

乳酸菌在发酵肉制品中的应用研究进展

李月明^{1,2}, 张根生^{1,*}

(1.哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2.中国农业科学院农产品加工研究所主食加工技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 151900)

摘要: 发酵肉制品因其独特的风味、较高的营养价值、易消化等优势成为人们生活中不可缺少的食品。乳酸菌通常是兼性厌氧菌, 在肉制品发酵过程中具有不可替代的作用。本文检索并总结乳酸菌在发酵肉制品研究领域的具体应用, 如抑菌作用、改善风味、抗氧化、降低生物胺生成量、抑制亚硝胺积累及赋予健康功能, 以期乳酸菌在发酵肉制品中的应用研究提供理论参考。

关键词: 乳酸菌; 发酵肉制品; 发酵; 应用; 研究进展

Recent Progress on the Application of Lactic Acid Bacteria in Fermented Meat Products

LI Yueming^{1,2}, ZHANG Gensheng^{1,*}

(1.College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2.Institute of Staple Food Processing Technology, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Harbin 151900, China)

Abstract: Fermented meat products have become indispensable foods in people's life because of their unique flavor, high nutritional value and easy digestibility. Lactic acid bacteria (LAB) are usually parthenogenic anaerobic bacteria, which have an irreplaceable role in the fermentation process of meat products. This paper summarizes the application of LAB in the field of research on fermented meat products, such as bacterial inhibition, flavor improvement, antioxidant effect, reduction of biogenic amine production, inhibition of nitrosamine accumulation, and health protective effects, in order to provide a theoretical reference for further research in this field.

Keywords: lactic acid bacteria; fermented meat products; fermentation; application; progress

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220620-072

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2022) 10-0051-06

引文格式:

李月明, 张根生. 乳酸菌在发酵肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(10): 51-56. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220620-072. <http://www.rlyj.net.cn>

LI Yueming, ZHANG Gensheng. Recent progress on the application of lactic acid bacteria in fermented meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(10): 51-56. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220620-072. <http://www.rlyj.net.cn>

发酵肉制品是指利用微生物或酶的发酵作用, 在自然或人工控制条件下将原料肉通过腌制、发酵、干燥或熏制等一系列加工工艺制成的肉制品^[1]。发酵肉制品是传统肉制品的一个重要分支, 以其独特的风味和丰富的营养深受消费者的喜爱。国外比较出名的发酵肉制品有土耳其大香肠、帕马火腿、黎巴嫩大香肠、意大利萨拉米、西班牙生火腿和德国香肠等^[2], 我国主要有腊肉、板

鸭、酸肉、咸肉、风干肠、金华火腿等传统腌腊肉发酵肉制品。由于发酵肉制品受到内源酶和微生物活性的影响, 在加工过程中会发生一系列的物理、化学变化, 与常规肉制品相比, 发酵后的肉显示出许多优势。不仅具有独特的风味、质地和色泽, 还具有营养价值较高、易被人体消化、保存时间长等优势。通常来说, 环境因素和人为因素使制备的发酵肉制品存在较大的差异, 即使

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2019ZX07B03)

第一作者简介: 李月明(1990—)(ORCID: 0000-0003-1288-9487), 女, 工程师, 博士研究生, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: liyueming1004@163.com

*通信作者简介: 张根生(1964—)(ORCID: 0000-0001-7779-4353), 男, 教授, 硕士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: zhangsh@163.com

工艺相同,风味也存在较大的差异。此外,因原料富含蛋白质、脂肪等营养物质,使得发酵肉制品常面临外源微生物的污染、氧化酸败、生物胺和亚硝胺等食品安全问题^[3]。

发酵肉制品在发酵过程中起作用的微生物通常由一种或几种乳酸菌、微球菌和葡萄球菌组成,其中乳酸菌在肉制品发酵过程中具有不可替代的作用,常被作为发酵剂用于肉制品发酵^[4]。乳酸菌是能够利用糖类进行发酵、产生乳酸等代谢产物的一类细菌的总称^[5],其可以通过快速酸化发酵基质和产生抗菌物质(如细菌素)来提高发酵肉制品的安全性,同时缩短肉制品的成熟时间^[6-7]。这类乳酸菌通常是兼性厌氧菌,主要包括乳酸杆菌属、明串珠菌属、片球菌属、乳球菌属和肠球菌属^[8]。乳酸菌在肉制品发酵和成熟过程中可利用碳水化合物产酸,降低肉品pH值,分泌抗菌物质抑制致病菌和腐败菌的生长;可通过促进NO₂⁻分解成NO使肉制品发色,降低常规生产中亚硝酸盐的使用量;可通过对碳水化合物代谢、蛋白质水解和氨基酸分解代谢,以及脂解和脂肪酸代谢作用影响发酵肉制品风味的形成等^[9]。乳酸菌的产酸特性、代谢特性、抑菌特性、益生特性等在发酵肉制品的研究与应用中具有诸多作用,为全面了解乳酸菌在发酵肉制品中的具体应用情况,本文检索并总结了乳酸菌在发酵肉制品研究与生产领域的应用情况,如抑菌作用、改善风味、抗氧化、降低生物胺生成量、抑制亚硝胺积累、赋予健康功能,以期对乳酸菌在发酵肉制品中的深入研究与应用提供理论参考。

1 乳酸菌抑制发酵肉制品中腐败菌和病原菌

发酵肉制品的品质通常与原料最初的杂菌种类、杂菌数量、发酵剂的选择、发酵条件及贮存条件相关。大量研究表明,肉制品的安全卫生问题主要由其中的腐败菌和致病菌引起^[10]。沙门氏菌属、产多细胞毒素大肠埃希菌、弯曲杆菌属、小肠结肠炎耶尔森菌、单核增生李斯特菌和假结核耶尔森菌,以及金黄色葡萄球菌、产气荚膜梭菌和肉毒杆菌的毒素是肉制品中可能出现的主要危害微生物与毒素。

Erdoğmuş等^[11]从土耳其本土20种发酵肉制品中共分离出30种乳酸菌,采用琼脂斑点和琼脂孔扩散方法测定乳酸菌分离物的抗菌活性,发现乳酸菌分离株对李斯特菌ATCC 19115、金黄色葡萄球菌ATCC 25923、肺炎克雷伯菌NRRL B 4420、铜绿假单胞菌ATCC 11778、粪样链球菌NRRL B 14617的抗菌活性高于大肠杆菌ATCC 35218和枯草芽孢杆菌NRRL 744。Casaburi等^[12]发现,从意大利发酵香肠中筛选的1株弯曲乳杆菌(*Lactobacillus curvatus*) 54M16能产生细菌素抑制致病菌李斯特菌、蜡

芽孢杆菌和热死环丝菌的生长。Chen Ou等^[13]从泡菜和腊肉中筛选乳酸菌,发现植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)、类谷糠乳杆菌(*Lactobacillus parafarraginis*)、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)、副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*)、布氏乳杆菌(*Lactobacillus buchneri*)和类肠膜魏斯氏菌(*Weissella paramesenteroides*)对青霉菌有明显的抑制作用。其中,植物乳杆菌CKXP13和CWXP24产生的抗菌物质包括有机酸、过氧化氢和蛋白质化合物。Zhu Yinglian等^[14]发现,来源于发酵食品的2种植物乳杆菌应用于肉制品中具有抗菌活性。赵冬兵^[15]以金黄色葡萄球菌和大肠杆菌作为指示菌,从宣威火腿、牛干巴、咸肉、南京板鸭、海南腊鱼5种发酵肉中分离得到96株乳酸菌,其中75株具有抑菌效果,37株抑菌作用明显,经筛选鉴定可知,清酒乳杆菌(*Lactobacillus sakei*)的抑菌活性最强。梁红敏^[16]分别对发酵香肠中高产细菌素乳酸菌进行筛选与抑菌研究,发现植物乳杆菌T102产生的细菌素具有广泛的抑菌谱,对乳酸菌、多种革兰氏阴性菌和阳性菌都有不同程度的抑制作用,但对啤酒酵母这种真菌无抑菌效果。由此可知,乳酸菌可以用于预防或控制微生物产生的危害,通过代谢产生酸性物质、过氧化氢及细菌素等抑制肉中有害微生物的生长,提高发酵肉制品的微生物安全性,延长产品保质期^[17-18]。但如果最初的污染水平很高,使用发酵剂也不能有效延长食品的保质期^[19]。综上所述,乳酸菌的抑菌性具有菌株差异性,且不同菌株的抑菌机制及抑菌效果不同,乳酸菌间的协同抑菌效果研究及优势抑菌乳酸菌的选育仍是发酵肉制品菌株研究的重点。

2 乳酸菌改善发酵肉制品风味

风味是定义发酵食品质量和消费者接受程度的关键属性,包括甜、酸、苦、咸和鲜味的味道和挥发性化合物所产生的香气^[20-21]。发酵肉制品的风味是由挥发性和非挥发性芳香化合物以及其他与风味相关的化合物(如醇、醛、酮和酯)的产生和积累引起的^[22]。为改善或保持发酵肉制品的质量和风味,添加发酵剂已被用作提高发酵肉制品风味形成的有效途径^[23]。与自然发酵食品相比,接种乳酸菌发酵剂的产品具有发酵食品的典型特征、更好的风味和更高的产品质量。

Hu Yingying等^[24]对从东北地区传统干香肠中分离的37株乳酸菌进行工艺特性表征及菌种鉴定,发现清酒乳杆菌HRB10、植物乳杆菌MDJ2、希腊魏斯氏菌(*Weissella helenica*) HRB6和乳酸杆菌(*Lactobacillus lactis*) HRB0促进了香肠模型中氨基酸和挥发性化合物的生成;通过偏最小二乘回归分析发现,甘氨酸、缬氨酸、谷氨酸、丝氨酸和异亮氨酸可能是造成产品风味差

异的原因。由此可知,本地乳酸菌菌种可应用于发酵肉制品中提高其风味和发酵性能。Mei Lin等^[25]研究植物乳杆菌对发酵香肠风味的影响,发现菌株P3和P3-M2显著提高了发酵后酯类的种类和相对含量,促进风味物质的生成。这是由于乳酸菌代谢产生的醇和有机酸在酯酶和烷基转移酶的作用下可生成相应的酯,从而改善风味。Hu Yingying等^[26]研究弯曲乳杆菌、清酒乳杆菌、希腊魏斯氏菌和植物乳杆菌4种乳酸菌对减盐干香肠滋味特性的影响,发现氨基酸和有机酸对减盐干香肠的滋味特性具有主要贡献,希腊魏斯氏菌和植物乳杆菌具备生产良好滋味特征减盐干香肠的潜力。这是因为乳酸菌,如植物乳杆菌、弯曲乳杆菌等含有降解肌肉蛋白相关的酶,可以促进蛋白质水解形成游离氨基酸及多肽,促进鲜味物质谷氨酸钠和天冬氨酸含量的增加,增强风味^[27-28]。脂质分解产生的游离脂肪酸是发酵肉制品中重要的芳香化合物^[29]。添加乳酸菌有利于发酵肉制品中游离脂肪酸含量的增加,为风味的形成提供物质基础^[30]。Xiao Yaqing等^[31]研究接种植物乳杆菌和木糖葡萄球菌(*Staphylococcus xylosus*)对中式干发酵香肠微生物菌相、脂类分解、蛋白水解和挥发性物质的影响。结果表明,香肠中接种发酵剂,尤其是混合发酵剂,能够增加游离脂肪酸和游离氨基酸的含量,阻止异味和酸味的生成,改善微生物群落结构并促进产品风味的形成。

乳酸菌主导风味形成的主要机制是碳水化合物代谢、蛋白质水解和氨基酸分解代谢,以及脂解和脂肪酸代谢;诸多因素,如温度、pH值、水分活度、氧气、盐和不同的底物原料都会影响乳酸菌发酵风味的形成^[32-33]。因此,了解掌握乳酸菌对风味形成的影响因素及作用机制是应用乳酸菌作为发酵剂改善发酵肉制品风味的基础条件。为了获得风味更佳发酵肉制品,产生良好风味菌株的筛选及其风味形成机理的探究是当下发酵肉制品行业的研究热点与发展方向。

3 乳酸菌增强发酵肉制品抗氧化作用

蛋白质和脂肪作为发酵肉制品中最重要的组成成分,其在生产加工过程中极易发生氧化降解,从而影响产品的品质。蛋白质与脂肪的适度氧化和降解可以有效改善产品的营养价值和风味,但过度氧化会对肉的质地、保水性和风味等产生不利影响,如出现酸败味和哈喇味,影响消费者的接受程度。

乳酸菌是一种天然优质的抗氧化剂^[34]。Lin等^[35]研究19株乳酸菌,发现所有菌株均表现出抗氧化性。曹辰辰等^[36]应用植物乳杆菌CD101联合模仿葡萄球菌(*Staphylococcus simulans*) NJ201 (1:1)作为发酵剂制作发酵香肠,发现该发酵剂不仅可以抑制产品中脂肪和

蛋白质的氧化作用,还可以增加产品中的挥发性成分。卢涵等^[37]也发现植物乳杆菌联合模仿葡萄球菌可以抑制发酵猪肉香肠的蛋白质氧化及脂肪酸败,还可改善产品的感官品质。赵艳红^[38]为筛选具备高抗氧化活性的乳酸菌,研究从传统风干肉制品中分离所得的6株乳酸菌的抗氧化特性及发酵特性,发现瑞士乳杆菌(*Lactobacillus helveticus*) TR1-1-3和ZF22耐受过氧化氢能力突出、自由基清除能力及抗氧化酶活性最强,具有良好的抗氧化特性。以上研究表明,发酵肉制品中的乳酸菌具有抗氧化性,可以抑制脂肪和蛋白质的氧化,提高产品风味和感官品质。

为明确乳酸菌的抗氧化机制,近些年有学者做了相关研究。Zhang Huan等^[39]利用代谢组学技术研究氧胁迫下戊糖片球菌R1的抗氧化机制,发现氧化应激1h后,菌体活性氧水平和抗氧化酶活性显著升高。不同的处理手段,如应用不同浓度的H₂O₂、应用乳酸调节不同的pH值都可以激发菌体自身的抗氧化防御机制,实现抗氧化作用^[40-41]。除此之外,添加一些天然物质,如迷迭香提取物^[42]以及甘氨酸和谷氨酸^[43]均可以起到协同抗氧化作用。除上述方式外,乳酸菌还可以通过螯合金属离子缓解脂质过氧化;通过调节宿主细胞的抗氧化防御系统;通过调节宿主细胞与抗氧化相关的信号通路来实现抗氧化作用^[44]。综上所述,乳酸菌具有抗氧化酶活性、具备抗氧化防御机制,能够抑制脂肪和蛋白质的氧化,是发酵肉制品中常用的优势发酵剂,但乳酸菌是否具备缓解体内氧化应激的能力及水平还需要更多研究。

4 乳酸菌降低发酵肉制品中生物胺生成量

生物胺是一类存在于某些特定食品中由前体氨基酸经微生物的氨基酸脱羧酶脱羧后形成具有芳香族(腐胺、尸胺、精胺、亚精胺)、脂肪族(β -苯乙胺、酪胺)及杂环结构(色胺、组胺等)的有机碱^[45-47]。生物胺在一定范围内具有促进生长、增强代谢、提高免疫力及清除自由基等作用;但若摄入过量则会引起很多不良反应,如头疼、呼吸紊乱、心悸、血管扩张、腹泻,甚至会造成机体中毒^[48-49]。李素等^[50]以猪肉风干肠为研究对象,通过筛选、鉴定与研究产生物胺的微生物,以期生物胺的防控提供理论依据。研究发现,大肠杆菌主要产色胺、苯乙胺、腐胺、尸胺和酪胺,克氏耶尔森菌主要产腐胺和酪胺。Dong Chunhui等^[51]研究哈尔滨风干肠酪氨酸脱羧酶阴性菌株对食源性病原菌生长和酪胺产量的影响,发现表皮葡萄球菌、沙克乳杆菌和弯曲乳杆菌可用于哈尔滨风干肠发酵和控制酪胺生产的下游研究。Sun Qinxu等^[52]评估木糖葡萄球菌和植物乳杆菌复合发酵剂(CS)结合真空包装(vacuum packaging, VP)对哈

尔滨风干香肠在4℃贮存期间生物胺的积累及其品质特性的影响,发现单独使用CS或VP皆可抑制生物胺形成,但2种方法的结合(VP+CS)则可以更有效地抑制生物胺积累。孙钦秀等^[53]研究接种植物乳杆菌、弯曲乳杆菌、发酵乳杆菌和木糖葡萄球菌对风干肠发酵过程中生物胺形成的抑制作用,发现可以显著降低生物胺(酪胺、腐胺、尸胺、组胺、2-苯乙胺和色胺)积累的菌株为植物乳杆菌和木糖葡萄球菌。添加乳酸菌发酵剂可使产品pH值快速下降,抑制具有氨基酸脱羧能力的微生物生长,从而防止发酵肉制品中生物胺的积累。此外,乳酸菌发酵剂可以在整个成熟和贮存过程中与本土的非发酵剂微生物菌群竞争,从而减少生物胺的产生。通常来说,生物胺的产生难以杜绝或抑制,是发酵肉制品食品安全控制领域的研究重点。因此,明确生物胺的形成途径,并选择恰当的发酵剂和处理方法来降低发酵肉中生物胺含量尤为重要。

5 乳酸菌抑制发酵肉制品中亚硝胺积累

亚硝酸盐作为一种添加剂因其具有发色、防腐、改善肉制品风味等作用而被应用于肉制品中^[54]。然而,硝酸盐和亚硝酸盐在腌制或发酵过程中会生成亚硝胺,该物质不稳定,食用过多会引起中毒^[55]。亚硝胺是一种致癌性极强的化合物,流行病学研究发现,亚硝胺与人类的诸多癌症,如肺癌、膀胱癌等都有关^[56]。因此,研究如何控制亚硝胺引发的安全问题是肉制品研究的重点领域。

目前,我国研究较多的方式是采用天然植物提取物来降低亚硝胺的生成量^[57],但也有相关学者发现添加乳酸菌发酵剂也可以起到降低亚硝胺生成量的作用。李木子^[58]在模拟体系中筛选具有降亚硝胺能力的微生物菌株,发现弯曲乳杆菌、戊糖乳杆菌(*Lactobacillus spentosus*)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)和清酒乳杆菌对大多数亚硝胺有显著的降解作用($P<0.05$)。Sun Fangda等^[59]评估戊糖乳杆菌、弯曲乳杆菌和清酒乳杆菌对哈尔滨风干肠中N-亚硝胺形成的抑制以及对其品质特性的影响。检测得到4种类型的N-亚硝胺,分别为N-亚硝基二乙胺、N-亚硝基二丙胺、N-亚硝基二苯胺和N-亚硝基吡啶;弯曲乳杆菌对以上4种N-亚硝胺都有很高的抑制作用,而戊糖乳杆菌只对N-亚硝基二丙胺和N-亚硝基二苯胺有抑制作用。胡蝶等^[60]研究发现,弯曲乳杆菌具备较佳的降亚硝酸盐能力。王淑梅等^[61]发现,干酪乳杆菌SB27可降低N-二甲基亚硝胺、N-二乙基亚硝胺、N-亚硝基吡咯烷及N-亚硝基吡啶对大鼠肠道黏膜细胞IEC-6的毒性损伤。由此可知,乳酸菌具备降解亚硝酸盐的能力,可以改善风干肠品质特性并抑制

N-亚硝胺的积累。但发酵肉制品的品质受到温度、水分活度、酸碱度、菌群竞争等多重栅栏因子的影响,在应用乳酸菌替代亚硝酸盐降低亚硝胺生成量时要综合考虑影响发酵肉制品的栅栏因子。

6 乳酸菌赋予发酵肉制品健康功能

乳酸菌常被当作功能性发酵剂用于发酵肉制品的生产。在由乳酸菌为主要发酵菌株的发酵肉制品中可以分离得到一些具有特殊功效的多肽,如抗菌多肽^[62]、抗氧化多肽^[63]、具有保肝活性多肽^[64]等,使发酵肉制品具备一定的健康功能。Han Qi等^[65]评估从哈尔滨风干肠中分离的戊糖片球菌R1、短乳杆菌R4、弯曲乳杆菌R5和发酵乳杆菌R6的益生菌特性,与来自发酵乳制品的益生菌(包括嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌、弯曲乳杆菌、清酒乳杆菌、戊糖乳杆菌和发酵乳杆菌)进行体外比较,发现除弯曲乳杆菌R5外,其余菌株都对人类胃肠道有良好的耐受性,乳酸菌的自聚集率和黏附率差别很大,其中短乳杆菌R4表现出最大的聚集和黏附。由此可知,从哈尔滨风干肠中分离出来的乳酸菌具有很强的益生菌特性。乳酸菌是一种常见的肠道益生菌,可以产生抑菌物质乳酸和过氧化氢抑制肠道内病原微生物的生长,在调节宿主肠道防御方面发挥着相当重要的作用^[66]。发酵肉制品在添加乳酸菌发酵剂后,经发酵会产生大量的乳酸,体系呈酸性环境。原料肉中的营养成分(如蛋白质和脂肪等)在此环境中会发生一系列的物理、化学和生物反应,生成更多的游离氨基酸和脂肪酸,同时提高蛋白质的消化率^[67]。乳酸菌可以改善机体内血清血脂的平衡,可以使人体内胆固醇含量下降,还可以促进免疫系统的活性。乳酸菌及其代谢产物通过诱导机体发生免疫应答并参与调节机体对有害抗原的免疫应答,从而达到增强机体免疫力的目的^[68]。基于乳酸菌自身的功能特性以及在发酵过程中产生的代谢产物强化了发酵肉制品的功能特性,故功能性乳酸菌菌株的筛选、功能性成分的分离与鉴定将成为今后肉制品加工科学研究的一个重要方向,发酵也将成为赋予及强化肉制品健康功能的有效手段。

7 结 语

发酵肉制品种类丰富、具备独特的风味、较高的营养价值使其越来越受到消费者的喜爱,但因其含有丰富的蛋白质、脂肪等而使其面临外源微生物污染、氧化酸败、生物胺和亚硝胺等食品安全问题,影响产品风味、品质及安全。乳酸菌因其自身的特性及其在发酵过程中的多重功效被广泛应用于发酵肉制品中。乳酸菌不仅具

备抑菌、改善风味、抗氧化、降低生物胺生成量、抑制亚硝胺积累作用,还具备益生菌功效,可增强发酵肉制品的健康功能。因此,可以采用乳酸菌或是采用乳酸菌联合其他优势发酵菌株制备发酵肉制品。还可以利用先进的基因工程、蛋白质工程等生物技术手段对目标乳酸菌菌种进行基因组的定向诱变,或通过转基因技术进行改造,定向选育适用于发酵肉制品的菌株,以达到具备较高水平的益生菌特性、发酵特性及营养特性等。另外,发酵肉制品的加工工艺、成熟与贮藏方式等均影响产品的品质,为更好地保障发酵肉制品品质及风味,还需要对菌株与影响品质特性因素的相关机理进行深入研究,最终实现乳酸菌对发酵肉制品品质调控的精准性,推动发酵肉制品加工业的发展。

参考文献:

- [1] 张根生, 潘雷, 岳晓霞, 等. 发酵肉制品加工过程中风味物质形成和影响因素研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(1): 200-205. DOI:10.3969/j.issn. 1000-9973.2022.01.039.
- [2] 王英. 抗氧化益生乳酸菌的筛选、抗氧化作用机制及应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2016: 17-18.
- [3] 杨慧轩, 罗欣, 梁荣蓉, 等. 乳酸菌作为生物抑菌剂在肉与肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 317-325. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201215-185.
- [4] 李思源, 沙坤, 孙宝忠, 等. 功能性微生物在发酵肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(12): 56-60. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191009-237.
- [5] STILES M E, HOLZAPFEL W H. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy[J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 36(1): 1-29. DOI:10.1016/S0168-1605(96)01233-0.
- [6] 裴正钰. 具有抑菌活性乳酸菌的筛选及其在发酵香肠中的应用[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2022: 11-14.
- [7] WANG X H, REN H Y, LIU D Y, et al. Effects of inoculating *Lactobacillus sakei* starter cultures on the microbiological quality and nitrite depletion of Chinese fermented sausages[J]. Food Control, 2013, 32(2): 591-596. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.01.050.
- [8] PADHI S, SHARMA S, SAHOO D, et al. Potential of lactic acid bacteria as starter cultures for food fermentation and as producers of biochemicals for value addition[M]//RAY R C, PARAMITHIOTIS S, DE CARVALHO AZEVEDO V A. Lactic acid bacteria in food biotechnology. Elsevier, 2022: 281-304. DOI:10.1016/B978-0-323-89875-1.00009-2.
- [9] 汪冬冬, 唐垚, 伍亚龙, 等. 泡菜细菌多样性和风味成分研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 296-302. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028083.
- [10] SWETWIWATHANA 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: 101-105. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.05.030.
- [11] ERDOĞMUŞ S F, ERIŞİMİŞ U C, UĞUZ C. Isolation and identification of lactic acid bacteria from fermented meat products and evaluation of their antimicrobial effect[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2021, 39(4): 289-296. DOI:10.17221/222/2020-CJFS.
- [12] CASABURI A, DI MARTINO V, FERRANTI P, et al. Technological properties and bacteriocins production by *Lactobacillus curvatus* 54M16 and its use as starter culture for fermented sausage manufacture[J]. Food Control, 2016, 59: 31-45. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.05.016.
- [13] CHEN Ou, HONG Yang, MA Jiahong, et al. Screening lactic acid bacteria from pickle and cured meat as biocontrol agents of *Penicillium digitatum* on citrus fruit[J]. Biological Control, 2021, 158: 104606. DOI:10.1016/j.biocontrol.2021.104606.
- [14] ZHU Yinglian, YANG Qingli. Isolation of antibacterial, nitrosylmyoglobin forming lactic acid bacteria and their potential use in meat processing[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1315. DOI:10.3389/fmicb.2020.01315.
- [15] 赵冬兵. 发酵肉中产细菌素乳酸菌的筛选鉴定及细菌素的分离纯化和特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017: 3-4.
- [16] 梁红敏. 发酵香肠中高产细菌素乳酸菌的筛选鉴定及发酵条件研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2013: 9-10.
- [17] 龙强, 聂乾忠, 刘成国. 发酵香肠研究进展及展望[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 291-298. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713047.
- [18] MAKSIMOVIC A Z, ZUNABOVIC-PICHLER M, KOS I, et al. Microbiological hazards and potential of spontaneously fermented game meat sausages: a focus on lactic acid bacteria diversity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 418-426. DOI:10.1016/j.lwt.2017.11.017.
- [19] YOUNG N W G, O'SULLIVAN G R. The influence of ingredients on product stability and shelf life[M]//DAVID K, PERSIS S. Food and beverage stability and shelf life. Woodhead Publishing, 2011: 132-183. DOI:10.1533/9780857092540.1.132.
- [20] EL HADI M A M, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. Molecules, 2013, 18(7): 8200-8229. DOI:10.3390/molecules18078200.
- [21] DIEZ-SIMON C, MUMM R, HALL R D. Mass spectrometry-based metabolomics of volatiles as a new tool for understanding aroma and flavour chemistry in processed food products[J]. Metabolomics, 2019, 15(3): 1-20. DOI:10.1007/s11306-019-1493-6.
- [22] SMID E J, KLEEREBEZEM M. Production of aroma compounds in lactic fermentations[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2014, 5: 313-326. DOI:10.1146/annurev-food-030713-092339.
- [23] DEVANTHI P V P, GKATZIONIS K. Soy sauce fermentation: microorganisms, aroma formation, and process modification[J]. Food Research International, 2019, 120: 364-374. DOI:10.1016/j.foodres.2019.03.010.
- [24] HU Yingying, TIAN Yuan, ZHU Jiamin, et al. Technological characterization and flavor-producing potential of lactic acid bacteria isolated from traditional dry fermented sausages in northeast China[J]. Food Microbiology, 2022, 106: 104059. DOI:10.1016/j.fm.2022.104059.
- [25] MEI Lin, PAN Dongmei, GUO Tingting, et al. Role of *Lactobacillus plantarum* with antioxidation properties on Chinese sausages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 162: 113427. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113427.
- [26] HU Yingying, LI Yongjie, ZHU Jiamin, et al. Improving the taste profile of reduced-salt dry sausage by inoculating different lactic acid bacteria[J]. Food Research International, 2021, 145: 110391. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110391.
- [27] HUAN Yanjun, ZHOU Guanghong, ZHAO Gaiming, et al. Changes in flavor compounds of dry-cured Chinese Jinhua ham during processing[J]. Meat Science, 2005, 71(2): 291-299. DOI:10.1016/j.meatsci.2005.03.025.
- [28] 陈倩, 韩齐, 孔保华, 等. 乳酸菌对发酵肉制品中肌肉蛋白降解作用的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 279-284. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201409055.
- [29] MURTAZA M A, UR-REHMAN S, ANJUM F M, et al. Cheddar cheese ripening and flavor characterization: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(10): 1309-1321. DOI:10.1080/10408398.2011.634531.
- [30] DU Sha, CHENG Huan, MA Jinkui, et al. Effect of starter culture on microbiological, physiochemical and nutrition quality of Xiangxi sausage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 811-823. DOI:10.1007/s13197-018-3541-z.
- [31] XIAO Yaqing, LIU Yingnan, CHEN Conggui, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus xylosus* on flavour

- development and bacterial communities in Chinese dry fermented sausages[J]. Food Research International, 2020, 135: 109247. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109247.
- [32] HU Yingying, ZHANG Lang, WEN Rongxin, et al. Role of lactic acid bacteria in flavor development in traditional Chinese fermented foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(10): 2741-2755. DOI:10.1080/10408398.2020.1858269.
- [33] 刁小琴, 王莹, 贾瑞鑫, 等. 动物性脂肪对肉品风味影响机制研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(3): 45-51. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20211206-235.
- [34] 刘英丽, 于青林, 万真, 等. 发酵剂抗氧化活性对发酵肉制品品质的影响研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 302-312. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200704-052.
- [35] LIN M Y, YEN C L. Antioxidative ability of lactic acid bacteria[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(4): 1460-1466. DOI:10.1021/jf9811491.
- [36] 曹辰辰, 冯美琴, 孙健, 等. 功能性发酵剂对发酵香肠氧化稳定性及挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 106-113. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190513-129.
- [37] 卢涵, 张香美, 彭澎, 等. 混合发酵剂对发酵香肠脂肪酸败和蛋白质氧化的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(9): 1552-1560. DOI:10.7606/j.issn.1004-1389.2019.09.022.
- [38] 赵艳红. 乳酸菌抗氧化功能特性研究及其在羊肉发酵香肠中的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 3-4.
- [39] ZHANG Huan, LIU Jinming, WEN Ronxin, et al. Metabolomics profiling reveals defense strategies of *Pediococcus pentosaceus* R1 isolated from Harbin dry sausages under oxidative stress[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110041. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110041.
- [40] ZHANG Huan, XU Jianhang, CHEN Qian, et al. Physiological, morphological and antioxidant responses of *Pediococcus pentosaceus* R1 and *Lactobacillus fermentum* R6 isolated from Harbin dry sausages to oxidative stress[J]. Foods, 2021, 10(6): 1203. DOI:10.3390/foods10061203.
- [41] ZHANG Huan, KONG Baohua, LIU Haotian, et al. Physiology and antioxidant activity of *Pediococcus pentosaceus* R1 and *Lactobacillus fermentum* R6 in response to lactic acid stress[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111878. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111878.
- [42] 姜蕾, 康大成, 张万刚, 等. 迷迭香提取物在体外和萨拉米中的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2018, 39(13): 68-73. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201813011.
- [43] ZHANG Huan, WANG Zhi, LI Zhiwei, et al. L-Glycine and L-glutamic acid protect *Pediococcus pentosaceus* R1 against oxidative damage induced by hydrogen peroxide[J]. Food Microbiology, 2022, 101: 103897. DOI:10.1016/j.fm.2021.103897.
- [44] 董晨阳, 张红星, 贾宇, 等. 唾液乳杆菌M18-6体外抗氧化功能评价及其机制探讨[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 132-137. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023705.
- [45] 景智波, 田建军, 杨明阳, 等. 食品中与生物胺形成相关的微生物菌群及其控制技术进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 262-268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815038.
- [46] 徐龙, 张邦建, 韩永霞, 等. 发酵剂对发酵牛肉干菌群结构及生物胺组成的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 117-124. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2020.11.019.
- [47] LARANJO M, POTES M E, ELIAS M. Role of starter cultures on the safety of fermented meat products[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 853. DOI:10.3389/fmicb.2019.00853.
- [48] 梁蕊芳, 张邦建, 高丽霞, 等. 复合发酵剂对发酵牛肉干理化品质及安全性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 43-49. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020050370.
- [49] TABANELLI G. Biogenic amines and food quality: emerging challenges and public health concerns[J]. Foods, 2020, 9(7): 859. DOI:10.3390/foods9070859.
- [50] 李素, 赵冰, 张顺亮, 等. 风干肠中产生生物胺细菌的筛选鉴定及其产胺特性[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 257-263. DOI:10.16429/j.1009-7848.2018.01.033.
- [51] DONG Chunhui, DU Xin, ZHONG Qiang, et al. Effects of tyrosine decarboxylase negative strains from Harbin dry sausage on the growth and tyramine production of foodborne pathogens[J]. Food Control, 2021, 121: 107600. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107600.
- [52] SUN Qinxu, SUN Fangda, ZHENG Dongmei, et al. Complex starter culture combined with vacuum packaging reduces biogenic amine formation and delays the quality deterioration of dry sausage during storage[J]. Food Control, 2019, 100: 58-66. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.01.008.
- [53] 孙钦秀, 张潮, 赵欣欣, 等. 接种发酵剂对哈尔滨风干肠中生物胺形成的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 199-205. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.02.025.
- [54] 刘雨萱, 黄晓红, 徐晔, 等. 肉制品中N-亚硝胺的危害、形成机制及乳酸菌对其控制效果的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 283-289. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023785.
- [55] 张根生, 韩冰. 食品加工单元操作原理[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 265-266.
- [56] SONG Peng, WU Lei, GUAN Wenxia. Dietary nitrates, nitrites, and nitrosamines intake and the risk of gastric cancer: a meta-analysis[J]. Nutrients, 2015, 7(12): 9872-9895. DOI:10.3390/nu7125505.
- [57] 颜廷旋, 余霞, 邹莉芳, 等. 药食同源植物提取物对肉制品品质影响研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(11): 57-63. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210528-158.
- [58] 李木子. 微生物发酵技术降低风干肠中亚硝胺的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 8-9.
- [59] SUN Fangda, KONG Baohua, CHEN Qian, et al. N-nitrosoamine inhibition and quality preservation of Harbin dry sausages by inoculated with *Lactobacillus pentosus*, *Lactobacillus curvatus* and *Lactobacillus sake*[J]. Food Control, 2017, 73: 1514-1521. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.11.018.
- [60] 胡蝶, 赵鑫, 张素平, 等. 降解亚硝酸盐乳酸菌的筛选鉴定及发酵特性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(6): 1-4; 9. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2022.06.001.
- [61] 王淑梅, 邸维, 于佳, 等. 干酪乳杆菌SB27降低N-亚硝胺对IEC-6细胞毒性作用研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 54-58. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2022.04.009.
- [62] 邢路娟, 曹松敏, 郑锦晓, 等. 宣威火腿中抗菌肽的分离、纯化及鉴定[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 46-52. DOI:10.3969/j.issn.2095X002.2019.06.007.
- [63] 吴慧琳, 李苗云, 朱瑶迪, 等. 酶解发酵肉制备抗氧化肽的工艺优化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 173-183; 297. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.1257.
- [64] NIE Wen, ZHOU Kai, WANG Ying, et al. Isolation and identification of bioactive peptides from Xuanwei ham that rescue oxidative stress damage induced by alcohol in HHL-5 hepatocytes[J]. Food and Function, 2020, 11(11): 9710-9720. DOI:10.1039/D0FO02329A.
- [65] HAN Qi, KONG Baohua, CHEN Qian, et al. *In vitro* comparison of probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from Harbin dry sausages and selected probiotics[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 391-400. DOI:10.1016/j.jff.2017.03.020.
- [66] 陈梓琦, 汪彩云, 李紫宁, 等. 乳酸菌的生长特性及其功能性质与应用综述[J]. 农产品加工, 2020(12): 80-83. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.06.054.
- [67] 李湘丽, 袁廷香, 闫吉美. 乳酸菌在发酵香肠生产过程中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 233-237. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2014.06.056.
- [68] 曹振辉, 刘永仕, 潘洪彬, 等. 乳酸菌的益生功能及作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 366-370; 377. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.24.072.