

冯坤, 周欢格, 武俊伟, 等. 乳酸链球菌素复配物活性包装膜在食品保鲜中的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 471-480.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060202

FENG Kun, ZHOU Huange, WU Junwei, et al. Research Progress of Nisin Compounds Active Packaging Film in Food Preservation[J].
Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 471-480. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060202

· 专题综述 ·

乳酸链球菌素复配物活性包装膜在食品 保鲜中的研究进展

冯坤^{1,2,3,*}, 周欢格¹, 武俊伟¹, 康婧璇¹, 聂荣祖^{1,2,3}, 李波^{1,2,3}, 伍永梅^{1,2,3}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450001;

2. 冷链食品加工与安全控制教育部重点实验室, 河南郑州 450001;

3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南郑州 450001)

摘要: 乳酸链球菌素 (Nisin) 与活性物质复配可拓宽其抗菌谱、赋予体系抗氧化性, 从而协同提升食品的防腐保鲜效果, 因此在食品安全研究领域备受关注。特别地, 以 Nisin 复配物为功能成分, 通过不同成膜方法 (涂膜法、流延法、挤出法和静电纺丝法等) 构建复合膜, 已成为近年来食品活性包装领域的研究热点。基于此, 本文在简要介绍 Nisin 及其抗菌机制的基础上, 主要概述了用于与 Nisin 复配的生物活性物质及其复配效果; 进而, 从不同成膜技术着手, 重点综述了含有 Nisin 复配物的活性膜在食品保鲜中的研究进展; 此外, 总结和讨论了当前研究存在的局限性及未来的发展方向, 以期 Nisin 在食品防腐保鲜领域中的高效应用提供参考。

关键词: 乳酸链球菌素, 复配, 成膜技术, 活性包装, 食品保鲜

中图分类号: TS206

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0471-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060202



本文网刊:

Research Progress of Nisin Compounds Active Packaging Film in Food Preservation

FENG Kun^{1,2,3,*}, ZHOU Huange¹, WU Junwei¹, KANG Jingxuan¹, NIE Rongzu^{1,2,3}, LI Bo^{1,2,3}, WU Yongmei^{1,2,3}

(1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Key Laboratory of Cold Chain Food Processing and Safety Control (Zhengzhou University of Light Industry),

Ministry of Education, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The combination of Nisin with active substances can broaden its antibacterial spectrum and endow the system with antioxidant capacity, thereby synergistically enhancing food preservation efficacy. Consequently, it attracted much attention in the field of food safety research. In particular, the construction of composite films using Nisin-based compounds as functional components through different film-forming methods (such as coating, casting, extrusion, and electrospinning, etc.) became a research hotspot in the field of food active packaging in recent years. This article begins with a brief introduction to Nisin and its antibacterial mechanism, followed by a comprehensive overview of the bioactive substances utilized in conjunction with Nisin and their synergistic effects. Then, the research progress of Nisin compounds active films in food preservation, specifically from the aspects of different film-forming techniques, is mainly reviewed. Furthermore, the limitations of the current research and the future development directions are summarized and discussed, with the expectation of providing a reference for the efficient application of Nisin in the field of food preservation.

Key words: Nisin; compound; film-forming technology; active packaging; food preservation

收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 郑州轻工业大学博士科研基金资助项目 (2022BSJJZK05); 河南省科技攻关计划项目 (222102310140, 252102110085)。

作者简介/通信作者*: 冯坤 (1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: fengkun_89@163.com。

“民以食为天,食以安为先”。食品在生产、流通等过程中易受微生物污染,导致其质量降低、货架期缩短,甚至会引发食品安全问题^[1]。随着大健康背景下消费者对食品安全的重视,如何在不影响营养与感官品质的前提下实现食品的防腐保鲜是当前亟需解决的重点问题。抗菌活性包装膜是近年来兴起的一种新型包装形式,通过膜中抗菌剂的释放,抑制微生物的生长繁殖,从而达到延长食品货架期的目的。特别地,相比于传统的无机抗菌剂,天然抗菌剂以其生物安全性高、来源广泛等优势而备受青睐。乳酸链球菌素(Nisin)是一种抗菌多肽,被 WHO/FDA 认证为天然食品防腐剂,现已广泛用于肉制品及果蔬保鲜^[2-3]。然而,直接将 Nisin 添加于食品中易影响其抗菌活性和食品品质。通过抗菌包装膜负载 Nisin 虽能解决上述问题,但 Nisin 主要作用于革兰氏阳性菌,Nisin 抗菌膜往往无法有效应对复杂菌系引发的食品腐败问题。活性物质复配是解决上述问题的重要手段^[4]。如图 1 所示,以 Nisin 及其复配物为活性成分,借助不同成膜技术构建活性包装材料应用前景广阔,是当前 Nisin 在食品保鲜研究领域的热点研究方向,然而目前相关综述报道较少。因此,本文在简要介绍 Nisin 及其抗菌机制的基础上,从复配物类型、复配物组成、复配物功能等方面总结和分析了用于与 Nisin 复配的生物活性物质及其复配效果,重点综述了基于不同成膜技术的 Nisin 复配物活性包装膜在食品防腐保鲜中的研究进展。

1 Nisin 及其抗菌机制

Nisin 是由 34 个氨基酸组成的阳离子多肽,目前其主要有 A、B、C、D、E、Z 和 Q 七种类型。其中研究最多的是 A 型和 Z 型,二者在组成上只有第 27 位氨基酸残基不同,即 A 型为组氨酸残基,而 Z 型为天冬酰胺残基^[5]。研究表明,Nisin 能够抑制金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、单增李斯特菌、嗜热链球菌等大部分革兰氏阳性菌的生长和繁殖,特别是对

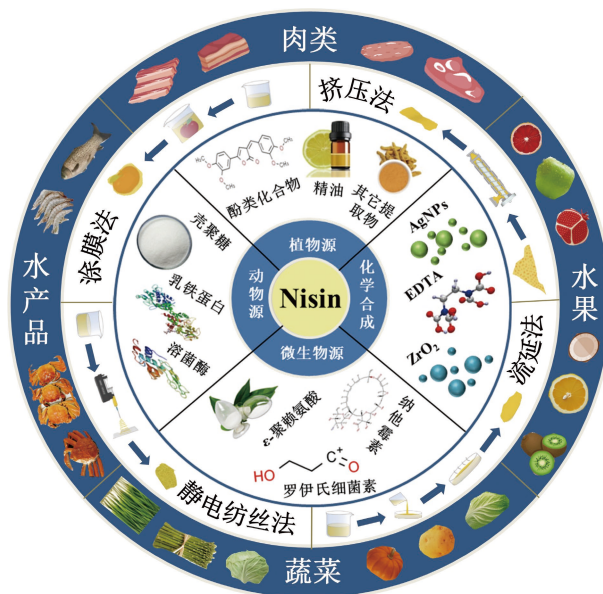


图 1 Nisin 复配抗菌物质种类及不同抗菌膜成膜方法
Fig.1 Types of Nisin compound antibacterial substances and different antibacterial film forming methods

芽孢的抑制作用明显^[6]。然而 Nisin 对革兰氏阴性菌、霉菌以及酵母菌的抑制作用有限。基于此,当前的研究主要聚焦于 Nisin 复配来弥补其抗菌谱窄的缺陷,提升防腐保鲜效果。为全面强化 Nisin 在食品保鲜领域的应用,首先需要明确 Nisin 的抗菌机制。前期,国内外对 Nisin 的抗菌机制进行了广泛的研究,但目前尚未形成统一定论。如图 2 所示,现有机制的研究包括以下三个方面:a.基因转录抑制。Nisin 通过阻碍细菌(如金黄色葡萄球菌)关键功能基因的转录,抑制其生长繁殖^[7];b.细胞膜酶反应。Nisin 分子结构中的关键活性基团脱氢丙氨酸或 β-甲基脱氢丙氨酸(DHA/DHB)与细菌细胞膜上含硫醇(-SH)的酶或蛋白发生共价结合,导致某些细菌产生抗性突变及细胞内容物流出并裂解^[8];c.孔道理论。Nisin 在细胞膜上形成孔道,使小分子物质外流,破坏细胞稳

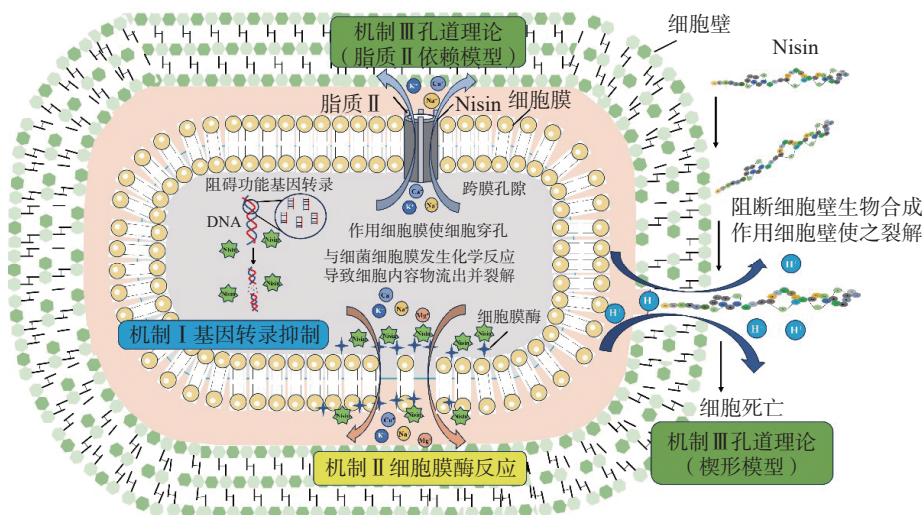


图 2 Nisin 抗菌机制

Fig.2 Antibacterial mechanism of Nisin

态。从分子动力学角度的“孔道理论”最受关注与认同,其核心是 Nisin 通过“楔形”模型和脂质 II 依赖模型两种途径在细胞膜上形成孔道^[9]。孔道理论从分子动力学角度揭示了 Nisin 的快速杀菌机制,尤其是脂质 II 结合模式兼具“破坏膜完整性”和“抑制细胞壁合成”的双重作用^[10]。综上,Nisin 的抗菌机制可能是多途径协同的结果,未来可聚焦于不同机制的协同效应,或针对特定细菌(如耐药菌)的靶向应用,多角度深入探讨和研究 Nisin 的抗菌机制。

2 Nisin 复配体系在食品保鲜中的研究现状

针对 Nisin 抗菌谱较窄这一问题,将其与其他抗菌活性物质进行复配,是实现食品长时保鲜的关键策略。近年来,研究者主要从复配物种类、复配物数量、复配物功效三方面对 Nisin 复配物的食品防腐保鲜效果展开研究。

2.1 复配活性物质种类

随着 Nisin 复配保鲜研究的不断深入,参与 Nisin 复配的活性物质类型也逐渐增多,主要的活性物质包括多酚、有机酸(盐)、细菌素、精油、化学合成物、其它提取物等。表 1 列出了 Nisin 复配的常用的活性物质种类及复配效果。相比于化学合成物抗菌剂,研究者更倾向使用多酚、细菌素、精油等天然抗菌剂与 Nisin 进行复配来提升防腐保鲜效果。多酚类化合物能够通过破坏细胞壁和细胞膜、抑制蛋白和核酸合成等,进而诱导细菌死亡^[41]。Dai 等^[42]将茶多酚与 Nisin 和壳聚糖复配,对比研究该复配体系对植物肉的保鲜特性。与对照样品的保质期相比,复配体系能够有效抑制微生物生长,使植物肉产品保质期延长至 56 d。有机酸是含有酸性基团(如羧基或磺酸基)的天然碳基化合物,其未解离的分子因脂

表 1 常见的 Nisin 复配活性物质种类及其应用效果

Table 1 Common types of active substances for Nisin compounding and their application effects

复配活性物质	致病菌	应用效果	
多酚	芝麻酚	单增李斯特菌	二者复配处理降低单增李斯特菌菌落数1.1~3.2 lg CFU/g, 鱼片经处理72 h后保持原有色泽 ^[11] ; 二者复配在48 h内完全抑制受试菌生物膜形成 ^[12]
	丁香酚	单增李斯特菌	二者复配处理抑制莴苣表面单增李斯特菌菌落数2.5 lg CFU/cm ² ^[13]
	香芹酚	单增李斯特菌	二者复配处理对受试菌株具有协同抑菌性(FICI=0.375~0.500) ^[14]
	百里香酚	铜绿假单胞菌	二者复配使微生物的生物膜减少64%和85%, 具有联合防御食源性病原菌的潜力 ^[15]
有机酸(盐)	柠檬酸	沙门氏菌	二者复配处理延长甜樱桃保质期至第10 d ^[16]
	苹果酸、乳酸和乙酸	单增李斯特菌	苹果酸与Nisin复配后协同超声处理使蘑菇中单增李斯特菌菌落数降低至小于1.48 lg CFU/g ^[17]
	3-苯乳酸	木糖乳杆菌、黄曲霉	二者复配使用有效提升抑菌效果(对木糖乳杆菌、黄曲霉抑菌圈直径分别为17.51 mm和21.89 mm) ^[18]
微生物代谢物	柠檬酸钠	单增李斯特菌	二者复配处理降低鲜切番茄中微生物菌落数2.56~3.48 lg CFU/mL ^[19]
	ϵ -PL	蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	二者复配对蜡样芽孢杆菌具有协同抑菌性(FICI=0.6) ^[20] , 对大肠杆菌具有叠加抑菌性(FICI=0.6) ^[21] ; 复配处理对菠萝蜜具有更好的保鲜效果 ^[22]
	黏菌素	鲍曼不动杆菌、铜绿假单胞菌	二者复配处理对受试菌株具有协同抑菌性(FICI=0.315) ^[23]
	Buforin I	枯草芽孢杆菌、表皮葡萄球菌、米曲霉	二者复配对微生物具有协同抑菌性(FICI=0.375) ^[24]
精油	纳他霉素	扩展青霉、麦角镰刀菌	二者复配使奶酪表面微生物减少1 lg CFU/g ^[25]
	牛至精油	大肠杆菌、单增李斯特菌	二者复配分别减少生菜中大肠杆菌和单增李斯特菌菌落数3.43和9.20 lg CFU/mL ^[26]
	迷迭香精油	脂环芽孢杆菌	二者复配抑制橙汁中环环芽孢杆菌的生长繁殖(24 h内85%微生物死亡或受损) ^[27]
	罗勒精油	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	二者复配抗菌指数FICI=0.75, 对微生物抑菌圈达80 mm, 具有相加作用, 优于二者的单独抑菌效果 ^[28]
化学合成物	藿香精油	单增李斯特菌	二者复配处理降低单增李斯特菌菌落数超过7 lg CFU/mL ^[29]
	次氯酸钠	粪肠球菌	二者复配抑菌表现相加效应(FICI=0.504), 具有较强抗生物膜作用 ^[30]
	纳米银颗粒	大肠杆菌	二者复配具有协同抗菌效果(FICI值<0.5), 显著抑制革兰氏阴性菌生长 ^[31]
	纳米银偶联物	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	二者复配能够抑制受试菌生物被膜形成, 拓宽未偶联抗菌剂的抗菌谱 ^[32]
植物/微生物/动物提取物	花椒提取物	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	二者复配处理抑制微生物生长(菌落数减少0.7 lg CFU/g), 延长冷鲜肉货架期 ^[33]
	葡萄籽提取物	单增李斯特菌	二者复配处理使单增李斯特菌菌落数减少1.7~1.9 lg CFU/g ^[34]
	韭菜提取物	金黄色葡萄球菌	二者对金黄色葡萄球菌具有协同抑菌活性, 可在25 ℃和4 ℃下贮藏8 d期间有效延缓巴氏杀菌乳和草莓的腐败变质 ^[35]
	微藻提取物	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和铜绿假单胞菌、伤寒沙门氏菌	Nisin与不同藻类提取物复配具有协同或相加作用, 能够使冰淇淋中需氧细菌和真菌的数量减少了90%以上 ^[36]
植物/微生物/动物提取物	溶菌酶	单增李斯特菌	二者复配分别降低全脂牛奶和脱脂牛奶中单增李斯特菌菌落数为2 lg CFU/mL和5 lg CFU/mL ^[37]
	噬菌体内溶酶	单增李斯特菌	二者复配100%抑制单增李斯特菌的生长繁殖, 奶酪在28 d储藏期间未发现微生物增殖 ^[38]
	壳聚糖	腐败希瓦氏菌、海藻希瓦氏菌	相比于单一抗菌剂, 二者复配能够显著抑制受试菌的增殖及生物被膜形成 ^[39] ; 相比于单一抗菌剂, 复配组的罗非鱼香肠保鲜效果最好 ^[40]

溶性可穿透微生物细胞膜,进入细胞后在中性环境中解离并释放 H^+ ,降低胞内 pH,从而破坏酶活性和代谢功能,实现抗菌作用。Guo 等^[43]将 Nisin 与柠檬酸复配使用,探究其协同抗菌作用。相比于 Nisin,复配体系对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率分别提升 4.43 倍和 1.49 倍。细菌素是由细菌代谢产生的抗菌物质,主要对同种或近缘种细菌具有抑制作用,其化学结构多为多肽、蛋白质或其复合物。杨立娜等^[44]将 Nisin 与纳他霉素复配应用于干豆腐保鲜。在 37 °C 条件下储藏 3 d 后,空白对照组和 Nisin 处理组的菌落总数均已超过国家非发酵性豆制品的标准临界值(5.0 lg CFU/g)。然而,复配体系能够显著抑制微生物的增殖,有效延长干豆腐的储藏期至 3 d,且不影响产品的感官品质。精油主要含醛类、酚类和含氧萜类化合物等^[45]。作为疏水性天然抗菌剂,它能渗透细菌细胞膜磷脂双分子层,破坏其结构,还能与细菌内关键成分如酶、转运蛋白或信号分子结合抑制生长^[46]。Liu 等^[47]研究 Nisin 与 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -PL)和八角茴香油复配体系对肴肉的防腐保鲜效果。结果发现在 20 d 储藏期内,经复合抗菌剂处理的样品总菌落数在第 16 d 时才达到食品安全上限(4 lg CFU/g),较对照组货架期延长了 8 d。

2.2 复配体系构成

根据参与 Nisin 复配的活性物质的数量,可将复配体系分为二元复配体系、三元复配体系等。现有研究中以二元复配体系最为常见,如表 1 所示。此外,三元和多元复配体系在食品保鲜中被证实具有更显著的优势^[48]。比如,Verdi 等^[49]研究发现,Nisin、乳酸菌素 AL750 与山梨酸钾组成的三元复合抗菌体系能协同增强对单增李斯特菌的抗菌效果,并显著延长 Sardo 硬奶酪的货架期。相较于 Nisin/山梨酸钾二元体系,三元体系中 Nisin 和山梨酸钾的用量明显降低,同时在 15 °C 储藏条件下可使 Sardo 硬奶酪的总菌落数降低 7 lg CFU/g。刘苗苗等^[50]研究发现,Nisin 与 ϵ -PL、壳聚糖联用对卤牛肉中的假单胞菌、枯草芽孢杆菌和溶酪大球菌均具有较高的抑制作用。在此基础上,进一步以纳他霉素作为抗真菌剂进行复配。结果发现 Nisin 与多种抗菌剂联合制备的多元复配物用于托盘包装卤牛肉,可使其冷藏货架期延长至 7 d。此外,与单纯 Nisin 相比,Nisin 复配不但能够拓展抗菌谱,获得较好的抗菌保鲜效果,而且也能降低单组分抗菌物质的添加量,从而有望实现更大的经济收益^[51]。

2.3 复配体系功效

含脂类食品(如肉品)在储藏过程中的腐败变质主要由微生物污染和油脂氧化两个因素引起。因此,Nisin 在用于此类食品保鲜时,不仅存在抗菌谱窄的问题,也无法解决因氧化导致的食品腐败。鉴于此,除了采用具有单一抗菌活性的复配物外,兼具抗菌和抗氧化活性的功能性物质是更加理想的 Nisin 复配

物。多酚和精油是最典型的抗菌/抗氧化活性物质,以此与 Nisin 复配能够赋予体系较好的抗氧化性,进而提升保鲜效果。比如,陈旋等^[52]将茶多酚与 Nisin 复配制备复合涂膜剂,研究其对澳洲坚果仁储藏稳定性的影响。结果表明该复配体系的 DPPH 自由基清除率可达 87.11%,羟基自由基清除率最高达 100%,能够通过有效抑制脂质氧化来延缓坚果酸价上升。王欣等^[53]将 Nisin 与迷迭香精油复配后掺入明胶/壳聚糖薄膜溶液制备活性膜,研究其对花蛤的保鲜效果。相较于仅含 Nisin 的薄膜,复配物膜的 DPPH 自由基清除率提升至 69.66%,这得益于迷迭香精油中富含的酚酸和萜类化合物的强抗氧化作用。除了脂质抗氧化外,杜津^[54]将柚子精油微胶囊与 Nisin 复配,用于探究其对鲜切苹果的保鲜效果。在储藏期间,鲜切苹果表面因氧化而产生褐变,其程度可以通过褐变指数(BI)来量化表示。储藏 2 周后,空白对照组中鲜切苹果的 BI 接近 140,仅使用柚子精油微胶囊处理的鲜切苹果 BI 接近 90。这是由于精油中的醛类等化合物在一定条件下可以转化为具抗氧化活性的脂肪族醇类物质,从而抑制多酚氧化酶活性,减缓褐变^[55]。更为显著的是,Nisin 与柚子精油微胶囊复配组处理的苹果,其 BI 仅为 75,这表明 Nisin 与柚子精油微胶囊的联合使用在抑制鲜切苹果褐变方面具有更佳的效果。

3 基于不同成膜技术的 Nisin 复配型食品活性包装研究

当 Nisin 及其复配物直接添加到食品中或涂覆于食品表面时,可能会与食品中的蛋白质、脂肪等成分发生相互作用,从而导致其抗菌活性降低,难以实现长效抗菌效果^[56]。为解决这一问题,活性包装技术应运而生。该技术通过将活性物质与聚合物材料相结合,制成薄膜或涂层,用于食品的防腐保鲜。目前,用于制备 Nisin 及其复配物活性包装膜的主要技术包括涂膜法、流延法、挤压法和静电纺丝法等。

3.1 基于涂膜法的 Nisin 复配型食品活性包装膜

涂膜法是将成膜基材与活性成分、助剂等混合制成膜液,随后在食品表面或内部进行浸渍、涂布或喷洒的保鲜技术。当成膜液干燥后,会形成一层致密的涂层薄膜。相较于其他活性包装技术,涂膜法可直接在食品表面一步成膜,具备操作简便、使用便捷等优势。特别地,该技术一般选用以多糖为主体的天然生物材料(如多糖、蛋白质等)来制备可食用涂膜。比如,商立超等^[57]将 Nisin 与抗坏血酸复配,然后与卡拉胶混合制成涂膜液,该涂膜能够减少双孢蘑菇子实体储藏期的腐烂失重率,有效延长采后双孢蘑菇的储藏期至 8 d。李晨等^[58]以明胶和壳聚糖作为涂膜基材,将 Nisin 与莽麦胰蛋白酶抑制剂(BTI)复配后掺入其中,应用于鲈鱼鱼糜的保鲜处理。研究表明,该复配保鲜剂能显著抑制微生物生长、延缓脂质氧化和蛋白质分解,并降低蒸煮损失率。且 BTI 可增

强 Nisin 抑制蛋白酶的抗性和稳定性, 最终将鱼糜的冷藏货架期从 4 d 延长至 7 d。

除成膜基材外, 活性物质同样是决定涂膜保鲜效果的关键因素, 主要包括多酚、有机酸、细菌素、精油等。通过将 Nisin 与这些活性物质联合使用, 并在食品表面形成涂层, 能够有效拓宽其抗菌谱, 延长食品货架期。比如, Eldib 等^[59] 以壳聚糖作为成膜基质和抗菌剂, 与 Nisin 及二氧化硅纳米粒子构建三元复合涂膜应用于采摘后蓝莓。结果发现, 该涂层能够显著降低蓝莓表面霉菌和嗜温菌总数。相较于壳聚糖/纳米二氧化硅二元体系, 三元复合涂膜进一步提升了蓝莓的储藏稳定性。Cao 等^[60] 将 Nisin 与壳聚糖、没食子酸复配涂膜, 探究对猪里脊肉抗氧化保鲜效果。结果显示, 相比于 Nisin/壳聚糖涂膜组, 经过没食子酸复配的 Nisin/壳聚糖涂膜组样品储藏 20 d 后的 TBARS 值显著降低, 猪里脊肉储藏期延长 5 d。

从适用食品种类来看, 目前基于 Nisin 复配物涂膜保鲜的食品以果蔬和肉品为主。比如, Song 等^[61] 利用涂膜法将 Nisin 与 ϵ -PL 复配, 研究其对鲜切胡萝卜品质的影响。结果显示, 与空白组相比, 复配组能够抑制呼吸速率, 减少酵母菌、霉菌、大肠杆菌和假单胞菌数量, 保持抗坏血酸和总酚含量, 使得 4 °C 下第 9 d 时仍低于腐败水平。侯晓卫等^[62] 采用 Nisin/壳聚糖/多酚复合涂膜处理冷鲜牦牛肉。该复合涂膜通过抑制蛋白质腐败和脂肪氧化, 有效降低硫代巴比妥酸值, 从而延长其保鲜期。此外, 相关研究还证实了 Nisin 与茶多酚、 ϵ -聚赖氨酸盐酸盐和抗坏血酸等成分复配涂膜可显著改善卤蛋与锥栗的感官品质, 并有效提高其储藏稳定性^[63-64]。

3.2 基于流延法的 Nisin 复配型食品活性包装膜

流延法, 即溶液浇铸法, 是食品活性包装膜研究的常用方法。该方法先将生物可降解聚合物溶解, 与其他助剂混合制成均匀的混合溶液。然后, 将溶液浇铸到成型模具中, 随着溶剂的挥发, 溶液逐渐固化并形成致密的薄膜^[65]。流延法与成膜法的共同点都是将基材与活性物质混合成膜液, 不同之处在于流延法是涂膜到模具上形成独立的薄膜。因此, 基于 Nisin 复配的流程膜所采用的复配物种类与涂膜法相类似, 目前主要包括天然活性物质^[66] 和合成化合物^[67]。比如, Kaewprachu 等^[68] 以明胶为成膜基材, 将儿茶素和 Nisin 作为二元复配物构建流延膜, 并研究了其对肉糜的保鲜效果。与单纯的 Nisin 膜相比, 含有 Nisin/儿茶素的二元复合膜在抑制微生物生长和脂质氧化方面具有明显优势, 能够有效延长肉糜的保质期 1~4 d。谢闰生等^[69] 将纳米银 (AgNPs) 加入到果胶溶液中绿色合成果胶基纳米银, 通过加入 Nisin 复配, 最终制备得到 Nisin@果胶-AgNPs 偶联物溶液, 并通过流延法制备 Nisin@果胶-AgNPs 复合薄膜。结果表明, 相较于单一的果胶-AgNPs 薄膜, Nisin@果胶-AgNPs 复合薄膜具有更高的抗菌活性。此外, Wu

等^[70] 采用流延法将 Nisin 与红甘蓝提取物 (RCA) 固定在支链淀粉和壳聚糖复合成膜基质中, 制备出兼具抗菌-抗氧化功能的智能活性膜。RCA 的加入有效弥补了 Nisin 抗菌谱较窄的缺陷, 同时赋予薄膜抗氧化功能。该复合薄膜具有独特的 pH 响应变色特性, 能够通过颜色变化直观地反映鲈鱼在储藏过程中的新鲜度变化。

与涂膜法相比, 流延膜作为一种独立的膜材, 其基材的选择更具灵活性, 同时流延膜的应用方式也更具多样性。除了单纯以天然聚合物为基材, Chang 等^[71] 以合成聚合物聚乳酸和壳聚糖为基材构建负载 Nisin 和 EDTA 的复合流延膜, 该复合膜中抗菌剂复配联用可以拓宽 Nisin 抗菌谱, 显著提升复合膜对石斑鱼的长时保鲜效果。此外, 除了传统的单层膜, Luciano 等^[72] 采用流延法在两层明胶膜之间加入了皮坦加叶氢乙醇提取物和 Nisin, 制备得到抗菌复合膜。该复合膜对金黄色葡萄球菌和单增李斯特菌均表现出良好的抗菌性。与相同厚度的单层膜相比, 制备该双层膜时抗菌剂的添加量减少三分之二, 有效降低食品活性包装的成本。另外, 流延膜不仅可以单独使用, 还可以与传统的包装基材结合使用, 以发挥更好的保鲜效果。例如, Cheng 等^[73] 将负载 Nisin 的羧甲基壳聚糖流延膜与聚乙烯薄膜贴合, 研究了这种新型食品包装膜对刺梨的保鲜效果。结果表明, 该包装膜的抗菌效果显著优于未添加 Nisin 的薄膜, 能够显著延长刺梨的保鲜期达 28 d。

3.3 基于挤压法的 Nisin 复配型食品活性包装膜

挤压法制备薄膜根据制作工艺的不同, 主要分为挤压成型法和挤压吹制法。目前以该类技术构建 Nisin 复配活性包装膜的研究相对较少。挤压成型法是将成膜基材与活性成分共混, 通过螺杆挤出机加热搅拌, 直至全部融化为可流动的粘性熔融态。随后, 利用螺旋杆将熔融态物料推送至出料端 (模具或固定形状喷嘴), 从而制成所需大小和厚度的薄膜^[74]。Lopresti 等^[75] 采用挤压成型法将 Nisin 与香芹酚等比例掺入生物聚合物基质中, 制备可降解抗菌膜。通过研究抗菌剂的释放规律, 评估该膜用于食品活性包装的潜力。结果表明, 膜中抗菌剂的释放呈现突释、缓释和停滞释放三个阶段。复合膜的抗菌作用主要依赖于香芹酚的释放。

相比于挤压成型法, 挤压吹制法是制备负载热稳定性抗菌剂的活性薄膜的理想方法。该方法将活性成分、成膜基材、塑化改性剂、成膜剂按配比在高速混合机混匀, 经单/双螺杆挤出造粒、脱泡吹膜、定型处理得到薄膜^[76]。对比其它成膜方法, 挤压吹制法成膜温度高, 需避免用强挥发性物质。Gao 等^[77] 研究了 Nisin 和 ϵ -PL 两种商用抗菌素的协同作用, 并采用挤压吹制法制备了淀粉/聚己二酸丁二醇酯抗菌膜。研究结果表明, 添加了 Nisin 和 ϵ -PL 的复合膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌率超过 90%。

从而能够有效延长鲜桃的储藏期。除了负载天然活性物质外,也有研究将 Nisin 与合成物质复配用于食品保鲜。例如, Diban 等^[78]将 Nisin 与山梨酸钾、壳聚糖以及银替代沸石进行复配,并采用吹制法得到一种活性多层膜,并将其用于 Kasar 奶酪的保鲜。与空白对照膜相比,这种活性薄膜能够将具备不同功能特性的聚合物进行组合,能够有效抑制霉菌的滋生,显著延长 Kasar 奶酪的保质期,在食品保鲜领域展现出良好的应用前景。

3.4 基于静电纺丝法的 Nisin 复配型食品活性包装

近年来,纳米材料因其独特的结构特性在活性物质稳态化及控释领域备受关注。静电纺丝技术凭借设备简单、操作方便、条件温和,所得微/纳米材料控释性好等优势,成为食品活性包装研究的热点。静电纺丝装置主要由电源、注射泵、喷头和接收板组成^[79]。根据喷头结构及纤维结构的不同,静电纺丝可分为单轴、同轴及三轴静电纺丝^[80]。目前,该技术多用于制备负载 Nisin 单一抗菌剂的纤维膜。通过单轴、同轴、三轴静电纺丝制得的 Nisin 纤维膜对金黄色葡萄球菌等革兰氏阳性菌展现出良好的抗菌活性,且能有效控释 Nisin,延长食品保质期^[81-82]。然而,基于 Nisin 构建的纤维膜抗菌谱较窄,防腐保鲜效果仍存在局限性。因此,以 Nisin 复配物为活性成分构建活性包装材料,成为该领域的重点研究方向。

3.4.1 基于单轴静电纺丝法的 Nisin 复配型食品活性包装膜

单轴静电纺丝是最简单的静电纺丝方法。该方法首先将活性物质溶解于天然或合成聚合物基材中制成纺丝液,然后借助单轴喷头制备负载活性物质的单层结构纳米纤维^[83-84]。比如, Wang 等^[85]利用单轴静电纺丝技术将 Nisin 与氧化锆(ZrO_2)负载于聚乙烯醇/小麦面筋蛋白(WG)制得的 Nisin-PVA/WG/ ZrO_2 纤维膜中,探究二者对纳米纤维膜形貌及其抗菌效果的影响。当 Nisin 和 ZrO_2 添加量分别为 6wt% 和 8wt% 时,纤维膜平均直径最均匀。抑菌及释放实验结果表明,该纤维膜对金黄色葡萄球菌具有较好的抗菌效果(抑菌圈直径 26.6 mm),且纤维膜对 Nisin 和 ZrO_2 的控释效果更好, Nisin 从纳米纤维中的释放符合 Fickian 扩散模型。此外, Meral 等^[86]将 Nisin 和姜黄素共封装于 PVA 单轴纳米纤维中。经该纳米纤维膜处理后,虹鳟鱼片总嗜酸性好氧菌菌落数降低 2.30 lg CFU/g,乳酸菌菌落数降低 3.79 lg CFU/g。此外,姜黄素复配赋予该纤维膜抗氧化作用,能够有效延缓鱼片氧化变质,使其保质期延长至 12 d。Pleva 等^[87]将丁香酚、百里香酚与 Nisin 复配加入玉米醇溶蛋白/聚乙二醇纺丝体系中,构建负载三元复配物的抗菌纳米纤维膜。丁香酚和百里香酚复配能够显著增强该抗菌膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果,有效弥补了 Nisin 对革兰氏阴性菌抗菌性不足的缺陷。

3.4.2 基于同轴静电纺丝法的 Nisin 复配型食品活

性包装膜

单轴静电纺丝是构建 Nisin 复配食品活性包装膜的常见方法,但存在生物活性物质突释等问题,进而会影响其长效保鲜效果^[88]。为解决这一问题,研究者采用同轴静电纺丝技术将 Nisin 与其它复配活性物质共负载到具有核壳结构的纳米纤维中。比如, Duan 等^[89]将羧甲基壳聚糖和 Nisin 复配制成纳米凝胶,负载于同轴纤维芯层,研究纤维膜对鲈鱼的品质保鲜效果。与空白组相比,抗菌纤维膜能够显著抑制革兰氏阳性菌数量和鲈鱼中微生物的生长,使得鲈鱼保质期从 9 d 延长至 15 d。此外,借助同轴静电纺丝技术还可以在纤维核层和壳层分别负载不同生物活性物质,有望实现活性物质的缓控释放。例如, Tajfiroozeh 等^[90]采用同轴静电纺丝技术制备了以壳聚糖/聚氧化乙烯(CS/PEO)为基材的核/壳结构纤维膜,其中芯层负载没食子酸(GA),壳层负载 Nisin。研究表明,单纯的 CS/PEO 纤维膜几乎不具备抗菌和抗氧化活性。而仅负载 Nisin 的纤维膜虽有一定的抗菌效果,但效果较弱,且 Nisin 的加入对纤维膜的抗氧化活性提升贡献甚微。然而,引入 GA 后,纤维膜的拉伸强度和抗氧化能力显著增强,GA/Nisin/CS/PEO 复合膜的 DPPH 自由基清除率可高达 90%。此外,该复合膜中的 GA 和 Nisin 均展现出良好的缓释特性,GA 的缓释周期为 12~20 d, Nisin 的缓释周期为 30~60 d。因此,使用该活性膜能够为食品的长时防腐保鲜提供重要保障。

4 结论与展望

本综述深度剖析了 Nisin 复配抗菌保鲜领域的研究现状,明确了其在食品保鲜中的优势与挑战。Nisin 作为一种天然生物防腐剂,对革兰氏阳性菌具有显著的抑制效果,且安全性高,使其在食品保鲜领域备受关注。然而,当前研究仍存在诸多不足。首先, Nisin 的抗菌机制尚未完全明确,限制了复配体系的精准设计。其次, Nisin 抗菌膜在实际应用中存在抗菌剂释放不理想的问题,缺乏对 Nisin 释放与保鲜效果之间关联的系统性分析,导致保鲜效果难以充分发挥。此外,从基材和成膜技术角度出发的缓控释活性膜研究虽有进展,但仍有待完善,以实现更高效、更持久的抗菌保鲜效果。因此,未来 Nisin 复配保鲜的研究应聚焦于以下几个关键方向: a. 深入研究 Nisin 的抗菌机制,借助基因编辑、蛋白质组学等先进生物技术手段,解析 Nisin 与微生物细胞的相互作用,明确其关键作用靶点和作用途径,为复配体系的合理设计提供坚实的理论基础; b. 加强 Nisin 抗菌膜中抗菌剂释放与保鲜效果关联的研究,优化抗菌膜的配方和制备工艺,实现 Nisin 的缓控释放,提高保鲜效果的可控性; c. 从基材和成膜技术角度出发,进一步探索新型缓控释活性膜的制备方法。开发具有良好生物相容性、机械性能和缓控释功能的基材,结合静电纺丝、层层自组装等先进成膜技术,制备出性能优异的 Nisin 缓控释抗菌膜。综上,通过上述研究方

向的持续探索与推进,不断推动 Nisin 复配抗菌保鲜技术的创新发展,为食品保鲜领域提供更加高效、安全、环保的解决方案,助力食品行业的可持续发展。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] FRANZ C M A P, den BESTEN H M W, BÖHNLEIN C, et al. Reprint of: Microbial food safety in the 21st century: Emerging challenges and foodborne pathogenic bacteria[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 84: 34–37.
- [2] SOLTANI S, HAMMAMI R, COTTER P D, et al. Bacteriocins as a new generation of antimicrobials: Toxicity aspects and regulations[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2021, 45(1): fuaa039.
- [3] WANG Rui, YU Shuang, HUANG Yueying, et al. Synthesis, high yield strategy and application of nisin: A review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(6): 2829–2841.
- [4] KHAN F, SINGH P, JOSHI A S, et al. Multiple potential strategies for the application of nisin and derivatives[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2023, 49(5): 628–657.
- [5] 王佳宇, 胡文忠, 管玉格, 等. 乳酸链球菌素抑菌机理及在食品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 346–350.
- [WANG Jiayu, HU Wenzhong, GUAN Yuge, et al. Research progress on the bacteriostatic mechanism of nisin and its application in food preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 346–350.]
- [6] 吕淑霞, 白泽朴, 代义, 等. 乳酸链球菌素(Nisin)抑菌作用及其抑菌机理的研究[J]. 中国酿造, 2008, 27(5): 87–91. [LÜ Shuxia, BAI Zepu, DAI Yi, et al. Study on antibacterial function and mechanism of Nisin[J]. China Brewing, 2008, 27(5): 87–91.]
- [7] ZHAO Xingchen, MENG Rizeng, SHI Ce, et al. Analysis of the gene expression profile of *Staphylococcus aureus* treated with nisin[J]. Food Control, 2016, 59: 499–506.
- [8] KAWAI Y, KEMPERMAN R, KOK J, et al. The circular bacteriocins gassericin A and circularin A[J]. Current Protein & Peptide Science, 2004, 5(5): 393–398.
- [9] SAHL H G, KORDEL M, BENZ R. Voltage-dependent depolarization of bacterial membranes and artificial lipid bilayers by the peptide antibiotic nisin[J]. Archives of Microbiology, 1987, 149(2): 120–124.
- [10] PUNYAUPPA-PATH S, PHUMKHACHORN P, RATANACHAIKUNSOPON P. Nisin: Production and mechanism of antimicrobial action[J]. International Journal of Current Research and Review, 2015, 7: 47–53.
- [11] WU Mengjie, DONG Qingli, YAN Hui, et al. Bacteriostatic potential of nisin and sesamol combination against *Listeria monocytogenes* in chilled raw tuna fillets[J]. LWT, 2023, 183: 114924.
- [12] YAN Hui, WU Mengjie, GAO Binru, et al. Inhibition and eradication of *Listeria monocytogenes* biofilm using the combined treatment with nisin and sesamol[J]. LWT, 2024, 198: 116015.
- [13] HOSSAIN M I, RAHAMAN M M F, TOUSHIK S H, et al. Antibiofilm effect of nisin alone and combined with food-grade oil components (thymol and eugenol) against *Listeria monocytogenes* cocktail culture on food and food-contact surfaces[J]. Food Control, 2022, 135: 108796.
- [14] CHURKLAMW, CHATURONGAKULS, NGAMWONGSATTIT 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.
- [15] CHEN Hong, JI Pengcheng, QI Yueheng, et al. Inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms by thymoquinone in combination with nisin[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1029412.
- [16] 钱红玫, 胡文忠, 李琳, 等. 乳酸链球菌素和柠檬酸对甜樱桃中沙门氏菌的抑制[J]. 食品工业科技, 2017, 38(15): 275–279.
- [QIAN Hongmei, HU Wenzhong, LI Lin, et al. Inhibitory effects of Nisin and citric acid on *Salmonella* on sweet cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(15): 275–279.]
- [17] YOON J H, JEONG D Y, LEE S B, et al. Decontamination of *Listeria monocytogenes* in king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*) by combined treatments with organic acids, nisin, and ultrasound[J]. LWT, 2021, 144: 111207.
- [18] LIU Jiaheng, HUANG Rongrong, SONG Qianqian, et al. Combinational antibacterial activity of nisin and 3-phenyllactic acid and their co-production by engineered *Lactococcus lactis*[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 612105.
- [19] SHRESTHA S, ERDMANN J J, RIEMANN M, et al. Ready-to-eat egg products formulated with nisin and organic acids to control *Listeria monocytogenes*[J]. Journal of Food Protection, 2023, 86(5): 100081.
- [20] 史文艳, 孙震. ϵ -聚赖氨酸盐酸盐与 Nisin 对蜡状芽孢杆菌的协同作用及机理[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 15–19, 103.
- [SHI Wenyan, SUN Zhen. Synergistic effect and mechanism of ϵ -polylysine hydrochloride and nisin on *Bacillus cereus*[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 15–19, 103.]
- [21] 魏奇, 钟鑫荣, 龚镁青, 等. ϵ -聚赖氨酸和乳酸链球菌素协同抑菌效应的研究[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(21): 38–42. [WEI Qi, ZHONG Xinrong, GONG Meiqing, et al. Study on the antibacterial activity of ϵ -polylysine and nisin[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(21): 38–42.]
- [22] ZENG Liping, FAN Aiping, YANG Guangming, et al. Nisin and ϵ -polylysine combined treatment enhances quality of fresh-cut jackfruit at refrigerated storage[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1299810.
- [23] JAHANGIRI A, NESHANI A, ALI MIRHOSSEINI S, et al. Synergistic effect of two antimicrobial peptides, Nisin and P10 with conventional antibiotics against extensively drug-resistant *Acinetobacter baumannii* and colistin-resistant *Pseudomonas aeruginosa* isolates[J]. Microbial Pathogenesis, 2021, 150: 104700.
- [24] ROSHANAK S, SHAHIDI F, TABATABAEI Y F, et al. Evaluation of antimicrobial activity of buforin I and nisin and synergistic effect of the combination of them as a novel antimicrobial preservative[J]. Journal of Food Protection, 2020, 83(11): 2018–2025.
- [25] HANUŠOVÁ K, ŠTASTNÁ M, VOTAVOVÁ L, et al. Polymer films releasing nisin and/or natamycin from polyvinylidene chloride lacquer coating: Nisin and natamycin migration, efficiency in cheese packaging[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 491–496.
- [26] TAKUNDWA B A, BHAGWAT P, PILLAI S, et al. Antimicrobial efficacy of nisin, oregano and ultrasound against *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* on lettuce[J]. LWT, 2021, 139: 110522.
- [27] da SILVA D A M, FERNANDES M S, ENDO E H, et al. Control of the growth of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in industri-

- alized orange juice using rosemary essential oil and nisin[J]. Letters in Applied Microbiology, 2021, 72(1): 41–52.
- [28] 丁华, 王建清, 王玉峰, 等. 罗勒精油和 Nisin 复配抑菌剂抑菌效果的研究[J]. 中国调味品, 2016, 41(7): 20–25. [DING Hua, WANG Jianqing, WANG Yufeng, et al. Study on antibacterial effect of compound bacteriostatic agent of basil essential oil and nisin[J]. China Condiment, 2016, 41(7): 20–25.]
- [29] ZHAO Xingchen, SHI Ce, MENG Rizeng, et al. Effect of nisin and *Perilla* oil combination against *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in milk[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2644–2653.
- [30] 张旭阳. 高纯度乳酸链球菌素单独/联合次氯酸钠对粪肠球菌抗菌效果的体外研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019. [ZHANG Xuyang. An *in vitro* study of the antibacterial effects of high-purity nisin Z alone and in combination with sodium hypochlorite against *Enterococcus faecalis* [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.]
- [31] KARKON S, EIMANI G B. Investigating synergistic effect of silver nanoparticles and nisin on *Escherichia coli* genome[J]. Biological Journal of Microorganism, 2019, 8(29): 11–23.
- [32] ZIMET P, VALADEZ R, RAFFAELLI S, et al. Biogenic silver nanoparticles conjugated with nisin: Improving the antimicrobial and antibiofilm properties of nanomaterials[J]. Chemistry, 2021, 3(4): 1271–1285.
- [33] 朱亚, 师红新, 赵永平. 花椒提取物和乳酸链球菌素复配对冷鲜肉保鲜效果的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(7): 111–115. [ZHU Ya, SHI Hongxin, ZHAO Yongping. Effect of *Zanthoxylum bungeanum* extract and nisin on the preservation of chilled meat[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(7): 111–115.]
- [34] ZHAO Xue, CHEN Lin, ZHAO Lin, et al. Antimicrobial kinetics of nisin and grape seed extract against inoculated *Listeria monocytogenes* on cooked shrimps: Survival and residual effects[J]. Food Control, 2020, 115: 107278.
- [35] 田子豪, 郭进琪, 王相茹, 等. Nisin 和韭菜籽提取物对金黄色葡萄球菌的抑菌作用及应用[J/OL]. 食品工业科技, 1–16. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040375>. [TIAN Z H, GUO J Q, WANG X R, et al. Synergistic antibacterial effects and application of nisin and chive seed extract on *Staphylococcus aureus* [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–16. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040375>.]
- [36] MARREZ D A, EL-SSAYAD M F, SHAKER A S, et al. Antimicrobial synergy interaction of microalgae and nisin to improve ice cream shelf life and retaining quality[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105638.
- [37] ALMEIDA L N, BARRETO P C M, BRANDELLI A. Antimicrobial activity of lysozyme-nisin co-encapsulated in liposomes coated with polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 1–9.
- [38] IBARRA-SÁNCHEZ L A, van TASSELL M L, MILLER M J. Antimicrobial behavior of phage endolysin PlyP100 and its synergy with nisin to control *Listeria monocytogenes* in Queso Fresco[J]. Food Microbiology, 2018, 72: 128–134.
- [39] HE Mu, GUO Quanyou, SONG Wei, et al. Inhibitory effects of chitosan combined with nisin on *Shewanella* spp. isolated from *Pseudosciaena crocea* [J]. Food Control, 2017, 79: 349–355.
- [40] KAZEMZADEH S, ABED-ELMDOUST A, MIRVAGHEFI A, et al. Physicochemical evaluations of chitosan/nisin nanocapsulation and its synergistic effects in quality preservation in tilapia fish sausage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(3): e16355.
- [41] CHEN Xuening, LAN Weiqing, XIE Jing. Natural phenolic compounds: Antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138198.
- [42] DAI Zenghui, HAN Linna, LI Zhe, et al. Combination of chitosan, tea polyphenols, and nisin on the bacterial inhibition and quality maintenance of plant-based meat[J]. Foods, 2022, 11(10): 1524.
- [43] GUO Hui, ZHAO Fengju, LEI Bingshuang, et al. Synergistic antimicrobial system based on nisin and α -hydroxy organic acids[J]. Archives of Microbiology, 2023, 205(6): 225.
- [44] 杨志娜, 赵亚凡, 马丹丹, 等. Nisin 及纳他霉素生物保鲜剂对干豆腐保鲜效果的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(10): 21–27. [YANG Lina, ZHAO Yafan, MA Dandan, et al. Effect of nisin and natamycin biological preservative on fresh-keeping of dried tofu[J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 21–27.]
- [45] 朱志妍, 田浩, 潘俊, 等. 迷迭香提取物的制备及抗氧化、抑菌活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 461–469. [ZHU Zhiyan, TIAN Hao, PAN Jun, et al. Research progress in preparation, antioxidant and antibacterial activities of rosemary extract[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 461–469.]
- [46] HEMMATI F, BAHRAMI A, ESFANJANI A F, et al. Electrospun antimicrobial materials: Advanced packaging materials for food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 520–533.
- [47] LIU Q, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effects of nanoemulsion-based active coatings with composite mixture of star anise essential oil, polylysine, and nisin on the quality and shelf life of ready-to-eat Yao meat products[J]. Food Control, 2020, 107: 106771.
- [48] 刘瑾瑾, 朱思明. 复合保鲜剂对鲜湿米粉防腐保鲜效果研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(10): 79–83. [LIU Jinjin, ZHU Siming. Study on the preservative and fresh-keeping effect of compound preservatives on fresh rice noodles[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(10): 79–83.]
- [49] VERDI M C, MELIAN C, CASTELLANO P, et al. Synergistic antimicrobial effect of lactocin AL705 and nisin combined with organic acid salts against *Listeria innocua* 7 in broth and a hard cheese[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(1): 267–275.
- [50] 刘苗苗, 白亚男, 张鑫, 等. ϵ -聚赖氨酸基卤牛肉保鲜剂的配比优化研究[J]. 陕西科技大学学报, 2025, 43(3): 66–72, 79. [LIU Miaomiao, BAI Yanan, ZHANG Xin, et al. Optimization of the formulation of ϵ -polylysine-based preservative for brined beef[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2025, 43(3): 66–72, 79.]
- [51] LI Qingxiang, YU Shuna, HAN Jinzhi, et al. Synergistic antibacterial activity and mechanism of action of nisin/carvacrol combination against *Staphylococcus aureus* and their application in the infecting pasteurized milk[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132009.
- [52] 陈旋, 鲁保芬, 向琴, 等. 茶多酚/壳聚糖/乳酸链球菌素复合涂膜处理对澳洲坚果仁贮藏品质的影响分析[J]. 现代食品, 2023(16): 109–114. [CHEN Xuan, LU Baoqin, XIANG Qin, et al. Analysis on effect of tea polyphenol/chitosan/lactostreptococci composite coating on storage quality of Macadamia nut kernels[J]. Modern Food, 2023(16): 109–114.]
- [53] 王欣, 李婷婷, 冯龙斐, 等. 负载蓝莓花青素的壳聚糖基智能指示膜监测花蛤新鲜度的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 10–19. [WANG Xin, LI Tingting, FENG Longfei, et al. Chitosan-

- based smart indicator film loaded with blueberry anthocyanins for monitoring clam freshness[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(11): 10–19.]
- [54] 杜津. 柚子精油微胶囊的制备及其在鲜切苹果保鲜中的应用[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [DU Jin. Preparation of pomelo essential oil microcapsule and its application on the preservation of fresh-cut apples[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [55] WATADA A E, QIL. Quality of fresh-cut produce[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1999, 15(3): 201–205.
- [56] 苏琰, 李融. 抗菌肽的食品保鲜应用及生物合成研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(7): 208–215. [SU Yan, LI Rong. Advance on biosynthesis of antibacterial peptides and its application in food preservation[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(7): 208–215.]
- [57] 商立超, 赵凤春, 弓志青, 等. 抗坏血酸联合乳酸链球菌素复合涂膜保鲜采后双孢蘑菇研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(20): 346–351. [SHANG Lichao, ZHAO Fengchun, GONG Zhiqing, et al. Preservation of postharvest *Agaricus bisporus* by V_C /nisin composite coating[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20): 346–351.]
- [58] 李晨, 牛泽洁, 李文婕, 等. BTI 和 Nisin 复合涂膜液对鲈鱼鱼糜的保鲜效果[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(22): 8–13. [LI Chen, NIU Zejie, LI Wenjie, et al. Preservation effect of composite coating liquid containing BTI and nisin on *Lateolabrax japonicus* surimi[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(22): 8–13.]
- [59] ELDIB R, KHOJAH E, ELHAKEM A, et al. Chitosan, nisin, silicon dioxide nanoparticles coating films effects on blueberry (*Vaccinium myrtillus*) quality[J]. *Coatings*, 2020, 10(10): 962.
- [60] CAO Y, WARNER R D, FANG Z X. Effect of chitosan/nisin/gallic acid coating on preservation of pork loin in high oxygen modified atmosphere packaging[J]. *Food Control*, 2019, 101: 9–16.
- [61] SONG Zunyang, LI Feng, GUAN Hui, et al. Combination of nisin and ϵ -polylysine with chitosan coating inhibits the white blush of fresh-cut carrots[J]. *Food Control*, 2017, 74: 34–44.
- [62] 侯晓卫, 唐善虎, 李思宁, 等. 复合保鲜涂膜液对冷鲜牦牛肉保鲜及抗氧化效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(7): 269–274. [HOU Xiaowei, TANG Shanhu, LI Sining, et al. Effect of combined preservative coating solutions on yak meat quality and antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(7): 269–274.]
- [63] LIU Jingbo, CHENG Dongkun, ZHANG Deju, et al. Incorporating ϵ -polylysine hydrochloride, tea polyphenols, nisin, and ascorbic acid into edible coating solutions: Effect on quality and shelf life of marinated eggs[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(12): 2683–2696.
- [64] 陈雪滇, 雒举, 黄林鑫, 等. 壳聚糖/乳酸链球菌素/茶多酚复合膜在锥栗保鲜中的应用[J]. *武夷学院学报*, 2023, 42(12): 20–25. [CHEN Xuezhen, LUO Ju, HUANG Linxin, et al. Application of chitosan/lactostreptococcus/tea polyphenol composite film on preservation of *Castanea henryi*[J]. *Journal of Wuyi University*, 2023, 42(12): 20–25.]
- [65] PRAKOSO F A H, INDIARTO R, UTAMA G L. Edible film casting techniques and materials and their utilization for meat-based product packaging[J]. *Polymers*, 2023, 15(13): 2800.
- [66] LIU Rui, WANG Jing, ZHANG Yan, et al. Biodegradable and gelatin-based composite films incorporating lactoferrin-nisin active nanoparticles: Preparation, characterization, antibacterial applications of cheese and chicken[J]. *Applied Food Research*, 2025, 5(1): 100883.
- [67] JIANG Kai, LU Wangwei, ZHU Bifen, et al. Study on the property of mesoporous silica nanoparticles loaded with nisin for poly (lactic acid)-based packaging film[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(10): 6676–6690.
- [68] KAEWPRACHU P, BEN AMARA C, OULAHAL N, et al. Gelatin films with nisin and catechin for minced pork preservation[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 18: 173–183.
- [69] 谢闰生, 曹兴业, 李培骏. Nisin@果胶基纳米银复合膜的绿色制备及其抗菌应用[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第二十届年会论文摘要集. 长沙: 韶关学院广东省食药资源利用与保护重点实验室; 桂林理工大学化学与生物工程学院; 韶关学院食品学院. 2023: 421–422. [XIE R S, CAO X Y, LI P J. Green preparation of the nisin @ pectin-AgNPs composite membrane and its application[C]//Chinese Institute of Food Science and Technology. Abstracts of the 20th Annual Meeting of CIFST. Changsha: Key Laboratory of Food and Drug Resource Utilization and Protection in Guangdong Province, Shaoguan University; School of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology; School of Food Science, Shaoguan University. 2023: 421–422.]
- [70] WU Chunhua, JIANG Haixin, ZHAO Jianbo, et al. A novel strategy to formulate edible active-intelligent packaging films for achieving dynamic visualization of product freshness[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107998.
- [71] CHANG S H, CHEN Y J, TSENG H J, et al. Applications of nisin and EDTA in food packaging for improving fabricated chitosan-poly lactate plastic film performance and fish fillet preservation[J]. *Membranes*, 2021, 11(11): 852.
- [72] LUCIANO C G, TESSARO L, BONILLA J, et al. Application of bi-layers active gelatin films for sliced dried-cured coppa conservation[J]. *Meat Science*, 2022, 189: 108821.
- [73] CHENG Le, LI Xue, AN Siyang, et al. Preparation and characterization of polyethylene-based composite films coated with carboxymethyl chitosan/sodium alginate/nisin and application in the packaging of *Rosa roxburghii* Tratt.[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, 43: 101295.
- [74] KUMAR L, RAMAKANTH D, AKHILA K, et al. Edible films and coatings for food packaging applications: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(1): 875–900.
- [75] LOPRESTI F, BOTTA L, LA CARRUBBA V, et al. Combining carvacrol and nisin in biodegradable films for antibacterial packaging applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 117–126.
- [76] 许立帆. 聚乙烯醇/淀粉薄膜挤出吹塑工艺及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008. [XU Lifan. Study on the technology and properties of PVA/starch bubble film[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.]
- [77] GAO Shan, ZHAI Xiaosong, CHENG Yue, et al. Starch/PBAT blown antimicrobial films based on the synergistic effects of two commercial antimicrobial peptides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 204: 457–465.
- [78] DIBLAN S, KAYA S. Shelf life modelling of kaşar cheese packaged with potassium sorbate, nisin, silver substituted zeolite, or chitosan incorporated active multilayer plastic films[J]. *International Dairy Journal*, 2023, 140: 105596.
- [79] ESFANJANI A F, JAFARI S M. Nanoencapsulation of phenolic compounds and antioxidants[J]. *Nanoencapsulation of Food Bioactive Ingredients*, 2017: 63–101.
- [80] KEIROUZ A, WANG Z, REDDY V S, et al. The history of electrospinning: Past, present, and future developments[J]. *Ad-*

- vanced Materials Technologies, 2023, 8: 2201723.
- [81] VENCATO A A, CLERICI N J, MENDES JUCHEM A L, et al. Nisin electrospun nanofibers as promising active food packaging[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 400: 112643.
- [82] HAN D, SHERMAN S, FILOCAMO S, et al. Long-term antimicrobial effect of nisin released from electrospun triaxial fiber membranes[J]. Acta Biomaterialia, 2017, 53: 242–249.
- [83] ROJAS A, VELÁSQUEZ E, GARRIDO L, et al. Design of active electrospun mats with single and core-shell structures to achieve different curcumin release kinetics[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 273: 109900.
- [84] REZAEINIA H, EMADZADEH B, GHORANI B. Electrospun balangu (*Lallemantia royleana*) hydrocolloid nanofiber mat as a fast-dissolving carrier for bergamot essential oil[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105312.
- [85] WANG Hualin, SHE Yi, CHU Chengjiang, et al. Preparation, antimicrobial and release behaviors of nisin-poly (vinyl alcohol)/wheat gluten/ZrO₂ nanofibrous membranes[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(14): 5068–5078.
- [86] MERAL R, ALAV A, KARAKAS C, et al. Effect of electrospun nisin and curcumin loaded nanomats on the microbial quality, hardness and sensory characteristics of rainbow trout fillet[J]. LWT, 2019, 113: 108292.
- [87] PLEVA P, BARTOŠOVÁ L, JANALÍKOVÁ M, et al. Biodegradable zein/PEG nanofibers incorporated with natural antimicrobial compounds for eco-friendly food packaging[J]. New Biotechnology, 2025, 88: 12–21.
- [88] MIN Tiantian, ZHOU Liping, SUN Xiaoli, et al. Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review[J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133239.
- [89] DUAN Mengxia, SUN Jishuai, YU Shan, et al. Insights into electrospun pullulan-carboxymethyl chitosan/PEO core-shell nanofibers loaded with nanogels for food antibacterial packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123433.
- [90] TAJFIROOZEH F, MORADI A, SHAHIDI F, et al. Fabrication and characterization of gallic-acid/nisin loaded electrospun core/shell chitosan/polyethylene oxide nanofiberous membranes with free radical scavenging capacity and antimicrobial activity for food packing applications[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102529.