

# 微生物源生物保鲜剂对水产品腐败菌作用机制研究进展

蓝蔚青<sup>1,2</sup>, 冯豪杰<sup>1</sup>, 刘大勇<sup>3</sup>, 徐逍<sup>3</sup>, 谢晶<sup>1,2</sup>

(1.上海海洋大学 a.食品学院 b.食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3.江苏中洋生态鱼类股份有限公司, 江苏 南通, 226600)

**摘要:** **目的** 了解微生物源生物保鲜剂对水产品腐败菌作用的研究现状, 延长水产品的贮藏货架期。

**方法** 分析常见水产品特定腐败菌种类、生物保鲜剂分类与主要优缺点, 在此基础上, 分别阐述乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸、乳酸菌、双歧杆菌等常用微生物源生物保鲜剂的抑菌机理与研究现状, 提出其存在的问题和改进建议, 并对微生物源生物保鲜剂的发展前景进行展望。**结论** 微生物源生物保鲜剂与其他生物保鲜剂或保鲜技术相结合, 能有效提高抑菌效果, 发展前景广阔。

**关键词:** 水产品; 微生物源生物保鲜剂; 作用机制; 研究进展

中图分类号: S983 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)05-0031-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.005

## Research Progress on Mechanism of Microbial Source Bio-preservatives on Spoilage Bacteria of Aquatic Products

LAN Wei-qing<sup>1,2</sup>, FENG Hao-jie<sup>1</sup>, LIU Da-yong<sup>3</sup>, XU Xiao<sup>3</sup>, XIE Jing<sup>1,2</sup>

(1a.College of Food Science and Technology b.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.Shanghai Aquatic Products

Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China;

3.Jiangsu Zhongyang Ecological Fish Co., Ltd., Nantong 226600, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to understand the research status of microbial source bio-preservatives on spoilage bacteria and extend the shelf life of aquatic products. Based on the analysis of specific spoilage bacteria in common aquatic products, classification, advantages and disadvantages of common biological preservatives, the bacteriostatic mechanism and research progress of Nisin, ε-polylysine, lactic acid bacteria and bifidobacteria were described respectively. The main suggestions for improvement were put forward and the development of microbial source bio-preservatives was also prospected. Microbial source bio-preservatives combined with other bio-preservatives or preservation technology can improve the bacteriostatic effect effectively. It has broad development prospects.

**KEY WORDS:** aquatic products; microbial source bio-preservatives; mechanism; research progress

收稿日期: 2019-08-05

基金项目: 农业部海水鱼产业体系项目 (CARS-47-G26); 江苏省农业科技自主创新资金 (CX (18) 2009); 上海市科委平台能力建设项目 (19DZ2284000)

作者简介: 蓝蔚青 (1977—), 男, 博士, 上海海洋大学高级工程师, 主要研究方向为食品保鲜技术。

通信作者: 谢晶 (1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授、博导, 主要研究方向为食品保鲜技术。

我国是渔业大国,水产资源丰富。自 1985 年,中国水产品总量呈逐年递增趋势,2018 年达到 6457.66 万 t,连续 33 年居世界第一<sup>[1]</sup>。水产品为高蛋白食品,其富含不饱和脂肪酸二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳六烯酸(DHA)、维生素与微量元素等,现已成为广受消费者欢迎的主要食品之一。由于水产品中存在内源酶与微生物,易发生腐败变质,其在流通贮藏期间品质会随之下降,水产品流通腐损率高达 15%以上<sup>[2]</sup>。

微生物源保鲜剂是由微生物代谢产生并具有抑菌效果的物质<sup>[3]</sup>。近年来因其安全高效、抑菌效果好等特点,受到国内外科研人员的重视,并逐渐应用于水产品保鲜。微生物源保鲜剂作用原理是通过微生物生长代谢产生抑菌物质(如抗生素、细菌素、过氧化氢和有机酸等)来改变环境 pH 值,达到抑制或杀灭微生物的目的,主要有乳酸链球菌素、 $\epsilon$ -聚赖氨酸、乳酸菌、双歧杆菌与纳他霉素等。文中拟在简述常见生物保鲜剂分类、主要优缺点与水产品中常见腐败菌分布的基础上,阐明主要微生物源生物保鲜剂对水产品腐败菌的作用机理与研究现状,提出存在问题与解决途径,并展望其发展前景。

## 1 水产品中主要腐败菌及生物保鲜剂分类

相关研究表明,在水产品腐败初期,主要存在的微生物有假单胞菌、黄杆菌、磷光杆菌、活泼性赤球菌、无色菌,以及粘附于水产品表面上的大肠杆菌、枯草芽孢杆菌等<sup>[4]</sup>。水产品中的微生物种类一方面取决于其生长环境,如在海产品中,腐败希瓦氏菌与假单胞菌为优势腐败菌;在淡水产品中,假单胞菌

为优势腐败菌<sup>[5]</sup>。另一方面,水产品中微生物的菌相组成也因其种类、贮藏方式等不同而有所差异,具体见表 1。

生物保鲜剂作为一类新型保鲜剂,具有无毒无害、来源广、成本低、应用前景良好等优点,受到科研人员与消费者的普遍欢迎。根据来源不同,生物保鲜剂可分为植物源、动物源与微生物源保鲜剂<sup>[12]</sup>。其主要优缺点见表 2。

## 2 主要微生物源生物保鲜剂及其作用机制

微生物源生物保鲜剂的主要成分一般可分为微生物菌体、微生物代谢产物与微生物发酵液等 3 类<sup>[19]</sup>,其主要通过 3 个方面达到抑菌保鲜目的。

1) 抑菌杀菌。抑制或杀灭有害微生物,延缓食品变质。

2) 竞争抑制。有益微生物与有害微生物彼此竞争营养物质,抑制有害微生物生长繁殖。

3) 生物保护膜。在食品表面形成一层生物保护膜,隔绝氧气,防止食品氧化酸败。

乳酸链球菌素、 $\epsilon$ -聚赖氨酸、乳酸菌与双歧杆菌等微生物源生物保鲜剂现已被广泛用于水产品的抑菌保鲜。

### 2.1 乳酸链球菌素

乳酸链球菌素(Nisin)又名乳酸链球菌肽,是一种由乳酸链球菌产生的多肽物质(见图 1)。其可有效抑制多数引起食品腐败的革兰氏阳性细菌与孢子繁殖,尤其对耐热芽孢杆菌、肉毒梭状芽孢杆菌与

表 1 部分水产品中主要特定腐败菌的种类分布

Tab.1 Distribution of specific spoilage bacteria in common aquatic products

种类	贮藏方式	特定腐败菌	研究人员	发表年份
鲳鱼	冷藏	荧光假单胞菌、腐败希瓦氏菌	蓝蔚青等 <sup>[6]</sup>	2013
挪威龙虾	冷藏	嗜冷菌、假单胞菌	Bekaert 等 <sup>[7]</sup>	2015
大黄鱼	冷藏	腐败希瓦氏菌	Zhu 等 <sup>[8]</sup>	2016
草鱼	冷藏	气单胞菌、假单胞菌	王航 <sup>[9]</sup>	2016
鲑鱼	冷藏	荧光假单胞菌	张新林等 <sup>[10]</sup>	2017
暗纹东方鲀	冰温	荧光假单胞菌	苏红等 <sup>[11]</sup>	2018

表 2 水产品常用生物保鲜剂的种类及主要优缺点

Tab.2 Varieties, main advantages and disadvantages of bio-antibacterial agents in aquatic products

保鲜方式	代表物	优点	缺点	应用实例
植物源	茶多酚、迷迭香提取物	种类多、安全有效、抑菌效果好	部分抑菌机理及抑菌成分尚不明确	Ju 等 <sup>[13]</sup> 、Jia 等 <sup>[14]</sup>
动物源	壳聚糖、抗菌肽	提取原料丰富、对环境无害、所需剂量小	涂膜难度大、透气性不足,限制了其作为包装材料的应用 <sup>[13]</sup>	Bonill 等 <sup>[15]</sup> 、Yu 等 <sup>[16]</sup>
微生物源	乳酸链球菌素、 $\epsilon$ -聚赖氨酸	无残留、无耐药性、热稳定性好	抑菌活性对环境条件要求高	Wu 等 <sup>[17]</sup> 、Sofra 等 <sup>[18]</sup>

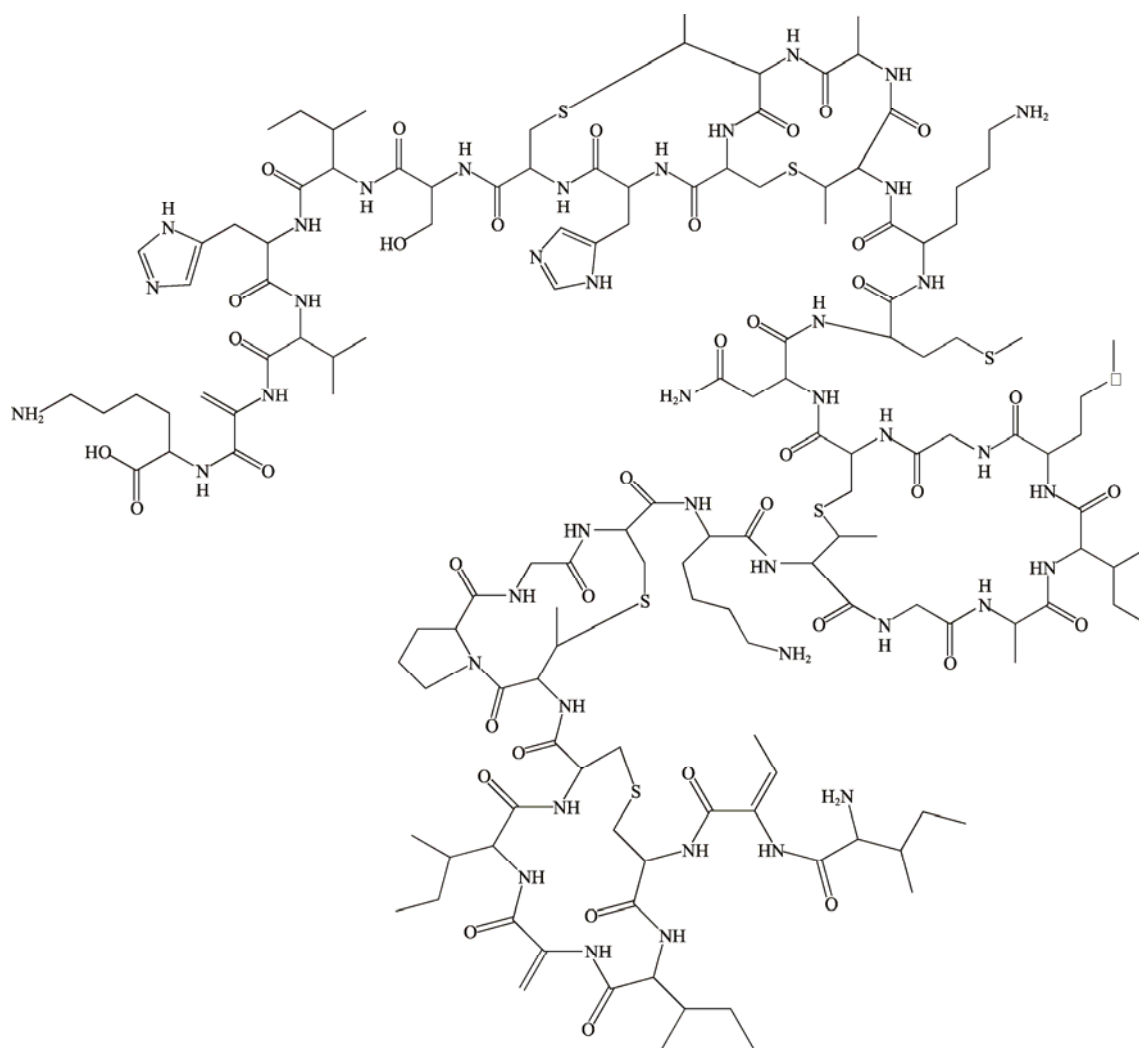


图 1 乳酸链球菌素化学结构式

Fig.1 Chemical structural formula of nisin

单增李斯特菌有明显抑制作用,进入人体后即被蛋白酶分解为多种氨基酸,因此是一种天然安全的食品抑菌剂<sup>[20]</sup>。

目前关于 Nisin 的抑菌机理可分为 2 个方面。

1) 与菌体细胞膜上的 LipidII (细菌萜醇-焦磷酸-N-乙酰胞壁酸-五肽-N-乙酰葡萄糖胺) 分子结合,形成 Nisin-lipidII 孔洞复合物,其可与细胞膜作用形成穿孔通道,使细胞内物质外流。

2) LipidII 分子是细胞壁合成的重要中间体,其与 LipidII 结合后阻碍了细胞壁的正常合成,抑制了细胞生长。

Nisin 的抗菌谱较窄,仅对革兰氏阳性菌发生作用,对大部分革兰氏阴性菌无抑制作用<sup>[21]</sup>。吕志飞等<sup>[22]</sup>得出 Nisin 对金黄色葡萄球菌的最小抑菌质量浓度 (Minimal Inhibit Concentration, MIC) 为 0.5  $\mu\text{g/mL}$ ,可有效抑制其生长繁殖,使菌体细胞膜受损渗漏、营养成分流失、膜电位下降;Zhao 等<sup>[23]</sup>对 Nisin 处理过的金黄色葡萄球菌进行了基因表达谱分析,通过全基因组转录分析得出, Nisin 能有效阻断金黄色葡萄球

菌中的主要功能性基因转录;Ce 等<sup>[24]</sup>通过扫描电子显微镜发现使用 Nisin 处理金黄色葡萄球菌后,其细胞壁和细胞膜受到损伤,菌体生长受到抑制 (见图 2);Li 等<sup>[25]</sup>研究了 Nisin 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌作用,结果得出大肠杆菌经 Nisin 处理后,其细胞膜完整性未发生改变,表明 Nisin 对大肠杆菌不发生作用;金黄色葡萄球菌的形态受损严重,膜表面变形,出现明显凹陷、皱纹或孔洞,并伴随质壁分离现象。

## 2.2 $\epsilon$ -聚赖氨酸

$\epsilon$ -聚赖氨酸是先由链霉菌生物合成 L-赖氨酸同型聚合物,然后通过 L-赖氨酸分子间的  $\alpha$ -羧基与  $\epsilon$ -氨基缩合反应形成的肽键连接而成,一般由 25~35 个残基组成 (见图 3)<sup>[26]</sup>。

$\epsilon$ -聚赖氨酸抑菌谱广,尤其对革兰氏阳性菌中的芽孢杆菌、革兰氏阴性菌中的大肠杆菌、酵母菌与霉菌的抑制效果最为明显。其先作用于菌体细胞膜,在膜上形成孔洞,导致内容物外渗,此时细胞仍能存活,

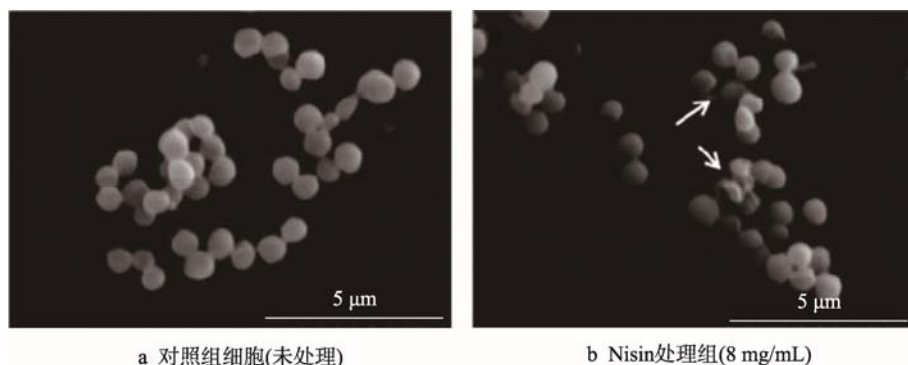


图2 Nisin 作用于金黄色葡萄球菌 ATCC 29213 的扫描电镜结果

Fig.2 Scanning electron microscope (SEM) of *staphylococcus aureus* ATCC 29213 treated with nisin

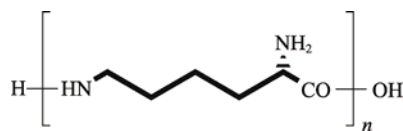


图3  $\epsilon$ -聚赖氨酸化学结构式

Fig.3 Chemical structural formula of  $\epsilon$ -polylysine

性状不变； $\epsilon$ -聚赖氨酸借助膜孔道进入细胞内部，使膜结构功能和生长代谢发生变化，阻碍了细胞内物质、能量与信息传递，继而作用于细胞内部物质，使胞核受损，导致菌体死亡<sup>[27]</sup>。

付萍<sup>[28]</sup>研究了  $\epsilon$ -聚赖氨酸对大肠杆菌的作用机理，发现  $\epsilon$ -聚赖氨酸通过静电作用吸附至磷壁酸上，在细胞壁上形成微小孔洞，使细胞壁结构与细胞膜完整性受到破坏，抑制其生长。陈晓青等<sup>[29]</sup>研究了  $\epsilon$ -聚赖氨酸对金黄色葡萄球菌生物膜形成影响，得出  $\epsilon$ -聚赖氨酸对金黄色葡萄球菌的 MIC 为 31.25 mg/mL，其抑菌效果与质量浓度正相关；1/2 MIC 的  $\epsilon$ -聚赖氨酸即可抑制金黄色葡萄球菌的生长繁殖，影响生物膜形成。刘伟<sup>[30]</sup>研究了  $\epsilon$ -聚赖氨酸对草鱼鱼肉中腐败微生物的作用机制，得出  $\epsilon$ -聚赖氨酸可使腐败菌细胞膜的疏水性增大 1~2 倍，改变通透性，破坏胞膜离子通道，使胞内的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  外流；同时，腐败菌细胞膜上分子量大于 38 ku 的蛋白质合成或分解过程受阻，膜屏障破损后形成孔洞。冯建岭<sup>[31]</sup>研究得出  $\epsilon$ -聚赖氨酸的抑菌作用与其浓度正相关。大肠杆菌经  $\epsilon$ -聚赖氨酸处理后，菌体细胞表面受损，细胞内  $\beta$ -半乳糖苷酶与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等离子外流，并降解细胞蛋白质、干扰蛋白质合成，进而导致蛋白质聚集，抑制细胞内呼吸链脱氢酶活性。此外，细胞 DNA 结构遭到破坏、阻碍了 DNA 的正常合成，使 DNA 和 RNA 泄漏，达到杀灭效果。

## 2.3 乳酸菌

乳酸菌及其代谢产物具有安全、无残留和广谱抗菌等特点，现已广泛应用于乳制品、肉制品、果蔬与水产品等领域。肠道细菌虽存在于生鲜水产品中的

主要菌群，但水产品中的乳酸菌经一定时间的生长繁殖后可逐渐转变为优势菌<sup>[32]</sup>。Rajaram 等<sup>[33]</sup>从海洋泥沙中分离得到乳酸乳杆菌，得出其对芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、粪肠球菌、大肠杆菌和志贺氏菌均有良好的抑菌效果。Hwanhlem 等<sup>[34]</sup>在土壤、水、叶、枝和果实中分离出的乳酸乳球菌 KT2W2L，其对冷藏虾中的单增李斯特菌、热死环丝菌均有拮抗作用，该菌可抑制食品中腐败菌和致病菌的生长。

乳酸菌作用机制通常为产生有机酸、细菌素等代谢产物，抑制腐败微生物生长；与腐败菌竞争生长环境和营养成分，形成酸性环境<sup>[35]</sup>。刘文婷等<sup>[36]</sup>研究发现，荧光假单胞菌经乳酸菌细菌素 Lac-B23 处理后，细胞外膜首先遭到破坏，细胞膜上出现孔洞，通透性增强，导致细胞内的无机磷和 ATP 渗出，同时跨膜电位和 pH 值梯度消散。王伟<sup>[37]</sup>研究发现乳酸菌抗菌肽 Lac-B23 对荧光假单胞菌的 MIC 为 640  $\mu\text{g/mL}$ ，由透射电镜观察到经抗菌肽处理后，膜内菌体凋亡数增多，菌体完整性下降，表明乳酸菌抗菌肽 Lac-B23 能使细胞膜通透性增加，内容物流出。马欢欢等<sup>[38]</sup>研究发现用鲈鱼肠道中的清酒乳杆菌 LY1-6 处理荧光假单胞菌后，抑菌效果明显，其主要抑菌活性物质为细菌素类，由扫描电镜观察到细胞结构被破坏并溶解。Yang 等<sup>[39]</sup>比较了富硒乳酸菌和非硒乳酸菌对病原菌的抗菌活性，采用扫描电子显微镜观察发现富硒乳酸菌能造成菌体细胞明显损伤，出现明显凹陷或空洞。刘辉等<sup>[40]</sup>研究发现乳酸菌抗菌肽 Enterocin T1 和 Plantaricin Q7 均先吸附于单增李斯特菌细胞膜表面，随后再作用于细胞膜内部物质，达到抑菌效果；对荧光假单胞菌的抑菌机制则是乳酸菌抗菌肽螯合  $\text{Zn}^{2+}$  后，其外膜遭到破坏，随后再与细胞膜作用。2 种乳酸菌抗菌肽都能引起 2 种菌细胞内  $\text{K}^+$  和磷酸盐离子发生不同程度泄漏，乳酸菌抗菌肽 Enterocin T1 还能影响其跨膜电位和 pH 梯度。Ning 等<sup>[41]</sup>研究得出，苯乳酸可破坏单增李斯特菌膜的完整性，并与基因组 DNA 结合，干扰细胞的正常

功能。苯乳酸虽可干扰大肠杆菌外膜通透性,但膜完整性不受影响,表明其对食源性病原菌的靶标为细菌膜和基因组 DNA。

## 2.4 双歧杆菌

双歧杆菌是一种存在于人和哺乳类动物肠道内重要的生理性有益菌,为革兰氏阳性、厌氧、不运动的分歧杆菌。其主要通过竞争营养成分和粘附位点、产生抑菌物质、增强机体免疫力等方式,达到拮抗肠道致病菌生长,阻断其致病途径的目的,能很好抑制常见腐败菌和低温菌<sup>[42]</sup>。双歧杆菌可产生有机酸、细菌素、类细菌素等主要抑菌物质,其代谢产物为乳酸、乙酸等,能使环境中的  $H^+$  浓度增加,当浓度高于致病菌细胞内液态  $H^+$  浓度时,  $H^+$  便渗透进入致病菌细胞内,使细胞质酸化并影响菌体生长,甚至可使致病菌失去活性<sup>[43]</sup>。刘国荣等<sup>[44]</sup>研究得出双歧杆菌细菌素 Bifidocin A 对金黄色葡萄球菌的 MIC 为 0.058  $\mu\text{g/mL}$ ,该细菌素主要通过消散细胞膜质子移动势能,在细胞膜上形成孔洞,破坏胞膜完整性,最终导致细胞瓦解;细菌素 Bifidocin A 对大肠杆菌<sup>[45]</sup>的抑菌效果可能通过改变细胞膜结构,阻断三羧酸循环过程,减少能量和三磷酸腺苷供给,降低细胞对外界胁迫条件的抵抗能力等方式来实现。

## 3 存在问题与改进建议

### 3.1 与其他生物保鲜剂相结合

单一微生物源生物保鲜剂存在抗菌谱窄、作用范围小等问题,其抑菌保鲜功效也相对有限,如能根据栅栏技术原理,将多种具有不同保鲜效果的单一生物保鲜剂按一定比例复配,组成复合生物保鲜剂,不仅可使单一生物保鲜剂用量减少,同时其抑菌效果也会明显增强<sup>[46]</sup>。Liu 等<sup>[47]</sup>研究了  $\epsilon$ -聚赖氨酸与 Nisin 的联合抗菌机制,研究发现 15.63  $\mu\text{g/mL}$  的  $\epsilon$ -聚赖氨酸与 31.25  $\mu\text{g/mL}$  的 Nisin 复合处理枯草芽孢杆菌,可使菌体细胞明显受损,外膜大多消失,内容物泄漏,表明 1/4 MIC 的 Nisin 可破坏其细胞结构,加快  $\epsilon$ -聚赖氨酸进入细胞的速率,导致原生质通过细孔渗漏到外部,使菌体死亡。Ce 等<sup>[24]</sup>将 8  $\mu\text{g/mL}$  的 Nisin 与 0.25  $\text{mg/mL}$  的肉桂醛配成复合保鲜剂来处理金黄色葡萄球菌,发现菌体细胞表面疏水性增强,外部结构遭到破坏,细胞壁受损,使细胞裂解。

### 3.2 与其他保鲜技术相结合

将微生物源生物保鲜剂与气调包装、冰温贮藏、超高压、辐照等传统保鲜技术相结合,可优势互补,抑制水产品中微生物生长,提升综合作用效果。鞠键等<sup>[48]</sup>研究表明,质量分数 0.03% 的 Nisin 结合 4 kGy

辐照处理可有效抑制冷藏鲈鱼中微生物的生长繁殖,延长其货架期。霍健聪等<sup>[49]</sup>研究得出,0.6  $\text{g/L}$  的  $\epsilon$ -聚赖氨酸与 250 MPa 超高压协同处理 30 min,可显著降低冷藏鲤鱼块的微生物数量,有效保持其色泽,在 80 h 内菌落总数未超标。

### 3.3 新型微生物源生物保鲜剂

可通过加强新型微生物源生物保鲜剂如纳米微生物源生物保鲜剂的研发,充分利用纳米材料体积小、比表面积大等特点,提升其抑菌效果<sup>[50]</sup>。目前,其在水产品保鲜方面的应用还很少,且纳米材料的制备成本较高,因此还需要进一步深入研究。

## 4 结语

在保持水产品鲜度的前提下,如何尽可能延长其货架期是目前亟须解决的关键问题。一方面要继续加大微生物源生物保鲜剂对水产品保鲜效果的影响,将生物保鲜剂复配或与其他保鲜技术结合。此外,还需深入研发纳米级微生物源生物保鲜剂,这是今后水产品保鲜新的研究方向。另一方面,目前对微生物源生物保鲜剂的抑菌机理、抑菌谱与应用范围研究尚浅,尤其对蛋白质组学、DNA 方面的研究不足。在保证食品食用安全的前提下,要大力加强微生物源生物保鲜剂的抑菌效果及作用机制研究,促进微生物源生物保鲜剂的应用推广。

### 参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2018: 17.  
Ministry of Agriculture and Rural Fisheries and Fisheries Administration, National Aquatic Technology Extension Station, Chinese Fisheries Society. 2019 China Fishery Statistics Yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018: 17.
- [2] 姜明珠. 农产品冷链物流发展现状与对策[J]. 科技经济市场, 2018(9): 61—62.  
JIANG Ming-zhu. Development Status and Countermeasures of Cold Chain Logistics of Agricultural Products[J]. Technology Economic Market, 2018(9): 61—62.
- [3] 倪萍. 冷却猪肉微生物源保鲜剂分离、鉴定及保鲜效果的初步研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2013: 14.  
NI Ping. Preliminary Study on Isolation, Identification of a Microbial Preservative and Its Effects on Preservation of Chilled Pork[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013: 14.
- [4] 熊善柏. 水产品保鲜储运与检验[M]. 北京:化学工业出版社,2007: 45.

- XIONG Shan-bai. Technology of Storage, Transportation and Inspection for Aquatic Product[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 45.
- [5] 励建荣, 杨兵, 李婷婷. 水产品优势腐败菌及其群体感应系统研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(19): 255—259.
- LI Jian-rong, YANG Bing, LI Ting-ting. Advances in Quorum Sensing of Dominant Spoilage Bacteria from Aquatic Products[J]. Food Chemistry, 2015, 36(19): 255—259.
- [6] 蓝蔚青, 谢晶, 施建兵, 等. 冷藏鲳鱼贮藏期间的细菌种群变化[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(11): 1141—1148.
- LAN Wei-qing, XIE Jing, SHI Jian-bing, et al. Bacterial Species Changes in *Pampus Argenteus* during Chilled Storage[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2013, 32(11): 1141—1148.
- [7] BEKAERT K, DEVRIESE L, MAES S. Characterization of the Dominant Bacterial Communities during Storage of Norway Lobster and Norway Lobster Tails (*Nephrops Norvegicus*) Based on 16Sr DNA Analysis by PCR-DGGE[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 132—138.
- [8] ZHU J I, ZHAO A F, FENG L F. Quorum Sensing Signals Affect Spoilage of Refrigerated Large Yellow Croaker by *Shewanella Baltica*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 217: 146—155.
- [9] 王航. 草鱼贮藏过程中品质变化规律及特定腐败菌的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 49.
- WANG Hang. Quality Changes and the Specific Spoilage Organisms of Grass Carp (*Ctenopharyngodon Idellus*) Fillets during Storage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016: 49.
- [10] 张新林, 谢晶, 钱韻芳, 等. 不同温度条件下三文鱼中荧光假单胞菌生长预测模型的建立[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 74—79.
- ZHANG Xin-lin, XIE Jing, QIAN Yun-fang, et al. Predictive Growth Model for *Pseudomonas* Fluorescence in Salmon at Different Temperatures[J]. Food Chemistry, 2017, 38(21): 74—79.
- [11] 苏红, 申亮, 毕诗杰, 等. 复合生物保鲜剂结合冰温贮藏对红鳍东方鲀的保鲜效果[J]. 水产学报, 2019, 43(3): 1—20.
- SU Hong, SHEN Liang, BI Shi-jie, et al. Preservation Effect of Complex Biological Preservative Combined with Ice Temperature Storage on *Takifugu Rubripes*[J]. Journal of Fisheries, 2019, 43(3): 1—20.
- [12] 老莹, 胡文忠, 冯可, 等. 天然抑菌剂的抑菌机理及其在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 288—293.
- LAO Ying, HU Wen-zhong, FENG Ke, et al. Application of Natural Antimicrobial Agents on Fruits and Vegetables Preservation and Its Mechanism[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(9): 288—293.
- [13] JU J, LIAO L, QIAO Y. The Effects of Vacuum Package Combined with Tea Polyphenols Treatment on Quality Enhancement of Weever (*Micropterus Salmoides*) Stored at 0 °C and 4 °C[J]. LWT-food Science and Technology, 2018, 91: 484—490.
- [14] JIA S I, HUANG Z, LEI Y T, et al. Application of Illumina-MiSeq High Throughput Sequencing and Culture-dependent Techniques for the Identification of Microbiota of Silver Carp (*Hypophthalmichthys Molitrix*) Treated by Tea Polyphenols[J]. Food Microbiology, 2018, 76: 52—61.
- [15] BONILLA F, CHOULJENKO A, REYES V. Impact of Chitosan Application Technique on Refrigerated Catfish Fillet Quality[J]. LWT-food Science and Technology, 2018, 90: 277—282.
- [16] YU D W, REGENSTEIN J, ZANG J H, et al. Inhibitory Effects of Chitosan-based Coatings on Endogenous Enzyme Activities, Proteolytic Degradation and Texture Softening of Grass Carp (*Ctenopharyngodon Idellus*) Fillets Stored at 4 °C[J]. Food Chemistry, 2018, 262(1): 1—6.
- [17] WU T T, WU C H, FANG Z X. Effect of Chitosan Microcapsules Loaded with Nisin on the Preservation of Small Yellow Croaker[J]. Food Control, 2017, 79: 317—324.
- [18] SOFRA C, TSIRONI T, TAOUKIS P. Modeling the Effect of Pretreatment with Nisin Enriched Osmotic Solution on the Shelf Life of Chilled Vacuum Packed Tuna[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 216: 125—131.
- [19] 赖小龙, 李文平, 廖鹏运, 等. 生物源食品保鲜剂研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(1): 79—84.
- LAI Xiao-long, LI Wen-ping, LIAO Peng-yun, et al. Research Progress on Biological Preservative of Food Products[J]. Sichuan Food and Fermentation, 2013, 49(1): 79—84.
- [20] CATHERINE J, NADIA O. Nisin as a Food Preservative Part 2: Antimicrobial Polymer Materials Containing Nisin[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(8): 1275—1289.
- [21] LIU H, PEI H, HAN Z, et al. The Antimicrobial Effects and Synergistic Antibacterial Mechanism of the Combination of  $\epsilon$ -Polylysine and Nisin against *Bacillus Subtilis*[J]. Food Control, 2015(47): 444—450.
- [22] 吕志飞, 连战, 王如娜, 等. 内酯型槐糖脂与乳酸链球菌素对金黄色葡萄球菌的抑菌活性比较及联合抑菌效果研究[J]. 中国调味品, 2018, 43(6): 13—18.
- LYU Zhi-fei, LIAN Zhan, WANG Ru-na, et al. Research on the Antibacterial Activities of Lactonic Sophorolipids and Nisin on *Staphylococcus Aureus* under Individual and Combined Uses[J]. China Condiment, 2018, 43(6): 13—18.
- [23] ZHAO X C, MENG R Z, CE S, et al. Analysis of the Gene Expression Profile of *Staphylococcus Aureus* Treated with Nisin[J]. Food Control, 2016(59): 499—506.



- [24] CE S, ZHANG X W, ZHAO X C, et al. Synergistic Interactions of Nisin in Combination with Cinnamaldehyde against *Staphylococcus Aureus* in Pasteurized Milk[J]. Food Control, 2017, 71: 10—16.
- [25] LI H, XU Z Z, ZHAO F, et al. Synergetic Effects of High-pressure Carbon Dioxide and Nisin on the Inactivation of *Escherichia Coli* and *Staphylococcus Aureus*[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 180—186.
- [26] LI Y N, YE Q Q, HOU W F, et al. Development of Antibacterial  $\epsilon$ -polylysine/Chitosan Hybrid Films and the Effect on Citrus[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 2051—2056.
- [27] LIU X C, LI D P, LI K F. Monitoring Bacterial Communities in  $\epsilon$ -polylysine-treated Bighead Carp (*Aristichthys Nobilis*) Fillets Using Culture-dependent and Culture-independent Techniques[J]. Food Microbiology, 2018, 76: 257—266.
- [28] 付萍.  $\epsilon$ -聚赖氨酸对 *E.coli* 抑菌机制及影响因素的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 43.  
FU Ping. Research on the Bacteriost Mechanism and Influence-factor of  $\epsilon$ -poly-L-lysine on *Escherichia Coli*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016: 43.
- [29] 陈晓青, 李可可, 余甜, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸对金黄色葡萄球菌生长及生物膜形成的影响[J]. 中国抗生素杂志, 2018, 43(1): 91—95.  
CHEN Xiao-qing, LI Ke-ke, YU Tian, et al. Effects of  $\epsilon$ -PL on Growth and Biofilm Formation of *Staphylococcus Aureus*[J]. Chinese Antibiotic Journal, 2018, 43(1): 91—95.
- [30] 刘伟. 基于草鱼鱼肉中腐败微生物抑制的  $\epsilon$ -聚赖氨酸抑菌机理研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017: 35.  
LIU Wei. Studies on Antimicrobial Mechanism of  $\epsilon$ -polylysine against Spoilage Microorganism in Grass Carp[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017: 35.
- [31] 冯建岭.  $\epsilon$ -聚赖氨酸的防腐效果及对大肠杆菌抑制机理的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014: 42—43.  
FENG Jian-ling. Preservative Effect of  $\epsilon$ -polylysine and Its Antibacterial Mechanism against *Escherichia Coli*[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2014: 42—43.
- [32] FENTA L, ASSEFA A. Invitro Evaluation of Antibacterial Activity of Lactic Acid Bacteria Isolated from Ergo and Qotchqotcha, Ethiopian Traditional Fermented Foods, against Some Selected Food Borne Pathogens[J]. International Journal of Scientific and Technology Research, 2017, 6(9): 230—238.
- [33] RAJARAM G, MANIVASAGAN P, GUNASEKARAN U, et al. Isolation, Identification and Characterization of Bacteriocin from *Lactobacillus Lactis* and Its Antimicrobial and Cytotoxic Properties[J]. African Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2010, 4(12): 895—902.
- [34] HWANHLEM N, CHOBERT J M. Bacteriocin-producing Lactic Acid Bacteria Isolated from Mangrove Forests in Southern Thailand as Potential Bio-controlagents in Food: Isolation, Screening and Optimization[J]. Food Control, 2014, 41(7): 202—211.
- [35] SWETWIWATHAHA A, VISESSANGUAN W. Potential of Bacteriocin-producing Lactic Acid Bacteria for Safety Improvements of Traditional Thai Fermented Meat and Human Health[J]. Meat Science, 2015, 109(11): 101—105.
- [36] 刘文婷, 王伟, 易华西, 等. 乳酸菌细菌素 Lac-B23 对荧光假单胞菌及其生物膜的抑制作用[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 1—7.  
LIU Wen-ting, WANG Wei, YI Hua-xi, et al. Anti-biofilm and Antimicrobial Activity of Bacteriocin Lac-B23 from Lactic Acid Bacteria against *Pseudomonas Fluorescens*[J]. Food Chemistry, 2017, 38(24): 1—7.
- [37] 王伟. 乳酸菌抗菌肽 Lac-B23 对荧光假单胞菌生物膜的消减作用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 69.  
WANG Wei. Study on the Effect of Antibacterial Peptides Lac-B23 from *Lactobacillus* on *Pseudomonas Fluorescens* Biofilm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 69.
- [38] 马欢欢, 吕欣然, 林洋, 等. 鲈鱼肠道 *Lactobacillus Sakei* LY1-6 对荧光假单胞菌抑制作用研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 150—155.  
MA Huan-huan, LYU Xin-ran, LIN Yang, et al. Inhibitory Activity of *Lactobacillus Sakei* LY1-6 from Perch Intestine against *Pseudomonas Fluorescens*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 150—155.
- [39] YANG J P, WANG J, YANG K, et al. Antibacterial Activity of Selenium-enriched Lactic Acid Bacteria against Common Food-borne Pathogens in Vitro[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 1930—1942.
- [40] 刘辉. 抑制耐冷菌的乳酸菌抗菌肽筛选及其结构和抗菌机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 80.  
LIU Hui. Screening, Structure and Mode of Action of Antimicrobial Peptides[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 80.
- [41] NING Y W, YAN A H, YANG K. Antibacterial Activity of Phenyllactic Acid against *Listeria Monocytogenes* and *Escherichia Coli* by Dual Mechanisms[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 533—540.
- [42] ESHAGHI M, BIBALAN M H, ROHANI M. *Bifidobacterium* Obtained from Mother's Milk and Their Infant Stool; a Comparative Genotyping and Antibacterial Analysis[J]. Microbial Pathogenesis, 2017, 111: 94—98.
- [43] 刘宪夫, 牛琴, 覃树林, 等. 双歧杆菌分类、生理功

- 能及应用研究进展[J]. 生物产业技术, 2017(3): 100—105.
- LIU Xian-fu, NIU Qin, QIN Shu-lin, et al. Research Progress on Classification, Physiological Function and Application of Bifidobacterium[J]. Biotechnology and Business, 2017(3): 100—105.
- [44] 刘国荣, 郜亚昆, 王欣, 等. 双歧杆菌细菌素 Bifidocin A 对金黄色葡萄球菌的抑菌作用及其机制[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 1—7.
- LIU Guo-rong, GAO Ya-kun, WANG Xin, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Bifidocin a against *Staphylococcus Aureus*[J]. Food Chemistry, 2017, 38(17): 1—7.
- [45] 刘国荣, 李雪, 王成涛. 双歧杆菌细菌素 Bifidocin A 对大肠杆菌细胞总蛋白表达的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 85—90.
- LIU Guo-rong, LI Xue, WANG Cheng-tao. Influence of Bifidocin A on the Expression of Whole Cell Proteins in *Escherichia Coli*[J]. Food Chemistry, 2018, 39(14): 85—90.
- [46] 王硕, 谢晶, 刘爱芳. 生物保鲜技术在海产品中的应用及展望[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 137—142.
- WANG Shuo, XIE Jing, LIU Ai-fang. Application of Bio-preservation Technology in Marine Products and the Prospects[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 137—142.
- [47] LIU H X, PEI H B, HAN Z N, The Antimicrobial Effects and Synergistic Antibacterial Mechanism of the Combination of  $\epsilon$ -polylysine and Nisin against *Bacillus Subtilis*[J]. Food Control, 2015, 47: 444—450.
- [48] 鞠健, 胡建中, 廖李, 等. Nisin 结合辐照处理对冷藏鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 280—284.
- JU Jian, HU Jian-zhong, LIAO Li, et al. Influence of Nisin Combined with Irradiation on Quality of Weever during Cold Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(21): 280—284.
- [49] 霍健聪, 邓尚贵, 李晓彤, 等. 超高压与  $\epsilon$ -聚赖氨酸处理对鲤鱼微生物和色泽的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 86—93.
- HUO Jian-cong, DENG Shang-gui, LI Xiao-tong, et al. Effects of Ultrahigh Pressure and  $\epsilon$ -PL Treatment on Microbiological Quality and Color of Skipjack[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(7): 86—93.
- [50] 初丽君. 百里香酚纳米级保鲜剂的制备及其在板栗保鲜中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 9—10.
- CHU Li-jun. Preparation of Thymol Nanoparticle and Its Application in Keeping Chinese Chestnut Preservation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017: 9—10.