

发酵香肠研究进展及展望

龙 强, 聂乾忠*, 刘成国
(湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 发酵香肠分布广、产量大, 是发酵肉制品的典型代表, 且因其独特的风味深受人们喜爱。近些年来, 安全、感官及健康品质的提升已成为发酵香肠研究的核心内容, 而发酵剂、工艺改进以及低脂低盐化等是其品质提升的重要举措。本文主要就发酵香肠在功能性发酵剂、复配发酵剂、酶、新工艺技术、低脂低盐化策略等方面的研究进行概述, 并对其未来研究进行展望, 以期为发酵香肠研究提供一定的参考。

关键词: 发酵香肠; 发酵剂; 工艺改进; 低脂低盐

Fermented Sausage: Recent Progress and Prospects

LONG Qiang, NIE Qianzhong*, LIU Chengguo
(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Fermented sausage is a typical representative of fermented meat products due to its widespread distribution and high output. The product is popular with consumers due to its unique flavor. In recent years, improving the safety, sensory quality and health benefits of fermented sausage has become the core of research, while starter culture, processing parameters improvement, and the development of low-fat and low-salt fermented sausage can provide important strategies to improve the quality of fermented sausage. In this paper, we review recent studies focused on functional starter cultures, starter culture combinations, enzymes and new technologies in the production of fermented sausage and the development of new low-fat and low-salt products, and we also discuss the prospects for future research, which will provide a reference for research on fermented sausage.

Key words: fermented sausage; starter culture; processing parameters improvement; low-fat and low-salt

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713047

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2017)13-0291-08

引文格式:

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. <http://www.spkx.net.cn>

LONG Qiang, NIE Qianzhong, LIU Chengguo. Fermented sausage: recent progress and prospects[J]. Food Science, 2017, 38(13): 291-298. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713047. <http://www.spkx.net.cn>

发酵香肠是指碎肉和丁状脂肪同盐、糖、发酵剂或香辛料等混合灌入肠衣后, 经微生物发酵及干燥成熟, 发生一系列复杂理化变化而加工成的一类肉制品。作为发酵肉制品的典型代表, 其不仅产量高, 而且普及度高。几乎每个国家都有自己的传统特色发酵香肠, 如意大利有Salami香肠、德国有Dauerwurst香肠、西班牙有Charqui香肠、葡萄牙有Chouriço de vinho香肠, 在我国则有腊肠、风干肠等。这些传统发酵香肠风味独特、营养丰富, 安全性较高, 深受特定人群喜爱。但美中不足的是: 传统发酵香肠生产周期长、品质不统一、存在致

病菌、生物胺等安全隐患。不过, 随着技术进步, 欧美发达国家一些传统发酵香肠已实现规模化、标准化的工厂化生产, 缩短了生产周期, 统一并提升了产品品质。但是, 致病菌、生物胺等潜在安全隐患仍是这些工业化发酵香肠面临的主要问题, 甚至工业化后产品还出现了过酸或风味单一的新问题。此外, 随着人们“吃得健康, 吃得有益健康”的意识越来越强烈, 发酵香肠的高脂高盐等健康问题以及益生诉求日益受到人们的关注和重视。因此, 低脂低盐化、赋予发酵香肠益生性成了发酵香肠的新任务与新挑战。迄今, 围绕发酵香肠的这些

收稿日期: 2016-06-11

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303082)

作者简介: 龙强(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品生物技术及安全。E-mail: 841394929@qq.com

*通信作者: 聂乾忠(1962—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为动物源食品加工。E-mail: ndnieqianzhong@126.com

传统或新兴的问题与挑战, 研究人员展开了广泛的研究工作。特别是纯种发酵剂首次应用以来, 发酵剂成为了这些问题与挑战的重要解决手段, 同时也成为了发酵香肠研究的核心内容。与此同时, 工艺改进、产品健康化等也与发酵剂应用相辅相成, 成为共同应对上述问题与挑战的重要策略。因此, 本文着重从发酵剂、工艺改进及低脂低盐化方面对发酵香肠研究的热点及进展进行综述, 以为发酵香肠研究提供一定的参考。

1 发酵香肠概述

发酵香肠历史悠久, 大约2 000多年前, 地中海地区的古罗马人便知道用碎肉加盐、糖和香辛料等经自然发酵、风干成熟制作成美味可口的香肠^[1-2]。但此后很长一时间内, 其发展缓慢, 甚至从区域性产品发展成为国际性产品也有100多年的历史^[3]。不过, Jensen和Paddock在发酵香肠生产中对纯培养微生物的首次应用成为其由传统制作模式进入到现代化生产模式的重要里程碑。此后, 在发酵剂的广泛应用及控制发酵等技术的普及的推动下^[2-3], 发酵香肠发展迅速, 并逐步进入到规模化、标准化、高效化的现代化生产模式。如今, 发酵香肠已发展成为发酵肉制品中产量最大的一类, 遍布世界各地。与此同时, 其品种也日益多样化, 在原料肉类型、成分种类与数量、尺寸大小及成熟条件等方面都呈现出较大的多样性。由于品种多样, 发酵香肠至今也没有正式且统一的分类标准和方法, 常见的分类方法如表1所示。

表1 发酵香肠常见分类方法

Table 1 Classification of fermented sausage

分类依据	类别名称	产品特点	产品举例
脱水程度	半干发酵香肠	水分含量>40%	图林根香肠、夏季香肠
	干发酵香肠	水分含量<40%	萨拉米香肠、加红辣椒的猪肉干香肠
发酵程度	低酸发酵香肠	pH≥5.5	法国、意大利、匈牙利的萨拉米香肠
	高酸发酵香肠	pH<5.4	夏季香肠
产地	意式香肠	低酸、低水分含量	米兰萨拉米、那不勒斯萨拉米
	德式香肠	口味相对较酸, 水分含量较高	Dauerwurst
	美式香肠	高酸发酵, 水分含量较高	夏季香肠
	中式香肠等	自然风干, 低水分低酸	哈尔滨红肠、川味腊肠、广味腊肠等

2 发酵剂研究

发酵剂是含有能在发酵基质中发挥理想代谢活性的活的或休眠状态的微生物制剂^[4], 而能在香肠等肉制品中发挥理想代谢活性的微生物制剂即肉品发酵剂。常见的肉品发酵剂微生物主要是乳酸菌、凝固酶阴性球菌、酵母菌及霉菌的一些菌株, 它们在原料肉中的代谢活动对于发酵香肠独特品质的形成具有重要意义。自发酵剂微生物首次应用于香肠生产以来, 针对这些发酵剂微生物

的研究便一直是发酵香肠等发酵肉制品研究的核心。当前, 对于肉品发酵剂的研究主要集中在功能性发酵剂与复配发酵剂方面, 且向功能性以及多菌种复配发展已成为必然趋势。

2.1 功能性发酵剂

功能性发酵剂即具备产良好风味、促进安全或益生性等优势的发酵剂^[5]。当前, 功能性发酵剂研究主要围绕乳酸菌、凝固酶阴性球菌、酵母菌展开。它们或具有产良好风味特性, 或具有促进安全特性乃至益生等功能特性, 如表2所示。

表2 乳酸菌、凝固酶阴性球菌及酵母菌的主要功能特性及菌株

Table 2 Major functional characteristics of recently isolated strains of lactic acid bacteria, coagulase-negative *Staphylococcus aureus* and yeast

菌株类型	潜在功能特性	菌株举例	菌株来源	参考文献
产细菌素		戊糖乳杆菌31-1;	云南宣威火腿	[6]
		戊糖片球菌BCC 3772;	发酵香肠Nham	[7]
		赫伦魏斯氏菌D1501	侗族酸肉	[8]
降生物胺		鼠李糖乳杆菌、戊糖片球菌、植物乳杆菌	新疆重马肠	[9]
		植物乳杆菌ZY-40;	传统鱼制品	[10]
		植物乳杆菌BCC9546	泰国BCC菌种保藏中心	[11]
乳酸菌	益生性	干酪或副干乳杆菌CTC1677、CTC1678以及鼠李糖乳杆菌CTC1679;	健康婴儿粪便;	[12]
		干酪乳杆菌LOCK 0900;	健康婴儿粪便;	[13]
		植物乳杆菌MF1291、MF1298以及戊糖乳杆菌MF1300	发酵肉制品	[14]
产良好风味		清酒乳杆菌TMW 1.1322、TMW 1.1383、TMW 1.1393;	前者为清酒乳杆菌23K的克隆, 后者来自干发酵香肠;	[15]
		戊糖片球菌、短乳杆菌、弯曲乳杆菌、发酵乳杆菌	哈尔滨风干肠	[16]
产良好风味		肉葡萄球菌833和木糖葡萄球菌873、831及16;	前二者来自干发酵香肠, 后者来自干酪;	[17]
		木糖葡萄球菌S18和缓慢葡萄球菌S44;	风干肠;	[18]
凝固酶阴性球菌		模仿葡萄球菌S52	湖南腊肉;	[19]
		木糖葡萄球菌S81、S206、S79、S90、S142;	意大利萨拉米香肠;	[20]
降生物胺		表皮葡萄球菌、模仿葡萄球菌	传统中式香肠	[21]
		汉逊德巴利酵母、Deformans假丝酵母、涎沫假丝酵母;	干腌肉制品Iacon;	[22]
酵母菌	产良好风味	汉氏德巴利酵母M4和P2	自然发酵香肠	[23]
		降生物胺	奥默柯达酵母	鱼露

2.1.1 功能性乳酸菌发酵剂

乳酸菌是发酵香肠的优势菌, 同时也是肉品发酵剂研究的热门微生物。常用肉品发酵剂乳酸菌主要是植物乳杆菌、清酒乳杆菌、弯曲乳杆菌、戊糖乳杆菌、干酪乳杆菌、食品乳杆菌、戊糖片球菌、乳酸片球菌等。这些乳酸菌最为人熟知的特性是所产乳酸降低pH值, 从而提升发酵香肠的安全性。不过, 一些乳酸菌菌株还具有产细菌素等抗菌物质的功能特性, 如表2所示。利用这些菌株可实现对发酵香肠中李斯特氏菌等致病菌的有效控制, 从而确保发酵香肠的微生物安全。如: Kingcha等^[7]研究发现产细菌素PA-1/AcH的戊糖片球菌BCC 3772能够

有效抑制Nham中的单核细胞增生李斯特菌；Gao Yurong等^[25]研究发现产Sakacin C2的清酒乳杆菌C2可在发酵香肠中快速建立主导优势从而有效控制腐败菌与致病菌。除具有产细菌素的功能特性外，一些乳酸菌还具有降低发酵香肠中生物胺含量的功能特性，从而控制发酵香肠潜在安全风险。如：Baka等^[26]研究发现清酒乳杆菌能够显著抑制发酵香肠中生物胺的形成；Zhang Qilin等^[10]研究发现植物乳杆菌ZY-40可有效控制发酵鲢鱼香肠的生物胺。值得注意的是，乳酸菌所产细菌素对产生物胺杂菌的抑制也有利于降低产品的生物胺含量。由此可见，乳酸菌在保证发酵香肠安全性方面具有重要作用。不仅可通过产乳酸降pH值抑制致病菌、腐败菌，而且可通过产细菌素抑制致病菌、腐败菌及产生物胺杂菌或直接降低生物胺含量而促进发酵香肠的安全性。目前，对乳酸菌的这两种功能特性的挖掘研究较多。

然而，与乳酸菌促进安全的作用为人们所熟知形成鲜明对比的是：乳酸菌很少被认为是具有产良好风味作用的菌株。不过，近些年来，乳酸菌潜在产良好风味的特性已逐渐引起研究者的重视。如：Sinz等^[15]研究发现，清酒乳杆菌TMW 1.1322、TMW 1.1383及TMW 1.1393具有不同程度代谢某些氨基酸、多肽的能力；Chen Qian等^[16]研究了分离自哈尔滨风干肠的戊糖片球菌、短乳杆菌、弯曲乳杆菌及发酵乳杆菌在猪肌浆蛋白提取物中分解肌浆蛋白形成风味物质的潜力，结果发现这些乳酸菌能够分解肌浆蛋白形成风味物质及其前体，其中戊糖乳杆菌的分解能力最强，能够产生更多可溶肽和自由氨基酸。与葡萄球菌相比，虽然乳酸菌产相关风味代谢物的能力较弱，但其在终产品中占有绝对数量优势，对发酵香肠总体风味的贡献不容忽视。

此外，随着人们健康意识日益增强，具有益生特性的肉品发酵剂乳酸菌也渐受到人们的关注。当前，一些研究者已验证了具有潜在益生特性的菌株在发酵香肠中的应用潜力。如：Ruiz-Moyano等^[27]研究了来自伊比利亚干发酵香肠、人类粪便、猪肠道的乳酸菌耐低pH值、胆盐、胰液的能力，及在伊比利亚干发酵香肠加工条件下的生长能力，结果表明这些菌株大多具有用作该发酵香肠益生发酵剂的潜力；Yuksekdag等^[28]研究了5株分离自发酵香肠Sucuk的片球菌菌株的抗菌活性、抗生素抗性及其耐低pH值、耐胆盐的能力等，结果也表明这些菌株具有用作肉品益生菌发酵剂的潜力；Ruiz-Moyano等^[29]研究发现发酵乳杆菌HL57、乳酸片球菌SP979能够在终产品中保持较高的活菌数，从而使香肠益生菌数量达到益生菌功能性产品的要求。此外，一些研究者还致力于对益生菌进行分离筛选，主要是从传统发酵肉制品中分离筛选，以获得能够较好地适应肉品环境的益生性功能乳酸菌。

2.1.2 功能性凝固酶阴性球菌发酵剂

肉品发酵剂中常见的凝固酶阴性球菌为肉葡萄球菌、木糖葡萄球菌及变异微球菌，其中肉葡萄球菌和木

糖葡萄球菌是工业化产品最常用的发酵剂菌株，也是现有商业肉品发酵剂必不可少的菌株类型。许多研究表明这些凝固酶阴性球菌的主要功能特性是产良好风味，如表2所示，且其对风味的贡献主要归功于以下几种反应类型：糖发酵、氨基酸代谢、脂质氧化及酯酶催化反应^[30]。其中，氨基酸代谢在产良好风味中扮演的重要作用受到研究人员的高度关注，其产物被认为与干发酵香肠的独特风味形成有关。如：Montel等^[17]研究发现在模拟干香肠生产中肉葡萄球菌833和木糖葡萄球菌873、831及16可产生强烈的干萨拉米风味，且生化特性、挥发性化合物分析结果表明，这种强烈的风味与菌株分解支链氨基酸产生3-甲基正丁醛及相应的酸类与醇类有关。因此，代谢氨基酸特别是分解支链氨基酸如亮氨酸、异亮氨酸及缬氨酸生成相应的支链醛、酸及醇的能力成为评价球菌菌株产良好风味潜力的重要依据之一。到目前为止，研究者已从传统发酵肉制品中挖掘了一批具有较强代谢支链氨基酸能力的球菌菌株。如：王海燕等^[19]以菌株代谢亮氨酸生成3-甲基丁醛的能力为依据并结合肉品发酵剂的筛选原则，从传统湖南腊肉中筛选得到一株具有良好产风味能力的葡萄球菌S52，经鉴定为模仿葡萄球菌；温婷婷^[18]从风干肠中分离筛选得到两株产良好风味能力较强的菌株：木糖葡萄球菌S18和缓慢葡萄球菌S44。不过，研究表明，不同球菌菌株产良好风味的能力不同^[31]，且受环境因子如酸化程度以及配方组成的影响^[32]。因此，今后不仅要考虑菌株代谢支链氨基酸形成风味物质的能力，而且还要考虑菌株在特定发酵香肠环境中的产风味能力亦或优化其环境参数使其产风味能力最大化。正如前述，球菌对发酵香肠风味的贡献可归功于4种因素，因此产良好风味球菌的筛选也可从其在另外3种代谢过程中产特定风味物质的能力去考虑。这不仅可拓宽产良好风味球菌的筛选思路，而且在一定程度上也可以丰富功能性球菌的风味类型。

除产良好风味外，一些研究还表明凝固酶阴性球菌具有降低发酵香肠生物胺含量的特性。如：Martuscelli等^[20]研究表明，一些木糖葡萄球菌能够通过其生物胺氧化酶活性来降低发酵香肠中生物胺含量；邓红梅等^[21]从传统中式香肠中获得4株具有生物胺氧化酶活性的葡萄球菌菌株：1株表皮葡萄球菌和3株模仿葡萄球菌，具有降低发酵香肠中生物胺含量的潜力。因此，葡萄球菌不仅可作为产良好风味功能性发酵剂，而且某些菌株还具有降低生物胺含量的功能特性，可促进发酵香肠的安全性。此外，随着研究的深入，凝固酶阴性球菌必将会有更多的功能特性被陆续挖掘。

2.1.3 功能性酵母菌发酵剂

酵母菌是肉品发酵剂的重要微生物类型，具有一定改善香肠风味的潜力。但是，关于功能性酵母菌发酵剂的研究相对较少。不过，近年来酵母菌产良好风

味的功能特性逐渐受到研究者的关注。Andrade^[33]、Purrinos^[22]、Cano-Garcia^[23,34]等对酵母菌的产良好风味潜力进行了深入探讨。他们的研究表明,酵母菌特别是汉逊氏德巴利酵母菌具有较好的产良好风味特性,在改善、提升香肠风味亦或使香肠风味多样化上具有较好的应用前景,且主要通过抑制脂质氧化、延缓酸败和产生醇类、酮类、酯类等风味物质而赋予香肠良好风味。此外,一些研究者还就酵母菌在低脂或低盐化发酵香肠中的应用进行研究。如:Corral等^[35]研究了汉逊氏德巴利酵母在低脂或低盐化香肠中的作用,结果发现其可补偿由脂肪含量或盐含量降低而引起的风味不足,但当脂肪和盐含量同时降低时其没有起到明显改善低脂低盐香肠风味的作用。Corral等^[36]的另外一项研究还表明,汉逊氏德巴利酵母菌可通过提高源于氨基酸降解的风味物质含量及产酯而弥补盐或脂肪含量降低带来的风味缺陷,且赋予发酵香肠水果风味。同样地,当脂肪与盐含量同时降低时,酵母菌的这种弥补作用便失灵。因此,还需进一步阐明与风味形成有关的生化反应过程及这些过程与盐含量、脂肪含量降低对风味影响的交互作用,以更好地利用产良好风味酵母菌弥补脂肪和盐含量同时降低可能带来的风味不足。除具有产良好风味功能特性外,酵母菌菌株的降生物胺功能特性也有见报道,如:杨利昆等^[24]从自然发酵3个月的鱼露中,筛选得到10株具有生物胺降解活性的菌株,其中以M8菌株降解活性最高,对其测序并在线比对,初步确定为奥默柯达酵母。由上述可知,酵母菌所具有的功能特性主要还是产良好风味。当然,像降生物胺亦或其他功能特性还有待深入地从事酵母菌菌株中挖掘。

2.2 复配发酵剂

复配发酵剂是由不同发酵剂菌株复配而成的多菌种发酵剂。将其应用到发酵香肠生产中可弥补单一菌种发酵的单调性,发挥各菌种的优势特性,从而改善或提升产品品质。一方面,复配发酵剂的应用更有利于香肠风味物质的产生。如:Mangia等^[37]研究表明,植物乳杆菌与木糖葡萄球菌复配可提高发酵香肠自由氨基酸含量,从而为风味的形成提供更多的前体;雷华威等^[38]研究表明,魏斯菌和植物乳杆菌复配更有利于发酵香肠主体风味物质的形成,且可产生高含量的不饱和醛,赋予香肠独特的香气。此外,复配发酵剂还能缩短发酵周期,提高产品品质。朱迎春等^[39]研究表明复配发酵剂可明显缩短发酵及成熟时间。虽然发酵剂的应用都可生产出高品质产品,但在获得同等品质产品的目标下,复配发酵剂应用可缩短生产周期。另一方面,特定复配发酵剂有利于提升发酵香肠安全性,特别是在降解生物胺方面,已成为降低发酵香肠生物胺含量的一种重要措施。Mangia等^[37]研究发现弯曲乳杆菌和木糖葡萄球菌复配能够降低

成熟发酵香肠的生物胺含量,且产品的感官得分最高;Simion等^[40]研究表明,复配发酵剂清酒乳杆菌CECT5764+Equorum葡萄球菌SA25及清酒乳杆菌CECT5764+Equorum葡萄球菌SA25+嗜酸乳杆菌CECT903添加到香肠Dacia中能够显著降低其酪胺、腐胺、尸胺以及总生物胺含量;朱志远等^[41]研究表明,香肠乳杆菌和肉糖葡萄球菌以1:1的比例复配,可有效抑制色胺、腐胺、尸胺、组胺的生成,肠膜明串珠菌和肉糖葡萄球菌的1:1复配发酵剂可降低发酵香肠中2-苯乙胺和酪胺的含量。

当然,复配发酵剂的优势性远不止这些,关键在于复配菌株的选择。不同类型菌株的复配将会产生不同的效果,将前述功能性菌株进行复配,理论上可得到多功能的复配发酵剂。但是,并不是所有菌株都可以进行复配,菌株间的协同或拮抗作用应予以考虑。

3 发酵香肠工艺研究

发酵香肠生产具有悠久的历史,但长期依赖于家庭式制作、作坊式生产,处于手工艺状态。不过,纯种发酵剂的首次应用成为其由手工艺生产状态向工业化生产转变的重要转折点。此后,国内外研究者围绕发酵剂应用展开了一系列的工艺研究,如发酵温度、发酵湿度、发酵时间、发酵剂用量及配比、食盐添加量、碳水化合物的种类和用量、腌制时间等工艺参数的选择与优化^[2]。而这一系列的研究成为了发酵香肠由手工艺生产状态向工厂化、标准化、规范化、规模化的工业生产状态转变的强大推动力。目前,欧美国家的一些发酵香肠已实现工业化生产^[2-3]。但是,围绕发酵剂特别是新型功能性发酵剂、复配发酵剂应用的工艺研究,如功能特性良好发挥的最佳条件探索、复配发酵剂菌种组合和配比研究等,仍是发酵香肠工艺研究的主要任务。尤其是我国,在目前传统发酵肉制品工艺化水平较低的情况下,研究出合适的发酵剂应用工艺以生产出符合我国消费者口味的发酵香肠是非常必要的。此外,随着人们对酶在发酵香肠中所起作用的深入认识,酶的应用也渐成为发酵香肠工艺研究的焦点,并成为工艺改进的策略之一。许多研究发现,酶的应用给发酵香肠生产带来了显著的优势。如:Feng Li等^[42]将风味酶按不同用量水平添加到中式香肠中,结果发现风味酶能够加速自身蛋白水解、降低质构参数、降低水分活度、硫代巴比妥酸反应物含量、提高肽提取物抗氧化能力,且适量的风味酶的添加具有改善中式香肠可食性和贮藏稳定性的潜力;杨华等^[43]研究表明外源酶的添加可以缩短香肠的成熟期,且按脂肪酶0.002 2%、酸性蛋白酶0.001 1%、风味蛋白酶0.002 7%添加时,羊肉香肠的成熟期为21 d,明显缩短了40%;巫永华等^[44]研究发现,脂肪酶、酸性蛋白酶、风

味蛋白酶分别以0.05%、0.015%、0.015%添加量添加到发酵香肠中时,发酵香肠在第7天的自由氨基酸非蛋白氮含量就已高于对照组第28天的水平,且最终酵成熟时间为14 d,较对照组缩短50%。此外,硫代巴比妥酸和挥发性盐基氮含量都处于安全范围之内。但是,值得注意的是,酶制剂不能完全取代微生物发酵剂。一方面,发酵剂中的酶大部分为内源酶,很难从菌株中分离提取,另一方面,酶制剂不能拮抗病原菌^[45]。因此,只有将酶制剂与微生物发酵剂适当地相结合,才能更好地达到改进工艺、提高发酵香肠品质的目的。

此外,随着高压处理技术(high pressure processing, HPP)在肉制品加工中的逐步推广应用,其成为改进发酵香肠生产工艺、提升其品质的重要潜在手段。一些研究表明,HPP具有改善发酵香肠微生物安全性甚至降低其生物胺含量的重要作用^[46]。如:Omer等^[47]研究发现高压处理可降低干发酵香肠中的大肠杆菌数量,但是这种降低效果取决于香肠的配方;Ananou等^[48]研究表明,HPP与肠球菌素AS-48联合使用可以有效控制Fuet香肠的沙门氏菌,弥补了肠球菌素AS-48单独使用对沙门氏菌控制的不足;Simon-Sarkadi等^[49]研究表明HPP可以改善干发酵香肠的微生物质量,并可有效控制贮藏过程中生物胺的形成,不过其只对腐胺和尸胺形成产生有效抑制。此外,HPP还可延长低盐发酵香肠的货架期并改善其安全性^[46]。因此,HPP应用到发酵香肠工艺改进中具有重要意义。除HPP技术外,辐照技术在发酵香肠工艺改进中也渐受到重视。一些研究者将其用来辐照香肠,以提升其品质。如, Kim等^[50]以 γ 射线辐照Pepperoni香肠,发现辐照能够显著降低其贮藏期中生物胺含量;于海等^[51]研究表明,辐照可以抑制发酵香肠中脂肪的氧化,同时可增加发酵香肠中风味物质含量及种类的变化,4 kGy辐照的发酵香肠中氨基酸总量和风味物质的种类及含量明显增加。此外,一些其他的新兴食品加工技术如:臭氧、脉冲电磁场、脉冲紫外光、功率超声波、欧姆加热、微波加热处理等正逐步应用到肉制品加工行业中^[46],也势必会成为发酵香肠现代化生产工艺的新元素。

4 发酵香肠低脂低盐化研究

随着人们对饮食与健康关系的深入认识,发酵香肠的高脂、高盐等对健康不利因素日益受到人们关注,特别是高脂、高盐已成为发酵香肠食用人群忧心的主要健康问题。脂肪和盐(NaCl)是发酵香肠中两种重要的成分,前者对发酵香肠的质构、多汁性及风味具有重要影响,后者则在滋味及微生物安全等方面发挥重要作

用^[52]。但是,在发酵香肠中脂肪含量高达30%以上^[53],NaCl含量一般也在8%左右^[54]。如此高的脂肪及盐含量,势必会造成发酵香肠的喜食人群过量摄入,从而增加心血管疾病等非传染性疾病的发生风险。因此,低脂、低盐化成为发酵香肠的必然选择,并逐渐成为发酵香肠研究新趋势,受到研究者的高度重视。

低脂化即在保证发酵香肠品质的前提下,降低其脂肪含量。当前,降低发酵香肠脂肪含量的措施主要有:大豆蛋白等非肉类蛋白部分替代;菊粉、谷物或水果纤维等糖类部分替代;魔芋胶等植物胶体部分替代;植物油、鱼油等健康油脂部分替代。其中,健康油脂部分代替法在所有降脂方法中最具潜力,其不仅可以实现发酵香肠脂肪含量的降低,而且可以改善脂肪酸组成,提升必需脂肪酸含量。因此,健康油脂替代成为发酵香肠低脂化的最具潜力的选择,备受研究者青睐。如:Caceres等^[55]通过预乳化将富含 $n-3$ 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)的鱼油应用到西班牙Bologna型煮制香肠Mortadella中,提升了其 $n-3$ PUFA含量,并使 $n-6/n-3$ 比接近2,达到健康推荐水平;Josquin等^[56]以鱼油进行Dutch型发酵香肠的脂肪替代,结果发现干发酵香肠富含 $n-3$ 脂肪酸,且商业胶囊化鱼油能够使其保持总体品质。此外,一些研究者还将不同类型健康油脂进行组合,以更好地改善发酵香肠的脂肪酸组成,达到健康要求。如:Jiménez-Colmenero等^[57]通过健康油脂组合固定于魔芋胶中同时实现了干发酵香肠Chorizo的降脂及脂肪酸组成改善,其中脂肪含量低至99~130 g/kg,饱和脂肪酸含量降低,不饱和脂肪酸含量显著提升, $n-6/n-3$ 比例得到改善,但是显著降低了其感官参数。

同样地,低盐化也必须在保证发酵香肠品质的前提下进行实现。NaCl在发酵香肠中具有重要的功能,直接降低食盐的添加量是不可取的。当前,一些研究主要聚焦于以一些物化性质与NaCl相似的盐,如:氯化钾、乳酸钾、氯化钙、抗坏血酸钙等部分替代食盐,以达到降低发酵香肠钠盐含量的同时维持其品质特性。其中,氯化钾因其安全性及同NaCl相似的抗菌特性而成为研究最多的NaCl替代物^[58]。但当其对食盐的替代比过高时,其会给产品带来一定程度的苦味或金属味以及降低产品的盐味^[59],这在一定程度上也成为其完全取代食盐的主要限制因素。值得注意的是,同氯化钾一样,乳酸钾、氯化钙及抗坏血酸钙等也不能完全取代食盐,都会使得产品出现不同程度的缺陷。不过,这些潜在的替代物联合使用或与增味成分联合使用,对弥补其单独替代所给产品带来的缺陷具有一定的意义。如:Campagnol等^[59]研究发现0.313%的赖氨酸或氨基乙磺酸与肌苷酸二钠和鸟苷酸二钠的混合物可降低由氯化钾替代造成的感官缺陷。此外,Campagnol等^[60]还发现2%酵母提取物的添加可增

加源自于氨基酸和糖代谢的挥发性化合物的含量,从而对氯化钾带来的感官缺陷具有一定的弥补作用,在某种程度上可提升低盐产品的感官接受性;Choi等^[61]以30%的乳酸钾和10%抗坏血酸钙替代40%NaCl,结果发现所制作的法兰克福香肠与对照组具有相似的持水力、质构特性以及感官特性,其研究表明这两种NaCl替代物的复合使用,可在维持产品感官品质的前提下,降低NaCl含量;dos Santos等^[62]研究发现氯化钾或氯化钙部分替代可使发酵香肠的钠离子含量降低大约42%,提升了干发酵香肠健康程度,但其感官可接受性有所下降,不过以50%的氯化钾与氯化钙1:1的混合物替代的NaCl而获得的干发酵香肠具有潜在的消费市场。此外,改变食盐的物理结构开发出新型盐作为降低食盐用量的新策略,在降低发酵香肠钠盐含量上具有巨大潜力,甚至要远优于其他的盐类替代物的应用。食盐的晶粒大小和形状与其咸度有关,对其进行改变可实现咸味的增强从而减少其用量^[63-64]。不过,新型盐的相关研究尚未成熟,从理论到真正研发出新型盐还需更深入的研究。

5 结 语

发酵剂、工艺改进、低脂低盐化等措施在发酵香肠安全、感官及健康品质提升方面具有重要作用。但其应用仍面临一些有待解决的难题或挑战。其中,高效、合适的功能性发酵剂的快速获取便是当前面临的重要挑战。特别是我国,在本土特色发酵剂较为匮乏的背景下,快速获得合适的功能性发酵剂愈发迫切。不过,现代分子生物学技术为此提供了重要的思路 and 手段。其不仅可借助基因工程技术对发酵剂菌株进行分子水平改造,快速定向地获得功能性菌株,而且基因组学技术与传统微生物学技术的结合也可快速、针对性挖掘传统发酵肉制品中的功能性菌株。相比于直接分离法,这些借助于分子手段的方式具有高效、快速、目的性强等特点,必将成为今后功能性菌株重要的获取方法。获得功能性菌株后,随之而来的问题是如何对其进行复配。事实上,复配可以根据不同的目的进行。如:可针对我国一些传统发酵香肠现代化改造后存在口味偏酸或风味不足而难以适应实际消费情况的问题,借助产良好风味、产细菌素等菌株的复配以实现低酸发酵的同时强化产品风味及微生物安全性。不过,菌株间的拮抗或协同作用、菌株间配比优化问题不能忽视。

另外,工艺改进及低脂低盐化等措施可能导致的不利影响也是当前面临的重要问题。尤其是在低脂化过程中,食盐及脂肪含量降低对发酵香肠风味造成的不利影响已成为健康化措施的重要挑战。虽然研究者已通过食盐、脂肪替代物降低其影响,但也很难保持传统产品的

独特风味。而与产良好风味酵母菌株的联合应用已成为弥补这种风味缺陷的一种协同措施。此外,酶、辐照及其他新工艺元素也具有弥补这种风味缺陷的潜力,可与低脂低盐化措施联合应用。当然,其他措施间有目的地协同应用,也可在发酵香肠品质提升中发挥重要作用,且必将成为今后的主要发展趋势。因此,在推进我国传统发酵香肠现代化进程中,不仅要充分挖掘发酵剂、工艺改进及低脂低盐化等措施的内在潜力,而且更应注重不同措施间的联合应用,取长补短,以最大限度保持传统发酵香肠的特色,并在此基础上实现安全、感官及健康品质的全面提升。

参考文献:

- [1] 王俊钢,李开雄,韩冬印.国内外发酵香肠的研究现状及其展望[J].肉类工业,2009(6):49-51.
- [2] 李轻舟,王红育.发酵肉制品研究现状及展望[J].食品科学,2011,32(3):247-251.
- [3] 马菊,孙宝忠,郝永清.国内外发酵肉制品历史及发展现状比较[J].肉类研究,2006,20(9):45-47.
- [4] HAMMES W P, HERTEL C. New developments in meat starter cultures[J]. Meat Science, 1998, 49(1): 125-138. DOI:10.1016/s0309-1740(98)90043-2.
- [5] 龙强,聂乾忠,刘成国.发酵肉制品功能性发酵剂研究现状[J].食品科学,2016,37(17):263-269. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201617044.
- [6] 吕燕妮.戊糖乳杆菌31-1菌株产细菌素研究[D].北京:中国农业大学,2004:11-19.
- [7] KINGCHA Y, TOSUKHOWONG A, ZENDO T, et al. Anti-listeria activity of *Pediococcus pentosaceus* BCC 3772 and application as starter culture for Nham, a traditional fermented pork sausage[J]. Food Control, 2012, 25(1): 190-196. DOI:10.1016/j.foodcont.2011.10.005.
- [8] CHEN Cen, CHEN Xiaohong, JIANG Mei, et al. A newly discovered bacteriocin from *Weissella hellenica* D1501 associated with Chinese Dong fermented meat (Nanx Wudl)[J]. Food Control, 2014, 42: 116-124. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.01.031.
- [9] 马宇霞,卢士玲,李开雄,等.熏马肠中生物胺氧化酶菌株的筛选与鉴定[J].现代食品科技,2014,30(5):49-55. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.05.002.
- [10] ZHANG Qilin, LIN Shenglin, NIE Xiaohua. Reduction of biogenic amine accumulation in silver carp sausage by an amine-negative *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Control, 2013, 32(2): 496-500. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.01.029.
- [11] TOSUKHOWONG A, VISESSANGUAN W, PUMPUANG L, et al. Biogenic amine formation in Nham, a Thai fermented sausage, and the reduction by commercial starter culture, *Lactobacillus plantarum* BCC 9546[J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 846-853. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.05.033.
- [12] RUBIO R, JOFRE A, MARTIN B, et al. Characterization of lactic acid bacteria isolated from infant faeces as potential probiotic starter cultures for fermented sausages[J]. Food Microbiology, 2014, 38: 303-311. DOI:10.1016/j.fm.2013.07.015.
- [13] TRZASKOWSKA M, KOŁOZYŃ-KRAJEWSKA D, WOJCIAK K, et al. Microbiological quality of raw-fermented sausages with *Lactobacillus casei* LOCK 0900 probiotic strain[J]. Food Control, 2014, 35(1): 184-191. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.07.002.

- [14] KLINGBERG T D, AXELSSON L, NATERSTAD K, et al. Identification of potential probiotic starter cultures for Scandinavian-type fermented sausages[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 105(3): 419-431. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2005.03.020.
- [15] SINZ Q, SCHWAB W. Metabolism of amino acids, dipeptides and tetrapeptides by *Lactobacillus sakei*[J]. Food Microbiology, 2012, 29(2): 215-223. DOI:10.1016/j.fm.2011.07.007.
- [16] CHEN Qian, LIU Qian, SUN Qinxiu, et al. Flavour formation from hydrolysis of pork sarcoplasmic protein extract by a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2015, 100: 110-117. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.10.001.
- [17] MONTEL M C, REITZ J, TALON R, et al. Biochemical activities of Micrococcaceae and their effects on the aromatic profiles and odours of dry sausage model[J]. Food Microbiology, 1996, 13(6): 489-499. DOI:10.1016/j.fm.1996.0056.
- [18] 温婷婷. 风干肠中挥发性化合物分析及产香菌的筛选鉴定[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2012: 23-38.
- [19] 王海燕, 马长伟, 李平兰. 传统湖南腊肉中产香葡萄球菌的筛选及鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(5): 45-49. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2006.05.012.
- [20] MARTUSCELLI M, CRUDELE M A, GARDNI F, et al. Biogenic amine formation and oxidation by *Staphylococcus xylosus* strains from artisanal fermented sausages[J]. Letters in Applied Microbiology, 2000, 31(3): 228-232. DOI:10.1046/j.1365-2672.2000.00796.x.
- [21] 邓红梅, 卢士玲, 李开雄. 传统中式香肠中产生物胺氧化酶菌的分离鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(2): 57-60. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2012.02.024.
- [22] PURRINOS L, CARBALLO J, LORENZO J M. The influence of *Debaryomyces hansenii*, *Candida deformans* and *Candida zeylanoides* on the aroma formation of dry-cured "lacón"[J]. Meat Science, 2013, 93(2): 344-350. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.09.015.
- [23] CANO-GARCIA L, BELLOCH C, FLORES M. Impact of *Debaryomyces hansenii* strains inoculation on the quality of slow dry-cured fermented sausages[J]. Meat Science, 2014, 96(4): 1469-1477. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.12.011.
- [24] 杨利昆, 付湘晋, 胡叶碧, 等. 鱼露中生物胺降解菌的筛选及其特性[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 158-162.
- [25] GAO Yurong, LI Dapeng, LIU Xiaoyan. Bacteriocin-producing *Lactobacillus sakei* C2 as starter culture in fermented sausages[J]. Food Control, 2014, 35(1): 1-6. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.06.055.
- [26] BAKA A M, PAPAVERGOU E J, PRAGALAKI T, et al. Effect of selected autochthonous starter cultures on processing and quality characteristics of Greek fermented sausages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 54-61. DOI:10.1016/j.lwt.2010.05.019.
- [27] RUIZ-MOYANO S, MATTIN A, BENITO M J, et al. Screening of lactic acid bacteria and bifidobacteria for potential probiotic use in Iberian dry fermented sausages[J]. Meat Science, 2008, 80(3): 715-721. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.03.011.
- [28] YUKSEKDAG Z N, ASLIM B. Assessment of potential probiotic and starter properties of *Pediococcus* spp. isolated from Turkish-type fermented sausages (sucuk)[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, 20(1): 161-168. DOI:10.4014/jmb.0904.04019.
- [29] RUIZ-MOYANO S, MATTIN A, JOSE BENITO M, et al. Application of *Lactobacillus fermentum* HL57 and *Pediococcus acidilactici* SP979 as potential probiotics in the manufacture of traditional Iberian dry-fermented sausages[J]. Food Microbiology, 2011, 28(5): 839-847. DOI:10.1016/j.fm.2011.01.006.
- [30] MAINAR M S, STAVROPOULOU D A, LEROY F. Exploring the metabolic heterogeneity of coagulase-negative staphylococci to improve the quality and safety of fermented meats: a review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 247: 24-37. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.021.
- [31] RAVYTS F, VRANCKEN G, D'HONDT K, et al. Kinetics of growth and 3-methyl-1-butanol production by meat-borne, coagulase-negative staphylococci in view of sausage fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 134(1/2): 89-95. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.006.
- [32] RAVYTS F, STEEN L, GOEMAERE O, et al. The application of staphylococci with flavour-generating potential is affected by acidification in fermented dry sausages[J]. Food Microbiology, 2010, 27(7): 945-954. DOI:10.1016/j.fm.2010.05.030.
- [33] ANDRADE M J, CORDOBA J J, CASADO E M, et al. Effect of selected strains of *Debaryomyces hansenii* on the volatile compound production of dry fermented sausage "salchichón"[J]. Meat Science, 2010, 85(2): 256-264. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.01.009.
- [34] CANO-GARCIA L, RIVERA-JIMENEZ S, BELLOCH C, et al. Generation of aroma compounds in a fermented sausage meat model system by *Debaryomyces hansenii* strains[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 364-373. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.051.
- [35] CORRAL S, SALVADOR A, BELLOCH C, et al. Effect of fat and salt reduction on the sensory quality of slow fermented sausages inoculated with *Debaryomyces hansenii* yeast[J]. Food Control, 2014, 45: 1-7. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.04.013.
- [36] CORRAL S, SALVADOR A, BELLOCH C, et al. Improvement the aroma of reduced fat and salt fermented sausages by *Debaryomyces hansenii* inoculation[J]. Food Control, 2015, 47: 526-535. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.08.001.
- [37] MANGIA N P, TRANI A, DI LUCCIA A, et al. Effect of the use of autochthonous *Lactobacillus curvatus*, *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus xylosus* strains on microbiological and biochemical properties of the Sardinian fermented sausage[J]. European Food Research and Technology, 2013, 236(3): 557-566. DOI:10.1007/s00217-013-1915-z.
- [38] 雷华威, 李榕, 樊康, 等. 不同菌种对中式发酵香肠风味的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 19-24.
- [39] 朱迎春, 杜智慧, 马佃珍, 等. 发酵剂对发酵香肠微生物及理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 198-205. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.9.033.
- [40] SIMION A M C, VIZIREANU C, ALEXE P, et al. Effect of the use of selected starter cultures on some quality, safety and sensorial properties of Dacia sausage, a traditional Romanian dry-sausage variety[J]. Food Control, 2014, 35(1): 123-131. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.06.047.
- [41] 朱志远, 徐幸莲, 李虹敏, 等. 不同发酵剂对发酵香肠生物胺含量的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(8): 133-137. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2009.08.023.
- [42] FENG Li, QIAO Yan, ZOU Yufeng, et al. Effect of flavourzyme on proteolysis, antioxidant capacity and sensory attributes of Chinese sausage[J]. Meat Science, 2014, 98(1): 34-40. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.04.001.
- [43] 杨华, 张琳, 马佃珍, 等. 外源酶缩短羊肉发酵香肠成熟期的效果研究[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 81-86.
- [44] 巫永华, 刘恩岐, 张建萍, 等. 外源酶加速半干发酵香肠成熟的研究[J]. 食品科技, 2015, 40(3): 136-140. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2015.03.036.
- [45] 王世宽, 许艳丽, 于海光, 等. 发酵剂和酶制剂在发酵香肠中的应用[J]. 肉类工业, 2009(5): 23-25.

- [46] OJHA K S, KERRY J P, DUFFY G, et al. Technological advances for enhancing quality and safety of fermented meat products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 44(1): 105-116. DOI:10.1016/j.tifs.2015.03.010.
- [47] OMER M K, ALVSEIKE O, HOLCK A, et al. Application of high pressure processing to reduce verotoxigenic *E. coli* in two types of dry-fermented sausage[J]. Meat Science, 2010, 86(4): 1005-1009. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.08.008.
- [48] ANANOU S, GARRIGA M, JOFRE A, et al. Combined effect of enterocin AS-48 and high hydrostatic pressure to control food-borne pathogens inoculated in low acid fermented sausages[J]. Meat Science, 2010, 84(4): 594-600. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.10.017.
- [49] SIMON-SARKADI L, PASZTOR-HUSZAR K, ISTVAN D, et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on biogenic amine content of sausage during storage[J]. Food Research International, 2012, 47(2): 380-384. DOI:10.1016/j.foodres.2011.10.029.
- [50] KIM J H, AHN H J, LEE J W, et al. Effects of gamma irradiation on the biogenic amines in pepperoni with different packaging conditions[J]. Food Chemistry, 2005, 89(2): 199-205. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.02.026.
- [51] 于海, 曹宏, 李想, 等. 辐照对发酵香肠品质特性的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(6): 1214-1218.
- [52] MUGUERZA E, GIMENO O, ANSORENA D, et al. New formulations for healthier dry fermented sausages: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(9): 452-457. DOI:10.1016/j.tifs.2003.12.010.
- [53] CAMPAGNOL P C B, dos SANTOS B A, WAGNER R, et al. Amorphous cellulose gel as a fat substitute in fermented sausages[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 36-42. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.05.026.
- [54] 张露, 张雅玮, 惠腾, 等. 低钠干腌肉制品研究进展[J]. 肉类研究, 2013, 27(11): 45-49.
- [55] CACERES E, GARCIA M L, SELGAS M D. Effect of pre-emulsified fish oil - as source of PUFA *n*-3-on microstructure and sensory properties of mortadella, a Spanish bologna-type sausage[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 183-193. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.11.018.
- [56] JOSQUIN N M, LINSSEN J P H, HOUBENA J H. Quality characteristics of Dutch-style fermented sausages manufactured with partial replacement of pork back-fat with pure, pre-emulsified or encapsulated fish oil[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 81-86. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.06.001.
- [57] JIMENÉZ-COLMENERO F, TRIKI M, HERRERO A M, et al. Healthy oil combination stabilized in a konjac matrix as pork fat replacement in low-fat, PUFA-enriched, dry fermented sausages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 158-163. DOI:10.1016/j.lwt.2012.10.016.
- [58] dos SANTOS B A, CAMPAGNOL P C B, MORGANO M A, et al. Monosodium glutamate, disodium inosinate, disodium guanylate, lysine and taurine improve the sensory quality of fermented cooked sausages with 50% and 75% replacement of NaCl with KCl[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 509-513. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.08.024.
- [59] CAMPAGNOL P C B, dos SANTOS B A, MORGANO M A, et al. Application of lysine, taurine, disodium inosinate and disodium guanylate in fermented cooked sausages with 50% replacement of NaCl by KCl[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 239-243. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.10.018.
- [60] CAMPAGNOL P C B, dos SANTOS B A, WAGNER R, et al. The effect of yeast extract addition on quality of fermented sausages at low NaCl content[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 290-298. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.11.005.
- [61] CHOI Y M, JUNG K C, JO H M, et al. Combined effects of potassium lactate and calcium ascorbate as sodium chloride substitutes on the physicochemical and sensory characteristics of low-sodium frankfurter sausage[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 21-25. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.06.022.
- [62] dos SANTOS B A, CAMPAGNOL P C B, da CRUZ A G, et al. Is there a potential consumer market for low-sodium fermented sausages?[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(5): 1093-1099. DOI:10.1111/1750-3841.12847.
- [63] WEISS J, GIBIS M, SCHUH V, et al. Advances in ingredient and processing systems for meat and meat products[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 196-213. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.05.008.
- [64] 李培迪, 张德权, 田建文. 低盐低脂功能性肉制品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 391-394. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.16.076.