

海洋源乳酸菌细菌素及其在海产品中的应用研究进展

唐海峰^{1,2}, 刘欢¹, 戴昀峰¹, 高腾琪^{1,2}, 崔子杭¹, 盘赛昆^{1,2}, 王文彬^{1,2}, 杨杰^{1,2*}

(1. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物资源与环境重点实验室/海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005; 2. 江苏海洋大学 江苏海洋生物产业技术协同创新中心, 江苏 连云港 222005)

摘要: 海鲜在加工和储存过程中因酶、微生物和化学反应等因素极易发生腐烂变质。海洋源乳酸菌细菌素是由海洋乳酸菌核糖体合成的一种天然抗菌肽,能有效抑制多种食源性病原菌,将其用于海产品保鲜中可以减少化学防腐剂的添加以及物理处理的强度,有效延长食品的保质期。该文综述海洋源乳酸菌细菌素来源、海产品中影响乳酸菌细菌素抗菌效果的因素及其在海产品中的应用研究进展,为海产品保鲜中乳酸菌细菌素的选择和应用提供参考。

关键词: 细菌素;天然防腐剂;海产品;应用方式;保鲜

Discovery and Research Progress on the Application of Marine Derived Lactic Acid Bacteria Produced Bacteriocins in Seafood

TANG Haifeng^{1,2}, LIU Huan¹, DAI Yunfeng¹, GAO Tengqi^{1,2}, CUI Zihang¹, PAN Saikun^{1,2}, WANG Wenbin^{1,2}, YANG Jie^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Marine Biotechnology, Key Laboratory of Marine Biological Resources and Environment of Jiangsu Province, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Marine Biological Industry Technology Collaborative Innovation Centre, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract: Seafood is highly prone to decay and deterioration during processing and storage due to factors such as enzymes, microorganisms and chemical reactions. Marine-derived bacteriocins from lactic acid bacteria are natural antimicrobial peptides synthesized by ribosomes of marine-derived lactic acid bacteria, which can effectively inhibit a variety of foodborne pathogens. Utilizing marine-derived bacteriocins for seafood preservation can reduce the addition of chemical preservatives and the intensity of physical treatment, and effectively prolong the shelf life of food. This article reviews the discovery of marine derived lactic acid bacteria-produced bacteriocins, factors affecting the antibacterial effect of lactic acid bacteria-produced bacteriocins in seafood and the research progress of their application in seafood, providing reference for the selection and application of lactic acid bacteria-produced bacteriocins in seafood preservation.

Key words: bacteriocin; natural preservatives; marine-derived food; application mode; preservation

引文格式:

唐海峰, 刘欢, 戴昀峰, 等. 海洋源乳酸菌细菌素及其在海产品中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 188-195.

TANG Haifeng, LIU Huan, DAI Yunfeng, et al. Discovery and Research Progress on the Application of Marine Derived Lactic Acid Bacteria Produced Bacteriocins in Seafood[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 188-195.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(32100037); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB550008); 连云港市科技计划(基础研究) JCYJ2324

作者简介: 唐海峰(1998—), 男(瑶), 硕士研究生, 研究方向: 海洋微生物及其活性物质。

*通信作者: 杨杰(1988—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 微生物天然产物发掘与生物合成。

海产品因其味道鲜香,风味独特,且含有丰富的蛋白质、矿物质和脂肪酸等成分,受到广大消费者的青睐。然而海产品通常水分含量高,不饱和脂肪酸的稳定性较差,并且含有生物胺(biogenic amine, BA)、三甲胺氧化物(trimethylamine oxide, TMAO)等,这使其自身携带的大量细菌能够在较宽的温度范围内生长,导致在储存、制作、运输的过程中蛋白质降解和脂质氧化,造成腐败变质^[1]。

在海产品加工领域,通常采用传统的冷藏、盐渍、干燥等方法延长保质期,然而这些过程不足以防止脂质氧化、酸败或细菌生长。此外,在规定范围内添加一些化学防腐剂可以保证食品质量,但长期大量使用会对人体造成潜在危害^[2]。乳酸菌细菌素是乳酸菌在生长代谢过程中由核糖体形成的具有抗菌活性的多肽,其作为安全、天然的食品防腐剂在海产品保鲜中具有巨大的应用潜力^[3]。

海洋源乳酸菌细菌素比其他来源的乳酸菌细菌素更容易适应海产品的生境,能够更自然地延长海产品的保质期并为消费者提供更优质的感官和营养价值^[4]。当前对海洋源乳酸菌细菌素的来源、特征及其在海产品中的应用研究尚未有相关综述介绍。本文根据现有的研究对海洋源乳酸菌细菌素的来源、海产品中影响乳酸菌细菌素抗菌效果的因素及其在海产品中

的应用研究进展进行归纳,以期在海产品保鲜中乳酸菌细菌素的选择应用提供参考。

1 海洋源乳酸菌细菌素

海洋生境是一个极端的环境,一些在空间和资源高度竞争条件下生存的乳酸菌产生的细菌素会表现出与陆源细菌素不同的特征,其主要优势是对高盐、低温、寡营养、渗透胁迫以及各种蛋白水解酶具有很强的耐受性,这为发现新细菌素提供了可能^[5-6]。例如,Sequeiros 等^[7]从海水鱼中分离的 nisin Z 分子量约为 4.5 kDa,经基质辅助激光解析电离飞行时间质谱(matrix-assisted laser desorption/ionization time of flight mass spectrometry, MALDI-TOF-MS)发现 m/z 2 351.2 处有一个很强的信号,质谱串联进一步分析其序列为 STKDF-NLDLVSVSKKDSGASPR,对应不含起始蛋氨酸的 nisin 前导肽,此结果并未在陆源 nisin Z 的研究中发现。

海洋源乳酸菌细菌素主要来源于海洋动物肠道、海洋沉积物和海藻表面等环境中^[8],已经适应了有利于海洋生物生存和海产品保存的生境,比其他来源的乳酸菌细菌素在海产品加工、控制海洋生物传染病以及植物检疫方面更具竞争力。近年来,从海洋及海产品中分离乳酸菌细菌素作为新型抗菌剂在海产品以及其他领域的应用逐渐受到关注,具体见表 1。

表 1 近 5 年海洋源分离的乳酸菌细菌素
Table 1 Lactic acid bacteria-produced bacteriocin isolated from marine in the last five years

产生菌株	细菌素	来源	分子量/Da	特点	参考文献
植物乳杆菌	DY4-2	带鱼、比目鱼等肠道	1 465	具有较高的热稳定性,且对荧光假单胞菌具有很好的活性	[9]
戊糖片球菌	PE-ZYB1	华贵栉孔扇贝肠道	2 019.22	pH 值 2~7 时高度稳定	[10]
魏斯氏菌	Weisserin	发酵虾	6 000	用 50% 乙醇或异丙醇处理不会降低其抗菌活性	[11]
明串珠菌	mesenterocin	鱼露	17 200	-	[12]
蒙氏肠球菌	bacLP18	沙丁鱼肠道	-	4 ℃和-20 ℃下放置 6 个月,对李斯特氏菌的抑制活性在 pH 2~12 范围内稳定	[13]
植物乳杆菌	plantaricin	大菱鲆肠道	8 540	-	[14]
植物乳杆菌	plantaricin LPL-1	鲟鱼、鲑鱼肠道	4 347.846 7	具有较高的热稳定性和表面活性剂稳定性,且易被蛋白酶降解	[15]
乳酸乳球菌乳亚种	nisin Z-like	柯氏喙鲸粪便	-	抑制溶藻弧菌和枯草芽孢杆菌的生长	[16]
鼠李糖乳杆菌	rhamnose-lactobacillus	发酵鱼制品	35 000	在-40、-20 ℃和 4 ℃下放置 30 d 后仍能保持完全稳定	[17]
乳酸链球菌	nisin	黑鳍鲨肠道	-	对副溶血性弧菌有杀菌作用	[18]
弯曲乳杆菌	SakP-H12Y, SakX	贻贝、海螵蛸等	-	SakP-H12Y 的 N-末端半部分少一个带正电荷的残基(his12/Tyr12),与 SakP 相比,其抗菌活性降低	[19]
耐久肠球菌	CAMT6	小黄鱼	1 254.63	较强的温度稳定性,在 pH 值 2~7 时稳定	[20]
屎肠球菌	BLIS	发酵比目鱼	16 500	可根除产气荚膜梭菌	[21]
粪肠球菌	EFL4	花鲈肠道	-	-	[22]
蒙氏肠球菌	STw38	扇贝、文蛤等肠道	-	抑制李斯特氏菌、腐败希瓦氏菌的生长	[23]

注:-表示未见相关报道。

2 海产品中影响乳酸菌细菌素抗菌效果的因素

由于海鲜捕获地与加工场所之间的距离、保藏温度和加工方法的影响,造成海产品中酸碱度、水分活度、温度的变化以及其内部各种酶或微生物进行一系列复杂的活动,往往会影响乳酸菌细菌素在食品中应用,从而不能达到很好的保鲜效果。例如1)细菌素与海鲜中蛋白质和脂类的相互作用,可降低细菌素的活性;2)海产品的酸碱度和温度等加工和储存条件可增加蛋白酶活性,损害细菌素的结构^[24];3)当海产品最初污染程度很高时,细菌素的抗菌效率会降低,可能无法阻止微生物的生长;4)细菌素在海产品基质中的不均匀分布;5)海产品中通常携带大量革兰氏阴性菌,乳酸菌细菌素一般不能抑制革兰氏阴性菌生长繁殖,因为外膜中的脂多糖起到了有效屏障的作用,阻碍了细菌素的进入,使用螯合剂可以破坏细菌外膜,使细菌素对抑制革兰氏阴性菌的生长更有效;6)静电的排斥作用及其自身降解也会影响其在食品中的抑菌活性^[25]。

3 乳酸菌细菌素在海产品中的应用研究进展

3.1 乳酸菌细菌素的安全性

乳酸菌细菌素是由乳酸菌发酵产生,具有天然、无残留、无副作用等特点,因此被认为是抗生素的理想替代品。nisin是目前可以大规模应用的细菌素,在医药及食品工业中,pediocin PA-1取得了较好的应

用效果。大多数细菌素在较低浓度时比抗生素对目标细菌更有效。一些研究发现,细菌素与抗生素协同作用,不仅可以提高抗生素的使用效率,防止耐药菌的出现,还可以通过降低抗生素的杀菌浓度来减少抗生素的副作用^[26]。使用乳酸菌细菌素应用于海产品,具有以下特点:1)保障消费者的安全且对消费者无害,其可被胃肠道中的胰蛋白酶和胃蛋白酶等酶灭活,且不会改变消化道的微生物群落;2)乳酸菌细菌素在不会对食品的感官特性产生有害影响的前提下对食品腐败菌具有抑制作用,其抑菌机制大致可分为两类,一类主要作用于细胞膜,与带负电的细菌细胞膜静电相互作用,经疏水端穿过脂质双分子层后,肽类物质聚合形成复合物,会使膜上的质子动力(proton motive force, PMF)遭到破坏,影响细胞内氨基酸的转运,并通过孔的形成使细胞内物质释放出来^[27];另一类能通过细胞膜上的孔道和转运蛋白进入细胞内,干扰DNA、RNA和蛋白质代谢来控制靶细菌,从而抑制腐败菌的生长^[28],作用模式见图1;3)在食品整个货架期内保持一致以及其作用过程安全可控;4)能够适应食品中pH值和盐浓度范围内的热稳定性和活性等^[29]。此外,许多乳酸菌细菌素被证实与人体健康密切相关,例如能抑制多种癌细胞,并对炎症和免疫力有调节作用。因此,乳酸菌细菌素在人类健康食品领域具有广阔的应用前景。

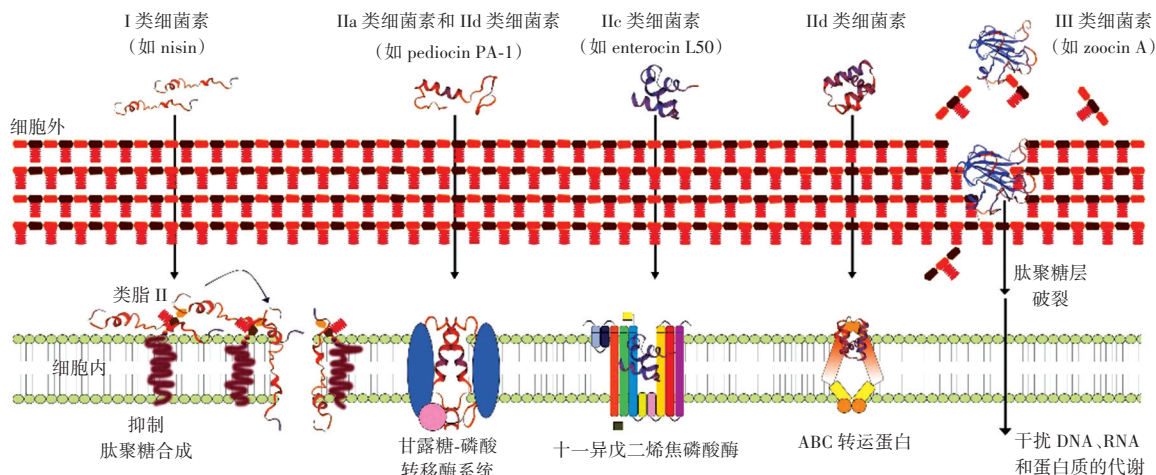


图1 细菌素的作用模式

Fig.1 Mode of action of bacteriocins

3.2 乳酸菌细菌素在海产品中的应用方式

3.2.1 直接添加

将乳酸菌细菌素或者产细菌素的乳酸菌作为天然防腐剂直接添加到食品中是一种最简便、廉价的方法。其优点是能够避免乳酸菌细菌素复杂的纯化步骤,同时产细菌素乳酸菌在发酵过程中产生的有机酸、过氧化氢等其他抑菌物质也有助于增加细菌素的抑菌效

果。如乳酸乳球菌亚种产生的 nisin Z 对高温、pH 值和化学物质具有很高的稳定性,将其添加到尼罗罗非鱼浆中,贮存 20 d 的鱼肉中弧菌的生长受到明显抑制,并不会改变其感官特性^[30]。Jo 等^[31]在常温下使用植物乳杆菌发酵液处理带鱼鱼片,可改善食品的理化指标,延长货架期,带鱼内三甲胺的含量也显著降低。因此,使用产细菌素乳酸菌发酵上清液直接处理新鲜

鱼片是一种有效的方法,可以在不影响理化特性和感官质量的情况下延长它们的保质期。

3.2.2 与其他天然食品防腐剂的联合应用

由于细菌素通常抑菌谱很窄,单独使用细菌素往往达不到最好的保鲜效果。不同的细菌素或细菌素与具有不同结构和作用机制的其他天然抗菌物质结合使用,能更有效地抑制食品中有害微生物,促进它们的抑制效果。同时,在细菌素和其他天然抗菌剂的相加或协同作用中,细菌素以较低的浓度使用,降低了食品保鲜中使用细菌素的成本,也最大限度地减少了化学防腐剂的添加。Iseppi 等^[32]从百里香、鼠尾草中提取的精油和细菌素 bacLP17 协同作用能使李斯特氏菌成熟的生物膜显著减少,具有开发控制海产即食食品中李斯特氏菌的新型防腐剂的潜力。此外,肠球菌素与壳聚糖和乳酸钠联合使用对李斯特氏菌、腐败希瓦氏菌和从鱼类中分离的嗜冷菌具有协同抑制作用,并有助于减少食品中添加抗菌剂的数量^[33]。

3.2.3 细菌素抗菌包装

一些可生物降解和可食用的材料(壳聚糖、明胶、海藻酸钙、聚乙烯和纤维素等),可作为乳酸菌细菌素抗菌包装的潜在载体,使细菌素与食品成分相互作用或蛋白水解酶失活的风险降低。细菌素抗菌包装一般通过两种方法发挥其控制食品腐败微生物的作用,一种是细菌素加入包装材料中与食品直接接触,另一种是通过将细菌素从包装膜中逐渐释放到食品表面并扩散到食品基质中,有助于细菌素的生物利用度和受控释放^[34]。壳聚糖-明胶复合包装膜中加入肠球菌素 CHQS 提高了薄膜的抗菌性能,CHQS 被有效释放,薄膜中剩余的细菌素也被稳定保存^[35]。

3.2.4 细菌素纳米包埋技术

细菌素-纳米材料组合,即用纳米脂质体、壳聚糖、金属纳米颗粒和纳米纤维等纳米颗粒(直径<100 nm)包裹细菌素,这使得颗粒与细菌素相互作用,增强细菌素的抗菌活性和吸收性,包埋体能对环境压力(如温度、

pH 值、氧气、光、酶、蛋白质和金属离子)的保护以及靶向释放,增强细菌素的抑菌效果,有利于其在食品加工领域的应用^[36]。以壳聚糖纳米颗粒为载体的 nisin,能大幅增强其抑菌效果,同时纳米颗粒也能透过细菌的细胞壁和膜内 DNA 结合从而抑制 RNA 和 DNA 的转录,具有潜在的抑菌前景^[37]。用银纳米粒子包裹的乳酸菌细菌素 Bac4463 和 Bac22 明显高于未包裹细菌素对金黄色葡萄球菌和福氏志贺菌抗菌活性,且稳定性更高,因为金属纳米颗粒体积小,带有正电荷,可以作为自由基扩散和破坏细胞膜,加强了乳酸菌细菌素的作用效果^[38]。纳米纤维是基于生物聚合物的包埋技术,纳米纤维由于具有较大的比表面积、较高的稳定性、较小的孔径和较强的密封性,是细菌素包埋的理想材料。Meral 等^[39]采用静电纺丝法制备了 nisin 和姜黄素纳米粒子,使虹鳟鱼鱼片的货架期延长了 6 d,改善其硬度和感官特性。纳米颗粒通过与致病细菌细胞表面接触来发挥作用,这种接触会对细胞造成各种结构变化,扰乱其基本细胞功能,最终导致细菌细胞死亡。纳米颗粒与乳酸菌细菌素在食品 and 食品包装的保鲜中有广阔的应用前景。

3.3 乳酸菌细菌素在海产品保鲜中的研究进展

海产品是人类饮食中多不饱和脂肪酸的主要来源,海产品的消费量逐年上涨。微生物生长是海产品变质的主要原因,由于形成特定的醇类(主要是乙醇)、醛类、酸类、酮类、硫类和氮类化合物,产生大量鱼腥味。与海产品有关的病原菌可分为 3 大类:海产品中天然菌群(致病性弧菌属、嗜水气单胞菌属)、由于粪便污染而存在的肠道细菌(沙门氏菌属、志贺氏菌属、大肠杆菌)、在加工处理、贮存或配制食用过程中受到细菌污染的细菌(蜡样芽孢杆菌、李斯特菌、金黄色葡萄球菌)^[40-41]。乳酸菌细菌素主要针对海产品中常见的致病菌和腐败细菌具有抑制作用,在海产品中添加乳酸菌细菌素可以有效提高产品稳定性和延长保质期,且对海产品的感官、色泽等方面均有很好的效果,乳酸菌细菌素应用于海产品保鲜中的研究见表 2。

表 2 乳酸菌细菌素应用于海产品保鲜中的研究
Table 2 Study on the application of lactic acid bacteria bacteriocin in seafood preservation

细菌素或细菌素产生菌	应用方式	应用食品	研究结果	参考文献
nisin	直接添加	菊黄东方鲀	菌落总数、挥发性盐基氮值低于未处理组,汁液流失率显著高于未处理组	[42]
lactobacillin	冷藏处理	笛鲷、银鲈、沙丁鱼	降低微生物数量	[43]
nisin	抗菌薄膜	鲑鱼片	对李斯特氏菌的抑菌效果持续了 28 d,超过了熏鲑鱼的标准货架期	[44]
PSY2	直接添加	金枪鱼	有效降低了在 4℃和 0℃下储存的鱼片中李斯特氏菌数量	[45]
Paraplantaricin L-ZB1	直接添加	虹鳟	货架期延长到 4~6 d,且样品具有良好的感官特性	[46]
AMET 1506	直接添加	斑节对虾	有效降低了大肠杆菌、霍乱弧菌、副溶血性弧菌的数量	[47]
nisin	直接添加	海鲈鱼	降低氧化和抑制微生物生长,将鱼片的货架期延长 2 d	[48]
nisin	真空冷藏	欧洲鲈鱼	0.8% nisin 的应用能更好地保持鲈鱼鱼片的感官品质,延长货架期	[49]

续表 2 乳酸菌细菌素应用于海产品保鲜中的研究

Continue table 2 Study on the application of lactic acid bacteria bacteriocin in seafood preservation

细菌素或细菌素产生菌	应用方式	应用食品	研究结果	参考文献
bacteriocin GP1	直接添加	石斑鱼	处理样品在 4℃下保存 21 d,挥发性盐基氮含量和感官品质仍在可接受的范围内,有效地控制大肠杆菌和弧菌的生长	[50]
bacteriocin LJRI	直接添加	南美白对虾	经细菌素处理后,第 1 天李斯特氏菌开始减少,并在 4℃下能保存 7 d	[51]
<i>lactobacillus casei</i>	直接添加	南美白对虾	抑制了南美白对虾中腐败希瓦氏菌	[52]
nisin Z	直接添加	热带对虾	控制对虾产品的食品腐败和食源性致病菌	[53]

3.3.1 鱼类海产品

海洋鱼类蛋白质含量高、饱和脂肪含量低,是 ω -3多不饱和脂肪酸的主要来源。据统计,鱼类海产品占海产品消费总量的一半左右。新鲜捕获的鱼肌肉组织中是无菌的,但在皮肤、鳃和肠道携带大量革兰氏阴性致病菌和腐败细菌,所以海水鱼在死后非常容易腐烂,腐败细菌的繁殖是鱼类品质降低的主要原因。乳酸菌细菌素具有较高的抗菌和扩散特性,已被用于鱼类海产品保鲜中。Sofra 等^[54]将添加 nisin 的渗透液预处理冷藏真空包装金枪鱼片,能够有效抑制微生物生长和提高感官品质,比未经处理的真空包装鱼的货架期延长了 40 d。为研究不同产细菌素乳酸菌在食品保鲜中的作用效果,Aymerich 等^[55]评估了 3 种产细菌素乳酸菌(弯曲乳杆菌、沙克乳酸杆菌和麦芽香肉杆菌)对烟熏鲑鱼中李斯特氏菌的抗菌活性,在 8~21℃条件下贮藏 21 d 后发现,沙克乳酸杆菌处理过的烟熏鲑鱼中李斯特氏菌均受到了明显抑制,该菌株具有作为在烟熏鲑鱼中抗李斯特菌保鲜剂的潜力。将乳酸菌细菌素与其他的食品保鲜剂复合使用,可以弥补单一生物保鲜剂在食品感官、抑菌效果和成本上的不足。AHL 内酯酶 AiiAAI96 是一种群体感应(quorum sensing, QS)抑制剂,可以通过抑制内酯酶的 QS 系统来控制引起鲟鱼腐败的革兰氏阴性菌,其与 nisin 联用能抑制鲟鱼体内微生物区系的生长,比单独使用 AiiAAI96 或 nisin 处理更能延缓鲟鱼挥发性盐基氮和生物胺含量增加,货架期延长了 5 d 左右^[56]。同时,为研究更多高效组合,研究者不断探索不同保鲜剂与 nisin 的最佳配比。方士元等^[57]利用 0.04% nisin、5.92% 乳酸钠和 1.06% 海藻酸钠处理大菱鲆,有效减缓挥发性盐基氮的产生,提高鱼肉保水性,对大菱鲆鱼肉内蛋白质氧化也起到了抑制作用,比常规 4℃冷藏贮藏延长了 2~3 d。

3.3.2 甲壳类海产品

虾和对虾是甲壳类的主要群体,是国际海产品贸易中重要的商品之一。甲壳类海产品游离氨基酸和其他可溶氮化合物的含量较高,且含有较多的多酚氧化酶,而且甲壳类动物除了其内源微生物区系外,由于在捕获后与这些物种一起的海底沉积物中的细菌通常会

容易受到腐败菌的侵入和产生黑变,影响了甲壳类肉的品质^[58]。一般常用亚硫酸盐以控制虾类黑斑的形成,并抑制微生物的生长,但它在使用过程中残留的 SO_2 会引起哮喘病,威胁人体健康^[59]。一些研究发现,含乳酸菌细菌素的保鲜剂添加到甲壳类海产品中,能够较好的确保安全性的同时还可以延长产品的货架期。胡奇杰等^[60]在单因素试验的基础上,采用壳聚糖 6 g/L、海藻酸钠 8 g/L、nisin 0.4 g/L 组成最优比例的生物涂膜到南美白对虾后冷藏 12 d,比对照组保鲜时间延长了 6 d。Liang 等^[61]探讨 nisin、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)和亚硫酸盐单独或联合使用对冰藏太平洋对虾的保鲜效果发现,联合使用对副溶血性弧菌、沙门氏菌和荧光假单胞菌均有一定的抑菌作用,低剂量的 nisin、EDTA 和亚硫酸盐的组合比高剂量亚硫酸盐具有更高的抗菌活性,在贮藏 10 d 内对虾中的菌落总数(total viable count, TVC)和挥发性盐基氮显著降低。结果表明,nisin 和 EDTA 可以在未来减少亚硫酸盐在海虾保鲜中的使用,有效控制甲壳类海产品贮藏中黑斑的形成。

3.3.3 软体动物类海产品及其他产品

软体动物包括贻贝、扇贝、牡蛎、蛤、鱿鱼和章鱼等,其富含矿物质、B 族维生素和 ω -3 脂肪酸,肌肉组织中水分含量高,口感细滑,是一些沿海地区居民主要的蛋白质来源之一。当其被捕捞后,肌肉组织开始自溶,蛋白质被分解成氨基酸和可溶性含氮物质,细菌得到大量繁殖,使产品腐败变质。细菌素应用于这类产品的研究相对较少,Kim 等^[62]将含有 nisin 和细菌素 NK24 的聚酰胺抗菌膜包裹新鲜牡蛎,减缓了包装牡蛎上的微生物生长,与普通低密度聚乙烯薄膜相比,加入细菌素的抗菌薄膜能更好地抑制大肠杆菌生长,并使牡蛎保质期延长 5~12 d。利用 nisin 与贝莱斯芽孢杆菌和混合草药提取物组合添加到干鱿鱼样品中,TVC 显著降低($P<0.05$),这种新型混合物具有提高海产品生物安全性的防腐潜力,以控制干鱿鱼微生物污染^[63]。

4 小结与展望

随着人们海洋意识的不断增强,海产品品质和安全问题也开始受到关注。从海洋中发掘新颖的乳酸菌

细菌素并应用于海产品加工领域成为研究热点。然而,因为各种限制因素,如抗菌谱窄、生产成本高、产量低、作用机理不完善等,限制其在商业中的进一步应用。到目前为止,只有 nisin 和 pediocin PA-1 被商业应用于食品保鲜领域,其他乳酸菌细菌素虽已证明具有相似效果,但仍需进一步认证。在实际应用中,为了更好地达到保鲜效果,通常采用直接添加、制成抗菌包装和与其他保鲜剂联合应用的方法。随着技术的发展,越来越多新的运用形式被发明出来,如纳米技术、含有 nisin 生产/免疫的干酪转接子等。通过选择合适的乳酸菌细菌素和相应的组合能更好地抑制病原菌的生长,提高乳酸菌细菌素的作用效果和利用率。

当前,基于基因组挖掘技术的乳酸菌细菌素筛选和纯化技术日益成熟,能够深入了解乳酸菌细菌素的生化特性,提高细菌素产量和安全性,未来也可以筛选获得具有专门应用于海产品中的新型乳酸菌细菌素。通过运用不同的遗传方式或编码它们的基因,在同源或异源宿主中合成乳酸菌细菌素用于商业化生产,这有助于扩大应用范围。随着研究深入,海洋源乳酸菌细菌素不仅可以开发更安全的传统海产品,还可以开发创新海产品,其作为安全、有效的保鲜剂应用市场前景广阔。

参考文献:

- [1] OKTARIANI A F, RAMONA Y, SUDARYATMA P E, et al. Role of marine bacterial contaminants in histamine formation in seafood products: A review[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(6): 1197.
- [2] 董欣旂, 赵英侠. 食品防腐剂在食品中应用现状分析[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(11): 139-143.
DONG Xinyi, ZHAO Yingxia. Analysis of the application of food preservatives in food[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(11): 139-143.
- [3] PENG Z, XIONG T, HUANG T, et al. Factors affecting production and effectiveness, performance improvement and mechanisms of action of bacteriocins as food preservative[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(33): 12294-12307.
- [4] SARIKA A R. Marine bacteriocins: Prospects and informatics tools[J]. *Informatics Studies*, 2022, 9(3): 31-40.
- [5] SEDEEK A M, ISMAIL M M, ELSAYED T R, et al. Recent methods for discovering novel bioactive metabolites, specifically antimicrobial agents, from marine-associated micro-organisms[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2022, 75(3): 511-525.
- [6] MCCALL J O, SIZEMORE R K. Description of a bacteriocinogenic plasmid in *Beneckeia harveyi*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1979, 38(5): 974-979.
- [7] SEQUEIROS C, GARCÉS M E, VALLEJO M, et al. Potential aquaculture probiont *Lactococcus lactis* TW34 produces nisin Z and inhibits the fish pathogen *Lactococcus garvieae*[J]. *Archives of Microbiology*, 2015, 197(3): 449-458.
- [8] BINDIYA E S. Marine bacteriocins: A review[J]. *Journal of Bacteriology & Mycology: Open Access*, 2016, 2(5): 00040.
- [9] LV X R, MA H H, SUN M T, et al. A novel bacteriocin DY4-2 produced by *Lactobacillus plantarum* from cutlassfish and its application as bio-preservative for the control of *Pseudomonas fluorescens* in fresh turbot (*Scophthalmus maximus*) fillets[J]. *Food Control*, 2018, 89: 22-31.
- [10] ZHANG Y, YANG J M, LIU Y, et al. A novel bacteriocin PE-ZYB1 produced by *Pediococcus pentosaceus* zy-B isolated from intestine of *Mimachlamys nobilis*: Purification, identification and its anti-listerial action[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 118: 108760.
- [11] AHN B K, MIN K C, CHO S H, et al. Isolation of lactic acid bacteria with anti-MRSA bacteriocin activity and characterization of the bacteriocin product[J]. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 2021, 49(2): 131-137.
- [12] DARMADI N M, EDI D S, SURYANI S P. Bacteriocin antimicrobial isolation in fish soy sauce[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1869(1): 012057.
- [13] ISEPPI R, STEFANI S, DE NIEDERHAUSERN S, et al. Characterization of anti-*Listeria monocytogenes* properties of two bacteriocin-producing *Enterococcus mundtii* isolated from fresh fish and seafood[J]. *Current Microbiology*, 2019, 76(9): 1010-1019.
- [14] 马国涵, 马欢欢, 吕欣然, 等. 大菱鲆肠道中广谱拮抗活性乳酸菌的筛选及其细菌素鉴定[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 159-165.
MA Guohan, MA Huanhuan, LÜ Xinran, et al. Screening for broad-spectrum antagonistic lactic acid bacteria from intestine of turbot and identification of bacteriocin produced by it[J]. *Food Science*, 2019, 40(6): 159-165.
- [15] WANG Y, QIN Y X, XIE Q, et al. Purification and characterization of plantaricin LPL-1, a novel class IIa bacteriocin produced by *Lactobacillus plantarum* LPL-1 isolated from fermented fish[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2276.
- [16] SUZUKI A, SUZUKI M. Antimicrobial activity of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* isolated from a stranded cuvier's beaked whale (*Ziphius cavirostris*) against gram-positive and-negative bacteria[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(2): 243.
- [17] Mubarik. Characterisation of a bacteriocin produced by *Lactobacillus rhamnosus* IN13 isolated from inasua, a fermented fish product from Central Maluku, Indonesia[J]. *International Food Research Journal*, 2019, 26(5): 1557-1563.
- [18] HAMID T H T A, AHMAD ZAHLI K I, ALOTAIBY M. *Lactococcus lactis* strains from intestinal organ of black tips shark carcharhinus limbatus producing nisin-like bacteriocin active against shrimp and fish pathogens (*Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio alginolyticus*)[J]. *Journal of microbiology biotechnology and food sciences*, 2020, 10(3): 354-360.
- [19] GÓMEZ-SALA B, MUÑOZ-ATIENZA E, DIEP D B, et al. Biotechnological potential and *in vitro* safety assessment of *Lactobacillus curvatus* BCS35, a multibacteriocinogenic strain isolated from dry-salted cod (*Gadus morhua*)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 112: 108219.
- [20] LI Q B, CHEN Q Y, WU Y Y, et al. Purification, characterization and structural identification of a novel bacteriocin produced by marine original *Enterococcus durans* YQ-6, and its inhibition of *Listeria monocytogenes*[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2023, 173: 114329.
- [21] LEE J S, PARK S W, LEE H B, et al. Bacteriocin-like inhibitory substance (BLIS) activity of *Enterococcus faecium* DB1 against biofilm formation by *Clostridium perfringens*[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2021, 13(5): 1452-1457.
- [22] MEI J, SHEN Y, LIU W R, et al. Effectiveness of sodium alginate active coatings containing bacteriocin EFL4 for the quality improvement of ready-to-eat fresh salmon fillets during cold storage[J]. *Coatings*, 2020, 10(6): 506.

- [23] DELCARLO S B, PARADA R, SCHELEGUEDA L I, et al. From the isolation of bacteriocinogenic LAB strains to the application for fish paste biopreservation[J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 110: 239-246.
- [24] RASHEED H A, TUOHETI T, ZHANG Y Z, et al. Purification and partial characterization of a novel bacteriocin produced by bacteriocinogenic *Lactobacillus fermentum* BZ532 isolated from Chinese fermented cereal beverage (Bozai)[J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 124: 109113.
- [25] BHATTACHARYA D, NANDA P K, PATEIRO M, et al. Lactic acid bacteria and bacteriocins: Novel biotechnological approach for biopreservation of meat and meat products[J]. Microorganisms, 2022, 10(10): 2058.
- [26] FUGABAN J I I, VAZQUEZ BUCHELI J E, HOLZAPFEL W H, et al. Assessment of bacteriocin-antibiotic synergy for the inhibition and disruption of biofilms of *Listeria monocytogenes* and vancomycin-resistant *Enterococcus*[J]. Microbiology Research, 2022, 13(3): 480-499.
- [27] KARCZEWSKI J, KRASUCKI S P, ASARE-OKAI P N, et al. Isolation, characterization and structure elucidation of a novel lantibiotic from *Paenibacillus* sp[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 598789.
- [28] YI L H, LUO L L, CHEN J X, et al. Cell wall and DNA damage of *Staphylococcus aureus* by bacteriocin BM1157[J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 134: 109842.
- [29] 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.
- [30] KAKTCHAM P M, TCHAMANI PIAME L, SANDJONG SILEU G M, et al. Bacteriocinogenic *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* 3MT isolated from freshwater Nile tilapia: Isolation, safety traits, bacteriocin characterisation, and application for biopreservation in fish pâté[J]. Archives of Microbiology, 2019, 201(9): 1249-1258.
- [31] JO D M, PARK S K, KHAN F, et al. An approach to extend the shelf life of ribbonfish fillet using lactic acid bacteria cell-free culture supernatant[J]. Food Control, 2021, 123: 107731.
- [32] ISEPPI R, CAMELLINI S, SABIA C, et al. Combined antimicrobial use of essential oils and bacteriocin bacLP17 as seafood biopreservative to control *Listeria monocytogenes* both in planktonic and in sessile forms[J]. Research in Microbiology, 2020, 171(8): 351-356.
- [33] SCHELEGUEDA L I, VALLEJO M, GLIEMMO M F, et al. Synergistic antimicrobial action and potential application for fish preservation of a bacteriocin produced by *Enterococcus mundtii* isolated from *Odontesthes platensis*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 794-801.
- [34] MOTELICA L, FICAI D, FICAI A, et al. Biodegradable antimicrobial food packaging: Trends and perspectives[J]. Foods, 2020, 9(10): 1438.
- [35] ZHANG A H, HAN Y, ZHOU Z J. Characterization of citric acid crosslinked chitosan/gelatin composite film with enterocin CHQS and red cabbage pigment[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108144.
- [36] TERRA A L M, CONTESSA C R, RASIA T A, et al. Nanotechnology perspectives for bacteriocin applications in active food packaging[J]. Industrial Biotechnology, 2022, 18(3): 137-146.
- [37] LI Y, ROKAYYA S, JIA F G, et al. Shelf-life, quality, safety evaluations of blueberry fruits coated with chitosan nano-material films[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 55.
- [38] SIDHU P K, NEHRA K. Bacteriocin-capped silver nanoparticles for enhanced antimicrobial efficacy against food pathogens[J]. IET Nanobiotechnology, 2020, 14(3): 245-252.
- [39] 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 - Food Science and Technology, 2019, 113: 108292.
- [40] HWANHLE N, H-KITTIKUN A. Biopreservation of seafood by using bacteriocins and bacteriocinogenic lactic acid bacteria as potential bio-control agents[M]// Beneficial Microorganisms in Agriculture, Aquaculture and Other Areas. Cham: Springer International Publishing, 2015: 183-213.
- [41] VERMA D K, THAKUR M, SINGH S, et al. Bacteriocins as antimicrobial and preservative agents in food: Biosynthesis, separation and application[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101594.
- [42] 邱楚雯, 施永海, 刘智禹, 等. 三种生物保鲜剂结合冷藏对菊黄东方鲀的保鲜效果[J]. 渔业研究, 2021, 43(5): 494-501.
- QIU Chuwen, SHI Yonghai, LIU Zhiyu, et al. Preservation effect of three kinds of biological preservatives combined with chilled storage on *Takifugu flavidus*[J]. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(5): 494-501.
- [43] WILSON A H, ANJANA B, JOVITA S J, et al. Biopreservation of value added marine fishes under different storage conditions using bacteriocin from *Lactobacillus* sp (AMETLAB27)[J]. IIOAB Journal, 2016, 7(4): 1-14.
- [44] CONCHA-MEYER A, SCHÖBITZ R, BRITO C, et al. Lactic acid bacteria in an alginate film inhibit *Listeria monocytogenes* growth on smoked salmon[J]. Food Control, 2011, 22(3/4): 485-489.
- [45] SARIKA A R, LIPTON A P, AISHWARYA M S, et al. Lactic acid bacteria from marine fish: Antimicrobial resistance and production of bacteriocin effective against *L. monocytogenes* in situ[J]. Journal of Food: Microbiology, Safety & Hygiene, 2018, 3(1): 2476-2059.
- [46] GUI M, ZHAO B, SONG J Y, et al. Paraplantaricin L-ZB1, a novel bacteriocin and its application as a biopreservative agent on quality and shelf life of rainbow trout fillets stored at 4 °C[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 174(6): 2295-2306.
- [47] SUBASHCHANDRABOSE G. Efficacy of bacteriocin from *Lactobacillus* sp. (AMET 1506) as a biopreservative for seafood's under different storage temperature conditions[J]. Journal of modern biotechnology, 2013, 2(3): 59-65.
- [48] UCAR Y, ÖZOGUL Y, ÖZOGUL F, et al. Effect of nisin on the shelf life of sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) fillets stored at chilled temperature (4±2 °C)[J]. Aquaculture International, 2020, 28(2): 851-863.
- [49] UCAR Y, ÖZOGUL Y, ÖZOGUL F, et al. The impact of different levels of nisin as a biopreservative agent on the chemical, sensory and microbiological quality of vacuum-packed sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets stored at 4±2 °C[J]. Grasas y Aceites, 2021, 72(2): e401.
- [50] SARIKA A R, LIPTON A P, AISHWARYA M S. Biopreservative efficacy of bacteriocin GP1 of *Lactobacillus rhamnosus* GP1 on stored fish filets[J]. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 29.
- [51] LADHA G, JEEVARATNAM K. Characterization of purified antimicrobial peptide produced by *Pediococcus pentosaceus* LJ1, and its application in preservation of white leg shrimp[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, 36(5): 72.
- [52] LI J P, YANG X Y, SHI G C, et al. Cooperation of lactic acid bacteria regulated by the AI-2/LuS system involve in the biopreservation of refrigerated shrimp[J]. Food Research International, 2019, 120: 679-687.
- [53] HWANHLE N, JAFFRÈS E, DOUSSET X, et al. Application of a nisin Z-producing *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* KT2W2L isolated

- from brackish water for biopreservation in cooked, peeled and ionized tropical shrimps during storage at 8 °C under modified atmosphere packaging[J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 240(6): 1259-1269.
- [54] SOFRA C, TSIRONI T, TAOUKIS P S. Modeling the effect of pre-treatment with nisin enriched osmotic solution on the shelf life of chilled vacuum packed tuna[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 216: 125-131.
- [55] AYMERICH T, RODRÍGUEZ M, GARRIGA M, et al. Assessment of the bioprotective potential of lactic acid bacteria against *Listeria monocytogenes* on vacuum-packed cold-smoked salmon stored at 8 °C[J]. *Food Microbiology*, 2019, 83: 64-70.
- [56] GUI M, ZHANG Y, GAO L, et al. Effect of AHL-lactonase and nisin on microbiological, chemical and sensory quality of vacuum packaged sturgeon storage at 4 °C[J]. *International Journal of Food Properties*, 2021, 24(1): 222-232.
- [57] 方士元, 梅俊, 谢晶, 等. 大菱鲆复合生物保鲜剂的优化及保鲜效果研究[J]. *核农学报*, 2020, 34(9): 2011-2020.
- FANG Shiyuan, MEI Jun, XIE Jing, et al. Optimization of composite biological preservative and freshness-keeping effect for turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(9): 2011-2020.
- [58] 林瑞环, 赵玲, 曹荣, 等. 南极磷虾与鹰爪糙对虾酚氧化酶生化性质对比分析[J]. *渔业科学进展*, 2021, 42(2): 124-131.
- LIN Ruihuan, ZHAO Ling, CAO Rong, et al. Comparative analysis of the biochemical properties of phenoloxidase isolated from *Euphausia superba* and *Trachypenaeus curvirostris*[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(2): 124-131.
- [59] 孙维维, 王林, 庞杰. 虾类抑制黑变保鲜技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(6): 2073-2078.
- SUN Weiwei, WANG Lin, PANG Jie. Research progress on the preservation and melanosis inhibition for shrimps[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(6): 2073-2078.
- [60] 胡奇杰, 王东旭, 谷贵章. 复配生物涂膜保鲜液对冷藏南美白对虾的保鲜效果研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(2): 763-768.
- HU Qijie, WANG Dongxu, GU Guizhang. Study on the preservative effect of compound biological coating liquid on frozen South American white prawn[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(2): 763-768.
- [61] LIANG Z R, HSIAO H I, JHANG D J. Synergistic antibacterial effect of nisin, ethylenediaminetetraacetic acid, and sulfite on native microflora of fresh white shrimp during ice storage[J]. *Journal of Food Safety*, 2020, 40(4): 1-11.
- [62] KIM Y M, PAIK H D, LEE D S. Shelf-life characteristics of fresh oysters and ground beef as affected by bacteriocin-coated plastic packaging film[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(9): 998-1002.
- [63] SUBUNTITH N, PORNPIMON S, NANTICHA R, et al. Biosafety, bacteriological quality and strategy of biopreservative administration for controlling spoilage bacteria in Thai traditional dried seafood products[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2021, 15(10): 512-521.

责任编辑:张璐

收稿日期:2023-02-14