

综述

蛋白质复合抗菌膜的研究进展

梁梦茜, 张群利*

(东北林业大学 家居与艺术设计学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 生物基包装材料凭借其绿色环保、成本低廉及易于降解的显著优势, 日益成为研究与实践的焦点。其中, 蛋白质薄膜具有卓越的成膜性能及复杂的形成机制, 始终是材料科学领域的研究热点。自然界中, 植物源抗菌成分丰富多样, 兼具天然与安全特性, 这为植物活性成分与蛋白质基质结合, 开发出具有抗菌功能的复合薄膜提供了可能。此类复合薄膜在食品包装中的应用能有效维持食品的感官品质并延长其保质期。该文介绍了国内外关于蛋白质抗菌薄膜(简称蛋白膜)的最新进展, 深入探讨了各类蛋白膜的成膜机理及其改性技术, 详细分析了植物源抗菌成分的种类、特性及抗菌作用机制, 同时综述了蛋白质活性包装在果蔬、肉类及水产品等食品类别中的实际应用案例, 并对其在食品包装领域的未来应用进行了总结与展望, 旨在为蛋白质活性包装膜的研发与应用提供坚实的理论基础与明确的研究方向, 以期推动其在未来食品包装领域的持续发展。

关键词: 蛋白膜; 植物源活性物质; 抗菌性能; 保鲜; 改性

中图分类号: TS206.4; TB383.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 10-2089-09

Research progress on protein composite antibacterial membranes

LIANG Mengxi, ZHANG Qunli*

(College of Home and Art Design, Northeast Forestry University, Harbin 150000, Heilongjiang, China)

Abstract: Bio-based packaging materials, with their obvious advantages of green environmental protection, low cost and easy degradation, have become the focus of research and practice. Among them, protein membranes have always been a research hotspot in the field of materials science due to their excellent film-forming properties and complex formation mechanism. Plant-derived antibacterial ingredients with both natural and safe characteristics are abundant and diverse in nature, thus providing the possibility for development of antibacterial composite membranes by combining plant active ingredients with protein matrix. The application of such composite membranes in food packaging can effectively maintain the sensory quality of food and extend its shelf life. Herein, the latest research progress in protein antibacterial membranes (protein membranes) at home and abroad was introduced. The film-forming mechanism and modification technology on various protein membranes were then discussed, with the type, characteristics and antibacterial action mechanism of plant-derived antibacterial components analyzed in detail. Moreover, the practical application cases of protein active packaging in food categories such as fruits, vegetables, meat, and aquatic products were reviewed, followed by summarization on its future application in the field of food packaging. It aims to provide a solid theoretical foundation and clear research direction for the research and development and application of protein active packaging membrane, thus promoting its sustainable development in the field of food packaging in the future.

Key words: protein membranes; plant-derived active substances; antibacterial properties; retain freshness; modification

鉴于以石油为基础的传统保鲜膜给环境带来了沉重的污染负担, 探索环境友好型替代品已成为亟

待解决的关键问题。在此背景下, 生物基材料, 特别是以蛋白质为代表的天然高分子可降解材料, 因

收稿日期: 2024-10-08; 定用日期: 2024-11-08; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240760

作者简介: 梁梦茜(2000—), 女, 硕士生, E-mail: 1280495538@qq.com。联系人: 张群利(1978—), 男, 副教授, E-mail: zhangqunli@nefu.edu.cn。

其独特的分子结构、复杂的成膜机理以及成膜后展现出卓越的力学性能和阻隔性能，迅速崛起为食品包装领域的研究前沿^[1]。

蛋白质中的玉米醇溶蛋白、明胶及酪蛋白因其广泛的应用潜力而备受瞩目，且通过与其他材料复合，并借助物理、化学及酶法改性技术，可有效提升蛋白质薄膜的各项性能指标。近年来，植物提取物因来源天然、安全性高及副作用小的特点，在食品、制药及化工等多个领域得到了广泛应用。植物中的抗菌活性成分，涵盖植物精油与植物提取物两大类，其抗菌机制复杂多变，展现出广谱的抑菌效果^[2]。将这些活性成分通过先进的加工技术融入蛋白质薄膜中，可开发出具有抗菌功能的薄膜材料，为食品包装领域带来革新。

本文聚焦于蛋白质抗菌薄膜（简称蛋白膜）的保鲜功能，深入探讨其与不同材料复合后性能的优化、保鲜效果的提升及其影响机制。综述近年来含有不同活性的蛋白膜在食品保鲜应用中的研究进展，如图 1 所示，旨在为蛋白质活性包装膜的进一步发展提供理论依据与实践指导，以期推动该领域向更高效、环保及可持续发展的方向发展。

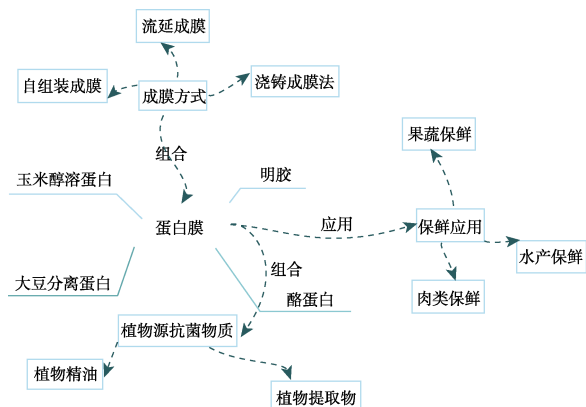


图 1 蛋白膜的成膜方式、抗菌成分种类及应用

Fig. 1 Film-forming methods, antibacterial components types and applications of protein membranes

1 蛋白膜

蛋白膜通常是由蛋白质、多糖、脂质或特定比例的增塑剂复合而成。相较于其他类型的膜材料，蛋白膜展现出更为卓越的 O_2 和 CO_2 渗透率调控能力，同时机械性能也更为突出^[3]。蛋白质的高级结构，包括二级、三级乃至四级结构，促进了不同位置、类型及能量状态下的相互作用与结合，这些相互作用主要为共价键与非共价键之间的复杂网络^[4]。鉴于蛋白质成膜机制的复杂性及其氨基酸组成的多样性，制得的蛋白膜展现出多样化的功能特性，从而在多方面表现出优异的性能^[5]。

值得注意的是，以不同蛋白质为基础材料所制备的薄膜，其物理、化学性质及功能特性均有所差异，且各类蛋白质均有良好的成膜性，其制膜方法主要分为溶液浇铸成膜法、挤出成型法、静电纺丝法和静电喷雾法等。

溶液浇铸成膜法：将蛋白通过各种方式制成膜溶液，然后将成膜液倒入适当的容器中，阴干后可将蛋白膜揭下来。浇铸成膜法操作简单、对设备要求低，但该法形成的薄膜厚度不均匀，进而影响各方面性能的测定。

静电喷雾法：通过高压静电发生装置使得喷出的雾滴带电，液滴在静电作用下沉积在物体表面形成薄膜。该法需要的工艺设备简单，能够大面积沉积制备薄膜。其他成膜方式及其优缺点见表 1。

1.1 玉米醇溶蛋白

玉米醇溶蛋白分子中有含硫氨基酸，通过形成较强的二硫键和疏水键，使得蛋白质分子间能够紧密连接，赋予玉米醇溶蛋白膜良好的机械及阻隔性能。但其缺乏能带电的酸性、碱性和极性基团的氨基酸，导致在某些溶剂中的溶解性受到限制，其分子式如图 2a 所示。此外，玉米醇溶蛋白常与其他材料复合以提升性能。

表 1 蛋白膜不同成膜方式比较

Table 1 Comparison of film-forming methods of protein membranes

成膜方式	成膜原理	性能	参考文献
自组装成膜	利用分子中疏水性氨基酸的疏水性，在溶剂中自组装形成微球、颗粒或膜	膜脆硬、载药量低、控缓释及稳定性差	[6]
挤压成膜	通过加热熔融或直接混合，倒入挤压机中挤压成膜	成膜结构不均匀	[7]
静电纺丝成膜	利用高分子流体静电雾化将蛋白质溶液制备成纤维丝，形成纤维膜	操作简单、成膜性能好、孔隙率高、用途广	[8]
浸出成膜	将蛋白质和亲水性的固体物质混合均匀，在模具中压实，用水将亲水物质溶解，然后冷冻干燥成膜	膜内部孔结构不规整	[9]
流延成膜	将蛋白质溶解于溶剂，倒入模具中，将溶剂蒸发后成膜	最常用、最简单的制膜方式，对蛋白膜的性能和要求较低	[10]

AVILA 等^[11]对比了纯玉米醇溶蛋白膜与玉米

醇溶蛋白/壳聚糖双层膜的阻隔性能，发现双层膜阻

隔性能更优。SONG 等^[12]则利用玉米醇溶蛋白合成包覆金纳米粒子的复合材料, 发现金纳米粒子的引入有效防止了薄膜屈曲, 提高了强度和柔韧性。这些研究不仅为玉米醇溶蛋白的功能化提供了新途径, 也为开发高性能薄膜材料提供了新思路, 为其在食品包装等领域的广泛应用奠定了坚实基础。合适的改性方法和复合材料是提升薄膜性能的关键。

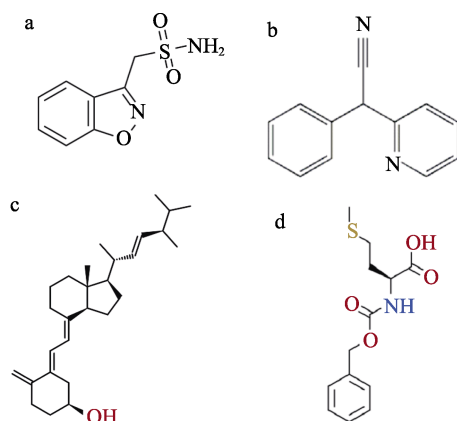


图 2 玉米醇溶蛋白 (a)、大豆分离蛋白 (b)、明胶 (c) 及酪蛋白 (d) 分子式

Fig. 2 Molecular formula of zein (a), soy protein isolate (b), gelatin (c) and casein (d)

1.2 大豆分离蛋白

大豆分离蛋白因分子结构中同时富含酸性和碱性氨基酸残基而展现出随 pH 变化的电荷调节特性以及优异的成膜性能。但其氨基酸中有 58% 为极性氨基酸, 导致大豆分离蛋白膜具有较强的亲水性^[13], 其分子式如图 2b 所示, 可尝试多种改性方法来改善这一状况。如高洁等^[14]混入不同的材料与大豆分离蛋白 (SPI) 和黄原胶共成膜, 其机械强度、透光度及微观结构均优于其他复合膜, 且透氧性显著降低; 侯玉萍^[15]则将花椒枝条纳米纤维素引入到 SPI 膜中, 显著提升了膜的机械性能和疏水性能。当纳米纤维素添加量为 4% (以 SPI 的质量计) 时, SPI 抗氧化膜的抗拉强度增至原来的 2.32 倍, 接触角增大 20.70%, 而水蒸气透过率降低了 79%。综上所述, 混入不同的材料可有效提升 SPI 膜的力学性能和阻

隔性能, 未来可进一步探索不同添加剂对 SPI 膜性能的影响, 以及如何通过优化配方和工艺条件来制备高性能的 SPI 基复合膜。

1.3 明胶

明胶富含肽键、酪氨酸和苯丙氨酸, 能够吸收紫外线并具备紧密的三螺旋结构, 从而赋予明胶膜优异的紫外线阻隔性能和良好的气体阻隔性能; 但由于明胶分子间存在较强的作用力, 使得明胶膜具有很大的脆性, 限制了其广泛应用^[16], 其分子式如图 2c 所示。为克服这一局限, JIN 等^[17]将植酸与明胶溶液混合成膜, 发现植酸与明胶间发生了强烈的交联反应, 使得复合膜内部结构紧密, 不仅显著增强了阻水性, 还提升了各项力学性能。YANG 等^[18]采用流延法制备了纳米纤维素/明胶复合膜, 并辅以质量分数 0.4% 的甘油作为增塑剂, 结果表明, 复合膜的力学性能、热稳定性和吸水性能均显著改善。

综上所述, 通过添加改性剂等, 明胶膜的性能显著提升。未来, 随着更多新型改性剂的发现和应用, 明胶膜的性能将进一步优化, 为其在更广泛领域的应用提供可能。

1.4 酪蛋白

酪蛋白作为营养丰富的动物蛋白, 其大量无规则卷曲结构为形成三维网络结构提供了巨大的潜力。然而, 酪蛋白的高水分敏感性限制了其在食品包装领域的应用, 分子式如图 2d 所示。DENG 等^[19]发现, 将酪蛋白基膜与微晶纤维素结合, 可以赋予膜优异的性能, 特别适用于光敏食品的包装。邓霜琪等^[20]采用溶液浇铸法制备了杨梅单宁-酪蛋白复合膜, 调整杨梅单宁的比例可有效改善复合膜的水溶性、拉伸性能、水蒸气透过率、热稳定性和抗氧化性。安楠^[21]利用结构共架技术开发了酪蛋白-虫胶复合保鲜薄膜 (CSFs), 并添加了甘油作为增塑剂, 显著提高了薄膜的持水性和机械性能。随着新型改性剂与技术的不断涌现, 酪蛋白膜的性能存在着提升的潜力, 可为食品包装行业注入更多的创新活力。表 2 为蛋白膜的阻隔性能与力学性能。

表 2 蛋白膜的阻隔及力学性能
Table 2 Barrier and mechanical properties of protein membranes

蛋白膜	阻隔性能		力学性能		参考文献
	水蒸气透过率/[g/(m ² ·24 h)]	吸水率/%	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	
玉米醇溶蛋白	7.58±0.78	1.81±0.19	9.99	19.33	[22-23]
花生分离蛋白	9.06±0.54	5.40±1.60	8.24	98.45	[24]
大豆分离蛋白	9.30±0.29	6.30±0.34	8.33	109.56	[15]
乳清蛋白	8.42±1.33		11.66±0.95	14.71±0.33	[25]
明胶	7.41±0.14		11.40±0.47	63.36±3.18	[26]
酪蛋白	3.89±0.54		6.63	140.40	[20]

2 植物源抗菌成分种类

抗菌剂通常被划分为有机、无机以及天然等抗菌剂。其中,天然抗菌剂特指从动植物体中提取得到的各类化合物。相较于动物源抗菌物质,植物源抗菌物质因具备完善的提取体系、价格低廉以及来源广泛等优势,在市场上更受欢迎。这些植物来源的抗菌化合物主要包括精油及其他植物提取物,它们能够产生抑制微生物生长的次级代谢物^[27]。

2.1 植物精油

目前,广泛应用的植物精油展现出广谱的抑菌特性,同时毒性较低、易于降解,对环境和动物均表现出相对的安全性。

关于植物精油的抗菌机理,已有诸多研究成果。这些机理主要包括:破坏微生物的细胞壁和细胞膜结构,干扰其能量代谢系统,影响全细胞蛋白质、

DNA 以及代谢组的正常功能,改变细胞形态,阻碍细胞分裂过程,削弱微生物的运动性,抑制生物膜的形成,影响群体感应(QS)活性,导致细胞质凝固,干扰信号转导系统,以及影响微生物的毒力等。这些作用机理如图 3 所示^[28]。由于不同的植物精油组分各异,它们的作用靶点、作用效果以及作用的微生物种类也各不相同。

在实际应用中,已开发且广泛使用的植物精油包括牛至、橘子、薰衣草、肉桂和丁香等精油。FRATINI 等^[29]研究表明,牛至精油对 14 种金黄色葡萄球菌野生菌株具有显著的抗菌活性,最小抑菌浓度(MIC)证实了其在抗金黄色葡萄球菌方面的潜力。随着对植物精油抗菌机理的深入研究和新型复配技术的不断发展,植物精油在食品保鲜、医疗卫生、农业植保等领域的应用前景将会更加广阔。

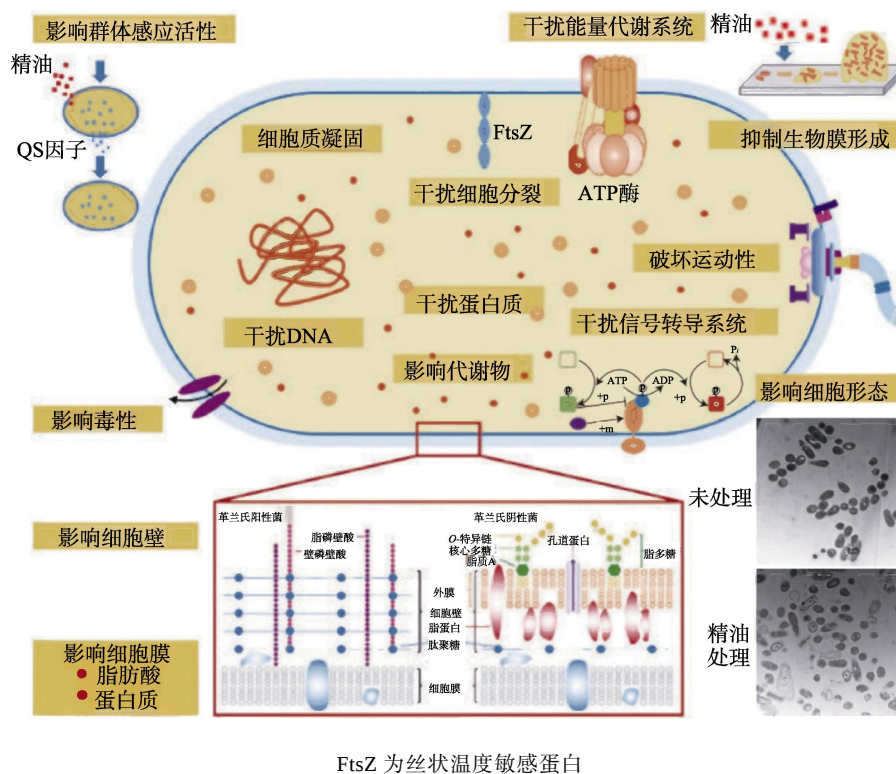


图 3 精油及其成分对病原微生物的抗菌机理^[28]

Fig. 3 Antibacterial mechanism of essential oils and their components against pathogenic microorganisms^[28]

2.2 植物提取物

目前,植物提取物的抗菌机理与效果已经过反复验证,展现出广谱抗菌特性,且不会导致靶标微生物产生耐药性。这些抗菌活性成分多为次生代谢产物,种类丰富、化学结构多样,主要包括多糖、酚类、生物碱和萜类等,其通过多种途径发挥抗菌作用,主要机理涉及破坏细胞结构、调控基因表达、抑制细菌代谢活动以及改变细胞膜电位等^[2],具体如表 3 和图 4 所示。

植物多酚由于来源广泛、种类多样而应用广泛。多酚单体根据碳骨架特征可分为酚酸类、黄酮类以及少量的 1,2-二苯乙烯和木酚素,代表性成分包括绿原酸、咖啡酸、异黄酮、黄酮和花青素等。而聚合多酚则是多酚单体的低聚或多聚物,统称为单宁类物质,包括水解型和缩合型多酚,如没食子酸和原花青素等^[36]。SUN 等^[34]深入研究了绿原酸对冷鲜鸡肉中食源性致病菌肠炎沙门氏菌的作用机理,发现绿原酸能够抑制三羧酸循环中的关键酶——苹果酸

脱氢酶和琥珀酸脱氢酶的活性, 从而影响细菌的能量代谢。随着对植物提取物抗菌机理的深入研究, 以及新型提取和纯化技术的不断发展, 植物提取物应用前景将更加广阔。同时, 也需要关注其在实际应用中的稳定性、安全性及环境影响等问题, 以确保其可持续性和可靠性。

表 3 植物源抗菌物质的主要靶点及作用机理^[2]
Table 3 Main targets and mechanisms of action of plant derived antibacterial substances^[2]

植物源抗菌物质种类	主要靶点	主要作用机理	参考文献
多糖	细胞壁、细胞膜	改变细胞膜的通透性和极性, 抑制物质进出细胞使细菌缺营养而死亡	[30]
多酚化合物	细胞壁、细胞膜、能量代谢途径、遗传物质合成途径	抑制 DNA 合成、转录及调控基因表达, 抑制细胞壁合成、导致细菌代谢紊乱、抑制群体感应系统等	[31-32]
生物碱	各种细胞器、能量代谢途径、遗传物质合成途径	插入或与核酸碱基堆积形成氢键导致 DNA 无法正常表达、氮正离子攻击导致各种细胞器损伤、细菌代谢紊乱等。	[33]
萜类	细胞壁、细胞膜、能量代谢途径	疏水作用使细胞膜破裂、细菌代谢紊乱等	[34-35]

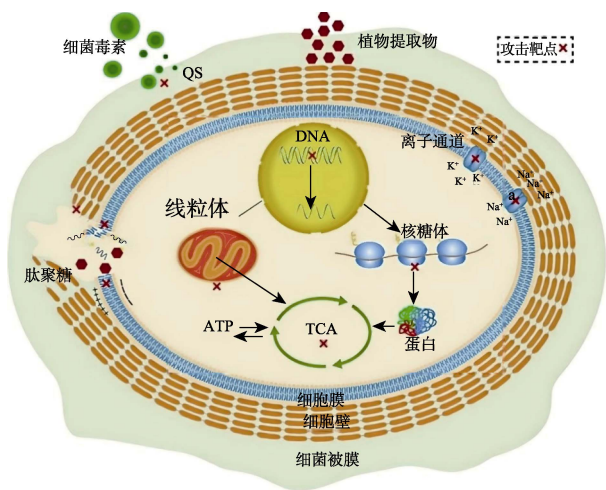


图 4 植物提取物的抗菌机理示意图^[2]

Fig. 4 Schematic diagram of antibacterial mechanism diagram of plant extracts^[2]

3 蛋白膜的应用

3.1 包装热封

在蛋白膜的热封过程中, 外部施加的热量和压力使处于熔融状态的热封界面之间的大分子互相渗透、扩散并纠缠在一起, 从而实现两个表面的紧密结合。蛋白膜热封性能的好坏直接影响到包装效果和产品的保质期。

玉米醇溶蛋白、酪蛋白以及乳清蛋白膜的热封温度为 140~150 ℃。在这个温度范围内, 蛋白膜能迅速软化并熔融, 从而实现良好的热封效果。对于大豆分离蛋白, 当热封温度由低温逐渐升高时, 热封强度不断增大。然而, 当温度>100 ℃时, 热封强度开始逐渐下降并趋于稳定。具体的热封温度可能会因蛋白膜的配方、制备工艺以及热封设备的不同而有所差异。可通过以下几种方法达到热封性能的优化。

优化配方: 通过调整酪蛋白膜的配方, 如添加适量的增塑剂、交联剂等, 可改善其热封性能。这些添加剂可以降低膜的熔点, 使其在较低的温度下就能实现良好的热封效果。

改进制备工艺: 通过优化制备工艺, 如提高斩拌的均匀性、优化成型与干燥条件等, 可进一步改善酪蛋白膜的热封性能。

综上所述, 蛋白膜的热封性能是其包装应用中重要的考量因素, 其优良的热封性能成为替代传统塑料包装材料的有力候选者。在实际应用中, 还需根据具体的包装需求和产品特性, 对蛋白膜的制备工艺和性能进一步优化和调整。各蛋白膜外观如图 5a~d 所示。

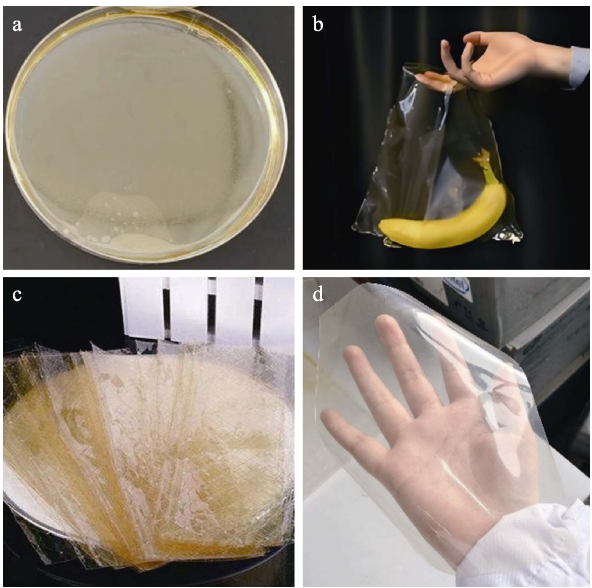


图 5 玉米醇溶蛋白膜 (a)、花生分离蛋白膜 (b)、明胶膜 (c) 和酪蛋白膜 (d) 的外观照片

Fig. 5 Photos of corn zein membrane (a), peanut protein isolate membrane (b), gelatin membrane (c) and casein membrane (d)

3.2 果蔬保鲜

为有效防止食品因存放时间过长或其他因素导致的感官品质下降和营养价值损失,采用科学的保鲜手段尤为重要。蛋白质基薄膜凭借出色的机械性能和阻隔性能,已成为制备各类活性包装膜的主要材料。

将活性物质添加到蛋白质复合膜中,并在包装食品后,使活性物质在密闭空间内迁移至膜表面,与空间内漂浮或直接接触食品表面的微生物发生作用,从而抑制其生长和繁殖,这是实现食品保鲜的有效途径,具体机制如图 6 所示^[37]。

在实际应用中,乔勤勤等^[38]向大豆分离蛋白膜液中添加苦瓜多糖,有效抑制了鲜切马铃薯的褐变现象,并显著减缓了马铃薯中微生物的生长速率,成功延长了马铃薯的保质期。范鑫等^[39]利用静电纺丝技术,成功制备出具有大比表面积的生物基玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜,该保鲜膜展现出优异的表面形貌、乙烯吸附效率以及抑菌性能,有效延长了香蕉的货架期。随着对蛋白质基薄膜材料及其

改性技术的深入研究,以及新型活性物质的不断发掘,蛋白质基活性包装膜在食品保鲜领域的应用前景将更加广阔。表 4 为近年来活性膜在水果和蔬菜中的应用。

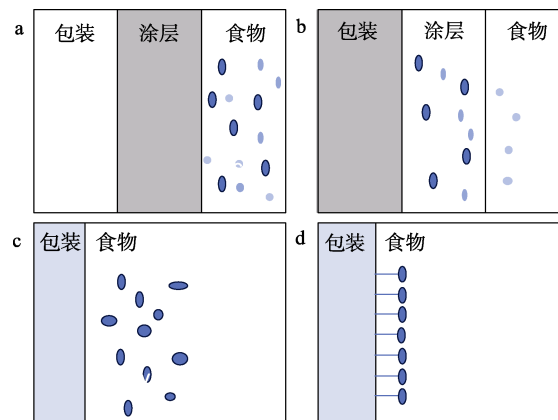


图 6 活性物质在抗菌包装系统中的迁移过程示意图^[37]
Fig. 6 Schematic diagram of migration process of active substances in antibacterial packaging systems^[37]

表 4 蛋白基活性膜在果蔬中的应用

Table 4 Application of protein-based active membranes in fruits and vegetables

载体	活性物质	保鲜对象	作用	参考文献
玉米醇溶蛋白	丁香酚	新鲜去皮荸荠	延缓了新鲜去皮荸荠外观品质的下降和菌落总数的增加,降低了褐变度、失重率、总黄酮和可溶性鞣的含量,并减少了可溶性固形物的损失,促进总酚含量的增加	[40]
明胶	甜菜碱	樱桃番茄	表现出更光滑的形貌和更好的光学和机械性能,提高了吸湿等温线曲线、水蒸气渗透率和优异的吸湿-解吸循环性能,延缓了水果的衰老	[41]
乳清蛋白	芦丁	双孢蘑菇	有效延缓双孢菇褐变,并维持较高的硬度,抑制呼吸速率、过氧化氢、超氧阴离子自由基及丙二醛水平,有效清除了菇体中多余的活性氧	[42]
酪蛋白	香草醛	圣女果	阻隔氧气、水分和异味的渗透,既保持了圣女果中的水分含量,也没有使其发霉变质	[43]
大豆分离蛋白	艾蒿精油	芒果	表面相对平坦、力学性能良好,增强了薄膜的光阻隔能力,增加了憎水性,表现出良好的保鲜性能	[44]

3.3 肉类保鲜

肉制品作为日常饮食中不可或缺的营养来源,因其高水分含量和脂肪易氧化的特性,极易发生腐败。在选取肉制品保鲜膜时,需考虑两大要素:一是基材需具备强大的阻隔性,能有效阻止氧气和水蒸气的渗透;二是所选活性物质需对肉制品上易生长的微生物展现出强烈的抑菌效果。

杨乐等^[45]将茶多酚与卵白蛋白进行复合,发现经质量分数 2% 的茶多酚膜液处理,能赋予猪肉最佳的保水性,其质构特性显著优于其他处理组,且微生物最大生长速率最低,有效延缓了猪肉的腐败进程。后鹏飞^[46]利用草鱼鳞提取的明胶,结合原儿茶酸作为抗氧化剂和抗菌剂,制备出明胶-聚合氯化铝 (PCA) 抗菌膜。该膜不仅增强了紫外线屏障作用,还显著抑制了牛肉中细菌的生长速率 ($P < 0.05$),有

效延长了牛肉的货架期。随着对新型保鲜膜材料的不断探索和研发,以及活性物质的深入研究和应用,肉制品的保鲜技术将更加成熟和完善。表 5 总结了蛋白膜近年来在肉类中的应用。

3.4 水产品保鲜

水产品因其丰富的营养特性而极易遭受微生物的侵袭,导致腐败变质,而这些微生物的繁殖与代谢活动极易受环境因素的影响,成为鱼肉在贮藏过程中腐败变质的主要原因^[52]。为提升水产品的保鲜效果,进行了诸多探索。

赵然^[53]通过筛选不同体积比的肉桂精油和紫苏精油,找出了具有最佳联合抑菌活性的复配精油。制备的复合膜能较好地抑制微生物的生长繁殖,并展现出较强的抗氧化性。此外,郭小斑^[54]成功制备了具有抑菌活性的胶原蛋白缓释复合膜。该膜的

活性涂层能够减缓鱼肉的质量损失和 pH 升高, 明显降低挥发性盐基总氮 (TVB-N) 值, 延缓鱼肉中蛋白质的降解和脂质的氧化。随着对天然保鲜剂及其作用机制的深入研究, 以及新型包装技术的不断发展, 水产品的保鲜技术将更加高效、环保和可持续, 为消费者提供更加安全、健康的水产品。表 6 总结了蛋白基活性膜近年来在水产品中的应用。

表 5 蛋白膜在肉类中的应用
Table 5 Application of protein-based active membranes in meat

载体	活性物质	保鲜对象	作用	参考文献
乳清蛋白	柚子叶提取物	鸡胸肉	具有较低的溶解度、含水量、水蒸气渗透性, 而机械性能、光阻隔性能和抗氧化活性较高, 有效延缓鸡胸肉变质和脂质氧化过程	[47]
明胶	丁香酚	牛肉	活性物质引起了氢、色度和水含量的电位上升, 有效抑制微生物繁殖、蛋白质降解和脂质氧化	[48]
蛋清蛋白	茶多酚	猪肉	表现出更高的断裂伸长率 (EAB) 和拉伸强度 (TS), 且对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出优异的抗菌活性	[49]
胶原蛋白	肉桂精油	猪肉	具有增强的热稳定性、紫外线阻隔性能和耐水性, 抗氧化活性和抗菌活性由于山苍子精油 (CEO) 的持续释放而得到改善, 使猪肉的保质期延长了 4 d	[50]
明胶	儿茶素	猪肉末	膜在水中的溶解度显著降低, 气体阻隔性能高, 延缓了脂质氧化和微生物生长	[51]

表 6 蛋白膜在水产品中的应用
Table 6 Application of protein-based active membranes in aquatic products

载体	活性物质	保鲜对象	作用	参考文献
明胶	香芹酚	鲈鱼片	延缓鱼色变化和 pH 升高的效果, 表现出较高的抗菌和抗氧化活性, 使鲈鱼片的货架期延长了 2~4 d	[55]
玉米醇溶蛋白	叶醛	金枪鱼	有效降低鱼肉菌落总数、挥发性盐基氮含量以及组胺含量, 延缓鱼肉质地劣变, 使金枪鱼片的货架期延长 3 d	[56]
明胶	牛至精油	草鱼片	有效阻止了冷藏鱼片 TVB-N 和硫代巴比妥酸反应物 (TBA) 值的增加, 显著抑制了腐败生物的生长, 从而延长了货架期 2~3 d	[57]
胶原蛋白	姜黄素	草鱼片	降低草鱼肉片的质量损失, 明显抑制鱼肉的脂质氧化和蛋白质的降解, 较好地维持鱼肉的品质	[58]
大豆分离蛋白	丁香精油	金枪鱼	包覆结构延长了丁香油的抗菌 (特别有效地抑制假单胞菌属) 和抗氧化活性, 减少金枪鱼片的微生物生长和脂质自氧化	[59]

4 结束语与展望

蛋白膜凭借复杂的成膜机理与卓越的成膜性能, 在生物基薄膜逐渐占据主流的当下, 已成为研究的热点之一。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。由于蛋白质的理化性质不同, 其成膜能力各不相同, 可根据不同需求, 施加不同的成膜方式及调整配比与技术工艺, 辅以改性处理, 增强膜的机械性能与保鲜效果, 以满足相应食品的特定储存条件。

植物源活性物质通过与蛋白膜共混, 对蛋白质中的化学键进行重塑, 改变了蛋白质原本的基团分布、空间结构, 同时进行改性处理, 改善单一膜材存在的机械性能、阻隔性能差的问题。并进一步提高食品质量、延长食品保质期。基于蛋白质活性薄膜的研究越来越广泛, 其可降解性、无毒性以及作为抗菌载体的能力而成为传统包装薄膜的更好替代品; 此外, 生物释放特性扩大了其在食品保鲜中的

应用。活性包装材料使功能食品市场迅速发展。然而, 在开发基于蛋白质的活性膜方面仍存在一些问题。食品来源的蛋白质活性膜的阻隔性和机械性能有限, 加工和生产的设备要求和成本高, 推迟了其工业生产。

目前, 国内外大量的研究都集中在生物基包装材料的性能上, 如进行高压、超声、3D 打印等方式, 以提高活性薄膜的包装性能。在这些材料工业化前, 需更有效的方法来解决阻隔性和机械性能差以及成本高的限制。未来的研究方向如下:

(1) 蛋白膜的机械性能是亟待解决的难题。通过添加化学物质或采用物理方法进行薄膜改性, 尤其是, 纳米颗粒的引入已提升了机械性能, 并对活性物质的挥发起到了缓释作用, 从而延长了抗菌效果。因此, 深入研究并推广纳米技术, 使薄膜与纳米颗粒更好地融合, 以达到更优异的性能效果, 将是未来研究的热点方向。

(2) 蛋白质纳米复合材料成本高、合成工艺复

杂、生产效率低等缺点阻碍了其广泛应用。由于多种生物活性物质可与纳米颗粒结合使用,进一步的研究可集中在不同生物活性物质之间的协同作用上,以便设计更合适的技术来大规模生产不同的蛋白质纳米复合材料和聚合物。

(3) 活性物质的提取与开发过程中常涉及大量化学品的使用,导致成品中可能存在残留物,给食品包装的安全性带来隐患。因此,应重点研发绿色、无污染、无残留的提取方法和技术,以确保食品包装的安全性。

(4) 随着研究的不断深入,智能时间-温度指示剂(TTI)、抗菌剂、抗紫外剂等成分可与蛋白质有机结合,形成完整的包装体系,同时研究其最佳工艺,为人们提供绿色安全的食品供应。此外,将未来的食品活性包装与缺陷识别、信息、图像识别等学科相结合,将进一步构建完整的、智能化的食品包装体系。

参考文献:

- [1] LIU S P (刘树萍), PENG X W (彭秀文), ZHANG J M (张佳美), *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 (食品工业科技), 2023, 44(22): 342-351.
- [2] YANG M C (杨明晨), HU F (胡锋), FU J Y (符姜燕), *et al.* Research progress on antibacterial structure-activity relationship, antibacterial mechanism and application in food of plant-derived active substances[J]. Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业), 2024, 50(18): 367-374.
- [3] SILVA N H C S, VILELA C, MARRUCHO I M, *et al.* Protein-based materials: From sources to innovative sustainable materials for biomedical applications[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(24): 3715-3740.
- [4] LIU F G (刘夫国), MA C C (马翠翠), WANG D (王迪), *et al.* Research progress on the interaction between proteins and polyphenols[J]. Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业), 2016, 42(2): 282-288.
- [5] CALVA-ESTRADA S J, JIMBEZ-FERÁNDEZ M, LUGO-CERVANTES E. Protein-based films: Advances in the development of biomaterials applicable to food packaging[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(2): 78-92.
- [6] KHAN M A. Preparation and characterization of resveratrol embedding and delivery carrier based on alcohol soluble protein composite particles[D]. Wuxi: Jiangnan University (江南大学), 2019.
- [7] JIAN M Y, LIU S Z, DENG G Y, *et al.* Coaxial electrospinning with acetic acid for preparing ferulic acid/zein composite fibers with improved drug release profiles[J]. Colloids and Surfaces Biointerfaces, 2013, 102: 737-743.
- [8] LIU W L (刘万里). Study on the performance of electrospun PLGA/silk fibroin membrane loaded metronidazole in the treatment of periodontitis[D]. Chengdu: Chengdu University (成都大学), 2024.
- [9] YU L, SUN F, WANG Y, *et al.* Effects of MgO nanoparticle addition on the mechanical properties, degradation properties, antibacterial properties and *in vitro* and *in vivo* biological properties of 3D-printed Zn scaffolds[J]. Bioactive Materials, 2024, 37: 72-85.
- [10] LUAN Q Y, WANG Y S, ZHANG Y X, *et al.* Mechanism of the G/M ratio and zein in enhancing the mechanical and hydrophobic properties of sodium alginate films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280(3): 136079.
- [11] AVILA L B, PINTO D, SILVA LFO, *et al.* Antimicrobial bilayer film based on chitosan/electrospun zein fiber loaded with jaboticaba peel extract for food packaging applications[J]. Polymers, 2022, 14(24): 5457.
- [12] SONG X Y, WANG Y Q. Development and characterization of edible bilayer films based on iron yam-pea starch blend and corn zein[J]. Food Science and Technology, 2021, 41(S2): 684-694.
- [13] SUN J L, YUAN Y J, ZENG H H, *et al.* Research progress of environment-friendly packaging materials based on soy protein isolate[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 269-277.
- [14] GAO J (高洁), ZENG X Y (曾鑫俞), XUE Y X (薛艺璇). Effects of matrices on the structure and properties of composite films of soy protein isolates/xanthan gum[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2024, 10: 1-13.
- [15] HOU Y P (侯玉萍). Preparation and performance analysis of zanthoxylum bungeanum extract/nano-cellulose/soybean protein isolate based films[D]. Xianyang: Northwest A & F University (西北农林科技大学), 2023.
- [16] PEI Y, XU G Q, LI Y H, *et al.* Fabrication, structure and properties of cellulose nanowhiskers/gelatin composite film[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(8): 45-49.
- [17] JIN H, LIU X, LIN Y M. Preparation, structure and properties of gelatin composite film modified by phytic acid[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(7): 3847-3853.
- [18] YANG S S, LI H C, SUN H Z. Preparation of gelatin-based films modified with nanocrystalline cellulose[J]. Iranian Polymer Journal, 2018, 27(9): 645-652.
- [19] DENG S Q, LIAO J J, WU H Z, *et al.* Multifunctional modification of biodegradable casein-microcrystalline cellulose composite film with UV-absorbing property using wood bark extract[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 192: 116080.
- [20] DENG S Q (邓霜琪), LIAO J J (廖晶晶), WU H Z (吴海柱), *et al.* Preparation and properties evaluation of casein-based film incorporated with Chinese bayberry tannin[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2023, 44(17): 35-41.
- [21] AN N (安楠). Co-construction mechanism of casein-shellac structures and fabrication and application of co-assembled films[D]. Wuxi: Jiangnan University (江南大学), 2022.
- [22] REN C (任聪), WANG X (王雪), SHI C S (石长硕), *et al.* Research on the application of high barrier corn alcohol soluble protein film in seasoning packages[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition) (河南工业大学学报: 自然科学版), 2021, 42(1): 78-84.
- [23] ZHAO J (赵珺), HE S (何珊), LI J B (李俊博), *et al.* Preparation and characterization of chitosan/zein composite film[J]. Chinese Seasoning (中国调味品), 2023, 48(1): 53-57.
- [24] YU L N (于丽娜), DU D H (杜德红), PENG Y P (彭娅萍), *et al.* Optimization of the preparation process of phosphorylated modified peanut protein isolate membrane using response surface methodology [J]. Journal of Food Safety and Quality Testing (食品安全质量检测学报), 2018, 9(16): 4269-4279.
- [25] LIU H P (刘海鹏), FENG L (冯磊), LI L (李玲), *et al.* Preparation, characterization, and properties of lotus root starch/whey protein composite film[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2022, 39(6): 1228-1233.
- [26] FAN F J (樊凤娇), LIAO H L (廖海露), YUE C L R (岳陈林瑞), *et al.* Preparation of gelatin and pectin composite film and its effect on the quality of refrigerated scallops[J]. Food Research and Development (食品研究与开发), 2024, 45(10): 117-126.
- [27] HUANG T Q, QIAN Y S, WEI J, *et al.* Polymeric antimicrobial food packaging and its applications[J]. Polymers, 2019, 11(3): 560.
- [28] SA R G W (萨仁高娃), FENG K (冯可), HU W Z (胡文忠), *et al.*

- Antimicrobial mechanisms of essential oils and their components on pathogenic bacteria: A review[J]. Food Science (食品科学), 2020, 41(11): 285-294.
- [29] FRATINI F, MANCINI S, TURCHI B, *et al.* A novel interpretation of the fractional inhibitory concentration index: The case *Origanum vulgare* L. and *Leptospermum scoparium* J. R. et G. Forst essential oils against *Staphylococcus aureus* strains[J]. Microbiologic Research, 2017, 195: 11-17.
- [30] SHAO L L, XU J, SHI M J, *et al.* Preparation, antioxidant and antimicrobial evaluation of hydroxamated degraded polysaccharides from enteromorpha prolifera[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 481-487.
- [31] SHEN F G, TANG X D, WANG Y, *et al.* Phenotype and expression profile analysis of *Staphylococcus aureus* biofilms and planktonic cells in response to licochalcone A[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(1): 359-373.
- [32] DA X, NISHIYAMA Y, TIE D, *et al.* Antifungal activity and mechanism of action of ougon scutellaria root extract components against pathogenic fungi[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-12.
- [33] HADDAD P R. The encyclopedia of separation science[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2004, 23(9): 3-4.
- [34] SUN Z L, ZHANG X X, WU H H, *et al.* Antibacterial activity and action mode of chlorogenic acid against *Salmonella enteritidis*, a foodborne pathogen in chilled fresh chicken[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2020, 36(2): 24.
- [35] SOUZA A B, MARTINS C H G, SOUZA M G M, *et al.* Antimicrobial activity of terpenoids from *Copaifera langsdorffii* Desf. against *Cariogenic Bacteria*[J]. Phytotherapy Research, 2011, 25(2): 215-220.
- [36] SUI X N (隋晓楠), HUANG G (黄国), LIU G C (刘贵辰). Research progress on the interaction between soy protein and plant polyphenols[J]. Chinese Journal of Food Science (中国食品学报), 2019, 19(7): 1-10.
- [37] QUINTAVALLA S, VICINI L. Antimicrobial food packaging in meat industry[J]. Meat Science, 2002, 62(3): 373-380.
- [38] QIAO Q Q (乔勤勤), WANG Y (王玥), SUN X T (孙雪婷), *et al.* Preservation of fresh cut potato by momordica polysaccharide/soybean protein isolate composite membrane[J]. Journal of Wuhan University of Light Industry (武汉轻工大学学报), 2024, 43(2): 27-33.
- [39] FAN X (范鑫), YANG T (杨婷), WANG Y Y (王艺瑜), *et al.* Preparation and application of electrospun zein-cinnamaldehyde fruit preservation film[J]. Food Research and Development (食品研究与开发), 2024, 45(5): 1-7.
- [40] CHEN Z (陈喆). Study and application of eugenol treatment on fresh-peeled Chinese water chestnut preservation[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry (武汉轻工大学), 2023.
- [41] WAN H C, ZHU Z W, SUN D W. Deep eutectic solvents (DESs) films based on gelatin as active packaging for moisture regulation in fruit preservation[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138114.
- [42] LIU H P, LI L, HAN J L, *et al.* Preparation and characterization of modified guar gum/whey protein/rutin composite membrane and its effect on storage quality of agaricus bisporus[J]. Food Science, 2024, 45(5): 233-242.
- [43] WANG X C (王秀超). Study and preparation of carrageenan-based quick-drying antibacterial preservative film[D]. Jinan: Qilu University of Technology (齐鲁工业大学), 2024.
- [44] MENG X H, LYU Z, JIANG T Z, *et al.* Preparation and characterization of a novel artemisia oil packaging film and its application in mango preservation[J]. Foods, 2023, 12(15): 2969.
- [45] YANG L (杨乐), LIU L L (刘丽莉), DING Y (丁玥). Effect of tea polyphenol-ovalbumin edible film on quality of chilled pork and construction of microbial growth model[J]. Food and Fermentation Industry (食品与发酵工业), 2024, 10: 1-12.
- [46] HOU P F (后鹏飞). Preparation, characterization, and application of fish scale gelatin based edible antibacterial film in beef preservation [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University (江西农业大学), 2020.
- [47] CHEN M, CHEN Y, JIANG L L, *et al.* Development and application of packaging using chitosan-whey protein composite film functionalized with persimmon (*Diospyros kaki* L. F.) leaf extract[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(3): 2040-2053.
- [48] DING Z G, SHEN Y, HU F, *et al.* Preparation and characterization of eugenol incorporated pullulan-gelatin based edible film of pickering emulsion and its application in chilled beef preservation[J]. Molecules, 2023, 28(19): 6833.
- [49] LIU J H, WANG Y M, LYU J H, *et al.* Biodegradable composite films based on egg white protein and tea polyphenol: Physicochemical, structural and antibacterial properties[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 38: 101098.
- [50] RAN R M, ZHENG T T, TANG P P, *et al.* Antioxidant and antimicrobial collagen films incorporating pickering emulsions of cinnamon essential oil for pork preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136108.
- [51] KAEWPRACHU P, GHARSALLOAUI A, OULAHAL N, *et al.* Gelatin films with nisin and catechin for minced pork preservation [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 18: 173-183.
- [52] SITU H Y (司徒慧媛), LI Y M (李玉梅), GAO J L (高加龙), *et al.* Effect of temperature fluctuation during simulated cold chain circulation on meat quality and microbial diversity of cultured trachinotus ovatus[J]. Journal of Food Science and Technology (食品科学技术学报), 2022, 40(5): 148-159.
- [53] ZHAO R (赵然). Preparation of plant essential oil compound anthocyanin edible film and its preservation effect[D]. Jinzhou: Bohai University (渤海大学), 2021.
- [54] GUO X B (郭小斑). Preparation and characterization of cinnamaldehyde/fish skin collagen film with antimicrobial activity and its mechanism of grass carp fillets preservation[D]. Fuzhou: Fuzhou University (福州大学), 2019.
- [55] DONG Q F, ZHANG Y Y, YANG L, *et al.* Development of gelatin film deposited with carvacrol-loaded fibers and its application to sea bass fillet preservation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): e165705.
- [56] CUI F C (崔方超), ZHOU S S (周闪闪), ZHANG X H (张星晖), *et al.* Preparation of leaf aldehyde/zein nanofiber film and its application in tuna preservation[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2024, 45(5): 309-318.
- [57] YING T H, JIANG C D, LIU R, *et al.* Synthesis and application of gelatin-based controlled-release antibacterial films containing oregano essential oil/ β -cyclodextrin microcapsules for chilling preservation of grass carp fillets[J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139465.
- [58] SUN X Y (孙新玉). Preparation, characterization of edible collagen/curcumin film with sustained release activity and its mechanism of grass carp fillets preservation[D]. Fuzhou: Fuzhou University (福州大学), 2018.
- [59] ECHEVERRIA I, MAURI A N, MONTERO M P, *et al.* Active nanocomposite films based on soy proteins-montmorillonite-clove essential oil for the preservation of refrigerated bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) fillets[J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 266: 142-149.