

接种复合菌的干腌美国红鱼在加工过程中的品质变化

刘佳玥¹, 麦锐杰¹, 杨娟^{1,2}, 李湘銮^{1,2}, 赵文红^{1,2}, 白卫东^{1,2*}, 欧佰侨³

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225)

(2. 农村农业部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东广州 510225)

(3. 茂名市大渔水产品有限公司, 广东茂名 525000)

摘要: 该文以植物乳杆菌和酵母菌作为复合发酵剂部分替代钠盐以制备低盐的干腌美国红鱼。通过测定其水分活度和水分含量、色差、质构及 pH 值、蛋白质氧化性的指标, 研究复合菌对美国红鱼在干腌过程中对其氧化现象的抑制作用。研究表明: 同时加入植物乳杆菌和酵母菌外源微生物的样品水分活度和 pH 值与对照组无显著性差异 ($P>0.05$), 对照组和混菌组水分含量分别是 35.21% (m/m) 和 35.35% (m/m), 水分含量与对照组有显著性差异 ($P<0.05$), 说明用复合菌替代部分钠盐不影响干腌红鱼的保藏性。复合菌使干腌红鱼分别在亮度 (L^*) 低于对照组 ($P<0.05$)、黄度 (b^*) 高于对照组 ($P<0.05$), 表明复合菌有助于维持干腌红鱼肉质稳定性。此外, 在加工过程中, 接种复合菌可以改善干腌鱼的质构特性。复合菌研究表明, 分析干腌红鱼蛋白氧化导致的蛋白羰基含量显著增长, 巯基含量显著下降, 羰基含量显著上升现象。该结果显示, 生产时可添加复合菌代替部分钠盐, 可以显著减少加工过程中的蛋白氧化现象。此外, 与单独加入酵母菌的红鱼相比, 单独加入植物乳杆菌的红鱼抑制蛋白氧化效果更好。

关键词: 干腌美国红鱼; 外源微生物; 品质; 植物乳杆菌; 酵母菌

文章编号: 1673-9078(2023)09-52-61

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.1161

Analysis of Quality Changes of Dry-cured American Red Fish Induced by Inoculating Complex Bacteria during Processing

LIU Jiayue¹, MAI Ruijie¹, YANG Juan^{1,2}, LI Xiangluan^{1,2}, ZHAO Wenhong^{1,2}, BAI Weidong^{1,2*}, OU Baiqiao³

(1. Light Industry Food College, Zhongkai College of Agricultural Engineering, Guangdong Province Lingnan Specialty Food Science and Technology Key Laboratory, Guangzhou 510225, China) (2. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Foods, Ministry of Rural Agriculture, Guangzhou 510225, China)

(3. Maoming Dayu Aquatic Products Co. Ltd., Maoming 525000, China)

Abstract: In this study, *Lactobacillus plantarum* and yeast were used as a composite starter to replace partially sodium salt to prepare low-salt dry-cured red fish. The inhibition of the composite bacteria on the oxidation of red fish during dry-curing was studied through measuring its water activity, water content, color difference, texture, pH, and protein oxidation. The results showed that the water activity and pH of the samples with simultaneously added *Lactobacillus plantarum* and yeast exogenous microorganisms were insignificantly different from those of the control group ($P>0.05$), though their water contents differed significantly ($P<0.05$; 35.21% m/m and 35.35% m/m , respectively, for the control group and the composite bacteria group). These results indicated that replacing partially sodium salt with composite bacteria did not affect the preservation of dry-cured red fish. The composite bacteria made the dry-cured red fish having a lower brightness (L^*) ($P<0.05$) and a

引文格式:

刘佳玥, 麦锐杰, 杨娟, 等. 接种复合菌的干腌美国红鱼在加工过程中的品质变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(9): 52-61

LIU Jiayue, MAI Ruijie, YANG Juan, et al. Analysis of quality changes of dry-cured american red fish induced by inoculating complex bacteria during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 52-61

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32272462); 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室 (2021B1212040013); 广东省教育厅的特色创新项目 (2021KTSCX046); 仲恺农业工程学院研究生创新基金项目 (KJCX2022012); 广东茂名滨海新区海洋渔业产业园-现代渔业全产业链技术研究项目 (0835-220FA8102621)

作者简介: 刘佳玥 (1999-), 女, 研究生, 研究方向: 食品化学, E-mail: jiayuezan@163.com

通讯作者: 白卫东 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: 767313893@qq.com

higher yellowness (b^*) compared with the control group ($P < 0.05$). These results showed that the composite bacteria helped maintain the stability of the color of dry-cured red fish. In addition, adding composite bacteria improved the texture characteristics of dry-cured red fish. The results showed that the protein oxidation in dry-cured red fish caused the increase of carbonyl content and decrease in the content of sulfhydryl group. Thus, replacing partially the sodium salt with the composite bacteria could significantly reduce protein oxidation during processing. Furthermore, compared with the red fish added with yeast alone, the inhibitory effect of protein oxidation in the red fish induced by inoculating *Lactobacillus plantarum* alone was better.

Key words: dry-cured redfish; exogenous microorganisms; quality; *Lactobacillus plantarum*; yeast

美国红鱼是一种富含蛋白质和 DHA、EPA 等多不饱和脂肪酸的鱼类^[1], 其味道鲜美、营养价值极高, 因而备受消费者青睐。由于美国红鱼中组织蛋白酶和脂肪酶等酶活性较高且容易受到微生物污染而容易腐败^[2], 因而在传统工艺上, 常常选用干腌工艺来抑制微生物生长和组织酶活力, 实现延长保质期的效果^[3]。干腌作为一种传统的食品保藏方法, 通过添加食盐对原料肉进行适度腌制后风干而成, 此工艺不仅能够抑制肉品腐败变质, 同时也在内源性酶或者少量微生物的适度发酵作用下, 形成干腌鱼肉制品独特的风味和滋味^[4], 受到部分消费者喜爱。

传统的干腌工艺往往仅通过添加少量食盐来促进水分流失、降低水分活度而实现抑制鱼肉制品腐败、延长保质期。而近些年, 一些学者在干腌过程中也会通过添加一些外源物来提高产品品质, 如添加抗氧化剂、微生物等^[5,6], 已有研究尝试将单一菌种或复配菌种人工接入原料肉中进行适度发酵, 以提高干腌肉制品品质^[7]。植物乳杆菌和酵母菌等微生物常常被添加到干腌鱼肉制品中用来促进原料肉部分发酵产生风味物质、抑制腐败菌的生长^[8,9]。此外, 鱼肉中的蛋白质与脂质在乳杆菌和酵母菌的作用下被水解为风味与滋味物质, 使得干腌鱼的腥味减少、香气增加^[10]。如, 植物乳杆菌被用在鱼肉腌制品中, 可以通过发酵产生有机酸降低 pH 值, 进而抑制病原菌和腐败菌的繁殖^[11]。接种植物乳杆菌可以提高发酵鱼抗氧化活性, 延缓鱼肉腐败变质, 提高腌鱼的货架期^[12-14]的同时, 较低的 pH 值还能促进纤维蛋白凝固, 使其持水性下降, 促进风干, 增加产品内聚性, 改善口感^[15]。An 等^[16]在研究从 Aji-narezushi (用盐腌制金枪鱼再用稻米发酵) 和 Kaburazushi (用盐腌制茼蒿并与黄鱼、麦芽发酵) 中筛选可发酵乳糖、嗜酸、具有抗氧化活性的菌株时发现, 筛选出的菌株为乳酸杆菌, 其表现出很高的自由基清除活性。除了延长腌鱼制品贮藏期外, 加入的植物乳杆菌和酵母菌还能改善腌鱼品质。酵母菌, 作为一种发酵剂, 使用的酵母菌促进发酵制品的干燥的同时, 还有一定的抗氧化作用^[17]。此外, 酵母

可以影响发酵产品的颜色和风味。尽管众多干腌鱼制品通过添加微生物来提高产品品质, 但是目前尚未见干腌美国红鱼制品有相关报道。

该文分别研究了加入酵母菌菌液、植物乳杆菌菌液和混菌菌液对干腌美国红鱼品质的影响。本实验通过比较不同菌种对腌鱼水分活度和水分含量、pH 值、色差、质构和蛋白质氧化性质的影响, 以期为干腌红鱼生产与开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 细菌培养和培养基

植物乳杆菌植物亚种 24258 (*Lactobacillus plantarum*, LAB-24258) 购自中国植物乳酸杆菌工业化培养收集中心。蜂蜜结合酵母 LGL-1 来源于轻工业与食品科学研究所(仲恺农业工程学院)创新团队发酵实验室。LAB-24258 和 LGL-1 分别在 MRS 肉汤培养基 (MRS Broth, MRS) 和麦汁培养基中 25 °C 传代两次, 每次培养 24 h。使用离心机离心, 并用无菌水洗涤两次。细菌计数调整为 1×10^8 CFU/mL。

1.1.2 样品处理

新鲜红鱼购于广州海珠区蟠龙市场, 样品经冷冻密封箱, 运回实验室后, 置于 -40 °C 低温冰箱保存。

将红鱼切成重 100 g 的小块, 大小为 15 cm × 5 cm × 2 cm。参考 Wu 等^[18]干腌过程如下: 按占总红鱼样品质量的 4% 加入食盐, 在 4 °C 下腌制 5 h。随后, 将鱼块用相应的菌液或无菌去离子水 (占红鱼总质量的 10%), 在环境温度 25 °C 下发酵 2 h, 然后在 16 °C 的人工气候箱中风干 5 d。最后, 使用 FW-80 型均质机在 24 000 r/min 的转速下均质化后的样品。

红鱼分为以下四组: 对照组、酵母菌组加蜂蜜结合酵母 LGL-1、植物乳杆菌组加植物乳杆菌植物亚种 24258 和混菌组样品加菌液 (植物乳杆菌植物亚种 24258: 蜂蜜结合酵母 LGL-1=1:2)。

1.2 实验试剂

食盐, 购自广州家乐福超市; 牛血清蛋白、三羟甲基氨基甲烷 (Tris(hydroxymethyl)aminomethane, Tris-HCl)、乙二胺四乙酸 (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid, EDTA)、尿素、甘氨酸、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸) (5,5'-Dithiobis-(2-Nitrobenzoic Acid), DTNB) 等均分析纯, 麦克林试剂有限公司; 其他实验所用常见试剂, 广州东巨生物试剂有限公司。

1.3 仪器设备

JP-300B-8D 高速多功能粉碎机, 永康市久品工贸有限公司; HC103 水份测定仪和 FiveEasy Plus pH 计, 梅特勒-托利多公司; Aw100 水分活度仪, 深圳冠亚水分仪科技有限公司; CR-400 色差仪, 日本 Konica Minolta 公司; TMS-PRO 质构仪, 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; HWS-12 电热恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; FW-80 型均质机, 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; 5810R 多功能台式离心机, 德国艾本德公司; TU-1901 双光束紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限公司; PQX-350H 人工气候箱, 中仪国科(北京)科技有限公司。

1.4 实验方法

1.4.1 水分含量的测定方法

参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》^[19]中直接干燥法进行测定。

1.4.2 水分活度的测定方法

参考 GB 5009.238-2016《食品水分活度的测定》^[20]中水分活度仪扩散法进行测定。

1.4.3 pH 变化的测定方法

参考 GB 5009.237-2016《食品 pH 值的测定》^[21]中测定肉制品 pH 值方法进行测定。

1.4.4 色差的测定方法

参考张波^[22]的方法, 并略有修改。按照 1.1.2 的工艺制备干腌美国红鱼产品, 取位置和大小一致的完整鱼肉, 用色差仪测定鱼肉的 a^* (红度值)、 b^* (黄度值) 和 L^* (亮度值)。

1.4.5 质构的测定方法

参考叶路漫^[23]的方法, 并略有修改。按照 1.1.2 的工艺制备干腌美国红鱼产品, 将样品切割成 3 cm×3 cm×3 cm 的块状, 采用质构仪进行多面剖析模式测试。具体参数: 平底柱形探头 P/5; 测前速率 30 mm/min; 测定速率: 60 mm/min; 测后速率: 60 mm/min; 压缩程度: 50%; 探头两次测定间隔时间 5 s。每次测定之

后清洗探头, 每片鱼片重复平行测定 2 次, 最终结果取其平均值。

1.4.6 蛋白质氧化性质的测定

1.4.6.1 肌浆蛋白与肌原纤维蛋白的提取

提取红鱼制品鱼肉肌浆蛋白和肌原纤维蛋白的方法参考 Toldrá 等^[24]的方法, 并略有修改。取鱼肉 5 g 于烧杯中, 加入 50 mL Tris-HCl 缓冲液 (0.1 mol/L, pH 值 7.4), 用均质机均质 2 min, 然后以 12 000 r/min 的速率离心 8 min, 上清液为肌浆蛋白提取液。上述肌浆蛋白提取的沉淀用 50 mL 的 Tris-HCl 缓冲液洗涤 3 次, 除去缓冲液后, 加入 50 mL 含有 0.6 mL/L KCl 的 Tris-HCl 缓冲液, 抽提过滤, 最后以 8 000 r/min 的速率离心 10 min, 取上清液即为肌原纤维蛋白溶液。此过程均在 4 °C 下进行。之后采用双缩脲法测定蛋白浓度。

1.4.6.2 蛋白质总巯基与活性巯基的测定

测定干腌红鱼制品鱼肉肌浆蛋白和肌原纤维蛋白总巯基和活性巯基的方法参考 Koutina 等^[25]的方法, 并略有修改。

(1) 总巯基的测定方法: 取 1.4.6.1 所制蛋白悬浮液 1 mL, 加入 pH 值 8.0 的 Tris-Gly-8M 尿素缓冲液 5 mL 和 4 mg/mL 的 DTNB 40 μ L, 5 °C 涡旋振荡 30 min, 在 412 nm 测定吸光值。

$$X = \frac{A \times D \times 10^7}{C \times 1.36 \times 10^4} \quad (1)$$

式中:

X —总巯基, nmol/g;

A —为减去试剂空白后 412 nm 处肌浆蛋白吸光值;

D —为肌浆蛋白稀释倍数;

C —为肌浆蛋白质量浓度, mg/mL。

(2) 活性巯基的测定方法: 取 1.4.6.1 所制蛋白悬浮液 1 mL, 加入 pH 值 8.0 的 Tris-Gly 缓冲液 5 mL 和 4 mg/mL 的 DTNB 40 μ L, 25 °C 涡旋振荡 30 min, 在 412 nm 处测定吸光值。

1.4.6.3 蛋白质羰基含量的测定

参考 Rashidnejad 等^[26]测定蛋白质羰基含量的方法测定肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的羰基含量。羰基含量按式 (2) 计算。

$$Y = \frac{A_1 - A_0}{\rho \times 22 \times 0.6} \times 2 \times 10^7 \quad (2)$$

式中:

Y —羰基含量, nmol/mg;

A_0 —为空白对照组溶液体系的吸光度;

A_1 —为样品溶液体系的吸光度;

ρ —为肌原纤维蛋白溶液质量浓度, mg/L。

1.4.6.4 蛋白质表面疏水性的测定

参考 Chelh 等^[27]测定蛋白质疏水性的方法测定肌原纤维蛋白和肌浆蛋白疏水性。蛋白表面疏水性以 BPB 结合量表示。表面疏水性按式 (3) 计算。

$$W = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 200 \quad (3)$$

式中:

W——表面疏水性, μg ;

A_0 ——为磷酸盐缓冲液吸光度;

A_1 ——为样品溶液吸光度。

1.5 数据分析

数据用 IBM SPSS Statistics 20 进行方差分析和 Duncan's 多重极差比较 ($P < 0.05$) 进行分析, 采用 SIMCA 14.1 和 Origin 2022 作图。

2 结果与讨论

2.1 复合菌在加工过程中对红鱼鱼片水分活度、水分含量和 pH 值的影响

水分活度是影响腌制品品质和衡量腌制品贮藏稳定性的重要因素之一。如表 1 所示, 各组干腌红鱼在加工过程中水分活度呈下降趋势, 鲜肉肉的水分活度为 0.98, 干腌 5 d 后, 对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品水分活度最终分别为 0.78、0.75、0.79、0.78, 均未超过 0.8, 因此能够抑制大部分微生物生长, 达到延长保质期的效果。对照组与植物乳杆菌组、混菌组之间未呈现出显著性差异 ($P > 0.05$), 较低的水分活度有利于延长红鱼的保藏^[28]。实验结果表明风干过程中, 加入的复合菌可有效降低鱼肉水分活度, 但其保藏性与对照组相比没有明显提升。该结果与吴永祥等^[29]研究结果一致。

表 1 加工过程中水分活度、水分含量和 pH 值

Table 1 Water activity, moisture content and pH

参数	水分活度	水分含量/(%, m/m)	pH 值
鲜肉	0.98±0.06 ^a	61.35±0.26 ^a	6.55±0.04 ^g
腌制后	0.97±0.07 ^a	55.52±0.64 ^a	6.49±0.03 ^f
发酵	对照组	0.96±0.05 ^{fg}	52.48±0.47 ^b
	酵母菌组	0.97±0.07 ^g	53.01±1.25 ^c
	植物乳杆菌组	0.97±0.08 ^g	53.91±0.35 ^d
	混菌组	0.97±0.07 ^g	52.14±0.28 ^a
风干 1 d	对照组	0.95±0.05 ^e	45.61±0.59 ^{ab}
	酵母菌组	0.96±0.04 ^f	47.01±0.16 ^{bc}
	植物乳杆菌组	0.97±0.04 ^g	47.78±1.06 ^c
	混菌组	0.96±0.04 ^f	45.05±1.51 ^a
风干 3 d	对照组	0.88±0.08 ^{cd}	41.01±0.26 ^b
	酵母菌组	0.88±0.05 ^{cd}	39.55±0.62 ^{ab}
	植物乳杆菌组	0.88±0.03 ^d	39.13±0.94 ^a
	混菌组	0.87±0.05 ^c	40.87±0.59 ^b
风干 5 d	对照组	0.78±0.04 ^b	35.21±0.49 ^b
	酵母菌组	0.75±0.06 ^a	34.06±0.25 ^{ab}
	植物乳杆菌组	0.79±0.06 ^b	33.47±0.45 ^a
	混菌组	0.78±0.04 ^b	35.35±0.37 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。下表同。

水分含量是影响干腌制品的质地和口感的重要因素之一。干腌红鱼制品的水分含量在加工过程中均呈现显著性的下降趋势 ($P < 0.05$), 风干阶段变化更为明显。未加工的红鱼鱼肉水分含量为 61.35% (m/m), 在干腌 5 d 后, 对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品水分含量最终分别降为 35.21% (m/m)、

34.06% (m/m)、33.47% (m/m)、35.35% (m/m)。此外, 各处理组干腌红鱼水分含量在风干过程均显著下降, 其中, 加入酵母菌组与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$), 其余植物乳杆菌组、混菌组 (酵母菌液: 植物乳杆菌液=2:1) 与对照组均有显著差异性 ($P < 0.05$), 分析其原因可能为植物乳杆菌在鱼肉上

进行了繁殖发酵,产生的乳酸导致 pH 值下降,而较低的 pH 值接近肌肉蛋白等电点时,能促进纤维蛋白凝固,肌肉蛋白的保水性降低,促进植物乳杆菌组的干燥,导致含水量下降^[30];且加入酵母菌进行腌制并不会降低干腌美国红鱼的贮藏性。由此可知,添加复合菌作为发酵剂能够显著降低干腌鱼的水分含量。该趋势与梁进欣等^[31]研究结果一致。

在干腌过程中,pH 值与微生物的生长、蛋白质和脂肪的分解直接相关。较低的 pH 值,导致干腌鱼中的脂肪酸和蛋白质水解酶类的活性降低^[32],影响其品质风味。如表 1 所示,鲜红鱼肉的 pH 值为 6.55,总体上,在加工过程中 pH 值呈下降趋势,在风干第 5 天,对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品 pH 值为 6.39、6.33、6.31、6.37。加菌组的 pH 值略低于对照组,但无显著性差异 ($P>0.05$),结果表明酵母菌和植物乳杆菌作为优势菌,产酸^[33]和酶促水解^[34]

导致 pH 值整体呈下降趋势,这说明混菌组保藏效果最好。混合菌种接种到样品中大量繁殖,分解鱼肉中的碳水化合物产生乳酸、乙酸等酸性代谢产物,从而快速降低鱼肉的 pH 值^[35];同时成熟过程中脂肪的分解、FFA 的积累也会引起 pH 值的降低,腌制后期微生物的活性降低,还可能是由于氨基酸分解产生的胺和肽中和酸性物质,导致 pH 值降低趋势变缓^[36]。对照组可能因内源酶或自身携带的微生物酶的作用引起 pH 值降低^[37]。说明加入复合菌可以充分利用红鱼肉产酸,降低 pH 值,抑制其他腐败菌生长^[38],而且复合菌对产品风味及品质和安全性有影响。该趋势与许惠雅等^[39]研究结果一致。

2.2 复合菌在加工过程中对红鱼鱼片色差的影响

表 2 加工过程中对色差的影响

Table 2 Influence on chromatic aberration during processing

参数	L^*	a^*	b^*	
鲜肉	48.98±0.18 ⁱ	0.49±0.02 ^d	5.16±0.38 ^g	
腌制后	39.69±0.17 ^c	-0.96±0.01 ^a	-5.06±0.66 ^a	
发酵	对照组	45.81±0.13 ^g	-1.13±0.17 ^{bc}	-2.94±0.39 ^c
	酵母菌组	47.33±0.23 ^h	-2.63±0.01 ^a	-4.00±0.08 ^b
	植物乳杆菌组	45.76±1.04 ^g	-1.07±0.15 ^{bc}	-2.92±0.07 ^c
	混菌组	45.74±1.11 ^g	-1.99±0.14 ^{ab}	-4.94±0.02 ^a
风干 1 d	对照组	44.97±0.88 ^g	-0.58±0.16 ^c	0.91±0.14 ^c
	酵母菌组	45.71±0.2 ^g	-0.9±0.04 ^c	-1.53±0.39 ^d
	植物乳杆菌组	42.51±0.23 ^f	-0.64±0.18 ^c	1.18±0.27 ^c
	混菌组	43.33±0.35 ^f	-1.04±1.26 ^{bc}	-2.09±0.06 ^{cd}
风干 3 d	对照组	36.16±0.91 ^d	1.6±0.3 ^{def}	5.53±0.24 ^g
	酵母菌组	33.04±0.52 ^c	1.07±0.15 ^{de}	2.91±0.37 ^f
	植物乳杆菌组	33.35±0.58 ^c	0.47±0.11 ^d	3.47±0.04 ^f
	混菌组	33.15±0.52 ^c	1.45±0.09 ^{ef}	3.37±0.26 ^f
风干 5 d	对照组	31.33±0.23 ^b	3.37±0.39 ^g	12.3±0.54 ^h
	酵母菌组	28.92±0.34 ^a	2.06±0.01 ^f	11.69±0.57 ^h
	植物乳杆菌组	28.75±0.84 ^a	8.84±0.93 ^h	19.69±0.57 ^j
	混菌组	29.84±0.25 ^a	3.64±0.6 ^g	16.28±0.72 ⁱ

腌鱼色泽是评价干腌鱼品质的关键指标之一。从表 2 可看出,在干腌过程中,加菌组与对照组的亮度 (L^*)、红度 (a^*)、黄度 (b^*) 有显著的变化 ($P<0.05$),其中加混菌组色泽最佳。鲜红鱼肉亮度为 48.98,在风干第 5 天,对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品亮度为 31.33、28.92、28.75、29.84。证明这一过程鱼肉收缩,肌纤维间距减小,导致亮度变低。在风干过程中,各试验组红度均呈现先下降后

上升的趋势,前期下降变化是由于鱼肉表面的少量的肌红蛋白与食盐反应产生胆绿素^[40],而在风干 3 d 至风干 5 d 过程中,对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品红度分别变为 3.37、2.06、8.84、3.64。这是由于血红蛋白氧化,以及微量的美拉德反应等使鱼肉的色泽降低^[41],从而鱼肉的亮度随着降低,红度上升。特别是风干第 5 天,黄度由鲜红鱼肉 5.16 分别升高为对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组样品

的黄度 12.3、11.69、19.69、16.28，这是鱼肉脂肪氧化造成的。

结果表明，添加复合菌发酵剂能够干腌红鱼制品的色泽。在风干第 5 天，对照组的亮度与其余 3 组都有显著性差异 ($P < 0.05$)，但这 3 组之间的亮度无显著差异 ($P > 0.05$)。说明复合菌的添加对干腌红鱼的外观品质有影响，但菌种差异对其亮度的影响不明显；在红度上，混菌组与对照组无显著差异 ($P > 0.05$)，加入发酵剂组之间有显著差异 ($P < 0.05$)，说明干腌红鱼的红度与加入发酵剂的种类有关系；在黄度上，

加酵母菌组与对照组没有明显的差异 ($P > 0.05$)，植物乳杆菌组与混菌组都有显著性差异 ($P < 0.05$)，说明植物乳杆菌对干腌红鱼黄度无显著影响。研究表明，颜色越深，氧化程度越大。植物乳杆菌和酵母菌作用时间与干腌红鱼色差值呈正相关^[42,43]。该结果与李秀明等^[44]研究结果相似。

2.3 复合菌在加工过程中对红鱼鱼片质构的影响

表 3 加工过程中对质构的影响

Table 3 Effects on texture during processing

参数	硬度/N	内聚性/ratio	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/mj	
鲜肉	5.91±0.12 ⁿ	0.49±0.01 ⁱ	0.76±0.03 ^k	2.91±0.02 ^l	2.21±0.07 ^o	
腌制后	8.58±0.33 ^m	0.45±0.03 ^j	1.56±0.02 ^b	3.81±0.08 ^k	3.99±0.14 ⁿ	
发酵	对照组	11.11±0.38 ^k	0.54±0.01 ^c	1.49±0.05 ^e	5.98±0.03 ^{ij}	9.04±0.23 ^k
	酵母菌组	10.73±0.13 ^k	0.54±0.03 ^d	1.37±0.03 ^d	5.82±0.02 ^j	7.83±0.03 ^l
	植物乳杆菌组	8.48±0.06 ^l	0.52±0.03 ^{ef}	1.32±0.04 ^{ef}	4.45±0.05 ^k	5.71±0.02 ^m
	混菌组	10.7±0.57 ^k	0.62±0.05 ^c	1.22±0.11 ^e	6.58±0.23 ^{ij}	8.09±0.12 ^{kl}
风干 1 d	对照组	11.65±0.26 ^k	0.6±0.02 ^d	1.35±0.06 ^{de}	6.87±0.32 ⁱ	9.23±0.24 ^j
	酵母菌组	22.58±0.31 ^h	0.58±0.02 ^d	1.58±0.07 ^a	13.3±0.19 ^e	21.2±0.53 ^h
	植物乳杆菌组	14.74±0.63 ^j	0.56±0.06 ^f	1.02±0.04 ⁱ	8.24±0.07 ^h	8.49±0.15 ^{kl}
	混菌组	19.82±0.28 ⁱ	0.64±0.07 ^b	0.94±0.02 ^j	12.55±0.32 ^e	11.91±0.05 ⁱ
风干 3 d	对照组	38.33±1.56 ^g	0.57±0.03 ^{ef}	1.12±0.02 ^h	21.7±0.73 ^f	24.54±1.25 ^g
	酵母菌组	68.61±1.33 ^d	0.52±0.06 ^f	1.28±0.04 ^f	35.91±1.18 ^e	46.38±1.45 ^b
	植物乳杆菌组	39.92±1.44 ^f	0.59±0.01 ^d	1.03±0.01 ⁱ	23.79±0.73 ^e	24.52±1.16 ^g
	混菌组	45.11±1.35 ^e	0.64±0.08 ^b	1.05±0.06 ⁱ	29.09±0.73 ^d	30.56±0.03 ^e
风干 5 d	对照组	71.82±2.8 ^d	0.66±0.01 ^a	0.76±0.03 ^k	46.53±0.47 ^b	35.64±0.88 ^f
	酵母菌组	83.51±2.24 ^a	0.63±0.04 ^{bc}	1.23±0.16 ^g	52.94±1.42 ^a	64.37±0.8 ^a
	植物乳杆菌组	74.86±1.89 ^c	0.63±0.01 ^{bc}	0.77±0.05 ^k	46.9±1.23 ^b	42.21±0.43 ^c
	混菌组	78.76±2.37 ^b	0.66±0.05 ^a	0.71±0.02 ^l	52.23±1.14 ^a	37.16±1.05 ^d

总体上，美国红鱼的硬度随着风干的进行而显著增加。其中对照组与加菌组之间具有显著差异 ($P < 0.05$)，说明复合菌发酵剂对硬度的变化有很大的影响。由于干腌过程中微生物的作用，酸性环境下，蛋白质易形成酸诱导凝胶使干腌美国红鱼的硬度上升，此外，水分含量的降低也会导致硬度的上升^[45]。同时从表 3 可以看出，内聚性在干腌制加工过程中总体呈现上升的趋势，在风干第 5 天，对照组与加菌组呈现出显著性差异 ($P < 0.05$)，表明加入复合菌腌制有助于适当保持食物内部组织之间连接完整性。此外，植物乳杆菌组和酵母菌组的弹性及咀嚼性均优于对照组，说明加菌可以丰富干腌美国红鱼的口感。在风干第 5 天，干腌红鱼的胶黏性对照组与酵母组、混菌组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)，说明酵母菌的加入

改变了干腌鱼胶黏性，减缓鱼的氧化变质，有助于保持和改善美国红鱼的质构品质^[46]。综上所述，混菌组的品质较好。该现象与刘钰琪等^[47]研究结果一致。

2.4 复合菌作为发酵剂在红鱼加工过程中对蛋白质氧化性质的影响

2.4.1 肌原纤维蛋白和肌浆蛋白疏水性的变化

疏水作用是维持蛋白质三级结构最重要的作用力。蛋白质的疏水性能反映出蛋白质化学和物理性质的微小变化，是评价蛋白变性的一个重要参数^[48]。有研究表明，蛋白疏水性和蛋白氧化有关^[49]，表面疏水性的变化如图 1 所示，总体上，肌原纤维蛋白和肌浆蛋白疏水性含量均随着加工的进行而上升，鱼肉蛋白

在鱼内源酶、微生物的共同作用下,氧化会使蛋白结构内部的疏水氨基酸暴露出来,从而增加蛋白的表面疏水性。肌原纤维蛋白疏水性含量从 76.94 μg 分别上升至 109.8、96.87、92.36、92.28 μg ; 肌浆蛋白疏水性含量从 22.08 μg 分别上升至 114.21、73.95、69.82、59.74 μg 。在风干第 5 天,对照组的疏水性含量显著高于其余三组 ($P < 0.05$),说明对照组蛋白质氧化更剧烈,加菌组氧化程度小,可能植物乳杆菌和酵母菌对蛋白质有抗氧化作用,氧化作用得到有效抑制,使干腌红鱼中暴露出来的疏水性氨基酸比较少。加菌组之间的差异性表明,鱼肉中蛋白质在植物乳杆菌和酵母菌产生的蛋白酶作用下降解^[50],会使蛋白内部疏水基团暴露出来,导致表面疏水性增加程度不同。蛋白氧化与张亚军等^[51]研究结果相似。

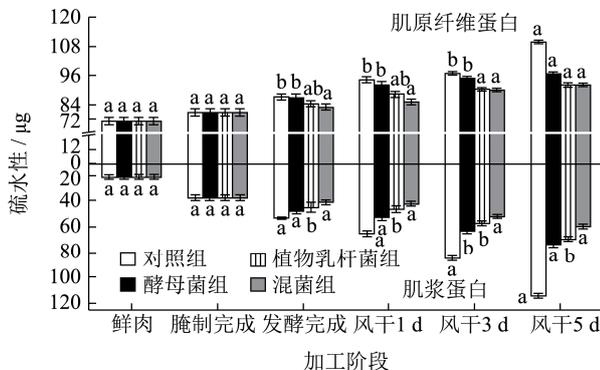


图1 腌制过程中疏水性的变化

Fig.1 Change of hydrophobicity during the salting process

注: 图中不同字母表示同一腌制时间,不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.4.2 肌原纤维蛋白和肌浆蛋白总巯基和活性巯基的变化

巯基是表现反应活性的重要功能基团。巯基含量反映了蛋白质变性聚合的程度^[52]。总体上,肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的总巯基和活性巯基含量均随着加工的进行而下降。肌原纤维蛋白含量下降幅度较小,从 0.46 nmol/g 分别下降至 0.12、0.14、0.16、0.16 nmol/g; 肌浆蛋白含量下降幅度较大,从 1.66 nmol/g 分别下降至 0.39、0.43、0.45、0.65 nmol/g。一般认为,鱼肉组织蛋白酶在蛋白水解中起主要作用,而微生物酶作用较弱,主要在腌肉成熟的后期发挥作用^[53]。在风干第 5 天,对照组的总巯基含量显著低于其余三组,说明对照组蛋白质氧化更剧烈,即加入的植物乳杆菌和酵母菌在一定程度上是能抑制蛋白氧化,使得肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的总巯基含量下降减缓^[54]。在风干第 5 天,加菌组肌原纤维蛋白的总巯基含量之间不具有显著差异 ($P > 0.05$),肌浆蛋白有显著差异,说明在短时间内的处理植物乳杆菌和酵母菌对肌浆蛋白的总巯

基含量影响不大。对于活性巯基含量,在第 5 天,加菌组的肌原纤维蛋白活性巯基含量与对照组含量有差异,但肌浆蛋白差异不显著 ($P > 0.05$)。可以说明单一发酵剂对干腌红鱼品质的影响,与酵母菌相比,植物乳杆菌在干腌红鱼腌制过程中有效抗蛋白氧化方面贡献可能更大。该结果与 Zhao 等^[55]的研究结果相似。

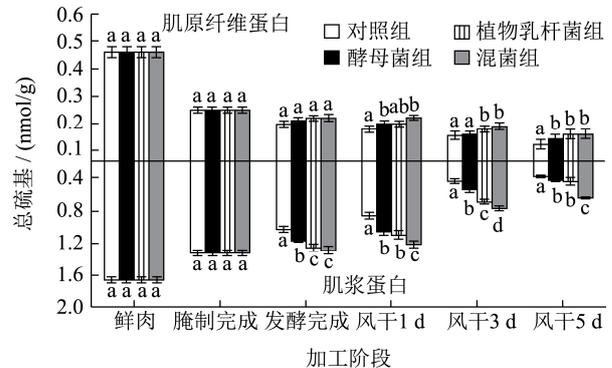


图2 腌制过程中的总巯基变化

Fig.2 Change of total sulfhydryl content during the salting process

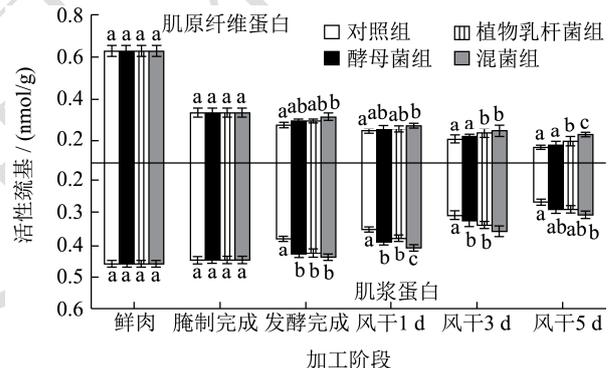


图3 腌制过程中的活性巯基变化

Fig.3 Changes of active sulfhydryl content during the salting process

2.4.3 肌原纤维蛋白和肌浆蛋白羰基含量的变化

蛋白羰基形成是蛋白氧化最显著变化之一。羰基值含量的高低能够反映蛋白质氧化损伤程度的大小。羰基含量越大说明蛋白氧化损伤越严重^[56]。在整个加工及贮藏过程中,各组中干腌红鱼中的羰基值呈上升趋势,说明蛋白氧化程度在不断加。如图 4 所示,在风干 3 d-风干 5 d,肌原纤维蛋白的羰基含量迅速上升,肌原纤维蛋白的羰基含量由鲜红鱼肉 0.14 nmol/mg,上升至对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组分别是 0.43、0.42、0.39、0.35 nmol/mg。肌浆蛋白的羰基含量呈缓慢上升趋势,在鲜肉时是 0.54 nmol/mg,后上升至对照组、酵母菌组、植物乳杆菌组、混菌组分别为 1.93、1.61、1.54、1.35 nmol/mg。其中加菌组羰基含量与对照组相比上升幅度小,具有显著性差异 ($P < 0.05$),说明在腌制鱼肉过程中微生物发酵剂增

殖,从而抑制了干腌红鱼中腐败菌的生长繁殖,复合菌发酵剂起到抗氧化作用^[57,58],降低了蛋白质的分解速率,一定程度上抑制了蛋白质的氧化^[59]。加菌组之间的差异可能是因为植物乳杆菌与酵母菌的抗氧化作用不同。该结果与冯美琴等^[60]结果相似。

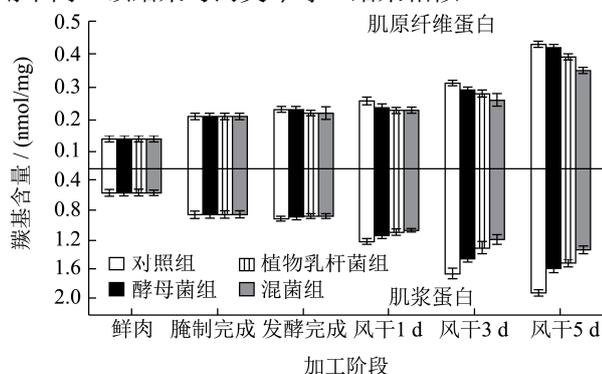


图4 腌制过程中的羰基含量变化

Fig.4 Changes of carbonyl content during the salting process

3 结论

在加工过程中,使用加入植物乳杆菌和酵母菌的干腌红鱼的理化特性与食盐组基本相似,且复合菌具有减少蛋白氧化作用。加入植物乳杆菌和酵母菌外源微生物的样品水分活度、pH值与对照组无显著性差异($P > 0.05$),水分含量与对照组有显著性差异($P < 0.05$),说明接种复合菌腌制有利于干腌红鱼的保藏。对照组与加菌组在质构上呈现出显著性差异($P < 0.05$)。蛋白氧化导致蛋白羰基含量都显著增长,巯基含量显著下降,羰基含量显著上升。复合微生物加快了蛋白的水解速率,在风干第5天,与对照组相比,混菌组的肌原纤维蛋白疏水性含量从76.94 μg 分别上升至92.28 μg ;混菌组的肌浆蛋白疏水性含量从22.08 μg 分别上升至59.74 μg 。对照组的疏水性含量显著高于其余三组($P < 0.05$)。肌原纤维蛋白的羰基含量对照组、混菌组分别是0.39、0.43 nmol/mg。肌浆蛋白的羰基含量在鲜肉时是0.54 nmol/mg,后上升至对照组、混菌组分别为1.93、1.35 nmol/mg。证明添加植物乳杆菌和酵母菌可以降低干腌红鱼加工过程中的钠盐的添加量。

由于加植物乳杆菌组和加酵母菌组的蛋白氧化程度不同,植物乳杆菌和酵母菌两种菌作为发酵剂在产酸、抑菌、蛋白质降解、抗氧化形成方面各有优势,它们不能完全相互替代。因此,加入植物植物乳杆菌和酵母菌替代钠盐具有对增加干腌红鱼贮藏性,获得更好品质,可以将这种复合菌作为干腌红鱼制品的优良发酵剂使用于后续干腌红鱼的加工和生产。综合考虑因素,还需要进一步探讨植物乳杆菌和酵母协同作

用对干腌红鱼风味的整体影响。

参考文献

- [1] 黄晓春,侯温甫,杨文鸽,等.冰藏过程中美国红鱼生化特性的变化[J].食品科学,2007,28(1):337-340.
- [2] 孟现成.美国红鱼营养需要的研究进展[J].齐鲁渔业,2009,26(5):22-24.
- [3] 杨华,张李玲,梅清清.不同腌制工艺处理对美国红鱼品质的影响[J].食品科学,2013,34(11):126-129.
- [4] Almeida M, Saldaa E, Pinto J S D S, et al. A peptidomic approach of meat protein degradation in a low-sodium fermented sausage model using autochthonous starter cultures [J]. Food Research International, 2018, 109: 368-379.
- [5] Ad A, Sod B, Ao C. Synergistic microbial interactions between lactic acid bacteria and yeasts during production of Nigerian indigenous fermented foods and beverages - Science Direct [J]. Food Control, 2020, 110: 106963.
- [6] Alves D, Bastianello C, Bittencourt F M, et al. Adding blends of NaCl, KCl, and CaCl₂ to low-sodium dry fermented sausages: Effects on lipid oxidation on curing process and shelf life [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2: 1-8.
- [7] Korcari D, Ricci G, Quattrini M, et al. Microbial consortia involved in fermented spelt sourdoughs: dynamics and characterization of yeasts and lactic acid bacteria [J]. Letters in Applied Microbiology, 2019, 70(1): 48-54.
- [8] 游刚.植物乳杆菌在腌干鱼类加工中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [9] 许惠雅,张强,王逸鑫,等.不同植物乳杆菌对发酵草鱼品质的影响[J].水产学报,2022,46(2):289-297.
- [10] Shivanne Gowda S G, Narayan B, Gopal S. Bacteriological properties and health-related biochemical components of fermented fish sauce: An overview [J]. Food Reviews International, 2016, 32(2): 203-229.
- [11] Liu Y, Wan Z, Yohannes K W, et al. Functional characteristics of lactobacillus and yeast single starter cultures in the ripening process of dry fermented sausage [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 11(1): 611260.
- [12] Zhou Y, Wu S, Peng Y, et al. Effect of lactic acid bacteria on mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) seasoning quality and flavor during fermentation [J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100971.
- [13] 郑俏然.酱鱼加工工艺优化及其腌制过程中微生物菌群的动态研究[J].食品科技,2015,5:130-133.
- [14] Noraphat H, Subaidah B, Saowakon W, et al. Isolation and screening of lactic acid bacteria from Thai traditional

- fermented fish (Plasom) and production of Plasom from selected strains [J]. Food Control, 2010, 22(3): 401-407.
- [15] Araya-Morice A, Gobba C D, Lametsch R, et al. Effect of the addition of cheese powder and salt content on sensory profile, physicochemical properties and γ -glutamylkokupeptides content in dry fermented sausages [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247: 2027-2037.
- [16] An C, Takahashi H, Kimura B, et al. Comparison of PCR-DGGE and PCR-SSCP analysis for microflora of Kaburazushi and Daikonzushi, traditional fermented foods made from fish and vegetables [J]. Journal of Food Technology, 2011, 9(1): 1-8.
- [17] Cocolin L, Dolci P, Rantsiou K. Biodiversity and dynamics of meat fermentations: The contribution of molecular methods for a better comprehension of a complex ecosystem [J]. Meat Science, 2011, 89(3): 296-302.
- [18] Wu S, Yang J, Dong H, et al. Key aroma compounds of Chinese dry-cured Spanish mackerel (*Scomberomorus nipponius*) and their potential metabolic mechanisms [J]. Food Chemistry, 2020, 342(16): 128381.
- [19] GB 5009.3-2016, 食品安全国家标准食品中水分的测定[S].
- [20] GB 5009.238-2016, 食品安全国家标准食品水分活度的测定[S].
- [21] GB 5009.237-2016, 食品安全国家标准食品 pH 值的测定[S].
- [22] 张波. 低温腌制肉品质形成规律研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [23] 叶路漫. 加工工艺对风干金鲳鱼制品品质作用的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [24] Toldrá F, Rico E, Flores J. Cathepsin B, D, H and L activities in the processing of dry-cured ham [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1993, 62(2): 157-161.
- [25] Koutina G, Jongberg S, Skibsted L H. Protein and lipid oxidation in Parma ham during production [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(38): 9737-9745.
- [26] Rashidnejad A, Shahsavani D, Baghshani H. Investigation of the protective effect of β -carotene in the prevention of lipid and protein oxidation in carp meat during different storage times [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2018, 27(8): 870-875.
- [27] Chelh I, Gatellier P, Santé-Lhoutellier V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination [J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681-683.
- [28] Liu J, Wan P, Xie C, et al. Key aroma-active compounds in brown sugar and their influence on sweetness [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128826.
- [29] 吴永祥, 王婷婷, 张梦婷, 等. 徽州臭鳃鱼微生物多样性、品质特性及其酶解产物抗氧化能力分析[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 128-134.
- [30] 赵艳红. 植物乳杆菌抗氧化功能特性研究及其在羊肉发酵香肠中的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [31] 梁进欣, 陈晓红, 李珊, 等. 植物乳杆菌对干腌马鲛鱼降盐增鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 174-180.
- [32] Ammor M S, Mayo B. Selection criteria for lactic acid bacteria to be used as functional starter cultures in dry sausage production: An update [J]. Meat Science, 2007, 76(1): 138-146.
- [33] 康峻, 吉莉莉, 王卫, 等. 调料中的微生物对浅发酵香肠产品特性的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 15-22.
- [34] 朱迎春, 杜智慧, 马丽珍, 等. 发酵剂对发酵香肠微生物及理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(9): 198-204.
- [35] 黄俊逸, 王凤娜, 吴香, 等. 复合发酵剂的筛选及其对发酵香肠加工过程中品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 95-101.
- [36] 李泽众, 陈红, 李世俊, 等. 云南三川火腿加工过程中的理化性质变化[J]. 肉类研究, 2017, 31(11): 1-6.
- [37] Visessanguan W, Benjakul S, Riebroy S, et al. Changes in lipid composition and fatty acid profile of Nham, a Thai fermented pork sausage, during fermentation [J]. Food Chemistry, 2006, 94(4): 580-588.
- [38] 李贝贝, 龚恒, 艾有伟, 等. 市售条件下冷鲜鲟鱼肉货架期及品质变化规律研究[J]. 食品科技, 2018, 43(4): 7.
- [39] 许惠雅, 张强, 王逸鑫, 等. 不同乳酸菌对发酵草鱼品质的影响[J]. 水产学报, 2022, 46(2): 289-297.
- [40] Kantachote D, Ratanaburee A, Sukhoom A, et al. Use of gamma-aminobutyric acid producing lactic acid bacteria as starters to reduce biogenic amines and cholesterol in Thai fermented pork sausage (Nham) and their distribution during fermentation [J]. LWT - Food Science & Technology, 2016, 70: 171-177.
- [41] Faustman C, Yin M C, Nadeau D B. Color stability, lipid stability, and nutrient composition of red and white veal [J]. Journal of Food Science, 1992, 57(2): 302-304.
- [42] Gallego M, Mora L, Escudero E, et al. Bioactive peptides and free amino acids profiles in different types of European dry-fermented sausages [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 276: 71-78.
- [43] Casaburi A, Di Martino V, Ferranti P, et al. Technological properties and bacteriocins production by *Lactobacillus curvatus* 54M16 and its use as starter culture for fermented sausage manufacture [J]. Food Control, 2016, 59: 31-45.
- [44] 李秀明, 周伟, 鲍佳彤, 等. 不同乳酸菌发酵剂对发酵红肠品

- 质的影响[J].肉类研究,2019,7:7.
- [45] Arief I I, Wulandari Z, Aditia E L, et al. Physicochemical and microbiological properties of fermented lamb sausages using probiotic *Lactobacillus plantarum* IIA-2C12 as starter culture [J]. Procedia Environmental Sciences, 2014, 20: 352-356.
- [46] 张婷,吴燕燕,李来好,等.咸鱼品质的质构与感官相关性分析[J].水产学报,2013,37(2):303-310.
- [47] 刘钰琪,陈澄,陈周,等.酵母提取物对鱼糜凝胶品质的影响[J].肉类研究,2019,33(5):1-6.
- [48] Morzel M, Gatellier P, Sayd T, et al. Chemical oxidation decreases proteolytic susceptibility of skeletal muscle myofibrillar proteins [J]. Meat Science, 2006, 73(3): 536-543.
- [49] Sante-Lhoutellier V, Aubry L, Gatellier P. Effect of oxidation on vitro digestibility of skeletal muscle myofibrillar proteins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(13): 5343-5348.
- [50] 吴满刚,吴雪燕,于海,等.中式香肠风干过程中蛋白氧化对蛋白聚集、水解性及溶解性的影响[J].食品与发酵工业, 2014,40(7):193-198.
- [51] 张亚军,陈有亮.金华火腿蛋白降解及其影响因素的研究[J].中国食品学报,2005,3:23-31.
- [52] 李婷婷,励建荣,赵崑,等.壳聚糖涂膜对冷藏美国红鱼品质的影响[J].食品科学,2013,34(10):299-303.
- [53] Zhang Y, Qi P. Determination of free sulfhydryl contents for proteins including monoclonal antibodies by use of SoloVPE [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2021, 201: 114092.
- [54] 金淼,周逸,徐亦及,等.秘鲁鱿鱼(*Dosidicus gigas*)冻品加工期间肌肉蛋白特性的变化[J].食品工业科技,2012,33(14): 353-357.
- [55] Zhao C C, Benjakul S, Eun J B. Changes in protein compositions and textural properties of the muscle of skate fermented at 10 °C [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 172-184.
- [56] 文镜,张春华,董雨,等.蛋白质巯基含量与蛋白质氧化损伤[J].食品科学,2003,24(10):153-157.
- [57] Sun W, Cui C, Zhao M, et al. Effects of composition and oxidation of proteins on their solubility, aggregation and proteolytic susceptibility during processing of Cantonese sausage [J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 336-341.
- [58] Xiao Y, Liu Y, Chen C, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus xylosus* on flavour development and bacterial communities in Chinese dry fermented sausages [J]. Food Research International, 2020, 135: 109247.
- [59] Zagorec M, Champomier-Vergès M. *Lactobacillus sakei*: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products [J]. Microorganisms, 2017, 5(3): 56.
- [60] 冯美琴,张杰,孙健.模仿葡萄球菌接种对发酵香肠品质及氧化稳定性的影响[J].食品科学,2022,43(4):105-112.