周娇, 贾溅琳, 吉莉莉, 等. *Weissella jogaejeotgali* SL7 对发酵香肠品质及风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 312−323. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070137

ZHOU Jiao, JIA Jianlin, JI Lili, et al. Effect of *Weissella jogaejeotgali* SL7 on the Quality and Flavour of Fermented Sausages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 312−323. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070137

· 分析检测 ·

# *Weissella jogaejeotgali* SL7 对发酵香肠品质及风味的影响

周　娇[1], 贾溅琳[1], 吉莉莉[1,2], 彭海川[1], 谢姝瑶[1], 林昱竹[1], 张　鉴[1,3,*]

（1.成都大学肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106;
2.肉类食品质量提升与安全控制技术四川省工程研究中心, 四川成都 610106;
3.成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106）

**摘　要:** 为探究 *Weissella jogaejeotgali* SL7（*W. jogaejeotgali* SL7）对发酵香肠品质及风味的影响，以未添加 *W. jogaejeotgali* SL7 的发酵香肠作为对照，对发酵过程中香肠的理化性质（pH、水分含量、水分活度）、菌落总数、亚硝酸盐、过氧化值、硫代巴比妥酸、羰基、巯基和挥发性风味物质的动态变化规律及差异进行分析。结果表明，添加 *W. jogaejeotgali* SL7 的发酵香肠的 pH、水分含量、水分活度（$a_w$）和菌落总数显著（$P<0.05$）低于对照组（CK），亚硝酸盐含量（1.71 mg/kg）显著（$P<0.05$）低于 CK 组。*W. jogaejeotgali* SL7 发酵香肠的过氧化值（POV）、硫代巴比妥酸（TBARS）和羰基含量显著（$P<0.05$）低于 CK 组，而总巯基含量显著（$P<0.05$）高于 CK 组。采用 HS-SPEM-GC/MS 方法从 *W. jogaejeotgali* SL7 组香肠中测定出挥发性风味物质含量为 7668.93 μg/kg，包括醇类、萜烯类、醛类和酮类等 89 种挥发性风味物质，数量远高于其他组。在发酵香肠中添加 *W. jogaejeotgali* SL7 可显著降低其亚硝酸盐含量，有效抑制脂肪和蛋白质氧化，并促进风味物质的形成。

**关键词:** *Weissella jogaejeotgali* SL7, 发酵香肠, 品质, 风味, 亚硝酸盐

**中图分类号:** TS201.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0312−12

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025070137　　本文网刊:

# Effect of *Weissella jogaejeotgali* SL7 on the Quality and Flavour of Fermented Sausages

**ZHOU Jiao[1], JIA Jianlin[1], JI Lili[1,2], PENG Haichuan[1], XIE Shuyao[1], LIN Yuzhu[1], ZHANG Yin[1,3,*]**

（1.Sichuan Provincial Key Laboratory of Meat Processing, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
2.Sichuan Provincial Engineering Research Centre for Meat Product Quality Improvement and Safety Control Technology, Chengdu 610106, China;
3.College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China）

**Abstract:** To investigate the effect of *Weissella jogaejeotgali* SL7 (*W.jogaejeotgali* SL7) on the quality and flavor of fermented sausage, fermented sausage without SL7 was used as the control group. The dynamic changes and differences in physicochemical properties (pH, moisture content, water activity), total bacterial count, nitrite content, peroxide value, thiobarbituric acid (TBARS), carbonyl, sulfhydryl groups, and volatile flavor compounds during the fermentation process were analyzed. The results showed that the pH, moisture content, water activity ($a_w$), and total bacterial count of fermented sausage with *W. jogaejeotgali* SL7 added were significantly ($P<0.05$) lower than those of the control group (CK), and the nitrite content (1.71 mg/kg) was significantly ($P<0.05$) lower than that of the CK group. The peroxide value (POV),

**收稿日期:** 2025−07−10

**基金项目:** 四川省科技计划项目（2024-689）; 四川省科技计划项目（2025-1401）。

**作者简介:** 周娇（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与保藏, E-mail: zzhoujiao2023@163.com。

*** 通信作者:** 张鉴（1981−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与保藏, E-mail: zhangyin@cdu.edu.cn。

TBARS, and carbonyl content of *W. jogaejeotgali* SL7 fermented sausage were significantly ($P$<0.05) lower than those of the CK group, while the total sulfhydryl content was significantly ($P$<0.05) higher than that of the CK group. The HS-SPEM-GC/MS method was used to determine the content of volatile flavor compounds in *W. jogaejeotgali* SL group, which was 7668.93 μg/kg, including 89 types of volatile flavor compounds such as alcohols, terpenes, aldehydes, and ketones. The quantity was much higher than that of other groups. Adding *W. jogaejeotgali* SL7 to fermented sausage can significantly reduce its nitrite content, effectively inhibited fat and protein oxidation, and promote the formation of flavor compounds.

**Key words:** *Weissella jogaejeotgali* SL7; fermented sausage; quality; flavour; nitrite

发酵香肠是一种传统发酵肉制品，其传统的加工方式是依靠自然条件进行发酵和干燥，导致其品质不稳定[1]。随着现代食品发酵技术的发展，应用特定微生物发酵剂对其发酵过程进行调控成为了新趋势。这种方式不仅能有效抑制腐败微生物的生长，而且还能改善产品的品质[2]。微生物群落是发酵香肠的核心要素，由于不同地域的生产环境和工艺条件差异，发酵香肠中的微生物组成及其功能性存在诸多不确定性，这也使得发酵香肠中微生物的群落研究成为当前食品科学领域的热点方向。Liu 等[3] 在猪肉香肠中接种了沙克乳酸杆菌（*Lactobacillus sakei*），使发酵香肠成熟后的硬度、弹性、内聚力和咀嚼性得以提高，食用品质得到改善。Shao 等[4] 研究发现植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum*）的加入，有助于碳水化合物代谢，提高了发酵香肠中脂肪酸和氨基酸含量，促进了风味形成。Zhu 等[5] 利用植物乳杆菌（*L.plantarum*）降低了发酵香肠的亚硝酸盐含量，并改善了其色泽，提高了香肠的安全性。

发酵食品是魏斯氏菌的重要来源之一，如发酵香肠、奶酪、豆豉和豆瓣酱等。相较于植物乳杆菌和乳酸链球菌等乳酸菌来说，魏斯氏菌属是个相对较新的属，但在近年来一直是食品行业的研究热点。从食品技术的角度来看，魏斯氏菌可以促进风味形成，生成细菌素、有机酸和过氧化氢等抑菌物质，在食品工业中具有巨大的应用潜力。有研究表明，魏斯氏菌的作用不仅仅是体现在发酵食品优势菌株上面，该菌株对肉制品风味也具有突出贡献。Yu 等[6] 研究了烟熏马肉肠发酵过程中细菌群落与挥发性物质的关系，结果发现，*Weissella hellenica* 是发酵过程中的优势菌种之一，且对主要挥发性化合物 2,3-丁二醇、丁酸乙酯、己酸乙酯和 3-羟基-2-丁酮的形成有显著促进作用。Hu 等[7] 将东北地区传统干香肠中分离得到的 *Weissella hellenica* HRB6 接种在香肠模型上，探讨其在风味形成中的作用，发现 *W. hellenica* HRB6 能够促进香肠模型挥发性化合物的生成。可见，魏斯氏菌可以促进香肠风味形成，但是有关魏斯氏菌对发酵香肠品质及风味研究较少。为了进一步研究魏斯氏菌菌种对发酵香肠品质及安全性的影响，将本团队以四川腊肉中新发现的魏斯氏菌菌种（*Weissella jogaejeotgali* SL7）作为发酵剂应用于发酵香肠，探究了该 SL7 菌株对发酵香肠品质与风味的影响。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料和仪器

*Weissella jogaejeotgali* SL7　由课题组自四川腊肉中分离鉴定并保藏于广东省微生物菌株保藏中心（GDMCC），保藏编号为 GDMCC 62429；*Leuconostoc mesenteroides* CM　由课题组自四川腊肉中分离鉴定的菌种，现保藏在四川微生物菌种保藏中心（SICC），保藏编号为（SIlA9049）；新鲜猪肉、猪背脂、天然肠衣　购于成都市十陵镇好乐购超市；葡萄糖、食盐、味精、抗坏血酸　均为食品级，购于中国河南万邦；德氏乳杆菌（MRS）培养基、平板计数琼脂（PCA）培养基 BR 级　奥博星生物技术有限公司；2,4,6-三甲基吡啶、GC/MS 基准试剂　美国 Sigma-Aldrich 公司；亚硝酸钠、氯化钠、乙酸锌、亚铁氰化钾、石油醚、硫代硫酸钠、碘化钾、无水硫酸钠　均为分析纯，科隆化工有限公司（中国成都）；三氯乙酸、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、硫代巴比妥酸和乙二胺四乙酸二钠　分析纯，科密欧化学试剂有限公司（中国天津）；2,4-二硝基苯肼、盐酸胍、5,5'-二硫代双（2-硝基苯甲酸）　分析纯，上海源叶生物科技有限公司。

LDZX-75L 高温高压灭菌锅　上海申安医疗器械厂；OptiClean1300 超净工作台　力康生物医疗科技控股有限公司；HWS-150 恒温恒湿培养箱　天津市莱波特瑞仪器设备有限公司；TGL-1650 高速冷冻离心机　四川蜀科仪器有限公司；Multiskan-Sky-high 全波长酶标仪　美国 Thermo Fisher 公司；HD-6 水分活度仪　无锡市华科仪器仪表有限公司；PEN3.0 电子鼻　德国 AIRSENSE 公司；5977A-7890B 气相色谱-质谱（GC-MS）　美国 Agilent 公司；Testo 205 pH 计　德国 Testo 公司；SFY-6 水分测定仪　深圳冠亚技术科技有限公司；NH300 色差仪　深圳三恩驰科技公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　发酵香肠制作

1.2.1.1　发酵剂制备　*W. jogaejeotgali* SL7 与 *L. mesenteroides* CM 活化 2 代后，分别接种于 MRS 肉汤培养基中，37 ℃ 培养 18 h。取菌液于 4 ℃、6000 r/min 离心 10 min，用无菌生理盐水（0.85%，w/v）洗涤重悬菌体 2 次后并重悬调节浓度为 $10^7$ CFU/mL 备用。

1.2.1.2 香肠配料 香肠以猪前腿瘦肉和猪背脂为原料，配料包括（按原料肉照重量比计）：2.5% 葡萄糖、2.5% 食盐、1.5% 十三香、0.15% 味精、0.05% 抗坏血酸、0.01% 亚硝酸钠。

1.2.1.3 香肠加工工艺 瘦猪肉和猪背脂去除结缔组织，洗净后切割为块状（0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm），按 8:2 的比例混合，再加入配料混合均匀并于 4 ℃ 腌制 12 h，最后加入发酵剂使得活菌数约为 $10^6$ CFU/g。香肠共设置三组，第一组接种 *W. jogaejeotgali* SL7 发酵剂（记为 SL 组），第二组接种 *L. mesenteroides* CM 发酵剂（记为 CM 组），第三组添加无菌生理盐水作为空白对照组（记为 CK 组）。将肉糜灌入直径约为 3 cm 的天然猪肠衣中，用棉线扎为 10 cm 一截，进行后续的发酵成熟过程。具体步骤如下：第一阶段，20 ℃、85%~90%RH，3 d；第二阶段，40 ℃、30%~35%RH，3 d；第三阶段，9~12 ℃、50%~55%RH，4 d；第四阶段，4 ℃ 真空储藏，7 d，得到香肠成品。在香肠加工过程采集各阶段样品，用于各项指标测定。

1.2.2 理化指标测定 发酵香肠样品的 pH 利用校准后的 Testo 205 pH 计进行测定；香肠水分测定：样品去除肠衣切碎，称取 2.5 g 肉末样品，使用 SFY-6 水分测定仪测定发酵香肠的水分含量；水分活度测定：取 5 g 粉碎处理后的香肠肉末，采用饱和 NaCl 溶液校准后 HD-6 水分活度仪进行测定。每个样本重复测定 3 次。

1.2.3 亚硝酸盐含量、色泽、微生物总量及脂肪氧化测定 亚硝酸盐含量按照 GB 5009.33-2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》[8] 进行测定。取 5.0 g 破碎处理香肠样品加入 12.5 mL 饱和硼砂溶液（50 g/L $Na_2B_4O_7·10H_2O$）和 150 mL 纯水，100 ℃ 水浴加热 15 min。取出冷却至室温后转移到 200 mL 容量瓶，加入 5 mL 106 g/L 的亚铁氰化钾溶液和 5 mL 220 g/L 的乙酸锌溶液，混匀静置 30 min 以沉淀蛋白质，过滤得到试样。向 50 mL 试样比色管中定量加入上述滤液，向标样比色管加入不同体积的 $NaNO_2$ 标准溶液。分别向试样管和标样管加入 2 mL 对氨基苯磺酸溶液（0.4 g $C_6H_7NO_3S$ 溶解于 100 mL 20% HCl 溶液），混匀静置 3 min，再加入 1 mL 2 g/L 的盐酸萘乙二胺溶液，定容后静置 15 min，于波长 538 nm 处测吸光度。样品的亚硝酸盐含量通过 $NaNO_2$ 标准曲线进行计算，结果以 mg/kg 表示。

发酵香肠色泽测定参考 Zhang 等[9] 的方法并稍加修改。将香肠样品均匀切片（厚度约为 1 cm），用 NH300 型色差仪对 $L^*$、$a^*$、$b^*$ 值进行测定。测定前使用黑板、白板分别对色差仪进行校正。每个样品重复测定 6 次，取平均值。

微生物测定方法参照 GB 4789.2-2022《食品微生物学检验 菌落总数测定》[10] 和 GB 4789.35-2023《食品微生物学检验 乳酸菌检验》[11]。

香肠过氧化值（POV）测定参考 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》[12] 方法测定。香肠硫代巴比妥酸活性物质含量（TBARS）测定参考 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》[13] 方法测定。

1.2.4 蛋白氧化分析

1.2.4.1 总巯基含量测定 总巯基含量的测定根据 Ge 等[14] 的方法并稍加修改，称取 0.1 g 样品，按料液比 1:8 g/mL 加入焦磷酸盐提取缓冲液，冰浴匀浆后，4 ℃ 8000×g 离心 10 min，取上清待测，使用 5,5’二硫代双（2-硝基苯甲酸）（DTNB）显色法测定巯基含量，在 412 nm 波长下测定吸光度。总巯基含量用 13600 $L·mol^{-1}·cm^{-1}$ 的摩尔消光系数计算，结果以 μmol/g prot 表示。

1.2.4.2 羰基含量测定 根据 Ge 等[14] 的方法并稍加修改。取 2 g 破碎处理香肠样品加入用 10 mL 焦磷酸盐缓冲液（2 mol/L 焦磷酸钠，20 mol/L 马来酸，0.1 mol/L KCl，2 mol/L $MgCl_2$，2 mol/L EGTA，pH7.4）20000 r/min 冰水浴匀浆 2 min。取 1 mL 匀浆，用 20%（w/v）三氯乙酸（TCA）沉淀，12000 r/min 离心 5 min。用 1 mL 10%（w/v）TCA 混匀，12000×g 离心 5 min 后去除上清。用 1 mL 0.01 mol/L DNPH（溶解于 2 mol/L HCl）充分混合，另外取等量匀浆的用 2 mol/L HCl 替代 0.01 mol/L DNPH 作为空白处理，在黑暗中孵育 30 min。孵育完成后，加入 20%（w/v）TCA 溶液沉淀蛋白质，用乙醇和乙酸乙酯的混合液洗涤 3 次，然后将蛋白质溶解在 3 mL 盐酸胍（6 mol/L）溶液中，在 10000 r/min 离心 5 min 后测定上清液 370 nm 吸光度，使用 22000 $L·mol^{-1}·cm^{-1}$ 的摩尔消光系数计算羰基含量（μmol/g prot）。蛋白浓度通过经 HCl 水解处理后的空白对照溶液进行校准测定。

1.2.5 挥发性风味物质分析 参照 Zhang 等[9,15] 的方法并稍作修改。称取 3 g 经切碎处理的香肠样品于 20 mL 顶空瓶中。随后加入 1 μL 浓度为 2 μg/μL 的内标物 2,4,6-三甲基吡啶溶液，迅速压盖密封。将样品瓶置于 40 ℃ 恒温箱中平衡 15 min。然后，插入 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头（2 cm），在 40 ℃ 下顶空萃取 30 min。之后，将温度升至 60 ℃ 并维持该温度，继续萃取 30 min。萃取完成后，将 SPME 纤维头插入气相色谱进样口，在 250 ℃ 无分流模式下解吸 5 min。

GC 条件：初始柱温设置为 35 ℃，保持 2 min；以 2 ℃/min 速度提温至 75 ℃，保持 3 min；然后以 5 ℃/min 速度提温至 110 ℃，保持 32 min；再以 12 ℃/min 速度提温至 180 ℃，保持 2 min；最后以 10 ℃/min 提升至 220 ℃，保持 1 min。

MS 条件：质谱分析在离子源温度为 230 ℃ 和四极杆温度为 150 ℃ 下进行，扫描范围为 40~450 m/z，电子能量为 70 eV。

通过 GC-MS 耦合工作站的自动反褶积系统和 NIST 18.0 谱库，保留指数及质量匹配率超过 85% 的选择条件，来确认化学物质。

以 2,4,6-三甲基吡啶为内标，根据各待测组与内标的峰面积比，按下式计算各挥发性风味物质的相对含量(g/kg)：Ci=(Ai/AIs)×CIS，式中：Ci 为待测风味物质的含量(μg/kg)；Ai 为待测风味物质的峰面积；AIs 为内标物 2,4,6-三甲基吡啶的峰面积；CIS 为内标物在样品中的终浓度(μg/kg)，本实验中为 666.7 g/kg。

### 1.3　数据处理

每个指标重复 3 次或以上，实验数据采用 SPSS V25.0 进行分析。采用单因素方差分析(ANOVA)评估显著性，当 $P<0.05$ 认为有显著性差异。数据结果图表采用 Excel 2016 软件进行绘制。聚类热图采用 OriginPro 2023b 绘制。

## 2　结果与分析

### 2.1　发酵香肠理化指标分析

2.1.1　pH、水分与水分活度($a_w$)变化　*W. jogaejeotgali* SL7 对发酵香肠的 pH、水分含量与水分活度的影响见图 1。pH、水分与 $a_w$ 是保障肉制品感官质量、安全和稳定性的重要因素[16]，由图 1 所示，SL 组(接种了 *W. jogaejeotgali* SL7 组)和 CM 组(接种了 *L. mesenteroides* CM 组)乳酸菌发酵香肠的 pH、水分含量和 $a_w$ 变化趋势相似。SL 与 CM 组香肠的 pH 在第 3 d 时分别快速降低至最低值 5.09 和 5.12，成品香肠 pH 回升至 5.47 左右，显著($P<0.05$)低于空白组的 5.78。三组发酵香肠的水分含量与 $a_w$ 变化趋势一致，在第一和第二阶段水分含量与 $a_w$ 快速降低，随后趋于平缓，最终水分含量降低至 30% 左右，$a_w$ 降低至 0.8 左右，并且 CK 组香肠的水分含量与 $a_w$ 显著高于($P<0.05$)试验组菌发酵香肠。

在发酵阶段中，可能由于乳酸菌 *W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 发酵产生乳酸，导致香肠的 pH 快速降低。进入干燥成熟阶段后，在蛋白质降解产生的碱性游离氨基酸和其他碱性含氮物质的酸碱中和作用下，香肠 pH 有所回升[17]，但是两组发酵香肠的 pH 均显著($P<0.05$)低于空白对照组。有机酸积累会导致肌肉蛋白质变性与肌肉束收缩，使得肌原纤维内部和肌原蛋白质网络之间的水分流失，从而影响肉制品水分含量与 $a_w$ 值[18]。在乳酸菌发酵的影响下，SL 与 CM 两组发酵香肠成品的水分含量分别为 25.57% 和 24.04%，$a_w$ 分别为 0.794 和 0.791，均显著($P<0.05$)低于 CK 对照组。这可能是由于香肠发酵过程中，微生物的增殖消耗了更多的水分。Hu 等[19] 将 *Pediococcus pentosaceus*、*Lactobacillus curvatus* 和 *Lactobacillus sakei* 应用于哈尔滨风干肠的发酵，得到了类似结果。

### 2.2　亚硝酸钠含量

CK、SL 和 CM 三组发酵香肠加工过程中亚硝酸盐含量的变化情况如图 2 所示。在发酵阶段(0~2 d)$NaNO_2$ 含量迅速降低，SL 和 CM 两组香肠的 $NaNO_2$ 含量从初始含量 100 mg/kg 分别降低至 4.98 mg/kg 和 3.94 mg/kg，CK 组香肠 $NaNO_2$ 含量降低至 49.03 mg/kg，降解率分别为 95.02%、96.06%、和 57.97%。进入干燥成熟阶段(2~10 d)后，三组香肠 $NaNO_2$ 含量均持续下降，SL 和 CM 组降幅比 CK 组平缓。SL 与 CM 组成品发酵香肠的 $NaNO_2$ 含量分别为 1.71 mg/kg 和 3.30 mg/kg，显著($P<0.05$)低于对照组的 27.43 mg/kg。

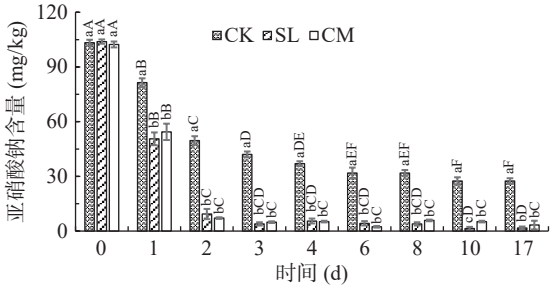



图 2　发酵香肠加工过程中 $NaNO_2$ 含量的变化

Fig.2　Changes in $NaNO_2$ content during fermented sausage processing

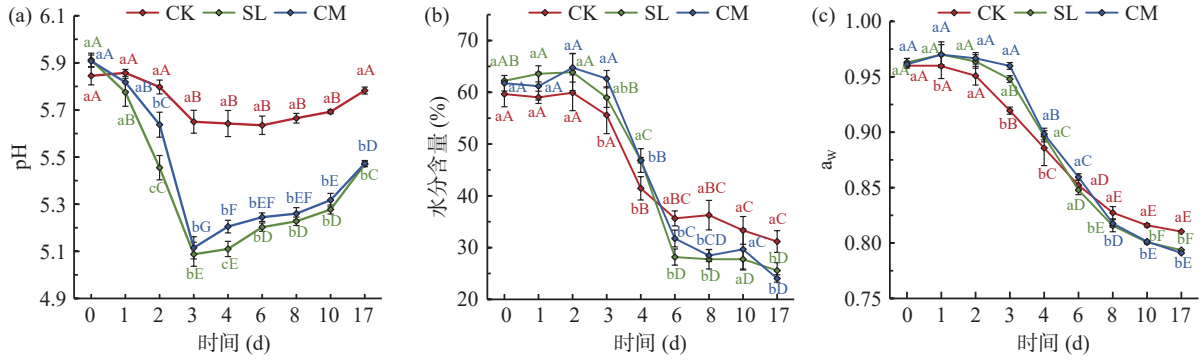



图 1　发酵香肠加工过程中 pH(a)、水分含量(b)和 $a_w$(c)的变化

Fig.1　Changes in pH (a), moisture (b) and $a_w$ (c) during fermented sausage processing

注：CK、SL 和 CM 分别为空白对照组香肠、*W. jogaejeotgali* SL7 试验组香肠和 *L. mesenteroides* CM 对照组香肠；大小写字母标注分别为组内和组间差异显著性($P<0.05$)；图 2~图 7 同。

结果表明，*W. jogaejeotgali* SL7 作为发酵剂能够显著降低发酵香肠中亚硝酸钠含量，成品香肠的亚硝酸盐含量远低于国家卫生健康委员会发布的 30 mg/kg 限量标准[20]。Chen 等[21] 将传统发酵猪肉（Nanx Wudl）中分离得到的 *L. plantarum* CMRC6 和 *L. sakei* CMRC15 两种乳酸菌应用于发酵香肠，也得到了相似的亚硝酸钠含量变化规律。乳酸菌可以通过酸和酶的作用来降解发酵肉制品中的亚硝酸盐[22]，$NO_2^-$会与 *W. jogaejeotgali* SL7 发酵产生的 $H^+$结合，生成不稳定的亚硝酸（$HNO_2$），随后分解为 $N_2O_3$ 与 $H_2O$，再进一步生成 NO 与 $NO_2$[23]，而亚硝酸盐还原酶能够促使亚硝酸盐降解并还原为 NO 或 $NH_3$。

## 2.3 色泽

发酵香肠的色泽是重要的品质指标之一，而亚硝酸盐在香肠诱人色泽形成中发挥着重要作用。为探究 *W. jogaejeotgali* SL7 降解发酵香肠亚硝酸盐是否会影响香肠色泽形成，对三组香肠的亮度值（$L^*$）、红度值（$a^*$）和黄度值（$b^*$）进行了测定，结果见表 1。

表 1 发酵香肠加工过程中色泽的变化

Table 1 Changes in color during fermented sausage processing

| 分组 | 天数(d) | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ |
|---|---|---|---|---|
| CK | 0 | $36.91\pm2.18^{aA}$ | $14.41\pm2.20^{aA}$ | $9.77\pm1.20^{aA}$ |
| | 2 | $34.48\pm1.77^{bAB}$ | $11.87\pm1.43^{bB}$ | $7.58\pm1.60^{aAB}$ |
| | 4 | $32.21\pm2.01^{bBC}$ | $12.68\pm0.94^{bAB}$ | $6.02\pm1.08^{aBC}$ |
| | 6 | $32.42\pm1.54^{cBC}$ | $9.93\pm0.94^{cC}$ | $5.38\pm0.90^{aBC}$ |
| | 8 | $31.71\pm2.10^{aBC}$ | $9.49\pm1.07^{bC}$ | $4.90\pm0.89^{aC}$ |
| | 10 | $31.95\pm2.75^{aBC}$ | $9.54\pm0.49^{bC}$ | $5.15\pm3.39^{aC}$ |
| | 17 | $30.85\pm2.45^{aC}$ | $9.68\pm0.35^{bC}$ | $5.80\pm1.37^{aBC}$ |
| CM | 0 | $36.33\pm2.68^{aBC}$ | $13.70\pm2.13^{aA}$ | $10.56\pm1.81^{aA}$ |
| | 2 | $37.78\pm1.33^{aB}$ | $13.54\pm0.79^{abA}$ | $9.45\pm2.32^{aA}$ |
| | 4 | $41.35\pm2.18^{aA}$ | $12.26\pm0.98^{bAB}$ | $5.96\pm1.54^{aB}$ |
| | 6 | $38.63\pm1.80^{aAB}$ | $11.51\pm1.31^{bB}$ | $5.37\pm1.40^{aB}$ |
| | 8 | $33.98\pm2.00^{aCD}$ | $11.25\pm1.02^{aB}$ | $4.90\pm0.89^{aB}$ |
| | 10 | $32.83\pm1.71^{aDE}$ | $10.76\pm1.28^{abB}$ | $5.44\pm1.43^{aB}$ |
| | 17 | $30.84\pm1.93^{aE}$ | $11.37\pm1.54^{aB}$ | $4.12\pm1.46^{aB}$ |
| SL | 0 | $33.72\pm2.31^{aCD}$ | $12.85\pm0.95^{aABC}$ | $7.51\pm1.10^{bA}$ |
| | 2 | $39.23\pm1.78^{aAB}$ | $14.54\pm2.04^{aA}$ | $9.20\pm1.62^{aA}$ |
| | 4 | $42.56\pm2.53^{aA}$ | $14.54\pm0.95^{aA}$ | $7.09\pm0.67^{aAB}$ |
| | 6 | $35.73\pm2.31^{bBC}$ | $13.11\pm0.99^{aAB}$ | $5.22\pm1.73^{aBC}$ |
| | 8 | $34.62\pm2.96^{aCD}$ | $12.59\pm0.88^{aBC}$ | $4.97\pm1.33^{aBC}$ |
| | 10 | $32.45\pm2.74^{aCD}$ | $11.77\pm1.60^{aBC}$ | $4.86\pm1.45^{aC}$ |
| | 17 | $31.79\pm3.56^{aD}$ | $11.26\pm0.90^{aC}$ | $4.87\pm2.09^{aC}$ |

注：CK、SL和CM分别为空白对照组香肠，*W. jogaejeotgali* SL7试验组香肠和*L. mesenteroides* CM对照组香肠。大小写字母标注分别为组内和组间差异显著性（$P<0.05$）。

空白对照组香肠（CK）亮度值 $L^*$随时间逐渐降低，而乳酸菌发酵香肠（SL 与 CM）的亮度值 $L^*$呈先上升后下降的趋势，在第 4 d 时分别达到最大值 42.56 和 41.35。香肠红度值 $a^*$整体上逐渐降低，在加工过程中（2~10 d）SL 组的 $a^*$要明显高于 CM 与 CK 组，第 17 d 时 SL 与 CM 组成品香肠 $a^*$分别为 11.26 和 11.37，均显著（$P<0.05$）高于 CK 组（9.68）。香肠样品的黄度值 $b^*$均逐渐降低，不同于 $a^*$，加工过程中香肠 $b^*$值的组间差异并不显著（$P>0.05$）。

Liu 等[24] 将 *Weissella cibaria* X31 和 *Weissella confusa* L2 菌株应用于香肠中，发现 *W. cibaria* X31 能够产生与肌红蛋白反应的一氧化氮，从而有助于亚硝基肌红蛋白的形成。此外，一些具有强产酸能力或者具有亚硝酸盐还原酶的微生物可以促进 $NO_2^-$通过酸降解或酶降解分解为 NO[25]。由图 1 可知，*W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 发酵香肠的 pH 更低，这可能是发酵组香肠红度值 $a^*$更高的原因之一。NO 与肌红蛋白或血红蛋白结合可以转化为稳定的呈鲜艳、亮红色的 MbNO 或 HbNO，起到更佳的呈色效果[26]。*W. jogaejeotgali* SL7 对发酵香肠色泽的作用可能是由于菌株的亚硝酸盐还原酶活性和较强的产酸能力。

## 2.4 微生物计数

亚硝酸盐腌制能够有效抑制肉制品中腐败细菌以及多种食源性病原体（肉毒梭状芽胞杆菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单增李斯特菌等）的生长繁殖[27−28]。为了解 *W. jogaejeotgali* SL7 发酵导致的亚硝酸盐含量降低是否会影响发酵香肠的微生物安全性，对加工过程中发酵香肠的菌落总数和乳酸菌数进行了测定。

发酵香肠加工过程中菌落总数和乳酸菌数结果如图 3 所示，三组香肠样品菌落总数和乳酸菌数均呈先上升后下降的变化规律。在发酵前期（0~2 d）菌落总数和乳酸菌数快速增加，添加乳酸菌发酵剂使得 SL 与 CM 组香肠的菌落总数和乳酸菌数显著

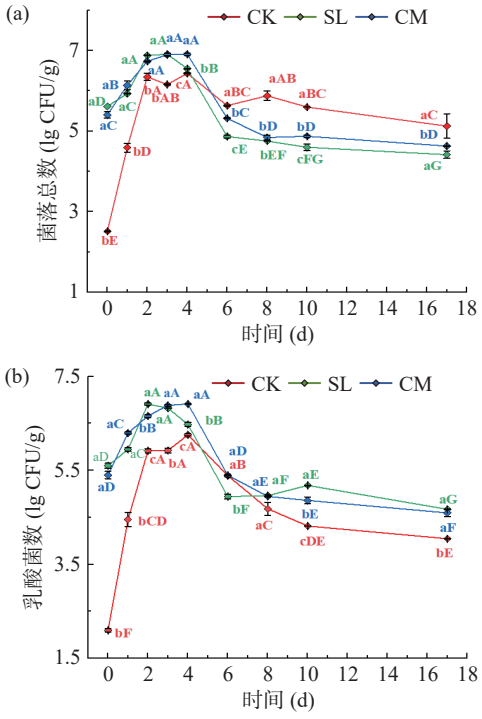



图 3 发酵香肠加工过程中菌落总数（a）与乳酸菌数（b）的变化

Fig.3 Changes of total colony count (a) and lactic acid bacteria (b) of fermented sausage

（$P$<0.05）高于 CK 组。发酵 2 d 后差异性变小。干燥阶段水分含量快速下降，发酵香肠菌落总数与乳酸菌数也随之下降。在自然风干与低温储藏期间，三组香肠的菌落总数和乳酸菌总体上呈缓慢降低的趋势，SL 和 CM 组成品香肠的菌落总数分别为 4.4 lg CFU/g 和 4.6 lg CFU/g，显著（$P$<0.05）低于 CK 组。乳酸菌数分别为 4.67 lg CFU/g 和 4.59 lg CFU/g，显著（$P$<0.05）高于 CK 组。

从微生物分析结果来看，在发酵期间适宜的温度与湿度条件下，*W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 快速生长，成为 SL 与 CM 组发酵香肠中的优势菌种，而 CK 组香肠还存在大量除乳酸菌以外的细菌。此外，相较于 SL 组，发酵香肠成品的菌落总数低于 CM 对照组，而乳酸菌数略高于 CM 组。魏斯氏菌发酵生成的乳酸导致香肠 pH 快速降低，使得病原菌及腐败菌的生长受到较强的抑制，而魏斯氏菌类乳酸菌代谢生成的细菌素等物质对细菌也有一定的抑制能力[29−30]。结果表明，*W. jogaejeotgali* SL7 应用于发酵香肠中可以在降低亚硝酸盐含量的同时保障食品的微生物安全性。

### 2.5　脂肪氧化

发酵香肠制品富含脂肪，在成熟过程中经常发生过度的脂肪氧化，导致香肠的哈喇味酸败形成，从而影响香肠食用品质[31]。为了确定 *W. jogaejeotgali* SL7 菌株对发酵香肠脂肪氧化的影响，将菌株应用于发酵香肠后，对加工过程中香肠样品的过氧化值（POV）与硫代巴比妥酸活性物质（TBARS）含量进行了测定。

发酵香肠加工过程中 POV 的变化如图 4 所示。SL7 试验组与对照组（CM 与 CK）发酵香肠的 POV 值均呈逐渐上升的趋势，在第 2~4 d 阶段 POV 值变化最大，第 4 d 时香肠的 POV 值比第 2 d 增加了 1 倍多。在成品发酵香肠中，SL 组香肠的 POV 值为 27.34 mg/100 g，显著（$P$<0.05）低于 CK 组（36.15 mg/100 g）与 CM 组（30.04 mg/100 g）。

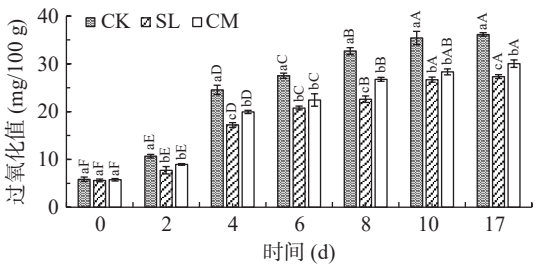



图 4　发酵香肠加工过程中过氧化值的变化

Fig.4　Changes in POV during fermented sausage processing

POV 是表征脂肪初级氧化产物含量的指标。从结果（图 4）来看，*W. jogaejeotgali* SL7 发酵香肠过氧化物含量最低，其次是 *L. mesenteroides* CM 对照组香肠，而 CK 对照组香肠的过氧化物含量最高。可见，*W. jogaejeotgali* SL7 能够较好地控制发酵香肠脂肪初级氧化程度，Wang 等[32] 报道了 *Lactobacillus sakei* 和 *Staphylococcus xylosus* 作为发酵剂对传统烟熏马肉香肠脂质氧化的影响，也得出了相似的结果。

TBARS 能够评判脂质次级氧化程度，其大小通过测定香肠次级氧化产物丙二醛含量来确定[33]。发酵香肠加工过程中 TBARS 值的变化如图 5 所示，其变化呈总体上升的趋势，香肠 TBARS 在发酵结束后缓慢上升。SL、CM 和 CK 三组发酵香肠成品的 TBARS 分别为 0.07、0.117 和 0.159 mg/100 g，且组间差异显著（$P$<0.05）。

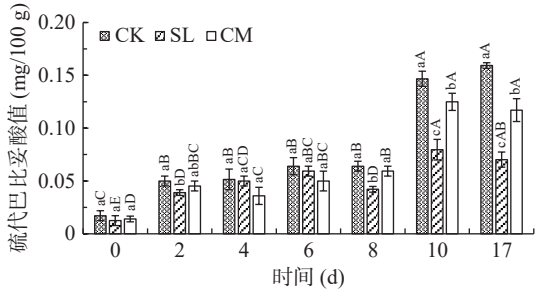



图 5　发酵香肠加工过程中硫代巴比妥酸值的变化

Fig.5　Changes in TBARS values during fermented sausage processing

结果表明，*W. jogaejeotgali* SL7 发酵香肠的脂肪次级氧化程度要低于 *L. mesenteroides* CM 对照组和 CK 对照组。脂肪氢原子解离会形成不稳定的自由基，进而与氧分子结合生成过氧自由基，过氧自由基通过攻击新的脂质分子形成大量不稳定的过氧化物，进一步分解成醛类、酮类、醇类等多种次级氧化产物[34]。发酵香肠的 TBARS 值在第 10 d 时迅速增加，这可能是初级氧化过程中累积的过氧化物发生不稳定分解引起的。由发酵香肠加工过程中 POV 与 TBARS 结果可知，*W. jogaejeotgali* SL7 能够有效控制脂肪氧化程度，这可能与乳酸菌产生的抗氧化酶和细胞外分泌抗氧化物有关[35]。

### 2.6　蛋白氧化

蛋白质的氧化可能导致蛋白质疏水性、构象和溶解度的改变，从而影响蛋白质的消化率[36]。为了探

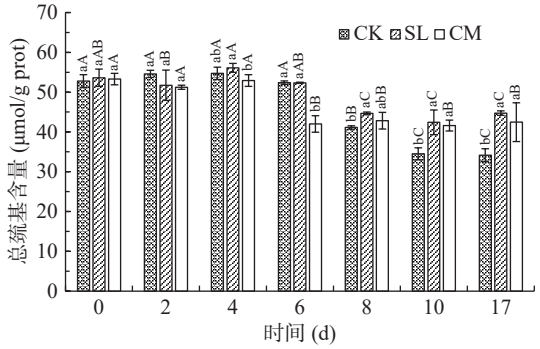



图 6　发酵香肠加工过程中总巯基含量的变化

Fig.6　Changes in total thiol content during fermented sausage processing

究 *W. jogaejeotgali* SL7 菌株对发酵香肠蛋白氧化的影响，对加工过程中香肠样品的总巯基含量和羰基含量进行了测定。

蛋白质表面的半胱氨酸残基氧化会导致巯基减少，因此总巯基值可以表示蛋白氧化的程度，巯基值越低则氧化程度越高[37]。加工过程中发酵香肠总巯基含量变化情况如图 6 所示，SL、CM 和 CK 三组发酵香肠的总巯基含量随加工时间的推进而缓慢降低，香肠总巯基含量组间差异不明显，进入成熟与储藏阶段（10~17 d）后 CK 组香肠的总巯基含量显著（$P<0.05$）低于 SL 与 CM 组。成品香肠的总巯基含量分别为 34.15 μmol/g prot（CK）、44.74 μmol/g prot（SL）和 42.46 μmol/g prot（CM）。

食品体系中蛋白质氧化程度常采用蛋白羰基的 2,4-二硝基苯肼（DNPH）衍生化测定方法进行确定，羰基含量越高表明蛋白氧化程度越高[38]。加工过程中香肠羰基含量变化结果如图 7 所示，三组发酵香肠的羰基含量均呈逐渐上升的趋势，说明香肠氧化程度随加工时间延长而逐渐加深。处理组（SL 与 CM）在加工时间为 2、4、6、10、17 d 时的羰基含量均要低于 CK 对照组，其中 SL 组的羰基含量在加工全过程中均低于 CK 组，且成品香肠的羰基含量为 1.21 μmol/g prot。

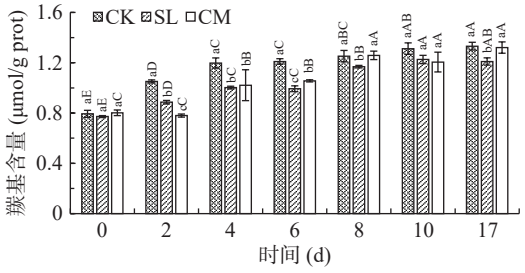



图 7 发酵香肠加工过程中羰基含量的变化

Fig.7 Changes in carbonyl content during fermented sausage processing

由香肠总巯基含量与羰基含量结果可知，接种 *W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 乳酸菌发酵剂能够有效的抑制蛋白氧化程度，并且 *W. jogaejeotgali* SL7 的抗氧化作用优于 *L. mesenteroides* CM。Ge 等[14] 探究 *L. plantarum* NJAU-01 对发酵香肠蛋白氧化的抑制作用时得出了相似的结果。Mei 等[39] 发现 *L. plantarum strain* P3 同样具备降低中式香肠脂质和蛋白质氧化的能力。有文章指出，乳酸菌抑制蛋白质氧化的作用可能与金属离子螯合、抗氧化代谢产物分泌和抗氧化酶表达密切相关[40]。

### 2.7 挥发性风味物质组成

接种发酵剂（SL 和 CM）和未添加发酵剂（CK）的成品香肠的挥发性风味物质，结果如表 2 所示。发酵香肠中共检测得到了包括萜烯类 21 种、醇类 27 种、酯类 12 种、醛类 11 种、酮类 7 种、醚类 5 种、酸类 4 种以及 12 种其他类共 99 种挥发性风味物质。CK 组香肠检测出 73 种，包括萜烯类 18 种、醇类 20 种、酯类 6 种、醛类 8 种、酮类 6 种、醚类 3 种、酸类 4 种以及 8 种其他类挥发性化合物，总含量为 7631.13 μg/kg；*L. mesenteroides* CM 组检测出 86 种，包括萜烯类 19 种、醇类 26 种、酯类 10 种、醛类 7 种、酮类 5 种、醚类 5 种、酸类 4 种以及 10 种其他类挥发性化合物，总含量为 5596.61 μg/kg；而 *W. jogaejeotgali* SL7 处理组共检测出共 89 种挥发性化合物，包括萜烯类 19 种、醇类 26 种、酯类 10 种、醛类 8 种、酮类 6 种、醚类 4 种、酸类 4 种以及 12 种其他类，总含量为 7668.93 μg/kg。

对比三组发酵香肠风味物质种类数量和风味物质的含量可知，SL 香肠中挥发性风味物质种类数量和风味物质含量最多，其次是 CK 和 CM 组香肠，其中 CM 组香肠的挥发性风味物质含量显著（$P<0.05$）低于其他两组。结果表明，接种 *W. jogaejeotgali* SL7 发酵剂会影响发酵香肠挥发性风味物质的组成，这与 Hu 等[41] 的研究结果相似。结果表明，*W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 发酵香肠具有较为相似的风味组成，都能够影响发酵香肠的风味特征。

发酵香肠中共检测到 21 种萜烯类化合物（CK18 种、CM19 种、SL19 种），含量分别为 3921.3 μg/kg（CK）、1642.22 μg/kg（CM）和 2566.55 μg/kg（SL），并且组间具有显著（$P<0.05$）差异。一般而言，萜类化合物绝大多数源于辅料中香料和辣椒粉，本研究各组辅料添加量一致，萜类含量差异主要由不同发酵菌株的微生物代谢差异引起。三个处理组香肠中均检测出较高含量的（+）-柠檬烯、*β*-石竹烯、*γ*-松油烯和苯乙烯等萜烯类化合物。其中，（+）-柠檬烯是一种单环单萜，是橙子、柚子和柠檬中精油的主要成分，气味阈值较低（34 μg/kg），而 *β*-石竹烯可以赋予香肠木香和辛香味，大多来源于黑胡椒和丁香等香料物质[42]。

醇类主要来源于脂类的氧化和降解，具有宜人的果味和花香[43]。除不饱和醇外，一般醇类化合物的气味阈值相对较高[44]。在香肠样品挥发性风味物质中，醇类化合物种类数量最多，空白组香肠共检测到 20 种，而 *W. jogaejeotgali* SL7 试验组发酵香肠和 *L. mesenteroides* CM 对照组发酵香肠都检测到 26 种。总体来看，大多数检出化合物风味阈值较高，但桉叶油醇和芳樟醇的风味阈值较低，并且在检出醇类物质中的含量占比较高。其中，芳樟醇具有花和薰衣草样的香气味道，在哈尔滨香肠中也检测出较高含量的芳樟醇[19]。Yu 等[45] 在湘西香肠中也检测出桉叶油醇和芳樟醇，并认为这两种化合物是湘西香肠的关键香气物质，同时指出它们应该是来源于香料。

酸和醇类化合物在微生物酯酶作用下会发生酯化反应，生成具有特有水果味和花香味且香气阈值较低的酯类化合物[46]。本研究共从发酵香肠中检测出

表 2　发酵香肠挥发性风味物质

Table 2　Volatile flavor compounds in fermented sausages

| No. | CAS | 化合物名称 | 化学式 | OT（μg/kg） | 含量（μg/kg） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | CK | CM | SL |
| | | 萜类(21) | | | | | |
| 1 | 17699-14-8 | (-)-Alpha-荜澄茄油烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 18.45±3.73$^{b}$ | 20.59±2.67$^{b}$ | 30.56±3$^{a}$ |
| 2 | 3856-25-5 | (-)-Alpha-蒎烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 83.12±10.97$^{b}$ | 91.1±6.79$^{b}$ | 118.29±8.78$^{a}$ |
| 3 | 5989-27-5 | (+)-柠檬烯 | $C_{10}H_{16}$ | 34 | 1176.28±106.76$^{a}$ | 548.38±125.79$^{b}$ | 1055.27±79$^{a}$ |
| 4 | 17699-16-0 | 反式水合桧烯 | $C_{10}H_{18}O$ | 55000 | / | 8.1±1.22$^{b}$ | 10.39±0.36$^{a}$ |
| 5 | 109-67-1 | 1-戊烯 | $C_{5}H_{10}$ | 92000 | 1.64±0.38$^{a}$ | 1.72±0.37$^{a}$ | 1.26±0.25$^{a}$ |
| 6 | 637-69-4 | 4-甲氧基苯乙烯 | $C_{9}H_{10}O$ | n.a. | 5.13±1.46$^{a}$ | 5.87±1.5$^{a}$ | 4.2±0.78$^{a}$ |
| 7 | 16729-01-4 | (+)-delta-紫穗槐烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | / | 24.15±3.27$^{a}$ | 26.47±5.23$^{a}$ |
| 8 | 10208-80-7 | *α*-衣兰油烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 6.14±0.74$^{b}$ | 10.37±1.33$^{a}$ | / |
| 9 | 21391-99-1 | A-二去氢菖蒲烯 | $C_{15}H_{20}$ | n.a. | 0.82±0.84$^{a}$ | 1.16±1.01$^{a}$ | 2.99±1.86$^{a}$ |
| 10 | 644-30-4 | A-姜黄烯 | $C_{15}H_{22}$ | n.a. | 23.71±6.39$^{b}$ | 20.46±2.66$^{b}$ | 42.78±6.85$^{a}$ |
| 11 | 6753-98-6 | *α*-律草烯 | $C_{15}H_{24}$ | 16 | 12.83±1.65$^{a}$ | 12.45±4.4$^{a}$ | 18.79±2.52$^{a}$ |
| 12 | 20307-83-9 | B- 倍半水芹烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 6.64±2.82$^{b}$ | 5.37±0.97$^{b}$ | 10.62±1.34$^{a}$ |
| 13 | 87-44-5 | *β*-石竹烯 | $C_{15}H_{24}$ | 64 | 190.9±26.53$^{a}$ | 158.73±28.96$^{a}$ | 202.28±8.64$^{a}$ |
| 14 | 30021-74-0 | *γ*-衣兰油烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 5.95±0.93$^{b}$ | 10.07±2.44$^{a}$ | 9.16±0.46$^{a}$ |
| 15 | 99-85-4 | *γ*-松油烯 | $C_{10}H_{16}$ | 64 | 98.67±7.58$^{b}$ | 89.95±15.84$^{b}$ | 150.27±14.37$^{a}$ |
| 16 | 483-76-1 | Δ-杜松烯 | $C_{15}H_{24}$ | n.a. | 20.69±5.8$^{b}$ | 25.02±3.91$^{b}$ | 35.86±2.88$^{a}$ |
| 17 | 100-42-5 | 苯乙烯 | $C_{8}H_{8}$ | 65 | 2157.44±210.31$^{a}$ | 530.4±100.17$^{b}$ | 648.99±93.7$^{b}$ |
| 18 | 546-79-2 | 水合桧烯 | $C_{10}H_{18}O$ | n.a. | 12.93±2.75$^{a}$ | 8.33±0.91$^{b}$ | / |
| 19 | 123-35-3 | 月桂烯 | $C_{10}H_{16}$ | 14 | 33.34±7.42$^{a}$ | / | 44.43±12.54$^{a}$ |
| 20 | 99-87-6 | 对伞花烃 | $C_{10}H_{14}$ | 150 | / | / | 68.38±3.56 |
| 21 | 527-84-4 | 邻伞花烃 | $C_{10}H_{14}$ | n.a. | 66.61±13.66$^{b}$ | 69.99±1.76$^{ab}$ | 85.57±1.42$^{a}$ |
| | | 小计 | | | 3921.3±192.3$^{a}$ | 1642.22±244.33$^{c}$ | 2566.55±48.79$^{b}$ |
| | | 醇类(27) | | | | | |
| 1 | 20126-76-5 | (-)-4-萜品醇 | $C_{10}H_{18}O$ | n.a. | 38.2±3.62$^{b}$ | / | 45.19±2.69$^{a}$ |
| 2 | 24347-58-8 | (2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇 | $C_{4}H_{10}O_{2}$ | 95.1 | 65.72±13.76$^{a}$ | 51.4±16.69$^{a}$ | 55.57±6.28$^{a}$ |
| 3 | 19132-06-0 | (2S,3S)-(+)-2,3-丁二醇 | $C_{4}H_{10}O_{2}$ | n.a. | / | 11.61±4.15$^{a}$ | 11.03±0.32$^{a}$ |
| 4 | 1517-69-7 | (R)-(+)-1-苯基乙醇 | $C_{8}H_{10}O$ | n.a. | 1.76±0.32$^{a}$ | 1.13±1.95$^{a}$ | 0.96±1.67$^{a}$ |
| 5 | 513-85-9 | 2,3-丁二醇 | $C_{4}H_{10}O_{2}$ | 20000 | / | 65.26±7.8$^{a}$ | 12.24±2.07$^{b}$ |
| 6 | 104-76-7 | 2-乙基己醇 | $C_{8}H_{18}O$ | 25482.2 | 20.38±5.62$^{a}$ | 31.96±8.63$^{a}$ | 28.04±4.55$^{a}$ |
| 7 | 122-97-4 | 3-苯丙醇 | $C_{9}H_{12}O$ | n.a. | 17.63±7.49$^{b}$ | 14.53±1.9$^{b}$ | 29.67±3.37$^{a}$ |
| 8 | 505-10-2 | 3-甲硫基丙醇 | $C_{4}H_{10}OS$ | 123.23 | / | 4.12±0.77$^{a}$ | 4.28±1.04$^{a}$ |
| 9 | 562-74-3 | 4-萜烯醇 | $C_{10}H_{18}O$ | 1200 | / | 94.73±14.87$^{a}$ | 54.44±9.28$^{b}$ |
| 10 | 536-60-7 | 4-异丙基苯甲醇 | $C_{10}H_{14}O$ | n.a. | 5.13±1.35$^{c}$ | 10.19±1.47$^{b}$ | 13.44±1.44$^{a}$ |
| 11 | 7299-42-5 | alpha,alpha-二甲基-4-亚甲基环己烷甲醇 | $C_{10}H_{18}O$ | n.a. | 6.82±2.17$^{a}$ | 6.29±0.77$^{a}$ | 8.07±1.18$^{a}$ |
| 12 | 98-85-1 | DL-1-苯乙醇 | $C_{8}H_{10}O$ | 479 | / | 2.96±0.38$^{a}$ | 3.15±2.74$^{a}$ |
| 13 | 98-55-5 | *α*-松油醇 | $C_{10}H_{18}O$ | 86 | 69.62±4.49$^{b}$ | 147.35±17.72$^{a}$ | 136.77±3.63$^{a}$ |
| 14 | 470-82-6 | 桉叶油醇 | $C_{10}H_{18}O$ | 1.1 | 299.94±55.03$^{a}$ | 342.59±29.76$^{a}$ | 210.47±9.41$^{b}$ |
| 15 | 100-51-6 | 苯甲醇 | $C_{7}H_{8}O$ | 2546.21 | 5.87±0.19$^{c}$ | 10.06±1.85$^{b}$ | 19.44±1.71$^{a}$ |
| 16 | 60-12-8 | 苯乙醇 | $C_{8}H_{10}O$ | 564.23 | 14.47±2.78$^{b}$ | 14.48±2.06$^{b}$ | 25.41±2.67$^{a}$ |
| 17 | 56-81-5 | 丙三醇 | $C_{3}H_{8}O_{3}$ | >20000 | 3.69±4.35$^{a}$ | 0.67±1.16$^{a}$ | / |
| 18 | 33467-76-4 | 反-2-庚烯-1-醇 | $C_{7}H_{14}O$ | 4172 | / | 0.79±1.37$^{a}$ | 3.52±3.09$^{a}$ |
| 19 | 78-70-6 | 芳樟醇 | $C_{10}H_{18}O$ | 6 | 247.74±61.11$^{a}$ | 98.61±16.33$^{b}$ | 227.35±48.79$^{a}$ |
| 20 | 104-54-1 | 肉桂醇 | $C_{9}H_{10}O$ | 77 | 48.3±11.92$^{c}$ | 149.92±23.7$^{b}$ | 331.63±34.2$^{a}$ |
| 21 | 1197-01-9 | 三甲基苯甲醇 | $C_{10}H_{14}O$ | n.a. | 3.1±0.69$^{a}$ | 3.37±1.23$^{a}$ | 2.96±1.04$^{a}$ |
| 22 | 78-83-1 | 异丁醇 | $C_{4}H_{10}O$ | 6505.2 | 1.61±1.47$^{a}$ | 6.31±1.15$^{a}$ | 3.71±4.65$^{a}$ |
| 23 | 123-51-3 | 异戊醇 | $C_{5}H_{12}O$ | 4 | 33.46±6.84$^{c}$ | 100.76±11.92$^{a}$ | 62.11±9.05$^{b}$ |
| 24 | 71-36-3 | 正丁醇 | $C_{4}H_{10}O$ | 459.2 | 11.6±2.56$^{a}$ | 16.64±5.65$^{a}$ | 11.16±1.07$^{a}$ |
| 25 | 111-27-3 | 正己醇 | $C_{6}H_{14}O$ | 5.6 | 6.96±0.66$^{a}$ | 6.97±6.6$^{a}$ | 6.32±5.47$^{a}$ |
| 26 | 143-08-8 | 正壬醇 | $C_{9}H_{20}O$ | 45.5 | / | 2.84±0.41$^{a}$ | 3.68±1.42$^{a}$ |
| 27 | 111-87-5 | 正辛醇 | $C_{8}H_{18}O$ | 125.8 | 4.41±1.93$^{a}$ | 5.04±0.93$^{a}$ | 6.53±2$^{a}$ |
| | | 小计 | | | 906.43±52.61$^{b}$ | 1200.56±121.65$^{a}$ | 1317.12±82.22$^{a}$ |

**续表 2**

| No. | CAS | 化合物名称 | 化学式 | OT(μg/kg) | 含量(μg/kg) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | CK | CM | SL |
| | | 酯类(12) | | | | | |
| 1 | 20347-65-3 | 1-乙酸冰片酯 | $C_{12}H_{20}O_2$ | n.a. | 13.37±2.58 | / | / |
| 2 | 687-47-8 | L(-)-乳酸乙酯 | $C_5H_{10}O_3$ | n.a. | / | 28.12±5.34$^a$ | 23.89±2.34$^a$ |
| 3 | 93-89-0 | 苯甲酸乙酯 | $C_9H_{10}O_2$ | 55.56 | / | 2.11±0.53$^a$ | 0.98±0.89$^b$ |
| 4 | 4192-77-2 | 反式-肉桂酸乙酯 | $C_{11}H_{12}O_2$ | 165 | 48.62±6.21$^a$ | 26.88±6.1$^b$ | 25.03±2.16$^b$ |
| 5 | 110-38-3 | 癸酸乙酯 | $C_{12}H_{24}O_2$ | 5 | / | 2.66±2.35$^a$ | 7.28±0.63$^a$ |
| 6 | 103-26-4 | 桂酸甲酯 | $C_{10}H_{10}O_2$ | 120 | 192.64±41.58$^a$ | 93.73±18.26$^b$ | 73.37±18.79$^b$ |
| 7 | 103-72-0 | 硫代异氰酸苯酯 | $C_7H_5NS$ | 2100 | 10.79±2.31$^a$ | 6.47±3.09$^a$ | / |
| 8 | 106-32-1 | 辛酸乙酯 | $C_{10}H_{20}O_2$ | 19.3 | 2.44±2.15$^b$ | 6.79±2.64$^{ab}$ | 11.83±3.52$^a$ |
| 9 | 80-26-2 | 乙酸松油酯 | $C_{12}H_{20}O_2$ | 2500 | 5.69±1.13$^b$ | 5.29±1.17$^b$ | 8.62±1.19$^a$ |
| 10 | 5655-61-8 | 左旋乙酸冰片酯 | $C_{12}H_{20}O_2$ | n.a. | / | 10.45±1.97$^a$ | 10.79±1.4$^a$ |
| 11 | 1000309-20-2 | 亚硫酸-2-乙基己基酯 | $C_{14}H_{30}O_3S$ | n.a. | / | 0.88±0.77$^a$ | 1.65±1.44$^a$ |
| 12 | 1000309-19-0 | 亚硫酸-2-乙基己基异己酯 | $C_{14}H_{30}O_3S$ | n.a. | / | / | 1.68±1.54 |
| | | 小计 | | | 273.54±35.04$^a$ | 183.4±22.83$^b$ | 165.11±19.02$^b$ |
| | | 醛类(11) | | | | | |
| 1 | 135-02-4 | 2-甲氧基苯甲醛 | $C_8H_8O_2$ | 174 | / | / | 1.9±0.38 |
| 2 | 1197-15-5 | 4-(1-甲基乙基)-1,3-环己二烯-1-甲醛 | $C_{10}H_{14}O$ | n.a. | 5.92±1.63$^a$ | 2.21±1.92$^b$ | 5.92±0.71$^a$ |
| 3 | 122-03-2 | 4-异丙基苯甲醛 | $C_{10}H_{12}O$ | 400 | 84.49±18.4$^a$ | 31.33±4.83$^b$ | 50.22±5.04$^b$ |
| 4 | 100-52-7 | 苯甲醛 | $C_7H_6O$ | 750.89 | 46.27±11.1$^c$ | 209.39±34.41$^b$ | 265.64±28.87$^a$ |
| 5 | 123-11-5 | 对甲氧基苯甲醛 | $C_8H_8O_2$ | 47 | 11.22±2.38$^{ab}$ | 9.29±1.22$^b$ | 12.83±0.75$^a$ |
| 6 | 25152-84-5 | 反式-2,4-癸二烯醛 | $C_{10}H_{16}O$ | 0.077 | 2.15±1.93 | / | / |
| 7 | 14371-10-9 | 反式肉桂醛 | $C_9H_8O$ | 6000 | 117.47±29.48$^a$ | / | 65.63±6.12$^a$ |
| 8 | 120-57-0 | 胡椒醛 | $C_8H_6O_3$ | 62 | 1.83±0.37 | / | / |
| 9 | 124-19-6 | 壬醛 | $C_9H_{18}O$ | 1.1 | 14.16±6.24$^a$ | 9.8±4.32$^a$ | 12.99±2.57$^a$ |
| 10 | 57194-69-1 | 顺式肉桂醛 | $C_9H_8O$ | 69 | / | 44.15±7.81 | / |
| 11 | 2765/11/9 | 正十五碳醛 | $C_{15}H_{30}O$ | 1000 | / | 1.96±1.75$^a$ | 3.52±3.5$^a$ |
| | | 小计 | | | 283.5±44.44$^b$ | 308.13±32.68$^b$ | 418.65±31.02$^a$ |
| | | 酮类(7) | | | | | |
| 1 | 821-55-6 | 2-壬酮 | $C_9H_{18}O$ | 41 | 3.33±0.53 | / | / |
| 2 | 513-86-0 | 3-羟基-2-丁酮 | $C_4H_8O_2$ | 14 | 345.08±51.76$^a$ | 10.66±2.44$^b$ | 16.31±4.6$^b$ |
| 3 | 98-86-2 | 苯乙酮 | $C_8H_8O$ | 65 | 19.33±3.79$^a$ | 9.42±0.92$^b$ | 17.97±3.3$^a$ |
| 4 | 937-30-4 | 对乙基苯乙酮 | $C_{10}H_{12}O$ | n.a. | / | / | 43.53±4.57 |
| 5 | 1195-79-5 | 葑酮 | $C_{10}H_{16}O$ | 440 | 33.29±2.82$^a$ | 28.31±5.12$^a$ | 35.81±4.93$^a$ |
| 6 | 89-81-6 | 胡椒酮 | $C_{10}H_{16}O$ | 680 | 9.15±2.43$^b$ | 16.18±1.42$^a$ | 12.49±2.62$^{ab}$ |
| 7 | 577-16-2 | 邻甲基苯乙酮 | $C_9H_{10}O$ | n.a. | 24.76±6.15$^a$ | 15.57±2.39$^b$ | 17.96±1.21$^{ab}$ |
| | | 小计 | | | 434.93±46.35$^a$ | 80.14±8.81$^b$ | 144.07±12.66$^b$ |
| | | 醚类(5) | | | | | |
| 1 | 140-67-0 | 4-烯丙基苯甲醚 | $C_{10}H_{12}O$ | 6 | 512.63±134.66$^{ab}$ | 392.56±69.02$^b$ | 692.88±114.72$^a$ |
| 2 | 115-10-6 | 甲醚 | $C_2H_6O$ | n.a. | 285.63±33.69$^b$ | 781.86±112.01$^a$ | 756.55±125.52$^a$ |
| 3 | 607-91-0 | 肉豆蔻醚 | $C_{11}H_{12}O_3$ | 30 | / | 3.37±0.59$^a$ | 0.35±0.61$^b$ |
| 4 | 122-99-6 | 乙二醇苯醚 | $C_8H_{10}O_2$ | n.a. | / | 1.64±0.24 | / |
| 5 | 104-46-1 | 茴香醚 | $C_{10}H_{12}O$ | 50 | 625.84±102.12$^b$ | 566.83±75.13$^b$ | 1028.42±195.81$^a$ |
| | | 小计 | | | 1424.1±170.91$^b$ | 1746.25±160.56$^b$ | 2478.2±171.66$^a$ |
| | | 酸类(4) | | | | | |
| 1 | 64-19-7 | 冰醋酸 | $C_2H_4O_2$ | 99000 | 132.21±6.71$^b$ | 245.55±40.14$^a$ | 258.98±39$^a$ |
| 2 | 107-92-6 | 丁酸 | $C_4H_8O_2$ | 2400 | 3.4±3$^a$ | 4.69±3.17$^a$ | 6.67±2.72$^a$ |
| 3 | 142-62-1 | 正己酸 | $C_6H_{12}O_2$ | 890 | 3.3±0.7$^b$ | 2.93±0.54$^b$ | 6±0.2$^a$ |
| 4 | 109-52-4 | 正戊酸 | $C_5H_{10}O_2$ | 11000 | 1.53±2.38$^a$ | 0.38±0.66$^a$ | 3.73±3.36$^a$ |
| | | 小计 | | | 140.44±6.2$^b$ | 253.55±33.45$^a$ | 275.38±32.2$^a$ |
| | | 其他(12) | | | | | |
| 1 | 1487-18-9 | 2-乙烯基呋喃 | $C_6H_6O$ | n.a. | 2.25±0.22$^a$ | / | 1.01±1.74$^a$ |
| 2 | 1072-83-9 | 2-乙酰基吡咯 | $C_6H_7NO$ | 58585.3 | / | 0.64±0.09$^a$ | 0.95±1.04$^a$ |
| 3 | 108-95-2 | 苯酚 | $C_6H_6O$ | 58585.3 | / | 2.09±0.18$^a$ | 3.06±0.38$^a$ |

**续表 2**

| No. | CAS | 化合物名称 | 化学式 | OT（μg/kg） | 含量（μg/kg） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | CK | CM | SL |
| 4 | 97-53-0 | 丁香酚 | $C_{10}H_{12}O_2$ | 0.71 | 177.98±49.56$^{b}$ | 155.96±24.84$^{b}$ | 262.5±17.52$^{a}$ |
| 5 | 94-59-7 | 黄樟素 | $C_{10}H_{10}O_2$ | 160 | 0.58±1.01$^{b}$ | 3.24±0.36$^{a}$ | 1.18±1.07$^{b}$ |
| 6 | 93-15-2 | 甲基丁香酚 | $C_{11}H_{14}O_2$ | 775 | 0.32±0.55$^{b}$ | 3.72±0.59$^{a}$ | 1.12±0.29$^{b}$ |
| 7 | 91-64-5 | 香豆素 | $C_9H_6O_2$ | 25 | 3.18±2.76$^{a}$ | 6.18±0.58$^{a}$ | 5.39±4.82$^{a}$ |
| 8 | 4940-11-8 | 乙基麦芽酚 | $C_7H_8O_3$ | n.a. | 56.22±12$^{a}$ | 8.04±2.47$^{b}$ | 17.03±5.16$^{b}$ |
| 9 | 76-22-2 | (±)-樟脑 | $C_{10}H_{16}O$ | 4600 | / | / | 5.49±0.96 |
| 10 | 464-49-3 | (+)-樟脑 | $C_{10}H_{16}O$ | 1360 | 4.39±0.4$^{a}$ | 0.61±1.06$^{b}$ | 2.15±3.72$^{ab}$ |
| 11 | 544-76-3 | 正十六烷 | $C_{16}H_{34}$ | n.a. | 1.97±1.91$^{a}$ | 0.56±0.97$^{a}$ | 2.1±1.82$^{a}$ |
| 12 | 563-16-6 | 3,3-二甲基已烷 | $C_8H_{18}$ | n.a. | / | 1.31±1.19$^{a}$ | 1.89±0.39$^{a}$ |
| | | 小计 | | | 246.89±46.99$^{ab}$ | 182.35±19.17$^{b}$ | 303.86±22.35$^{a}$ |
| | | 总计 | | | 7631.13±502.15$^{a}$ | 5596.61±611.27$^{b}$ | 7668.93±319.87$^{a}$ |

注：CK、SL和CM分别为空白对照组香肠，*W. jogaejeotgali* SL7试验组香肠和*L. mesenteroides* CM对照组香肠。OT为化合物在风味阈值（μg/kg），通过2011版《Compilations of odour threshold values in air, water and other media》进行查询，n.a.表示未查询到阈值信息。小写字母标注表示组间差异显著性（$P$<0.05）。

12 种酯类化合物，SL 和 CM 两组乳酸菌发酵香肠都检测到 10 种酯类化合物，而空白组香肠仅检测出 6 种。L(-)-乳酸乙酯、反式-肉桂酸乙酯和桂酸甲酯在酯类物质中的含量较高。其中，L(-)-乳酸乙酯仅在 SL 和 CM 两组乳酸菌发酵香肠中检测到，该化合物可能由乳酸菌代谢产物乳酸经酯化反应生成。

肉制品中醛酮类物质主要来源于脂质氧化和氨基酸分解代谢[47]。发酵香肠中检测出的醛类化合物主要有 4-异丙基苯甲醛、苯甲醛和反式肉桂醛，酮类主要是 3-羟基-2-丁酮与葑酮。其中乳酸菌发酵香肠的苯甲醛含量分别为 209.39 μg/kg（CM）和 265.64 μg/kg（SL），显著（$P$<0.05）高于空白组（46.27 μg/kg），这可能与 *W. jogaejeotgali* SL7 和 *L. mesenteroides* CM 的氨基酸代谢有关[20]。3-羟基-2-丁酮的阈值为 14 μg/kg，具有强烈的奶油香味[48]，在 CK 组中含量为 345.08 μg/kg，显著（$P$<0.05）高于 SL 和 CM 组发酵香肠。

三个处理组香肠中仅检测出 5 种醚类化合物，含量分别为 1424.1 μg/kg（CK）、1746.25 μg/kg（CM）和 2478.2 μg/kg（SL），含量占比仅次于萜烯类和醇类化合物。4-烯丙基苯甲醚、甲醚和茴香醚是最主要的醚类化合物。其中 4-烯丙基苯甲醚的风味阈值仅 6 μg/kg，被描述为甘草香和茴香味[49]。发酵香肠中还检测出 4 种酸类化合物，乳酸菌发酵香肠中酸类物质的含量分别 253.55 μg/kg（CM）和 275.38 μg/kg（SL），显著（$P$<0.05）高于 CK 组（140.44 μg/kg），其中冰醋酸的含量占比最高。但酸性化合物的风味阈值较高，对香肠风味的贡献作用较小。其他类别的化合物中，丁香酚的含量最高，并且具有较低的风味阈值（0.71 μg/kg）。

## 3　结论

本研究以 *W. jogaejeotgali* SL7 为发酵剂制备猪肉香肠，分析其对产品理化特性、微生物安全性、氧化稳定性和风味的影响。结果表明，SL7 可显著降低亚硝酸盐含量，提高储藏稳定性和整体品质。SL 组与 CM 组的 pH、水分活度（$a_w$）及水分含量均显著低于 CK 组（$P$<0.05）。在发酵阶段（0~2 d），SL 和 CM 组的菌落总数和乳酸菌数显著高于 CK 组（$P$<0.05），随后在干燥阶段因水分下降而减少。SL7 有效抑制了脂肪和蛋白质氧化，其 POV 和 TBARS 值显著低于 CM 和 CK 组（$P$<0.05），总巯基含量较高而羰基含量较低。SL 组红度值（$a^*$=11.26）显著（$P$<0.05）高于 CK 组（9.68），表明显著改善发色效果。挥发性风味物质分析表明，SL 组中检出 7668.93 μg/kg 的 89 种风味成分，主要包括醇类、萜烯类（如(+)-柠檬烯、丁香酚等），显著（$P$<0.05）优于其他组。综上所述，*W. jogaejeotgali* SL7 可有效提升发酵香肠的微生物安全性、氧化稳定性和风味特性，具备作为理想发酵剂的潜力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献

[1] 温昊，芮露明，张雅玮. 发酵肉制品研究现状及发展趋势[J]. 肉类研究，2025，39(8)：71−83. [WEN H, RUI L M, ZHANG Y W. Current status and development trends in fermented meat products research[J]. Meat Research, 2025, 39(8): 71−83.]

[2] JUNGEUN H, YU J K, YEONGEUN S, et al. Effect of starter cultures on quality of fermented sausages.[J]. Food Science of Animal Resources, 2023, 43(1): 1−9.

[3] LIU M Y, LUO H T, XIAO Q, et al. Effect of *Latilactobacillus sakei* and *Staphylococcus xylosus* on the textural characteristics of dry fermented sausages[J]. Food Bioscience, 2024, 59103972.

[4] SHAO X F, WANG H H, SONG X Y, et al. Decoding the flavor regulation mechanism of fermented sausages inoculated with indigenous strains via metagenomic and GC-MS analysis[J]. LWT, 2024, 206(15): 116604.

[5] ZHU Y L, GUO L P, YANG Q L. Partial replacement of nitrite with a novel probiotic Lactobacillus plantarum on nitrate, color,

biogenic amines and gel properties of Chinese fermented sausages [J]. Food Research International, 2020, 137: 109351.
[6] YU H, LI P, YIN P, et al. Bacterial community succession and volatile compound changes in Xinjiang smoked horsemeat sausage during fermentation[J]. Food Research International, 2023, 174: 113656.
[7] HU Y Y, TIAN Y, ZHU J M, 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.
[8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.33-2016 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, General Administration of Food and Drug. GB 5009.33-2016 National food safety standard determination of nitrite and nitrate in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[9] ZHANG Yin, WANG Linguo, MU Yunlong, et al. Effect of deep dormancy temperature cultivation on meat quality of crucian carp (*Carassius auratus*)[J]. Foods, 2023, 12(4): 792.
[10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 4789.2-2022 食品安全国家标准 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China, General Administration of Food and Drug. GB 4789.2-2022 National food safety standard determination of total bacterial count[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
[11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 4789.35-2023 食品安全国家标准 乳酸菌检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [National Health Commission of the People's Republic of China, General Administration of Food and Drug. GB 4789.35-2023 National food safety standard determination of lactic acid bacteria test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[12] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.227-2023 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.227-2023 National food safety standard determination of peroxide value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.181-2016 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.181-2016 National food safety standard determination of malondialdehyde in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
[14] GE Q, CHEN S, LIU R, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* NJAU-01 on the protein oxidation of fermented sausage[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 361−367.
[15] ZHANG Y, PENG C Z, HAI C P, et al. Effects of cooking processes on protein nutritional values and volatile flavor substances of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(17): 3169.
[16] ZHANG Y, ZHANG Y, LI H, et al. Comparison of nutrition and flavor characteristics of five breeds of pork in China[J]. Foods, 2022, 11(17): 2704.
[17] RUIZ-MOYANO S, MARTIN A, BENITO M J, 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.
[18] VISESSANGUAN W, BENJAKUL S, SMITINONT T, et al. Changes in microbiological, biochemical and physico-chemical properties of nham inoculated with different inoculum levels of *Lactobacillus curvatus*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 39(7): 814−826.
[19] HU Y Y, CHEN Q, WEN R X, et al. Quality characteristics and flavor profile of Harbin dry sausages inoculated with lactic acid bacteria and *Staphylococcus xylosus*[J]. LWT, 2019, 114: 108392.
[20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 2760-2014 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 2760-2014 National food safety standard determination of standard for the use of food additives[S]. Beijing: China Standards Press, 2014.]
[21] CHEN X, LI J P, ZHOU T, et al. Two efficient nitrite-reducing *Lactobacillus strains* isolated from traditional fermented pork (Nanx Wudl) as competitive starter cultures for Chinese fermented dry sausage[J]. Meat Science, 2016, 121: 302−309.
[22] ZENG X Q, PAN Q, GUO Y X, et al. Potential mechanism of nitrite degradation by *Lactobacillus fermentum* RC4 based on proteomic analysis[J]. Journal of Proteomics, 2018, 194: 70−78.
[23] SHEN Q Y, ZENG X Q, KONG L Y, et al. Research progress of nitrite metabolism in fermented meat products[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(7): 1485.
[24] LIU X J, QU H Y, GOU M X, et al. Application of *Weissella cibaria* X31 or *Weissella confusa* L2 as a starter in low nitrite dry-fermented sausages[J]. International Journal of Food Engineering, 2020, 16(8): 221371950.
[25] 孔令杰, 邓洁莹, 吴莹, 等. 发酵肉制品中微生物替代亚硝酸盐发色作用机理及应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 301−308. [KONG L J, DENG J Y, WU Y, et al. Research progress on mechanism and application of microorganism replacing nitrite in fermented meat products[J]. Food Science, 2023, 44(11): 301−308.]
[26] 苟梦星, 段冰潮, 李瑞, 等. 肉制品中亚硝酸盐替代的研究现状及作用机制[J]. 食品科技, 2023, 48(5): 127−132. [GOU M X, DUAN B C, LI R, et al. Research status and mechanism of nitrite substitutes in meat products[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(5): 127−132.]
[27] GILL A O, HOLLEY R. Interactive inhibition of meat spoilage and pathogenic bacteria by lysozyme, nisin and EDTA in the presence of nitrite and sodium chloride at 24 degrees C[J]. International journal of food microbiology, 2003, 80(3): 251−259.
[28] SUN F, KONG B, CHEN Q, 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, 2016: S961187734.
[29] 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.
[30] KAISER A L, MONTVILLE T J. Purification of the bacteriocin bavaricin MN and characterization of its mode of action against Listeria monocytogenes Scott A cells and lipid vesicles[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1996, 62(12): 4529.
[31] 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 Y L. Study on the correlation between the changes of microbial structure and histamine production during the fermentation of Sichuan sausage[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020. ]
[ 32 ] WANG J Y, LU S L, WANG Q L, et al. Effects of starter cultures on lipid oxidation and accumulation of biogenic amines in traditional Chinese smoked horsemeat sausage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(5): e14439.
[ 33 ] ULU H. Evaluation of three 2-thiobarbituric acid methods for the measurement of lipid oxidation in various meats and meat products[J]. Meat Science, 2003, 67(4): 683−687.
[ 34 ] FEREIDOON S, YING Z. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(11): 4067−4079.
[ 35 ] ASHAOLU T J, KHALIFA I, MESAK M A. et al. A comprehensive review of the role of microorganisms on texture change, flavor and biogenic amines formation in fermented meat with their action mechanisms and safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 63(19): 11−18.
[ 36 ] ZHANG W G, XIAO S, AHN D U. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(11): 1191−1201.
[ 37 ] 王雍雍, 陈磊, 魏从娇, 等. 功能菌株复配对发酵香肠抗氧化特性及风味的作用[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 149−157. [ WANG Y Y, CHEN L, WEI C J, et al. Effects of functional strains on antioxidant properties and flavor of fermented sausages [J]. Food Science, 2023, 44(22): 149−157. ]
[ 38 ] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, MUNEKATAP E S, et al. Protein oxidation in muscle foods: A review[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(1): 83−95.
[ 39 ] MEI L, PAN D M, UO T T, et al. Role of *Lactobacillus plantarum* with antioxidation properties on Chinese sausages[J]. LWT, 2022, 162: 113427.
[ 40 ] 尹树磊, 杜香, 张小希, 等. 乳酸菌抗氧化机制研究进展及在食品领域的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 345−355. [ YIN S L, DU X, ZHANG X X, et al. Research progress of antioxidant mechanism of lactic acid bacteria and its application in food field[J]. Food Science, 2024, 45(13): 345−355. ]
[ 41 ] HU Y Y, LI Y J, LI X A, et al. Application of lactic acid bacteria for improving the quality of reduced-salt dry fermented sausage: Texture, color, and flavor profiles[J]. LWT, 2022, 154: 112723.
[ 42 ] LORENZOO J M, MONTES R, PURRINOS L, et al. Effect of pork fat addition on the volatile compounds of foal dry-cured sausage[J]. Meat Science, 2012, 91(4): 506−512.
[ 43 ] GASPARDO B, PROCIDA G, TOSO B, et al. Determination of volatile compounds in San Daniele ham using headspace GC–MS[J]. Meat Science, 2008, 80(2): 204−209.
[ 44 ] LAWRIE R A, LEDWARD D A. Lawrie's meat science [M]. CRC Press, Woodhead, 2006.
[ 45 ] YU M J, XIANG X L, TAN H, et al. Potential correlation between volatiles and microbiome of Xiang xi sausages from four different regions[J]. Food Research International, 2021, 139: 109943.
[ 46 ] LI Y X, CAO Z X, YU Z H, et al. Effect of inoculating mixed starter cultures of *Lactobacillus* and *Staphylococcus* on bacterial communities and volatile flavor in fermented sausages[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 200−211.
[ 47 ] WANG F, GAO Y Q, WANG H B, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography–ion mobility spectrometry (GC–IMS) [J]. Meat Science, 2021, 175: 108449.
[ 48 ] 雷华威, 陈晓红, 李伟, 等. 赛里木酸乳原籍菌种发酵乳主体风味成分分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 127−130. [ LEI H W, CHEN X H, LI W, et al. Analysis of main flavor components of fermented milk from the original strain of *Sailimu yogurt*[J]. Food Science, 2013, 34(20): 127−130. ]
[ 49 ] 贾潇, 周琦, 杨祷旎. 3 种坚果油的挥发性成分提取及关键风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 35−41. [ JIA X, ZHOU Q, YANG Y N. Extraction of volatile components and analysis of key flavor components of three kinds of nut oils[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(7): 35−41. ]