

ϵ -聚赖氨酸的抑菌机制及其在食品防腐保鲜中的应用

张重阳, 陈旭升*

(工业生物技术教育部重点实验室 江南大学生物工程学院 江苏无锡 214122)

摘要 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -PL)是我国于 2014 年批准的一种天然食品防腐剂,因抑菌谱广、水溶性强、安全性高、耐高温和稳定性好等优良特征,而成为天然食品防腐剂替代化学食品防腐剂的关键品种。本文首先介绍 ϵ -PL 理化与生物学性质以及微生物生产方法,随后,综述近 10 年国内外学者在 ϵ -PL 抑菌机制和食品防腐保鲜方面应用取得的最新进展,最后对当前 ϵ -PL 在我国食品工业中的应用瓶颈进行剖析并展望未来的研究重点,为其的广泛应用提供参考。

关键词 天然食品防腐剂; ϵ -聚赖氨酸; 抑菌机制; 食品防腐

文章编号 1009-7848(2023)03-0390-16 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.039

ϵ -聚赖氨酸(ϵ -poly-L-lysine, 简写 ϵ -PL)是由几个至几十个 L-赖氨酸单体通过其 α -羧基和 ϵ -氨基缩合而成的多阳离子同型氨基酸聚合物^[1]。 ϵ -PL 因富含阳离子和异形肽键(ϵ 型肽键)而展现出对 G⁺细菌、G⁻细菌、酵母菌、霉菌和病毒的广谱抑制活性^[2]。同时,它还具有水溶性好、耐高温、无毒性、可食用且可生物降解等特点。鉴于此, ϵ -PL 被首先开发成防腐保鲜剂用于食品领域。此外,作为阳离子生物聚合物,它还被用作药物载体、基因载体、保湿材料和生物芯片等^[3]。

ϵ -PL 是日本大阪府立大学 Shoji Shima 和 Heiichi Sakai 于 1977 年在土壤中筛选生物碱产生微生物时意外发现的^[4]。随后,日本室素公司将 ϵ -PL 进行工业化生产,并于 1990 年建成 12 t/年的生产线^[5]。1989 年日本厚生劳动省率先批准 ϵ -PL 用于食品防腐保鲜。1990 年,韩国也批准 ϵ -PL 用于食品防腐保鲜。至 1999 年, ϵ -PL 在日本的销售量达到 880 t,仍不能满足 1 000 t/年的市场需求^[6,7]。2004 年,美国食品和药品管理局(FDA)认定 ϵ -PL 为 GRAS 产品并批准用于方便米饭和寿司的防腐保鲜^[8]。2014 年,我国国家卫生计生委正式批准 ϵ -PL 用于果蔬及果蔬汁制品、米面及其制品、杂粮制品、肉及肉制品、调味品、饮料、焙烤食

品等防腐保鲜,正式开启了 ϵ -PL 及其盐酸盐在我国食品防腐保鲜领域的应用^[9]。

ϵ -PL 和乳酸链球菌素(Nisin)、纳他霉素是目前国际范围内获得批准且被广泛使用的微生物来源的天然食品防腐剂。乳酸链球菌素能有效抑制引起食品腐败的革兰氏阳性细菌,如肉毒杆菌、金黄色葡萄球菌等,尤其对产生孢子的革兰氏阳性细菌有特效^[10]。纳他霉素能够有效抑制霉菌和酵母菌^[11]。由此可见,3 种微生物来源天然食品防腐剂的抑菌谱相互补充,实现了对食源性腐败和病原微生物的全覆盖,为天然食品防腐剂替代化学食品防腐剂提供了可行性。然而, ϵ -PL 作为一种新型天然食品防腐剂在我国仍处在应用的探索阶段,许多研究人员对其理化性质、抑菌机制和应用效果还不甚了解。为此,本文总结近年来国内外有关 ϵ -PL 对细菌、酵母菌和霉菌作用的最新研究进展,并综述其在食品防腐保鲜中的应用情况,以期对 ϵ -PL 在我国食品工业中的广泛应用提供参考。

1 ϵ -PL 性质

1.1 ϵ -PL 理化性质

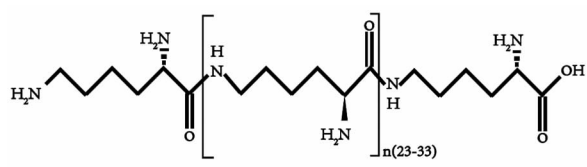
ϵ -PL 是由不同数量 L-赖氨酸聚合而成的混合物。经提取、精制加工后成品 ϵ -PL 聚合度一般为 25~35 个,化学结构式如图 1 所示。成品 ϵ -PL 一般是淡黄色粉末,味稍苦,吸湿性强,对 pH 和高温比较稳定,易溶于水,微溶于乙醇,难溶于乙酸乙酯、乙醚等有机溶剂^[12]。 ϵ -PL 在水溶液中会依据 pH 值不同而呈现出不同的二级结构^[13]。当 pH

收稿日期: 2022-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0907700);
江苏省自然科学基金项目(BK20191332)

第一作者: 张重阳,女,硕士生

通信作者: 陈旭升 E-mail: chenxs@jiangnan.edu.cn

图 1 ϵ -PL 的化学结构式Fig.1 The chemical structure of ϵ -PL

值低于 8.0 时, ϵ -PL 呈现静电延伸构象;而当 pH 值高于 9.0 时, ϵ -PL 呈现 β -折叠构象。

1.2 ϵ -PL 生物学性质

1.2.1 安全性 ϵ -PL 具有良好的安全性。大鼠两代繁殖实验结果表明, ϵ -PL 的无毒剂量水平为 38 mg/mL,而 114 mg/mL 的 ϵ -PL 也不会对大鼠的生殖、神经功能、胚胎和胎儿发育和生长造成任何毒性^[14]。体内药代动力学研究显示, ϵ -PL 在大鼠胃肠道中不被吸收,94%的 ϵ -PL 会在 48 h 内通过粪便排泄,仅有少量被降解为 L-赖氨酸, ϵ -PL 不会在任何组织或器官中累积^[15]。基于上述安全性评估,美国 FDA 于 2004 年将 ϵ -PL 认定为 GRAS 产品,并允许在方便米饭和寿司中使用,最高添加量

为 50 mg/kg^[18]。在此之前,日本和韩国分别于 1989 年和 1990 年将 ϵ -PL 批准在食品中添加使用。2014 年,我国国家卫生计生委正式批准 ϵ -PL 用于各种食品防腐保鲜,正式开启了 ϵ -PL 及其盐酸盐在我国食品防腐保鲜领域的应用^[9]。由此可见, ϵ -PL 是一种被实际应用超过 30 年且被广泛认可安全的天然食品防腐剂。

1.2.2 抑菌谱 ϵ -PL 具有广谱的抑菌活性。然而,它的抑菌能力与其聚合度、pH 值、温度和处理时间等因素密切相关。当聚合度低于 9 时, ϵ -PL 失去抑菌活性^[16];当聚合度为 30~35 时, ϵ -PL 对细菌的抑制能力最强;而聚合度为 10~20 时, ϵ -PL 对酵母菌的抑制能力最强^[17]。 ϵ -PL 抑制大肠杆菌(*E. coli*)O157:H7 的最佳 pH 值为 6.0,抑制作用随着 pH 值的升高而下降,可能是由于碱性环境中 ϵ -PL 电荷强度下降导致的^[18]。表 1 汇总了 ϵ -PL 对部分常见食品污染微生物的最小抑菌浓度。可以看出, ϵ -PL 对 G⁺细菌、G⁻细菌、酵母菌、霉菌和病毒均有抑制作用,特别是对 G⁺细菌和 G⁻细菌。

表 1 ϵ -PL 对不同食品病原菌的最低抑菌浓度Table 1 The minimum inhibitory concentrations of ϵ -PL to food-borne pathogens

微生物	MIC/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	培养基	ϵ -PL 纯度与来源	参考文献
革兰氏阴性细菌				
大肠杆菌(<i>Eshcherichia coli</i>)ATCC 8739	12.5	LB	99%纯度,新银象	[19]
大肠杆菌 K-12	75	TSB	50%纯度,室素	[20]
大肠杆菌 O157:H7	10	LB	95%纯度,拜纳佛	[18]
肠道沙门氏菌(<i>Salmonella enterica</i>)	31	LB	99%纯度,新银象	[21]
恶臭假单胞菌(<i>Pseudomonas putida</i>) DSMZ 291	73	TSB	50%纯度,室素	[22]
腐败希瓦氏菌(<i>Shewanella putrefaciens</i>)	150	TSB	未明确纯度,国药集团	[23]
革兰氏阳性细菌				
金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>) ATCC 6538	12.5	LB	99%纯度,新银象	[19]
金黄色葡萄球菌 ATCC 25923	31.2	LB	95%纯度,Sai Taisi	[24]
单核细胞增生李斯特菌(<i>Listeria monocytogenes</i>) Scott A	15	bTSB	25%纯度,室素	[25]
无害李斯特菌(<i>Listeria innocua</i>) DSM 20649	750	TSB	50%纯度,室素	[20]
变异链球菌(<i>Streptococcus mutans</i>)	20	TSB	25%纯度,室素	[26]
枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>) ACCC 10242	62.5	LB	95%纯度,Sai Taisi	[24]

(续表 1)

微生物	MIC/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	培养基	ϵ -PL 纯度与来源	参考文献
肠球菌属(<i>Enterococcus</i> sp.)	75	M17	未明确纯度,丁贝	[27]
		酵母菌		
酿酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) AS2399	200	YPD	未明确纯度,新银象	[28]
		霉菌		
指状青霉菌(<i>Penicillium digitatum</i>)	200	PDA	99%纯度,新银象	[29]
灰霉菌(<i>Botrytis cinerea</i>)	450	PDA	未明确	[30]
扩展青霉菌(<i>Penicillium expansum</i>)	600	PDB	未明确	[31]
黄曲霉菌(<i>Aspergillus flavus</i>)	750	PDB	食品级,新银象	[32]

1.2.3 稳定性 ϵ -PL 具有优良的热稳定性。在 80 °C 和 100 °C 水浴中保持 30 min, 以及在烤箱 120 °C 条件下处理 20 min, 其仍保持良好的抑菌活性^[33]。另外, 120 °C 加热 50 min 后, ϵ -PL 对枯草芽孢杆菌仍有较好的抑菌效果^[34]。这表明 ϵ -PL 具有优良的热稳定性, 为其在部分需要热杀菌食品中的应用奠定了基础。由于 ϵ -PL 属于异形肽(常见肽键为 α 型), 因此不能被常见的蛋白酶所水解。目前, 已知能使 ϵ -PL 降解的是其产生菌具有的两种 ϵ -PL 降解酶(属于氨基酸酶)^[35]和蛋白酶 A^[36]。

2 ϵ -PL 抑菌机制

基于结构特征, ϵ -PL 属于一种典型的抗菌肽。目前, 关于抗菌肽的抑菌机制划分为细胞膜作用机制和非细胞膜作用机制^[37]。抗菌肽的细胞膜作用机制又分为 3 种模型: 1) 抗菌肽分子与细胞膜磷脂分子结合后, 诱导磷脂分子向内弯曲, 最终成孔, 称为环孔模型(toroidal pore model); 2) 抗菌肽分子被吸附在细胞膜表面, 相互聚集, 以多肽的形式嵌入细胞膜中, 形成跨膜离子通道, 称为桶壁模型(barrel-stave model); 3) 抗菌肽分子先结合在磷脂膜表面, 平铺在膜表面, 形似地毯, 当抗菌肽的数量在单位面积达到一定阈值时, 它会以类似洗涤剂的作用改变膜表面张力, 从而在膜上出现短暂的孔洞, 称为毯式模型(carpet model)。3 种模型均破坏了细胞膜完整性, 并引起细胞外部水分子和离子渗透到细胞中, 细胞内含物溢出, 最终导致细胞死亡。抗菌肽的非膜作用机制又分为细胞外和细胞内两种作用方式。细胞外作用方式主要是抑制细胞壁合成; 细胞内作用方式是抗菌

肽分子进入细胞后作用于核酸, 从而影响 DNA、RNA 合成与复制以及蛋白质的合成。 ϵ -PL 是通过何种作用方式发挥其抑菌作用, 一直是研究者关心的问题。近几年, 研究者分别以典型的食品常见污染和病害微生物为研究模型, 研究了 ϵ -PL 对这些微生物的抑菌机制。

2.1 ϵ -PL 对革兰氏阳性细菌的作用机制

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)是食品中最常见的革兰氏阳性致病菌之一。 ϵ -PL 对金黄色葡萄球菌的作用涉及多个靶点, 包括细胞壁、细胞膜以及细胞内组分^[38]。带正电荷的 ϵ -PL 首先通过静电作用与带负电荷的细菌表面组分相互作用, 使得金黄色葡萄球菌跨膜电位降低, 导致细胞膜去极化, 引起细胞膜损伤和细胞渗漏, 甚至细胞死亡。然后, ϵ -PL 进入细胞膜受损的金黄色葡萄球菌胞内, 与 DNA 通过插入结合干扰 DNA 二级结构, 扰乱依赖 DNA 结构的生物过程。事实上, ϵ -PL 除了与 DNA 结合, 还能与细胞内其它组分相互作用, 从而刺激金黄色葡萄球菌产生 ROS。过多的 ROS 会驱动金黄色葡萄球菌产生强烈的氧化应激反应, 破坏细胞的防御系统, 进而造成细胞结构严重损伤, 代谢受阻甚至细胞死亡。另外, ϵ -PL 也会通过凋亡途径引起金黄色葡萄球菌的死亡。韩晴^[39]和邢蓓^[40]的研究也表明 ϵ -PL 可以改变金黄色葡萄球菌细胞壁膜的结构, 表现为增加细胞内外膜的渗透性, 提高细胞壁的通透性, 增强细胞表面疏水性, 抑制膜蛋白的合成或降解膜蛋白, 破坏细胞膜蛋白结构, 从而破坏细胞的正常形态, 使细胞内、外失去平衡, 导致细胞裂解, 进而抑制细胞生长甚至导致死亡。Tan 等^[41]的研究发现, ϵ -PL

可以抑制金黄色葡萄球菌的三羧酸循环和糖酵解等主要碳代谢途径,结合 ϵ -PL 对细胞壁膜的作用,最终导致菌体的死亡。可见, ϵ -PL 杀死金黄色葡萄球菌的机制主要是细胞膜损伤和 ROS 驱动的细胞凋亡。

除了研究 ϵ -PL 对金黄色葡萄糖球菌的作用机制外,Lin 等^[42]还研究了 ϵ -PL 对单核细胞增生李斯特菌的抑菌机制。他们发现, ϵ -PL 可以中和单核细胞增生李斯特菌表面细胞膜的负电荷,导致细胞膜的破坏。同时,抑制糖酵解途径降低细胞内物质、酶和可溶性蛋白质的含量。另外,刘蔚等^[43]发现 ϵ -PL 可以增加枯草芽孢杆菌细胞壁的通透性,降低细胞膜流动性,破坏细胞内环境的稳定性,从而达到抑菌作用。

2.2 ϵ -PL 对革兰氏阴性菌的作用机制

肠出血性大肠杆菌 O157:H7 是一种新型的致病性大肠杆菌,是近年来新发现的危害严重的肠道传染病,容易引起腹泻、出血性肠炎等症状,病情凶险,病死率高^[44]。目前, ϵ -PL 对于革兰氏阴性菌抑制机制的研究主要集中于大肠杆菌。带正电荷的 ϵ -PL 通过静电作用结合到大肠杆菌 O157:H7 细胞膜表面,聚集的 ϵ -PL 会导致细胞膜紊乱,引起细胞膜结构断裂。紧接着, ϵ -PL 通过膜破裂处进入细胞质。此外, ϵ -PL 会诱导 ROS 相关基因 *oxyR*、*sodA*,SOS 相关基因 *recA*、*lexA* 显著上调,降低毒性基因 *eaecA* 和 *espA* 转录,以调节氧化胁迫、SOS 响应和毒力变化。这些因素协同或累积作用最终导致细菌死亡^[18]。Zhang 等^[45]利用扫描电镜和透射电镜,结合细胞膜电位测定、流式细胞仪和 β -半乳糖苷酶活性检测(内膜通透性指标)观察大肠杆菌 O157:H7 在 16 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ϵ -PL(最小抑菌浓度)下细胞的变化,结果发现细胞形态、细胞膜完整性和通透性被完全破坏且细胞膜的破坏程度随 ϵ -PL 浓度的增加而加剧。Hyldgaard 等^[20]以非致病大肠杆菌 K-12 为研究对象,考察了 ϵ -PL 对细胞形态和膜完整性的影响。体外细胞研究表明, ϵ -PL 与细胞膜结合依赖于膜上的负电荷,而二价阳离子和脂多糖层中的庚糖 I 和庚糖 II 磷酸基团则是影响 ϵ -PL 与细胞膜结合效率的关键。碘化丙啶染色显示, ϵ -PL 可以穿透细胞质膜,表明细胞膜是攻击的部位。原子力显微镜成像证实

大肠杆菌细胞膜破坏类似于去污剂。因此,他们认为 ϵ -PL 通过取代细胞膜磷脂头基团的二价阳离子,在膜上强制负曲率折叠,形成囊泡或胶束,以地毯式的机制破坏膜的稳定性。

2.3 ϵ -PL 对酵母菌的作用机制

以酿酒酵母为研究模型,Bo 等^[46]研究发现,不同浓度 ϵ -PL 对酿酒酵母的杀菌和抑制的作用机制是不同的。首先,由于静电作用, ϵ -PL 与酵母菌细胞膜的阴离子成分相结合。随后,当 ϵ -PL 达到阈值 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时, ϵ -PL 以地毯模型的作用方式引起细胞膜磷脂双分子层发生弯曲和穿孔,最终导致细胞死亡;当 ϵ -PL 浓度低于阈值 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,可引起细胞膜的流动性、结构和通透性的变化,进而造成细胞膜的功能被破坏,导致细胞内中心碳代谢的抑制和刺激细胞内 ROS 的产生,从而诱导细胞凋亡。他们的研究还发现, ϵ -PL 存在会使细胞壁更加脆弱,细胞壁通透性显著增加,从而丧失阻碍 ϵ -PL 与细胞膜结合的作用^[47]。当 ϵ -PL 进入酵母细胞内后,又会引起离子浓度不平衡而对细胞产生高渗透压的胁迫,这会诱导细胞质膜分离和细胞膜曲率的改变,引发诸如 ROS 爆发等一系列次生细胞损伤^[48]。

2.4 ϵ -PL 对霉菌的作用机制

扩展青霉菌(*Penicillium expansum*)在苹果、葡萄、柑橘、梨和桃等水果中分布比较广泛,它不仅会造成水果的腐烂,还会产生一种名为扩展青霉素的次级代谢产物,而扩展青霉素存在致畸性、致癌性和免疫毒性,会严重危害人体的健康^[49]。 ϵ -PL 能有效抑制采后苹果由扩展青霉菌引起的蓝霉病,其抑制扩展青霉菌的机制可能存在 3 种:首先, ϵ -PL 能够诱导苹果组织中防御真菌的相关基因表达上调,从而提高相应防御相关酶 PPO、PAL、CAT 和 POD 的活性。其次,扩展青霉菌暴露在 ϵ -PL 环境下会导致孢子胞内产生过多 ROS,从而损伤或杀死孢子,消除或降低孢子萌发或菌丝生长。其三, ϵ -PL 会使扩展青霉菌分生孢子细胞壁降解,降低质膜的完整性,导致大量的细胞物质泄漏,再次消除或降低孢子萌发和菌丝生长^[31]。Liu 等^[29]研究了 ϵ -PL 对指状青霉的抑制作用,他们发现, ϵ -PL 能够显著抑制指状青霉的菌丝生长、孢子萌发和胚管长度。经过 ϵ -PL 处理,指状青

霉菌丝体形态受到严重破坏,菌丝失去光滑度,并显示不规则、皱缩和粗糙的表面,菌丝体聚集和黏附。同时,指状青霉的质膜会丧失完整性,脂质发生过氧化,进而导致指状青霉死亡。孟岳成等^[32]研究了 ϵ -PL对黄曲霉的抑制作用,他们发现经1 500 mg/kg ϵ -PL处理的黄曲霉菌丝空腔面积增大,细胞核、线粒体模糊不可分辨,细胞膜通透性增加,线粒体嵴模糊,细胞核降解,蛋白质及核酸泄露,生理代谢紊乱。

基于上述 ϵ -PL对细菌、酵母和霉菌抑菌作用的研究,推测 ϵ -PL抑菌机制如图2所示。多阳离子的 ϵ -PL通过静电作用结合到细胞膜磷脂结构,导致细胞膜电位降低和去极化,细胞膜流动性和通透性改变。当 ϵ -PL浓度过高时,还会进一步导

致细胞膜磷脂双分子层弯曲、穿孔,造成膜结构断裂和膜完整性损坏,从而破坏了细胞膜的功能。 ϵ -PL会从破损的细胞膜进入细胞内,与胞内带负电荷的细胞组分结合,包括DNA、蛋白质(酶)等,扰乱胞内正常生化反应过程;同时, ϵ -PL进入胞内会引起细胞产生大量ROS,造成细胞氧化胁迫和脂质过氧化,胞内SOS响应和凋亡途径激活。这些细胞膜和胞内因素协同或累积作用,最终导致单细胞微生物的裂解,多细胞微生物的孢子萌发、菌丝生长受阻和菌丝空腔化死亡。由此看出, ϵ -PL主要是通过抗菌肽毯式模型破坏细胞膜功能,通过影响细胞内生化反应而干扰正常代谢的双重作用方式发挥其抑菌作用。

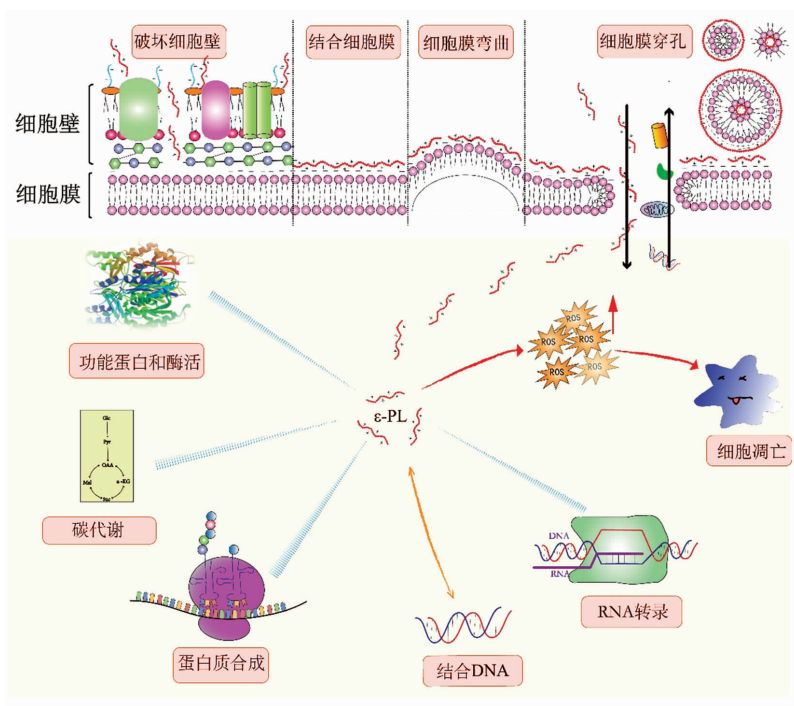


图2 ϵ -PL 抑菌机制

Fig.2 Mechanism of action of ϵ -PL on microorganisms

3 ϵ -PL 在食品防腐保鲜领域的应用

自然界中各种微生物分布广泛,食品中难免出现微生物的污染。当环境条件适宜时,它们就会迅速生长繁殖,造成食品的腐败与变质,最终降低食品的卫生质量和营养价值,甚至危害人体的健康。我国每年因食品腐败而造成的经济损失严重,而生鲜食品的腐败变质占据大多数,因此急需开

发新型的防腐剂和防腐保鲜技术。如今, ϵ -PL及其盐酸盐已被国家允许用于果蔬及果蔬汁制品、米面及其制品、杂粮制品、肉及肉制品、调味品、饮料、焙烤食品等领域,为我国食品防腐保鲜增添了新手段。近几年,随着 ϵ -PL及其盐酸盐的批准使用和使用成本的不断下降, ϵ -PL及其盐酸盐被尝试用于不同种类食品防腐保鲜研究,取得了很多

进展,为 ϵ -PL 及其盐酸盐在食品工业中的广泛应用奠定了基础。

3.1 在果蔬中的应用

我国每年因为腐烂造成的果蔬损失高达总产量的 20%~30%^[50]。导致果蔬腐败变质的原因主要来自两方面:1) 采摘后的果蔬仍然在进行呼吸作用,同时果蔬中的还原性成分易于与空气中的氧气发生氧化作用,以及自身体内生物酶的降解作用等;2) 果蔬表面污染的微生物的生长作用,特别是病原微生物,还会分泌对人体健康有危害的毒素。霉菌是引起果蔬败坏的主要微生物,包括青霉属、芽孢霉属、交链孢霉属和木霉属等。针对霉菌引起的果蔬变质,往往使用化学杀菌剂,虽然防腐效果良好,但是长期使用会对生态和人体造成伤害。

近几年, ϵ -PL 被众多研究者尝试用于果蔬保鲜领域。由扩展青霉(*Penicillium expansum*)引起的青霉病是苹果贮藏期间的一种重要病害,即使在低温贮藏条件下苹果感病后也会发生腐烂。Dou 等^[51]发现当 ϵ -PL 质量浓度超过 200 mg/L 时就能抑制扩展青霉的孢子萌发和芽管生长;而将一定数量的扩展青霉接种于苹果上时,600 mg/L ϵ -PL 就可有效抑制扩展青霉在苹果上生长。Ge 等^[51]将苹果经 50 mg/L ϵ -PL 浸泡处理后,能有效抵抗扩展青霉的腐烂作用。进一步分析发现, ϵ -PL 可激活苹果果实中的苯丙素途径,增加酚类化合物以及类黄酮和木质素的含量,也可以增加苹果果实中 H_2O_2 含量以及超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽还原酶和过氧化物酶的活性,从而有效抑制苹果果实中扩展青霉的生长。除了考察 ϵ -PL 对苹果的保鲜效果,Liu 等^[29]研究 ϵ -PL 对柑橘上污染指状青霉的抑制作用,他们发现 200 mg/L ϵ -PL 能够显著抑制指状青霉孢子萌发和菌丝生长,3 200 mg/L ϵ -PL 可以完全抑制柑橘上接种的指状青霉生长。此外,Jiao 等^[52]将灰霉菌接种至樱桃番茄、草莓、葡萄和青椒后,研究了不同浓度 ϵ -PL 对这些植物中灰霉菌生长的影响,发现抑制灰霉菌效果随 ϵ -PL 浓度的增加而加强。同时,他们指出相同浓度的 ϵ -PL 对抑制樱桃番茄、草莓、葡萄和青椒接种的灰霉菌效果却不同,可能是存在不同宿主的灰霉菌对 ϵ -PL 敏

感性的不同造成的。最近,Shu 等^[53]研究发现 500 mg/L ϵ -PL 能够显著抑制赤星病菌在红枣和西红柿上引起的黑斑病,体外试验表明 ϵ -PL 对赤星病菌的半抑制剂量(IC_{50})为 160.1 mg/L。Li 等^[30]报道 4 000 mg/L ϵ -PL 可完全抑制红枣上接种了灰霉菌孢子的生长,而 150 mg/L ϵ -PL 就能显著抑制灰霉菌菌丝生长,450 mg/L ϵ -PL 则能完全抑制其生长。除此之外, ϵ -PL 还被用于猕猴桃、櫻桃、蓝莓、葡萄、火龙果、菠菜、杭白菜、青椒、竹笋等果蔬,并都显示出较好的保鲜效果。

为考察 ϵ -PL 与其它保鲜方法的协同作用,Song 等^[54]将 ϵ -PL 与乳酸链球菌素和壳聚糖进行复配用于鲜切胡萝卜的保鲜,发现不仅可以有效抑制鲜切胡萝卜的微生物生长繁殖,还可以抑制其失重率、呼吸速率、白化现象、纤维素和纤维素的合成、总酚的合成、维生素 C 的降解,有效保持鲜切胡萝卜的营养价值。Fan 等^[55]将 400 mg/L ϵ -PL 结合 23 W/L 超声波用于鲜切莴苣保鲜,在 4 °C 条件保藏 12 d 后,鲜切莴苣的总菌落数和霉菌、酵母菌、大肠杆菌数量明显低于 400 mg/L ϵ -PL 或 23 W/L 超声波的单一处理,且减少了失重和颜色变化,说明 ϵ -PL 复合超声波处理不仅有利于微生物的抑制,而且对提高保藏质量也有帮助,是延长鲜切莴苣货架期一种有效方法。由此可见,单一或联合使用 ϵ -PL 对于果蔬的保鲜是一种非常有效的手段。

3.2 在肉类中的应用

肉类富含营养,是膳食营养的主要来源,这导致其极易遭受微生物污染,从而造成肉类的腐败变质。霉菌、细菌、酵母等微生物均会引起肉类腐败变质,当这些微生物数量达到一定时,就会造成肉的发黏、变味、变色,导致其感官和质量的恶化,而且也会导致肉类的营养价值大大折损,在食用后,人甚至会出现食物中毒等症状^[56]。因此,寻找有效的保鲜方法至关重要。

出于对化学合成防腐剂安全的担忧,开发无安全隐患的手段来延缓肉制品变质并延长其货架期成为越来越多的选择。华盛顿州立大学 Dong-Hyun Kang 教授是第 1 个将 ϵ -PL 用于肉制品防腐研究的学者,他考察了 0.1%、1% 和 2% ϵ -PL 对即食烤牛肉中接种大杆菌肠 O157:H7、鼠伤寒沙

门菌和单增李斯特菌的抑制作用,证实 ϵ -PL 在真实食品体系中能够有效抑制病原菌的生长和繁殖^[57]。Miya 等^[58]研究了将浸泡在 11.4~30.4 mg/mL ϵ -PL (40 min) 中的新鲜牛肉在 4 °C 条件下保藏 7d, 大肠杆菌 O157:H7 和沙门氏菌数量可降低 4.3 和 2.4 个数量级。如将保藏温度提高到 10 °C, 大肠杆菌 O157:H7 和沙门氏菌数量只减少 2.9 和 1.7 个数量级, 表明保藏温度提高显著影响 ϵ -PL 抑制大肠杆菌 O157:H7 和沙门氏菌的能力。然而, 将 ϵ -PL 与 CO₂ 气调包装相结合, 10 °C 时大肠杆菌 O157:H7 和沙门氏菌数量可以减少 4.4 和 3.5 个数量级, 而在 4 °C 时, 与仅使用 ϵ -PL 没有差别。另外, Moschonas 等^[59]研究了辛酸、香芹酚和 ϵ -PL 及其组合对非即食面包鸡中污染沙门氏菌的抑制能力, 发现 0.125% 辛酸+0.15% 香芹酚+0.5% ϵ -PL 三者组合抑制沙门氏菌效果超过单一或两两组合的效果。Feng 等^[60]将 ϵ -PL 与迷迭香提取物组成的混合物处理鸡胸肉, 置于冷冻条件下保藏 10 d, 发现鸡胸肉的生化与感官质量参数相比 ϵ -PL 或迷迭香提取物单一处理显著提升, 微生物菌落数也明显减少。由此可看出, 单一使用 ϵ -PL 抑制病原菌能力有限, 复合其它防腐保鲜手段能够显著提升 ϵ -PL 抑菌能力。最近, Liu 等^[61]将 ϵ -PL、Nisin 和八角精油制备成纳米乳液用于肴肉保鲜、防腐, 不仅能实现肴肉货架期由 8 d 延长至 16 d, 而且产品 pH 值和总挥发性碱性氮显著降低, 颜色、气味、含水量和外观均保持良好。Alirezalu 等^[62]将 ϵ -PL 与荨麻叶提取物用于牛肉保鲜防腐, 发现经 1% ϵ -PL 和 9% 荨麻叶提取物浸泡处理的牛肉, 在 4 °C 条件下保藏 12 d, 能够显著抑制霉菌、酵母菌、大肠杆菌和总活菌数, 而且牛肉的生化指标和感官评价未发生明显变化。他们还将 ϵ -PL 与壳聚糖制成薄膜用于牛柳保鲜防腐, 获得相似的结果^[63]。Cheng 等^[64]将壳聚糖涂层与 ϵ -PL 和谷胱甘肽相结合处理鲜牛肉片, 可有效抑制鲜牛肉片在冷藏过程中腐败菌的生长、pH 值的增加以及红色指数和感官品质的下降。

在香肠中添加亚硝酸盐不仅能够产生粉红的色泽, 香气和风味, 还能够防止氧化和抑制耐热微生物, 是香肠制作中一种不可或缺的添加剂。然而, 亚硝酸盐有增加儿童患肝、脑、食管、胃癌和血

癌的风险。香肠生产中最重要挑战之一是从配方中去除亚硝酸盐或降低其含量。Alirezalu 等^[65-66]发现 ϵ -PL、壳聚糖和混合浸膏(茶叶、荨麻叶和橄榄叶提取物)配合使用可作为亚硝酸盐替代品, 从而有效提高无亚硝酸盐法兰克福香肠的保质期。

3.3 在水产品中的应用

水产品营养成复杂, 水分多, pH 接近于中性等特点, 导致其极易发生腐败变质, 其降解主要来自生物反应, 例如脂质氧化, 蛋白质降解或微生物酶介导的分解, 这些活动导致鱼类和其它水产品的保质期短^[67]。亟需寻找有效的保鲜方法。

南美白对虾是世界上最重要的水产养殖物种之一, 2017 年占世界养殖虾总产量达 446.8 万 t, 在全国甲壳类养殖总产量中占比最高, 达 29%^[68]。然而, 南美白对虾在养殖、加工、运输和储存中极易受到希瓦氏菌、假单胞菌、气单胞菌、耐冷杆菌、索丝菌、葡萄球菌、肉杆菌和假交替单胞菌等微生物的污染而腐败。Jia 等^[69]利用 Illumina-MiSeq 测序技术研究南美白对虾在 0 °C 冰藏和 0.1% ϵ -PL (0 °C 冰藏) 条件下微生物群落组成的变化, 发现假交替单胞菌、假杆菌和干湿单胞菌是南美白对虾 0 °C 保存 5 d 的主要污染微生物。0.1% ϵ -PL 能够抑制假单胞菌和干湿单胞菌的生长, 使假丝酵母菌和弧菌成为南美白对虾在 0 °C 保存 8 d 的主要微生物群。Na 等^[70]研究发现 ϵ -PL 复合壳寡糖能有效抑制南美白对虾中温和嗜冷细菌、假单胞菌和产 H₂S 细菌的生长, 减少低温条件下南美白对虾物理化学和感官质量的变化, 二者结合是低温保藏南美白对虾的理想天然防腐剂。为针对性抑制南美白对虾污染的希瓦氏菌, Qian 等^[23]体外研究 ϵ -PL 和牛至精油抑制希瓦氏菌的最小抑菌质量浓度和体积分数分别为 75 mg/L 和 0.12%, 而 ϵ -PL (75 mg/L) 和牛至精油 (体积分数 0.12%) 复合可将在南美白对虾中接种 9.11 log (CFU/g) 希瓦氏菌减少到 6.35 log (CFU/g), 总挥发性碱性氮保持在 20 mg N/100 g 的低水平; 同时, 也可延缓虾肌肉水分迁移和水分损失。同样, ϵ -PL 与荨麻提取物、壳聚糖、海藻酸钠等天然提取物复合还被广泛用于各种鱼的保鲜与防腐, 如海鲈鱼^[71]、鳙鱼^[72]、河豚^[73]、虹鳟鱼^[74]等。Lan 等^[75]研究表明, 0.1% ϵ -PL 与 0.2% 迷迭香提取物组成的复配

液可有效抑制组织蛋白酶 B 和 D 活性,抑制蛋白质降解和微生物生长,减缓大黄鱼贮藏期间的氧化变性和肉质软化速度,保证其品质和持水力,从而延长大黄鱼在冰存储时的保质期。上述研究结果表明,在低温条件下, ϵ -PL 复合具有抑菌活性的天然提取物,能够抑制腐败微生物生长,从而有效保障水产品不变质,达到延长货架期的效果。

3.4 在淀粉类食品中的应用

淀粉食物是许多亚洲国家的主食,如米饭、面条、米糕等。为了食用方便,开发出即食米饭和湿鲜面条等产品。然而,这些淀粉产品含水量高,适合腐败菌的繁殖,使其难以长期保存。如何延长这些食品的保质期成为人们关心的课题。日本学者是世界上最早将 ϵ -PL 用于淀粉食物保鲜防腐的。例如, Yamada 等^[76]报道保存米饭最大 ϵ -PL 使用量是 200 mg/kg,最优添加量是 100~150 mg/kg,如果同时添加一定量柠檬酸,则使米饭的保质期延长至 20 d。Otsuka 等^[77]将 ϵ -PL 添加到简单包装的煮好的面条中,研究其对即食面条的防腐效果,结果发现 20 °C 条件下,添加质量分数 0.25%~1.0% ϵ -PL 的即食面条,在贮藏 6 d 内 pH 值基本保持不变,活细胞数在从 10^2 CFU/g 增加到 10^3 ~ 10^5 CFU/g,其中酵母菌和霉菌数量从 10^2 CFU/g 增加到 10^4 ~ 10^5 CFU/g;而对照组(未添加 ϵ -PL)活细胞数在 2 d 后迅速增到 10^6 CFU/g 以上,酵母菌和霉菌数量也达到 10^6 CFU/g 以上。由此可见,与未添加 ϵ -PL 的即食面条相比,添加 ϵ -PL 能够延长煮熟面条的货架期。很多学者将 ϵ -PL 与乙醇、乙酸按一定比例复配用于米饭和面条的保鲜,发现 ϵ -PL 与乙酸复配优于与乙醇复配的抑菌效果。使用 0.1% ϵ -PL 与 0.15% 乙酸保存即食面条或使用 0.12% ϵ -PL 与 0.20% 乙酸保存米粉,可将它们保质期在 37 °C 条件下延至 10 d。为此,2004 年美国 FDA 将 ϵ -PL 认证为 GRAS 产品,批准其用于熟米饭保鲜防腐,最大允许添加量不超过 200 mg/kg^[8]。最近, TUERSUNTUOHETI 等^[78]将 ϵ -PL 与微波辐射和丙酸钙相结合用于湿青稞面条的保鲜防腐。她们将制作青稞面条的面粉经 800 W 微波炉辐照 40 s,然后加入 0.3% ϵ -PL 和 0.01% 丙酸钙制作成面条,置于 4 °C 冰箱中保藏。与对照组相比,经处理的湿青稞面条起始菌落总数由 4.40 log

(CFU/g)降至 3.75 log(CFU/g),保藏时间由 6 d 延至 12 d。同时,面条的品质、色泽、烹调品质相对较好,强结合水和弱结合水的丰度也较高。

3.5 在其它食品中的应用

目前乳制品大多采用巴氏杀菌、超高温瞬时杀菌进行灭菌处理,然而都存在蛋白质变性、风味变化等问题。 ϵ -PL 能有效抑制牛乳中沙门氏菌^[79]、单核细胞增生李斯特菌^[80]和金黄色葡萄球菌^[21]的生长繁殖。采用高压辅助 ϵ -PL 进行脱脂奶灭菌,在相同的灭菌条件下,添加 ϵ -PL 能降低高压处理产生的蛋白质变性程度以及营养成分减少^[81]。月桂酰精氨酸和 ϵ -PL 联合使用能够更明显地抑制全脂乳中单核细胞增生李斯特菌的生长^[82]。奶酪中添加适量浓度的 ϵ -PL,不仅可以控制腐败霉菌的生长,还能保持其感官品质^[83]。乳制品富含带有负电荷的蛋白,易与多阳离子的 ϵ -PL 通过静电作用来结合,这一方面会降低 ϵ -PL 的抑菌效果,另一方面也可使乳制品中蛋白质沉淀。如何解决 ϵ -PL 与蛋白质的结合作用,是突破其在乳制品中应用的关键。

ϵ -PL 还被尝试用于各种饮料的保鲜防腐。例如,吴勤等^[84]将 ϵ -PL 应用于蓝莓汁防腐,发现添加 200 mg/L ϵ -PL 对蓝莓汁饮料的 pH、色泽、总酸含量没有显著性影响,然而会引起可溶性固形物含量升高,在未杀菌的蓝莓汁饮料中, ϵ -PL 的最高抑菌率可达 79.7%。王换男等^[85]探究 ϵ -PL 对冷藏条件下鲜榨血橙汁贮藏期及贮藏品质的影响,他们发现 4 °C 条件下添加 200 μ g/mL ϵ -PL,可将鲜榨血橙汁的贮藏期由 3 d 延至 15 d,且橙汁的呈味物质、色值、pH、可滴定酸、可溶性固形物等无明显变化,同时还可减少其可溶性糖和游离氨基酸的损失。另外,吕志良等^[86]将 0.114 mg/mL ϵ -PL 添至经 110 °C、40 min 杀菌的玉米汁饮料中,可实现该饮料在 37 °C 下保存 30 d 以上。

4 总结

ϵ -PL 作为天然食品防腐保鲜剂的安全性和有效性被食品工业领域广泛接受。 ϵ -PL 应用最早且最成熟的日本市场,年使用量已在千吨以上。自 2014 年我国批准 ϵ -PL 在食品中使用以来,其生产技术水平不断提升,应用研究呈快速增长,市场

表2 ϵ -PL在不同食品中的应用Table 2 The application of ϵ -PL in different foods

食品类别	食品名称	使用方式	使用效果	参考文献	
果蔬类	苹果	50 μ L/L ϵ -PL+0.5 mL/L Tween-20 浸泡 10 min	抑制果实中扩展青霉的生长	[51]	
	龙眼	10%壳聚糖+ ϵ -PL 溶液浸泡 3 min	提高好果率,保证品质	[87]	
	樱桃	10 g/L 普鲁兰糖+0.3 g/L ϵ -PL+0.1 g/L 纳他霉素+0.04 g/L 乳酸链球菌素浸泡 5 min	保证品质	[88]	
	猕猴桃	0.05% ϵ -PL+1%藻酸钠浸泡 30 s	保持较好的品质,并延长保质期	[89]	
	竹笋	0.5 g/L ϵ -PL +0.2 g/L R-多糖+0.35 g/L 茶多酚	替代化学防腐剂,延长货架期	[90]	
	胡萝卜	250 μ g/mL ϵ -PL+1%乳酸+1%壳聚糖+64 μ g/mL 乳酸链球菌素浸泡 30 s	保证品质	[57]	
	菠菜	0.05 g/L ϵ -PL 溶液浸泡 30 s+UV-A 光照	延长保质期,并保证品质	[91]	
	肉类	鲜牛肉	0.5%壳聚糖+0.2% ϵ -PL+0.1%谷胱甘肽 5 $^{\circ}$ C浸泡 10 min,-5 $^{\circ}$ C保存	抑制腐败菌的生长及品质的下降	[65]
		鲜牛肉	0.3% ϵ -PL+0.75%马齿苋提取物+0.03%木犀草素浸泡 5 min,-18 $^{\circ}$ C保存	有效延缓品质下降	[92]
		鸡肉	0.1%乳酸链球菌素+0.2% ϵ -PL+0.2%壳聚糖雾化喷淋 1 min	保持较好的品质,并延长保质期	[93]
香肠		0.2% ϵ -PL+1%壳聚糖+混合提取物(绿茶,荨麻和橄榄叶提取物)	替代亚硝酸盐,有效提高香肠的保质期	[66]	
猪肉		0.24% ϵ -PL+1.8%壳聚糖浸泡 5 min,-4 $^{\circ}$ C保存	抑制微生物生长,维持色泽和保水力	[94]	
水产品	河豚	0.1% ϵ -PL+高 CO ₂ MAP,4 $^{\circ}$ C浸泡 10 min	抑制腐败微生物生长,保持较好的品质,并延长保质期	[75]	
	虹鳟鱼	6%荨麻提取物+0.2% ϵ -PL,4 $^{\circ}$ C浸泡 1 h	保持较好的品质,并延长保质期	[78]	
	大黄鱼	0.2%迷迭香提取物+0.1% ϵ -PL, 浸泡 30 min	减缓肉质软化速度,改善持水力,延长保质期	[79]	
	虾	0.1% ϵ -PL 浸泡 30 min,0 $^{\circ}$ C保存	改善微生物菌群的组成,延长保质期	[70]	
	海鲈鱼	0.4% ϵ -PL+0.3%魔芋葡甘聚糖, 浸泡 15 min,4 $^{\circ}$ C保存	抗氧化和抑菌保鲜	[95]	
	牡蛎	2% ϵ -PL 浸泡	抑制腐败微生物生长,保持较好的品质,并延长保质期	[96]	
淀粉质类	米饭	100~125 mg/kg ϵ -PL+柠檬酸	延长保质期	[97]	
	米饭	0.4%~0.6% ϵ -PL+醋酸	显著抑菌作用	[98]	
	白茶米糕	0.1 g/kg ϵ -PL+0.25 g/kg 乳酸链球菌素	较好的保鲜效果,有效延长保质期	[99]	
	生鲜面	2%乙醇+0.02%丙酸钙+0.006% ϵ -PL	保持良好的感官,有效延长保质期	[100]	

需求量以每年 200%的速度迅速扩大。目前,我国 ϵ -PL 及其盐酸盐的国家标准已完成制定。

然而,与现已成熟应用的另外两种生物食品防腐剂——乳酸链球菌素和纳他霉素相比, ϵ -PL

及其盐酸盐的应用范围、应用方法和用量还相差甚远。主要原因在于:1) ϵ -PL 及其盐酸盐成品售价太高,目前在 800~1 000 元/kg,严重阻碍了下游应用开发。 ϵ -PL 生物制造成本偏高,主要受限

于发酵水平、提取率、原料转化率和发酵周期等生产因素。2) ϵ -PL 及其盐酸盐应用方法不成熟。日本市场销售的 ϵ -PL 及其盐酸盐是以复配形式销售,针对不同食品种类设计不同复配剂型, ϵ -PL 及其盐酸盐有效含量只占 50%左右,配料主要是糊精、醋酸、甘氨酸、乙醇等,不仅降低了使用成本,而且提高了防腐保鲜效果;我国销售的 ϵ -PL 及其盐酸盐主要是纯品,下游应用企业只能自主开发。3) ϵ -PL 及其盐酸盐使用成本偏高,是其价格高和应用方法不成熟,与化学食品防腐剂缺乏竞争力。推动 ϵ -PL 及其盐酸盐在我国食品工业的大规模应用,一方面要继续降低 ϵ -PL 生物制造成本,另一方面要大力开展 ϵ -PL 及其盐酸盐在我国食品体系中的应用开发,大幅降低其综合使用成本,从而带动下游食品工业使用的积极性。

参 考 文 献

- [1] SHIMA S, SAKAI H. Poly-L-lysine produced by *Streptomyces*. Part III. Chemical studies[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1981, 45(11): 2503-2508.
- [2] YAMANAKA K, MARUYAMA C, TAKAGI H, et al. Epsilon-poly-L-lysine dispersity is controlled by a highly unusual nonribosomal peptide synthetase[J]. Nature Chemistry Biology, 2008, 4(12): 766-772.
- [3] YOSHIDA T, NAGASAWA T. ϵ -Poly-L-lysine: microbial production, biodegradation and application potential[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 62(1): 21-26.
- [4] SHIMA S, SAKAI H. Polylysine produced by *Streptomyces*[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1977, 41(9): 1907-1909.
- [5] 孙国凤. 食品保存料聚赖氨酸已商业生产[J]. 生物技术通报, 1990, 71(11): 22.
SUN G F. The food preservative polylysine has been commercially produced[J]. Biotechnology Bulletin, 1990, 71(11): 22.
- [6] 凌关庭. 防腐抑菌剂的进展[J]. 粮食与油脂, 2000(5): 44-47.
LING G T. Progress in antiseptic and bacteriostatic agents[J]. Cereals and Oils, 2000(5): 44-47.
- [7] 徐维正. 日本聚赖氨酸年需求增长 10%[J]. 精细与化学品, 1999(15): 28.
- [8] XU W Z. The annual demand of Japan for polylysine increased by 10%[J]. Fine and Chemical, 1999(15): 28.
- [8] US Food and Drug Administration. CFSAN/Office of food additive safety. GRAS notice No. GRN000135 [EB/OL]. (2003-06-26)[2021-09-27]. <http://www.fda.gov>.
- [9] 中华人民共和国国家卫生计生委. 关于批准 ϵ -聚赖氨酸等 4 种食品添加剂新品种等的公告(2014 年第 5 号)[EB/OL]. (2014-04-03)[2021-09-27]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7890201404/a93467d652c24a75a6de637abde31f30.shtml>.
- [9] National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Announcement on the approval of four new food additives such as ϵ -polylysine (No.5,2014) [EB/OL]. (2014-04-03)[2021-09-27]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7890/201404/a93467d652c24a75a6de637abde31f30.shtml>.
- [10] DE ARAUZ LJ, JOZALA AF, MAZZOLA PG, et al. Nisin biotechnological production and application: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(3/4): 146-154.
- [11] APARICIO J F, BARREALES E G, PAYERO T D, et al. Biotechnological production and application of the antibiotic pimarin: biosynthesis and its regulation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(1): 61-78.
- [12] HIRAKI J. Basic and applied studies on ϵ -polylysine[J]. Journal of Antibacterial Antifungal Agents, 1995, 23: 349-354.
- [13] IU J, CHANG S, XU P, et al. Structural changes and antibacterial activity of epsilon-poly-L-lysine in response to pH and phase transition and their mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(4): 1101-1109.
- [14] NEDA K, SAKURAI T, TAKAHASHI M, et al. Two-generation reproduction study with teratology test of ϵ -poly-L-lysine by dietary administration in rats[J]. Japanese Journal of Pharmacology, 1999, 27(7): 1139-1159.
- [15] HIRAKI J, ICHIKAWA T, NINOMIYA S, et al. Use of ADME studies to confirm the safety of ϵ -polylysine as a preservative in food[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2003, 37(2): 328-340.
- [16] SHIMA S, MATSUOKA H, IWAMOTO T, et al. Antimicrobial action of ϵ -poly-L-lysine[J]. The Jour-

- nal of Antibiotics, 1984, 37(11): 1449-1455.
- [17] 刘庆瑞, 陈旭升, 曾昕, 等. 链霉菌 M-Z18 膜蛋白 ϵ -聚赖氨酸降解酶的分离纯化、酶学性质及应用[J]. 微生物学报, 2014, 54(9): 1022-1032.
- LIU Q, CHEN X, ZENG X, et al. Purification, characterization and application of ϵ -poly-L-lysine-degrading enzyme from *Streptomyces* sp. M-Z18[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2014, 54(9): 1022-1032.
- [18] YE R, XU H, WAN C, et al. Antibacterial activity and mechanism of action of epsilon-poly-L-lysine [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2013, 439(1): 148-153.
- [19] LI Y Q, HAN Q, FENG JL, et al. Antibacterial characteristics and mechanisms of ϵ -poly-lysine against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. Food Control, 2014, 43: 22-27.
- [20] HYLGAARD M, MYGIND T, VAD B S, et al. The antimicrobial mechanism of action of epsilon-poly-L-lysine[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(24): 7758-7770.
- [21] 黄现青, 李云冰, 李苗云, 等. 壳聚糖、 ϵ -聚赖氨酸、Nisin 抑制沙门氏菌效果研究[J]. 浙江农业科学, 2009(4): 738-740.
- HUANG X Q, LI Y B, LI M Y, et al. Inhibitory effect of chitosan, ϵ -polylysine and nisin on *Salmonella*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Science, 2009(4): 738-740.
- [22] HYLGAARD M, MEYER R L, PENG M, et al. Binary combination of epsilon-poly-L-lysine and isoeugenol affect progression of spoilage microbiota in fresh turkey meat, and delay onset of spoilage in *Pseudomonas putida* challenged meat[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 215: 131-142.
- [23] QIAN Y F, CHENG Y, YE J X, et al. Targeting shrimp spoiler *Shewanella putrefaciens*: Application of ϵ -polylysine and oregano essential oil in Pacific white shrimp preservation[J]. Food Control, 2021, 123(6): 107702.
- [24] HONGXIA, LIU, HOUBAO, et al. The antimicrobial effects and synergistic antibacterial mechanism of the combination of ϵ -Polylysine and nisin against *Bacillus subtilis*[J]. Food Control, 2015, 47: 444-450.
- [25] NAJJAR M B, KASHTANOV D, CHIKINDAS M L. ϵ -poly-L-lysine and nisin A act synergistically against Gram-positive food-borne pathogens *Bacillus cereus* and *Listeria monocytogenes*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2007, 45(1): 13-18.
- [26] NAJJAR M B, KASHTANOV D, CHIKINDAS M L. Natural antimicrobials ϵ -poly-L-lysine and nisin A for control of oral microflora[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2009, 1(2): 143-147.
- [27] 周祺, 刘芳, 范晓然, 等. ϵ -聚赖氨酸对肠球菌的抑菌作用及机制[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 65-72.
- ZHOU Q, LIU F, FAN X R, et al. Antimicrobial activity and mechanism of ϵ -polylysine on *Enterococcus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(1): 65-72.
- [28] 薄涛, 杨萍, 宋萌, 等. ϵ -聚-L-赖氨酸对酿酒酵母抑菌机制的初步研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(6): 53-59.
- BO T, YANG P, SONG M, et al. A preliminary study on antimicrobial mechanism of ϵ -poly-L-lysine on *Saccharomyces cerevisiae*[J]. China Food Additives, 2015(6): 53-59.
- [29] LIU K, ZHOU X, FU M. Inhibiting effects of epsilon-poly-lysine (ϵ -PL) on *Penicillium digitatum* and its involved mechanism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 123: 94-101.
- [30] LI H, HE C, LI G, et al. The modes of action of epsilon-polylysine (ϵ -PL) against *Botrytis cinerea* in jujube fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 1-9.
- [31] DOU Y, ROUTLEDGE M N, GONG Y, et al. Efficacy of epsilon-poly-L-lysine inhibition of postharvest blue mold in apples and potential mechanisms [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 171: 111346.
- [32] 孟岳成, 王欣伟, 李延华, 等. ϵ -聚赖氨酸对黄曲霉的作用机制初探[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 239-244.
- MENG Y C, WANG X W, LI Y H, et al. Preliminary study on the mode of action of ϵ -polylysine against *Aspergillus flavus*[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(12): 239-244.
- [33] HIRAKI J. ϵ -Polylysine, its development and utilization [J]. Fine Chemistry, 2000, 29: 18-25.
- [34] 何堃. 白色链霉菌产生天然防腐剂多聚赖氨酸的研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2007.
- HE K. Study on the production of natural preservative polylysine by *Streptomyces albulus*[D]. Harbin:

- Heilongjiang University, 2007.
- [35] YAMANAKA K, KITO N, IMOKAWA Y, et al. Mechanism of epsilon-poly-L-lysine production and accumulation revealed by identification and analysis of an epsilon-poly-L-lysine-degrading enzyme[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(17): 5669-5675.
- [36] KITO M, ONJI Y, YOSHIDA T, et al. Occurrence of epsilon-poly-L-lysine-degrading enzyme in epsilon-poly-L-lysine-tolerant *Sphingobacterium multivorum* OJ10: purification and characterization. FEMS Microbiology Letter., 2002, 207(2): 147-151.
- [37] 张溪, 弓磊. 抗菌肽抗菌机制及研究热点[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(10): 1634-1640.
- ZHANG X, GONG L. Antimicrobial mechanism of antimicrobial peptide and research progress [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2020, 24(10): 1634-1640.
- [38] NING H Q, LI Y Q, LIN H, et al. Apoptosis-induction effect of ϵ -poly-lysine against *Staphylococcus aureus* and its application on pasteurized milk [J]. LWT -Food Science and Technology, 2021, 137: 110493.
- [39] 韩晴. ϵ -聚赖氨酸对金黄色葡萄球菌的抑制机理及在牛乳上的应用效果[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2015.
- HAN Q. Antibacterial mechanism of ϵ -polylysine against *Staphylococcus aureus* and its effect on the application of milk[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2015.
- [40] 邢蓓. ϵ -聚赖氨酸对 *Staphylococcus aureus* 活性及初级代谢的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- XING B. Effect of ϵ -poly-L-lysine on the activity and primary metabolism of *Staphylococcus aureus* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [41] TAN Z, SHI Y, XING B, et al. The antimicrobial effects and mechanism of ϵ -poly-lysine against *Staphylococcus aureus*[J]. Bioresources & Bioprocessing, 2019, 6(1): 1-10.
- [42] LIN L, GU Y, LI C, et al. Antibacterial mechanism of ϵ -poly-lysine against *Listeria monocytogenes* and its application on cheese[J]. Food Control, 2018, 91: 76-84.
- [43] 刘蔚. ϵ -聚赖氨酸抑菌机理及其在低温肉制品中的应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2009.
- LIU W. Antibacterial mechanism of ϵ -polylysine and its application in low temperature meat products[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2009.
- [44] 郭文燕, 童雅琪, 余雅琦, 等. ϵ -聚赖氨酸对大肠杆菌 O157:H7 和金黄色葡萄球菌的抗菌稳定性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 109-115.
- GUO W Y, TONG Y Q, YU Y Q, et al. The antimicrobial stability of ϵ -polylysine against *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(4): 109-115.
- [45] ZHANG X, SHI C, LIU Z, et al. Antibacterial activity and mode of action of epsilon-polylysine against *Escherichia coli* O157:H7[J]. Journal of Medical Microbiology, 2018, 67(6): 838-845.
- [46] BO T, LIU M, ZHONG C, et al. Metabolomic analysis of antimicrobial mechanisms of ϵ -poly-L-lysine on *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(19): 4454-4465.
- [47] 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.
- [48] TAN Z, BO T, GUO F, et al. Effects of epsilon-poly-L-lysine on the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae* and its involved antimicrobial mechanism [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118 (Pt B): 2230-2236.
- [49] 姜辣, 陈海燕, 张婧, 等. ϵ -聚赖氨酸盐酸盐对扩展青霉生长和产毒的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 38-43.
- JIANG L, CHEN H Y, ZHANG J, et al. Effects of ϵ -poly-L-lysine·HCl on growth of *Penicillium expansum* and production of patulin[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(4): 38-43.
- [50] 励建荣. 生鲜食品保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3):1-12.
- LI J R. Research progress of fresh-keeping technique for fresh food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(3): 1-12.
- [51] GE Y, WEI M, LI C, et al. Reactive oxygen species metabolism and phenylpropanoid pathway involved in disease resistance against *Penicillium expansum* in apple fruit induced by ϵ -poly-L-lysine

- [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(13): 5082–5088.
- [52] JIAO W, LIU X, CHEN Q, et al. Epsilon-poly-L-lysine (ϵ -PL) exhibits antifungal activity *in vivo* and *in vitro* against *Botrytis cinerea* and mechanism involved[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168(19): 111270.
- [53] SHU C, CUI K, LI Q, et al. Epsilon-poly-L-lysine (ϵ -PL) exhibits multifaceted antifungal mechanisms of action that control postharvest Alternaria rot [J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 348: 109224.
- [54] SONG Z, LI F, GUAN H, et al. Combination of nisin and ϵ -polylysine with chitosan coating inhibits the white bluish of fresh-cut carrots[J]. Food Control, 2017, 74: 34–44.
- [55] FAN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A combination treatment of ultrasound and ϵ -polylysine to improve microorganisms and storage quality of fresh-cut lettuce [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113(1): 108315.
- [56] 张春江, 王海燕, 罗欣. 微生物引起的肉与肉制品的腐败 [J]. 肉品卫生, 2001(6): 16–19.
ZHANG C J, WANG H Y, LUO X. Microbial spoilage of meat and meat products[J]. Meat Hygiene, 2001(6): 16–19.
- [57] CHANG SS, LU WY, PARK SH, et al. Control of foodborne pathogens on ready-to-eat roast beef slurry by epsilon-polylysine[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 141(3): 236–241.
- [58] MIYA S, TAKAHASHI H, HASHIMOTO M, et al. Development of a controlling method for *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in fresh market beef by using polylysine and modified atmosphere packaging[J]. Food Control, 2014, 37(1): 62–67.
- [59] MOSCHONAS G, GEORNARAS I, STOPFORTH J D, et al. Activity of caprylic acid, carvacrol, ϵ -polylysine and their combinations against *Salmonella* in not-ready-to-eat surface-browned, frozen, breaded chicken products[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(7): M405–411.
- [60] FENG L, SHI C, BEI Z, et al. Rosemary extract in combination with ϵ -polylysine enhance the quality of chicken breast muscle during refrigerated storage [J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(10): 2338–2348.
- [61] 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.
- [62] ALIREZALU K, MOVLAN HS, YAGHOUBI M, et al. ϵ -polylysine coating with stinging nettle extract for fresh beef preservation[J]. Meat Science, 2021, 176(1): 108474.
- [63] ALIREZALU K, PIROUZI S, YAGHOUBI M, et al. Packaging of beef fillet with active chitosan film incorporated with ϵ -polylysine: An assessment of quality indices and shelf life[J]. Meat Science, 2021, 176: 108475.
- [64] CHENG Y X, HU J F, WU S J. Chitosan based coatings extend the shelf-life of beef slices during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138(1): 110694.
- [65] ALIREZALU K, HESARI J, NEMATI Z, et al. Combined effect of natural antioxidants and antimicrobial compounds during refrigerated storage of nitrite-free frankfurter-type sausage[J]. Food Research International, 2019, 120: 839–850.
- [66] ALIREZALU K, HESARI J, YAGHOUBI M, et al. Combined effects of ϵ -polylysine and ϵ -polylysine nanoparticles with plant extracts on the shelf life and quality characteristics of nitrite-free frankfurter-type sausages[J]. Meat Science, 2021, 172: 108318.
- [67] 齐子琦, 秦子晋, 黄永震, 等. 生物防腐剂 ϵ -聚赖氨酸的研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 289–293.
QI Z Q, QIN Z J, HUANG Y Z, et al. Research progress of ϵ -polylysine as a biological preservative [J]. The Food Industry, 2019, 40(10): 289–293.
- [68] 佚名. 南美白对虾产业发展报告[J]. 中国水产, 2021(5): 27–36.
ANON. *Penaeus chinensis* industrial development report[J]. Chinese Aquaculture, 2021(5): 27–36.
- [69] JIA S, LIU Y, ZHUANG S, et al. Effect of ϵ -polylysine and ice storage on microbiota composition and quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) stored at 0 °C [J]. Food Microbiology, 2019, 83: 27–35.
- [70] NA S, KIM JH, JANG HJ, et al. Shelf life extension of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)

- using chitosan and ϵ -polylysine during cold storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 1103–1108.
- [71] CAI L, CAO A, BAI F, LI J. Effect of ϵ -polylysine in combination with alginate coating treatment on physicochemical and microbial characteristics of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) during refrigerated storage [J]. LWT—Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1053–1059.
- [72] LIU X, LI D, LI K, LUO Y. Monitoring bacterial communities in ϵ -polylysine-treated bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets using culture-dependent and culture-independent techniques[J]. Food Microbiology, 2018, 76: 257–266.
- [73] LI P, ZHOU Q, CHU Y, et al. Effects of chitosan and sodium alginate active coatings containing ϵ -polylysine on qualities of cultured pufferfish (*Takifugu obscurus*) during cold storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 418–428.
- [74] ALIREZALU K, YAGHOUBI M, NEMATI Z, et al. Efficacy of stinging nettle extract in combination with ϵ -polylysine on the quality, safety, and shelf life of rainbow trout fillets[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(3): 1542–1550.
- [75] LAN W Q, LIU L, ZHANG N N, et al. Effects of ϵ -polylysine and rosemary extract on the quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) stored on ice at (4±1)°C[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(10): e13418.
- [76] YAMADA M, HASIGUTI N. Effect of natural substances on the shelf life of boiled rice[J]. Food Chemicals, 2008, 29: 102–105.
- [77] OTSUKA N, KUWAHARA Y, MANABE M. Effect of epsilon - poly - lysine on preservation of boiled noodles[J]. Journal of Japanese Society of Food Science and Technology, 1992, 39(4): 344–347.
- [78] TUERSUNTUOHETI T, WANG Z, ZHANG M, et al. Combination use of the microwave irradiation and preservatives effect on the shelf life and quality of Qingke barley fresh noodles stored at low temperature[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15183.
- [79] HUANG X Q, SUO J H, CUI Y H. Optimization of antimicrobial activity of surfactin and polylysine against salmonella enteritidis in milk evaluated by a response surface methodology[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2011, 8(3): 439–443.
- [80] 孙昶. 乳制品中致病菌的调查与控制技术建立[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- SUN C. Investigation and control of pathogens in dairy products of *Staphylococcus aureus*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.
- [81] LIU H B, LI P, SUN C, et al. Inhibitor-assisted high-pressure inactivation of bacteria in skim milk [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7): 1672–1681.
- [82] KOZAK S M, BROWN S R B, BOBAK Y, et al. Control of *Listeria monocytogenes* in whole milk using antimicrobials applied individually and in combination[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 1889–1900.
- [83] LUZ C, TORRIJOS R, QUILES J M, et al. Shelf life extension of mozzarella cheese contaminated with *Penicillium* spp. using the antifungal compound ϵ -polylysine[J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(4):295–302.
- [84] 吴勤, 孟岳成, 李延华, 等. ϵ -聚赖氨酸在蓝莓汁饮料中的应用研究[J]. 食品科技, 2015(6): 71–75.
- WU Q, MENG Y C, LI Y H, et al. Application of ϵ -polylysine in blueberry juice beverage[J]. Food Science and Technology, 2015(6): 71–75.
- [85] 王换男, 卿琳华, 童群义. ϵ -聚赖氨酸对鲜榨血橙汁贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 219–226.
- WANG H N, QING L H, TONG Q Y. Effect of ϵ -poly-L-lysine on the storage quality of freshly squeezed blood orange juice[J]. Food and Fermentation Industries. 2020, 46(4): 219–226.
- [86] 吕志良, 周桂飞, 周斌. ϵ -聚赖氨酸在玉米汁饮料中的防腐应用[J]. 食品工业科技, 2010, 31(2): 289–291.
- LV Z L, ZHOU G F, ZHOU B. Application of ϵ -polylysine in antiseptic of fresh corn juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(2): 289–291.
- [87] 李亚娜, 吴凡, 贺庆辉, 等. 壳聚糖/ ϵ -聚赖氨酸对龙眼的保鲜性影响[J]. 武汉轻工大学学报, 2019, 38(5): 35–39.
- LI Y N, WU F, HE Q H, et al. The effect of chitosan/ ϵ -polylysine on longan fruit quality[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2019, 38(5): 35–39.

- [88] 陈东杰, 姜沛宏, 程丽林, 等. 生物保鲜剂对樱桃贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(1): 9-13.
CHEN D J, JIANG P H, CHENG L L, et al. Effect of bio-preservative on storage quality of cherry [J]. Storage and Process, 2019, 38(5): 35-39.
- [89] LI S, ZHANG L, LIU M, et al. Effect of poly- ϵ -lysine incorporated into alginate-based edible coatings on microbial and physicochemical properties of fresh-cut kiwifruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 134: 114-121.
- [90] 刘翔, 叶麟, 申光辉, 等. 天然抑菌剂在清水竹笋软罐头中的应用研究[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 62-65.
LIU X, YE L, SHEN G, et al. Application of natural antibacterial agent in soft canned bamboo shoots [J]. The Food Industry, 2018, 39(3): 62-65.
- [91] 郁杰, 张雨宸, 谢晶. 低强度 UV-A 光循环照射结合 ϵ -聚赖氨酸处理对 4 °C 下鲜切菠菜保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 154-160.
YU J, ZHANG Y C, XIE J. The effect of cyclic irradiation of low-intensity UV-A combined with ϵ -Polylysine on the preservation of fresh-cut spinach at 4 °C[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 154-160.
- [92] 郝瑞, 余群力, 陈颖予, 等. 复配天然保鲜剂结合冰温保鲜对牛肉保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 177-182.
HAO R, YU Q L, CHEN H Y, et al. Effect of the combination of natural preservative and ice-temperature on the preservation of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 177-182.
- [93] 赵圣明, 赵岩岩, 马小童, 等. 天然减菌剂对宰后鸡胴体表面雾化喷淋减菌效果研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 167-175.
ZHAO S M, ZHAO Y Y, MA X T, et al. Decontamination effects of natural preservatives on slaughtered broiler carcasses surface by atomization spraying treatments[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 167-175.
- [94] 贺羽, 王帅, 金益, 等. 天然保鲜剂对低温肉制品的保鲜作用[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 177-182.
HE Y, WANG S, JIN Y, et al. Study on preservation of low-temperature meat products by natural preservatives[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 177-182.
- [95] 张海燕, 吴燕燕, 杨少玲, 等. ϵ -聚赖氨酸与魔芋葡甘聚糖复配对海鲈鱼片的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 202-208.
ZHANG HY, WU YY, YANG S L, et al. Combined preservation effects of ϵ -polylysine and konjac glucomannan on *Lateolabrax japonicus* fillets[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 202-208.
- [96] 王军华, 王易芬, 裘纪莹, 等. ϵ -聚赖氨酸对牡蛎的防腐抗菌效果[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 270-275.
WANG J H, WANG Y F, QIU J Y, et al. Antiseptic and antimicrobial effects of ϵ -polylysine on Oysters[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 270-275.
- [97] 杨云斌, 周桂飞, 周斌. ϵ -聚赖氨酸对米饭保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(9): 77-79.
YANG Y B, ZHOU G F, ZHOU B. Study on preservation of cooked-rice with ϵ -Poly-L-lysine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(9): 77-79.
- [98] 滕井正弘, 吕绍杰. 日本对于天然食品防腐剂的开发与应用[J]. 食品添加剂工业, 1996(2): 21-26.
TENJING Z H, LÜ S J. Development and application of natural food preservatives in Japan[J]. Food Additive Industry, 1996(2): 21-26.
- [99] 袁秋萍, 叶盛德, 李玲, 等. 白茶米糕保鲜技术研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(6): 182-187.
YUAN Q P, YE S D, LI L, et al. Study on preservation technology of white tea steamed cake [J]. Food Research and Development, 2018, 39(6): 182-187.
- [100] 陈什康, 单长松, 陈志刚. 三种保鲜剂复配对生鲜面的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 270-276.
CHEN S K, SHAN C S, CHEN Z G. Effect of compound proportion of three preservatives on fresh noodles preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 270-276.

The Antibacterial Mechanism and Application of ϵ -Poly-*L*-Lysine in Food Preservation

Zhang Chongyang, Chen Xusheng*

(Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu)

Abstract ϵ -Poly-*L*-lysine (ϵ -PL) is a new natural food preservative approved by our country since 2014. It has attracted extensive attention from the food industry due to its excellent characteristics, such as wide antibacterial spectrum, good water solubility, high safety, high temperature resistance and good stability. Thus, ϵ -PL has become a key natural food preservative instead of chemical food preservatives. This review is firstly introduced ϵ -PL's physicochemical and biological properties and microbial production methods. Then, the worldwide achievements of ϵ -PL's antimicrobial mechanisms and applications in food industry in recent decade years are systematically reviewed. Finally, the future research on ϵ -PL is prospected based on the analysis of the application bottleneck of ϵ -PL in food industry. It is expected that this review provide references for the wide use of ϵ -PL in China's food industry.

Keywords natural food preservative; ϵ -poly-*L*-lysine; antibacterial mechanism; food preservation