

产细菌素乳酸菌在食品中的应用

胡美丽¹, 王俊钢², 李宇辉^{3*}

(1. 石河子大学食品学院, 石河子 832000; 2. 亳州学院生物与食品工程系, 亳州 236800;
3. 新疆农垦科学院农产品加工研究所, 石河子 832000)

摘要: 食品在加工贮藏过程中容易被有害微生物侵染, 从而导致其腐败变质。现常用的物理化学防腐保鲜方法虽然可以延长产品的货架期但却存在一定的安全隐患, 而且目前消费者更倾向于选择绿色、天然的产品, 因此生物抑菌剂的开发显得尤为重要。乳酸菌及其代谢物通常被认为是安全的, 因此广泛应用于食品中。乳酸菌细菌素是由乳酸菌在生长代谢过程中通过核糖体合成的一类具有抗菌活性的多肽或蛋白质, 对一些有害微生物的生长繁殖有明显抑制作用。本文主要介绍了乳酸菌细菌素的分类、抑菌机制、细菌素与其他食品保鲜技术的结合及乳酸菌作为天然抑菌剂在乳及乳制品、肉及肉制品、水产品、果蔬类产品及蛋制品中的应用, 以为产抑菌素乳酸菌的综合利用与进一步的研究提供一定的理论依据。

关键词: 乳酸菌; 细菌素; 天然抑菌剂

Application of bacteriocin produced by *Lactobacillus* in food

HU Mei-Li¹, WANG Jun-Gang², LI Yu-Hui^{3*}

(1. College of Food Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Department of Biology and Food Engineering, Bozhou University, Bozhou 236800, China; 3. Institute of Agro-products Processing Science and Technology Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

ABSTRACT: Food is easily infected by harmful microorganisms during processing and storage, resulting in spoilage. Although the commonly used physical and chemical preservative and fresh-keeping methods can prolong the shelf life of products, they have certain potential safety hazards, and consumers are more inclined to choose green and natural products, so the development of biological bacteriostatic agents is particularly important. *Lactobacillus* and their metabolites are generally considered safe and are therefore widely used in food. *Lactobacillus* bacteriocin is a class of polypeptides or proteins with antibacterial activity synthesized by *Lactobacillus* through ribosomes in the process of growth and metabolism, and has a significant inhibitory effect on the growth and reproduction of some harmful microorganisms. This paper mainly introduced the classification of *Lactobacillus* bacteriocin, the antibacterial mechanism, the combination of bacteriocin and other food preservation technologies, and the use of *Lactobacillus* as a natural antibacterial agent in milk and dairy products, meat and meat products, aquatic products, fruit and vegetable products and egg products, in order to provide a certain theoretical basis for the comprehensive utilization and further research of bacteriostatin-producing *Lactobacillus*.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760451、31860437)、兵团科技创新人才计划项目(2020CB024、2021CB004)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760451, 31860437), and the Corps of Science and Technology Innovation Talent Program (2020CB024, 2021CB004)

*通信作者: 李宇辉, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为畜产品加工, 食品微生物研究。E-mail: liyuhui615@sina.com

*Corresponding author: LI Yu-Hui, Master, Associate Professor, Institute of Agro-products Processing Science and Technology Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China. E-mail: liyuhui615@sina.com

KEY WORDS: *Lactobacillus*; bacteriocin; natural bacteriostatic agent

0 引言

由食品腐败菌、致病菌引起的食品安全性问题一直以来受到广泛关注^[1]。为了延缓或防止食品腐败变质,除了干燥、冷冻、盐渍、罐藏等保藏方法外,还可采用添加化学防腐剂的方法来延长保质期。目前大量研究表明,一些化学防腐剂存在致畸、诱癌及致癌等潜在的危害^[2-4]。因此,开发性能稳定、适应性广、安全无毒的天然抑菌物质是目前研究的热点^[5]。

天然抑菌物质可从植物、动物及微生物中提取获得,可杀死霉菌、细菌等有害微生物或抑制其生长繁殖。微生物抗菌物质是微生物在生长代谢过程中产生的具有抗菌作用的物质,主要包括多肽、有机酸等^[6]。乳酸菌在代谢过程中可产生过氧化氢、有机酸及细菌素等具有抗菌活性的物质^[7],因此乳酸菌常作为生物保护菌添加至食品中,以抑制有害微生物生长繁殖及延长食品货架期^[8]。乳酸菌的代谢产物过氧化氢产生的活性氧的氧化能力较强^[9],通过破坏羟自由基来抑制微生物的生长^[10];有机酸(如乳酸、草酸、柠檬酸等)是通过改变细菌细胞的通透性以达到杀死或抑制致病菌的目的^[11];细菌素可以抑制与其产生菌株同源或近源菌株的生长繁殖,但只有极少数的细菌素具有广谱抑菌活性^[12],已商品化的乳酸菌细菌素也十分有限,乳酸链球菌素(nisin)是由乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)发酵产生的一类天然的抗菌肽^[13],被广泛应用于食品工业中,可抑制病原菌及延长食品保质期,但它的抑菌谱较窄,不能抑制革兰氏阴性菌,而且其抑菌活性不稳定,存在局限性^[14]。本文综述了乳酸菌细菌素的抑菌机制、乳酸菌作为天然抑菌剂在食品中的应用及与其他食品保鲜技术结合使用的优势,并对天然抑菌剂未来的研究方向进行展望,以期对产细菌素乳酸菌的综合利用及具有广谱抑菌活性细菌素的进一步研究提供理论依据,以促进产细菌素乳酸菌在食品工业及其他领域的应用。

1 乳酸菌代谢产物细菌素

1.1 细菌素

细菌素是由乳酸菌在代谢过程中通过核糖体合成的对同种或近源微生物有抑菌活性的多肽或蛋白质,且其可抑制革兰氏阳性及革兰氏阴性致病菌^[15]。细菌素和抗生素都是微生物的代谢物,且二者都有一定的抑菌作用,所以起初人们认为细菌素就是抗生素,但细菌素与抗生素的产生机制和抑菌机制并不相同,且细菌素具有无毒、无害、

无残留的特点,与抗生素存在本质上的差异。乳酸菌细菌素作为新型生物抑制剂在细菌防治方面有代替传统抗生素的潜力,在食品工业中有良好的应用前景。

1.2 细菌素的分类

1.2.1 羊毛硫抗生素

根据结构及作用方式,可将羊毛硫细菌素分为 2 个亚类,即 A 型羊毛硫细菌素和 B 型羊毛硫细菌素,乳酸菌产生的大部分为 A 型羊毛硫细菌素^[16]。A 型是带有正电荷及疏水基团的两亲螺旋肽,一般有 21~38 个氨基酸残基,其分子量大约为 2164~3488 D。A 型羊毛硫细菌素主要通过破坏敏感菌的细胞膜,使其形成孔隙从而达到抑菌或杀菌的作用^[17]。B 型含有较多的小环结构,分子量较小,一般在 2000 D 左右,不带电荷,主要是通过干扰酶的活性来达到抑菌效果^[18]。

1.2.2 热稳定、无修饰的小分子肽

II 类细菌素是小分子多肽或蛋白质,其分子量一般小于 10 kDa,且热稳定性较好,通常对李斯特菌有特异抗性,根据其结构的不同可被分为 3 个亚类^[19]。

1.2.3 热敏感的大分子肽

III 类细菌素是一种热不稳定的大分子肽或蛋白,其分子量通常大于 30 kDa。其通过在敏感菌的细胞膜上形成孔隙,增加细胞膜的通透性,从而达到抑菌的目的。与 A 型羊毛硫抗生素抑菌的作用方式相似,但 III 类细菌素具有较好的广谱性,而且对革兰氏阴性菌及革兰氏阳性菌的生长繁殖有一定的抑制效果^[20]。

1.2.4 蛋白质化合物

IV 类细菌素由碳水化合物、蛋白基团及类脂基团等共同构成,这些基团通常是细菌的活性部位,蛋白部分与其他化学成分必须共同作用才能使其产生活性。同时,IV 类细菌素能有效抑制真菌及革兰氏阴性菌的生长繁殖^[21],但此类细菌素已被终止,并被命名为溶菌素^[22],具体分类及特征见表 1、2。

表 1 按分子大小分类
Table 1 Classification by molecular size

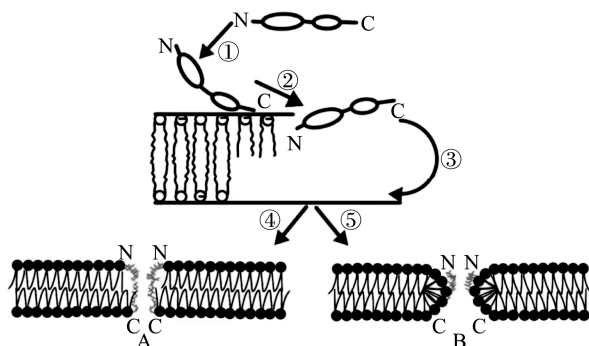
分类	大小	特点
Class I	<5 kDa	羊毛硫细菌素
Class II	5~10 kDa	疏水性、热稳定
Class III	>30 kDa	热不稳定
Class IV	大分子蛋白	碳水化合物、蛋白基团或类脂基团

表 2 细菌素的分类
Table 2 Classification of bacteriocins

分类	特征	举例	参考文献
I	Ia 羊毛硫细菌素(<5 kDa 含硫氨酸和 β 甲基硫氨酸的多肽)	nisin	[16-17]
	Ib 含 labyrinthin 和 labionin 的碳环羊毛硫细菌素	labyrinthopeptin A1	[18]
	Ic Sactibiotics(发夹结构和硫键)	thuricin CD	[20]
II	IIa 热稳定性小分子多肽, 具有抗单核细胞增生李斯特菌活性	sakacins A and P, leucocin A, Pediocin PA-1	[19-20]
	IIb 两肽细菌素, 其活性取决于两种肽的互补作用	lactacin EF and plantaricin JK, lactococcin G	[19-20]
	IIc 环状细菌素	enterocin AS-48, garvicin ML	[19-20]
	II d 未修饰的, 线性的, 非类片菌素	bactofencin A	[19-20]
III	热不稳定大分子细菌素	lactacin B, helveticin J and enterolysin A	[20]

1.3 乳酸菌细菌素的抑菌机制

不同的乳酸菌产生的细菌素不同, 其作用机制也不同, 一般来说, 细菌素的抑菌过程是多种机制共同作用的结果, 如破坏细菌膜的结构、阻碍细胞增殖分裂及破坏细胞壁结构, 其中破坏细胞膜结构的抑菌机制最常见, 细胞膜是抵御外部杀菌剂的第一道防线, 以细胞膜为靶点的抗菌剂有望杀死所有形式的细菌, 大多数自然发生的防御肽是针对细菌膜^[23], 例如 nisin 作用于细菌细胞膜时主要通过两种方式形成孔隙, 即“桶板”模型和“楔形”模型(图 1)。



注: ①nisin 与细胞膜结合; ②nisin 氮端与细胞膜结合; ③nisin 碳端跨过细胞膜切换至跨膜方向; ④⑤在细胞膜上形成孔道;

A: “桶板”模型; B: “楔形”模型。

图 1 Nisin 作用方式模型

Fig.1 Nisin mode of action model

SINGH 等^[24]利用荧光显微镜和透射电镜观察用侧孢菌素(laterosporulin, LS)处理的细胞在处理的早期时刻保持细胞形状, 而在处理的后期时刻细胞完全溶解, 这是因为 LS 可以形成紧密的封闭结构并与受试菌的膜蛋白相互作用从而破坏了细胞膜的完整性。LU 等^[25]研究发现一种新型细菌素 BM1122 具有较低的血活性, 在 60~120°C 之间具有良好的热稳定性, 且对各种 pH (2~11)和蛋白酶都有抗性, 能使金黄色葡萄球菌质壁分离、大肠杆菌形成孔隙。

此外, 细菌素 BM1122 还可以抑制生物膜形成, 破坏细胞膜的完整性, 扰乱细胞周期。除此之外, 细菌素诱导细胞死亡的方式有多种, 如改变细胞膜的通透性或细胞内酶的活性、抑制孢子萌发及敏感菌的呼吸作用等^[26-28]。

目前对乳酸菌细菌素的生物学特性、分离纯化及鉴定的研究较多, 对其抑菌机制的研究较少, 乳酸菌细菌素的抑菌机制的研究对其安全性评价及后续的开发应用有重要意义。

2 乳酸菌作为天然抑菌剂在食品中的应用

乳酸菌是一类以糖为原料, 通过发酵产生大量乳酸的无芽孢、革兰氏阳性细菌的总称^[29], 在其发酵过程中可产生过氧化氢、有机酸及细菌素等抗菌物质, 目前有大量研究可以证明乳酸菌早已作为添加剂、生物防腐剂及生产辅助剂应用于食品工业中, 具有良好的应用前景^[30-33]。

2.1 乳及乳制品

发酵乳制品一般是以生牛、羊乳或乳粉为原料添加益生菌发酵剂制成的产品^[34]。乳制品营养丰富, pH 较低, 适合部分微生物生长繁殖, 容易被霉菌及酵母菌污染^[35]。乳酸菌具有良好的安全性^[36], 在乳制品中既是发酵剂也是生物保护菌。大部分乳酸菌细菌素具有耐热及耐酸的特性, 在加热过程中可保证其活性不受抑制, 在人体胃肠道内可耐受胃酸的影响。乳酸菌细菌素的本质就是蛋白质, 可被人体内的蛋白酶分解, 不会在体内残留并蓄积, 食用安全可靠。尚楠等^[37]研究发现接种了产细菌素双歧杆菌 L-SN 的酸奶后酸化现象明显改善, 并且酸奶的持水力及黏度都有所提高, 酸奶的品质也有所改善。杨慧等^[38]研究发现产细菌素植物乳杆菌 Q7 对嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌的生长有抑制作用, 且对后者的抑制效果更好。其本格苏都等^[39]研究发现接种了益生菌 *Lactobacillus casei* Zhang 的发酵乳质构和风味更好。

发酵乳制品有降低胆固醇、抗氧化、降压作用和免疫

益处^[40], 目前对发酵乳制品在预防和治疗疾病方面可能的治疗效果进行了大量研究, 特定乳酸菌菌株的发酵作用可能会从发酵乳中去除有毒或抗营养因素, 在食品与保健行业有良好的应用前景。

2.2 肉及肉制品

肉类和肉制品一直是人类饮食的重要组成部分, 含有对生长和健康有价值的营养物质, 但其易被微生物污染, 易腐败变质, 给消费者的健康带来风险, 给肉类行业造成损失。发酵肉制品适宜接种产生细菌素的乳酸菌细胞作为发酵剂或保护培养物, 当乳酸菌活细胞在真实肉制品体系中不能产生细菌素时, 直接添加细菌素作为食品添加剂更为适宜。在包装中加入细菌素是提高肉类安全性的另一种方法, 以避免肉类中直接添加细菌素^[40]。近年一些研究表明乳酸菌可有效抑制新鲜肉、熟肉及真空包装肉制品中的致病菌, 并且还能赋予肉制品独特风味^[41-42]。ZHANG 等^[43]研究发现将戊糖乳杆菌素 31-1 应用于托盘包装冷鲜猪肉中, 能抑制单核细胞增生李斯特菌和荧光假单胞菌的生长, 可改善产品的理化性质和感官特性, 并可处理后将产品的保质期延长至 15 d。许女等^[44]将凝结芽孢杆菌 VP4 的代谢产物(VP4 细菌素)应用于冷鲜羊肉保藏中, 并研究了对微生物、理化性质及感官评价的影响, 结果表明 VP4 细菌素有明显的抑菌作用, 可有效延长羊肉的保质期。DANIELSKI 等^[45]研究发现麦芽芳香卡诺杆菌能抑制托盘包装的熟火腿中的英诺克李斯特菌的生长繁殖, 并不影响贮藏过程中产品的品质。

细菌素可通过 3 种主要方法应用于肉及肉制品, 一为直接将产生细菌素的乳酸菌细胞作为发酵剂或保护培养物接种到肉类和肉制品中; 二为将细菌素作为食品添加剂直接应用; 三为以包装形式使用纯化或部分纯化细菌素。此外, 它们的性能取决于储存的时间和温度、产品的 pH 范围, 以及与其他食品成分或食品微生物群成员的相互作用。细菌素活性的保持受很多条件的制约, 如何增强细菌素的活性将是以后研究的重点。

2.3 水产品

水产品中含优质蛋白、不饱和脂肪酸及一些人体所必需的微量元素, 但在其贮藏加工中极易受到腐败微生物的侵染, 使其腐败变质、产品质量下降^[46], 水产品比其他动物源性食品更容易变质。对于水产品运输及贮藏过程中的保鲜, 多采用化学及物理保藏方法, 但都有其限制性, 目前, 将乳酸菌作为生物抑制剂应用于水产品保鲜中受到广泛关注^[47-49]。唐文静等^[50]研究发现复合乳酸菌对冻鲈鱼具有保鲜和延长货架期的作用。KAKTCHAM 等^[51]研究发现乳酸菌通过抑制罗非鱼体内有害微生物, 可有效延长罗非鱼的贮藏时间。GOMEZ-SALA 等^[52]研究发现从鱼类中分离得到的弯曲乳杆菌 BCS35 既可作为保护剂, 也可作为食

品添加剂, 是一种适宜的、有效的鱼类生物保藏剂。CAO 等^[53]研究发现分离株粪肠杆菌 NCIM5367 和酸乳酸杆菌 NCIM5368 具有脂解和蛋白水解特性, 可抑制革兰氏阳性菌的生长, 将罗非鱼鱼片的保存时间从 24 h 延长到 48 h, 但对革兰氏阴性菌无显著作用。

乳酸菌可以降低轻度保存的海鲜产品中食源性病原体传播的风险, 延长贮藏期间的货架寿命, 尽量减少物理处理(加热、冷藏等)和添加化学防腐剂, 减少因变质而造成的经济损失, 具有成本效益和商业可行性, 并符合消费者对最低限度加工和自然保存的食品要求。乳酸菌与其他水产品保鲜技术的结合使用可作为今后的研究方向, 以减少酶和氧化腐败。

2.4 果蔬类产品

新鲜果蔬容易被单增李斯特菌、沙门氏菌等致病菌污染, 使用化学防腐剂会损害果蔬的营养特性和感官品质。在果蔬表面喷洒乳酸菌既可抑制致病菌, 又能保护果蔬的营养和品质。DONG 等^[54]发现植物乳杆菌可以通过抑制贮藏期间李斯特菌毒力基因的表达, 来抑制卷心菜中李斯特菌的生长。ALEGRE 等^[55]在楔形苹果上添加了 6 Log CFU/g 浓度的鼠李糖乳杆菌 GG (*Lactobacillus rhamonosus* GG), 并在 5、10℃下贮存 14 d, 贮藏期间单增李斯特菌减少了 1 Log CFU/g, 而对苹果质量没有任何不良影响。MA 等^[56]利用栖树汁乳杆菌 JT03 及乳酸片球菌 JY03 来防治柑橘霉菌病, 结果表明这两种乳酸菌产生的蛋白类抑菌物质能有效抑制指状青霉生长。

消费者需要新的天然的产品, 新鲜切块的蔬菜和水果深受消费者的青睐。利用食用涂层或薄膜可以防止新鲜产品的失水和微生物增殖, 提高保质期。食用涂料一般由食品添加剂或抗菌剂组成, 正逐渐成为减少蔬菜和食品加工过程恶化影响的重要元素, 因此, 乳酸菌在这一方面拥有广阔前景。

2.5 蛋制品

我国是禽蛋生产和消费大国, 资源丰富, 品种多样。蛋类营养价值高, 且易被人体消化, 已成为日常饮食的一部分。为满足人们对蛋及蛋制品的追求, 将乳酸菌应用于此, 可改善蛋及蛋制品的质量^[57]。巴氏杀菌全蛋液制品因其易于操作和储存的优点, 越来越受到食品行业和各个餐饮部门的欢迎, 但其主要缺点之一是保质期短^[58]。巴氏杀菌仍然是应用的主要方法, 因为其他方法或多或少存在问题。如微波杀菌的工艺条件难以控制^[59]、辐照会导致高蛋白产品产生辐射气味^[60]、而高脉冲电场容易引起蛋白质变性^[61]。此外, 一些抗菌物质的添加可能会对消费者健康和环境产生次要的安全问题, 但一些有益细菌也可以抑制腐败细菌以及一些病原体。WANG 等^[62]研究发现植物乳杆菌 90 的无细胞上清液可以显著抑制全蛋液中几种优势腐败

菌的生长, 而乳酸菌的无细胞上清液也首次被用作鸡蛋制品中的抑菌剂, 有广阔的应用前景。这些发现为延长蛋制品的货架期提供了理论依据。

3 产细菌素乳酸菌与其他食品保鲜技术的结合应用

产细菌素乳酸菌与其他保鲜技术的结合为维持食品质量和食品安全提供了一个新选择。传统的加热工艺是控制食源性微生物最常用和有效的方法, 主要通过蛋白质去折叠和变性使微生物失活^[63]。细菌素与热处理相结合可以提高孢子的热敏感性, 延长抗菌作用时间, 拓宽抗菌活性谱^[64]。在热处理(103℃)前向脱脂牛奶中添加乳链菌肽(2000 IU/mL)可加强对嗜热蜡样芽孢杆菌 T 和嗜热脂肪嗜热芽孢杆菌 ATCC 12980 孢子的控制。乳酸链球菌素增强了孢子对热的敏感性, 残留乳酸链球菌素的存在抑制了孢子的存活和生长^[65]。

高压加工是一种非热加工技术, 通常使用水作为压力传递介质, 同时最大限度地保持食品质量。高压处理与细菌素的结合可以有效地延缓微生物的生长, 同时保持较高的食品质量^[66]。在干酪中, 产细菌素乳酸菌和高压处理的联合效应比单独的高压处理高得多^[67]。

精油(essential oils, EOs)被广泛用于食品防腐剂、医药、化妆品和香水中, EOs 及其植物成分具有广泛的生物活性, 食品中的高 EOs 水平显示出不可接受的感官特性, 但若 EOs 水平降低以保持食品的颜色, 抗菌活性效果将受到破坏。EOs 与细菌素结合后, 具有增强或协同作用, 而 EOs 和细菌素都可以在较低的用量下使用^[68-69]。百里香 EOs (0.9%)在肉糜中表现出不可接受的感官特性, 为了减少副作用并控制食源性病原体, 将百里香 EOs 与乳链菌肽联合使用, 结果表明, 百里香 EOs (0.6%)和乳链菌肽(1000 IU/g)对大肠杆菌 O157:H7 和单核细胞增生李斯特菌 Scott A 和单核细胞增生李斯特菌 Lmk 的抑制效果明显增强, 并延长了在 4℃ 贮藏的碎牛肉的货架期^[70]。

4 结束语

乳酸菌种类丰富, 可改善食品风味、延长食品保质期, 在食品领域具有良好的应用前景, 一些乳酸菌细菌素也早已应用于生物医药和畜牧养殖领域, 但仍存在一些有待深入研究的问题: 一为减少乳酸菌对生长环境的依赖程度, 如在乳酸菌的生产、储存和运输过程中, 难以保证活菌的数量和活性, 从而限制了乳酸菌产品的开发; 二为安全有效地利用乳酸菌细菌素, 需要更深入研究其作用的分子机制, 如细菌素生产、免疫和作用模式等。产抑菌素的乳酸菌的应用价值较高, 随着研究的不断深入, 其在抑菌防腐尤其是食品防腐、保鲜、包装等方面应用

前景将更加广阔。

参考文献

- [1] 谢海伟, 吴琳芝, 黄欲菲, 等. 食品保鲜剂研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(15): 13-17.
XIE HW, WU LZ, HUANG YF, *et al.* Research progress on food preservatives [J]. J Anhui Agric Sci, 2019, 47(15): 13-17.
- [2] 朱燕莉, 王正莉, 王卫, 等. 天然食品防腐剂的抑菌机理研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(9): 176-180.
ZHU YL, WANG ZL, WANG W, *et al.* Research progress on antibacterial mechanism of natural food preservatives [J]. China Cond, 2021, 46(9): 176-180.
- [3] 董欣旖, 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 XY, ZHAO YX. Analysis of the application status of food preservatives in food [J]. China Food Addit, 2020, 31(11): 139-143.
- [4] 顾味. 现阶段食品防腐剂的发展现状及其存在问题[J]. 食品安全导刊, 2020, (6): 31.
GU M. The current development status and existing problems of food preservatives [J]. Chin Food Saf Magaz, 2020, (6): 31.
- [5] 赵冬雪, 杨晓溪, 郎玉苗. 天然抗菌剂在食品抑菌保鲜中的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 204-207.
ZHAO DX, YANG XX, LANG YM. Research progress of natural antibacterial agents in food antibacterial and fresh-keeping [J]. Food Ind, 2021, 42(7): 204-207.
- [6] 蔡晨晨, 王瑞琴, 陈德昭, 等. 天然抗菌物质在食品包装中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, (2): 331-335.
CAI CC, WANG RQ, CHEN DZ, *et al.* Research progress on the application of natural antibacterial substances in food packaging [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, (2): 331-335.
- [7] 孔祥丽, 吴昕雨, 许晓曦. 植物乳杆菌代谢产物抑菌机制与应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 3131-3140.
KONG XL, WU XY, XU XX. Research progress on the antibacterial mechanism and application of *Lactobacillus plantarum* metabolites [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(8): 3131-3140.
- [8] 张文敏, 耿方琳, 方太松, 等. 应用乳酸菌生物保护剂控制肉制品中单增李斯特菌的研究进展[J]. 工业微生物, 2019, 49(4): 39-45.
ZHANG WM, GENG FL, FANG TS, *et al.* Research progress on application of lactic acid bacteria bioprotectant to control *Listeria monocytogenes* in meat products [J]. Ind Microbiol, 2019, 49(4): 39-45.
- [9] 胡美忠, 张新卓, 刘芸. 一株产广谱高效抑菌活性细菌素植物乳杆菌的筛选与鉴定[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(2): 96-99.
HU MZ, ZHANG XZ, LIU Y. Screening and identification of a *Lactobacillus plantarum* producing broad-spectrum and highly effective bacteriocin [J]. Guizhou Agric Sci, 2016, 44(2): 96-99.
- [10] MALIK A, MASOOD F, AHMAD S. Food processing: Strategies for quality assessment, a broad perspective [M]. New York: Springer, 2014.
- [11] LACOMBE A, WU VCH, TYLER S, *et al.* Antimicrobial action of the American cranberry constituents; phenolics, anthocyanins, and organic acids, against *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Int J Food Microbiol, 2010, 139(1-2): 102-107.
- [12] 徐炳政, 王颖, 梁小月, 等. 乳酸菌细菌素应用研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(1): 60-63.

- XU BZ, WANG Y, LIANG XY, *et al.* Research progress on the application of lactic acid bacteria bacteriocin [J]. *J Heilongjiang Bayi Agric Univ*, 2015, 27(1): 60–63.
- [13] 罗林根, 朱明扬, 黄谦, 等. 乳酸链球菌素及其在食品中的应用研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(5): 1003.
- LUO LG, ZHU MY, HUANG Q, *et al.* Research progress of nisin and its application in food [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2020, 61(5): 1003.
- [14] 王利君, 郇萍, 付碧石, 等. 乳酸菌细菌素抗菌作用机制研究进展[J]. *食品科技*, 2020, 45(1): 36–42.
- WANG LJ, LI P, FU BS, *et al.* Research progress on the mechanism of antibacterial action of lactic acid bacteria bacteriocin [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(1): 36–42.
- [15] 吴学友, 朱悦, 陈正行, 等. 乳酸菌细菌素 Durancin GL 对单增李斯特菌的抗菌活性及机制[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 73–78.
- WU XY, ZHU Y, CHEN ZX, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of *Lactobacillus* bacteriocin Durancin GL against *Listeria monocytogenes* [J]. *Food Sci*, 2019, 40(23): 73–78.
- [16] 吕懿超, 李香澳, 王凯博, 等. 乳酸菌作为生物保护菌的抑菌机理及其在食品中应用的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(19): 281–290.
- LV YC, LI XAO, WANG KB, *et al.* Research progress on the antibacterial mechanism of lactic acid bacteria as biological protection bacteria and its application in food [J]. *Food Sci*, 2021, 42(19): 281–290.
- [17] YAMASHITA H, TOMITA H, INOUE T, *et al.* Genetic organization and mode of action of a novel bacteriocin, bacteriocin 51: Determinant of Van A-type vancomycin-resistant *Enterococcus faecium* [J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2011, 55(9): 4352–4360.
- [18] 李瑞胜, 别怀周, 张明. 乳酸菌细菌素作用机理的研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(27): 13616–13617.
- LI RS, BIE HZ, ZHANG M. Study on the action mechanism of *Lactobacillus* bacteriocin [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, 40(27): 13616–13617.
- [19] 张隽娟, 李静, 樊铭勇. 细菌素的研究与应用进展[J]. *绿色科技*, 2017, (18): 74–78.
- ZHANG JX, LI J, FAN MY. Research and application progress of bacteriocin [J]. *Green Sci Technol*, 2017, (18): 74–78.
- [20] KUMARIYA R, GARSA AK, RAJPUT YS, *et al.* Bacteriocins: Classification, synthesis, mechanism of action and resistance development in food spoilage causing bacteria [J]. *Microb Pathog*, 2019, 128: 171–177.
- [21] 赵娜, 刘鑫, 石和平, 等. 乳酸菌抗菌物质分类及作用机理[J]. *农产品加工*, 2015, (10): 58–60.
- ZHAO N, LIU X, SHI HP, *et al.* Classification and mechanism of antibacterial substances of lactic acid bacteria [J]. *Farm Prod Process*, 2015, (10): 58–60.
- [22] GULLUCE M, KARADAYI M, BARIS O, *et al.* Bacteriocins: Promising antimicrobials. Microbial pathogens and strategies for combating them [M]. Madrid: Science, Technology and Education, 2013.
- [23] 李世超, 方华, 朱校适. 嗜酸乳杆菌产细菌素的生物学特性及抑菌机制研究[J]. *饲料研究*, 2017, (11): 20–26.
- LI SC, FANG H, ZHU XS. Biological characteristics and antibacterial mechanism of bacteriocin produced by *Lactobacillus acidophilus* [J]. *Feed Res*, 2017, (11): 20–26.
- [24] SINGH PK, SOLANKI V, SHARMA S, *et al.* The intramolecular disulfide-stapled structure of laterosporulin, a class IId bacteriocin, conceals a human defensin-like structural module [J]. *FEBS J*, 2015, 282(2): 203–214.
- [25] LU Y, YAN H, LI X, *et al.* Physicochemical properties and mode of action of a novel bacteriocin BM1122 with broad antibacterial spectrum produced by *Lactobacillus crustorum* MN047 [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(5): 1523–1535.
- [26] 张军, 汤伟, 孙晓雯, 等. 环状细菌素研究进展[J/OL]. *微生物学报*: 1–13. [2022-05-31]. DOI: 10.13343/j.cnki.wsxb.20210714
- ZHANG J, TANG W, SUN XW, *et al.* Research progress of cyclic bacteriocins [J/OL]. *Acta Microbiol*: 1–13. [2022-05-31]. DOI: 10.13343/j.cnki.wsxb.20210714
- [27] TJAKKO A. Pore-forming bacteriocins of gram-positive bacteria and self-protection mechanisms of producer organisms [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2010, (1): 1–9.
- [28] DABA GM, ISHIBASHI N, GONG X, *et al.* Characterisation of the action mechanism of a *Lactococcus*-specific bacteriocin, lactococcin Z [J]. *J Biosci Bioeng*, 2018, 126(5): 603–610.
- [29] 唐贤华, 张崇军, 隋明. 乳酸菌在食品发酵中的应用综述[J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(6): 44–46, 50.
- TANG XH, ZHANG CJ, SUI M. A review of the application of lactic acid bacteria in food fermentation [J]. *Cere Food Ind*, 2018, 25(6): 44–46, 50.
- [30] WEI T, BAO JY, YANG HH, *et al.* Musa basjoo regulates the gut microbiota in mice by rebalancing the abundance of probiotic and pathogen [J]. *Microb Pathog*, 2019, 131: 205–211.
- [31] 张益卓, 赵长青, 赵兴秀, 等. 乳酸链球菌素在延长猪肉干保藏期中的应用[J]. *中国调味品*, 2022, 47(3): 44–48.
- ZHANG YZ, ZHAO CQ, ZHAO XX, *et al.* Application of nisin in prolonging the preservation period of dried pork [J]. *China Cond*, 2022, 47(3): 44–48.
- [32] 田露, 吴咪, 缙敬轩, 等. 细菌素的研究与应用进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(4): 224.
- TIAN L, WU M, HOU JX, *et al.* Research and application progress of bacteriocins [J]. *Biotechnol Bull*, 2021, 37(4): 224.
- [33] 方士元, 谢晶. 乳酸菌及其细菌素在海水鱼保鲜中应用的研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2019, 39(2): 111–116.
- FANG SY, XIE J. Research progress on the application of lactic acid bacteria and their bacteriocins in the preservation of marine fish [J]. *J Microbiol*, 2019, 39(2): 111–116.
- [34] 谢婷婷, 黄丽, 黄加祥. 产 γ -氨基丁酸的乳酸菌在发酵乳制品中的应用现状[J]. *中国乳业*, 2021, (1): 60–64.
- XIE TT, HUANG L, HUANG JX. Application status of γ -aminobutyric acid-producing lactic acid bacteria in fermented dairy products [J]. *China Dairy*, 2021, (1): 60–64.
- [35] 薛书红, 刘玉凤. 乳及乳制品中微生物污染及其控制[J]. *食品安全导刊*, 2016, (12X): 24.
- XUE SH, LIU YF. Microbial contamination in milk and dairy products and its control [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2016, (12X): 24.
- [36] 高慢慢, 焦新雅, 张志胜, 等. 侗族传统发酵肉中乳酸菌的筛选, 发酵特性及安全性分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(12): 94.
- GAO MM, JIAO XY, ZHANG ZS, *et al.* Screening, fermentation

- characteristics and safety analysis of lactic acid bacteria in traditional fermented sour meat of Dong nationality [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(12): 94.
- [37] 尚楠, 刘丽莎, 任发政, 等. 产细菌素双歧杆菌 L-SN 对酸奶后酸化及品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(4): 178–182.
SHANG N, LIU LS, REN FZ, *et al.* Effects of bacteriocin-producing *Bifidobacterium* L-SN on post-acidification and quality of yogurt [J]. *J China Agric Univ*, 2013, 18(4): 178–182.
- [38] 杨慧, 步雨珊, 刘奥, 等. 产细菌素植物乳杆菌 Q7 对酸奶后酸化及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 30–35.
YANG H, BU YS, LIU AO, *et al.* Effects of bacteriocin-producing *Lactobacillus plantarum* Q7 on post-acidification and quality of yogurt [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(3): 30–35.
- [39] 其木格苏都, 郭壮, 王记成, 等. 益生菌 *Lactobacillus casei* Zhang 对凝固型发酵乳质构和挥发性风味物质的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(3): 595–605.
QI MGS, GUO Z, WANG JC, *et al.* Effects of probiotic *Lactobacillus casei* Zhang on texture and volatile flavor compounds of coagulated fermented milk [J]. *Chin Agric Sci*, 2013, 46(3): 595–605.
- [40] GARCIA-BURGOS M, MORENO-FERNÁNDEZ J, ALFÉREZ MJM, *et al.* New perspectives in fermented dairy products and their health relevance [J]. *J Functional Foods*, 2020, 72: 104059.
- [41] WORAPRAYOTE W, MALILA Y, SORAPUKDEE S, *et al.* Bacteriocins from lactic acid bacteria and their applications in meat and meat products [J]. *Meat Sci*, 2016, 120: 118–132.
- [42] 康慎敏, 武瑞赞, 穆文强, 等. 乳酸菌拮抗食源性致病菌的研究及应用进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 250–259.
KANG SM, WU RY, MU WQ, *et al.* Research and application progress of lactic acid bacteria against food-borne pathogenic bacteria [J]. *Food Sci*, 2022, 43(1): 250–259.
- [43] ZHANG J, LIU G, LI P, *et al.* Pentocin 31-1, a novel meat-borne bacteriocin and its application as biopreservative in chill-stored tray-packaged pork meat [J]. *Food Control*, 2010, 21(2): 198–202.
- [44] 许女, 杨光, 王璐, 等. 山西老陈醋源凝结芽孢杆菌 VP4 细菌素在冷鲜羊肉保藏中的应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 199–207.
XU N, YANG G, WANG L, *et al.* Application of *Bacillus coagulans* VP4 bacteriocin from Shanxi aged vinegar source in the preservation of chilled mutton [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(1): 199–207.
- [45] DANIELSKI GM, IMAZAKI PH, ANDRADE CCM, *et al.* *Carnobacterium maltaromaticum* as bioprotective culture *in vitro* and in cooked ham [J]. *Meat Sci*, 2020, 162: 108035.
- [46] MURRAY G, WOLFF K, PATTERSON M. Why eat fish? Factors influencing seafood consumer choices in British Columbia, Canada [J]. *Ocean Coast Manage*, 2017, 100(144): 16–22.
- [47] 匡珍, 李学英, 徐春霞, 等. 乳酸菌细菌素研究进展及其在水产养殖和加工中的应用[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(4): 292–298.
KUANG Z, LI XY, XU CX, *et al.* Research progress of lactic acid bacteria bacteriocin and its application in aquaculture and processing [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(4): 292–298.
- [48] SULISTIANI, HANDAYANI R. Application biopreservatives produced by lactic acid bacteria (LAB) for preservation boiled-salted (pindang) tuna (*Euthynnus affinis* Cantor, 1849) [C]. *AIP Conf Proc AIP Publishing LLC*, 2018.
- [49] RATHOD NB, PHADKE GG, TABANELLI G, *et al.* Recent advances in bio-preservatives impacts of lactic acid bacteria and their metabolites on aquatic food products [J]. *Food Biosci*, 2021, 44: 101440.
- [50] 唐文静, 宁喜斌, 王楚文, 等. 复合乳酸菌对冷藏海鲈鱼块的保鲜效果[J]. *微生物学通报*, 2016, 43(3): 559–566.
TANG WJ, NING XB, WANG CW, *et al.* Preservation effect of compound lactic acid bacteria on refrigerated sea bass pieces [J]. *Microbiol China*, 2016, 43(3): 559–566.
- [51] KAKTCHAM PM, TEMGOUA JB, NGOUFACK ZF, *et al.* Quantitative analyses of the bacterial microbiota of rearing environment, tilapia and common carp cultured in earthen ponds and inhibitory activity of its lactic acid bacteria on fish spoilage and pathogenic bacteria [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2017, 33(2): 1–12.
- [52] GOMEZ-SALA B, HERRANZ C, DIAZ-FREITAS B, *et al.* Strategies to increase the hygienic and economic value of fresh fish: Biopreservation using lactic acid bacteria of marine origin [J]. *Int J Food Microbiol*, 2016, 223: 41–49.
- [53] CAO R, LIU Q, CHEN S, *et al.* Application of lactic acid bacteria (LAB) in freshness keeping of tilapia fillets as sashimi [J]. *J Ocean Univ China*, 2015, 14(4): 675–680.
- [54] DONG Q, ZHANG W, GUO L, *et al.* Influence of *Lactobacillus plantarum* individually and in combination with low O₂-MAP on the pathogenic potential of *Listeria monocytogenes* in cabbage [J]. *Food Control*, 2020, 107: 106765.
- [55] ALEGRE I, VINAS I, USALL J, *et al.* Microbiological and physicochemical quality of fresh-cut apple enriched with the probiotic strain *Lactobacillus rhamnosus* GG [J]. *Food Microbiol*, 2011, 28(1): 59–66.
- [56] MA J, HONG Y, DENG L, *et al.* Screening and characterization of lactic acid bacteria with antifungal activity against *Penicillium digitatum* on citrus [J]. *Biol Control*, 2019, 138: 104044.
- [57] 曾生林. 乳酸菌在蛋和蛋制品中的应用[J]. *现代食品*, 2017, (22): 87–89.
ZENG SL. Application of lactic acid bacteria in eggs and egg products [J]. *Mod Food*, 2017, (22): 87–89.
- [58] WANG J, SU Y, GU L, *et al.* The inhibition of cell-free supernatants of several lactic acid bacteria on the selected psychrophilic spoilage bacteria in liquid whole egg [J]. *Food Control*, 2021, 123: 107753.
- [59] ZHANG W, LIU F, NINDO C, *et al.* Physical properties of egg whites and whole eggs relevant to microwave pasteurization [J]. *J Food Eng*, 2013, 118(1): 62–69.
- [60] HARDER MNC, ARTHUR V, PERINA VCS, *et al.* Sensory evaluation by gamma radiation effect on protein allergen of laying hen eggs [J]. *Radiat Phys Chem*, 2012, 81(8): 1141–1143.
- [61] ZHAO W, YANG R, ZHANG HQ. Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2012, 27(2): 83–96.
- [62] WANG C, CHUPROM J, WANG Y, *et al.* Beneficial bacteria for aquaculture: Nutrition, bacteriostasis and immunoregulation [J]. *J Appl Microbiol*, 2020, 128(1): 28–40.

- [63] SMELT J, BRUL S. Thermal inactivation of microorganisms [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2014, 54(10): 1371–1385.
- [64] LIU G, NIE R, LIU Y, *et al.* Combined antimicrobial effect of bacteriocins with other hurdles of physicochemic and microbiome to prolong shelf life of food: A review [J]. Sci Total Environ, 2022, 825: 154058.
- [65] WANDLING LR, SHELDON BW, FOEGEDING PM. Nisin in milk sensitizes *Bacillus* spores to heat and prevents recovery of survivors [J]. J Food Prot, 1999, 62(5): 492.
- [66] KOMORA N, MACIEL C, PINTO CA, *et al.* Non-thermal approach to *Listeria monocytogenes* inactivation in milk: The combined effect of high pressure, pediocin PA-1 and bacteriophage P100 [J]. Food Microbiol, 2020, 86: 103315.
- [67] RODRIGUEZ E, ARQUES JL, NUNEZ M, *et al.* Combined effect of high-pressure treatments and bacteriocin-producing lactic acid bacteria on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in raw-milk cheese [J]. Appl Environ Microbiol, 2005, 71(7): 3399–3404.
- [68] ALVES FCB, BARBOSA LN, ANDRADE B, *et al.* Short communication: Inhibitory activities of the lantibiotic nisin combined with phenolic compounds against *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* in cow milk [J]. J Dairy Sci, 2016, 99(3): 1831–1836.
- [69] CHURKLAM W, CHATURONGAKUL S, NGAMWONGSATIT B, *et al.* The mechanisms of action of carvacrol and its synergism with nisin against *Listeria monocytogenes* on sliced bologna sausage [J]. Food Control, 2020, 108: 106864.
- [70] SOLOMAKOS N, GOVARIS A, KOIDIS P, *et al.* The antimicrobial effect of thyme essential oil, nisin, and their combination against *Listeria monocytogenes* in minced beef during refrigerated storage [J]. Food Microbiol, 2008, 25(1): 120–127.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



胡美丽, 硕士研究生, 主要研究方向为畜产品加工。

E-mail: 2439846579@qq.com



李宇辉, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为畜产品加工, 食品微生物研究。

E-mail: liyuhui615@sina.com