

蛋白/植物精油基复合膜的形成机制及在食品保鲜上的应用研究进展

刘树萍, 彭秀文, 张佳美, 关桦楠, 石长波

Research Progress on the Formation Mechanism of Protein/Essential Oil-based Composite Films and Application in Food Preservation

LIU Shuping, PENG Xiuwen, ZHANG Jiamei, GUAN Huanan, and SHI Changbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

壳聚糖/植物精油可食性抗菌膜研究进展

Research Progress of Edible Antimicrobial Films Based on Chitosan and Essential Oil

食品工业科技. 2018, 39(18): 323-329,335 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.18.057>

山梨酸钾对魔芋葡甘聚糖/玉米醇溶蛋白复合膜的性能和抑菌效果的影响

Effect of potassium sorbate on properties and antibacterial effect of konjac glucomannan/zein composite films

食品工业科技. 2017(11): 276-280 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.11.044>

黄原胶对壳聚糖精油复合膜的性能及精油释放的影响

Effects of Xanthan Gum on Properties and Essential Oil Release of Chitosan Essential Oil Composite Films

食品工业科技. 2020, 41(10): 178-183 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.029>

复合涂膜处理对圣女果的贮藏保鲜效果研究

Preservation Effect of Compound Coating Treatment on Cherry Tomatoes during Storage Time

食品工业科技. 2020, 41(4): 247-251 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.042>

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

Research Progress on Antioxidant Activity of Plant Essential Oil and Its Application in Fresh-keeping of Fruits and Vegetables

食品工业科技. 2019, 40(23): 343-348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.23.056>

PLA/TiO₂纳米复合膜对香菇保鲜效果的研究

The preservation effect of polylactic acid nano-Ti O₂ composite film packaging on Lentinus edodes

食品工业科技. 2017(16): 225-228 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.16.042>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘树萍, 彭秀文, 张佳美, 等. 蛋白/植物精油基复合膜的形成机制及在食品保鲜上的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 342–351. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110029

LIU Shuping, PENG Xiuwen, ZHANG Jiamei, et al. Research Progress on the Formation Mechanism of Protein/Essential Oil-based Composite Films and Application in Food Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 342–351. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110029

· 专题综述 ·

蛋白/植物精油基复合膜的形成机制及在食品保鲜上的应用研究进展

刘树萍^{1,*}, 彭秀文¹, 张佳美¹, 关桦楠², 石长波¹

(1. 哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘要: 传统包装材料已无法满足消费者对于食品包装绿色、环保、高效的需求, 利用可生物降解材料开发食品包装对于保持食品自然状态并减少环境污染有着重要意义。可食用膜以安全和零废弃性成为研究热点, 其中, 蛋白质具备良好的机械性能、营养价值, 常用于可食用膜的制备, 植物精油从芳香植物中提取, 具有广谱的抑菌性和抗氧化特性, 在应用于食品包装方向展示出较大潜力, 将蛋白质与植物精油共混制备可食用膜, 可进一步改善蛋白基膜的性能, 同时也掩盖了植物精油的强烈感官特性并达到缓释作用。本文对蛋白/植物精油基复合膜进行综述, 阐述蛋白/植物精油基复合膜的形成机理, 围绕单植物精油与复配植物精油两种与蛋白基膜的复合方式进行介绍, 并总结了蛋白/植物精油基复合膜在食品上的应用情况。本文可为蛋白/植物精油基复合膜后续发展提供一定参考。

关键词: 植物精油, 蛋白质, 复合膜, 成膜机制, 保鲜效果

中图分类号: TS206.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0342-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110029



本文网刊:

Research Progress on the Formation Mechanism of Protein/Essential Oil-based Composite Films and Application in Food Preservation

LIU Shuping^{1,*}, PENG Xiuwen¹, ZHANG Jiamei¹, GUAN Huanan², SHI Changbo¹

(1. College of Tourism and Cuisine, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: It has great significance to maintain the natural state of food and reduce the environmental pollution that use of bio-based packaging materials to research and development food packaging, because it has been unable to meet the demand of consumers for green, environmental protection and high-efficiency, for traditional food packaging. Edible films are attracting great attentions in food packaging due to their safety and zero waste property, among which, the protein often used in the preparation of edible films because of good mechanical properties and nutritional value. Essential oils extracted from aromatic plants, the broad-spectrum antibacterial and antioxidant properties give it great potential in food packaging. Incorporation of essential oils into edible protein-based films can effectively improve their properties, and cover the strong sensory properties of essential oils, meanwhile, the release rate of essential oils is controlled. This review covers the recent developments in protein/essential oils-based composite films, the formation mechanism of protein/essential oils-based composite films is discussed, the two composite methods of single essential oil and complex essential oil with protein-based composite films is introduced. Meanwhile, the application of protein/essential oils-based composite films in food is summarized. This study can provide some reference for the future development of protein/essential oils-based composite films.

收稿日期: 2022-11-07

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2021B015); 2019 年度哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划学术骨干项目 (2019CX18); 2021 年哈尔滨商业大学教师“创新”项目支持计划 (LH2021B015); 第二批国家级职业教育教师教学创新团队课题研究项目 (ZH2021080101)。

作者简介/通信作者*: 刘树萍 (1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 传统烹饪工业化, E-mail: liusp201@163.com。

Key words: essential oils; protein; composite films; film-forming mechanism; preservation effect

包装材料使用的塑料占塑料生产总量的 40%, 其中, 大部分用于食品包装。以石油为原料的传统塑料对环境造成了极大危害, 使用可生物降解的材料替代塑料应用于食品包装能有效减少环境污染^[1]。可食用膜以多糖、蛋白质、脂质等天然聚合物为基质制备而成, 能够控制水分流失并降低不良化学反应率从而提高食品质量, 且大幅度降低了对环境的影响, 在近年来得到广泛研究^[2]。

蛋白质因其良好的生物相容性与较高的营养价值, 常作为可食用膜的成膜基质进行研究。蛋白类可食用膜通过蛋白质分子间的化学键相互作用形成, 有良好的机械性能, 适用于低水分食品包装^[3]。蛋白类可食用膜与壳聚糖、淀粉等多糖类可食用膜相比透明度稍低但具备更好的防水性, 而由蜂蜡、脂肪酸等脂类制备的可食用膜疏水性高但脆性较大。然而, 单一材料制备而成的可食用蛋白膜存在高刚度、低延展性与较差的疏水性等缺点, 实际应用受到限制, 相较于传统塑料包装仍存在缺陷^[4]。因此, 在制备可食用膜时, 常将生物基材料与其他材料相结合以竞争传统包装材料的性能。以蛋白质为成膜基质, 对其进行物理、化学、酶法及共混改性是改善蛋白膜性能的有效途径^[5]。植物精油在食品保鲜领域有着巨大潜力, 将植物精油作为活性成分添加至蛋白基膜中可提升蛋白膜的机械性能与防潮性能, 是一种有效的改善蛋白膜性能的方法。植物精油为多种有机化合物的混合物, 主要成分包括萜类化合物、芳香化合物、脂肪族化合物及含氮含硫化合物, 具备广谱的抑菌性与优良的抗氧化性, 常应用于食品包装中以延长食品货架期^[6-7]。用做食品抑菌、抗氧化等方面可有效延缓食品变质。除了单独用于食品保鲜, 也可作为添加剂与成膜基质结合制备复合膜, 改善膜的机械性能并提高抑菌、抗氧化活性。

本文以蛋白基膜的性能改善为切入点, 对于在亲水性基质中加入疏水性化合物制备多组分复合膜进行分析, 分析蛋白/植物精油基复合可食用膜的成膜机制、复合方式, 对近年来的研究进展及在食品中的应用情况进行综述, 为蛋白/植物精油基复合膜的进一步发展提供参考。

1 蛋白/植物精油基复合膜的构建

1.1 蛋白质的来源及功能特性

蛋白质具备较好的生物相容性, 较高的营养价值, 其二级、三级和四级结构引起不同位置、类型和能量的相互作用和结合。由于蛋白质的氨基酸组成多样, 呈现出多种功能特性, 因此, 蛋白质基与其他成膜材料相比, 成膜后有更好的性能^[8]。

蛋白质根据来源可分为植物蛋白与动物蛋白两种, 植物蛋白常用大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白、小麦面筋蛋白制备可食用膜, 常用的动物蛋白包括乳清蛋白、明胶、酪蛋白等。表 1 为各类蛋白质的来源及成膜后性能, 大豆分离蛋白由 18 种氨基酸组成, 由氨基酸侧链上的官能团决定其亲水或疏水, 是蛋白膜研究中使用频率极高的材料, 本身无抗菌性能, 需要在制备过程中添加活性物质以提升抑菌性^[11]。明胶是动物体内胶原蛋白水解后得到的天然蛋白质大分子, 兼具亲水与亲脂基团, 在动物蛋白中最常用到, 成膜后形成一层外部屏障减少食品受光、热和氧的影响, 但被用作单一成膜材料时, 产生液滴较大, 膜的应用受到限制^[12]。

天然提取的蛋白自身性质不够稳定, 且有一定的过敏风险, 在制备成膜的过程中结构易遭到破坏, 性能有待完善^[13]。亲水性是蛋白膜应用时较大的阻碍, 而水蒸气的转移主要通过蛋白质的亲水基团, 因此, 控制成膜溶液中疏水-亲水基团比例可提高可食用膜的疏水性能。植物精油疏水性强, 与蛋白质复配能有效提高疏水性, 在提升其物理性能的同时, 植物精油本身具有的抑菌活性也能增强复合膜的保鲜能力^[14]。

1.2 植物精油的提取及抑菌机制

植物精油来源于各类可食用的芳香植物与药用植物, 可溶于脂类及有机物, 密度低于水, 一般为透明液体^[15]。植物精油是具有强烈感官特性的挥发性化合物的集合, 各类柠檬烯化合物、醛、酯、醚是精油独特气味的来源, 根据不同的香型可将精油分为花香型、木香型、豆香型、酒香型及动物香型^[16]。传统的精油提取方法效率较低。近年来, 更环保有效的提取方法成为探索热点。微波提取、微波辅助水蒸馏提

表 1 各类蛋白质的来源与成膜后性能^[8-10]

Table 1 Source and properties after film formation of various protein^[8-10]

| 蛋白质 | 来源 | 成膜性能 |
|--------|-------------------|-----------------------------------|
| 豆类蛋白 | 豆粕 | 不透明度较低, 弹性良好, 亲水性高 |
| 玉米醇溶蛋白 | 玉米胚乳 | 成膜性较好, 疏水性强, 力学性能较差, 脆性大 |
| 小麦面筋蛋白 | 麦醇溶蛋白、麦谷蛋白与水结合的产物 | 粘弹性与疏水性较好, 延伸性强, 乙醇含量高时性能有所下降 |
| 乳清蛋白 | 牛乳 | 成膜性良好, 湿度适宜时对氧气与芳香化合物有较好阻隔性, 亲水性高 |
| 酪蛋白 | 动物乳液 | 不透明度较高, 疏水性强 |
| 明胶 | 动物胶原蛋白水解产物 | 较高的机械强度与营养价值, 颗粒较大 |

取、超声辅助提取、超临界萃取、酶法提取等新型技术为植物精油的提取提供了更有效、环保的途径^[17]。Teshale 等^[18]对水蒸气蒸馏法提取迷迭香精油工艺进行优化,调整工艺参数后得到的精油最大产率为2.8%,并发现迷迭香精油具备良好的抑菌、抗氧化作用。Bakar 等^[19]使用蒸馏法和酶辅助蒸馏法提取积雪草精油,发现以纤维素酶 40 FPU/g 为底物时,精油的得率可达到 1.01%。Fan 等^[20]研究了天然深共晶溶剂辅助微波蒸馏法提取当归精油,通过对不同溶剂的比较,发现氯化胆碱和柠檬酸更有利于精油的提取,当归精油的提取率为 1.39%。Yang 等^[21]使用微波诱导加氢蒸馏和同步萃取(microwave-induced hydrodistillation and simultaneous extraction, MHDE)的方法从紫苏中提取挥发油,结果表明,传统水蒸馏法提取精油中紫苏醛含量为 40.69%,使用 MHDE 法提取精油,紫苏醛含量达到 51.91%,在提取时采用硬脂酸蔗糖为添加剂,减少了精油中非萜类化合物的含量。

植物精油具备优良的抑菌性能,图 1 为植物精油的抑菌机制示意图,其抑菌作用的实现包括破坏细胞壁、细胞膜的流动性导致细胞内容物泄露,抑制遗传物质的复制影响微生物繁殖,植物精油所含的酚类物质与膜蛋白结合干扰其正常工作^[22-23]。Banday 等^[24]研究了印度拉达克德拉斯地区的白果茎精油的抗氧化、抗菌活性,结果表明,其 DPPH 自由基清除能力随精油浓度升高呈上升趋势,对革兰氏阳性菌与革兰氏阴性菌都有毒性,精油可以穿过细胞壁阻碍 ATP 的组装,影响包括膜运输与细胞能量生产在内的活动。代安娜等^[25]测定了 6 种植物精油及其复合精油对玉米中霉菌的抑制作用,根据抑菌圈直径判断抑菌效果,结果表明,霉菌对比例为丁香:八角:薄荷:花椒(1:1:1:1)的复合精油高度敏感,均高于同等剂量下霉菌对其他单体精油及复合精油的敏感度。

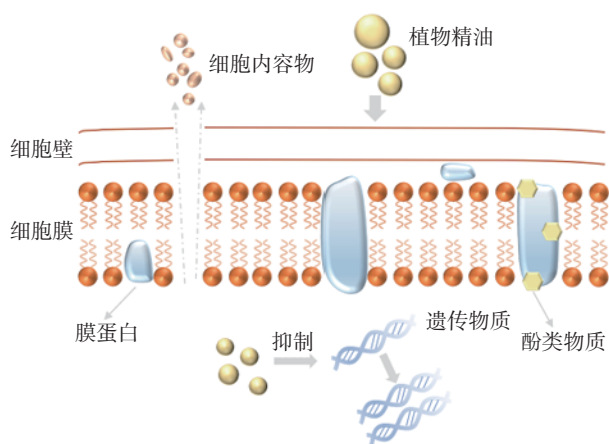


图 1 植物精油的抑菌机制示意图^[22-23]

Fig.1 Schematic diagram of the bacteriostatic of essential oils^[22-23]

1.3 蛋白/植物精油基复合膜的成膜机制

1.3.1 蛋白基可食用膜的形成机制 蛋白类可食用

膜在性能研究时常使用流延法、挤压吹塑法与静电纺丝法 3 种,在实际应用时多用浸泡、涂布、喷雾法。综合生产成本、制备过程来看。流延法是实验室制备可食用膜最常使用的方法,在制备成膜溶液之后,脱气消泡,倒在平板上干燥成膜即可^[26-27]。蛋白质依靠各种不同的化学键成膜,聚合物之间通过离子键、共价键、氢键、范德华力、疏水相互作用形成具有半刚性的网络结构,使溶剂均匀分散在内,二硫键是形成膜结构中最主要的化学键^[28]。蛋白膜的作用力包括分子间的内聚力、支架与薄膜之间的附着力两种。足够强的内聚力促进薄膜结构的产生,决定薄膜的机械性能,受多种因素影响,如结构、溶剂、温度、增塑剂种类。附着力与聚合物结构、化学组成、分子量、链的结构、基团有关^[29]。蛋白膜的疏水性与氨基酸的极性相关,极性氨基酸亲水而非极性氨基酸疏水,不同的氨基酸组成赋予蛋白膜不同的疏水性能,除此之外,蛋白质分子链上的极性氨基酸与非极性氨基酸也会产生化学势,从而产生相互作用的力,是形成有凝聚力的蛋白膜的关键因素^[30-31]。蛋白膜的形成除受内在因素影响之外,外界环境因素同样会改变具体的成膜过程。王莹等^[32]研究了物理、化学及酶法三种成膜方法对乳清蛋白成膜过程的影响,并分析成膜过程,发现热处理与还原剂会使乳清蛋白分子间形成新的二硫键,pH 与交联剂影响其二级结构,TG 酶催化乳清蛋白分子间或分子内共价键产生,利于形成三维网络结构,不同成膜方法的最佳成膜工艺均赋予乳清蛋白膜良好的机械性能与阻隔性能。

1.3.2 植物精油对蛋白膜物理性能的影响 植物精油添加至蛋白基复合膜的方式包括直接添加至成膜溶液与制备成微胶囊后再形成混合溶液两种,图 2 为蛋白/植物精油基复合膜的制备过程。植物精油对蛋白基可食用膜性能的影响体现在膜表面不均匀、厚度增加、阻光性、阻湿性增加、机械性能提升等方面。将精油添加至蛋白质溶液中,脂肪液滴集中于疏水基质,打破可食用膜的原有结构,在复合膜中形成较多微孔与不连续结构,使表面凹凸不平,此外,复合膜干燥过程中精油挥发也造成了许多气孔和纹裂^[35]。针对这一现象,有研究人员对复合膜的制备过程进行优化,使用超声的方式得到粒径更小的成膜溶液,从而使复合膜表面更加平整。Gul 等^[36]将榛子蛋白和丁香精油用超声分别在不同时间和振幅均质,得到纳米乳膜。对成膜纳米乳剂的平均粒径和电位进行了分析,并评估了可食用膜的特性,以及抗菌和抗氧化活性。薄膜的厚度和水溶性随超声处理的增加而显著降低,微观结构更加均匀,薄膜的透气性降低,具有更好的抑菌及抗氧化活性。复合膜的厚度取决于复合膜成膜溶液中非溶剂的总质量,随着精油添加量的增加,膜的厚度也随之上升^[37]。复合膜溶液中的不溶性成分影响了光的散射程度与透明度,因此随着植物精油的加入,水溶性物质比例减少,在提高复合膜厚

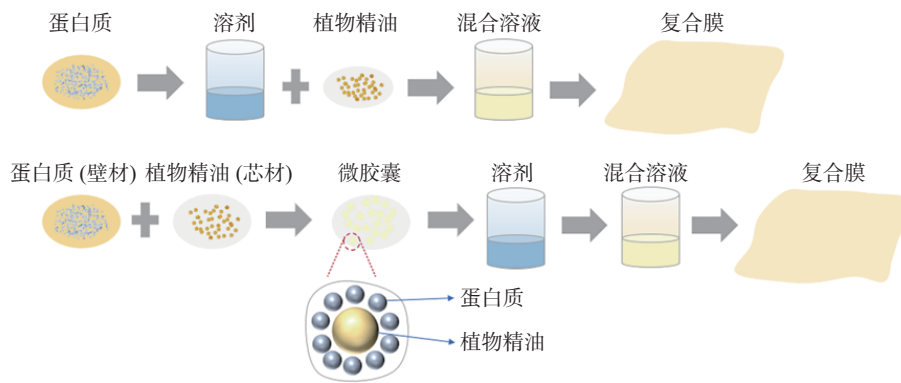


图 2 蛋白/植物精油基复合膜的制备过程^[33-34]

Fig.2 Preparation process of the protein/essential oils composite film^[33-34]

度进而增加不透明度的同时,也因光的反射与吸收提升复合膜阻光性^[38]。精油所含多酚可以在蛋白质基膜中起到类似增塑剂的作用,因为它们极性基团通过与蛋白质的 C-O 酰胺基团形成氢键,取代了 NH 或 SH 和蛋白质的 C-O 基团之间的氢键相互作用,膜结构中链的移动性增加,交联与增塑作用得到增强^[33]。脂类的疏水特性使蛋白质基质和精油之间产生分子间相互作用,疏水基团暴露,分子间化学键重新结合,疏水性能增强^[39]。随着精油添加,可食用膜的酚、醛、醇类等物质含量上升,导致多肽链之间的疏水相互作用变弱,膜内部疏散程度提升,复合膜更具流动性与弹性^[40]。

1.3.3 蛋白质对植物精油释放速度的影响 植物精油易挥发、释放快、作用时间短且难溶于水,在实际应用时易受到限制导致保鲜效果不稳定,部分精油带有影响感官体验的特殊气味,也使其在应用方面存在局限^[41]。将植物精油作为活性物质添加至可食用膜中,不仅提升了复合膜的性能,也对植物精油本身起到了掩盖气味与缓释作用^[42]。研究表明,以蛋白质或蛋白质复合物为壁材包裹植物精油,制作微胶囊后再进行可食用膜的制备,能更好地控制植物精油的释放

速度、提高稳定性。石泽栋等^[43]以牛至精油为芯材,明胶与阿拉伯胶为壁材,使用复凝聚法制备牛至精油微胶囊,对微胶囊进行缓释性能测定,发现与单一牛至精油相比,微胶囊具备良好的表面结构和热稳定性,在低温、避光、无氧条件下缓释性能较好。微胶囊相比牛至精油单体具有更好的成膜效果。Localipereira 等^[44]将粉胡椒精油作为芯材,分别在单层(蛋白质)和双层(蛋白质-多糖)乳剂中微囊化处理,乳剂干燥后形成薄涂层用于圣女果储存,在 25 °C 下保存 21 d,以不含精油的包装为对照,使用含精油包装的圣女果各项质量参数均优于对照组,且挥发物的释放速度得到了控制。由此可见,在制备蛋白/植物精油基复合膜时,先使用微胶囊技术对精油进行处理,进而制备复合膜,可提升膜的稳定性与保鲜效果。

1.4 蛋白/单植物精油基复合膜

在蛋白膜中加入植物精油进行共混可显著增强复合膜的性能,表 2 为蛋白/植物精油基复合膜的示例,由此可见,植物精油与蛋白质复合后对蛋白膜的性能改善包括水蒸气透过率降低、阻光性增强、抑菌性能提升、抗氧化活性增强等方面。Socaciu 等^[45]研究了添加龙蒿精油对 5% 乳清分离蛋白和 5% 甘油

表 2 蛋白/植物精油基复合膜的种类

Table 2 Type of protein/essential oils composite film

| 植物精油 | 成膜基质 | 复合膜性能 | 参考文献 |
|----------------|----------------|------------------------------------|------|
| 龙蒿精油 | 乳清蛋白 | 阻光性、疏水性、抗机械穿透性增强 | [45] |
| 橄榄精油 | 明胶 | 机械性能提高,抗菌性能增强 | [47] |
| 丁香精油 | 玉米醇溶蛋白 | 改善膜的物理性能 | [49] |
| 孜然精油 | 绿豆蛋白 | 水蒸气透过率降低、抗氧化活性升高 | [50] |
| 荨麻精油 | 鱼鳞明胶 | 对大肠杆菌、单核增生李斯特菌和金黄色葡萄球菌均表现出抑制作用 | [51] |
| 肉桂精油 | 盲鳗皮明胶 | 具备良好的物理性能、阻水性、抑菌性、抗氧化活性 | [52] |
| | 明胶、壳聚糖 | 具有较强的抑菌和抗氧化活性 | [46] |
| 石竹精油 | 明胶、羧甲基纤维素 | 对产黄曲霉素霉菌抑制效果较好 | [53] |
| 薰衣草精油 | 鱼鳞明胶、壳聚糖 | 疏水性增强、抗氧化性提升、对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有良好抑制作用 | [54] |
| 丁香精油 | 明胶、普鲁兰 | 复合膜具备良好的力学性能、机械性能与抗氧化活性,对植物精油有缓释作用 | [48] |
| 茴香、橘子、肉桂精油 | 壳聚糖、玉米醇溶蛋白 | 改善膜的物理性能 | [55] |
| 丁香酚、卡伐克醇、柠檬醛 | 壳聚糖、瓜尔胶、乳清分离蛋白 | 具有良好的抑菌活性 | [56] |
| 香茅、香菜、龙蒿、百里香精油 | 鳕鱼蛋白 | 复合膜的抗氧化活性得到增强 | [57] |
| 牛至、肉桂、迷迭香精油 | 肌原纤维蛋白 | 复合膜的抑菌性能得到增强 | [58] |

制备的薄膜物理、力学性能的影响。成膜液中加入龙蒿精油后,复合膜的含水量、水溶解度、透明度增大,经热处理的复合膜表现出更好的物理和机械性能,适合食品包装应用。蛋白/植物精油基复合膜的制备也常通过添加多糖等物质对性能进行提升。Roy等^[46]以肉桂精油和芦丁为添加剂,制备壳聚糖/明胶基活性包装膜,研究发现,添加剂均匀分布于壳聚糖/明胶基质中且对原有结构不造成影响,复合膜具有较强的抑菌和抗氧化活性,肉桂精油与芦丁的联合使用表现出协同效应。

植物精油添加至蛋白膜的方式除了直接添加至蛋白质溶液外,利用技术手段先将植物精油进行封装,再添加至成膜溶液中的这一复合形式也得到了广泛研究。Abbasi等^[47]将橄榄精油封装在醋酸纤维素静电纺丝中,然后加入明胶基薄膜,经研究发现负载橄榄精油的电纺纤维复合明胶膜在提高水蒸气透过系数的同时,仍能提高复合材料的机械性能和抗菌性能。Shen等^[48]以吐温80和乳清分离蛋白/菊粉混合物与丁香精油结合制备纳米乳液和Pickering乳液,以0.2%、0.4%和0.6%的水平分别加入普鲁兰/明胶膜基液中。结果表明,普鲁兰/明胶与精油纳米载体的相容性得到了改善。由Pickering载体组成的复合膜具有高密度、低含水量、低渗透性的结构特点,具备良好的力学性能、隔水性能和较好的抗氧化活性。与纳米乳液相比,负载植物精油的Pickering乳液在薄膜样品中表现出缓释特征。所制备的含Pickering乳液复合膜具有作为天然活性食品包装的有效替代品的巨大潜力。

1.5 蛋白/复配植物精油基复合膜

不同的植物精油的抑菌效果略有不同,添加至蛋白膜中对其机械性能的影响也存在差距,复配植物精油是将不同的植物精油单体以一定比例混合而成,能弥补单体植物精油存在的缺陷,达到更好的综合性能。Escamilla-garcía等^[55]在壳聚糖/玉米醇溶蛋白膜中添加茴香、橘子、肉桂三种植物精油,并对复合膜进行表征,发现肉桂精油的添加改善了薄膜的物理性能,添加精油后复合膜的结构发生改变进而改善了性能,通过拉曼光谱分析,膜结构的改变是来自玉米醇溶蛋白的氨基酸侧链、壳聚糖的葡萄糖胺和来自精油的肉桂醛、茴香醇或柠檬烯的化学相互作用的结果。Torres等^[59]利用形质心设计法与微量稀释法,通过意愿函数同时预测牛至精油、百里香精油和柠檬草精油及其混合物对肠炎沙门氏菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的最小抑菌浓度和最小杀菌浓度,发现精油联用能有效抑制与杀灭细菌,其中,最大抑制效应为75%牛至精油、15%百里香精油与10%柠檬草精油联用,最大失活效应为50%牛至精油、40%百里香精油与10%柠檬草精油联用。利用精油之间的协同作用制备可食用膜可以达到更好的保鲜效果,因此,复配植物精油与蛋白质的结合有愈来

愈多的研究。Dhumal等^[56]在壳聚糖/瓜尔胶/乳清分离蛋白复合膜中加入丁香酚、卡伐克醇、柠檬醛,研究精油的联合使用对复合膜性能的影响,XRD分析表明,精油的加入改变了生物聚合物的相互作用。FTIR分析表明,在精油的存在下,乳清蛋白结构发生了变化。含有薄膜的精油具有良好的抑菌活性,在食品包装中具有潜在的应用前景。Pires等^[57]研究了添加用香茅、香菜、龙蒿和百里香精油合成的鳕鱼蛋白膜的物理、机械、抗氧化和抗菌性能,通过对DPPH自由基清除能力和还原活性的测定发现,精油的加入使鳕鱼蛋白膜的抗氧化活性增强。Qian等^[58]提取鸡肉的肌原纤维蛋白,与含有牛至精油、肉桂精油、迷迭香精油的复合精油共混制备复合膜,使用牛血浆进行等离子体处理,经研究发现,血浆处理可以促进精油从膜向肉的迁移,血浆与精油/蛋白质膜结合,可以显著调节血浆诱导的脂质氧化,进一步增强抑菌能力。将植物精油以复配的形式添加至蛋白基可食用膜中,对复合膜的抗氧化活性及抑菌活性均有一定增强,进一步提升了复合膜在食品保鲜上的应用潜力。

2 蛋白/植物精油基复合膜的应用

2.1 在水果保鲜中的应用

水果中含有丰富的维生素、矿物质及膳食纤维,具备较高的营养价值,但货架期较短、易腐烂变质是其在生产、销售过程中常发生的问题。保持水果品质常用方法为低温贮存^[60]与使用保鲜剂^[61],存在成本较高与化学物质对人体造成损害的问题,植物精油对水果保鲜有良好效果,近年来,研究人员对植物精油在水果保鲜中的应用进行大量研究,并取得一定的进展^[62]。

Lu等^[63]制备百里香酚/大豆分离蛋白/硅藻土复合膜,并对复合膜的热封参数进行优化,结果显示复合膜具备良好的热封性能和生物降解性,能有效延缓蓝莓贮藏期间品质的恶化。Roshandel-hesari等^[64]以壳聚糖、酪蛋白和牛至精油为原料制备可食用膜,测定其理化、屏障、抑菌、抗氧化和结构性能,并将复合膜应用于圣女果的贮藏,结果表明复合膜的性能得到提升,圣女果在4℃环境下的贮藏时间可延长至32d。Tügen等^[65]研究不同添加量的柠檬精油对明胶/壳聚糖薄膜的影响,发现随着柠檬精油比例的增加,复合膜的抗氧化活性增加,柠檬精油浓度高的薄膜具有更好的力学性能。将新鲜苹果切片上涂覆薄膜,4℃环境下储藏7d,经检测涂覆0.75%柠檬精油的苹果切片需氧菌未达到检测水平,综合性能最佳。孟金明等^[66]以壳聚糖和乳清蛋白作为成膜基质,添加不同浓度的木姜子精油制备复合溶液,对枇杷进行涂膜处理并在8℃下冷藏,结果表明木姜子精油添加量为6%的复合涂膜对枇杷保鲜效果最好,在贮藏第25d时涂膜组相比于对照组更好地保留了枇杷品质,且该复合膜能有效抑制多酚氧化酶、过氧

化物酶、苯丙氨酸解氨酶活性。蛋白/植物精油基复合膜应用于水果保鲜上时,可有效抑制细菌增长及酶活性,与对照组相比,以复合膜包装的水果保质期有效延长,且该保鲜方式成本较低、无对人体有害的化学物质,在未来水果保鲜领域可广泛使用。

2.2 在畜禽肉保鲜中的应用

肉及肉制品是饮食中不可或缺的一部分,储存时相比于其他食品更易变质,与食源性疾病关联较高^[67],合理的包装方式能有效减少微生物的繁殖与脂肪氧化酸败,可食用膜无毒无害、性质稳定,是理想的肉类包装材料,蛋白/植物精油基复合膜拥有较普通可食用膜更好的保鲜效果,常应用于肉及肉制品贮藏中。

Naseri 等^[68]制备了含有不同阿魏精油(ferulago angulate essential oil, FAEO)的明胶/壳聚糖复合膜,与对照样品相比,使用复合膜的火鸡肉的微生物指标较低,添加 0.5% FAEO 的明胶/壳聚糖复合膜可以抑制微生物生长,提高火鸡肉的货架期。Fernández-Pan 等^[69]在乳清分离蛋白中加入牛至或丁香精油制备可食用复合膜,对去皮鸡胸肉表面不同冷藏时期形成的整体菌群和选定菌群进行了有效性测定,发现复合膜对冷藏 8 d 的去皮鸡胸肉表面的主要病原菌均有较好的防治效果,以牛至精油为基础的薄膜比以丁香精油为基础的薄膜效果更好。张赟彬等^[70]在大豆分离蛋白膜的基础上添加 6% 肉桂醛、6% 丁香酚和 6% 肉桂醛/丁香酚复配物(质量比 1:1)制成的可食膜,研究其对冷鲜猪肉的保鲜效果。发现使用单体精油的大豆分离蛋白可食用膜能有效减少猪肉贮藏过程中的失水率、挥发性盐基氮值、菌落总数。Tsironi 等^[71]制备了加入生姜精油、迷迭香精油的乳清蛋白膜,考察其对延缓羊肉糜变质的作用,通过微生物指标及理化特性对羊肉糜的货架期进行分析,结果表明,添加 1% 植物精油的涂膜可显著提高肉的微生物品质,第 11 d 时,精油浓度为 1% 的薄膜的总活菌数、假单胞菌属、嗜热链球菌属、乳酸菌、肠杆菌科细菌和酵母菌与精油浓度为 0.5% 的薄膜相比均保持较低水平。精油的添加增强了复合膜的抑菌性与抗氧化活性,从而对禽畜肉制品在贮存过程中的微生物繁殖与脂肪氧化酸败现象有明显抑制作用,多项研究结果表明,将植物精油以一定比例与蛋白复合之后,所得复合膜可显著提高畜禽肉的货架期。

2.3 在水产品保鲜中的应用

水产品加工业的发展受到保鲜技术的制约,水产品腐败引起的食品安全问题较为严重。高水分、高蛋白的水产品易受微生物、内源酶及脂质氧化作用腐败变质^[72]。植物精油对水产品的保鲜效果主要体现在抑菌方面,同时也有一定的抗氧化、钝化酶活性的作用,将其与成膜材料结合构建复合膜应用于水产品保鲜,能使植物精油在与其接触的水产品表面不断释放,达到较为理想的保鲜效果^[73-74]。

Hu 等^[75]使用肉桂、丁香、牛至复合精油与胶原蛋白结合制备可食用复合膜,研究其对太平洋鲑鱼冷藏期间品质的影响。通过对微生物及理化性质的测定进行分析,结果表明,经涂膜处理的鲑鱼片微生物数量较少,总挥发性盐基氮值与硫代巴比妥酸含量更低,与对照组相比,货架期由 4 d 延长至 8 d。邵东旭等^[76]从鱼鳞中提取胶原蛋白,与马铃薯淀粉进行共混,并加入高良姜精油制备可食用复合膜,研究其对罗非鱼肉的保鲜效果,对 TVB-N 值进行测定发现对照组在第 6 d 已不可食用,复合膜包覆组第 8 d 仍保持可食用标准。郭小斑^[77]结合肉桂醛包合物、肉桂醛乳液与胶原蛋白制备复合膜,对草鱼进行贮藏实验,结果显示,涂膜处理能减缓鱼肉的质量损失和 pH 的升高,降低 TVB-N 值,延缓蛋白质的降解和脂质的氧化;肉桂醛含量越多,对菌落生长抑制效果越明显,并且经活性涂层处理的鱼肉样品的总菌落数在第 15 d 均未超过标准,表现出良好的微生物抑制作用,有效延长了鱼肉的货架期。Arfat 等^[78]研究添加罗勒叶精油的鱼分离蛋白/鱼皮明胶/ZnO 纳米复合膜对鲈鱼切片在 4 ℃ 环境冷藏 12 d 的品质变化,结果表明复合膜在贮藏期间的腐败微生物总数低于对照组,经复合膜包裹的样品保质期可达 12 d,对照组仅为 6 d。水产品作为高水分、高蛋白的食品在贮藏过程中受微生物影响较大,植物精油具备广谱的抑菌性,适用于水产品的保鲜,将其与蛋白质复合制备可食用膜,对水产品质量的保持有较好的效果。

2.4 在其他食品保鲜中的应用

除了在水果、肉及肉制品、水产品中的应用之外,研究人员也将蛋白/植物精油基复合膜应用于乳制品、蔬菜、菌类等食品上,同样表现出良好的保鲜效果。Seydim 等^[79]将乳清分离蛋白、牛至精油、大蒜精油、纳他霉素作为成膜材料,在接种了细菌的卡萨奶酪切片上,测定贮藏 15 d 内微生物失活情况,发现微生物数量显著降低。Lee 等^[80]从凤爪中提取蛋白制备可食用膜,确定增塑剂最佳配方为甘油:山梨醇为 3:2 后,为增强薄膜的抗菌及抗氧化作用,选用马郁兰精油、香菜精油和丁香花苞精油为添加剂,将复合膜涂抹至切达干酪切片上,经测定发现含丁香花苞精油的复合膜能有效抑制切达干酪切片中的微生物生长及脂质氧化,适用于食品包装。Ghoshal 等^[81]将罗望子淀粉与乳清蛋白浓缩物以一定比例复配制备了含百里香精油的纳米乳液复合膜,应用于番茄储藏上,结果表明,乳清蛋白浓缩物与百里香精油的添加可有效延长番茄保质期至 14 d。Wang 等^[82]将不同浓度的柠檬精油添加到壳聚糖/玉米醇溶蛋白复合膜中,评价其对香菇在 4 ℃ 下贮藏 12 d 品质的影响,发现复合膜在贮藏期间能有效抑制微生物生长,精油添加量为 6% 时香菇表现出最低的褐变指数和呼吸速率,经涂膜处理的香菇具有更好的抗氧化能力和质构特性。植物精油赋予蛋白基可食用膜更为广

泛的适用范围,不再受低延展性、高亲水性等性质的影响,在各类食品保鲜上均有良好的效果,基于这一改善方法,研究人员对贮藏对象有更宽泛的选择,也丰富了蛋白/植物精油基可食用膜的潜在市场。

3 结论

蛋白质具备良好的生物相容性,材料来源广、储量大,在可食用膜的开发上展现出巨大潜力,对于改善食品包装造成的环境污染问题有重要意义。与多糖、脂质相比,多样的氨基酸组成赋予蛋白膜较其他可食用膜更好的综合性能,与此同时,也存在阻湿性较低、力学性能不足等缺陷,蛋白膜制备过程中常辅以改性处理增强膜的机械性能与保鲜效果。

植物精油通过与蛋白质的共混,对蛋白质中的化学键进行展开重塑,改变了蛋白质原本的基团分布、空间结构,也可辅以其他成膜材料及均质方法,对单一成膜材料存在的力学性能、阻水性能较差等问题进行改善,并进一步提升了可食用膜的抑菌、抗氧化性能,精油多样的添加方式赋予复合膜更加全面、稳定的品质,蛋白质与植物精油的共混也有效掩盖了植物精油的特殊气味并控制其释放速度。蛋白/植物精油基复合膜具备良好的机械性能,优秀的抑菌、抗氧化能力,应用于各类食品的贮藏时均达到较为理想的效果,有效延长食品的货架期,适用范围较广,在食品包装上有较高的应用价值。

植物精油与蛋白质共混成膜的方式为蛋白基膜的改进提供了更丰富的思路,目前对于此类复合膜的开发日益成熟,未来的相关研究中可逐步丰富此类膜的种类,包括与 pickering 乳液体系、纳米体系相结合,也可对成膜工艺进行优化,通过高压、超声、3D 打印等方式进一步提高复合膜的性能,并在复合膜的食品保鲜适用范围上展开更多研究。此外,植物精油较高的生产成本与强烈的感官特性仍是需要攻克的难点。本文综述了蛋白/植物精油基复合膜的形成与应用,可为日后蛋白基膜的改善与实际应用提供一定参考。

参考文献

- [1] AMIN U, KHAN M U, MAJEED Y, et al. Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 2184–2198.
- [2] KUMAR A, HASAN M, MANGARAJ S, et al. Trends in edible packaging films and its prospective future in food: A review[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(1): 100118.
- [3] WIHODO M, MORARU C I. Physical and chemical methods used to enhance the structure and mechanical properties of protein films: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(3): 292–302.
- [4] FLORENTINO G I B, LIMA D A S, SANTOS M M F, et al. Characterization of a new food packaging material based on fish by-product proteins and passion fruit pectin[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100920.
- [5] GOPALAKRISHNAN S, XU J, ZHONG F, et al. Strategies

for fabricating protein films for biomaterial applications[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(1): 2000167.

- [6] GHAFFARI T, KAFIL H S, ASNAASHARI S, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils from the aerial parts of *Pinus eldarica* grown in Northwestern Iran[J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3203.
- [7] 欧凯玉, 逢建龙, 张一敏, 等. 天然酚类化合物的抑菌作用及在肉与肉制品中应用研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(9): 358–366. [OU K Y, JIANG J L, ZHANG Y M, et al. Research progress on the antibacterial effect of natural phenolic compounds and their application in meat and meat products[J]. *Food Science*, 2023, 44(9): 358–366.]
- [8] CALVA-ESTRADA S J, JIMÉNEZ-FERNÁNDEZ M, LU-GO-CERVANTES E. Protein-based films: Advances in the development of biomaterials applicable to food packaging[J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 11(2): 78–92.
- [9] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(1): 66–105.
- [10] ABDELHEDI O, SALEM A, NASRI R, et al. Food applications of bioactive marine gelatin films[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 43: 206–215.
- [11] RANI S, KUMAR R. A review on material and antimicrobial properties of soy protein isolate film[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, 27(8): 1613–1628.
- [12] 樊世芳. 罗非鱼鱼鳞胶原蛋白的提取及其包装应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [FAN S F. Study on extraction and packaging application of collagen from *Tilapia* fish scales[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
- [13] FU M, CAO M, DUAN J, et al. Research on the properties of zein, soy protein isolate, and wheat gluten protein-based films containing cellulose nanocrystals[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3010.
- [14] KARAMI P, ZANDI M, GANJLOO A. Evaluation of physicochemical, mechanical, and antimicrobial properties of gelatin-sodium alginate-yarrow (*Achillea millefolium* L.) essential oil film[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(7): e16632.
- [15] 郭娟, 张进, 王佳敏, 等. 天然抗菌剂在食品包装中的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 336–346. [GUO J, ZHANG J, WANG J M, et al. Research progress of natural antibacterial agents in food packaging[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 336–346.]
- [16] 周华丽. 几种精油小分子与牛血清白蛋白相互作用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015. [ZHOU H L. Several small molecules of essential oils interact with bovine serum albumin[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.]
- [17] RASOOL N, SAEED Z, PERVAIZ M, et al. Evaluation of essential oil extracted from ginger, cinnamon and lemon for therapeutic and biological activities[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022, 44: 102470.
- [18] TESHALE F, NARENDIRAN K, BEYAN S M, et al. Extraction of essential oil from rosemary leaves: Optimization by response surface methodology and mathematical modeling[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(2): 100133.
- [19] BAKAR I N A, IBRAHIM M F, HAKIMAN M, et al. Characterization of asiaticoside concentration, total phenolic compounds, and antioxidant activity of different varieties of *Centella asiatica* (L.) and essential oil extraction using hydro-distillation with enzyme assisted[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022, 44: 102474.

- [20] FAN Y, LI Q. An efficient extraction method for essential oil from angelica sinensis radix by natural deep eutectic solvents-assisted microwave hydrodistillation[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 29: 100792.
- [21] YANG X, LIU T, WEI M, et al. A modified microwave hydrodistillation and simultaneous extraction in a rotating state to obtain essential oil, rosmarinic acid, and polysaccharides with sucrose stearate as an additive from *Perilla frutescens*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 181: 114807.
- [22] 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 M R, QIAO H Y, KE M Y, et al. Antibacterial mechanism of plant-derived essential oils and their application progress in food preservation packaging[J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(7): 439-444.]
- [23] 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. [SAREN G W, HU W Z, FENG K, et al. Research progress on the antibacterial mechanism of plant essential oils and their components on pathogenic microorganisms[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 285-294.]
- [24] BANDAY J A, YATOO G N, HAJAM M A, et al. Gas chromatographic-mass spectrometric analysis, antioxidant, antiproliferative and antibacterial activities of the essential oil of *Prangos pabularia*[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2022, 166: 105540.
- [25] 代安娜, 张丽媛, 钱丽丽. 6 种植物精油对玉米中霉菌的抑菌作用[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(1): 135-141. [DAI A N, ZHANG L Y, QIAN L L. Antibacterial effect of 6 plant essential oils on mold in corn[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(1): 135-141.]
- [26] WANG H, DING F, MA L, et al. Edible films from chitosan-gelatin: Physical properties and food packaging application[J]. *Food Bioscience*, 2021, 40: 100871.
- [27] 郑彦钊, 陈复生. 大豆分离蛋白基可降解膜的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(9): 198-204. [ZHENG Y Z, CHEN F S. Research progress of biodegradable membranes based on soybean protein isolate[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(9): 198-204.]
- [28] 刘妍靖, 李西月, 刘跃洲, 等. 可食用抗菌膜在食品包装领域的应用及研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(9): 331-339. [LIU Y J, LI X Y, LIU Y Z, et al. Application and research progress of edible antibacterial film in the field of food packaging[J]. *Food Science*, 2023, 44(9): 331-339.]
- [29] AVILA-SOSA R, PALOU E, LÓPEZ-MALO A. Essential oils added to edible films[M]. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*. Academic Press, 2016: 149-154.
- [30] PAPADAKI A, KACHRIMANIDOU V, LAPPA I K, et al. Tuning the physical and functional properties of whey protein edible films: Effect of pH and inclusion of antioxidants from spent coffee grounds[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 27: 100700.
- [31] MURRIETA-MARTÍNEZ C L, SOTO-VALDEZ H, PACHECO-AGUILAR R, et al. Edible protein films: Sources and behavior[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(3): 113-122.
- [32] 王莹, 刘晶晶, 张飞飞, 等. 乳清蛋白成膜条件及其应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 172-179. [WANG Y, LIU J J, ZHANG F F, et al. Whey protein film-forming conditions and their applications[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(1): 172-179.]
- [33] HADIDI M, JAFARZADEH S, FOROUGH M, et al. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 120: 154-173.
- [34] MONDAL K, BHATTACHARJEE S K, MUDENUR C, et al. Development of antioxidant-rich edible active films and coatings incorporated with de-oiled ethanolic green algae extract: A candidate for prolonging the shelf life of fresh produce[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(21): 13295-13313.
- [35] SHLUSH E, DAVIDOVICH-PINHAS M. Bioplastics for food packaging[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 125: 66-80.
- [36] GUL O, SARICA O G U, BESIR A, et al. Effect of ultrasound treatment on the properties of nano-emulsion films obtained from hazelnut meal protein and clove essential oil[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 41: 466-474.
- [37] CHENG J, LI Z, WANG J, et al. Structural characteristics of pea protein isolate (PPI) modified by high-pressure homogenization and its relation to the packaging properties of PPI edible film[J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 132974.
- [38] ERDEM B G, KAYA S. Edible film fabrication modified by freeze drying from whey protein isolate and sunflower oil: Functional property evaluation[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100887.
- [39] GALUS S, KADZIŃSKA J. Whey protein edible films modified with almond and walnut oils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 78-86.
- [40] GALUS S, KADZIŃSKA J. Moisture sensitivity, optical, mechanical and structural properties of whey protein-based edible films incorporated with rapeseed oil[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2016, 54(1): 78-89.
- [41] LIU Z, LIN D, SHEN R, et al. Konjac glucomannan-based edible films loaded with thyme essential oil: Physical properties and antioxidant-antibacterial activities[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100700.
- [42] 汤友军, 鲁晓翔. 植物精油稳定性的改善及其在食品中应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 353-357. [TANG Y J, LU X X. Research progress on the improvement of the stability of plant essential oils and their application in food[J]. *Food Industry Technology*, 2020, 41(7): 353-357.]
- [43] 石泽栋, 蒋雅萍, 孙英杰. 牛至精油微胶囊的制备、表征及在杏贮藏期的抑菌效果[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 186-194. [SHI Z D, JIANG Y P, SUN Y J. Preparation, characterization and bacteriostatic effect of oregano essential oil microcapsules during apricot storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(11): 186-194.]
- [44] LOCALI-PEREIRA A R, GUAZI J S, CONTI-SILVA A C, et al. Active packaging for postharvest storage of cherry tomatoes: Different strategies for application of microencapsulated essential oil[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100723.
- [45] SOCACIU M I, FOGARASI M, SEMENIUC C A, et al. Formulation and characterization of antimicrobial edible films based on whey protein isolate and tarragon essential oil[J]. *Polymers*, 2020, 12(8): 1748.
- [46] ROY S, RHIM J W. Fabrication of bioactive binary composite film based on gelatin/chitosan incorporated with cinnamon essential oil and rutin[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 204: 111830.
- [47] ABBASI H, FAHIM H, MAHBOUBI M. Fabrication and characterization of composite film based on gelatin and electrospun

- cellulose acetate fibers incorporating essential oil[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(2): 2108–2118.
- [48] SHEN Y, NI Z J, THAKUR K, et al. Preparation and characterization of clove essential oil loaded nanoemulsion and Pickering emulsion activated pullulan-gelatin based edible film[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181: 528–539.
- [49] 张慧芸, 郭新宇, 吴静娟. 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜性能及结构的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 7–12. [ZHANG H Y, GUO X Y, WU J J. Effects of clove essential oil on the properties and structure of corn gliadin membranes[J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 7–12.]
- [50] OYOM W, XU H, LIU Z, et al. Effects of modified sweet potato starch edible coating incorporated with cumin essential oil on storage quality of ‘early crisp’[J]. *LWT*, 2022, 153: 112475.
- [51] MAHJOORIAN A, JAFARIAN S, FAZELI F. Nettle (*Urtica dioica*) essential oil incorporation in edible film from caspian whitefish (*Rutilus frisii kutum*) scale: Physical, antimicrobial, and morphological characterization[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2021, 30(2): 151–161.
- [52] KIM H, BEAK S E, SONG K B. Development of a hagfish skin gelatin film containing cinnamon bark essential oil[J]. *LWT*, 2018, 96: 583–588.
- [53] MOHAMMADI M, AZIZI M H, ZOGHI A. Antimicrobial activity of carboxymethyl cellulose-gelatin film containing *Dianthus barbatus* essential oil against aflatoxin-producing molds[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2): 1244–1253.
- [54] 张群利, 罗灏, 崔琳琳, 等. 鱼鳞明胶/壳聚糖/薰衣草精油抗菌复合膜的制备及性能[J]. *精细化工*, 2022, 39(11): 2259–2267. [ZHANG L Q, LUO H, CUI L L, et al. Preparation and properties of fish scale gelatin/chitosan/lavender essential oil antibacterial composite film[J]. *Fine Chemicals*, 2022, 39(11): 2259–2267.]
- [55] ESCAMILLA-GARCÍA M, CALDERÓN-DOMÍNGUEZ G, CHANONA-PÉREZ J J, et al. Physical, structural, barrier, and antifungal characterization of chitosan-zein edible films with added essential oils[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(11): 2370.
- [56] DHUMAL C V, PAL K, SARKAR P. Characterization of tri-phasic edible films from chitosan, guar gum, and whey protein isolate loaded with plant-based antimicrobial compounds[J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2019, 58(3): 255–269.
- [57] PIRES C, RAMOS C, TEIXEIRA B, et al. Hake proteins edible films incorporated with essential oils: Physical, mechanical, antioxidant and antibacterial properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 224–231.
- [58] QIAN J, ZHAO Y, YAN L, et al. Improving the lipid oxidation of beef patties by plasma-modified essential oil/protein edible composite films[J]. *LWT*, 2022, 154: 112662.
- [59] TORRES NETO L, MONTEIRO M L G, MACHADO M A M, et al. An optimization of oregano, thyme, and lemongrass essential oil blend to simultaneous inactivation of relevant foodborne pathogens by simplex-centroid mixture design[J]. *Antibiotics*, 2022, 11(11): 1572.
- [60] KOSTIUK V A, KOLODYAZNAYA V S, RUMIANTCEVA O N, et al. Biological method based on track membranes to form controlled gaseous media for fruit cold storage[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 866(1): 012013.
- [61] JIANG Y C, LUO M F, NIU Z N, et al. In-situ growth of bimetallic FeCo-MOF on magnetic biochar for enhanced clearance of tetracycline and fruit preservation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138804.
- [62] 李亚茹, 周林燕, 李淑荣, 等. 植物精油对果蔬中微生物的抑菌效果及作用机理研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 325–329. [LI Y R, ZHOU Y L, LI S R, et al. Research progress on the antibacterial effect and mechanism of plant essential oil on microorganisms in fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2014, 35(11): 325–329.]
- [63] LU J, LI T, MA L, et al. Optimization of heat-sealing properties for antimicrobial soybean protein isolate film incorporating diatomite/thymol complex and its application on blueberry packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100690.
- [64] ROSHANDEL-HESARI N, MOKABER-ESFAHANI M, TALEGHANI A, et al. Investigation of physicochemical properties, antimicrobial and antioxidant activity of edible films based on chitosan/casein containing *Origanum vulgare* L. essential oil and its effect on quality maintenance of cherry tomato[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133650.
- [65] TÜGEN A, OCAK B, ÖZDESTAN-OCAK Ö. Development of gelatin/chitosan film incorporated with lemon essential oil with antioxidant properties[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(6): 3010–3019.
- [66] 孟金明, 樊爱萍, 吴依婕, 等. 木姜子精油/壳聚糖/乳清蛋白复合膜对枇杷品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(15): 19–24. [MENG J M, FAN A P, WU Y J, et al. Effect of ginger seed essential oil/chitosan/whey protein composite membrane on loquat quality[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(15): 19–24.]
- [67] REN B, WU W, SOLADOYE O P, et al. Application of biopreservatives in meat preservation: A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(12): 6124–6141.
- [68] NASERI H R, BEIGMOHAMMADI F, MOHAMMADI R, et al. Production and characterization of edible film based on gelatin-chitosan containing *Ferulago angulata* essential oil and its application in the prolongation of the shelf life of turkey meat[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(8): e14558.
- [69] FERNÁNDEZ-PAN I, MENDOZA M, MATÉ J I. Whey protein isolate edible films with essential oils incorporated to improve the microbial quality of poultry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(12): 2986–2994.
- [70] 张贇彬, 王景文, 彭军. 不同精油单体的大豆分离蛋白可食膜对冷鲜猪肉的保鲜效果研究[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(12): 72–77. [ZHANG Y B, WANG J W, PENG J. Study on the preservation effect of soybean protein isolate edible film with different essential oil monomers on the freshness of cold fresh pork[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2012, 12(12): 72–77.]
- [71] TSIRONI M, KOSMA I S, BADEKA A V. The effect of whey protein films with ginger and rosemary essential oils on microbiological quality and physicochemical properties of minced lamb meat[J]. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3434.
- [72] 尹一鸣, 徐永霞, 张朝敏, 等. 水产品贮藏期间风味劣变机理的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 269–274. [YIN Y M, XU Y X, ZHANG C M, et al. Research progress on the mechanism of flavor deterioration during storage of aquatic products[J]. *Food And Fermentation Industry*, 2020, 46(14): 269–274.]
- [73] 孟玉霞, 崔惠敬, 赵前程, 等. 植物精油在水产品保鲜中的研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 288–293. [MENG Y X, CUI H J, ZHAO Q C, et al. Research progress of plant essential oils in aquatic product preservation[J]. *Food Science*, 2017, 38(15): 288–293.]

- [74] ZHANG L, ZHANG M, JU R, et al. Antibacterial mechanisms of star anise essential oil microcapsules encapsulated by rice protein-depolymerized pectin electrostatic complexation and its application in crab meatballs[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2023, 384: 109963.
- [75] HU J, XU Y, MAJURA J J, et al. Combined effect of the essential oil and collagen film on the quality of pacific mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) fillet during cold storage[J]. *Foodborne Pathogens and Disease*, 2021, 18(7): 455–461.
- [76] 邵东旭, 王卉, 裴志胜, 等. 鱼鳞胶原蛋白复合抗菌膜对罗非鱼肉的保鲜效果[J]. *包装工程*, 2016, 37(23): 73–77. [SHAO D X, WANG H, PEI Z S, et al. Preservation effect of fish scale collagen complex antibacterial film on tilapia meat[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(23): 73–77.]
- [77] 郭小斑. 肉桂醛/鱼皮胶原蛋白抗菌膜的制备、性质分析及对草鱼保鲜机理的研究[D]. 福州: 福州大学, 2019. [GUO X B. Preparation and property analysis of cinnamaldehyde/fish skin collagen antibacterial film and study on the preservation mechanism of grass carp[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019.]
- [78] ARFAT Y A, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K, et al. Shelf-life extension of refrigerated sea bass slices wrapped with fish protein isolate/fish skin gelatin-ZnO nanocomposite film incorporated with basil leaf essential oil[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(10): 6182–6193.
- [79] SEYDIM A C, SARIKUS-TUTAL G, SOGUT E. Effect of whey protein edible films containing plant essential oils on microbial inactivation of sliced Kasar cheese[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 26: 100567.
- [80] LEE J H, LEE J, SONG K B. Development of a chicken feet protein film containing essential oils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 46: 208–215.
- [81] GHOSHAL G. Thyme essential oil nano-emulsion/tamarind starch/whey protein concentrate novel edible films for tomato packaging[J]. *Food Control*, 2022, 138: 108990.
- [82] WANG X, SUN Y, LIU Z, et al. Preparation and characterization of chitosan/zein film loaded with lemon essential oil: Effects on postharvest quality of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 192: 635–643.