

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240424009

# 香肠微生物多样性研究进展

牟燕<sup>1</sup>, 赖茂佳<sup>1</sup>, 易宇文<sup>2</sup>, 范文教<sup>1</sup>, 乔兴<sup>3\*</sup>

(1. 四川旅游学院食品学院, 成都 610100; 2. 烹饪科学四川省高校重点实验室, 成都 610100;  
3. 四川旅游学院烹饪学院, 成都 610100)

**摘要:** 香肠作为我国传统特色发酵肉制品的典型代表, 因其腊香醇厚、风味饱满、食用便利等特点具有较高的市场接受度。在发酵过程中, 香肠制品的微生态系统为提高产品的食用安全性、产生良好的风味物质提供了新的研究思路和方法。近年来, 香肠发酵过程中相关微生物群落的研究报道主要集中于细菌、酵母菌和部分霉菌, 细菌的作用主要体现在促进肉的发色、赋予独特发酵风味以及抑制生物胺生成等方面; 酵母菌有利于香肠产品特征发酵香气和滋味的形成, 并提高安全性; 霉菌可使香肠具有独特的表面特性和风味。本文对香肠发酵成熟各个环节中微生物的多样性及其作用进行综述, 旨在充分挖掘微生物的物质资源, 加强天然品质改良剂在香肠产业中的研究和应用, 全面改善香肠的品质质量和食用安全性, 以期香肠微生物发酵剂的开发与推广提供借鉴。

**关键词:** 香肠; 微生物; 多样性

## Research progress on microbial diversity of sausages

MOU Yan<sup>1</sup>, LAI Mao-Jia<sup>1</sup>, YI Yu-Wen<sup>2</sup>, FAN Wen-Jiao<sup>1</sup>, QIAO Xing<sup>3\*</sup>

(1. Food College, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Culinary Science, Chengdu 610100, China; 3. Culinary Institute, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

**ABSTRACT:** Sausage, as a typical representative of traditional fermented meat products in China, has a high market acceptance due to its rich and mellow flavor, full-bodied taste, and convenience of consumption. During the fermentation process, the microbial ecosystem of sausage products provides new research ideas and methods to enhance product safety and generate desirable flavor compounds. In recent years, research on the microbial communities involved in sausage fermentation has mainly focused on bacteria, yeast, and some molds. Bacteria play a key role in promoting meat color development, imparting unique fermentation flavors, and inhibiting biogenic amine formation. Yeasts contribute to the formation of characteristic fermentation aromas and flavors in sausage products, enhancing their safety. Molds contribute to the unique surface characteristics and flavors of sausages. This review summarized the diversity of microbes and their roles at various stages of sausage fermentation, aiming to fully explore the material resources of microbes, strengthen research and application of natural quality improvers in the sausage industry, comprehensively improve the quality and safety of sausages, and provide insights for the

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0120)、四川省重点研发项目(2023YFN0064)、大学生创新创业项目(202302060)

**Fund:** Supported by the Sichuan Natural Science Foundation Project (2022NSFSC0120), the Key Research and Development Projects in Sichuan Province (2023YFN0064), and the College Student Innovation and Entrepreneurship Project (202302060)

\*通信作者: 乔兴, 硕士, 副教授, 主要研究方向为烹饪工艺与食品加工。E-mail: 258937768@qq.com

\*Corresponding author: QIAO Xing, Master, Associate Professor, Culinary College of Sichuan Tourism University, No.459, Hongling Road, Longquanyi District, Chengdu 610100, China. E-mail: 258937768@qq.com

development and promotion of microbial fermentation agents for sausages.

**KEY WORDS:** sausage; microorganism; diversity

## 0 引言

香肠作为我国的传统肉制品,文化底蕴深厚,是中国传统节日春节的餐桌上的一道必不可少的菜肴。早在北魏末期(公元 6 世纪)贾思勰所著的《齐民要术》中就有关于香肠配方和制作方法的记载<sup>[1]</sup>,在当时,将肉制品发酵制成香肠是百姓用来延长其贮藏期的一种方式,而在其漫长的发展过程中形成了多种具有地方特色风味的类别,其代表有四川的“麻辣香肠”、广州的“广式腊肠”、江苏的“如皋香肠”、哈尔滨的“红肠”等<sup>[2]</sup>。香肠以动物的肉为原料,绞碎成条状,再灌入肠衣制成长圆柱体状,通过自然附着的菌种或人工接种进行发酵制备而成<sup>[3]</sup>。在香肠发酵过程中,微生物多样性的动态变化和代谢过程对香肠风味物质的形成至关重要。目前,国内外学者通过多种手段对香肠发酵中微生物群落结构和功能进行了深入的研究,使得人们对香肠发酵过程中的微生态多样性及其代谢过程有了新的认识。香肠中微生物(如细菌、酵母菌、霉菌)的多样性在丰富产品营养价值、延长贮藏期及其风味形成过程中发挥了关键作用,本文简要概述了近年来关于香肠发酵和成熟过程中微生物多样性的研究现状,以期为今后选择优质的香肠发酵菌株提供一定理论依据。

## 1 香肠的研究发展现状

我国香肠制作工艺发展至今已有上千年的历史,因其贮藏期长、风味独特、食用便利等特点深受消费者青睐。在政府引导和产学研研究的努力下,香肠产业在生产工艺改进、新技术应用、菌种优化等方面有了很大的进步<sup>[4]</sup>,促进了我国香肠产业的快速发展,形成了品种繁多的香肠产品<sup>[5]</sup>。研究香肠在加工和储藏期间的微生物多样性是完善香肠加工过程及控制产品质量等方面的客观要求。传统香肠原料以猪、牛、羊等畜产肉制品为主,种类较单一,在生活水平不断提高的今天,人们对于发酵食品的质量及安全性追求也在逐步提高,香肠的原材料趋向于品种多样化、营养均衡化发展,因此复合香肠<sup>[6]</sup>的市场正在不断地扩大。在风味设计上,为了更好地满足广大消费者的口味,在参考西方发酵肉制品独特制作工艺的基础上,将中国传统风味与现代工艺相结合,研究出了绿茶风味发酵香肠<sup>[7]</sup>、大蒜味发酵香肠<sup>[8]</sup>、芝士玉米风味发酵香肠<sup>[9]</sup>等。

目前我国香肠产业对新型发酵剂的研发应用已经进入了新的发展阶段,在改进香肠的形态、色泽、香气、组织状态以及提升其食用性能等方面发挥了重要作用<sup>[10]</sup>。ZHANG 等<sup>[11]</sup>采用了 5 种乳酸菌发酵剂探究差异丰度微生物

物与产品品质的关系,发现接种功能性发酵剂能够显著改善香肠的感官和质构特性。有研究表明在香肠发酵过程中接种植物乳杆菌会产生抗菌物质抑制组胺的形成和积累,降低发酵香肠中生物胺的含量<sup>[12]</sup>。但国内人工发酵剂的研究主要集中在能使肉制品缩短其成熟时间的乳酸菌上,例如肉葡萄球菌、植物乳杆菌和戊糖片球菌<sup>[13-14]</sup>等,有待通过研究发酵香肠的微生态多样性筛选出更多有益菌株,进一步扩展对菌株复配的研究与应用,使用一系列互补的方法来研究菌株的潜力,推广使用各种高效安全的微生物发酵剂。

## 2 香肠发酵过程中细菌多样性及作用

### 2.1 香肠发酵过程中细菌多样性

发酵香肠中细菌微生态系统具有种类繁多、代谢反应复杂、作用多样等特点。其中乳酸菌和凝固酶阴性球菌是最主要的细菌群落。乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)是一类能利用可发酵性糖产生大量乳酸的细菌总称,是最早从香肠中分离出来的微生物种类<sup>[15]</sup>;目前,乳酸菌在发酵香肠、发酵奶制品、泡菜以及焙烤食品中应用广泛。凝固酶阴性球菌(*Coagulase-negative staphylococci*, CNS)是发酵肉制品中研究最多的一类微生物,不仅能提高产品的食用安全性,而且能增强产品的风味形成<sup>[16]</sup>。赵改名等<sup>[17]</sup>采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术得出在门水平上,厚壁菌门(Firmicutes)和变形菌门(Proteobacteria)为绝对优势菌门,两者的相对丰度在各样品中均达到 98%以上。滕安国等<sup>[18]</sup>在新鲜香肠中共检测到 7 个科水平上的微生物,丰度最高的是葡萄球菌科(Staphylococcaceae);优势菌群是马胃葡萄球菌,占比 25.59%。在属水平上,赵改名实验结果鉴定出了 83 个细菌属,其中葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和乳杆菌属(*Lactobacillus*)为主要优势细菌属。葛芮瑄等<sup>[19]</sup>实验指出大多数发酵香肠的优势菌属还包括明串珠菌属(*Leuconostoc*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、片球菌属(*Pediococcus*)、链球菌属(*Streptococcus*)和肠球菌属(*Enterococcus*)等。西式发酵香肠中的优势菌属是乳杆菌属(*Lactobacillus*)和葡萄球菌属(*Staphylococcus*)<sup>[20]</sup>,主要有木糖葡萄球菌、肉葡萄球菌、腐生葡萄球菌和马胃葡萄球菌<sup>[21]</sup>。TAKASHI 等<sup>[22]</sup>从日本鱼肠中一共分离出 75 株乳酸菌,其中乳酸乳球菌是发挥主要作用的优势菌。综合国内外主要文献报道,香肠中常见的细菌属见表 1。由上可知,在香肠发酵过程中核心细菌以乳杆菌属、乳球菌属及葡萄球菌属为主。

表 1 香肠中常见的细菌属  
Table 1 Common bacterial genera in sausages

属	中文名称	拉丁文学名
乳杆菌属 ( <i>Lactobacillus</i> )	清酒乳杆菌	<i>Lactobacillus sakei</i>
	植物乳杆菌	<i>Lactobacillus plantarum</i>
	发酵乳杆菌	<i>Lactobacillus fermentum</i>
	短乳杆菌	<i>Lactobacillus brevis</i>
	弯曲乳杆菌	<i>Lactobacillus curvatus</i>
	德式乳杆菌	<i>Lactobacillus delbrueckii</i>
	香肠乳杆菌	<i>Lactobacillus farciminius</i>
乳球菌属 ( <i>Lactococcus</i> )	干酪乳杆菌	<i>Lactobacillus casei</i>
	消化乳杆菌	<i>Lactobacillus alimentarius</i>
	乳酸乳球菌	<i>Lactococcus lactis</i>
	路邓葡萄球菌	<i>Staphylococcus lugunensis</i>
	缓慢葡萄球菌	<i>Staphylococcus lentus</i>
	马胃葡萄球菌	<i>Staphylococcus equorum</i>
	木糖葡萄球菌	<i>Staphylococcus xylosus</i>
葡萄球菌属 ( <i>Staphylococcus</i> )	克式葡萄球菌	<i>Staphylococcus kloosii</i>
	解糖葡萄球菌	<i>Staphylococcus saccharolyticus</i>
	肉葡萄球菌	<i>Staphylococcus carnosus</i>
	腐生葡萄球菌	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>
	干酪葡萄球菌	<i>Staphylococcus casei</i>
	小牛葡萄球菌	<i>Staphylococcus vitulinus</i>
	模仿葡萄球菌	<i>Staphylococcus simulans</i>
片球菌属 ( <i>Pediococcus</i> )	戊糖片球菌	<i>Pediococcus pentosus</i>
	乳酸片球菌	<i>Pediococcus acidilactici</i>
	马脍片球菌	<i>Pediococcus urinaequi</i>
明串珠菌属 ( <i>Leuconostoc</i> )	肠膜明串珠菌	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>
微球菌属 ( <i>Micrococcus</i> )	乳微球菌	<i>Micrococcus lactis</i>
	变异微球菌	<i>Micrococcus varians</i>
肠球菌属 ( <i>Enterococcus</i> )	屎肠球菌	<i>Enterococcus faecium</i>
	粪肠球菌	<i>Enterococcus faecalis</i>
魏斯氏菌属 ( <i>Weissella</i> )	希腊魏斯氏菌	<i>Weissella hellenica</i>
链球菌属 ( <i>Streptococcus</i> )	乳链球菌	<i>Streptococcus lactis</i>
	粪链球菌	<i>streptococcus faecalis</i>
	二醋酸乳酸链球菌	<i>Streptococcus lactis diacetate</i>

## 2.2 细菌在香肠发酵过程中的作用

### 2.2.1 促进肉的发色并防止脂肪氧化

香肠发酵过程中存在的部分细菌能够对颜色产生积极影响, 延缓色泽的衰退并提高稳定性<sup>[23]</sup>。葡萄球菌属是香肠自然发酵的优势菌, 它能够迅速还原硝酸盐并将降解产物和肌红蛋白结合生成亚硝基肌红蛋白, 使肉制品色泽红

润, 又能避免脂肪氧化。WANG 等<sup>[24]</sup>利用高通量测序技术鉴定发现微生物群落中的微球菌与葡萄球菌的主要作用在于优化产品的颜色并增强其口感。文献研究表明在广式腊肠中添加干酪乳杆菌和植物乳杆菌对其色泽的提高表现出积极的影响<sup>[25]</sup>; 植物乳杆菌 NJAU-01 对发酵香肠蛋白质氧化具有调节作用, 能明显降低香肠中的蛋白质羰基含量及蛋白质表面的疏水性, 一定程度上提升香肠的色泽和感官品质<sup>[26]</sup>。王淳玉等<sup>[27]</sup>通过生理生化试验及分子生物学鉴定方法从传统发酵肉制品中分离确定植物乳杆菌 YR07 和清酒乳杆菌 L.48 在香肠的色泽和质地方面有良好的改进作用。龚珏等<sup>[28]</sup>将戊糖片球菌接种于牦牛肉香肠, 结果表明戊糖片球菌对亚硝酸盐还原酶有生成作用, 有利于亚硝酸盐分解成一氧化氮和肌红蛋白相结合, 促进肉制品发色。刘天祯等<sup>[29]</sup>从鹅肉香肠中分离鉴定出具有较高抗氧化活性的干酪乳杆菌, 能够显著抑制发酵肉品中脂质氧化酸败现象。研究发现, 在肉类的发酵和成熟阶段, 植物乳杆菌能够产生超氧化物歧化酶和过氧化氢酶, 分解猪肉香肠在该过程中产生的过氧化物, 进而有效地抑制脂肪的氧化作用<sup>[30]</sup>。因此, 将微生物发酵剂接种于香肠发酵过程中改善产品感官品质、延长贮藏期已经成为目前该方向的研究热点。

### 2.2.2 赋予产品独特的发酵风味

成熟阶段的香肠在细菌的作用下会发生一系列复杂的生物化学变化, 如将脂肪、蛋白质降解为发酵香肠的风味前体物质。木糖葡萄球菌具有分解脂肪的活性, 提高发酵香肠中的风味物质的含量, 主要包括酯类、酮类、醛类、醇类、酸类、烃类、酚类、及含氧含氮杂环。张香美等<sup>[31]</sup>采用高通量测序与气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry techniques, GC-IMS)联合分析得出在发酵过程中, 乳酸菌科细菌在香肠发酵过程中占据绝对优势, 其次是葡萄球菌属、短杆菌属; 乳杆菌科细菌与 1-辛烯-3-醇、三甲基吡嗪、乙酸乙酯以及己醛、辛醛和 2-丁酮等挥发性风味物质的合成正相关, 葡萄球菌属与 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛的合成呈正相关。木糖葡萄球菌和肉葡萄球菌发酵剂的添加能促进发酵香肠重要风味物质醛类、酮类、酯类的形成<sup>[32]</sup>。接种植物乳杆菌和木葡萄球菌可以有效促进发酵香肠游离脂肪酸和游离氨基酸的释放, 防止异味和酸败味的形成<sup>[33]</sup>。HU 等<sup>[34]</sup>从哈尔滨风干肠中分离出了戊糖片球菌、短乳杆菌、弯曲乳杆菌及发酵乳杆菌, 其中戊糖乳杆菌分解肌浆蛋白形成风味物质的能力最强, 在发酵香肠挥发性风味的形成过程中起主导作用。刘英丽等<sup>[35]</sup>报道常用木糖链球菌生产芳香型香肠, 因其能产生 3-甲基-1-丁醇、二乙酰基、乙酰丁酮、苯甲醛、2-戊酮和 2-庚酮等重要风味化合物, 为发酵香肠带来更“圆润”的风味。在香肠发酵过程中, 正是多种多样的细菌代谢产生生物酶等物质促进蛋白质、脂质和碳水化

合物的氧化分解,进而促进产品风味的形成,这对于功能性发酵剂的开发利用尤为重要。

### 2.2.3 抑制生物胺的生成

生物胺类物质含量过多会危害人体健康。乳酸片球菌对色胺具有明显的抑制作用,可减少色胺的生成;植物乳杆菌可以降低酪胺的含量;肉葡萄球菌可以降低苯乙胺和组胺的含量。吴双慧等<sup>[36]</sup>利用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)和宏基因组技术(metagenomics)对香肠在发酵过程中的生物胺含量变化和微生物群落演变进行了测定,并对生物胺与微生物多样性之间的关系进行了深入分析,结果表明:明串珠菌属、假交替单胞菌属等 5 种细菌属与尸胺含量存在极显著的正相关关系;酒球菌属、芽孢杆菌属等 15 种细菌属与精胺含量呈显著负相关;酒球菌属、弓形菌属等 4 种细菌属与亚精胺含量呈显著负相关;酒球菌属、泛菌属等 5 种细菌属与酪胺含量呈显著负相关,而假交替单胞菌属和发光杆菌属则与其呈显著正相关;葡萄球菌属、链球菌属与色胺含量呈显著正相关。蔡永敏等<sup>[37]</sup>通过试验证明植物乳杆菌和木糖葡萄球菌的复合发酵剂能有效抑制猪肉香肠中苯乙胺、尸胺、组胺的积累,提高产品安全性能。李秀明等<sup>[38]</sup>将肉葡萄球菌和戊糖片球菌应用到红肠产品中可有效控制生物胺的含量,而弯曲乳杆菌能够显著降低 9 种 N-亚硝胺总量至 9.46  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,与 XIAO 等<sup>[39]</sup>研究结果一致。综上所述,香肠发酵过程中的细菌多样性能够有效减除生物胺的水平。一方面,细菌如乳酸菌、葡萄球菌及片球菌抑制了生物胺产生菌的生长繁殖,进而抑制其形成,另一方面,植物乳杆菌、木糖葡萄球菌、腐生葡萄球菌及乳酸片球菌产生的生物胺降解酶对已经形成的胺类物质进行降解。

## 3 香肠发酵过程中酵母菌多样性及作用

### 3.1 香肠发酵过程中酵母菌多样性

酵母菌是一种兼性厌氧、能发酵糖类产能的单细胞真菌,主要对香肠风味有较大的贡献。ENCINAS 等<sup>[40]</sup>从西班牙发酵香肠中发现了白吉利丝孢酵母、解脂耶罗威亚酵母、间型假丝酵母、近平滑假丝酵母和类筒假丝酵母。龚小会<sup>[41]</sup>通过内部转录间隔区(internal transcribed spacer, ITS)和 26S rDNA 测序发现了香肠中的 4 种酵母菌,即汉逊德巴利酵母、涎沫假丝酵母、牛首耶氏酵母和食物耶氏酵母。其中汉逊德巴利酵母在加工的各个阶段均存在,主要在成熟阶段占据绝对优势,是香肠中最丰富的酵母菌。吴丽红<sup>[42]</sup>的研究表明,香肠在 7°C 下腌制 48 h 后的优势酵母菌是朗比可酒香酵母,在 25°C 下自然发酵 48 h 的核心酵母菌为埃利诺诺球酵母,在 50°C 下烘烤 16 h 的主要酵母菌是赛道威汉逊酵母。党喜军<sup>[43]</sup>利用纯培养及宏基因组环境微生物测序技术分析不同年份诺邓火腿表面的微生物多样性,发现

汉逊德巴利氏酵母属和假丝酵母属是主要的优势酵母类群,OLESEN 等<sup>[44]</sup>成功从发酵肉制品中分离出了产脲假丝酵母。香肠中常见的酵母属如表 2 所示。

表 2 香肠中常见的酵母属  
Table 2 Common yeasts in sausages

属	中文名称	拉丁文学名
德巴利酵母属 ( <i>Debaryomyces</i> )	汉逊德巴利酵母	<i>Debaryomyces hansenii</i>
	近平滑假丝酵母	<i>Candida parapsilosis</i>
	类筒假丝酵母	<i>Candida cylindrica</i>
	产脲假丝酵母	<i>Candida utilis</i>
	假丝酵母属 ( <i>Candida</i> )	间型假丝酵母
假丝酵母属 ( <i>Candida</i> )	涎沫假丝酵母	<i>Candida zeylanoides</i>
	赛道威汉逊酵母	<i>Candida ernobii</i>
	法马塔假丝酵母	<i>Candida famata</i>
	牛首耶氏酵母	<i>Yarrowia bubula</i>
耶氏酵母属 ( <i>Yarrowia</i> )	食物耶氏酵母	<i>Yarrowia alimentaria</i>
隐球酵母属 ( <i>Cryptococcus</i> )	解脂耶罗威亚酵母	<i>Yarrowia lipolytica</i>
	埃利诺诺球酵母	<i>Cryptococcus elinonii</i>
酒香酵母属 ( <i>Brettanomyces</i> )	朗比可酒香酵母	<i>Brettanomyces lambicus</i>
	丝胞酵母属 ( <i>Trichosporon</i> )	白吉利丝孢酵母
毕赤酵母属 ( <i>Pichia</i> )	克鲁维毕赤酵母	<i>Pichia kluyveri</i>
	巴斯德毕赤酵母	<i>Pichia pastoris</i>
	季也蒙毕赤酵母	<i>Pichia guilliermondii</i>
	三角毕赤酵母	<i>Pichia triangularis</i>
酵母属 ( <i>Saccharomyces</i> )	鲁氏酵母	<i>Saccharomyces rouxii</i>
	酿酒酵母	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>

### 3.2 酵母菌在香肠发酵过程中的作用

#### 3.2.1 利于特征香气和滋味的形成

在发酵肉制品中,酵母菌具有广泛的胞外脂肪酶和蛋白酶活性,有助于加速肉中脂肪和蛋白质的降解过程,其初级和次生代谢产物可促进产品形成独特的香气和口感<sup>[45]</sup>。兰沁洁等<sup>[46]</sup>采用戊糖片球菌 L7 和近平滑假丝酵母 Y22 以 2:1 的比例复配发酵生产羊肉香肠,结果表明乳酸

菌和酵母菌复配接种发酵能够降低羊肉香肠的膻味, 提高羊肉香肠的可接受度。张佳敏等<sup>[47]</sup>在川式腊肉中以添加 0.3% 的酿酒酵母为试验组, 结果表明添加酿酒酵母可促进蛋白质降解成可溶性蛋白和游离氨基酸, 有利于腊肉风味的形成。万晶莹<sup>[48]</sup>研究发现酵母菌能显著增加香肠中酸类(44.88%和 38.08%)和酯类(87.14%和 83.31%)物质的含量, 且酵母与火腿成熟过程中维生素 E、脯氨酸、色氨酸等成分的增加及特征滋味的形成有关。COCOLIN 等<sup>[49]</sup>强调汉逊德巴利酵母菌对发酵香肠成熟过程中挥发性物质的产生有重要影响, 通过抑制脂质氧化产物的产生、促进乙酯的产生, 使香肠具有特征性的发酵香气; FLORES 等<sup>[50]</sup>与 LV 等<sup>[51]</sup>还表明德巴利酵母属有助于增强干发酵香肠的果味与腌制香味。

### 3.2.2 降低亚硝酸含量, 提高食用安全性

亚硝酸盐具有抗氧化活性, 能提高制品的色泽、味道以及储存能力<sup>[52]</sup>, 是发酵香肠中常用的发色剂, 但其易生成具有致癌性的亚硝基化合物危害人体健康。赵俊仁等<sup>[53]</sup>从自然发酵香肠中分离出近平滑假丝酵母, 具有耐受 6% 食盐、0.015% 亚硝酸盐及耐酸的能力, 可与乳酸菌复配成复合发酵剂, 起到稳定发酵香肠品质的作用。高绍金等<sup>[54]</sup>与王鹤霖等<sup>[55]</sup>的研究表明鲁氏酵母菌可以协同乳酸菌促进猪肉香肠发色, 减弱发酵肉制品中固有微生物菌群的硝酸盐还原能力, 降低亚硝酸盐及 pH, 缩短发酵时间, 提高发酵肉制品的安全性。在发酵过程中, 酵母菌产生的巯基物质会和部分亚硝酸钠反应, 造成亚硝酸钠降低, 减少其残留<sup>[56]</sup>。范鑫洋等<sup>[57]</sup>和 GARCÍA 等<sup>[58]</sup>表明接种酿酒酵母可以有效抑制肠杆菌生长, 提高发酵香肠的安全性。因此, 酵母菌在原料肉中的代谢活动对于提高香肠制品的安全性具有重要作用, 将酵母菌与细菌混合接种制成复配发酵剂从而改善或提升产品品质, 是近几年发酵肉制品行业的发展趋势。

## 4 香肠发酵过程中霉菌多样性及作用

### 4.1 香肠发酵过程中霉菌多样性

霉菌发酵制品是人类饮食文化中常见的食品之一, 其发酵植物性产品集中于亚洲, 如豆腐乳、豆豉、酱、酱油、柠檬酸等; 发酵肉制品主要集中于欧洲南部, 比如法国、西班牙、意大利、匈牙利和德国的南部, 主要的发酵肉制品类型有熏肉薄片、干腌香肠、火腿、风干脖肉、杯形香肠等。

目前已有 7 种产黄青霉和 2 种纳地青霉被国外筛选出来用于工业化生产, 且德国成功将白地青霉和娄地青霉用于肉制品发酵。VANESA 等<sup>[59]</sup>根据颜色、菌丝、外形和生长特征从阿根廷一种名为萨拉米的干发酵香肠中筛选出了 13 株青霉属菌株, 并对其重要生理学特征展开研究, 例如

菌株的生长、蛋白质水解和脂肪水解活性。杨勇等<sup>[60]</sup>利用察氏培养基、马铃薯葡萄糖琼脂培养基和孟加拉红培养基, 从四川自然发酵香肠中分离出了 121 株霉菌, 其中主要是青霉属、毛霉属和曲霉属; 韦友兵等<sup>[61]</sup>以萨拉米发酵香肠为研究对象, 发现在高温发酵阶段, 霉菌中 90% 以上是青霉, 而曲霉属是干腌火腿发酵后期的主要优势菌属。综合国内外各大文献报道, 香肠常见霉菌属如表 3 所示。但目前, 国内对适合接种于香肠制品的微生物发酵剂的筛选和构建工作主要集中在细菌和真菌, 对霉菌发酵剂的研究还较少, 其中产黄青霉和纳地青霉是发酵香肠中常用的有益霉菌。

表 3 香肠中常见的霉菌属  
Table 3 Common molds genera in sausages

属	中文名称	拉丁文学名
青霉属 ( <i>Penicillium</i> )	纳地青霉	<i>Penicillium nalgiovense</i>
	产黄青霉	<i>Penicillium chrysogenum</i>
	白地青霉	<i>Penicillium candidum</i>
	娄地青霉	<i>Penicillium roqueforti</i>
	疣状青霉	<i>Penicillium verruculosum</i>
	圆弧青霉	<i>Penicillium cyclopium</i>
	壳青霉	<i>Penicillium crustosum</i>
	柑桔青霉	<i>Penicillium citrinum</i>
	黄曲霉	<i>Aspergillus flavus</i>
	寄生曲霉	<i>Aspergillus parasiticus</i>
曲霉属 ( <i>Aspergillus</i> )	淄曲霉	<i>Aspergillus tamarii</i>
	灰绿曲霉	<i>Aspergillus glaucus</i>
	萨氏曲霉	<i>Aspergillus sydowii</i>
	黄柄曲霉	<i>Aspergillus flavipids</i>

### 4.2 霉菌在香肠发酵过程中的作用

霉菌能分解蛋白质和脂肪, 产生特有的“霉菌香味”, 因此霉菌发酵肉制品具有表面特性和风味。但大多数霉菌会产生有毒代谢产物<sup>[62]</sup>, 如普通青霉(*Penicillium commune*)和灰黄青霉(*Penicillium griseofulvum*)能产生环皮质素, 黄曲霉(*Aspergillus flavus*)和寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)会产生黄曲霉毒素, 均为具有致癌性和致畸性的真菌毒素, 要避免其在香肠中出现。霉菌在香肠发酵过程中的作用主要有以下 4 点。

#### 4.2.1 赋予香肠独特的表面特征、风味和香气

霉菌将香肠中的脂肪和蛋白质分解, 形成特种发酵风味, 主要由萜烯类和醇类组成。蒋云升等<sup>[63]</sup>以蛋白酶和脂肪酶活性为筛选指标, 从如皋火腿中分离出了 152 株霉菌菌株, 得出青霉属具有较高的蛋白酶和脂肪酶活性, 这与张雪梅<sup>[64]</sup>的研究结果一致。霉菌在香肠表面生长过程中, 产生了强烈的蛋白质水解和脂解作用, 有利于香肠典型风

味和香气的产生。肠衣表面的毛霉菌在适宜条件下能产生脂肪酶和蛋白酶分解肠体渗出的油脂和蛋白质,使香肠具有特殊的香气<sup>[65]</sup>。程燕<sup>[66]</sup>将产黄青霉接种在川味香肠中进行 30 d 的发酵实验,观察到产黄青霉在香肠发酵过程中有助于减少产品水分,改善香肠的色泽、质构及风味。将筛选出的优良霉菌——产黄青霉与戊糖乳杆菌、腐生葡萄球菌为复合发酵剂对四川香肠进行初步应用,一共分离鉴定出 38 种挥发性物质,且这些挥发性物质具有一定程度的抗氧化性;产黄青霉以葡萄糖发酵产生的乙醛作为底物,通过添加不同比例的戊糖乳杆菌和腐生金黄色葡萄球菌来提高其发酵活性,在一定程度上对香肠的风味形成产生积极作用<sup>[67]</sup>。综上表明,霉菌的酶系比较发达,在发酵过程中,其产生的酶类物质可以分解香肠中的蛋白质和脂肪,在一定程度上赋予产品特殊的外观,减缓香气成分的散失。

#### 4.2.2 竞争性抑制有害微生物的生长

优质的霉菌能够避免不良霉菌、酵母菌和细菌的生长,霉菌典型的白色和浅灰色菌丝和孢子可以控制水分从肠衣向外散失,有效避免“硬壳”现象的发生,竞争性抑制有害微生物繁殖。试验表明纳氏青霉菌对竞争性排除不需要的丝状真菌具有一定的作用<sup>[68]</sup>。GARCIA 等<sup>[69]</sup>与 BRUNA 等<sup>[70]</sup>报道发现霉菌具有分解蛋白质和脂肪的能力,能有效改善发酵肉制品的质量和感官特性,对腐败菌具有一定的拮抗作用。

#### 4.2.3 防止香肠过度酸败

霉菌具有过氧化氢酶活性,通过耗氧量可在一定程度上控制脂肪酸败。蔡嘉铭等<sup>[71]</sup>将从干腌火腿中分离出的高酶活、无毒霉菌枝孢菌 P27 作为干发酵香肠的发酵剂,发现其可以减缓香肠的脂肪氧化,起到一定的抗氧化作用。史崇颖等<sup>[72]</sup>报道霉菌生产会对传统火腿品质产生进一步的影响,包括阻止氧气渗透、防止产品产生哈喇味,并且其在金华火腿加工过程中仍扮演着重要角色。

## 5 香肠发酵过程中的微生物动态变化规律

成熟发酵工序对香肠色泽、香气、滋味的形成至关重要,我国还尚未有全面深入的关于香肠整个发酵过程中微生物区系动态变化与其成熟生香之间的关系的研究报道。香肠在生产、加工和贮藏过程中均有微生物参与,并呈现多样性的特征,主要的微生物有酵母菌,霉菌以及各种细菌<sup>[73]</sup>,所以对香肠制品发酵成熟阶段微生物的多样性及其作用研究是目前该领域的热点。香肠中微生物的种类、分布情况及其消长规律对香肠的品质具有显著影响。在不同的发酵阶段,随着发酵时间的延长,香肠中的优势菌群演替发生变化,微生物的多样性及丰富度也在不断改变。不同风味的香肠由于生产工艺的差异,微生物群落分布规律也各不相同。近年来,已有大量研究者探究了香肠发酵过程中的微生物类群变化规律,部分研究结果如表 4。

表 4 不同风味香肠在发酵过程中微生物的变化规律  
Table 4 Changes of microorganisms in different flavors of sausages during fermentation

风味	方法	变化趋势	参考文献
川味	高通量测序法	在香肠成熟初期:片球菌和乳杆菌呈快速增长的态势,之后迅速成为优势菌群,且抑制腐败菌群的生长。	[74]
	高通量测序法	随着香肠的成熟,葡萄球菌、戊糖片球菌、植物乳杆菌和魏斯氏菌逐渐成为优势菌。	[75]
	高通量测序法	在发酵后期贡献突出的菌属是德巴氏酵母属,但并没有表现出显著的优势,且随时间推移所占比例呈下降趋势;在 20 d 时,优势菌属向乳酸杆菌属转变,占比高达 63.14%。	[76]
	高通量测序法	成品香肠优势菌在门水平上为变形菌门和厚壁菌门,目水平上为假单胞菌目、乳杆菌目、肠杆菌目和弧菌目,属水平上为葡萄球菌属,种水平上为小牛葡萄球菌和马胃葡萄球菌。	[77]
	聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳	细菌群落中葡萄球菌和乳酸菌是最主要的种类,其中腐生葡萄球菌、乳杆菌和木糖葡萄球菌占主导地位,特别是葡萄球菌所占的比例相当大。成熟期,细菌总数呈不断下降趋势但下降幅度逐渐减小。影响产生风味前体物质的优势菌属分别为乳杆菌属、小球菌属、八叠球菌属、链球菌属,在不同成熟阶段发挥的作用不同。	[78]
广味	传统分离培养	在干燥过程中:乳酸菌、微球菌和葡萄球菌构成了主导菌群,而酵母和霉菌的数量相对较少,被归类为次要菌群。酵母、霉菌随烘烤时间延长呈下降趋势,最终分离出屎肠球菌。	[79]
	6SrDNA 测序分析	在发酵过程中:门的水平主要有厚壁菌门、变形杆菌门、拟杆菌门、放线菌门;在属的水平上主要有弧菌属、乳酸杆菌属、魏斯氏菌属、不动杆菌属、环丝菌属、肠杆菌属、耶尔森氏菌属。厚壁菌门(优势菌门)和乳酸杆菌属(优势菌属)随发酵时间先增加后减少,第 20 d 时,其占比分别为 95.4%、84.61%。菌落总数在灌肠工序时达到最高,在蒸煮熏制阶段呈下降趋势,在冷却贮藏过程中又略微上升。	[80]
红肠	高通量测序法	优势菌门为蓝细菌门,其后依次为变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门。	[81]
	传统分离培养	优势菌属为芽孢杆菌属、明串珠菌属、乳球菌属。	[82]
	高通量测序法	优势菌属为芽孢杆菌属、明串珠菌属、乳球菌属。	[83]

## 6 结束语

在香肠发酵过程中, 微生物的多样性直接关系到香肠的品质与风味。随着科技与社会的进步, 我国对高端发酵肉制品的市场需求十分旺盛, 这正是国内香肠产业发展的机遇, 但目前我国香肠仍存在品质不稳定、风味不理想等问题。在香肠发酵过程中, 微生物的丰富群系、优势菌的种类对香肠的风味及质量均有非常重要的贡献, 因此利用发酵过程中微生物的多样性及作用是定向改造发酵香肠后期风味的一种有效途径。目前发酵香肠中功能性微生物发酵剂的研究主要集中在以乳酸菌、凝固酶阴性葡萄球菌和酵母菌为单一菌种方面, 对霉菌和复配菌发酵剂的研究有待进一步加深且至今仍没有形成一个完备的理论支撑体系。基于研究现状, 应用香肠中微生物群落的多样性和微生物代谢对香肠品质的作用并结合微生物调控技术, 研发推广高效安全的微生物发酵剂, 从而科学指导香肠发酵, 优化传统生产工艺, 丰富香肠独特风味, 提高产品的品质 and 安全性。

## 参考文献

- [1] WANG H, SUI Y, LIU J, *et al.* Analysis and comparison of the quality and flavour of traditional and conventional dry sausages collected from northeast China [J]. *Food Chem X*, 2023, 20: 100979.
- [2] 周琴, 宋积赞, 王秋霞, 等. 27 种传统猪肉腌腊制品的游离氨基酸成分分析及评价[J]. *食品工业*, 2023, 44(6): 310-315.  
ZHOU Q, SONG JY, WANG QX, *et al.* Free amino acid composition and analysis of twenty-seven traditional cured meat products [J]. *Food Ind*, 2023, 44(6): 310-315.
- [3] KONG L, DENG J, CAI K, *et al.* Evaluating the colour formation and oxidation effect of *Leuconostoc mesenteroides* subsp. IMAU: 80679 combining with ascorbic acid in fermented sausages [J]. *Food Biosci*, 2023, 12: 102478.
- [4] BELLEGGIA L, OSIMANI A. Fermented fish and fermented fishbased products, an ever-growing source of microbial diversity: A literature review [J]. *Food Res Int*, 2023, 172: 113112.
- [5] HUANG Z, SHEN Y, HUANG X, *et al.* Microbial diversity of representative traditional fermented sausages in different regions of China [J]. *J Appl Microbiol*, 2021, 130(1): 133-141.
- [6] 乔兴, 徐培, 易宇文, 等. 松茸牦牛肉香肠制作工艺[J]. *食品工业*, 2023, 44(10): 42-45.  
QIAO X, XU P, YI YW, *et al.* The processing technology of matsutake yak meat sausages [J]. *Food Ind*, 2023, 44(10): 42-45.
- [7] 吴昊, 张光杰, 吕留庄, 等. 绿茶风味发酵香肠工艺研究[J]. *肉类工业*, 2013, (1): 8-11.  
WU H, ZHANG GJ, LV LZ, *et al.* Research on technology of fermented sausage with green tea flavor [J]. *Meat Ind*, 2013, (1): 8-11.
- [8] 刘鑫垒. 大蒜风味发酵香肠工艺优化及贮藏品质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.  
LIU XL. Study on optimization of garlic-flavored fermented sausage technology and storage quality [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [9] 金维忠, 高玉龙, 卢绪志, 等. 椰果芝士玉米风味香肠的研究[J]. *肉类工业*, 2020, (8): 8-12.  
JIN WZ, GAO YL, LU XZ, *et al.* Study on sausage with coconut cheese and corn flavor [J]. *Meat Ind*, 2020, (8): 8-12.
- [10] 冯美琴, 李天翔, 孙健. 复合发酵剂对发酵鱼肉香肠品质、风味及其多肽抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(24): 138-145.  
FENG MQ, LI TY, SUN J. Effects of mixed-strain starter culture on quality, flavor and antioxidant activity of fermented fish sausage [J]. *Food Sci*, 2023, 44(24): 138-145.
- [11] ZHANG YZ, ZHAO WJ, LIU H, *et al.* Characteristics of microbial community in Linyi fermented pork sausage and their correlation with quality: Effects of the single *Lactobacillus* starter [Z]. 2023.
- [12] 王艺伦. 植物乳杆菌 LPZN19 对发酵香肠中组胺减除机制的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.  
WANG YL. Study on the mechanism of histamine reduction by *Lactobacillus plantarum* LPZN19 in fermented sausage [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023.
- [13] 祝超智, 赵世昌, 李璇, 等. 肉葡萄球菌发酵牛肉香肠的制作工艺优化[J/OL]. *河南农业大学学报*: 1-17. [2024-06-19]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.004>  
ZHUCHAO Z, ZHAOSHI C, LI X, *et al.* Optimization of fermented beef sausage process by *Staphylococcus carnosus* [J/OL]. *J Henan Agric Univ*: 1-17. [2024-06-19]. <https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20240429.004>
- [14] 杨滔, 张晓东, 刘红梅, 等. 不同发酵剂对发酵猪肉香肠品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 101-109.  
YANG T, ZHANG XD, LIU HM, *et al.* Effect of different starters on the quality of fermented pork sausage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(1): 101-109.
- [15] BARCENILLA C, DUCIC M, LÓPEZ M, *et al.* Application of lactic acid bacteria for the biopreservation of meat products: A systematic review [J]. *Meat Sci*, 2022, 183: 108661.
- [16] ZHONG A, CHEN W, DUAN YF, *et al.* The potential correlation between microbial communities and flavors in traditional fermented sour meat [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 149: 111873.
- [17] 赵改名, 李珊珊, 崔文明, 等. 不同来源腊肉中细菌菌群结构与风味相关性分析[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 246-253.  
ZHAO GM, LI SS, CUI WM, *et al.* Correlation analysis of bacterial community structure and flavor in different Chinese bacon [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(13): 246-253.
- [18] 滕安国, 张芹, 蒋怡, 等. 不同储藏时期香肠菌群结构的变化及优势腐败菌研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(2): 40-46.  
TENG ANG, ZHANG Q, JIANG Y, *et al.* Studies on the microbial profiles and dominant spoilage bacteria in sausage during different storage periods [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(2): 40-46.
- [19] 葛芮瑄, 罗玉龙, 剧柠. 传统发酵肉制品中微生物菌群对风味形成的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(6): 2295-2307.  
GE RX, LUO YL, JU N. Research progress on the microbial flora affecting flavor formation of traditional fermented meat products [J]. *Microbiol China*, 2022, 49(6): 2295-2307.
- [20] TODOROV SD, STOJANOVSKI S, ILIEV I, *et al.* Technology and safety assessment for lactic acid bacteria isolated from traditional Bulgarian

- fermented meat product “lukanka” [J]. *Brazilian J Microbiol*, 2017, 48(3): 576–586.
- [21] REBECCHI A, PISACANE V, CALLEGARI ML, *et al*. Ecology of antibiotic resistant coagulase-negative staphylococci isolated from the production chain of a typical Italian salami [J]. *Food Control*, 2015, 53: 14–22.
- [22] TAKASHI K, MIHO K, MAKI N, *et al*. *In vitro* antioxidant and anti-inflammation properties of lactic acid bacteria isolated from fish intestines and fermented fish from the Sanriku Satoumi region in Japan [J]. *Food Res Int*, 2014, 64: 248–255.
- [23] 牟燕, 赖茂佳, 易宇文, 等. 微生物发酵剂对川味牦牛肉香肠品质的影响[J]. *中国酿造*, 2024, 43(2): 188–193.  
MOU Y, LAI MJ, YI YW, *et al*. Effect of microbial starter on the quality of Sichuan yak sausage [J]. *China Brew*, 2024, 43(2): 188–193.
- [24] WANG X, ZHANG Y, REN H, *et al*. Comparison of bacterial diversity profiles and microbial safety assessment of salami, Chinese dry-cured sausage and Chinese smoked-cured sausage by high-throughput sequencing [J]. *LWT*, 2018, 90: 108–115.
- [25] 李小妮, 于立梅, 曾晓房, 等. 干酪乳杆菌和植物乳杆菌对广式腊肠品质的影响[J]. *中国调味品*, 2020, 45(8): 31–3443.  
LI XN, YU LM, ZENG XF, *et al*. Effects of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum* on the quality of cantonese sausage [J]. *China Cond*, 2020, 45(8): 31–3443.
- [26] GE Q, CHEN S, LIU R, *et al*. Effects of *Lactobacillus Plantarum* njau-01 on the protein oxidation of fermented sausage [J]. *Food Chem*, 2019, 295(15): 361–367.
- [27] 王淳玉, 徐宝才, 杨柳, 等. 传统发酵肉制品中乳酸菌的筛选及其在萨拉米中的初步应用[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(1): 67–75.  
WANG CY, XU BC, YANG L, *et al*. Screening of lactic acid bacteria in traditional fermented meat products and their application in salami fermentation [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2024, 40(1): 67–75.
- [28] 龚珏, 唐善虎, 李思宁, 等. 乳酸菌对发酵牦牛肉灌肠理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 57–64.  
GONG Y, TANG SH, LI SN, *et al*. Effect of lactic acid bacteria on physicochemical properties and volatile flavor substances of fermented yak meat sausage [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(4): 57–64.
- [29] 刘天祯, 潘道东. 抗氧化活性乳酸菌的筛选[J]. *食品科学*, 2011, 32(19): 125–129.  
LI TY, PAN DD. Screening of lactic acid bacteria with antioxidant activity [J]. *Food Sci*, 2011, 32(19): 125–129.
- [30] 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.  
LU H, ZHANG XM, PENG P, *et al*. Effects of mixed culture starters on the fat rancidity and protein oxidation of fermented sausage [J]. *Acta Agric Boreali-occid Sin*, 2019, 28(9): 1552–1560.
- [31] 张香美, 叶翠, 卢涵, 等. 发酵香肠制作过程中菌群演替及挥发性风味成分变化规律[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(5): 282–290.  
ZHANG XM, YE C, LU H, *et al*. The succession of bacterial flora and the variation of volatile flavor components during the production of fermented sausage [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2022, 22(5): 282–290.
- [32] 刘文龙, 雷英杰, 张孝琴, 等. 发酵剂 SM-75 对广味香肠特性及风味的影响研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(6): 41–45.  
LIU WL, LEI YJ, ZHANG XQ, *et al*. Effect of starter SM-75 on the properties and flavor of cantonese sausage [J]. *China Cond*, 2021, 46(6): 41–45.
- [33] 龙正玉, 邹金浩, 杨怀谷, 等. 肉制品发酵技术对肉品质调控及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(3): 354–362.  
LONG ZY, ZOU JH, YANG HG, *et al*. Research progress on the regulation of meat quality and application of fermentation technology for meat products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2024, 45(3): 354–362.
- [34] HU YY, CHEN Q, WEN RX, *et al*. Quality characteristics and flavor profile of Harbin dry sausages inoculated with lactic acid bacteria and *Staphylococcus xylosum* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 114: 108382.
- [35] 刘英丽, 杨梓妍, 万真, 等. 发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质形成的作用及影响机制研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(11): 284–296.  
LIU YL, YANG ZY, WAN Z, *et al*. Progress in understanding the effect and mechanism of starter cultures on the formation of volatile flavor compounds in fermented sausage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(11): 284–296.
- [36] 吴双慧, 牛茵, 何济坤, 等. 基于宏基因组技术分析自然发酵羊肉香肠中微生物多样性及生物胺的代谢[J]. *食品科学*, 2023, 44(18): 133–140.  
WU SH, NIU Y, HE JK, *et al*. Metagenomic analysis of microbial diversity and biogenic amine metabolism in naturally fermented mutton sausage [J]. *Food Sci*, 2023, 44(18): 133–140.
- [37] 蔡永敏, 黄海英, 胡炜东, 等. 混合发酵剂的筛选及对发酵猪肉香肠加工特性及安全性能的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 138–144.  
CAI YM, HUANG HY, HU WD, *et al*. Screening of mixed starter and its effect on processing characteristics and safety of fermented pork sausage [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(1): 138–144.
- [38] 李秀明, 杨华, 王洋, 等. 乳酸菌复配对红肠发酵中 N-亚硝胺生成的抑制作用[J]. *食品科学*, 2020, 41(6): 131–138.  
LI XM, YANG H, WANG Y, *et al*. Inhibitory effect of mixed cultures of lactic acid bacteria on N-nitrosamine production during sausage fermentation [J]. *Food Sci*, 2020, 41(6): 131–138.
- [39] XIAO Y, LI P, ZHOU Y, *et al*. Effect of inoculating *Lactobacillus pentosus* R3 on N-nitrosamines and bacterial communities in dry fermented sausages [J]. *Food Control*, 2018, 87: 126–134.
- [40] ENCINAS JP, MARIA T, DIAZ L, *et al*. Yeast populations on spanish fermented sausages [J]. *Meat Sci*, 2000, 54: 203–208.
- [41] 龚小会. 酵母产香特性及其对发酵肉制品风味品质的影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.  
GONG XH. Research on aroma-producing properties of yeast and its effect on flavor quality of fermented meat products [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [42] 吴丽红. 川味香肠发酵过程中微生物区系及发酵剂的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.  
WU LH. Study on the microbial flora in the process of sichuan type sausage fermentation and starter culture of sausage [D]. Chongqing: Southwest University, 2006.
- [43] 党喜军. 诺邓火腿化学成分测定及表面微生物多样性研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020.  
DANG XJ. Study on the chemical composition and the surface microbial diversity for Nuo Deng ham [D]. Kunming: Yunnan University, 2020.
- [44] OLESEN PT, STAHNKE LH. The influence of *Debaryomyces hansenii* and *Candida utilis* on the aroma formation in garlic spiced fermented sausages and model minces [J]. *Meat Sci*, 2000, 56(4): 357–368.
- [45] FRANCIOSA I, ALESSANDRIA V, DOLCI P, *et al*. Sausage fermentation



- and starter cultures in the era of molecular biology methods [J]. *Int J Food Microbiol*, 2018, 279: 26–32.
- [46] 兰沁洁, 宋杰, 陈沫, 等. 乳酸菌和酵母菌复配发酵对羊肉香肠食用品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(6): 24–33.  
LAN QJ, SONG J, CHEN M, *et al.* Effect of compound fermentation of lactic acid bacteria and yeast on eating quality of mutton sausages [J]. *Food Ferment Ind*, 2024, 50(6): 24–33.
- [47] 张佳敏, 张李智桐, 王卫, 等. 酿酒酵母对腊肉理化性质及微生物特性的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 145–153.  
ZHANG JM, ZHANG LZT, WANG W, *et al.* Effects of *Saccharomyces cerevisiae* on physicochemical properties and microbial characteristics of cured meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(14): 145–153.
- [48] 万晶莹. 传统宣威火腿酵母菌的筛选及对发酵香肠品质的影响[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.  
WAN JY. Screening yeast from traditional xuanwei ham and its effect on fermented sausage quality [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [49] COCOLIN L, DOLCI P, RANTSIOU K. Biodiversity and dynamics of meat fermentations: The contribution of molecular methods for a better comprehension of a complex ecosystem [J]. *Meat Sci*, 2011, 89(3): 296–302.
- [50] FLORES M, CORRAL S, CANO-GARCIA L, *et al.* Yeast strains as potential aroma enhancers in dry fermented sausages [J]. *Int J Food Microbiol*, 2015, 212: 16–24.
- [51] LV J, LIN XP, LIU MY, *et al.* Effect of *Saccharomyces cerevisiae* LXPSC1 on microorganisms and metabolites of sour meat during the fermentation [J]. *Food Chem*, 2023, 402: 134213.
- [52] 吴若茜, 尚昊, 颜旭, 等. 不同发酵剂对费力诺萨拉米品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6592–6598.  
WU RH, SHANG H, YAN X, *et al.* Effects of different starter on the quality of Felino Salami [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(20): 6592–6598.
- [53] 赵俊仁, 孔保华. 自然发酵风干肠中酵母菌生产性能的研究[J]. *食品科技*, 2010, 35(10): 27–31.  
ZHAO JR, KONG BH. The fermentation properties of yeast isolated from the Chinese-style naturally dry fermented sausages [J]. *Food Sci Technol*, 2010, 35(10): 27–31.
- [54] 高绍金, 李志江, 赵家圆, 等. 鲁氏酵母菌对发酵香肠品质的影响研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(4): 64–68, 79.  
GAO SJ, LI ZJ, ZHAO JY, *et al.* Effect of *Zygosaccharomyces rouxii* on the quality of fermented sausages [J]. *China Cond*, 2019, 44(4): 64–68, 79.
- [55] 王鹤霖, 范苗艺, 李昕, 等. 鲁氏酵母发酵香肠加工工艺的研究[J]. *肉类工业*, 2018, (5): 25–28.  
WANG HL, FAN ZY, LI X, *et al.* Study on the processing technology of the fermented sausage of *Zygosaccharomyces rouxii* [J]. *Meat Ind*, 2018, (5): 25–28.
- [56] LI YX, CAO ZX, YU ZH, *et al.* Effect of inoculating mixed starter cultures of *Lactobacillus* and *Staphylococcus* on bacterial communities and volatile flavor in fermented sausages [J]. *Food Sci Human Wellness*, 2023, 12(1): 200–211.
- [57] 范鑫洋, 张香美, 刘程鹏, 等. 酿酒酵母 Y-8 对发酵香肠品质与风味的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(7): 119–126.  
FAN XY, ZHANG XM, LIU CP, *et al.* Effect of *saccharomyces cerevisiae* Y-8 on the quality and flavor of fermented sausages [J]. *Food Sci*, 2024, 45(7): 119–126.
- [58] GARCÍA BB, SÁNCHEZ CD, ALARCON M, *et al.* Autochthonous yeast from pork and game meat fermented sausages for application in meat protection and aroma developing [J]. *Animals*, 2020, 10(12): 2340.
- [59] VANESA L, GRACIELA P, MARIA LP, *et al.* Determination of growth characteristics and lipolytic and proteolytic activities of *Penicillium* strains isolated from Argentinean salami [J]. *Int J Food Microbiol*, 2018, 35: 9613–9618.
- [60] 杨勇, 程燕, 廖定容, 等. 四川香肠中产蛋白酶和脂肪酶霉菌的分离与鉴定[J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 246–251.  
YONG Y, CHENG Y, LIAO DR, *et al.* Isolation and identification of proteinase and lipase producing mould from Sichuan sausages [J]. *Food Sci*, 2012, 33(15): 246–251.
- [61] 韦友兵, 吴香, 周辉, 等. 萨拉米发酵成熟过程中微生物菌群变化及对风味的影响[J]. *肉类研究*, 2018, 32(12): 48–54.  
WEI YB, WU X, ZHOU H, *et al.* Changes of microbial flora during the fermentation of Salami and their effect on flavor [J]. *Meat Res*, 2018, 32(12): 48–54.
- [62] 吴宝森, 孙玥晖, 刘姝韵, 等. 发酵肉制品中脂肪、蛋白质水解氧化与微生物的关系[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(3): 832–837.  
WU BS, SUN YH, LIU SY, *et al.* Relationship between hydrolysis and oxidation of fat and protein with microorganisms in fermented meat products [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(3): 832–837.
- [63] 蒋云升, 潘明, 汪志君, 等. 如皋火腿用霉菌性表面涂膜发酵剂的应用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(7): 81–84.  
JIANG YS, PAN M, WANG ZJ, *et al.* The study of application of fermentation on the surface of Rugao ham [J]. *Food Ferment Ind*, 2007, 33(7): 81–84.
- [64] 张雪梅. 四川香肠生产过程中理化特性、微生物特性及产葡萄球菌的筛选与应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.  
ZHANG XM. Physical, Chemical and microbial property of Sichuan sausage during processing and selection and application of *Staphylococcus* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [65] 李开雄, 蒋彩虹, 唐明翔, 等. 霉菌在发酵香肠中的应用[J]. *肉类工业*, 2004, (12): 33–36.  
LI KX, JIANG CH, TANG MX, *et al.* Application of mold in fermented sausages [J]. *Meat Ind*, 2004, (12): 33–36.
- [66] 程燕. 四川香肠中产蛋白酶和脂肪酶霉菌菌株的分离、鉴定及其初步应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.  
CHENG Y. Isolation and identification of the proteinase and lipase producing mould from Sichuan Sausage and its preliminary study in fermented sausage [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [67] LARANJO M, POTES ME, ELIAS M. Role of starter cultures on the safety of fermented meat products [J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 853.
- [68] 刘功明, 孙京新, 李鹏, 等. 纳地青霉发酵对鸡肉质构、游离氨基酸及挥发性物质变化的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(9): 289–295.  
LIU GM, SUN JX, LI P, *et al.* Texture, free amino acid content, and volatile compounds of chicken meat fermented by *penicillium nalgioense* [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(9): 289–295.
- [69] GARCIA ML, CASAS C, TOLEDO VM, *et al.* Effect of selected mould strains on the sensory properties of dry fermented sausages [J]. *Eur Food Res Technol*, 2001, 212(3): 287–291.
- [70] BRUNA JM, HIERRO EM, LORENZO DLH, *et al.* Changes in selected

- biochemical and sensory parameters as affected by the superficial inoculation of *Penicillium camemberti* on dry fermented sausages [J]. *Int J Food Microbiol*, 2003, 85(1): 112–125.
- [71] 蔡嘉铭, 王际辉, 陶冶, 等. 霉菌发酵剂对干发酵香肠的理化指标、氧化程度及风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(5): 17–22.  
CAI JM, WANG JH, TAO Y, *et al.* The effects of mould starter on the physicochemical parameters, oxidation degree and flavor of dry-cured sausage [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(5): 17–22.
- [72] 史崇颖, 黄艾祥, 田洋. 传统火腿微生物发酵作用的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2007, (7): 165–168.  
SHI CY, HUANG AIX, TIAN Y. Research development on the action of fermentation of ham's microorganism [J]. *Food Res Dev*, 2007, (7): 165–168.
- [73] 杨小莹, 肖珊, 庞煜, 等. 不同发酵剂对发酵香肠品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(18): 242–249.  
YANG XY, XIAO S, PANG Y, *et al.* Different starters on the quality of fermented sausage [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(18): 242–249.
- [74] 张巍. 微生物发酵技术提升传统川味香肠安全性的研究[D]. 成都: 成都大学, 2019.  
ZHANG W. Study on improving the safety of traditional Sichuan-style sausage by microbial fermentation [D]. Chengdu: Chengdu University, 2019.
- [75] 张楠. 川味香肠中组胺降解菌的筛选鉴定及其对组氨酸脱羧酶基因表达的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.  
ZANG N. Screening, Identification and influence on histidine decarboxylase gene expression of histamine degrading bacteriomes in Sichuan-style sausage [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [76] 张雅琳. 川味香肠发酵过程菌群结构变化与组胺生成相关性的研究[D]. 成都: 成都大学, 2020.  
ZHANG YL. Study on the correlation between microbial community structure changing and histamine production of Sichuan-flavor sausage during fermentation [D]. Chengdu: Chengdu University, 2020.
- [77] 王正莉, 王卫, 陈林, 等. 传统腌腊肉制品中微生物多样性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(8): 202–206.  
WANG ZL, WANG W, CHEN L, *et al.* Advances in the study of microbial diversity in traditional cured meat products [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(8): 202–206.
- [78] 谢科. 广式腊肠微生物群落分析及产地溯源研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
XIE K. Analysis of microbial community and study on traceability of producing area for cantonese sausage [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [79] 吴燕涛, 穆同娜, 李蓓, 等. 我国广式腊肠研究进展[J]. *食品科学*, 2011, 32(1): 246–250.  
WU YT, MU TN, LI B, *et al.* Research progress of cantonese sausage [J]. *Food Sci*, 2011, 32(1): 246–250.
- [80] 吴娜, 赵谋明. 广式腊肠加工过程中肠球菌变化规律及其分离鉴定[J]. *现代食品科技*, 2009, 25(12): 1380–1383.  
WU N, ZHAO MM. Study on the changes and the identification of *Enterococci* in cantonese sausage during processing [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2009, 25(12): 1380–1383.
- [81] 王新惠, 张雅琳, 孙劲松, 等. 基于高通量测序技术分析广味香肠中细菌群落结构和演替规律[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 334–340.  
WANG XH, ZHANG YL, SUN JS, *et al.* Bacterial community structure and succession law in cantonese sausage based on high-throughput sequencing technology [J]. *J Chin Inst Food Sci and Technol*, 2021, 21(3): 334–340.
- [82] 马春华, 陶荣. 红肠不同生产环节中菌落总数和大肠菌群数量变化规律初步研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(2): 536–539.  
MA CH, TAO R. Study on the total colony of bacteria and coliform group during the production process of sausage [J]. *J Food Saf Qual*, 2013, 4(2): 536–539.
- [83] 黄郑朝. 中国不同区域传统发酵香肠细菌多样性及发酵用菌株筛选研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021.  
HUANG ZZ. Study on the bacterial diversity of traditional fermented sausages in different regions of China and the fermentation characteristics of the target strains for fermentation [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



牟 燕, 主要研究方向为食品安全。  
E-mail: 2201467189@qq.com



乔 兴, 硕士, 副教授, 主要研究方向为烹饪工艺与食品加工。  
E-mail: 258937768@qq.com