

综论

ϵ -聚赖氨酸抑菌机制及其在肉类保鲜中的应用

曹云刚¹, 张瀚丹¹, 张鑫¹, 陆瑞琪², 卞忠明², 刘苗苗^{1*}, 黄峻榕^{1*}

(1. 陕西科技大学 食品与生物工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 江苏一鸣生物股份有限公司, 江苏 泰兴 225400)

摘要: 肉制品营养丰富, 但极易腐败变质, 亟需寻求绿色、高效的保鲜技术。 ϵ -聚赖氨酸是一种天然抗菌肽, 具有抑菌活性高、稳定性强、生物降解性高、安全性好等优点, 在食品保鲜和防腐领域极具开发潜力。目前, 基于 ϵ -聚赖氨酸与成膜材料联合制备的复合膜已成为防腐保鲜技术的研究热点。首先, 综述了 ϵ -聚赖氨酸的基本性质、抑菌活性及抑菌机制; 其次, 探讨了 ϵ -聚赖氨酸对肉制品品质的系统影响; 最后, 重点介绍了 ϵ -聚赖氨酸与蛋白质、多糖、聚乙烯醇等制备的复合膜特性及其在肉制品保鲜中的应用进展。

关键词: ϵ -聚赖氨酸; 抑菌机制; 肉制品; 复合膜; 抑菌保鲜

中图分类号: TS251.5 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2022)01-0001-06

Antibacterial mechanism of ϵ -poly-L-lysine and its application in meat preservation

CAO Yungang¹, ZHANG Handan¹, ZHANG Xin¹, LU Ruiqi²,
BIAN Zhongming², LIU Miaomiao^{1*}, HUANG Junrong^{1*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. Jiangsu Yiming Biological Technology Co., Ltd., Taixing 225400, Jiangsu, China)

Abstract: Meat products are rich in nutrition but prone to corruption. Therefore, it is urgent to explore green and efficient technology for meat preservation. ϵ -Poly-L-lysine is a kind of natural antimicrobial peptide and possesses high antibacterial activity, strong stability, high biodegradability as well as good safety, which has great potential for food preservation and antisepsis. Currently, the composite films prepared by ϵ -poly-L-lysine and film-forming materials have become one of the research interests. Firstly, the basic properties, antibacterial activity and antibacterial mechanism of ϵ -poly-L-lysine are reviewed. Subsequently, the effects of ϵ -poly-L-lysine on the quality of meat products are discussed. Finally, the characteristics of composite films prepared by ϵ -poly-L-lysine and proteins, polysaccharides and polyvinyl alcohol and their applications in the meat preservation are emphatically introduced.

Key words: ϵ -poly-L-lysine; antibacterial mechanism; meat products; composite membranes; bacteriostasis and preservation

随着生活品质的提高, 人们对新鲜肉制品的需求也不断增大。肉制品营养丰富、水分含量高, 在加工、运输和贮存过程中极易受到腐败性、致病性微生物的污染, 引起腐败变质, 不仅降低其感官品质和营养价值, 带来巨大经济损失, 还易引发食物

中毒, 危害人体健康。传统的肉制品保鲜技术主要有冷冻保鲜技术、高温灭菌保鲜技术、真空包装技术和化学保鲜技术等, 但都存在一定的缺陷。冷冻保鲜技术需要冷柜、冷库等设备, 同时肉制品冷冻后其嫩度、保水性等均不同程度下降; 高温灭菌保鲜

收稿日期: 2021-07-15; 定用日期: 2021-10-09; DOI: 10.13550/j.jxhg.20210722

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(31801480); 陕西省自然科学基金青年项目(2020JQ-716); 陕西科技大学&江苏一鸣生物股份有限公司“产学研”合作项目

作者简介: 曹云刚(1985—), 男, 副教授, E-mail: caoyungang@sust.edu.cn。联系人: 刘苗苗(1991—), 女, 讲师, E-mail: liumiaomiao@sust.edu.cn; 黄峻榕(1971—), 女, 教授, E-mail: huangjunrong@sust.edu.cn。

技术易对肉制品风味、品质等产生不良影响；真空包装技术对包装材料要求较高，且一般需与其他防腐方法结合使用；化学保鲜剂（目前应用较多的有山梨酸及其钾盐类、抗坏血酸和二氧化氯等）的过量添加不仅破坏肉制品特有品质，其残留还易造成食品安全问题。因此，寻求更加绿色、安全、有效的保鲜技术已成为肉制品加工领域的研究热点。

ϵ -聚赖氨酸（ ϵ -PL）是一种天然抗菌肽，抑菌谱广、稳定性强，同时兼具生物可降解性高、安全性好等优势，且已被美国、日本、韩国和中国等国家批准为食品防腐剂，在食品保鲜和防腐领域极具开发潜力。中国 ϵ -PL 的工业化生产已初具规模，但产品用途较为单一，存在开发不足、产品同质化等问题^[1]。近年来，采用 ϵ -PL 与其他防腐抑菌剂及成膜材料复配制备复合膜已成为防腐保鲜技术的研究趋势，极有可能成为未来 ϵ -PL 应用研究的新方向。本文将主要针对 ϵ -PL 的抑菌保鲜应用研究进行综述，着重探讨 ϵ -PL 的抑菌机制及其多种复合膜在肉类保鲜领域的应用新进展，以期对 ϵ -PL 的高值化开发利用和肉制品的绿色、高效保鲜提供参考。

1 ϵ -PL 概述

ϵ -PL 是一种天然抗菌肽，主要由白色链霉菌（*Streptomyces albus*）发酵葡萄糖产生，L-赖氨酸是合成 ϵ -PL 的前体物质，其在 ϵ -PL 合成酶作用下聚合为 ϵ -PL。SHIMA 等^[2]于 1977 年首次在 No.346 白色链霉菌中发现 ϵ -PL，此后，研究者陆续发现不少能够合成 ϵ -PL 的菌株，如北里孢菌（*Kitasatosporia*）、芽孢杆菌（*Bacillus*）和丝状真菌（*Filamentous fungi*）等^[3-6]。 ϵ -PL 是含有 25~30 个 L-赖氨酸的同型氨基酸聚合物，其残基之间通过 α -羧基与 ϵ -氨基缩合形成，相对分子质量为 $(3.0\sim 4.5) \times 10^6$ ，聚合度一般为 25~30^[7-9]。

ϵ -PL 外观呈浅黄色或白色，吸湿性好，具有良好的水溶性，不溶于乙酸乙酯、乙醚等有机溶剂^[10]。理化分析发现， ϵ -PL 呈茚三酮阳性，熔点为 172.8 °C，没有固定熔点，在 250 °C 时软化分解但是不会熔化^[11-13]。 ϵ -PL 还具有热稳定性强、安全性好、生物可降解性高^[14]等良好的生物学性质。研究表明， ϵ -PL 经 120 °C、20 min 或者 100 °C、30 min 加热处理后，均不会分解，仍具有抑菌活性^[15]，因而， ϵ -PL 可与原料一起进行热处理加工，以达到防止二次污染的目的。 ϵ -PL 的安全性已经在小鼠实验中得到证实，其不会对胚胎的发育、生长繁殖、神经和免疫器官产生毒副作用^[16]。对 ϵ -PL 的生物可降解性分析发现，该聚合多肽在进入人体后，可被分

解为人体必需的赖氨酸。因此， ϵ -PL 是一种安全无害的食品保鲜剂。

目前， ϵ -PL 已广泛应用于奶酪、肉制品、水产品等多种食品产品中，以减缓食品的腐败变质，延长产品贮藏期^[17-19]，如图 1 所示。除此之外，基于其良好稳定的性质， ϵ -PL 及其衍生品已经在医药、电子等工业领域中得到广泛应用^[20]。在食品安全领域， ϵ -PL 抑菌活性是最受关注的特性，已成为近年来研究的热门课题。

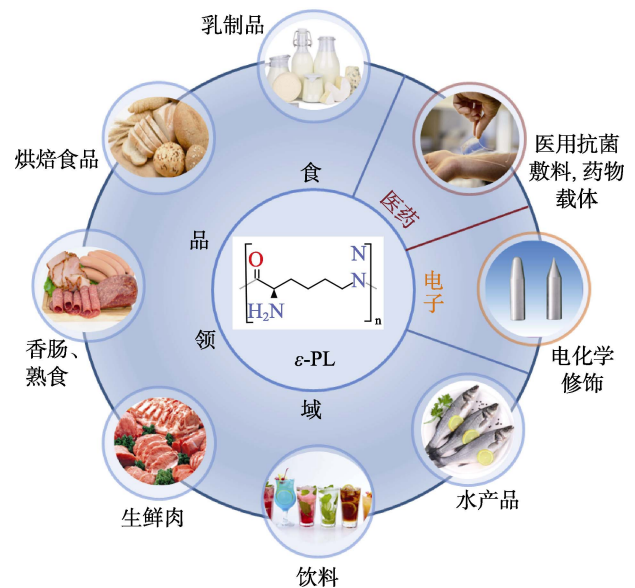


图 1 ϵ -PL 的应用领域
Fig. 1 Application fields of ϵ -PL

2 ϵ -PL 的抑菌活性及机制

2.1 ϵ -PL 的抑菌活性

ϵ -PL 具有广谱抑菌活性。研究表明， ϵ -PL 对枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）、腐生葡萄球菌（*Staphylococcus saprophyticus*）、肠球菌（*Enterococcus*）等革兰氏阳性菌，大肠杆菌（*Escherichia coli*）、沙门氏菌（*Salmonella*）等革兰氏阴性菌，酿酒酵母菌（*Saccharomyces cerevisiae*）、热带假丝酵母菌（*Candida tropicalis*）、法红酵母菌（*Rhodotorula farinensis*）等酵母菌属，以及黑曲霉（*Aspergillus niger*）、产黄青霉（*Penicillium chrysogenum*）等霉菌均具有显著抑制作用^[21]。除对乳链球菌（*Streptococcus lactis*）的最小抑菌质量浓度为 150 $\mu\text{g/mL}$ 外， ϵ -PL 对其他多数革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌及酵母菌的最小抑菌质量浓度均 $\leq 50 \mu\text{g/mL}$ ^[21]。 ϵ -PL 对霉菌的最小抑菌质量浓度均 $> 50 \mu\text{g/mL}$ ^[21]。除浮游态菌体外， ϵ -PL 对生物被膜态菌体也具有一定抑制作用。结晶紫染色分析发现， ϵ -PL 能够抑制金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）生物膜的形成，且呈现

浓度依赖效应, 浓度越高对生物膜形成的抑制作用越强^[22-23]; 时文静等^[24]应用结晶紫法研究发现, ϵ -PL 可抑制鲍曼不动杆菌 (*Acinetobacter baumannii*) 生物膜的形成, 且随着 ϵ -PL 浓度的增加, 其对生物膜抑制作用增强。

2.2 ϵ -PL 的抑菌机制

目前普遍认为, ϵ -PL 的抑菌机制是毡毯模型理论, 即膜攻击理论, 如图 2A 所示。 ϵ -PL 与细胞膜的相互作用属于物理行为, 细胞膜因 ϵ -PL 的作用受到损伤, 导致菌体细胞死亡。另有研究者提出, ϵ -PL 会抑制微生物内部能量代谢, 进而降低细胞存活率。还有研究者认为, ϵ -PL 可引起 DNA 损伤, 干扰基因表达, 从而引起菌体细胞死亡。

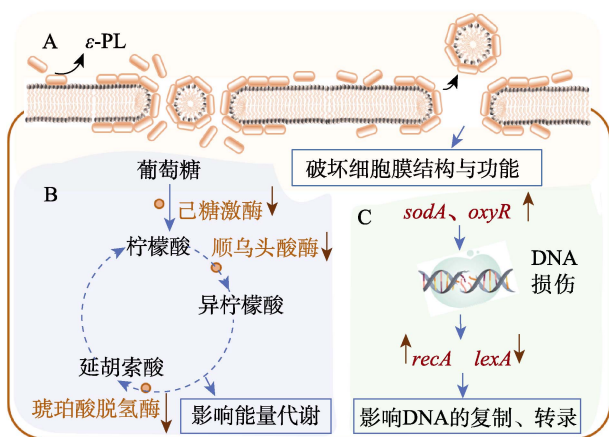


图 2 ϵ -PL 的抑菌机理

Fig. 2 Antibacterial mechanism of ϵ -PL

2.2.1 破坏细胞膜结构与功能

根据毡毯模型理论, ϵ -PL 通过静电作用与细胞膜磷脂头基结合, 磷脂头基取代二价阳离子, 在细胞膜上形成负曲率折叠, 使细胞膜破裂, 最终导致微生物死亡^[25]。虽然革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的细胞膜结构区别较大, 但 ϵ -PL 均是通过破坏菌体细胞膜的完整性, 进而诱导菌体死亡。大肠杆菌是一种常见的革兰氏阴性菌^[26-27], 广泛存在于动植物产品中^[28-30]。王梓源等^[31]揭示了 ϵ -PL 对大肠杆菌的抑菌机制: ϵ -PL 通过攻击细胞膜, 破坏其完整性, 使其正常生命代谢活动受到显著影响, 进而导致菌体细胞死亡, 从而达到抑菌目的。ZHANG 等^[32]也证实, 低浓度的 ϵ -PL 可以改变大肠杆菌 O157:H7 (*Escherichia coli* O157:H7) 细胞膜的通透性和功能性, 从而导致细胞死亡。蓝蔚青等^[33]阐释了 ϵ -PL 对腐生葡萄球菌的作用机制: ϵ -PL 能够改变细胞膜的通透性并使其完整性受损, 引起菌体死亡。LI 等^[34]研究发现, 随着 ϵ -PL 浓度的增加, 金黄色葡萄球菌的细胞膜受到破坏, 细胞内容物渗出加剧, 其抑制作用在前 45 min 尤其显著。

ϵ -PL 也可通过影响酵母菌的细胞膜结构和功能进而实现抑菌目的。BO 等^[35-36]和侯颖等^[37]研究表明, 不同浓度的 ϵ -PL 对酿酒酵母菌的抑制程度及机理呈现特异性。高浓度的 ϵ -PL 能够破坏酿酒酵母菌的细胞膜结构, 导致细胞死亡; 低浓度 ϵ -PL 则通过改变酿酒酵母菌细胞膜的通透性, 破坏细胞膜的功能, 进而达到对酿酒酵母菌的抑制效果。因此, ϵ -PL 能够破坏微生物细胞膜的结构, 改变其功能性, 导致菌体死亡, 最终达到抑菌保鲜的目的。

2.2.2 抑制能量代谢

糖酵解和三羧酸 (TCA) 循环是需氧生物体内普遍存在的重要代谢途径, 是机体代谢所需能量的主要来源。 ϵ -PL 能够抑制微生物体内的糖酵解和 TCA 循环, 影响其正常代谢过程, 进而导致菌体死亡。邢蓓^[38]研究表明, 在 ϵ -PL 作用下, 金黄色葡萄球菌糖酵解和 TCA 循环的关键酶 (如己糖激酶、顺乌头酸酶和琥珀酸脱氢酶) 的酶活力均不断下降, 且呈浓度依赖效应 (图 2B)。蓝蔚青等^[33]研究发现, ϵ -PL 对腐生葡萄球菌 TCA 循环中的苹果酸脱氢酶及琥珀酸脱氢酶的活性有显著的抑制作用, 进而影响电子传递链与呼吸作用, 抑制菌体代谢活力, 从而导致菌体死亡。

2.2.3 诱导 DNA 损伤

ϵ -PL 能够引起微生物内部的氧化应激反应, 导致胞内重要大分子, 如 DNA 发生氧化损伤 (图 2C)。YE 等^[39]研究发现, 经 ϵ -PL 处理后, 大肠杆菌 O157:H7 中与氧化应激相关的超氧化物歧化酶基因 (*sodA*)、抗氧化系统调节子 (*oxyR*) 表达显著上调; DNA 损伤反应调节基因 (*recA*) 上调, 同时阻遏蛋白基因 (*lexA*) 表达下调, 这表明大肠杆菌 O157:H7 中 DNA 损伤的反应调节功能可能在 ϵ -PL 的作用下受损。周祺等^[40]发现, ϵ -PL 与肠球菌的 DNA 具有较强的结合作用, 可引起 DNA 损伤, 进而影响 DNA 的复制、转录等过程, 最终导致肠球菌死亡。

3 ϵ -PL 对肉制品的影响

3.1 ϵ -PL 对肉制品中微生物的影响

ϵ -PL 作用对肉制品中微生物多样性具有重要影响。侯温甫等^[41]研究表明, ϵ -PL 预处理后, 草鱼鱼肉中不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、青枯菌属 (*Ralstonia*)、嗜冷杆菌属 (*Psychrobacter*) 等相对丰度均有所增加。而金黄杆菌属 (*Chryseobacterium*)、泛菌属 (*Pantoea*)、考克氏菌属 (*Kocuria*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 等相对丰度均有不同程度的下降, 可见 ϵ -PL 对食品中各种微生物的影响具有特异性。徐梅等^[42]研究发现, 与空白组相比, 在盐焗鸡中加入 ϵ -PL 后, 处理组的菌落总数显著降低, 表明

ϵ -PL 可抑制肉制品中微生物的增殖。

3.2 ϵ -PL 对肉制品理化性质及感官品质的影响

挥发性盐基氮 (TVB-N) 含量、pH 和硫代巴比妥酸 (TBA) 值等是评价肉制品品质的重要理化指标。 ϵ -PL 能够通过调控 TVB-N、pH、TBA 等指标的变化影响肉制品的理化性质^[43]。冯建岭等^[44]研究表明,质量浓度为 12.5 和 15.0 g/L 的 ϵ -PL 水溶液浸泡处理能显著降低冷鲜肉中 TVB-N 含量,延长肉制品保质期。李艳青等^[45]研究发现,卤制好的麻辣鸭脖在用灭菌卤水制成的 ϵ -PL 溶液 (ϵ -PL 含量分别为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 g/kg) 中浸泡 30 s 后,其 pH、TVB-N 含量和 TBA 值均优于空白组。可见, ϵ -PL 能够显著改善贮存过程中肉制品理化品质的劣变,延长其货架期。

化学保鲜剂虽然可以达到抑菌保鲜的效果,但在一定程度上会影响肉制品的肉质、色泽、滋味、持水性等感官品质。多项研究表明, ϵ -PL 处理肉制品可有效避免这些不良影响。何丽^[46]研究发现, ϵ -PL 处理能保持草鱼鱼腩的正常颜色和原有鱼香味,且不会对其肉质、滋味和弹性等品质产生不良影响。贺羽等^[47]研究发现,相对于 4 °C 下冷藏的猪肉,经质量浓度 0.24 g/L ϵ -PL 水溶液浸泡处理的猪肉其红度值下降速率较缓,这表明 ϵ -PL 具有一定的护色作用。JIA 等^[48]发现,在太平洋白虾中添加 ϵ -PL 不会对其感官质量产生不良影响;添加 ϵ -PL 组和冷藏组的感官评分均高于空白组,而 ϵ -PL 组的色泽和质地均优于冷藏组。

4 ϵ -PL 复合膜的特性及其在肉制品保鲜中的应用

4.1 ϵ -PL 多糖复合膜

壳聚糖、淀粉、海藻酸钠及魔芋葡甘聚糖等均属多糖类涂膜剂,可通过直接或间接方式成膜,具有良好的降解性,是目前涂膜保鲜技术中的常用材料。

4.1.1 ϵ -PL/壳聚糖复合膜

壳聚糖是一种优质的绿色成膜材料,具有广谱抑菌性、安全无毒、生物可降解及成膜性能优良等特点^[49]。张振^[50]研究表明,壳聚糖- ϵ -PL-卡拉胶 (CA) 复合膜的处理可有效保持中国对虾 4 °C 冷藏期间的品质。壳聚糖- ϵ -PL-CA 复合膜处理能够显著减缓对虾的亮度下降和色调变暗的速度,在贮藏期间保持其良好的色泽。理化分析表明,经该复合膜处理的对虾,在 4 °C 冷藏期间 pH、TVB-N 含量总体上升缓慢,显著优于 ϵ -PL 单一处理组和空白对照组。复合膜处理样品组汁液流失率低,硬度、弹性等性能保持较好。LI 等^[51]利用 ϵ -PL 与壳聚糖和迷

迭香酸复合膜对半滑舌鳎鱼片进行抑菌保鲜,该复合膜可以有效抑制半滑舌鳎鱼片中腺嘌呤核苷三磷酸 (ATP) 相关化合物的分解及游离脂肪酸的积累,延缓腐烂变质。张盼等^[52]研究表明,壳聚糖- ϵ -PL-普鲁兰多糖复合抗菌膜中 ϵ -PL 的添加量为 4 g/L 时可以有效抑制冷鲜牛肉中的致病菌,减缓冷鲜牛肉的腐败变质。

4.1.2 ϵ -PL/淀粉复合膜

淀粉是一类天然可生物降解高分子聚合物,由葡萄糖分子聚合而成。由于淀粉来源广泛、价格低廉、具有可食性等优点,已成为可食性成膜材料中的关注热点^[53]。余作龙等^[54]在 100 mL 水中加入 10.5 g 豌豆淀粉、1.5 g ϵ -PL、0.189 g 甘油和 0.0525 g 海藻酸钠制备得到 ϵ -PL/豌豆淀粉复合膜。抑菌实验发现,在涂有菌液的固体培养基中,复合膜圆片周围出现较大抑菌圈,而且抑菌圈环形区域较大,淀粉膜本身无抑菌性,这说明添加 ϵ -PL 后复合膜具有良好的抑菌活性。邱肖华等^[55]研究发现,在 100 mL 水中添加 11 g 豌豆淀粉、1.2 mL 甘油、0.4 g 海藻酸钠及质量浓度为 64 g/L 的 ϵ -PL 制备复合膜,其周围形成的抑菌圈环形区域较大,说明该复合膜具有良好的抑菌性。

4.1.3 ϵ -PL/其他多糖复合膜

海藻酸钠是一种天然多糖,具有安全性、黏性、溶解性和稳定性等特性,同时具有形成凝胶、浓缩溶液和成膜的能力。汤秋冶等^[56]研究表明,添加 ϵ -PL 的海藻酸钠涂膜具有良好的抑菌性能,应用于冰鲜鸭肉中其菌落总数和大肠杆菌菌落数均有所降低。该复合膜还可显著控制鸭肉水分的流失,使其保持良好色泽。魔芋葡甘聚糖是一种天然的高分子可溶性膳食纤维,黏度高且安全无毒副作用。张海婷等^[57]报道,将质量分数为 0.78% 的普鲁兰多糖和质量分数为 0.79% 的魔芋葡甘聚糖混合溶解后添加质量分数 0.27% 的 ϵ -PL 制备成复合膜,该复合膜在已接种大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌混合菌液的固体培养基中可形成直径为 41.96 mm 的抑菌圈,表明其具有良好的抑菌活性。

ϵ -PL/多糖复合膜具有良好的抑菌活性,且由于多糖化学性质稳定,适宜于长期贮存。但多糖属于亲水性聚合物,阻湿性较差 (表 1),因此,对多糖进行改性是提高多糖复合膜性能的重要途径之一。

4.2 ϵ -PL 蛋白复合膜

部分蛋白质,如大豆分离蛋白、豌豆蛋白等可作为蛋白膜,对食品进行包装。但由于蛋白膜本身不具有抑菌活性且营养丰富,容易受微生物的污染,可向其中添加抑菌剂以达到抗菌保鲜的作用。

4.2.1 ϵ -PL/大豆分离蛋白复合膜

大豆分离蛋白营养丰富、安全无毒, 具有成膜性好、可降解等特性, 是优良的可食性涂膜原料。张小涵^[58]将 ϵ -PL 作为抑菌剂加入大豆蛋白-壳聚糖复合膜中, 发现其可有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长, 表明该膜具有良好的抑菌性能。另外, 加入 ϵ -PL 还可提高复合膜的机械性能, 复合膜断裂伸长率随 ϵ -PL 浓度增大而提高。

4.2.2 ϵ -PL/豌豆蛋白复合膜

豌豆蛋白由于营养丰富、价格低廉、不含植物激素且具有低过敏性的特点, 是近年兴起的一种优质植物蛋白^[59]。豌豆蛋白具有良好的成膜性, 其制作的豌豆蛋白膜能够作为包装材料; 同时, 豌豆蛋白膜具有良好的生物降解性, 能够有效解决塑料包装废弃物降解时间久、对环境造成污染的问题。郭永^[60]将 ϵ -PL 添加至以豌豆蛋白为基质的成膜液中, 所制备的复合抑菌膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有明显的抑制作用, 并且该复合膜的抗拉强度显著提高, 水蒸气透过性和水溶性显著降低。

ϵ -PL 与蛋白类物质制备的复合膜在抑菌活性和机械性能方面较单一蛋白膜显著增强, 但热封性差、透水率高、基本无法阻止水蒸气扩散(表 1)。因此, 仍需通过深入研究以提高 ϵ -PL/蛋白质复合膜的理化性能, 以实现其工业化生产和应用, 满足市场需求。

4.3 ϵ -PL/聚乙烯醇复合膜

聚乙烯醇(PVA)是一种性能优良的可降解高分子聚合物, 无毒无害, 具有良好的水溶性、成膜性和气体阻隔性。但是由于单一聚乙烯醇膜无抑菌性, 故必须在其中添加抑菌剂以制成聚乙烯醇抗菌复合膜。

杨萍萍等^[61]研究表明, 添加 ϵ -PL 的聚乙烯醇复合膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠球菌和枯草芽孢杆菌均有抑制作用。另外, 该复合膜可有效抑制生鲜鸭肉在贮存过程中 TVB-N 含量的增加, 有效延长货架期 4 d 以上。谭之磊^[62]采用流延法制备 ϵ -PL/聚乙烯醇复合膜, 该复合膜具有良好的力学性能, 拉伸强度可达 28.6~33.1 MPa。 ϵ -PL/聚乙烯醇复合膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑菌效果, 其抑菌圈直径随 ϵ -PL 浓度增加而增大。

添加 ϵ -PL 制备的 ϵ -PL/聚乙烯醇复合膜具有良好的可降解性、抑菌活性和水溶性, 是一种绿色环保的食品用复合膜。但该复合膜在低温和低湿度情况下韧性、强度较差, 且存在的成本问题制约了其工业化生产。今后聚乙烯醇复合膜的研究重点是对聚乙烯醇进行改性, 发挥其优势, 以期更高效地实现肉制品的长效保鲜。

表 1 汇总了 ϵ -PL 不同复合膜的特点。

表 1 ϵ -PL 不同复合膜的优势与限制因素

Table 1 Advantages and limiting factors of different ϵ -PL composite membranes

复合膜	优势	限制因素
ϵ -PL/多糖复合膜	良好的抑菌活性 ^[50-54] ; 适宜于长期贮存 ^[56]	阻湿性较差 ^[57]
ϵ -PL/蛋白复合膜	良好抑菌活性; 机械性能优异 ^[58-60]	热封性差; 透水率高 ^[60]
ϵ -PL/聚乙烯醇复合膜	良好的可降解性、抑菌活性和水溶性 ^[61-62]	韧性、强度较差; 生产成本低 ^[61]

5 结束语与展望

ϵ -PL 作为天然、高效的抗菌肽, 在肉制品的绿色加工及安全控制领域具有极大的开发利用潜力。 ϵ -PL 能够通过破坏细胞膜结构与功能、抑制菌体能量代谢、引起 DNA 损伤等诱导致腐微生物死亡, 进而有效抑制肉制品的腐败变质, 延长货架期。随着对 ϵ -PL 研究及应用的深入, 基于 ϵ -PL 制备的食品包装膜已受到广泛关注。相较于利用单一 ϵ -PL 作为保鲜剂, 将其与蛋白、多糖、聚乙烯醇等联合制备的复合膜可以达到更为理想的肉制品保鲜效果。同时, ϵ -PL 复合膜的高生物降解性能够替代不可降解的传统食品包装, 以达到保护环境的目的。

目前, 国内已有江苏一鸣、浙江新银象等生物技术公司建立了 ϵ -PL 的工业生产线, 实现了 ϵ -PL 的规模化生产, 但在产品用途开发方面尚存在明显不足。今后还需深入研究 ϵ -PL 与成膜材料的相互作用与内在机制, 以进一步改善复合膜的理化性质及抑菌活性, 制备高效安全、绿色环保、抑菌保鲜性能优良的 ϵ -PL 复合膜, 实现 ϵ -PL 的高值化开发应用以及肉类和其他食品的长效保鲜。

参考文献:

- [1] WANG A X (王爱霞), WANG X W (王秀文), QIN J Y (秦加阳), *et al.* Biosynthesis of ϵ -polylysine and its application in medicine field[J]. Journal of Binzhou Medical University (滨州医学院学报), 2020, 43(3): 216-221.
- [2] SHIMA S, SAKAI H. Polylysine produced by *Streptomyces*[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1977, 41(9): 1807-1809.
- [3] SHUKLA S, MISHRA A. Epsilon-polylysine production from sugar cane molasses by a new isolates of *Bacillus* sp. and optimization of the fermentation condition[J]. Annals of Microbiology, 2013, 63(4): 1513-1523.
- [4] LI Y H, GAO F, GUO J, *et al.* Polymeric micelles with aggregation-induced emission based on microbial ϵ -polylysine for doxorubicin delivery[J]. European Polymer Journal, 2020, 122: 108474.
- [5] ITUZE K M C, QIAO Z N (乔郑钠), XU M J (徐美娟), *et al.* Heterologous expression of *Streptomyces albulus* ϵ -poly-L-lysine synthase and optimization of whole-cell biocatalyst for ϵ -poly-L-lysine synthesis[J]. Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业), 2020, 46(16): 1-6.
- [6] WANG K F (王开方), PAN L (潘龙), DIAO W J (刁文娇), *et al.* Effects of pH and specific growth rates on ϵ -poly-L-lysine

- biosynthesis in *Streptomyces albulus*[J]. Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业), 2019, 45(23): 8-14.
- [7] HIROHARA H, SAIMURA M, TAKEHARA M, *et al.* Biosynthesis of poly(ϵ -L-lysine)s in two newly isolated strains of *Streptomyces* sp.[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 73(2): 321-331.
- [8] LIU J N (刘家宁). Study on seration, purification, dynamic structure and antibacterial activity of ϵ -poly-L-lysine[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (中国科学院大学), 2020.
- [9] LIU S R (刘盛荣), WU Q P (吴清平), ZHANG J M (张菊梅), *et al.* Analysis of chemical structure and mass weight of a product produced by a suspected ϵ -poly-L-lysine-producing *Streptomyces* strain[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2015, 36(9): 107-110, 115.
- [10] SUN Y H (孙艳辉), DONG Y (董英). Research progress of ϵ -poly-L-lysine[J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing (粮油加工与食品机械), 2004, (7): 68-69.
- [11] SHIMA S, SAKAI H. Poly-L-lysine produced by *Streptomyces*. Chemistry studies[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1981, 45(11): 2503-2508.
- [12] PAN L (潘龙). Physiological mechanisms of high ϵ -poly-L-lysine accumulation in *Streptomyces albulus* by low pH shock strategy[D]. Wuxi: Jiangnan University (江南大学), 2020.
- [13] QI Z Q (齐子琦), QIN Z J (秦子晋), HUANG Y Z (黄永震), *et al.* Research progress of ϵ -polylysine as a biological preservative[J]. The Food Industry (食品工业), 2019, 40(10): 289-293.
- [14] JIA S R (贾士儒). Biological preservatives—Research progress of ϵ -poly-L-lysine[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology (发酵科技通讯), 2005, (3): 22-25.
- [15] ZHANG D R (张东荣), ZHANG C (张超), DUAN Z Y (段作营), *et al.* Study on the antimicrobial activity of ϵ -poly-L-lysine[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition (河南工业大学学报: 自然科学学报), 2006, 27(6): 75-80.
- [16] HIRAKI J. Basic and applied studies on ϵ -polylysine[J]. J Antibact Antifungal Agents, 1995, 23: 349-354.
- [17] LIN L, GU Y L, LI C Z, *et al.* Antibacterial mechanism of epsilonpoly-lysine against *Listeria monocytogenes* and its application on cheese[J]. Food Control, 2018, 91: 76-84.
- [18] XU H X (徐霞红), YANG S (杨莎), SHAN C S (单长松), *et al.* Effects of different preservation treatments on quality of wet rice noodles and microbial diversity of spoiled samples[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2021, 42(21): 158-165.
- [19] LI L (李立). Study on application of ϵ -polylysine in storage and fresh-keeping of fresh-cut Hang cabbage[J]. Vegetables (蔬菜), 2020, (3): 50-55.
- [20] SHIMA S, MATSUOKA H, IWAMOTO T, *et al.* Antimicrobial action of epsilon-poly-L-lysine[J]. Journal of Antibiotics, 1984, 37(11): 1449-1455.
- [21] ZHANG Y Z, ZHAO C Q, ZHAO X X, *et al.* Application of ϵ -polylysine in extending the storage period of pork jerky[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(6): 3250-3257.
- [22] ZHOU J Y (周俊英), GUO Q L (郭清莲), LE Y B (乐英棒), *et al.* Study on the anti-biofilm growth of *Staphylococcus aureus* by epsilon polylysine and nisin[J]. Journal of Clinical Hematology (临床血液学杂志), 2018, 31(6): 439-442.
- [23] CHEN X Q (陈晓青), LI K K (李可可), YU T (余甜), *et al.* Effects of ϵ -PL on growth and biofilm formation of *Staphylococcus aureus*[J]. Chinese Journal of Antibiotics (中国抗生素杂志), 2018, 43(1): 91-95.
- [24] SHI W J (时文静), YU T (余甜), LI K K (李可可), *et al.* Effects of ϵ -poly-L-lysine on the growth and biofilm formation of *Acinetobacter baumannii*[J]. Chinese Journal of Antibiotics (中国抗生素杂志), 2020, 45(1): 73-77.
- [25] HYLGAARD M, MYGIND T, VAD B S, *et al.* The antimicrobial mechanism of action of epsilon-poly-L-lysine[J]. Applied and Environmental, 2014, 80(24): 775-777.
- [26] YANG X Q, WANG H, HE A N, *et al.* Microbial efficacy and impact on the population of *Escherichia coli* of a routine sanitation process for the fabrication facility of a beef packing plant[J]. Food Control, 2017, 71: 353-357.
- [27] ALIREZALU K, MOVLAN H S, YAGHOUBI M, *et al.* ϵ -Polylysine coating with stinging nettle extract for fresh beef preservation[J]. Meat Science, 2021, 176: 108474.
- [28] RANDALL L P, LODGE M P, ELVISS N C, *et al.* Evaluation of meat, fruit and vegetables from retail stores in five united kingdom regions as sources of extended-spectrum beta-lactamase (ESBL)-producing and carbapenem-resistant *Escherichia coli*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 241: 283-290.
- [29] YANG S R, PEI X Y, WANG G, *et al.* Prevalence of food-borne pathogens in ready-to-eat meat products in seven different Chinese regions[J]. Food Control, 2016, 65: 92-98.
- [30] SKOCKOVA A, KOLACKOVA I, BOGDANOVICOVA K, *et al.* Characteristic and antimicrobial resistance in *Escherichia coli* from retail meats purchased in the Czech republic[J]. Food Control, 2015, 47: 401-406.
- [31] WANG Z Y (王梓源), LI X Y (李欣颖), LYU J G (吕俊阁), *et al.* The antimicrobial mechanism of ϵ -poly-L-lysine against *Escherichia coli*[J]. Food and Fermentation Industries (食品与发酵工业), 2020, 46(21): 34-41.
- [32] ZHANG X W, SHI C, LIU F G, *et al.* Antibacterial activity and mode of action of ϵ -polylysine against *Escherichia coli* O157:H7[J]. Journal of Medical Microbiology, 2018, 67(6): 838-845.
- [33] LAN W Q (蓝蔚青), ZHANG N N (张楠楠), CHEN M L (陈梦玲), *et al.* Effect of ϵ -polylysine on cell structure and energy metabolism of *Saprophytic staphylococcus*[J]. Food Science (食品科学), 2020, 41(23): 56-62.
- [34] LI Y Q, HAN Q, FENG J L, *et al.* Antimicrobial characteristics and mechanisms of epsilon-poly-lysine against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Food Control, 2014, 43: 22-27.
- [35] BO T, LIU M, ZHONG C, *et al.* Metabolomic analysis of antimicrobial mechanisms of ϵ -poly-L-lysine on *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Agriculture Food Chemistry, 2014, 62(19): 4454-4465.
- [36] BO T, HAN P P, SU Q Z, *et al.* Antimicrobial ϵ -poly-L-lysine induced changes in cell membrane compositions and properties of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Control, 2016, 61: 123-134.
- [37] HOU Y (侯颖), MA W R (马文瑞), CHENG Y W (程雅文), *et al.* Apoptosis of *Saccharomyces cerevisiae* induced by ϵ -poly-L-lysine combined with reactive oxygen species[J]. Food Science (食品科学), 2020, 41(10): 81-87.
- [38] XING B (邢蓓). Effect of ϵ -poly-L-lysine on the activity and primary metabolism of *Staphylococcus aureus*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology (天津科技大学), 2015.
- [39] YE R S, XU H Y, WAN C X, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of action of epsilon-poly-L-lysine[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2013, 439(1): 148-153.
- [40] ZHOU Q (周祺), LIU F (刘芳), FAN X R (范晓然), *et al.* Antimicrobial activity and mechanism of ϵ -polylysine on *Enterococcus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology (中国食品学报), 2018, 18(1): 65-72.
- [41] HOU W F (侯温甫), YUE Q Q (岳琪琪), HAN Q H (韩千慧), *et al.* Inhibition of ϵ -poly-lysine on dominant spoilage bacteria in grass carp and its effect on microbial diversity during cold storage[J]. Food Science (食品科学), 2020, 41(17): 223-230.
- [42] XU M (徐梅), QIN L J (秦丽娟), SONG X L (宋贤良), *et al.* Effect of salt baked chicken treated with different preservatives on antibacterial property and quality[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2016, 37(24): 333-335, 354.
- [43] SOUZA B W S, CERQUEIRA M A, RUIZ H A, *et al.* Effect of chitosan-based coatings on the shelf life of salmon (*Salmo salar*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(21): 11456-11462.
- [44] FENG J L (冯建岭), LI Y Q (李迎秋). Effect of ϵ -polylysine on physicochemical features of chilled meat[J]. The Food Industry (食品工业), 2020, 41(7): 141-145.