

丙酸杆菌发酵提取物-乳酸链球菌素复配 对熏煮香肠品质的影响

王昭钰¹, 王向坡², 张万刚^{1*}

(1. 南京农业大学食品科技学院, 江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心, 肉品加工与质量控制教育部重点实验室, 江苏南京 210095) (2. 安徽绿微康生物科技有限公司, 安徽池州 247100)

摘要: 为延长熏煮香肠的货架期、保持其食用品质, 该文研究了丙酸杆菌发酵提取物 (*Propionibacterium* fermented extract, PFE) 和乳酸链球菌素 (Nisin) 复配对熏煮香肠贮藏期间品质、氧化程度及微生物的影响。分别将 0.01%、0.02%、0.03% 的 Nisin 与 0.30% 的 PFE 复配后添加到熏煮香肠中, 探究其在贮藏期间 (4 °C) 颜色、质构、硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS) 和菌落总数的变化, 并与 0.30% PFE 和 0.03% Nisin 作比较, 同时通过高通量测序分析贮藏过程中熏煮香肠的微生物多样性。结果显示, PFE 与 Nisin 复配后显著提高香肠的 L* 值和 a* 值并降低 b* 值 ($p < 0.05$), 显著降低产品的硬度、咀嚼性和弹性 ($p < 0.05$)。0.3% PFE 复配 0.01% 和 0.02% Nisin 的处理组抑制脂肪氧化的效果显著优于单独添加 Nisin 和 PFE 的处理组 ($p < 0.05$)。复配处理组的菌落总数在整个贮藏期间均显著小于其它处理组 ($p < 0.05$), 且复配 0.01% Nisin 的处理组在贮藏后期表现出更好的抑菌效果。通过高通量测序技术发现 Nisin 与 PFE 复配添加对葡萄球菌属、不动杆菌属和芽孢八叠球菌属均表现出更好的抑制效果。PFE 复配 Nisin 后可有效抑制熏煮香肠的脂肪氧化和微生物生长, 更好地保持熏煮香肠在贮藏期间的品质, 其中 0.01% 的 Nisin 复配比例的综合表现最佳。

关键词: 熏煮香肠; 丙酸杆菌发酵提取物; 乳酸链球菌素; 品质; 氧化; 微生物

文章编号: 1673-9078(2021)11-239-249

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0313

Effect of the Combination of *Propionibacterium* Fermented Extract and Nisin on the Quality of Smoked and Cooked Sausages

WANG Zhaoyu¹, WANG Xiangpo², ZHANG Wangang^{1*}

(1. Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing, Quality and Safety Control, College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China) (2. Leveking Biotech Co. Ltd., Chizhou 247100, China)

Abstract: In order to extend the shelf life and maintain the eating quality of smoked and cooked sausages, the effects of *propionibacterium* fermented extract (PFE) combined with Nisin on quality (color, textural characteristics), oxidation level (thiobarbituric acid reactive substance, TBARS) and microorganism profiles (total viable counts and microbial diversity) of smoked and cooked sausages during storage (4 °C) were investigated. Six treatment groups were set as following: adding PFE (0.3%) with 0.01%, 0.02% or 0.03% Nisin, and adding PFE (0.3%) or Nisin (0.03%) alone and adding neither PFE nor Nisin as control group. The results showed that PFE-Nisin combination could significantly increase the a* value and the L* value, decrease the b* value ($p < 0.05$), and reduce the hardness, chewiness and spring ($p < 0.05$). Compared with adding PFE or Nisin alone, the treatment of 0.01% or 0.02% Nisin with 0.3% PFE showed better inhibition on lipid oxidation ($p < 0.05$). Meanwhile, the total viable counts of colonies in each combined treatment were significantly lower than that in other treatment groups

引文格式:

王昭钰,王向坡,张万刚.丙酸杆菌发酵提取物-乳酸链球菌素复配对熏煮香肠品质的影响[J].现代食品科技,2021,37(11):239-249

WANG Zhaoyu, WANG Xiangpo, ZHANG Wangang. Effect of the combination of *Propionibacterium* fermented extract and nisin on the quality of smoked and cooked sausages [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 239-249

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400703; 2018YFD0400101); 江苏现代农业 (生猪) 产业技术体系 (JATS[2020]425)

作者简介: 王昭钰 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 肉品质量安全控制, E-mail: 2019808152@njau.edu.cn

通讯作者: 张万刚 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品质量安全控制, E-mail: wangang.zhang@njau.edu.cn

during the whole storage period ($p < 0.05$), especially the combined treatment with 0.01% Nisin exhibited better antibacterial effect in the final period of storage. By high-throughput sequencing, PFE-Nisin combination showed better inhibition on *Staphylococcus*, *Acinetobacter*, and *Sporosarcina*. PFE-Nisin combination could significantly inhibit lipid oxidation and microorganism, which maintained the quality of smoked sausage and extended the shelf life of the product. PFE combined with 0.01% Nisin showed better improving effect on the quality of smoked and cooked sausages.

Key words: smoked and cooked sausages; *propionibacterium* fermented extract; Nisin; oxidation; quality; microorganism

熏煮香肠是一类典型的传统低温肉制品, 主要以畜禽肉为原料经过腌制、斩拌等工序灌装到肠衣中, 经熟制后形成特定的风味和感官特性^[1]。因其携带和食用方便、营养丰富、风味独特等特点深受消费者的喜爱。但在贮藏过程中熏煮香肠易发生氧化和受到微生物污染, 从而造成品质劣变并影响香肠的货架期。

在肉制品加工过程中, 食品添加剂可用于保持肉制品品质和延长货架期。根据来源的不同食品保鲜剂分为化学合成、植物提取、微生物源等^[2]。化学合成的防腐和抗氧化剂具有较强的防腐、抗氧化功能, 但对人体健康存在潜在危害, 且消费者接受度较低, 因此寻找可替代的、安全可靠的食物添加剂是食品行业关注的重点。近年来, 微生物来源的防腐抗氧化剂因具有无毒、安全等特点而成为研究热点。与化学添加剂相比, 其具有安全、环保等特点; 与动植物源的食物添加剂相比, 其具有生产效率高、成本低廉、设备简单、条件易控制等优点, 是极具市场潜力的食品添加剂种类。研究表明, 丙酸等有机酸和乳酸链球菌素(Nisin)均具有良好的抗氧化和抑菌能力^[3-5]。丙酸杆菌发酵提取物(*Propionibacterium* fermented extract, PFE)是由产酸丙酸杆菌发酵产生的有机酸混合物, Nisin 则是由乳酸乳球菌乳酸亚种发酵过程中产生的一种以多肽类物质为主要成分的抑菌类物质^[4]。罗欣等^[6]用含有丙酸钙的保鲜液浸泡牛肉, 发现丙酸钙保鲜液可减缓鲜牛肉储藏期间微生物的生长和蛋白质的降解。刘启莲等^[7]研究发现 Nisin 在酸性条件下活性较高, 且随着 pH 的升高, 活性会逐渐下降。PFE 可为 Nisin 提供适宜的酸性环境, 从而更好保证其抑菌活性。阎永贞等^[8]对比了不同防腐剂在西式火腿肠中的抑菌效果发现, Nisin 对革兰氏阳性菌具有良好的抑菌效果, 而丙酸则对革兰氏阴性菌具有良好的抑菌表现。目前, 关于 PFE 和 Nisin 复配对熏煮香肠产品品质及货架期影响的研究还未见报道。

因此, 本实验将 PFE 与 Nisin 复配加入到熏煮香肠中, 研究 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠品质、氧化程度及微生物的影响, 从而为天然微生物添加剂的开发和应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

PFE 由安徽绿维康生物工程有限公司提供, 主要功能成分: 丙酸 435.9 mg/g、琥珀酸 22.21 mg/g、柠檬酸 19.42 mg/g、乙酸 13.29 mg/g 和乳酸 3.25 mg/g; Nisin 由浙江新银象生物工程有限公司提供; 猪后腿瘦肉、猪背膘由江苏省雨润食品集团提供。

三氯乙酸(Trichloroacetic acid solution, TCA), 上海凌峰化学试剂有限公司; 2-硫代巴比妥酸(2-Thiobarbituric acid, TBA), 上海源叶生物科技有限公司; 平板计数琼脂(Plate count agar, PCA), 北京陆桥技术股份有限公司。

1.2 仪器与设备

MN-22S 绞肉机, 沈阳厚地实业有限公司; BZBI-15 斩拌机, 嘉兴市经开凯斯设备有限公司; SIM-F140AY65-PC 制冰机, 日本 Panasonic 公司; VF620 真空灌肠机, 德国 Handtmann 公司; Ti3000 烟熏炉, 德国 Fessmann 公司; Agilent 1100 高效液相色谱仪, 美国安捷伦科技有限公司; MUL-9000XILIE 系列纯水机, 美国 Millipore 公司; PD500-TP 分散匀浆机, 英国 Prima 公司; TW20 通用水浴锅, 德国 JULABO 公司; Spectral Max M2e 多功能酶标仪, 美国 MD 公司; Avanti J-26S XP 高速冷冻离心机, 美国 Beckman Coulter 公司; SX-500 高压灭菌锅, 日本 Tomy 公司; CR-400 便携式色差仪, 日本 Konica Minolta 公司; TA-XT2i 质构仪, 英国 Stab Micro System 公司。

1.3 方法

1.3.1 熏煮香肠的制作

基本配方: 猪后腿肉与猪背膘的质量比为 4:1, 冰水添加量为猪后腿肉与猪背膘总质量的 20%, 食盐添加量为猪肉总质量的 2%, 三聚磷酸盐、鸡精和白胡椒粉的添加量均为猪肉总重的 0.4%。实验分为对照组(由上述基本配方制成)和五个处理组(C: 对照

组; T1: 0.3% PFE 复配 0.01% Nisin; T2: 0.3% PFE 复配 0.02% Nisin; T3: 0.3% PFE 复配 0.03% Nisin; T4: 单独添加 0.3% PFE; T5: 单独添加 0.03% Nisin)。

工艺流程: 去除猪后腿肉的可见筋膜, 用 4 mm 孔板将猪后腿肉和猪背膘绞碎, 按照 4:1 的比例混合后, 加入配料后用斩拌机 (1400 r/min, 60 s) 充分斩拌成肉糜。整个斩拌过程中, 混合肉糜的温度不超过 12 °C。将肉糜灌入直径为 25 mm 胶原蛋白肠衣中, 将香肠置于烟熏炉中经过干燥排气后烟熏 (65 °C~68 °C, 60 min), 再经过水汽蒸煮至中心温度为 72 °C, 冷却至室温后置于托盘中放于 4 °C 冷库中贮藏, 并在贮藏期间测定相关指标。

1.3.2 颜色的测定

参照 Moroney 等^[9]的方法并稍作改动。将香肠样品用双面切刀切成相同高度的圆柱体, 先将色差仪用标准板进行校正 ($Y=94.0$, $x=0.3156$, $y=0.3321$), 然后采用 D65 光源、8 mm 测量直径范围及 2° 视角对香肠横截面的 L* (亮度)、a* (红度)、b* (黄度) 值进行测量。

1.3.3 质构的测定

参考 Wu 等^[10]的方法并稍作修改。将香肠样品用 1 cm 厚双面切刀和圆柱形取样器制成高 1 cm、直径为 1 cm 的圆柱体, 选取硬度 (Hardness)、弹性 (Springiness)、咀嚼性 (Chewiness) 和回复性 (Resilience) 4 个质构特性指标来表征熏煮香肠的质构变化。选取 P50 探头, 测定参数如下: 测定前探头速度: 2.00 mm/s; 测定后探头速度: 1.00 mm/s; 两次测定时间间隔: 5.00 s; 测定压缩比: 50%; 测定完成后通过仪器自带软件分析数据。

1.3.4 硫代巴比妥酸值 (Thiobarbituric acid reactive substance, TBARS) 的测定

参考 Zhang 等^[11]的方法并略作改动。称取 2 g 碎肉于离心管中, 加入 10 mL 7.5% 的三氯乙酸溶液, 冰浴匀浆 2 次 (12000 r/min, 20 s/次), 匀浆液于 4 °C 和 12000 r/min 离心 5 min, 取 2 mL 上清加入 2 mL 2-硫代巴比妥酸溶液 (0.02 mol/L), 95 °C 水浴加热 30 min。冷却至室温后, 用酶标仪测量上清液在 532 nm 的吸光值, 同时以三氯乙酸加 2-硫代巴比妥酸溶液作空白对照。以 1,1,3,3-四乙氧基丙烷标准溶液绘制标准曲线。TBARS 值以每 1 kg 肉样中所含丙二醛的量 (mg/kg) 来表示。

1.3.5 菌落总数的测定

按照 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验菌落总数测定》进行测定^[12]。

1.3.6 DNA 提取及高通量测序

DNA 提取参考 Yang 等^[13]的方法, 取相应时间点的样品, 提取细菌总 DNA 后, 通过质量分数 0.8% 琼脂糖凝胶电泳检测并通过紫外分光光度计定量。采用由上海凌恩生物公司提供的方法, 对细菌的 16S rDNA 的 V3~V4 区进行聚合酶链式反应 (Polymerase chain reaction, PCR) 扩增, 扩增引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')。PCR 扩增参数为: 98 °C 预变性 2 min; 进入热循环, 98 °C 变性 15 s, 55 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s, 25~30 个循环; 最后一个延伸为 72 °C、5 min。扩增产物通过 Agencourt AMPure Beads 纯化, 由 Qubit 3.0 荧光计定量, 再通过 Illumina MiSeq 平台进行 DNA 测序。

1.4 数据处理

所有实验重复 3 次, 所得数据均以平均值±标准差 (SD) 表示, 采用 SPSS 17.0 软件对实验数据进行统计分析, 字母不同表示差异显著 ($p<0.05$)。测序数据参考 Xue 等^[14]的方法, 通过定量微生物生态软件 (Quantitative Insights Into Microbial Ecology, QIIME) 在 97% 的置信水平下进行 OTU 聚类 and 后续生物分析。通过 QIIME 和 R 软件对 Alpha 多样性 (包括覆盖度、Shannon 和 Chaos1 指数) 进行分析。使用可视化工具 GraPhlAn 绘制分类等级树以快速发现优势菌群。用 R 软件进行聚类分析绘制热图, 以二维图像描述样本间的自然分布特征。

2 结果与讨论

2.1 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠颜色的影响

由表 1 可以看出, 在整个贮藏期内, 复配组的 L* 值显著高于单独添加 Nisin 的处理组 ($p<0.05$), 在前 7 d, 单独添加 PFE 的样品 L* 值均显著高于空白对照组 ($p<0.05$)。研究显示肉制品的亮度与水分含量呈显著正相关, Lawrence 等^[15]发现乳酸盐可提高牛肉的持水性, 这主要是因为有机酸盐增强了肉中的离子强度, 使蛋白发生溶胀, 进而使保水性增加。因此复配后香肠亮度值的上升主要与 PFE 中含有的丙酸盐、乳酸盐等有机酸盐提高香肠的保水性有关。在第 10 d, 复配 0.01% Nisin 的亮度值显著高于其它处理组 ($p<0.05$), 说明该复配比例有助于提高香肠的亮度, 保持香肠的色泽。

在贮藏的第 1 和 7 d, 复配组的 a* 值显著高于单独添加 PFE 的处理组 ($p<0.05$), 说明复配可提高熏煮香肠的红度值; 与 1 d 相比, 各试验组的 a* 值在第

4 d 均显著降低 ($p<0.05$), 但当贮藏时间延长到第 10 d 时, 复配组的 a^* 值均显著上升 ($p<0.05$), 而单独添加 Nisin 的处理组和对照组的红度值则无显著差异 ($p>0.05$)。红度值主要受肉品中肌红蛋白影响, 肌红蛋白被氧化为褐色的高铁肌红蛋白后会使肉制品的红度值降低。Kim 等^[16]发现乳酸盐具有较高的抗氧化能力, 能提高牛肉肌红蛋白的还原活性, 保持肉色稳定。复配组红度值升高原因可能是复配处理可以更好地抑制肌红蛋白的氧化, 以上结果与侯芹等^[17]在花椒提取

物对调理猪肉饼贮藏期间品质的影响中报道一致。

在贮藏前期 (1~4 d), 除了复配 0.02% Nisin 的 b^* 值无显著变化外, 对照组和其它处理组均显著上升 ($p<0.05$); 随着贮藏时间的延长, 复配 0.01% Nisin 的 b^* 值显著降低 ($p<0.05$)。结果表明, PFE 复配 Nisin 后显著抑制了黄度值的上升。陈洪生等^[18]发现, 在肉饼中加入丁香提取物可以降低脂肪氧化程度, 导致黄度值下降, 据此推测复配处理能更好地抑制脂肪氧化, 降低香肠的黄度值。

表 1 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠颜色的影响

Table 1 Effects of PFE-nisin combination on the color of smoked and cooked sausages

指标	组别	贮藏时间/d			
		1	4	7	10
L^*	C	69.03±0.57 ^{cB}	68.41±0.40 ^{cC}	68.52±0.85 ^{bBC}	70.30±0.40 ^{bca}
	T1	69.82±0.64 ^{abB}	69.07±0.72 ^{bC}	69.23±0.71 ^{abC}	71.19±0.36 ^{aA}
	T2	69.36±0.56 ^{bcBC}	69.70±0.60 ^{aAB}	68.98±0.34 ^{abC}	69.96±0.43 ^{cdA}
	T3	69.75±0.51 ^{abA}	69.79±0.68 ^{aA}	68.82±0.48 ^{abB}	69.57±1.18 ^{dA}
	T4	70.24±0.64 ^{aA}	69.71±0.57 ^{ab}	69.34±0.44 ^{ab}	70.57±0.29 ^{bA}
	T5	67.71±0.30 ^{dB}	67.30±0.77 ^{dB}	66.99±0.59 ^{cC}	68.46±0.40 ^{eA}
a^*	C	4.67±0.20 ^{bA}	3.09±0.11 ^{bB}	3.04±0.11 ^{bB}	3.09±0.06 ^{dB}
	T1	3.85±0.26 ^{dA}	2.96±0.08 ^{cC}	2.84±0.09 ^{cC}	3.30±0.13 ^{cB}
	T2	3.85±0.07 ^{dA}	2.96±0.09 ^{cD}	3.10±0.15 ^{bC}	3.45±0.09 ^{bB}
	T3	4.09±0.10 ^{cA}	2.97±0.10 ^{cC}	2.79±0.10 ^{cD}	3.26±0.14 ^{cB}
	T4	3.64±0.26 ^{eA}	3.04±0.12 ^{bcB}	2.64±0.12 ^{dC}	3.55±0.08 ^{ab}
	T5	4.86±0.16 ^{aA}	3.36±0.16 ^{ab}	3.29±0.09 ^{ab}	3.23±0.07 ^{cB}
b^*	C	7.99±0.24 ^{bB}	9.05±0.20 ^{aA}	8.79±0.32 ^{bcA}	8.75±0.40 ^{aA}
	T1	8.54±0.18 ^{aC}	9.27±0.24 ^{aA}	9.06±0.19 ^{ab}	8.57±0.05 ^{abC}
	T2	8.35±0.22 ^{ab}	8.28±0.41 ^{cB}	8.99±0.16 ^{abA}	8.93±0.11 ^{aA}
	T3	7.67±0.42 ^{bcC}	8.27±0.30 ^{cB}	8.95±0.27 ^{abA}	8.69±0.17 ^{aA}
	T4	7.52±0.58 ^{cC}	8.19±0.42 ^{cB}	8.78±0.19 ^{bcA}	8.30±0.14 ^{bB}
	T5	7.97±0.29 ^{bB}	8.67±0.36 ^{bA}	8.67±0.28 ^{cA}	8.80±0.07 ^{aA}

注: C: 对照组; T1: 0.3% PFE 复配 0.01% Nisin; T2: 0.3% PFE 复配 0.02% Nisin; T3: 0.3% PFE 复配 0.03% Nisin; T4: 单独添加 0.3% PFE; T5: 单独添加 0.03% Nisin; 不同小写字母表示同列间的数据差异显著 ($p<0.05$), 不同大写字母表示同行间的数据差异显著 ($p<0.05$), 下同。

2.2 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠质构的影响

由表 2 可知, 单独添加 PFE 的硬度均显著低于单独添加 Nisin 的处理组 ($p<0.05$); 在第 4~7 d, 复配 0.01% 和 0.02% Nisin 的硬度均显著小于对照组和单独添加 Nisin 的处理组, 说明复配可降低熏煮香肠的硬度。肉制品的硬度与其含水量呈反比关系, 许多研究表明乳酸盐、磷酸盐等有机酸盐可以改变蛋白质网状结构、增加凝胶强度来提高肉制品的保水性^[19,20]。Meltwm 等^[21]研究柠檬酸对肉制品食用品质的影响, 发现柠檬酸具有明显的嫩化作用。Berge 等^[22]发现注

射乳酸可以降低牛肉的韧性, 增加其嫩度。由此推测复配后熏煮香肠硬度的下降与 PFE 中的有机酸及其盐有关。此外, 在贮藏期间, 只有复配 0.01% Nisin 的香肠硬度未发生显著性变化, 表明该复配比例能更好地保持香肠硬度的稳定。

在第 7~10 d, 复配 0.01% 和 0.02% Nisin 处理组的弹性均显著低于单独添加 Nisin 的处理组 ($p<0.05$), 说明复配会降低香肠的弹性。吴雪燕等^[23]对中式香肠的研究发现蛋白氧化程度与产品的弹性呈正相关, 这主要是因为蛋白氧化形成二硫键, 增加肌原纤维结构的韧性, 从而使弹性上升。因此复配组弹性的下降的

主要原因可能是复配处理可抑制蛋白氧化,降低肌原蛋白的交联进而抑制弹性的上升。在整个贮藏期间,不同复配比例的处理组间弹性无显著差异,说明不同复配比例对香肠的弹性影响不显著。

如表 2 所示,在第 4 和 10 d,复配组的咀嚼性显著低于单独添加 Nisin 的处理组 ($p<0.05$);且在整个贮藏期内,单独添加 PFE 的咀嚼性均小于单独添加 Nisin 的处理组 ($p<0.05$)。Mohammad 等^[24]研究表明香肠的咀嚼性与硬度呈显著正相关,故复配组咀嚼性的降低与其硬度的降低有关。在贮藏期间,复配 0.02% Nisin 的处理组的咀嚼性波动显著 ($p<0.05$),而其它复配比例的咀嚼性均未发生显著性变化,说明 0.02%

的复配比例不利于熏煮香肠咀嚼性的稳定。

在贮藏过程中,除第 1 d 外,单独添加 Nisin 的回复性均显著高于其它处理组 ($p<0.05$);在第 7 d,复配 0.02%和 0.03% Nisin 的回复性显著高于单独添加 PFE 的处理组 ($p<0.05$),说明加入 Nisin 可提高香肠的回复性。除第 7 d 外,复配组间的回复性均无显著差异,说明不同复配比例对香肠的回复性影响不显著。质构特性是评价肉制品品质和感官特性的重要指标,其与产品的水分、脂肪氧化、蛋白质结构等多种因素有关^[25]。综合以上研究结果可知,PFE 复配一定比例的 Nisin 使香肠软硬适中,有利于熏煮香肠贮藏期间质构特性的稳定。

表 2 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠质构的影响

Table 2 Effects of PFE-nisin combination on the textural characteristics of smoked and cooked sausages

指标	组别	贮藏时间/d			
		1	4	7	10
硬度	C	2080.49±124.47 ^{abcC}	2252.88±71.36 ^{abB}	2409.85±115.51 ^{aA}	2530.71±121.43 ^{aA}
	T1	1929.66±123.27 ^{ca}	1966.12±179.34 ^{ca}	2148.94±160.56 ^{ba}	2116.67±208.00 ^{ca}
	T2	1965.79±83.16 ^{bcB}	2083.28±123.45 ^{bcAB}	2045.63±48.18 ^{bb}	2208.70±145.63 ^{bcA}
	T3	2138.23±110.41 ^{abB}	2151.00±58.90 ^{abb}	2398.37±90.26 ^{aA}	2258.31±149.89 ^{bcAB}
	T4	1918.63±161.17 ^{cb}	2031.63±88.39 ^{bcAB}	2064.13±121.95 ^{baB}	2144.14±213.35 ^{ca}
	T5	2167.96±173.12 ^{abB}	2276.57±89.83 ^{aAB}	2428.94±62.42 ^{aA}	2404.37±137.03 ^{abA}
弹性	C	0.85±0.01 ^{aA}	0.86±0.01 ^{abA}	0.86±0.01 ^{abA}	0.86±0.01 ^{abA}
	T1	0.85±0.01 ^{aAB}	0.83±0.02 ^{bB}	0.85±0.01 ^{bcA}	0.84±0.01 ^{caB}
	T2	0.84±0.00 ^{abA}	0.85±0.01 ^{abA}	0.85±0.01 ^{ca}	0.85±0.01 ^{bcA}
	T3	0.85±0.01 ^{aAB}	0.85±0.02 ^{abAB}	0.86±0.01 ^{abcA}	0.84±0.01 ^{bcB}
	T4	0.80±0.01 ^{ba}	0.84±0.01 ^{ba}	0.83±0.02 ^{da}	0.83±0.01 ^{ca}
	T5	0.87±0.00 ^{aA}	0.87±0.03 ^{aA}	0.87±0.01 ^{aA}	0.88±0.02 ^{aA}
咀嚼性	C	1188.09±90.82 ^{abc}	1311.59±49.05 ^{abB}	1425.08±76.95 ^{aA}	1504.83±103.57 ^{aA}
	T1	1093.04±101.31 ^{bcA}	1055.96±143.86 ^{da}	1192.17±129.43 ^{ba}	1202.73±117.74 ^{ba}
	T2	1127.22±47.24 ^{bcB}	1189.44±93.86 ^{bcdAB}	1161.31±35.58 ^{baB}	1263.91±132.31 ^{ba}
	T3	1231.29±99.95 ^{abA}	1234.20±70.40 ^{bcA}	1372.69±74.84 ^{aA}	1250.59±144.33 ^{ba}
	T4	1046.45±133.67 ^{ca}	1119.71±29.31 ^{cdA}	1090.31±113.40 ^{ba}	1161.82±142.92 ^{ba}
	T5	1304.53±105.90 ^{abB}	1421.52±203.10 ^{aAB}	1482.14±38.39 ^{aA}	1486.89±97.43 ^{aA}
回复性	C	0.31±0.01 ^{ba}	0.32±0.01 ^{ba}	0.33±0.01 ^{ba}	0.33±0.01 ^{ba}
	T1	0.31±0.02 ^{ba}	0.30±0.02 ^{ba}	0.31±0.02 ^{cdA}	0.32±0.01 ^{bcA}
	T2	0.32±0.00 ^{abA}	0.31±0.01 ^{ba}	0.31±0.01 ^{bcA}	0.32±0.01 ^{bcA}
	T3	0.33±0.01 ^{abA}	0.33±0.01 ^{ba}	0.32±0.01 ^{ba}	0.31±0.02 ^{bcA}
	T4	0.32±0.03 ^{ba}	0.30±0.01 ^{ba}	0.29±0.01 ^{da}	0.31±0.01 ^{ca}
	T5	0.34±0.01 ^{aA}	0.36±0.04 ^{aA}	0.35±0.01 ^{aA}	0.35±0.01 ^{aA}

2.3 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠脂肪氧化的影响

响

脂肪过度氧化是导致肉制品品质劣变的重要原因

之一,氧化产生的不良风味会使肉制品感官发生改变,造成感官品质和营养价值降低,同时还会产生某些有毒的醛类、酮类等危害消费者健康^[26,27]。肉制品的脂肪氧化程度主要用 TBARS 值来表示,PFE 与 Nisin 复配对熏煮香肠贮藏期间 TBARS 值的影响如图 1 所

示。由图 1 可知,与空白对照组相比,处理组的 TBARS 值均显著降低 ($p<0.05$),说明 Nisin 和 PFE 均可抑制脂肪氧化。在贮藏前期 (1~4 d),复配 0.01% 和 0.02% Nisin 的 TBARS 值均显著低于单独添加 PFE 的处理组,而复配 0.03% Nisin 时则与单独添加 PFE 无显著差异,说明复配低浓度的 Nisin 能显著提高抗氧化效果。磨佳琳等^[28]研究发现,随着加入 Nisin 浓度的升高猪肉的 TBARS 值呈现先下降后上升的趋势,说明 Nisin 的浓度过高时反而不利于抑制脂肪氧化。宋萌等^[29]发现, Nisin 与乳酸、乳酸钠和壳聚糖复配对冷却猪肉的保鲜具有良好的协同作用,且最佳复配比例为 250 mg/L Nisin+0.25%壳聚糖+1%乳酸钠+1%乳酸。赵敏等^[30]指出, Nisin 协同 0.5%乳酸对冷却猪肉的脂质氧化抑制作用有效果。研究表明, Nisin 在低 pH 条件下活性最高,随着 pH 的上升其活性逐渐降低,故 PFE 与 Nisin 产生协同作用的主要原因为 PFE 中的丙酸、乳酸等有机酸为 Nisin 提供了适宜的酸性环境,从而保证了良好的保鲜效果。

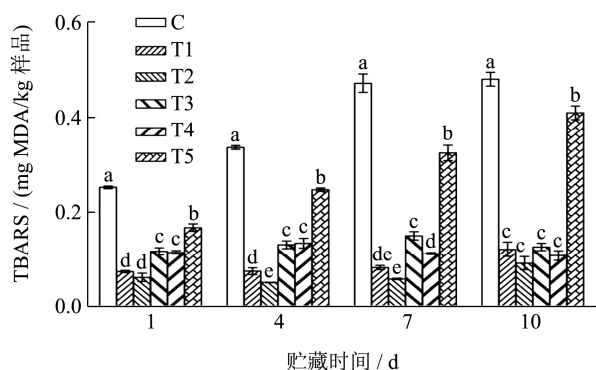


图 1 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠 TBARS 值的影响

Fig.1 Effects of PFE-nisin combination on TBARS values of smoked and cooked sausages

注: C: 对照组; T1: 0.3% PFE 复配 0.01% Nisin; T2: 0.3% PFE 复配 0.02% Nisin; T3: 0.3% PFE 复配 0.03% Nisin; T4: 单独添加 0.3% PFE; T5: 单独添加 0.03% Nisin; 不同小写字母表示相同贮藏时间下不同试验组间的差异显著 ($p<0.05$)。

2.4 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠菌落总数的影响

为探究复配对货架期的影响,本研究将熏煮香肠的贮藏周期延长至 28 d,观察贮藏过程中菌落总数的变化。由表 3 可知,与空白组相比,处理组的菌落总数显著降低 ($p<0.05$),说明添加剂在整个贮藏期间表现出了良好的抑菌效果。Taylor 等^[31]研究表明,丙酸盐释放的丙酸可抑制酶的活性,进而达到抑菌效果。吕淑霞等^[32]发现, Nisin 通过吸附在微生物的细胞膜上来破坏细胞膜的完整性,引起微生物细胞的裂解和死亡。此外,复配组的菌落总数均显著小于单独添加的处理组 ($p<0.05$),说明复配处理能显著提高产品的抑菌能力,延长香肠的保质期。罗婵^[33]研究发现, Nisin 与柠檬酸复配对大肠杆菌、肠炎沙门氏菌和金黄色葡萄球菌均表现出协同抑菌效果;顾仁勇等^[34]利用响应面法优化腊肉的复配防腐剂时发现, Nisin 和柠檬酸、双乙酸钠存在协同增效作用,且最佳复配比例为:柠檬酸 1.20 g/kg、双乙酸钠 0.97 g/kg、Nisin 0.16 g/kg。在贮藏后期 (21~28 d),复配 0.01% Nisin 的菌落总数显著低于其它复配组 ($p<0.05$);在第 28 d,复配 0.02% 和 0.03% Nisin 的菌落总数已经超过 GB 2726-2016^[35]中熟肉制品菌落总数的最高安全限量值 5 lg(CFU/g),说明香肠已经发生腐败变质,而复配 0.01% Nisin 的处理组仍处于安全标准,说明 0.01% 复配比例的防腐效果更好。李茹等^[36]在优化复合生物保鲜剂时发现,当茶多酚浓度一定时,随着 Nisin 浓度的增大,复配后的抑菌率先增大后减小,当复配 Nisin 的浓度过高时协同作用会降低。微生物的生长繁殖是导致食品腐败变质的主要原因,在食品的低温贮藏过程中 (0~4 °C),微生物的活动并没有被完全抑制,仍然影响食品的品质,添加天然高效的抑菌剂对延长肉制品的保质期和货架期至关重要。

表 3 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠菌落总数 [lg (CFU/g)] 的影响

Table 3 Effects of PFE-nisin combination on the total bacterial counts of smoked and cooked sausages

组别	贮藏时间/d				
	1	7	14	21	28
C	4.72±0.04 ^{aD}	4.75±0.08 ^{aD}	4.89±0.06 ^{aC}	6.12±0.09 ^{aB}	7.08±0.06 ^{aA}
T1	4.11±0.09 ^{dB}	3.74±0.14 ^{cC}	3.75±0.09 ^{cC}	4.54±0.15 ^{eA}	4.60±0.13 ^{eA}
T2	4.36±0.09 ^{cC}	3.79±0.06 ^{cD}	3.72±0.07 ^{cD}	4.96±0.25 ^{dB}	5.20±0.13 ^{dA}
T3	3.97±0.16 ^{cC}	3.56±0.08 ^{dD}	3.57±0.09 ^{dD}	4.86±0.09 ^{dB}	5.60±0.16 ^{CA}
T4	4.48±0.05 ^{bC}	4.24±0.07 ^{bD}	4.15±0.06 ^{bD}	5.16±0.15 ^{CB}	5.73±0.03 ^{CA}
T5	4.13±0.08 ^{dC}	3.77±0.10 ^{cD}	4.22±0.14 ^{bC}	5.75±0.11 ^{BB}	5.99±0.10 ^{BA}

2.5 熏煮香肠的微生物多样性分析

表4 贮藏期间熏煮香肠的菌群丰度和多样性

Table 4 Species richness and diversity of smoked and cooked sausages during storage

指标	组别	贮藏时间/d		
		1	14	28
序列标签数	C	41017	20637	52062
	T1	41611	33589	27207
	T2	45312	57563	28058
	T3	31136	34108	45800
	T4	29860	20196	58901
	T5	38411	49146	48268
OTUs	C	460	262	522
	T1	472	268	479
	T2	478	363	381
	T3	412	306	477
	T4	430	317	511
	T5	422	404	459
Chao 1	C	527.13	294.41	595.11
	T1	554.50	349.16	527.25
	T2	549.30	423.02	430.23
	T3	513.02	339.89	543.09
	T4	508.53	413.83	577.45
	T5	480.52	446.06	513.60
Shannon	C	3.76	2.33	3.69
	T1	3.88	1.76	4.09
	T2	3.78	2.17	3.70
	T3	3.74	2.46	3.71
	T4	3.92	3.09	3.61
	T5	3.99	3.93	3.80
覆盖度/%	C	99.8	99.7	99.8
	T1	99.8	99.8	99.7
	T2	99.8	99.9	99.7
	T3	99.7	99.8	99.8
	T4	99.7	99.6	99.8
	T5	99.8	99.9	99.8

由表4可知,空白对照组和五个处理组的平均有效序列标签分别为37905、34136、43644、37015、36319和45275个。不同处理组中所含微生物种类存在差异,表明不同处理的熏煮香肠在贮藏期间的微生物菌群结构平衡和多样性存在差异。所有处理组的Chao 1与Shannon均呈现先下降后上升的趋势,表明熏煮香肠中的菌群多样性呈先下降后上升的趋势。在贮藏前期,加入的添加剂对微生物的丰度产生了明显的抑制作

用,但随着贮藏时间的延长其抑制作用逐渐减弱,导致贮藏后期微生物丰度值的上升。所有样品的测序覆盖度均在99%以上,说明香肠中主要的微生物均被检测,本数据可反映样品中的微生物多样性。

2.6 熏煮香肠的微生物菌群结构变化

图2为贮藏28 d内添加剂复配对熏煮香肠微生物菌群结构的影响。在贮藏初期,不同处理组的微生物结构较为相似,主要的优势菌群有不动杆菌属(*Acinetobacter*)、水杆菌属(*Hydrobacter*)、嗜冷杆菌属(*Psychrobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)等。在贮藏的第14 d,不同处理组的微生物结构出现差异,除单独添加Nisin的处理组外,其它处理组劳尔氏菌属(*Ralstonia*)的相对丰度急剧上升,成为绝对优势菌群;而单独添加Nisin的处理组的优势菌群为不动杆菌属、嗜冷杆菌属、分支杆菌属(*Mycobacterium*)和豕村氏菌属(*Tsukamurella*)。同时,单独添加PFE的处理组的叶杆菌属(*Phyllobacterium*)和中慢生根瘤菌属(*Mesorhizobium*)的比例上升,成为优势菌群。在贮藏后期,复配组和单独添加Nisin的菌群结构相似,优势菌群为水杆菌属、不动杆菌属、嗜冷杆菌属和假单胞菌属;单独添加PFE的处理组中,葡萄球菌属(*Staphylococcus*)的相对含量上升,成为优势菌群。同时,对照组的芽孢八叠球菌属(*Sporosarcina*)的相对丰度升高,成为优势菌群,推测其可能是导致对照组香肠腐败的主要微生物。

研究表明,Nisin对革兰氏阳性菌的抑菌效果较好,而丙酸及其盐类则对革兰氏阴性菌具有较强的抑制能力^[37,38]。在贮藏的中后期,复配组比单独添加Nisin的处理组对不动杆菌属(*G*⁻)表现出更好的抑菌效果;而与单独添加PFE相比,复配组则对葡萄球菌属(*G*⁺)具有更好的抑菌效果,说明复配能扩大产品的抑菌谱,延长香肠的保质期。不动杆菌属是一类专性需氧的革兰氏阴性菌,张秋勤等^[39]对生鲜鸡中的腐败菌分析后发现,在贮藏前期和后期的优势菌群都包含不动杆菌属,是贮藏过程中主要的致腐菌。葡萄球菌属属于需氧或兼性厌氧的革兰氏阳性菌,是肉制品中常见的腐败菌,其中金黄色葡萄球菌是引起食物中毒的主要微生物之一。

本研究采用热图分析进一步探究了不同处理的香肠在贮藏期间菌群结构的变化及差异,结果如图3所示,其中红色表示丰度较高,而蓝色表示丰度较低。由热图的颜色变化可知,在第14 d时,各处理组的相对丰度均相对较低,菌群丰度值随贮藏时间的延长呈现先下降后上升的趋势,这与2.5中菌群丰度和多样性

的结果一致。在贮藏的前期和中期(1~14 d),不同的处理组根据时间分别聚类,同一时间的不同处理组的菌群结构相似。但到贮藏后期(28 d),复配0.01% Nisin的处理组菌群单独聚类,说明在贮藏后期其与其它处理组的菌群结构存在较大差异,且菌群丰度显著低于其它试验组。相较于其它复配比例,复配0.01%的 Nisin 对分支杆菌属和弧菌属 (*Vibrionimonas*) 表现出更好的

抑制作用。Salo 等^[40]对牛奶中的微生物鉴定发现牛奶生产加工过程中易受到分支杆菌属的污染,导致牛奶的腐败。Duan 等^[41]分析了不同贮藏温度下罗非鱼片的微生物构成,发现在 0 °C 和-3 °C 条件下的优势菌群中都发现了弧菌属,是罗非鱼片低温贮藏过程中主要的腐败菌。结合菌落总数的结果可以得知 0.01%的复配比例对微生物的数量和种类都能起到更好的抑制作用。

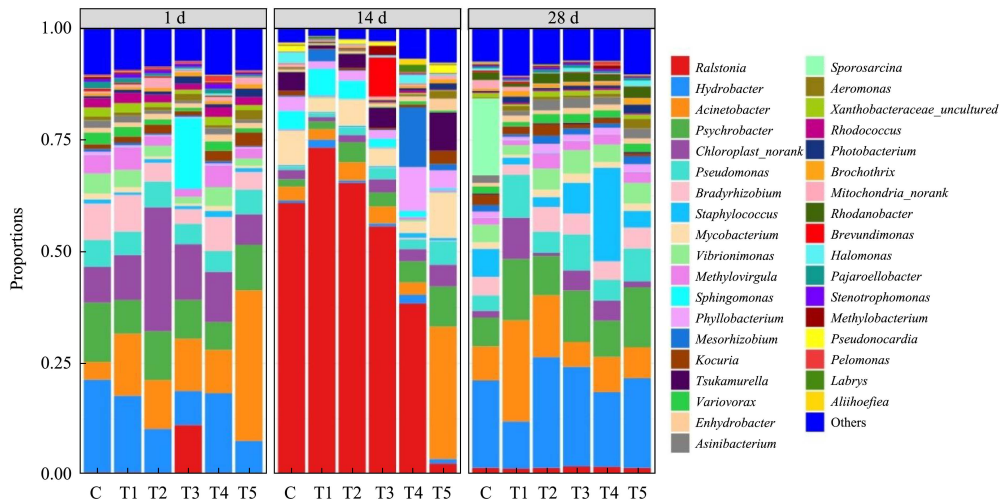


图2 贮藏期间熏煮香肠微生物群落的相对丰度(属水平)

Fig.2 Relative abundance of bacterial community in smoked and cooked sausages during storage (at genus level)

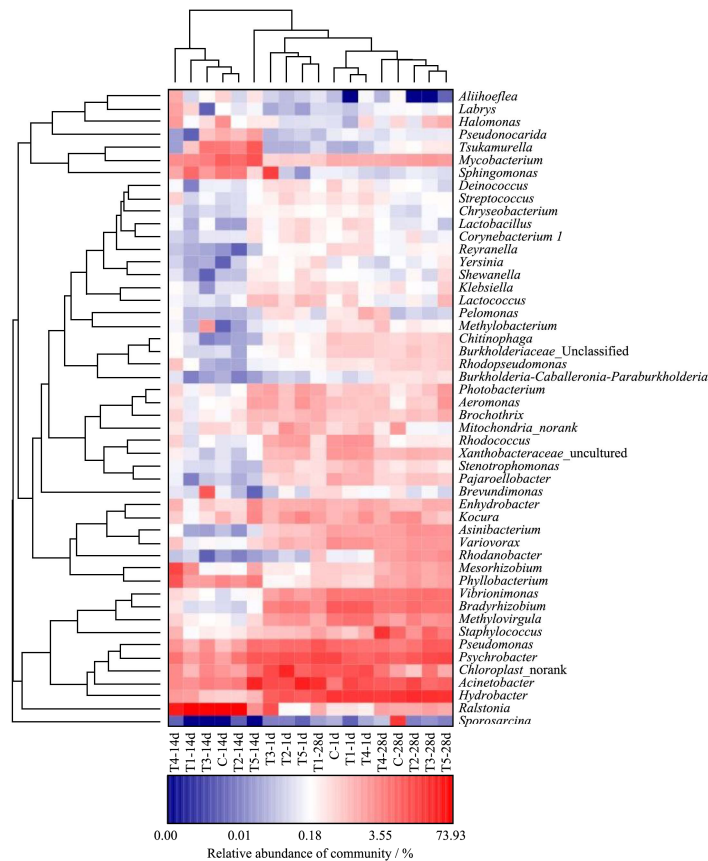


图3 贮藏期间熏煮香肠微生物群落的热图分析

Fig.3 Heatmap of bacterial community in smoked and cooked sausages during storage

3 结论

本文通过分析产品品质和脂肪氧化及微生物等指标研究了 PFE-Nisin 复配对熏煮香肠贮藏期间品质的影响。PFE 复配 Nisin 可提高香肠贮藏期间 L*值和 a*值,降低 b*值;同时可显著降低香肠的硬度和咀嚼性,提高产品的弹性。在贮藏的第 1~4 d,复配 0.01%和 0.02% Nisin 的 TBARS 值显著低于单独添加 Nisin 和 PFE 的处理组;复配处理组的菌落总数在整个贮藏期间均显著小于单独添加的处理组,且 0.01% Nisin 复配组在贮藏后期菌落总数最低,货架期显著延长。通过分析微生物的多样性结果发现,复配添加剂对熏煮香肠贮藏期间的菌群结构产生了显著影响。在贮藏初期,不同处理组的菌群结构相似,但在贮藏的中后期,复配处理对不动杆菌属、葡萄球菌属和芽孢八叠球菌属等表现出更好的抑制作用,扩大了抑菌范围。综上所述可知,PFE 复配 Nisin 后可有效抑制熏煮香肠微生物菌群的多样性,抑制微生物的生长和脂肪氧化,更好的保障熏煮香肠在贮藏期间的品质,其中 0.01%的 Nisin 复配比例综合表现良好。

参考文献

- [1] 刘阳,唐莉娟,王凌云,等.即食肉制品产业发展现状与市场前景[J].食品工业,2017,38(2):275-279
LIU Yang, TANG Lijuan, WANG Lingyun, et al. Industry development status and market prospects of ready-to-eat meat products [J]. The Food Industry, 2017, 38(2): 275-279
- [2] 董欣旖,赵英侠.食品防腐剂在食品中应用现状分析[J].中国食品添加剂,2020,31(11):139-143
DONG Xinyi, ZHAO Yingxia. Analysis of current situation of food preservatives application in food [J]. China Food Additives, 2020, 31(11): 139-143
- [3] El-Shenawy M A, Marth E H. Behavior of *Listeria monocytogenes* in the presence of sodium propionate [J]. International Journal of Food Microbiology, 1989, 8(1): 85-94
- [4] Gharsallaoui A, Joly C, Oulahal N, et al. Nisin as a food preservative: part 2: antimicrobial polymer materials containing nisin [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2016, 56(8): 1275
- [5] 鞠健,汪超,李冬生,等.茶多酚和迷迭香结合 Nisin 对冷藏鲈鱼品质的影响[J].食品科学技术学报,2017,35(1):70-75
JU Jian, WANG Chao, LI Dongsheng, et al. Effects of tea polyphenol and rosemary extract combined with nisin on storage quality of weever (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(1): 70-75
- [6] 罗欣,朱燕,唐建俊,等.丙酸钙在真空包装鲜牛肉保鲜中的应用研究[J].肉类研究,1998,2:3-5
LUO Xin, ZHU Yan, TANG Jianjun, et al. Study on the application of calcium propionate in the preservation of vacuum packing fresh beef [J]. Meat Research, 1998, 2: 3-5
- [7] 熊玲,张立彦,刘启莲.不同阴离子对乳酸链球菌素抑菌稳定性的影响研究[J].食品工业科技,2012,33(23):306-308, 313
XIONG Ling, ZHANG Liyan, LIU Qilian. Influence of various ions on the antimicrobial stability of nisin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(23): 306-308, 313
- [8] 阎永贞.西式火腿肠主要腐败菌菌相分析及其防腐保鲜研究[D].杭州:浙江大学,2009
YAN Yongzhen. Analysis of microflora in western-style ham sausages and its preservation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009
- [9] Moroney N C, O'grady M N, O'doherty J V, et al. Effect of a brown seaweed (*Laminaria digitata*) extract containing laminarin and fucoidan on the quality and shelf-life of fresh and cooked minced pork patties [J]. Meat Science, 2013, 94(3): 304-311
- [10] Wu J Y, Guan R F, Huang H Z, et al. Effect of catechin liposomes on the nitrosamines and quality of traditional Chinese bacon [J]. Food & Function, 2019, 10(2): 625-634
- [11] Zhang W, Xiao S, Lee E J, et al. Consumption of oxidized oil increases oxidative stress in broilers and affects the quality of breast meat [J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(3): 969-974
- [12] GB 4789.2-2016, 食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数测定[S]
GB/T 4789.2-2016, Ministry of Health of the People's Republic of China. Total National Food Safety Standards of Food Microbiology Testing Colonies Determination [S]
- [13] Yang X, Zhu L, Zhang Y, et al. Microbial community dynamics analysis by high-throughput sequencing in chilled beef longissimus steaks packaged under modified atmospheres [J]. Meat Science, 2018, 141(JUL.): 94-102
- [14] Xue C A, Yz A, Xy A, et al. Shelf-life and microbial community dynamics of super-chilled beef imported from Australia to China - Science Direct [J]. Food Research International, 2019, 120: 784-792
- [15] Lawrence T E, Dikeman M E, Hunt M C, et al. Staged injection marination with calcium lactate, phosphate and salt may improve beef water-binding ability and palatability traits

- [J]. Meat Science, 2003, 65(3): 967-972
- [16] Y H Kim, J T Keeton, S B Smith, et al. Evaluation of antioxidant capacity and colour stability of calcium lactate enhancement on fresh beef under highly oxidising conditions [J]. Food Chemistry, 2008, 115(1): 272-278
- [17] 侯芹,李书文,王艳,等.花椒提取物对调理猪肉饼冷藏期间品质的影响研究[J].食品工业科技,2018,39(10):285-291, 297
HOU Qin, LI Shuwen, WANG Yan, et al. Effects of *Zanthoxylum bungeanum* extract on the quality of prepared pork patties during chilled storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(10): 285-291, 297
- [18] 陈洪生,刁静静,孔保华,等.丁香提取物对冷藏肉饼品质的控制作用[J].天然产物研究与开发,2017,29(3):482-488
CHEN Hongsheng, DIAO Jingjing, KONG Baohua, et al. Effectiveness of clove extracts on inhibiting the quality deterioration of pork patties stored at 4 °C [J]. Natural Product Research and Development, 2017, 29(3): 482-488
- [19] 张杰,唐善虎,李思宁,等.添加含磷与非磷保水剂对牦牛肉肉糜保水性的影响[J].食品工业科技,2017,38(8):306-310
ZHANG Jie, TANG Shanhu, LI Sining, et al. Effect of phosphorus or phosphorus-free agents on water-holding capacity of yak meat batters [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(8): 306-310
- [20] Choi Y M, Jung K C, Jo H M, et al. Combined effects of potassium lactate and calcium ascorbate as sodium chloride substitutes on the physicochemical and sensory characteristics of low-sodium frankfurter sausage [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 21-25
- [21] Meltwm Serdaroglu, Abdraimov K, Alper. The effects of marinating with citric acid solutions and grapefruit juice on cooking and eating quality of turkey breast [J]. Journal of Muscle Foods, 2007, 18(2): 162-172
- [22] Berge P, Ertbjerg P, Larsen L M, et al. Tenderization of beef by lactic acid injected at different times post mortem [J]. Meat Science, 2001, 57: 347-357
- [23] 吴雪燕,张培培,汪淼,等.中式香肠蛋白氧化降解对产品品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(14):151-156
WU Xueyan, ZHANG Peipei, WANG Miao, et al. Effect of protein oxidation and degradation on the quality of Chinese-style sausage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(14): 151-156
- [24] Rahman M S, Al-Farsi S A. Instrumental texture profile analysis (TPA) of date flesh as a function of moisture content [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(4): 505-511
- [25] Benito M J, Rodriguez M, Acosta R, et al. Effect of the fungal extracellular protease EPg222 on texture of whole pieces of pork loin [J]. Meat Science, 2003, 65(2): 877-884
- [26] Ana Rivas-Cañedo, Juez-Ojeda C, Manuel Nuñez, et al. Effects of high-pressure processing on the volatile compounds of sliced cooked pork shoulder during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2010, 124(3): 749-758
- [27] 李媛媛,韩齐,牛海力,等.高静压加工对肉及肉制品脂肪氧化的影响[J].食品工业,2015,36(12):227-231
LI Yuanyuan, HAN Qi, NIU Haili, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on lipid oxidation of meat and meat product: a review [J]. The Food Industry, 2015, 36(12): 227-231
- [28] 磨佳琳,刘程惠,戴祥英,等.Nisin 抑制冷鲜牛肉氧化的研究[J].肉类工业,2019,12:38-42
MO Jialin, LIU Chenghui, DAI Xiangying, et al. Study on inhibiting oxidation of chilled beef by nisin [J]. Meat Industry, 2019, 12: 38-42
- [29] 宋萌,孔保华.Nisin 复合防腐剂对冷却猪肉保质期及品质的影响[J].东北农业大学学报,2008,10:82-88
SUN Meng, KONG Baohua. Extending shelf life of chilled pork by combination of nisin and other preservatives [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 10: 82-88
- [30] 赵敏,唐宏刚,孟祥河,等.Nisin 和壳聚糖协同乳酸对冷却猪肉保鲜效果的影响[J].浙江农业学报,2015,27(10):1817-1821
ZHAO Min, TANG Honggang, MENG Xianghe, et al. The effect of nisin and chitosan cooperating with lactic acid on fresh-keeping of chilled pork [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(10): 1817-1821
- [31] Taylor C C, Kung L. The effect of *Lactobacillus buchmeri* 40788 on the fermentation and aerobic stability of high moisture corn in laboratory silos 1 [J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(6): 1526-1532
- [32] 吕淑霞,白泽朴,代义,等.乳酸链球菌素(Nisin)抑菌作用及其抑菌机理的研究[J].中国酿造,2008,9:87-91
LYU Shuxia, BAI Zepu, DAI Yi, et al. Study on antibacterial function and mechanism of nisin [J]. China Brewing, 2008, 9: 87-91
- [33] 罗婵.Nisin、柠檬酸及双乙酸钠在鲜切生菜清洗过程中的应用研究[D].成都:四川农业大学,2014
LUO Chan. Study on the application of nisin, citric acid and sodium acetate in the washing process of fresh-cut lettuce [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2014

- [34] 顾仁勇,杨万根.响应面试验优化低盐湘西腊肉复配防腐剂的配方[J].食品科学,2015,36(22):46-50
GU Renyong, YANG Wangen. Optimization of mixed preservative for low-salt Xiangxi bacon by response surface methodology [J]. Food Science, 2015, 36(22): 46-50
- [35] GB 2726-2016,食品安全国家标准 熟肉制品[S]
GB/T 2726-2016, Ministry of Health of the People's Republic of China. National food safety standard cooked meat products [S]
- [36] 李茹,卢世玲,李开雄.响应面法优化酱卤鹿肉复合生物保鲜剂配方的研究[J].食品工业,2013,34(5):1-4
LI Ru, LU Shiling, LI Kaixiong. Optimization of composite natural antistaling agent on venison halogen products by response surface methodology [J]. The Food Industry, 2013, 34(5): 1-4
- [37] Liu H, Pei H, Han Z, et al. The antimicrobial effects and synergistic antibacterial mechanism of the combination of ϵ -polylysine and nisin against *Bacillus subtilis* [J]. Food Control, 2015
- [38] 殷燕,李晨博,曾晔临,等.丙酸钙及其在动物生产中的应用[J].饲料工业,2011,32(16):15-17
YIN Yan, LI Chenbo, ZENG Yelin, et al. Application of calcium propionate in animal production [J]. Feed Industry, 2011, 32(16): 15-17
- [39] 张秋勤.生鲜鸡肉中腐败菌群体感应信号分子研究[D].南京:南京农业大学,2014
ZHANG Qiuqin. Study on quorum-sensing signal of spoilage bacteria in raw chicken meat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [40] S Salo, H Ehavald, L Raaska, et al. Microbial surveys in Estonian dairies [J]. LWT - Food Science and Technology, 2006, 39(5): 460-471
- [41] Duan S, Zhou X, Xiao H, et al. Characterization of bacterial microbiota in tilapia fillets under different storage temperatures [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(6): 1487-1493

(上接第 287 页)

- [20] 高凯,刘香军,刘霞,等.不同壁材丁香精油微胶囊保鲜剂性能研究[J].食品工业,2015,23(2):58-61
GAO Kai, LIU Xiangjun, LIU Xia, et al. Study on the properties of microencapsulated preservative of clove essential oil from different wall materials [J]. Food Industry, 2015, 23(2): 58-61
- [21] 徐姗姗,刘文颖,陆路,等.猕猴桃籽油微胶囊的制备及稳定性研究[J].食品与发酵工业,2018,25(10):95-97
XU Shanshan, LIU Wenying, LU Lu, et al. Preparation and stability of kiwifruit seed oil microcapsules [J]. Food & Fermentation Industry, 2018, 25(10): 95-97
- [22] 李琴琴.不同制法纳米银的抗菌活性及其应用研究[D].太原:中北大学,2017
LI Qinqin. Study on antibacterial activity and application of silver nanoparticles prepared by different methods [D]. Taiyuan: North University of China, 2017
- [23] Maryam Nazari, Babak Ghanbarzadeh, Hossein Samadi-kafil, et al. Garlic essential oil nanophytosomes as a natural food preservative: its application in yogurt as food model [J]. Colloid and Interface Science Communications, 2019, 30: 100176
- [24] 陈敏杰.三种植物精油微胶囊的制备及其性能研究[D].广州:华南农业大学,2016
CHEN Minjie. Preparation and properties of three plant essential oil microcapsules [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016
- [25] 徐单单.全封闭脆性柠檬精油微胶囊的制备及表征[D].上海:上海应用技术学院,2016
XU Dandan. Preparation and characterization of completely enclosed brittle lemon essential oil microcapsules [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016
- [26] 程建华,谌宏学,张鹏,等.壳聚糖包裹广藿香精油微胶囊的制备及表征[J].香料香精化妆品,2014,6:17-22,26
CHENG Jianhua, CHEN Hongxue, ZHANG Peng, et al. Preparation and characterization of chitosan encapsulated patchouli essential oil microcapsules [J]. Fragrance and Fragrance Cosmetics, 2014, 6: 17-22, 26
- [27] 彭莹芸,付复华,朱平平,等.超声辅助制备葡萄柚精油纳米微胶囊及其表征[J].食品与机械,2019,35(5):208-212
PENG Yingyun, FU Fuhua, ZHU Pingping, et al. Ultrasonic-assisted preparation and characterization of grapefruit essential oil nanoscale microcapsules [J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 208-212
- [28] YANG Ziming, PENG Zheng, LI Ji-hua, et al. Development and evaluation of novel flavour microcapsules containing vanilla oil using complex coacervation approach [J]. Food Chemistry, 2014, 145(7): 272-277