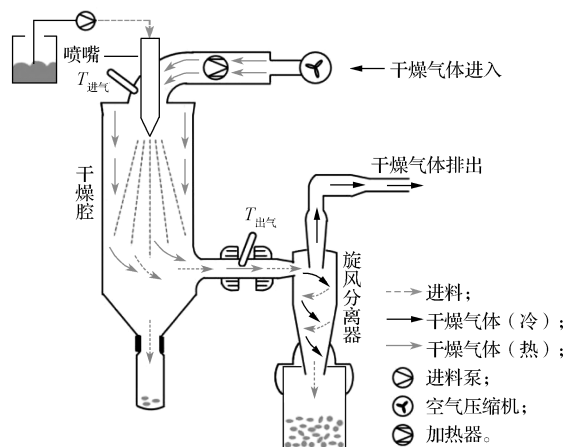


图4 喷雾干燥法流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spray drying process

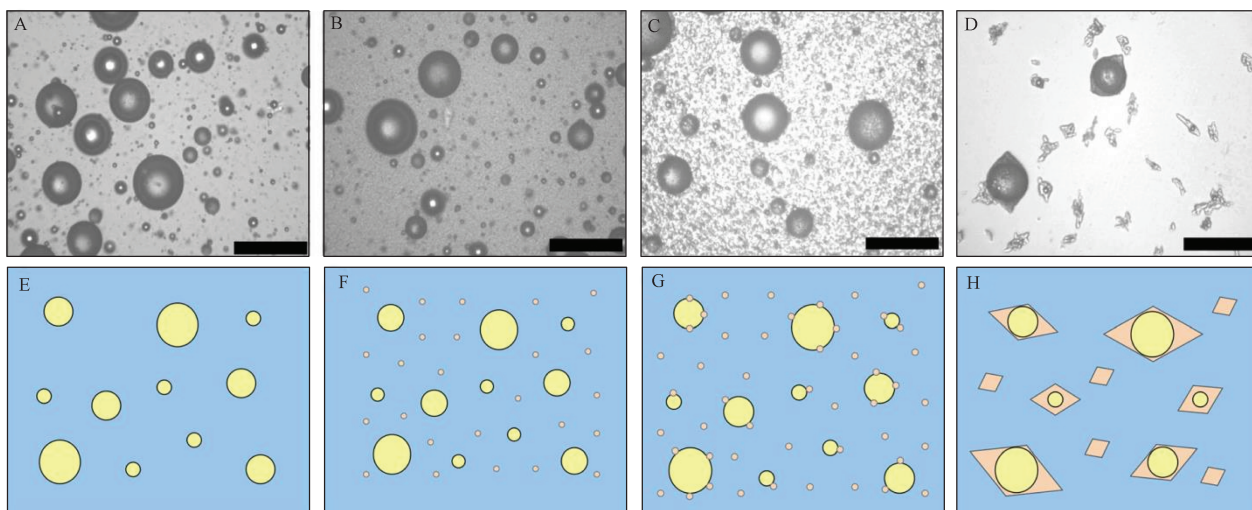
V. Y. Ixtaina 等^[57]采用喷雾干燥法研究添加不同抗氧化剂(迷迭香提取物、迷迭香和甘菊提取物的混合物、抗坏血酸棕榈酸酯)微胶囊化奇亚籽油的理化特性及氧化稳定性。微胶囊化的效率和水分含量均高于97%, 表明了喷雾干燥法制备的奇亚籽油微胶囊可作为加工和储存过程中具有氧化稳定性和高效率的研究体系。Yang Y. H. 等^[58]用 β -环糊精包埋山苍子精油, 探究饱和水溶液法、研磨法、喷雾干燥法、冷冻干燥法4种微胶囊制备方法对山苍子精油的包封及释放效果, 其中, 喷雾干燥法的包埋率最高, 达79.15%, 其后依次为冷冻干燥法、饱和

水溶液法和研磨法。喷雾干燥法包埋山苍子精油释放速率明显低于研磨法,效果最佳。贾有青等^[59]采用喷雾干燥法处理元宝枫籽油。得到的元宝枫籽油微囊,有较规则的球形微观结构,囊壁比较完整,结构上无裂纹,具有良好的包埋结构。

2.4.2 复合凝聚法

复合凝聚法通过改变体系的pH值、温度或水溶液浓度,使两种壁材相互作用形成一种复聚物,从而导致复聚物溶解度下降,凝聚析出形成微胶囊^[60]。复合凝聚法制备微胶囊主要包括4个步骤^[61],芯材乳化、壁材单体的凝聚反应、凝聚相凝胶化和微胶囊固化。复合凝聚法优点是工艺简单、反应温和,制备出的微胶囊具有良好的稳定性,同时具有较高的装载量和包埋率。

D. Ach等^[62]用明胶(gelatin, GE)和阿拉伯胶(gum arabic, GA)凝聚物对亚麻油进行包封处理,根据乳化条件和多液滴包封引起的颗粒生长情况,制备了粒径约为130 μm 的多核微胶囊,并利用浸没在搅拌容器中的视频探头对微胶囊的形成进行动态观察,结果如图5^[62]所示。Tu Q. B.等^[63]采用复合凝聚法制备的肉桂精油微胶囊,其包封率为87.32%,平均粒径为870.4 μm ,在100 $^{\circ}\text{C}$ 下放置6 h后,微胶囊的释放率为44.53%,符合Korsmeyer-Peppas释放动力学。Yuan Y.等^[64]对5种茶树精油的化学成分和抑菌活性进行分析,并研究了GE和GA之间的凝聚作用。结果表明,采用复合凝聚法制备的茶树精油微胶囊产生的颗粒较小,包封率较高,可作为新型防腐剂应用于食品工业。



注: A~D 为视频中的照片(比例尺 $\frac{1}{4}$ 300 mm); E~H 为示意图。A/E: 乳化液的形成; B/F: 水相中凝聚体的形成; C/G: 油滴周围凝聚堆积; D/H: 最终微胶囊。

图5 复合凝聚法形成微胶囊的过程图

Fig. 5 The process diagram of forming microcapsules by compound condensation method

2.4.3 层层自组装法

层层自组装法制备微胶囊是指将带有相反电荷的壁材在带电模板上通过相互作用力(如氢键、化学键和静电引力)交替沉积,然后把模板去除得到中空微胶囊^[65-66]。层层自组装法制备微胶囊已经被运用较长时间,在生物化学、材料等领域应用广泛。

张珊珊^[67]制备的百里香精油微胶囊,表面光滑,囊壁完整,平均粒径为140 nm。均质循环6次得到包埋率较高的百里香纳米胶囊,不仅避免了循环次数过多导致的高温,还保留了百里香精油的主要成分。张昭^[68]以百里香精油水包油微乳液为芯材,制备百

里香精油微胶囊,通过正交试验验证最佳条件下百里香精油微胶囊包埋率为91.35%,产率为84.79%,载油量为0.056 $\mu\text{L/mL}$;微胶囊的抑菌效果随微胶囊浓度增大而增强,对金黄色葡萄球菌的抑制作用强于大肠杆菌。Zhang Z.等^[69]以天然多糖壳聚糖和海藻酸钠为壁材制备了百里香精油微胶囊,该微胶囊包埋率为91.35%,在pH=4~10范围内有良好的pH敏感性。此外,在制备微胶囊的过程中发现,壳聚糖与海藻酸钠的静电结合力弱于壳聚糖季铵盐与羧甲基纤维素钠,因此制备的百里香精油微胶囊包埋率下降,且平均粒径较大。

3 微胶囊化植物精油的果蔬保鲜包装应用

调研显示,微胶囊化植物精油已广泛用于食品、医药、农药、纺织、日用化学品等众多领域,而在果蔬保鲜包装领域的应用尚未出现,仍然处于实验室阶段,亟待进一步深入研究,以便尽快开发出适用于果蔬保鲜包装的市场化微胶囊化植物精油产品。目前,正在研究的微胶囊化植物精油与包装系统的结合主要有3种形式:精油微胶囊保鲜剂控释包装、精油微胶囊复合保鲜薄膜包装和精油微胶囊可食性涂膜包装。

3.1 精油微胶囊保鲜剂控释包装

精油微胶囊保鲜剂控释包装是指将制得的精油微胶囊封入无纺布小袋,并放置在被包装物和包装材料之间的包装环境中^[51],微胶囊通过向包装环境中缓释抑菌抗氧化的活性成分,从而起到抑菌保鲜效果的包装方式。此类包装的优点是避免微胶囊与果蔬的直接接触。在实际应用时应根据食品特性选择释放速率合适的精油微胶囊。

黎汉清等^[70]选择 β -环糊精作为壁材,对丁香精油进行微胶囊化,通过参考袋装干燥剂的外观及作用方式,制备了无接触式保鲜剂,并以气体熏蒸方式进行抑菌保鲜试验,即用微胶囊小袋对草莓进行常温保鲜。研究发现,实验组对草莓的保鲜效果明显优于空白组,能有效延长货架期2 d。Tian Y. Q.等^[40]将茶树精油包封在淀粉-羧甲基纤维素中,并将其应用在气调保鲜的鲜切菠萝上。结果表明,该种固体精油保鲜剂可有效减少菠萝营养物质的损失,并能够延长其保质期至4 d。戴瑶等^[71]以灰霉菌为目标菌种,制备了壬醛与香芹酚复合精油- β -环糊精微胶囊,通过对蓝莓的保鲜试验发现,相比于对照组,6%微胶囊组蓝莓的商品率提高了39.73%,霉菌总数降低了61.39%,该微胶囊可作为蓝莓采后贮藏保鲜的非接触式抑菌型天然固体缓释保鲜剂。张红梅^[72]将花椒、牛至及复配精油微胶囊分别置于无纺布中,结合聚己内酯(polycaprolactone, PCL)/聚左旋乳酸(poly-L-lactic acid, PLLA)包装薄膜对葡萄进行保鲜包装,并在1℃、90% RH的环境下进行贮藏。研究表明,3种精油微胶囊均可长效抑制葡萄主要腐败菌的生长,保持葡萄采后良好的感官品质和理化品质。P. J. P. Espitia等^[73]用多孔树脂包埋牛至精油、

柠檬草精油和肉桂醛制备了3种微胶囊,将其分别装在不织布小袋里并用热封机封口,在外包装袋中形成抗菌包装系统用于木瓜的保鲜。结果表明,含肉桂醛的实验组木瓜酵母菌和霉菌显著减少,抗菌包装系统作用效果最为明显。

3.2 精油微胶囊复合保鲜薄膜包装

精油微胶囊复合保鲜薄膜是指采用一定比例的精油微胶囊与包装薄膜基材,利用挤出吹塑、流延或直接将微胶囊涂在包装薄膜表面等方法制得的复合保鲜薄膜。该复合保鲜薄膜包装的优点是可控控包装内的气体成分,从而抑制微生物的生长。但是,精油微胶囊复合保鲜薄膜包装对微胶囊的粒径大小有较高要求。

Cai C. C.等^[74]制备了含百里香精油微胶囊的淀粉薄膜,并分析了薄膜对芒果品质和理化性质的影响。扫描电子显微镜图像分析表明,百里香精油微胶囊的添加提高了薄膜的厚度、不透明度、水溶性、断后伸长率和抗拉强度;保鲜实验表明,含有百里香精油的淀粉膜可有效减缓芒果的成熟腐败,减缓抗坏血酸流失,同时能对果实表面的腐败菌产生一定的抑制作用。Li L.等^[75]的研究表明,通过喷雾干燥法制备的牛至精油微胶囊可以显著增强聚乙烯复合膜的透湿性和透气性,对草莓的呼吸作用起到良好的调节功能,抑制包装中CO₂的积累和O₂的释放。宋文龙等^[76]制备了生姜精油微囊,并将其作为抗菌剂制备聚乙烯-生姜精油微囊活性薄膜包装。研究表明,含有生姜精油微囊的包装相较于对照组能显著减缓秋葵果实质量损失及硬度降低,抑制丙二醛含量的降低,减慢秋葵采后衰老进程,维持果实较高的感官品质。栗方宇^[77]将 β -环糊精/百里香酚微胶囊加入到复合膜中,并将复合膜应用于番茄果实的保鲜。研究表明,该植物精油微胶囊实现了百里香酚在复合膜中的持续释放,解决了百里香酚的疏水性和易挥发的问题。

3.3 精油微胶囊可食性涂膜包装

可食性涂膜包装通过将食品浸泡在含有保鲜剂的溶液或直接将含有保鲜剂的溶液喷洒在食品表面,使食品表面覆盖一层均匀的保鲜涂层,从而隔绝O₂、水分,同时也能在一定程度上抑制果蔬被微生物侵染^[78],从而达到抗菌目的。

张兰^[79]采用离子胶凝法制备丁香精油壳聚糖纳米微胶囊,将其应用于蓝莓保鲜,评估蓝莓果实的

各项指标变化。结果表明,微胶囊涂膜处理结合 5℃贮藏可以很好地维持蓝莓机体内活性物质的含量,延缓果实软化,降低失重率和腐烂率,将货架期延长 12 d 左右。殷诚^[80]采用包合法制备了 β -环糊精-牛至精油微胶囊,然后将牛至精油微胶囊与柠檬酸、海藻酸钠共混制成涂膜液用于鲜切紫玉淮山的保鲜,并对不同涂膜处理后样品的褐变度、硬度、菌落总数、可溶性固形物含量、抗坏血酸含量和花青素含量等指标进行检测分析。结果表明,微胶囊涂膜液成功附着在样品表面,且涂层表面较为平整;涂膜处理能有效延缓山药褐变,被微胶囊涂层涂膜处理过的山药在贮藏 24 h 后,仍具有较高的营养价值。王伟赫^[81]从佛手果皮中提取精油,利用羟丙基- β -环糊精包埋果皮精油制成微胶囊,再将微胶囊负载于可食用膜中。结果表明,佛手果皮精油微胶囊覆膜处理可有效延缓果实采后成熟速度,以减少营养物质被氧化分解,其中贮藏 15 d 的蓝莓中花色苷含量与总酚含量分别为空白组的 3.6 倍和 1.5 倍;高浓度涂膜处理既有效延长了货架期又保证了蓝莓果实的营养价值和品质。

保鲜涂层与食品直接接触的应用可能存在潜在毒性,在食用的过程中有连同保鲜涂层一起摄入的风险,因此更适用于有外壳保护的果蔬。

4 展望

随着社会经济的发展和人们食品安全意识的提高,生鲜果蔬类产品市场迫切需要一种安全、环保、高效、便捷的保鲜包装方式。抑菌性微胶囊化植物精油逐渐成为果蔬保鲜包装领域的研究热点。然而,目前微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装领域的应用也存在着亟待解决的重要问题:1)在确保安全和保鲜性能的前提下,开发出新的、天然的或人工合成的壁材资源,实现绿色化、工业化生产^[82];2)目前的研究对象仍然受限,植物精油微胶囊化保鲜技术还未应用到大部分果蔬种类,应继续扩大研究对象的范围;3)对植物精油中的活性成分进行分离、鉴定及表征,进一步对植物精油微胶囊的释放动力学以及保鲜机理进行更深入的探究;4)提升产品的装载量和产率的同时,降低微胶囊制备成本和加工工艺的难度,使其能够在生鲜果蔬保鲜领域普及使用;5)通过感官指标评价、理化指标检测、微生物检测以及微胶囊组分分析等方法对微胶囊化的植物精油进行失效评价与评估,以明确其使用的时间期限;6)在失效评价

与评估的基础上,探究更适宜的微胶囊化植物精油制备材料与工艺、储运环境、应用场景等,以充分保证微胶囊具有更长的使用寿命。因此,应该充分考虑限制微胶囊化植物精油在果蔬保鲜包装领域应用的各种因素,并以此为依据,开发研究出性能良好、制备简单、便捷高效、有效期长的微胶囊化植物精油保鲜包装。

参考文献:

- [1] DELSHADI R, BAHRAMI A, ASSADPOUR E, et al. Nano/Microencapsulated Natural Antimicrobials to Control the Spoilage Microorganisms and Pathogens in Different Food Products[J]. Food Control, 2021, 128: 108180.
- [2] UD-DAULA A F M S, DEMIRCI F, ABU SALIM K, et al. Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Essential Oils from Leaves, Aerial Stems, Basal Stems, and Rhizomes of *Etligeria Fimbriobracteata* (K.Schum.) R.M.SM[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 84: 189-198.
- [3] EBRAHIMI L, JALALI H, ETEBARIAN H R, et al. Evaluation of Antifungal Activity of some Plant Essential Oils Against Tomato Grey Mould Disease[J]. Journal of Plant Pathology, 2022, 104(2): 641-650.
- [4] XIAO Z B, LIU H Q, ZHAO Q X, et al. Application of Microencapsulation Technology in Silk Fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(25): 52351.
- [5] 荣培秀, 何晓琴, 王金秋, 等. 植物精油的功能特性及在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 226-233, 240.
RONG Peixiu, HE Xiaoqin, WANG Jinqu, et al. Research Progress on Functional Properties of Plant Essential Oils and Their Applications in Fresh Keeping of Fruits and Vegetables[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 226-233, 240.
- [6] KANT R, KUMAR A. Review on Essential Oil Extraction from Aromatic and Medicinal Plants: Techniques, Performance and Economic Analysis[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2022, 30: 100829.
- [7] 李林林, 孙建明, 刘辉, 等. 基于艾叶-丁香精油复配的番茄保鲜包装效果研究[J]. 包装学报, 2023, 15(6): 24-33.
LI Linlin, SUN Jianming, LIU Hui, et al. Study on the Effect of Tomato Preservation Packaging Based on

- Compounding of Mugwort-Clove Essential Oils[J]. Packaging Journal, 2023, 15(6): 24-33.
- [8] 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 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.
- [9] MEENU M, PADHAN B, PATEL M, et al. Antibacterial Activity of Essential Oils from Different Parts of Plants Against *Salmonella* and *Listeria* Spp[J]. Food Chemistry, 2023, 404(Pt B): 134723.
- [10] da SILVA B D, do 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.
- [11] 高原, 王金鹤, 庞兆越, 等. 丁香精油对金黄色葡萄球菌及铜绿假单胞菌的抑制作用研究 [J]. 化学与生物工程, 2023, 40(4): 48-52.
- GAO Yuan, WANG Jinhe, PANG Zhaoyue, et al. Antibacterial Activity of Clove Essential Oil Against *Staphylococcus Aureus* and *Pseudomonas Aeruginosa*[J]. Chemistry & Bioengineering, 2023, 40(4): 48-52.
- [12] BADR M M, BADAWY M E I, TAKTAK N E M. Preparation, Characterization, and Antimicrobial Activity of Cinnamon Essential Oil and Cinnamaldehyde Nanoemulsions[J]. Journal of Essential Oil Research, 2022, 34(6): 544-558.
- [13] 臧芳波, 李冲, 韩雪, 等. 香茅精油微胶囊的制备及表征分析 [J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 191-195.
- ZANG Fangbo, LI Chong, HAN Xue, et al. Preparation and Characterization Analysis of Citronella Essential Oil Microcapsules[J]. China Condiment, 2023, 48(1): 191-195.
- [14] de OLIVEIRA ALENCAR D D, de SOUZA E L, da CRUZ ALMEIDA E T, et al. Microencapsulation of *Cymbopogon Citratus* D. C. Stapf Essential Oil with Spray Drying: Development, Characterization, and Antioxidant and Antibacterial Activities[J]. Foods, 2022, 11(8): 1111.
- [15] 鲁萌萌, 李文茹, 周少璐, 等. 生姜精油化学成分及其抗菌活性 [J]. 微生物学通报, 2021, 48(4): 1121-1129.
- LU Mengmeng, LI Wenru, ZHOU Shaolu, et al. Chemical Component and Antibacterial Activity of Ginger(*Zingiber Officinale Roscoe*) Essential Oil[J]. Microbiology China, 2021, 48(4): 1121-1129.
- [16] CHURKLAM W, CHATURONGAKUL S, NGAMWONGSATIT B, et al. The Mechanisms of Action of Carvacrol and Its Synergism with Nisin Against *Listeria Monocytogenes* on Sliced Bologna Sausage[J]. Food Control, 2020, 108: 106864.
- [17] 徐冰, 徐少青, 刘锐, 等. 百里香精油纳米乳液的制备及添加植物油对其理化性质及抑菌效果的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5861-5869.
- XU Bing, XU Shaoqing, LIU Rui, et al. Preparation of *Thymus Vulgaris* Essential Oil Nanoemulsions and the Effects of Adding Vegetable Oils on Its Physicochemical and Antibacterial Properties[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5861-5869.
- [18] LI X, LI G Y, SHAN Y, et al. Preparation, Characterization, and Antifungal Property of the Inclusion Complex of *Litsea Cubea* Essential Oil/Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin and Its Application in Preservation of Shatang Mandarin[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(10): 4714-4724.
- [19] GARCÍA-PÉREZ J S, CUÉLLAR-BERMÚDEZ S P, ARÉVALO-GALLEGOS A, et al. Influence of Supercritical CO₂ Extraction on Fatty Acids Profile, Volatile Compounds and Bioactivities from *Rosmarinus Officinalis*[J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(4): 1527-1537.
- [20] 张鑫, 耿庆何, 郭超, 等. 植物精油在粮油食品抑菌中的应用 [J]. 粮油食品科技, 2021, 29(1): 180-186.
- ZHANG Xin, GENG Qinghe, GUO Chao, et al. The Application of Plant Essential Oil in Antifungal of Grain and Oil Food[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(1): 180-186.
- [21] 王雪. 植物精油在粮油食品抑菌中的应用 [J]. 现代食品, 2021(8): 51-53.
- WANG Xue. Application of Plant Essential Oil in Bacteriostasis of Grain, Oil and Food[J]. Modern Food, 2021(8): 51-53.
- [22] 马永亮. 丁香精油纳米乳壳聚糖复合涂膜的制备及对鲜银耳抑菌保鲜研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2022.
- MA Yongliang. Preparation of Chitosan Composite Coating with Clove Essential Oil Nanoemulsion and Study on Fresh *Tremella Fuciformis* Antimicrobial and Preservation[D]. Jilin: Jilin University, 2022.
- [23] 孙畅, 李湘, 王银红, 等. 山苍子精油对柑橘意大利青霉的抑菌活性及作用机制 [J]. 食品科学,

- 2023, 44(11): 17–25.
- SUN Chang, LI Xiang, WANG Yinhong, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of *Litsea Cubeba* Essential Oil Against *Penicillium Italicum* in Citrus Fruits[J]. Food Science, 2023, 44(11): 17–25.
- [24] CAO C, XIE P, ZHOU Y B, et al. Characterization, Thermal Stability and Antimicrobial Evaluation of the Inclusion Complex of *Litsea Cubeba* Essential Oil in Large-Ring Cyclodextrins (CD9-CD22)[J]. Foods, 2023, 12(10): 2035.
- [25] 苏翔宇, 何剑波, 郭升岚, 等. 不同植物精油及精油成分体外抗氧化性能评定 [J]. 饲料工业, 2023, 44(17): 8–14.
- SU Xiangyu, HE Jianbo, GUO Shenglan, et al. In Vitro Evaluation of the Antioxidant Activity of Essential Oils[J]. Feed Industry, 2023, 44(17): 8–14.
- [26] 龙 娅, 胡文忠, 李元政, 等. 植物精油的抗氧化活性及其在果蔬保鲜上的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 343–348.
- LONG Ya, HU Wenzhong, LI Yuanzheng, et al. Research Progress on Antioxidant Activity of Plant Essential Oil and Its Application in Fresh-Keeping of Fruits and Vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 343–348.
- [27] 陈文丹, 白玉莹, 郭成虎, 等. 黄花蒿精油抑菌、抗氧化及毒理学特性研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 44–50.
- CHEN Wendan, BAI Yuying, GUO Chenghu, et al. Study on Antibacterial, Antioxidant and Toxicological Properties of *Artemisi Aannua* Essential Oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 44–50.
- [28] NEMATI LAFMEJANI Z, JAFARI A A, MORADI P, et al. Impact of Foliar Application of Iron-Chelate and Iron Nano Particles on Some Morpho-Physiological Traits and Essential Oil Composition of Peppermint (*Mentha Piperita* L.)[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2018, 21(5): 1374–1384.
- [29] 温朋飞, 彭 艳. 植物精油抗氧化作用机制研究进展 [J]. 饲料工业, 2017, 38(2): 40–45.
- WEN Pengfei, PENG Yan. Research Advances on Antioxidant Mechanism of Plant Essential Oil[J]. Feed Industry, 2017, 38(2): 40–45.
- [30] BI S F, ZHU G Q, WU J, et al. Chemical Composition and Antioxidant Activities of the Essential Oil from *Nandina Domestica* Fruits[J]. Natural Product Research, 2016, 30(3): 362–365.
- [31] UDEMA I I. Directly and Indirectly Determinable Rate Constants in Michaelian Enzyme-Catalyzed Reactions[J]. Asian Journal of Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, 2023, 15(1): 41–55.
- [32] 刘艳灿, 袁 杨, 翁艾慧, 等. 红葱头精油体外抗氧化及抑菌效果研究 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 246–252.
- LIU Yancan, YUAN Yang, WENG Aihui, et al. Studies on Anti-Oxidative in Vitro and Anti-Microbico Effect of *Allium Cepa* var. *Proliferum*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(11): 246–252.
- [33] JONUŠAITE K, VENSKUTONIS P R, MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, et al. Antioxidant and Antimicrobial Effect of Plant Essential Oils and *Sambucus Nigra* Extract in Salmon Burgers[J]. Foods, 2021, 10(4): 776.
- [34] 金思渊, 谢 晶. 茴香精油对 4℃下鲜切苋菜贮藏品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 191–198.
- JIN Siyuan, XIE Jing. Effect of Fennel Essential Oil on Storage Quality of Fresh-Cut Amaranth at 4 °C [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 191–198.
- [35] SAMANTA I, ROY P C, DAS E, et al. Plant Peroxisomal Polyamine Oxidase: A Ubiquitous Enzyme Involved in Abiotic Stress Tolerance[J]. Plants, 2023, 12(3): 652.
- [36] 张轶斌, 贾晓昱. 壳聚糖姜精油复合保鲜剂对甜椒贮藏品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 228–232.
- ZHANG Yibin, JIA Xiaoyu. Effects of Chitosan Coating Enriched with Ginger Oil on Qualitative Properties of Sweet Pepper[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(22): 228–232.
- [37] KRAŚNIEWSKA K, GNIEWOSZ M, KOSAKOWSKA O, et al. Preservation of Brussels Sprouts by Pullulan Coating Containing Oregano Essential Oil[J]. Journal of Food Protection, 2016, 79(3): 493–500.
- [38] 陈敏杰. 三种植物精油微胶囊的制备及其性能研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- CHEN Minjie. Study on the Facile Fabrication and Characterization of Essential Oil-Loaded Antibacterial Microcapsules[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [39] YIN C, HUANG C X, WANG J, et al. Effect of Chitosan- and Alginate-Based Coatings Enriched with Cinnamon Essential Oil Microcapsules to Improve the Postharvest Quality of Mangoes[J]. Materials, 2019, 12(13): 2039.
- [40] TIAN Y Q, ZHOU L, LIU J P, et al. Effect of Sustained-Release Tea Tree Essential Oil Solid

- Preservative on Fresh-Cut Pineapple Storage Quality in Modified Atmospheres Packaging[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135898.
- [41] 李 丁, 丁哲旭, 李 威, 等. 基于丁香精油/ β -CD 微胶囊的 PLA/PVA 抗菌膜的研制及其性能研究[J]. 包装学报, 2018, 10(3): 1-7.
- LI Ding, DING Zhexu, LI Wei, et al. Study on Preparation and Properties of PLA/PVA Antibacterial Film Based on Clove Essential Oil/ β -CD Microcapsule[J]. Packaging Journal, 2018, 10(3): 1-7.
- [42] TONTUL I, TOPUZ A. Mixture Design Approach in Wall Material Selection and Evaluation of Ultrasonic Emulsification in Flaxseed Oil Microencapsulation[J]. Drying Technology, 2013, 31(12): 1362-1373.
- [43] WHELEHAN M, MARISON I W. Microencapsulation Using Vibrating Technology[J]. Journal of Microencapsulation, 2011, 28(8): 669-688.
- [44] 彭莹芸. 葡萄柚精油微胶囊的制备及稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- PENG Yingyun. Preparation and Stability of Grapefruit Essential Oil Microcapsules[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [45] 韩旭旭, 王玉涵, 王 鑫. 植物精油在果蔬保鲜领域的应用研究及展望[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(23): 204-208.
- HAN Xuxu, WANG Yuhan, WANG Xin. Research and Prospect of the Application of Plant Essential Oil in the Field of Fruit and Vegetable Preservation[J]. Food Research and Development, 2018, 39(23): 204-208.
- [46] AHN J H, KIM Y P, SEO E M, et al. Antioxidant Effect of Natural Plant Extracts on the Microencapsulated High Oleic Sunflower Oil[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 327-334.
- [47] WANG H H, LI M Y, DONG Z Y, et al. Preparation and Characterization of Ginger Essential Oil Microcapsule Composite Films[J]. Foods, 2021, 10(10): 2268.
- [48] 刘漪萱, 陈雅琪, 陈维宁, 等. 缓释型精油微胶囊壁材的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 405-410.
- LIU Yixuan, CHEN Yaqi, CHEN Weining, et al. Research Progress on Wall Materials for Sustained Release Microcapsules of Essential Oils[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 405-410.
- [49] ALVARENGA BOTREL D, VILELA BORGES S, VICTÓRIA DE BARROS FERNANDES R, et al. Evaluation of Spray Drying Conditions on Properties of Microencapsulated Oregano Essential Oil[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2012, 47(11): 2289-2296.
- [50] 王倩文, 张 珍, 郝旭东, 等. 反向凝胶法制备孜然精油微胶囊的工艺优化及其释放[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(5): 28-35.
- WANG Qianwen, ZHANG Zhen, HAO Xudong, et al. Preparation and Release of Cumin Essential Oil Microcapsules by Inverse Gelation Method[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2021, 57(5): 28-35.
- [51] JU J, CHEN X Q, XIE Y F, et al. Simple Microencapsulation of Plant Essential Oil in Porous Starch Granules: Adsorption Kinetics and Antibacterial Activity Evaluation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): 14156.
- [52] 王 楠, 王建清, 王玉峰, 等. 海藻酸钠/多孔淀粉牛至精油微胶囊的制备[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 224-227, 234.
- WANG Nan, WANG Jianqing, WANG Yufeng, et al. Preparation of Sodium Alginate / Porous Starch Oregano Essential Oil Microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(9): 224-227, 234.
- [53] HSIEH W C, CHANG C P, GAO Y L. Controlled Release Properties of Chitosan Encapsulated Volatile Citronella Oil Microcapsules by Thermal Treatments[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2006, 53(2): 209-214.
- [54] REN X L, YUE S L, XIANG H, et al. Inclusion Complexes of Eucalyptus Essential Oil with β -Cyclodextrin: Preparation, Characterization and Controlled Release[J]. Journal of Porous Materials, 2018, 25(6): 1577-1586.
- [55] BAH M G, BILAL H M, WANG J T. Fabrication and Application of Complex Microcapsules: A Review[J]. Soft Matter, 2020, 16(3): 570-590.
- [56] 冉 欢, 夏晓霞, 赵吉春, 等. 纳米喷雾干燥法制备食品生物活性成分微胶囊研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 318-325.
- RAN Huan, XIA Xiaoxia, ZHAO Jichun, et al. Preparation of Food Bioactive Ingredient Nanocapsules by Nano Spray Drying: A Review[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 318-325.
- [57] IXTAINA V Y, HOFFMAN E, COPADO C N, et al. Microencapsulation of Chia Seed Oil by Spray-Drying: Influence of the Antioxidant Addition[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2023, 125(1): 2200134.
- [58] YANG Y H, LI X Z, ZHANG S. Preparation Methods and Release Kinetics of *Litsea Cubeba* Essential Oil Microcapsules[J]. RSC Advances, 2018, 8(52): 2289-2296.

- 29980–29987.
- [59] 贾有青, 李哲, 代岚, 等. 元宝枫籽油微胶囊化及其稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 141–146.
- JIA Youqing, LI Zhe, DAI Lan, et al. Preparation and Stability of Acer Truncatum Microcapsules by Spray Drying[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(4): 141–146.
- [60] CONSTANTINO A B T, GARCIA-ROJAS E E. Microencapsulation of Beta-Carotene by Complex Coacervation Using Amaranth Carboxymethyl Starch and Lactoferrin for Application in Gummy Candies[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108488.
- [61] 张蕊, 李红燕, 刘薇, 等. 复凝聚法制备丁香油微囊的工艺研究[J]. 现代生物医学进展, 2013, 13(4): 631–635, 665.
- ZHANG Rui, LI Hongyan, LIU Wei, et al. Preparation of Clove Oil Microcapsules Process of Composite Coacervation[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2013, 13(4): 631–635, 665.
- [62] ACH D, BRIANÇON S, BROZE G, et al. Formation of Microcapsules by Complex Coacervation[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015, 93(2): 183–191.
- [63] TU Q B, WANG P Y, SHENG S, et al. Microencapsulation and Antimicrobial Activity of Plant Essential Oil Against *Ralstonia Solanacearum*[J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(10): 5273–5282.
- [64] YUAN Y, GENG X, WU H, et al. Chemical Composition, Antimicrobial Activities, and Microencapsulation by Complex Coacervation of Tea Tree Essential Oils[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): 16585.
- [65] 赵芷芪, 李秋瑾, 董中旺, 等. 层层自组装微胶囊制备与应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(10): 33–36.
- ZHAO Zhiqi, LI Qiujin, DONG Zhongwang, et al. Progress in Microcapsule Prepared Through Layer-by-Layer Self-Assembly[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(10): 33–36.
- [66] BAH M G, BILAL H M, WANG J. Fabrication and Application of Complex Microcapsules: A Review[J]. Soft Matter, 2020, 16(3): 570–590.
- [67] 张珊珊. 乳液模板-层层自组装百里香微胶囊制备、缓释和抑菌效果的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- ZHANG Shanshan. Preparation of Thyme Microcapsule with Emulsion Templates by Layer-by-Layer Self-Assembly Method and Its Controlled Release and Antibacterial Effect Research[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [68] 张昭. 基于百里香精油微乳液层层自组装微胶囊的淀粉基薄膜的抗菌保鲜应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- ZHANG Zhao. Application on Antiseptic Preservation of Starch Films with Thyme Essential Oil Microemulsion and Layer-by-Layer Self-Assembly Microcapsule[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [69] ZHANG Z, ZHANG S S, SU R R, 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.
- [70] 黎汉清, 罗文翰, 肖更生, 等. 丁香精油微胶囊的制备及其对草莓保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 191–196.
- LI Hanqing, LUO Wenhan, XIAO Gengsheng, et al. Preparation of Microcapsule of Clove Essential Oil and Preservation Effect on Strawberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(21): 191–196.
- [71] 戴瑶, 陈玥琰, 张翔, 等. 壬醛与香芹酚复合抑菌微胶囊的制备及其对蓝莓的保鲜作用[J/OL]. 食品与发酵工业. [2023–12–22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035532>.
- DAI Yao, CHEN Yueyan, ZHANG Xiang, et al. Preparation of Composite Antibacterial Microcapsules with Nonanal and Carvacrol and Its Application in Blueberry Preservation [J/OL]. Food and Fermentation Industries. [2023–12–22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035532>.
- [72] 张红梅. 花椒/牛至精油微胶囊的制备及其对葡萄贮藏品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- ZHANG Hongmei. Preparation of Pepper/Oregano Essential Oil Microcapsules and Their Effect on the Storage Quality of Grapes[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [73] ESPITIA P J P, de FÁTIMA FERREIRA SOARES N, BOTTI L C M, et al. Assessment of the Efficiency of Essential Oils in the Preservation of Postharvest Papaya in an Antimicrobial Packaging System[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2012, 15(4): 333–342.
- [74] CAI C C, MA R J, DUAN M W, et al. Effect of Starch Film Containing Thyme Essential Oil Microcapsules on Physicochemical Activity of Mango[J]. LWT, 2020, 131: 109700.
- [75] LI L, SONG W L, SHEN C H, et al. Active Packaging Film Containing Oregano Essential Oil Microcapsules and Their Application for Strawberry Preservation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): 14799.

- [76] 宋文龙, 李洋洋, 邵海燕, 等. 生姜精油微胶囊薄膜包装对秋葵保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 142–148.
SONG Wenlong, LI Yangyang, GAO Haiyan, et al. Effect of Ginger Essential Oil Microcapsule Film Packaging on Okra Preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(8): 142–148.
- [77] 栗方宇. 百里香酚微胶囊的交联复合膜制备及其在樱桃番茄保鲜中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LI Fangyu. The Preparation of Cross-Linked Composite Films Based on Thymol Microcapsules and Its Application in the Preservation of Cherry Tomato[J]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [78] AZIZ M, KARBOUNE S. Natural Antimicrobial/Antioxidant Agents in Meat and Poultry Products as Well as Fruits and Vegetables: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(3): 486–511.
- [79] 张 兰. 丁香精油壳聚糖纳米微胶囊的研究及在蓝莓保鲜中的应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
ZHANG Lan. Study on Clove Essential Oil Chitosan Nano-Microcapsules and Its application in Blueberry Preservation[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2021.
- [80] 殷 诚. 可食微胶囊涂层的设计及其对鲜切紫玉淮山保鲜效果的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
YIN Cheng. Design of Edible Coating Containing Microcapsules and its Study in Preserving Fresh-Cut Purple Yam[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [81] 王祎赫. 佛手果皮精油微胶囊的制备及其在可食用膜中应用研究[D]. 成都: 成都大学, 2023.
WANG Yihe. Study on Preparation of Fingered Citron Peel Essential Oil Microcapsule and its Application in Edible Film[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.
- [82] 王海松, 赵亚丽, 杜 健, 等. 生物质基可降解果蔬保鲜包装材料的制备及应用[J]. 包装学报, 2023, 15(1): 1–11.
WANG Haisong, ZHAO Yali, DU Jian, et al. Preparation and Application of Biomass-Based Biodegradable Fruit and Vegetable Preservation Packaging Materials[J]. Packaging Journal, 2023, 15(1): 1–11.

(责任编辑: 李玉华)

Application of Microencapsulated Plant Essential Oil in Fruit and Vegetable Preservation Packaging

SUN Jianming^{1,2}, ZHAO Chenhui¹, LIU Hui^{1,2}

(1. Department of Packaging Engineering, School of Art & Design, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471000, China; 2. Henan Intelligent and Protective Packaging Design Engineering Research Center, Luoyang Henan 471000, China)

Abstract: The natural antibacterial and antioxidant activity of plant essential oil make it have a wide application prospect in the field of fruit and vegetable preservation. However, plant essential oil has some disadvantages such as strong odor and volatility, and the application effect is not good. Microcapsule technology can cover the strong smell of essential oils, maintain the chemical stability, and have a slow-release effect, which can better play the excellent role of plant essential oils in the preservation and packaging of fruits and vegetables. The antibacterial and antioxidant activities of plant essential oils were introduced, as well as the core materials, wall materials and common preparation methods of plant essential oil microcapsules. The research status of plant essential oil microcapsule fresh-keeping agent controlled-release packaging, composite fresh-keeping film packaging and edible film packaging in fruit and vegetable preservation packaging was reviewed and analyzed, in order to provide reference for further research and application of microencapsulated plant essential oil in fruit and vegetable preservation packaging.

Keywords: plant essential oils; microcapsule technology; core material; wall material; preservation packaging