

# 清酒乳杆菌对发酵风干肠品质的影响

郑云<sup>1</sup>, 郑爽<sup>1</sup>, 周天硕<sup>1</sup>, 鲍伟<sup>1</sup>, 韩齐<sup>1,2\*</sup>, 李艳青<sup>1,2\*</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

(2. 黑龙江省中加合作食品研究发展中心, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:** 该研究采用清酒乳杆菌 (*Lactobacillus sakei*, *L. sakei*) 作为发酵菌株制备发酵风干肠, 研究其对发酵风干肠品质的影响, 以自然发酵产品作为对照组, 在发酵成熟过程中的第 0、3、6、9 天测定产品的菌落总数、乳酸菌数、pH 值、水分含量、水分分布、嫩度、色差、过氧化物值 (Peroxide Value, POV)、硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric Acid Value, TBARS)、脂肪酸含量和感官评分等指标, 研究发酵菌株对风干肠品质的影响。试验表明, *L. sakei* 接种组的乳酸菌数和菌落总数显著高于对照组 ( $P<0.05$ ),  $L^*$  值和  $a^*$  和  $b^*$  显著低于对照组 ( $P<0.05$ ); *L. sakei* 接种组在发酵终点时, 水分含量降至 32.15%, pH 值降至 4.41, 保证了发酵风干肠的安全性; POV 值和 TBARS 值显著低于对照组 ( $P<0.05$ ), 表明 *L. sakei* 具有较好的抑制脂肪氧化作用; *L. sakei* 接种组的总体可接受性更高, 发酵后期酯类物质种类和含量均高于对照组。综上, *L. sakei* 的添加改善了产品的品质和风味。

**关键词:** 发酵风干肠; 清酒乳杆菌; 品质; 脂肪氧化

文章编号: 1673-9078(2023)12-122-129

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.1587

## Effect of *Lactobacillus sakei* on the Quality of Fermented Air-dried Sausage

ZHENG Yun<sup>1</sup>, ZHENG Shuang<sup>1</sup>, ZHOU Tianshuo<sup>1</sup>, BAO Wei<sup>1</sup>, HAN Qi<sup>1,2\*</sup>, LI Yanqing<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. China-Canada Cooperation Agri-Food Research Center of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

**Abstract:** In this study, *Lactobacillus sakei* (*L. sakei*) was used as the fermentation strain to prepare fermented air-dried sausage, and the effects of *L. sakei* (*Lactobacillus sakei*) on the quality of the fermented air-dried sausage was investigated. Naturally fermented air-dried sausage was used as the control. The total number of bacterial colonies and lactic acid bacteria, pH value, moisture content, moisture distribution, tenderness, colour difference, peroxide value (POV), thiobarbituric acid value (TBARS), fatty acid content and sensory evaluation score of the samples at day 0, 3, 6 and 9 of the fermentation process were measured to examine the impact of fermentation strain on the quality of air-dried sausage. The experimental results showed that the fermented air-dried sausage inoculated with *L. sakei* had significantly higher total number of lactic acid bacteria and bacterial colonies but lower  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  values compared with the control ( $P<0.05$ ). At the end of fermentation, the moisture content and pH value of the fermented air-dried sausage inoculated with *L. sakei* decreased to 32.15% and 4.41, respectively, thereby ensuring the safety of fermented air-dried sausage; the POV and TBARS values of the fermented air-dried sausage inoculated with *L. sakei* were significantly lower than those of the control ( $P<0.05$ ), indicating that *L. sakei* possessed a greater inhibitory effect against fat oxidation; The overall acceptability of the fermented air-dried sausage inoculated with *L. sakei* was higher, and the type and content of esters at the end of fermentation were greater, compared with the control. In summary, the addition of *L. sakei* improved product quality and flavor.

**Key words:** fermented dry sausages; *Lactobacillus sakei*; quality; fat oxidation

引文格式:

郑云, 郑爽, 周天硕, 等. 清酒乳杆菌对发酵风干肠品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 122-129

ZHENG Yun, ZHENG Shuang, ZHOU Tianshuo, et al. Effect of *Lactobacillus sakei* on the quality of fermented air-dried sausage [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 122-129

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (32202109); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划 (UNPYSCT-2020039); 黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动计划资助项目 (XYB201803); 黑龙江八一农垦大学“青年创新人才”项目 (CXRC2017012)

作者简介: 郑云 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: ZY424452833@163.com

通讯作者: 韩齐 (1988-), 女, 讲师, 博士, 研究方向: 肉品加工及安全控制, E-mail: hanqihappy@foxmail.com; 共同通讯作者: 李艳青 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉制品加工, E-mail: liyanqing2003@163.com

发酵香肠是指在自然或人工控制条件下,将绞碎的肉和动物脂肪及辅料等混合后灌进肠衣,经微生物发酵而成的具有较好稳定性、贮藏性和特殊发酵风味的肉制品<sup>[1,2]</sup>。自由基是引起蛋白质和脂肪氧化的重要因素。自由基在人体中积累过多会引起细胞损伤,在食品中会影响产品质地和货架期<sup>[3]</sup>。微生物在发酵香肠生产过程中发挥着至关重要的作用。因此,筛选出具备较强抗氧化能力的菌株对于改善发酵肉制品的品质具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。乳酸菌作为发酵肉制品中的主要优势菌,在发酵过程中可促进发酵肉制品色泽和风味的形成、改善肉制品品质特性、提高产品的安全性和稳定性<sup>[7-9]</sup>。杜宝等<sup>[10]</sup>研究接种植物乳杆菌和戊糖片球菌至发酵羊肉香肠中,可以有效降低香肠的脂质氧化。潘晓倩等<sup>[11]</sup>以植物乳杆菌 10M-7 为发酵剂应用于发酵风干肠中,促进了肉制品风味的形成。付源<sup>[12]</sup>从延吉泡菜、自制农家酸菜、四川泡菜中筛选并鉴定出一株戊糖片球菌,将其作为发酵剂应用于发酵香肠中,提高了发酵香肠的品质特性和贮藏性。

发酵过程中微生物群落是动态演变的,各个发酵阶段的菌群种类和数量对品质的贡献也不同,部分微生物在发酵过程中呈现的作用或多或少地对发酵肉制品的质量和理化性质有一定的影响<sup>[13]</sup>。目前国外将乳酸菌应用于发酵肉制品中的工艺及技术已趋于成熟化,Chen 等<sup>[14]</sup>发现弯曲乳杆菌、发酵乳杆菌和戊糖乳杆菌能够赋予发酵香肠特殊的风味。国内关于发酵菌株的研究多集中于植物乳杆菌、戊糖片球菌<sup>[15]</sup>,而对于 *L. sakei* 作为发酵菌株的研究较少。因此本试验选用从自然发酵风干肠中分离获得的具有抗氧化能力的 *L. sakei* 生产发酵风干肠,以自然发酵组为对照,对 2 组发酵风干肠成熟过程中的品质指标进行测定,分析研究乳酸菌在发酵肉制品体系中的抗氧化效果,结合产品品质和感官评价,为发酵风干肠品质保障和安全控制提供一定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

猪后腿肉和肥膘、猪小肠衣、食盐、味素、混合调料、麩酒(玉泉大麩)等,购于当地北京华联超市;葡萄糖(食品级),辽宁泉瑞试剂有限公司。

清酒乳杆菌 (*L. sakei*),保存于中加合作发展中心微生物实验室。

### 1.2 仪器与设备

HWS-250 型恒温恒湿培养箱、DK-S24 型电热恒

温水浴锅,上海森信实验仪器有限公司;5810R 冷冻离心机,德国 Eppendorf 公司;SPECORD 210 PLUS 紫外分光光度计,德国耶拿分析仪器股份公司;SevenMulti pH 计,美国 Mettler Toledo 公司;CM-5 色差仪,日本 Konica Minolta 公司;NMI20-15 核磁共振食品成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;TA-XT PLUS 质构仪,英国 SMS 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 发酵风干肠的制备

##### (1) 工艺流程

猪后腿肉→切小块(1×1×1 cm<sup>3</sup>)→混合辅料→拌馅→静置 1 h→接种 *L. sakei*→拌馅→静置 1 h→灌肠→风干[相对湿度为 30%~50%,温度为(25±2)℃,12 h]→发酵[培养湿度为 75%~80%,培养温度为(25±2)℃,9 d]

##### (2) 操作要点

瘦肉:肥肉=9:1,配料(质量分数):曲酒 1%(按肉总质量计)、味素 0.3%、亚硝酸盐 0.01%(按肉总质量计)、盐 2.5%、混合调味料 0.3%、水 3%、葡萄糖 5%。

乳酸菌组为添加 *L. sakei* 生产的风干肠,在腌制好的肉中添加发酵菌株,使其终浓度约为 10<sup>7</sup> CFU/g 肉馅,搅拌均匀,对照组为没有人为添加发酵剂的天然发酵风干肠。分别在发酵过程中的第 0、3、6、9 天取样并测定相关指标。

#### 1.3.2 微生物数量的测定

取样品于无菌生理盐水中拍打均质后连续 10 倍梯度稀释,选取 4~5 个适当稀释度进行涂布,采用营养琼脂培养基和 MRS (De Man, Rogosa, Sharpe) 琼脂培养基在 37℃ 下培养 48 h,进行菌落总数与乳酸菌数的测定,所有操作均在无菌环境下进行。

#### 1.3.3 产品理化性质的测定

##### (1) pH 值的测定

参照 GB 5009.239-2016 的食品酸度的测定<sup>[16]</sup>。去除肠衣和脂肪,称取 5.0 g 风干肠肉样,加入 10 倍体积去离子水,均质,取滤液进行 pH 测定。

##### (2) 水分含量的测定

参考 GB 5009.3-2016 的食品中的水分进行测定<sup>[17]</sup>,采用直接干燥法测定。称取 5 g 绞碎样品置于已烘干至恒质量的称量瓶中,105℃ 烘干至样品恒质量。

##### (3) 水分分布的测定

参照 Gao 等<sup>[18]</sup>的方法,去除风干肠的肠衣和肥肉,称取 3 g 1×1×1 cm<sup>3</sup> 风干肠肉样,裹一层水胶布,置于核磁试管底部。采用低场核磁共振成像仪进行测定。

##### (4) 色差的测定

去除风干肠肠衣和肥肉,将绞碎样品均匀铺满玻

璃皿中,采用色差仪测定风干肠的色差变化(红度值  $a^*$ 、黄度值  $b^*$ 和亮度值  $L^*$ )。

#### (5) 嫩度的测定

参照 Hope 等<sup>[19]</sup>的方法,利用质构仪的 HDP/BS 探头,参数设定为:测试速率 5 mm/s,触发力 5 g,载重物 30 kg 进行测定。

#### 1.3.4 过氧化物值(Peroxide Value, POV)的测定

按照 Chen 等<sup>[20]</sup>的方法测定样品的过氧化物值,采用还原铁粉做标准曲线。取 2 g 肉样,加 15 mL 氯仿:甲醇(2:1)混合物,高速均质(11 000 g, 30 s),加入 3 mL 质量分数 0.5%氯化钠溶液,4 °C 下离心(1 000 r/min, 5 min),取 5 mL 下层溶液,加入 5 mL 氯仿:甲醇(2:1)混合物,漩涡混匀 5 s,再加入 25  $\mu$ L  $Fe^{2+}$ 溶液、硫氰酸铵溶液,漩涡混匀 5 s,静止 10 min,上清液于 500 nm 处测定吸光值。样品测定结果表示为毫克当量每千克(meq/kg)。

#### 1.3.5 硫代巴比妥酸值(Thiobarbituric Acid Value, TBARS)的测定

参考 Kong 等<sup>[21]</sup>的方法,硫代巴比妥酸(TBARS)值的测定:称取 0.4 g 肉样,加入 3 mL  $\varphi=1\%$  TBA 溶液,17 mL  $\varphi=2.5\%$  TCA-HCl 溶液,均质,加入 0.05 mL 0.01%的抗氧化剂,沸水浴 30 min,迅速冷却。取 5 mL 上清液,加入 5 mL 氯仿,漩涡震荡混匀,3 000 r/min 离心 5 min,取上清液测定吸光度值 532 nm。计算公式如下:

$$B = \frac{A_1}{M} \times 9.48 \quad (1)$$

式中:

$B$ —硫代巴比妥酸值, mg/kg;

$A_1$ —样品吸光值;

$M$ —样品质量, g;

9.48—由 TBA 反应产物的稀释因子和摩尔消光系数(152 000 L·mol<sup>-1</sup>·cm<sup>-1</sup>)推导出的一个常数。

#### 1.3.6 脂肪酸测定

参考刘梦等<sup>[22]</sup>稍作修改。脂肪酸的提取:称取 0.5 g 绞碎均匀的样品,加入 6 mL 混合液(10 mol/L KOH、甲醇),55 °C 水浴 1.5 h,期间震荡使其充分混匀;待其冷却到室温时后加入 12 mol/L 的硫酸溶液 0.58 mL,55 °C 水浴 1.5 h,取出后冷却至室温,加入 3 mL 正己烷,漩涡震荡 5 s,离心(1 500 r/min, 5 min),取上清液经 0.45  $\mu$ m 的滤膜至进样瓶中,-20 °C 保存备用。脂肪酸的测定:色谱柱(100 m×250  $\mu$ m, 0.2  $\mu$ m)。参数设定:初始温度 120 °C,持续 5 min;150 °C,升温速率为 1.5 °C/min,28 min;220 °C,升温速率为 1.5 °C/min,10 min。

#### 1.3.7 感官评价

风干肠蒸煮 20 min 后,切成约为 0.5×0.5×0.5 cm<sup>3</sup> 的小块,随机邀请 10 位食品学院本专业相关人员组成评定小组,采用双盲法对发酵风干肠进行综合评价(1~7 分)<sup>[11]</sup>。

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	
	7 分	1 分
颜色	外表光泽,瘦肉颜色红润,肥肉呈半透明状态	外表无光泽、颜色暗红
气味	具有发酵肉制品特殊的香气,无哈败味及其他不良气味	风味不良、有异味
滋味	具有发酵肉制品浓郁的香味	无香味
酸味	无厚重的酸味	过酸
口感	肉质硬度适中,有嚼劲	咀嚼性差
整体可接受性	最好	最差

## 1.4 数据分析

采用 SPSS Statistics 25 统计软件对数据进行分析,用 Duncan 多重比较,  $P < 0.05$ , 差异显著。使用 SigmaPlot 14.0 绘图软件作图。每个处理重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 风干肠发酵过程中微生物数量的变化

由图 1a 可知,发酵过程中风干肠的菌落总数和乳酸菌数均呈先上升后下降的趋势,且 *L. sakei* 组菌落总数显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。发酵前期(0~3 d),对照组和 *L. sakei* 组菌落总数均显著上升至 7.46、8.16 ( $P < 0.05$ ),可能是由于此时水分含量高,碳水化合物丰富,为微生物生长提供了良好的生长环境。*L. sakei* 中乳酸菌的加入使其菌落总数显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。发酵后期(3~9 d),对照组和 *L. sakei* 组菌落总数下降至 6.76、7.33 log CFU/g,可能是随着发酵过程的进行营养物质缺乏、代谢产物积累、水分

流失等抑制了微生物的活性,导致菌落总数在发酵后期均出现不同程度的降低。由图 1b 可知,发酵前期(0~3 d),乳酸菌作为优势菌生长和繁殖,这对抑制风干肠内不良微生物的生长繁殖具有重要意义。发酵后期(3~9 d),对照组和 *L. sakei* 组乳酸菌数分别从 6.2、8.16 log CFU/g 下降至 5.16、6.4 log CFU/g,这是由于发酵环境水分和营养物质降低阻碍了乳酸菌的正常生长繁殖。刘思婷等<sup>[23]</sup>研究表明,低盐风干肠中接种植物乳杆菌后,乳酸菌数在发酵期间均呈先上升后下降趋势。

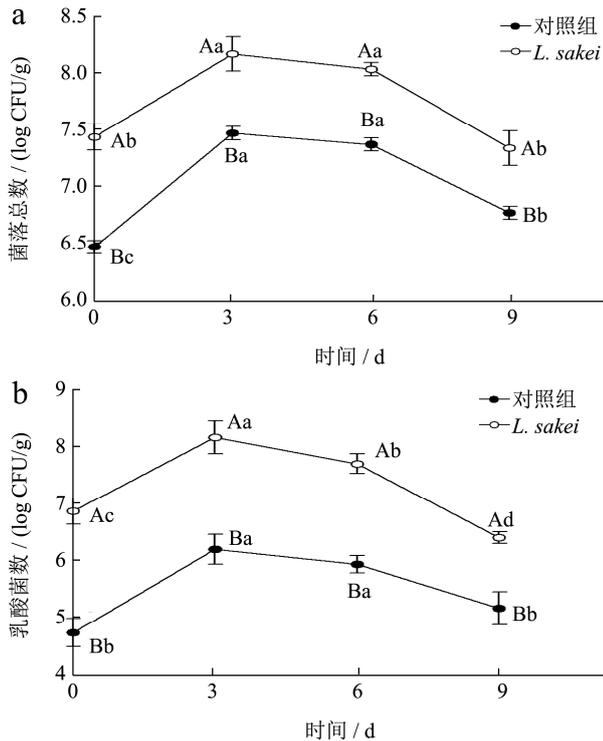


图1 风干肠发酵过程中菌落总数(a)和乳酸菌数(b)的变化  
Fig.1 The changes of total number of bacterial colonies (a) and lactic acid bacteria (b) of dry sausages during fermentation

注:不同小写字母(a~d)表示同一处理组不同发酵时间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母(A~B)表示同一发酵时间不同处理组差异显著( $P<0.05$ )。图2、3、5、6同。

## 2.2 风干肠发酵过程中理化性质的变化

### 2.2.1 pH 值的变化

由图 2 可知,随着发酵过程的进行 pH 值呈现显著下降趋势,且对照组 pH 值显著高于 *L. sakei* 组( $P<0.05$ ),由此可知 *L. sakei* 的添加可以促进 pH 值的降低,加快酸化过程,有助于缩短发酵周期<sup>[24]</sup>。pH 值的下降能够有效抑制发酵风干肠中致病微生物和腐败微生物的生长,有利于提高产品安全性。发酵 9 d, *L. sakei* 组 pH 值(4.41)显著低于对照组(4.76)( $P<0.05$ ),可能是由于 *L. sakei* 组乳酸菌数量较多产生了大量乳酸等酸性物质导致的。Lee 等<sup>[25]</sup>研究表明,

乳酸菌产生乳酸,促进酸性环境的生成,从而改善了肉制品的风味,提高了产品的质地。

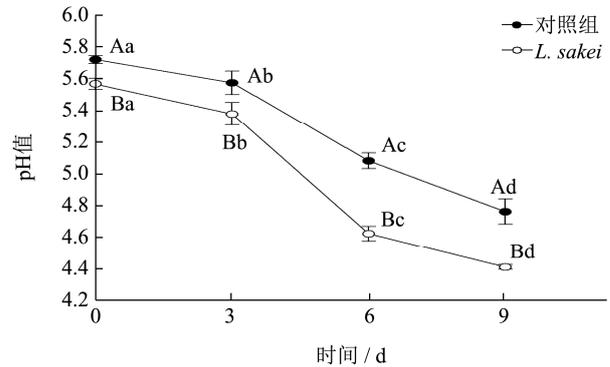


图2 风干肠发酵过程中 pH 值的变化

Fig.2 The changes of pH value of dry sausages during fermentation

### 2.2.2 水分含量的变化

由图 3 可知,随着发酵过程的进行,风干肠中水分含量呈下降趋势。发酵 0 d,两个处理组水分含量均在 55%左右;发酵 9 d,对照组水分含量较高为 37.15%,*L. sakei* 组水分含量较低为 32.15%。这可能是随着发酵的进行,乳酸菌产生乳酸,环境 pH 值降低,导致风干肠内部蛋白质变性,进而影响网络空间结构,从而加速水分流失<sup>[26]</sup>。风干肠中持有较低的水分能够有效抑制病原微生物的生长繁殖,有利于发酵风干肠的生产和保藏。陈援援等<sup>[27]</sup>研究表明,随着风干过程的进行,接种乳酸菌的风干肠水分含量逐渐降低。

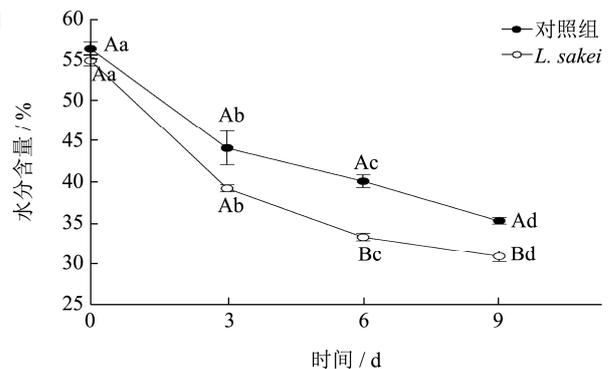


图3 风干肠发酵过程中水分含量的变化

Fig.3 The changes of moisture content of dry sausages during fermentation

### 2.2.3 水分分布的变化

发酵风干肠中的水分分布见图 4 所示。风干肠发酵过程中, $T_2$  横向弛豫时间曲线主要出现 3 个水分分布的状态,分别为:结合水  $T_{21}$  (弛豫时间 0~10 ms)、不易流动水  $T_{22}$  (弛豫时间 10~100 ms) 和自由水  $T_{23}$  (弛豫时间 100~1 000 ms)。发酵初期(0 d),风干肠中水分分布主要以不易流动水  $T_{22}$  为主,且各处理组差异不显著( $P>0.05$ ),结合水  $T_{21}$  和自由水  $T_{23}$  所占比例较少。风

干肠发酵成熟过程中,由于蛋白质结构的变化,不易流动水整体向左迁移,且不易流动水  $T_{22}$  的峰面积显著降低 ( $P<0.05$ ),其中接种 *L. sakei* 组  $T_{22}$  向左迁移程度更加明显,这可能是由于酸性条件下,肌肉蛋白质遭到破坏,水分散失。Bertram 等<sup>[28]</sup>研究也证明发酵肉制品的水分散失与肌肉蛋白质结构变化有关。

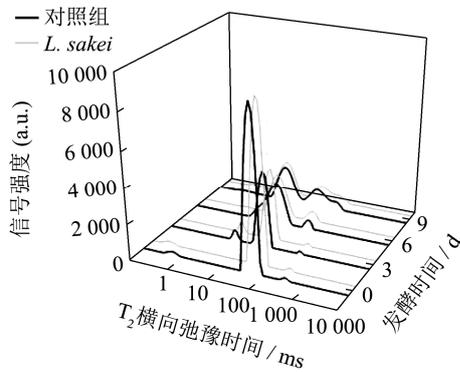


图4 风干肠发酵过程中横向弛豫时间  $T_2$  的变化

Fig.4 The changes of transverse relaxation time  $T_2$  of dry sausages during fermentation

### 2.2.4 颜色的变化

乳酸菌对风干肠发酵过程中颜色变化见表 2。由表 2 可知,风干肠在发酵过程中  $L^*$  值和  $b^*$  值呈整体下降的趋势,发酵 9 d, *L. sakei* 组  $L^*$  值和  $b^*$  值分别为 40.62、11.34,显著低于对照组 43.33、12.54 ( $P<0.05$ )。随着发酵过程的进行,水分逐渐散失,  $a^*$  值呈先上升后下降的趋势,这可能是风干肠内部水分散失,色素沉积导致  $a^*$  值升高。而  $a^*$  值逐渐下降可能是由于肌红蛋白分子的表面被水分子包围,其周围氧分子数量少,去氧肌红蛋白的比例升高所导致的<sup>[29]</sup>。发酵 9 d, *L. sakei* 组  $a^*$  值 (17.02) 显著低于对照组 (18.27) ( $P<0.05$ )。因此, *L. sakei* 作为发酵菌株对色泽的形成未起到促进作用。可能是由于乳酸菌的添加在快速降低酸度值的同时抑制了还原性细菌(如葡萄球菌等)生长,影响了发酵肉制品色泽的形成<sup>[30]</sup>。Visessanguan 等<sup>[31]</sup>研究表明,接种乳酸菌可使发酵香肠的发色效果更好,与本研究结果不一致,这可能与发酵菌株和发酵环境差异有关。

表 2 风干肠发酵过程中颜色的变化

Table 2 The changes of color determination of dry sausage during fermentation

项目	菌株分类	0 d	3 d	6 d	9 d
$L^*$	对照组	50.11±0.11 <sup>Aa</sup>	48.88±3.00 <sup>Ab</sup>	44.76±0.64 <sup>Ac</sup>	43.33±0.20 <sup>Ad</sup>
	<i>L. sakei</i>	47.64±0.25 <sup>Ba</sup>	44.92±0.15 <sup>Bb</sup>	41.96±0.76 <sup>Bc</sup>	40.62±0.19 <sup>Bd</sup>
$a^*$	对照组	20.93±0.03 <sup>Ab</sup>	21.06±2.07 <sup>Aa</sup>	19.70±0.33 <sup>Bc</sup>	18.27±0.36 <sup>Ad</sup>
	<i>L. sakei</i>	18.64±0.26 <sup>Bb</sup>	18.95±0.75 <sup>Bb</sup>	20.21±0.73 <sup>Aa</sup>	17.02±0.87 <sup>Bc</sup>
$b^*$	对照组	13.14±0.05 <sup>Aa</sup>	13.97±1.46 <sup>Aa</sup>	12.92±0.13 <sup>Ab</sup>	12.54±0.44 <sup>Ab</sup>
	<i>L. sakei</i>	11.91±0.11 <sup>Ba</sup>	12.00±0.22 <sup>Ba</sup>	11.02±0.43 <sup>Bb</sup>	11.34±0.46 <sup>Bb</sup>

注: 同列不同大写字母 (A-B) 表示不同处理组同一发酵时间之间差异显著 ( $P<0.05$ ); 同行不同小写字母 (a-d) 不同, 表示同一处理组不同发酵时间之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.2.5 嫩度的变化

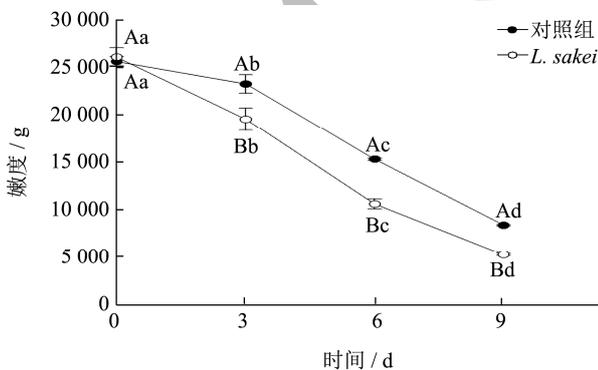


图5 风干肠发酵过程中嫩度的变化

Fig.5 The change of tenderness of dry sausage during fermentation

由图 5 可知,在发酵过程中风干肠的嫩度值呈显著下降趋势,发酵 0 d 各组风干肠嫩度值在 25 000 g 左右,差异不显著 ( $P>0.05$ ),随着发酵时间的延长

嫩度差异显著 ( $P<0.05$ )。发酵 9 d, *L. sakei* 组嫩度值显著低于对照组 ( $P<0.05$ ),说明 *L. sakei* 的添加显著降低了产品的嫩度,这可能是由于风干肠在发酵过程中发生脱水收缩现象,且酸性条件促进蛋白结构发生了改变,导致风干肠嫩度值降低。Ge 等<sup>[32]</sup>研究表明,干腌火腿发酵过程中溶胶蛋白转变成凝胶蛋白,同时乳酸菌产生的外源性蛋白酶,对肌动蛋白质等其他蛋白质结构有一定影响,最终改变了产品的质构。

### 2.3 风干肠发酵过程中脂肪的氧化

过氧化值 (POV) 是衡量肉类及肉制品脂质初级氧化程度的重要指标,与氧化程度呈正相关。如图 6a 所示,发酵初期风干肠的 POV 值处于 0.15 mmol/kg 左右,差异不显著 ( $P>0.05$ ),发酵 3 d 时 POV 值急剧上升达到最大值,对照组 POV 值为 0.42 mmol/kg, *L. sakei* 组 POV 值 (0.35 mmol/kg) 显著低于对照组

(0.42 mmol/kg) ( $P<0.05$ )。发酵后期 (6~9 d), 两个处理组的 POV 值均呈显著下降的趋势 ( $P<0.05$ ), 这是由于随着氧化的发生初级氧化产物逐渐转变为次级氧化产物, 且 *L. sakei* 组显著低于对照组 ( $P<0.05$ ), 说明 *L. sakei* 的添加能够有效阻碍风干肠发酵过程中过氧化物的生成。硫代巴比妥酸值是评价肉及肉制品在加工及贮藏过程中次级氧化产物含量的重要指标。脂肪氧化也是影响产品风味物质生成的重要指标, 过

高会使食品产生哈败味<sup>[33]</sup>, 脂肪氧化程度与 TBARS 值呈线性正相关, 国标规定了发酵香肠中的 TBARS 值需低于 1.0 mg/kg。由图 6b 可知, 在整个发酵过程中, TBARS 值呈上升趋势, 其中 *L. sakei* 组 TBARS 值曲线上升较为平缓, 发酵过程中 *L. sakei* 组 TBARS 值显著低于对照组 ( $P<0.05$ ), 且均符合国家标准, 说明 *L. sakei* 的添加可显著抑制发酵风干肠的脂肪氧化。

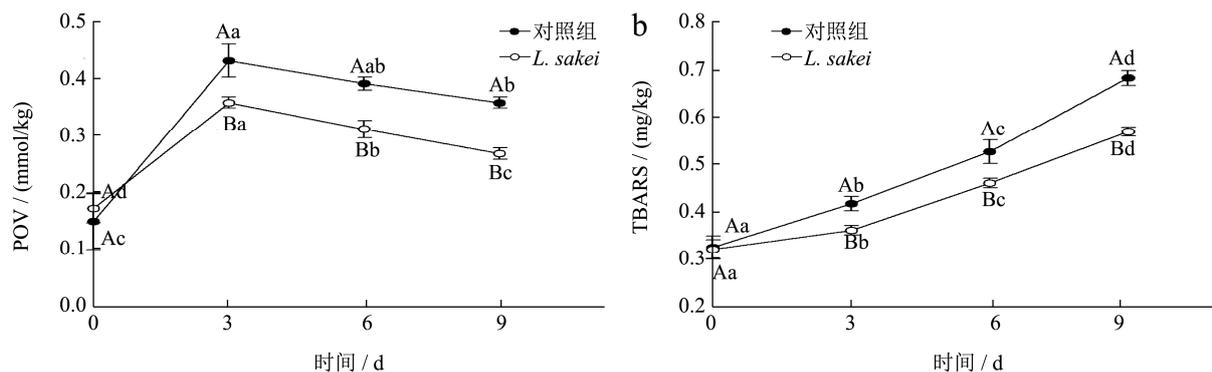


图 6 风干肠发酵过程中 POV 值 (a) 和 TBARS (b) 值的变化

Fig.6 The changes of POV (a) and TBARS (b) values of dry sausage during fermentation

表 3 风干肠中最终单脂肪酸含量

Table 3 Content of final mono-fatty acid in dry sausages

最终单脂肪酸含量/(g/100 g)	对照组 (0 d)	对照组 (9 d)	<i>L. sakei</i> (9 d)
辛酸甲酯	ND	ND	ND
癸酸甲酯	0.09±0.02 <sup>A</sup>	0.09±0.01 <sup>A</sup>	0.08±0.02 <sup>A</sup>
十一烷酸甲酯	ND	ND	ND
月桂酸甲酯	0.08±0.01 <sup>A</sup>	0.08±0.03 <sup>A</sup>	0.07±0.02 <sup>A</sup>
十三烷酸甲酯	ND	0.02±0.01 <sup>A</sup>	0.01±0.01 <sup>A</sup>
肉豆蔻酸甲酯	1.20±0.02 <sup>A</sup>	1.23±0.01 <sup>A</sup>	1.21±0.03 <sup>A</sup>
肉豆蔻烯酸甲酯	ND	ND	0.01±0.00 <sup>A</sup>
十五烷酸甲酯	0.04±0.02 <sup>A</sup>	0.04±0.02 <sup>A</sup>	0.03±0.02 <sup>A</sup>
棕榈酸甲酯	23.50±0.72 <sup>A</sup>	22.88±0.32 <sup>A</sup>	22.99±0.62 <sup>A</sup>
棕榈油酸甲酯	2.30±0.12 <sup>A</sup>	2.23±0.17 <sup>A</sup>	2.21±0.15 <sup>A</sup>
十七烷酸甲酯	0.20±0.47 <sup>A</sup>	0.21±0.26 <sup>A</sup>	0.11±0.05 <sup>BC</sup>
十七烷酸甲酯	0.19±0.08 <sup>A</sup>	0.18±0.05 <sup>A</sup>	0.16±0.09 <sup>AB</sup>
硬脂酸甲酯	11.70±0.42 <sup>A</sup>	11.40±0.27 <sup>A</sup>	11.83±0.71 <sup>A</sup>
油酸甲酯	38.06±0.75 <sup>B</sup>	40.91±0.46 <sup>A</sup>	40.75±0.52 <sup>A</sup>
亚油酸甲酯	18.68±0.45 <sup>A</sup>	17.30±0.32 <sup>A</sup>	16.83±0.47 <sup>AB</sup>
花生酸甲酯	0.21±0.36	ND	ND
γ-亚麻酸甲酯	ND	0.29±0.07 <sup>A</sup>	0.29±0.02 <sup>A</sup>
花生一烯酸甲酯	1.21±0.14 <sup>A</sup>	0.74±0.09 <sup>B</sup>	0.79±0.14 <sup>B</sup>
α-亚麻酸甲酯	0.61±0.04 <sup>A</sup>	0.68±0.02 <sup>A</sup>	0.74±0.03 <sup>A</sup>
花生二烯酸	0.69±0.12 <sup>A</sup>	0.67±0.22 <sup>A</sup>	0.69±0.10 <sup>A</sup>
山萘酸甲酯	0.16±0.02 <sup>A</sup>	0.16±0.03 <sup>A</sup>	0.15±0.02 <sup>A</sup>
芥酸甲酯	ND	ND	0.54±0.06 <sup>B</sup>
二十碳三烯酸甲酯	0.97±0.22 <sup>A</sup>	0.67±0.28 <sup>B</sup>	0.08±0.02 <sup>C</sup>
花生四烯酸甲酯	ND	0.09±0.03 <sup>A</sup>	ND
神经酸甲酯	ND	0.15±0.02 <sup>A</sup>	0.14±0.02 <sup>A</sup>
DHA	ND	ND	ND

注: 同行不同大写字母 (A~C) 表示差异显著 ( $P<0.05$ ); ND 表示未检出。

## 2.4 风干肠发酵过程中脂肪酸含量的变化

由表3可知,发酵终点,风干肠样品中检测出26种挥发性酯类物质,它们主要来源于醇类和酸类的酯化反应,可以赋予发酵风干肠独特的香气。在风干肠发酵过程中,酯类物质的含量和种类均有不同程度的改变,与对照组(0d)相比,其他两个处理组中的十三烷酸甲酯、神经酸甲酯、 $\gamma$ -亚麻酸甲酯含量均显著升高( $P<0.05$ ),这可能与发酵过程中无论是人为添加乳酸菌还是自然发酵,微生物的活动有助于这三种脂肪酸更好的形成。与对照组相比,*L. sakei*组中的肉豆蔻烯酸甲酯、芥酸甲酯含量显著升高( $P<0.05$ ),这可能与*L. sakei*进行碳水化合物代谢提供更多的酸类物质作为底物参与酯类合成有关,还可能与发酵过程中接种微生物差异有关<sup>[34]</sup>。对照组(0d)中棕榈酸甲酯、棕榈油酸甲酯、顺-10-十七烷酸甲酯、硬脂酸甲酯、亚油酸甲酯、花生一烯酸甲酯、花生二烯酸、二十碳三烯酸甲酯含量高于对照组(9d),这可能是发酵过程种某些物质阻碍了部分脂肪降解。综上,这一结果表明接种*L. sakei*有利于风干肠中酯类物质的形成,对照组(0d和9d)总酯含量为99.89g和100.02g,接种组(9d)总酯含量为99.71g,这可能是乳酸菌产生大量乳酸,导致酸性环境,加快蛋白质降解,微生物群落不断演变,进而影响脂肪氧化,最终影响风干肠中挥发性风味物质的生成<sup>[11]</sup>。

## 2.5 风干肠发酵过程中感官评价的变化

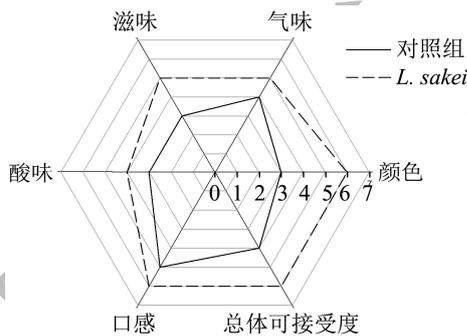


图7 感官评价

Fig.7 Sensory evaluation

如图7所示,与对照组相比,*L. sakei*组具有风干肠特有的浓郁气味。总体可接受性均较高,各项评分都较高。颜色、滋味和总体可接受度都显著高于对照组( $P<0.05$ )。由此可见,接种*L. sakei*的风干肠在保证原有感官特性的基础上,更易于风味的形成,提升产品可接受度,这主要是由于乳酸菌通过对蛋白质和脂质分解代谢所产生的游离氨基酸、醛酮酯类等风味化合物,有利于改善产品的风味<sup>[35]</sup>。

## 3 结论

本试验研究了*L. sakei*对发酵风干肠理化性质和安全品质的影响,研究发现*L. sakei*组微生物数量显著高于对照组( $P<0.05$ ),说明*L. sakei*可以有效抑制风干肠内不良微生物的生长繁殖,且*L. sakei*的添加能快速降低风干肠发酵期间的pH、水分含量和嫩度,有助于提高风干肠的品质,但*L. sakei*的添加对于发酵风干肠色泽的形成可能存在负面影响。通过对发酵风干肠POV、TBARS脂肪氧化指标测定,*L. sakei*对风干肠脂肪氧化有较好的抑制效果,且*L. sakei*的添加能有效提高风干肠产品中酯类物质的种类和含量。综上,接种*L. sakei*有利于提高发酵风干肠的安全性,且感官总体可接受度较好,对发酵风干肠的品质和风味有积极的影响,这对风干肠的实际生产有重要意义。

## 参考文献

- [1] Wang Y, Han J, Wang D, et al. Research update on the impact of lactic acid bacteria on the substance metabolism, flavor, and quality characteristics of fermented meat products [J]. Foods, 2022, 11(14): 2090.
- [2] Halagarda M, Wojciak K M. Health and safety aspects of traditional European meat products. A review [J]. Meat Science, 2022, 184: 108623.
- [3] Balakrishnan G, Agrawal R. Antioxidant activity and fatty acid profile of fermented milk prepared by *Pediococcus pentosaceus* [J]. Journal of Food Science & Technology, 2014, 51(12): 4138-4142.
- [4] 王吉,张鑫,胡静荣,等.灭菌猪肉浆中发酵菌株脂质水解和氧化能力分析[J].中国农业科学,2022,55(9):1846-1858.
- [5] 李玉娥,李晓宏,朱迎春,等.商业发酵剂对发酵香肠成熟过程中理化性质的影响[J].肉类研究,2019,33(8):42-47.
- [6] 孙颖瑛.发酵酸鱼贮藏过程中品质变化及控制研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [7] 王淳玉,徐宝才,杨柳,等.传统发酵肉制品中乳酸菌的筛选及在萨拉米中的初步应用[J/OL].现代食品科技,DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0181.
- [8] Wang C, Liu H Y, He L P, et al. Determination of bacterial community and its correlation to volatile compounds in Guizhou Niuganba, a traditional Chinese fermented dry-cured beef [J]. LWT, 2022, 161: 113380.
- [9] Kuda T, Kawahara M, Nemoto M, 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 Research

- International, 2014, 64(64): 248-255.
- [10] 杜宝.不同发酵剂和贮藏温度对发酵羊肉香肠品质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018:30-31.
- [11] 潘晓倩,成晓瑜,张顺亮,等.乳酸菌发酵剂对风干肠风味品质的影响[J].肉类研究,2017,31(12):50-55.
- [12] 付源.具有防腐抗氧化作用的乳酸菌在发酵香肠的应用研究[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [13] Wang Y C, Yu R C, Chou C C. Antioxidative activities of soymilk fermented with lactic acid bacteria and bifidobacteria [J]. Food Microbiology, 2006, 23(2): 128-135.
- [14] Chen Q, Kong B H, Sun Q, et al. Antioxidant potential of a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage: *In vitro* and in a sausage model [J]. Meat Science, 2015, 110: 180-188.
- [15] 奇美.驼肉理化性能的分析及新型驼肉干研发[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [16] GB 5009.239-2016,中华人民共和国国家标准.食品酸度的测定[S].
- [17] GB 5009.3-2016,中华人民共和国国家标准.食品中水分的测定[S].
- [18] Gao T, Li J L, Zhang L, et al. Effect of different tumbling marinade treatments on the water status and protein properties of prepared pork chops [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(12): 2494-2500.
- [19] Hope J M, Strydom P E, Frylinck L, et al. The efficiency of electrical stimulation to counteract the negative effects of  $\beta$ -agonists on meat tenderness of feedlot cattle [J]. Meat Science, 2010, 86(3): 699-705.
- [20] Chen Q, Kong B H, Han Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development [J]. LWT, 2017, 77: 389-396.
- [21] Kong B H, Zhang H Y, Xiong Y L. Antioxidant activity of spice extracts in a liposome system and in cooked pork patties and the possible mode of action [J]. Meat Science, 2010, 85(4): 772-778.
- [22] 刘梦,史智佳,杨震.不同热加工温度对牛肉干脂肪酸及脂肪氧化的影响[J].肉类研究,2019,33(2):1-6.
- [23] 刘思婷,刘馨屿,王雯萱,等.植物乳杆菌接种量对低盐风干肠品质特性及风味特征的影响[J].食品科学,2022,43(22): 97-104.
- [24] Pringsulaka O, Thongngam N, Suwannasai N, et al. Partial characterisation of bacteriocins produced by lactic acid bacteria isolated from Thai fermented meat and fish products [J]. Food Control, 2012, 23(2): 547-551.
- [25] Lee J Y, Kim C J, Kunz B. Identification of lactic acid bacteria isolated from kimchi and studies on their suitability for application as starter culture in the production of fermented sausages [J]. Meat Science, 2006, 72(3): 437-445.
- [26] Fadda S, Sanz Y, Vignolo G, et al. Characterization of sarcoplasmic and myofibrillar protein hydrolysis caused by *Lactobacillus plantarum* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(8): 3540-3546.
- [27] 陈媛媛,牛文秀,马凯华,等.接种乳酸菌发酵剂对风干肠加工过程中理化性质及安全品质的影响[J].食品工业科技, 2022,43(8):148-156.
- [28] Bertram H C, Wu Z, Berg F V D, et al. NMR relaxometry and differential scanning calorimetry during meat cooking [J]. Meat Science, 2006, 74(4): 684-689.
- [29] 陈佳新,陈倩,孔保华.食盐添加量对哈尔滨风干肠理化特性的影响[J].食品科学,2018,39(12):85-92.
- [30] 刘英丽,于青林,万真,等.发酵剂抗氧化活性对发酵肉制品品质的影响研究进展[J].食品科学,2021,42(1):302-312.
- [31] Visessanguan W, Benjiakull 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, 2006, 39(7): 814-826.
- [32] Ge Q F, Pei H J, Liu R, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* NJAU-01 from Jinhua ham on the quality of dry-cured fermented sausage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 101: 513-518.
- [33] 刘孝沾,孔永昌,李丹.肉和肉制品中脂肪氧化的研究进展[J].肉类工业,2017,3:47-49.
- [34] Wen R X, Sun F D, Li X A, et al. The potential correlations between the fungal communities and volatile compounds of traditional dry sausages from Northeast China [J]. Food Microbiology, 2021, 98: 103787.
- [35] 张香美,卢涵,叶翠,等.不同发酵剂对发酵香肠菌相、挥发性风味成分及品质的影响[J].东北农业大学学报,2021,52(3): 45-53.