

槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 蛋白质和脂质氧化的影响

陈寒霜露, 骆卓伶, 潘坤, 马源, 唐善虎, 李思宁*, 田木*

(西南民族大学食品科学与技术学院, 四川成都 610041)

摘要: 为研究槲皮素 (Quercetin, Q) 和不同 NaCl 添加量 (0%、2%、4%、6%, *m/m*) 对牦牛肉饼在贮藏过程中蛋白质和脂质氧化的影响, 测定了牦牛肉饼在冷藏 15 d 期间的 pH 值、色差、羰基含量、表面疏水性、色氨酸荧光强度、二聚酪氨酸含量、过氧化值 (Peroxide Value, POV) 和硫代巴比妥酸反应物 (Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS) 值。结果表明, 随着 NaCl 添加量增加, pH 值增加 ($P<0.05$), L^* 、 a^* 和 b^* 值先增加后降低 ($P<0.05$); 添加槲皮素后咸肉饼的 pH 值 ($P<0.05$)、 a^* 和 b^* 值增加 ($P<0.05$)、 L^* 值降低 ($P<0.05$)。添加 NaCl 使肉饼的羰基、表面疏水性、二聚酪氨酸、POV 值和 TBARS 值增加 ($P<0.05$), 色氨酸荧光强度减小 ($P<0.05$); 但槲皮素处理使咸肉饼的色氨酸荧光强度、二聚酪氨酸、POV 值及 TBARS 值降低, 使 4% NaCl (质量分数) 肉饼的羰基含量降低了 27.80%; 表面疏水性在 0~2% NaCl (质量分数) 添加量下进一步增加 ($P<0.05$), 而在 4%~6% NaCl 添加量下降低 ($P<0.05$)。该研究表明, NaCl 能促进牦牛肉饼蛋白质和脂质氧化, 但加入槲皮素可有效缓解肉饼氧化。该结果可为槲皮素作为肉制品天然抗氧化剂提供参考。

关键词: 槲皮素; NaCl; 牦牛肉饼; 蛋白质氧化; 脂质氧化

文章编号: 1673-9078(2023)11-215-224

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1347

Effects of Quercetin and NaCl Additives on Protein and Lipid Oxidation in Yak Meat Patties

CHEN Hanshuanglu, LUO Zhuoling, PAN Kun, MA Yuan, TANG Shanhu, LI Sining*, TIAN Mu*

(College of Food Science and Technology, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Effects of quercetin (Q) and different levels of added sodium chloride (0%, 2%, 4%, and 6%, *m/m*) on protein and lipid oxidation in yak meat patties during storage were investigated by assessing the pH, color change, carbonyl content, surface hydrophobicity, tryptophan fluorescence intensity, dityrosine content, peroxide value (POV) and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) in yak meat patties spanning 15 days of refrigerated storage. With increasing sodium chloride addition, pH increased ($P<0.05$), and values of L^* , a^* , and b^* first increased, then decreased ($P<0.05$); after adding quercetin, the pH ($P<0.05$), a^* and b^* values of salted patties increased ($P<0.05$), and L^* value decreased ($P<0.05$). Sodium chloride addition increased the carbonyl content, surface hydrophobicity, dityrosine content, POV, and TBARS ($P<0.05$), and decreased tryptophan fluorescence intensity ($P<0.05$). Quercetin treatment decreased tryptophan fluorescence intensity, dityrosine content, POV, and TBARS of salted patties, resulting in a 27.80% reduction in carbonyl content in 4% sodium chloride-treated patties; Surface hydrophobicity increased at 0~2% sodium chloride addition ($P<0.05$) but decreased at 4%~6% sodium chloride addition ($P<0.05$). This study shows that sodium chloride promotes protein and lipid oxidation in yak meat patties, but the addition of quercetin can effectively alleviate

引文格式:

陈寒霜露, 骆卓伶, 潘坤, 等. 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼蛋白质和脂质氧化的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 215-224

CHEN Hanshuanglu, LUO Zhuoling, PAN Kun, et al. Effects of quercetin and NaCl additives on protein and lipid oxidation in yak meat patties [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 215-224

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 西南民族大学研究生创新项目 (ZD2022677)

作者简介: 陈寒霜露 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2368078352@qq.com

通讯作者: 李思宁 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与贮藏技术, E-mail: 616906108@qq.com; 共同通讯作者: 田木 (1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 功能性食品加工, E-mail: 944783664@qq.com

this oxidation. These results provide guidance for using quercetin as a potential natural antioxidant in meat products.

Key words: quercetin; sodium chloride; yak meat patties; protein oxidation; lipid oxidation

富含脂质和蛋白质的动物性食品容易被氧化,氧化产物会对肉制品的营养、物理化学和感官特性产生潜在影响^[1]。然而,在肉类加工、运输和贮藏过程中,脂质和蛋白质氧化是不可避免的^[2]。脂质氧化是肉制品变味和变色的主要原因,会导致产品不宜食用;蛋白质氧化与脂质氧化是同时发生的,会导致肉品嫩度降低、变色、风味恶化和功能改变^[3]。因此,控制肉制品加工过程中脂质和蛋白质氧化的程度至关重要。

大量研究表明,添加合成或天然抗氧化剂可以抑制肉制品中脂质和蛋白质氧化,合成抗氧化剂由于存在健康风险和毒性,限制了其在肉制品中的应用^[4]。近年来,利用天然物质,如多酚、多糖、肽、维生素和生物碱等物质作为合成添加剂的替代品越来越受欢迎^[5]。槲皮素是双酚类化合物,具有强烈的抗氧化功效^[6,7]。Cheng 等^[8]研究表明,槲皮素可减少羰基和二聚酪氨酸形成、抑制巯基转化为二硫键,从而抑制广式香肠中肌原纤维蛋白和肌浆蛋白的氧化。Capitani 等^[9]发现,添加槲皮素可有效抑制香肠中丙二醛(Malondialdehyde, MDA)形成。Wu 等^[10]发现,槲皮素通过清除羟基自由基从而强烈抑制火鸡血红蛋白诱导鲤鱼的脂质氧化。

众所周知,食品加工过程中,酚类物质与食品成分的相互作用受诸多因素影响,如离子强度、pH 值等^[11]。氯化钠(NaCl)是食盐的主要成分,是肉制品加工中最常用的添加剂,其在肉制品加工工艺、保藏和感官性能方面具有一定优势。但 NaCl 的添加对肉制品品质也有负面影响。NaCl 是蛋白质的促氧化剂,其通过激活血红素诱导蛋白质氧化、促进过渡金属参与 Fenton 型反应并形成氧自由基、创造高离子浓度环境,使肌原纤维更容易受到自由基和其他促氧化因子的影响,从而增强蛋白质氧化敏感性^[12]。同时 NaCl 也是脂质的促氧化剂,它通过破坏细胞膜、释放铁离子和抑制抗氧化酶活性来加速脂质氧化^[13]。

目前,关于槲皮素联合 NaCl 对牦牛肉蛋白质和脂质氧化影响的研究还未见报道。本试验旨在评价槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼蛋白质和脂质氧化的影响,以此为槲皮素提高肉制品品质提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牦牛肉购于四川省阿坝州红原新希望牦牛食品有

限公司,选取自然放牧状态下 3 岁左右健康无病公牦牛背最长肌,经冷却排酸、急冻处理后, -4 ℃ 运回实验室储藏于 -20 ℃ 的环境中。槲皮素购于上海麦克林生化科技有限公司。

氯化钠、牛血清白蛋白、乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA)、十二水磷酸氢二钠、二水磷酸二氢钠、2,4-二硝基苯肼、三氯乙酸、乙醇、乙酸乙酯、溴酚蓝、氯仿、甲醇、硫氰酸铵、氯化钡、硫酸亚铁、没食子酸、乙二胺四乙酸,均购于成都科隆化学品有限公司;氯化镁,购于天津佰伦斯生物技术有限公司;盐酸胍,购于德国 Biofroxx 公司;氢氧化钠,购于成都金山化学试剂有限公司;2-巯代巴比妥酸、5,5'-二巯代双(2-硝基苯甲酸),购于上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

5804R 冷冻离心机,德国 Eppendorf 公司;UV1810S 紫外分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司;T-25 高速匀浆机,德国 IKA 公司;PL303 分析天平,梅特勒-托利多国际股份有限公司;LD510 电子天平,沈阳龙腾电子有限公司;F-4700 荧光分光光度计,日本株式会社日立公司;MC40X5-100B 绞肉机,美的公司;DZ-350M 食品真空包装机,温州市瓯海潘桥弘业包装机械厂;PHS-3C 酸度计,上海佑科仪器仪表有限公司;CR-400/410 色差仪,日本 Konica Minolta 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 牦牛肉饼的制作

参考 Turan 等^[14]的方法,并作适当修改。剔除牦牛肉背最长肌的结缔组织和表面脂肪,切成约 1 cm 厚的小块,使用带有 3 mm 孔板的绞肉机将肉绞成肉糜。将绞好的肉糜分成 4 份,按照每 100 g 肉糜分别添加 0 g (0%)、2 g (2%)、4 g (4%) 和 6 g (6%) 的 NaCl,然后在每一份肉糜中添加 0.2 g/kg 槲皮素;以只添加 NaCl 不添加槲皮素的肉糜作为对照。将经过 NaCl 和槲皮素处理后的肉糜搅拌 1 min,装入模具,加工成厚度为 10 mm、直径为 60 mm、质量为 (25.0±1.0) g 的肉饼,立即用聚乙烯袋真空包装后,在 4 ℃ 下贮藏 0、5、10、15 d,用于指标测定。

1.3.2 pH 值的测定

参考 Khan 等^[15]的方法,并做适当调整。用镊子取 (1.0±0.01) g 肉样与 9 mL 蒸馏水混合,于 5 000 r/min 匀浆 30 s,用 pH 计测定。

1.3.3 色差的测定

参考 Khan 等^[15]的方法, 并做适当调整。拆封包装袋后, 立即将样品覆盖仪器探头直径, 使用色差仪测量牛肉饼的亮度值 L^* 、红度值 a^* 和黄度值 b^* , 在垂直于牦牛肉饼的 5 个不同部位各测定 1 次。

1.3.4 肌原纤维蛋白的提取

参考 Yang 等^[16]的方法稍加修改。取 (5.0 ± 0.01) g 牦牛肉饼放入 50 mL 离心管, 加入 20 mL 预冷的磷酸盐缓冲溶液 (0.1 mol/L NaCl、2 mmol/L $MgCl_2$ 、1 mmol/L EGTA, 20 mmol/L PBS, pH 值 7.0), 10 000 r/min 匀浆 30 s 后, 4 °C、2 500×g 离心 15 min, 弃上清液。重复上述步骤 3 遍后, 向所得沉淀中加入 20 mL 预冷的磷酸盐缓冲溶液 (50 mmol/L NaCl, 50 mmol/L PBS, pH 值 6.4), 10 000 r/min 匀浆 30 s 后, 4 °C、2 500×g 离心 15 min, 弃上清液。重复上述步骤 2 遍后, 向所得沉淀中加入 20 mL 预冷的磷酸盐缓冲溶液 (20 mmol/L PBS, pH 值 6.0), 10 000 r/min 匀浆 30 s 后, 用 4 层纱布过滤以除去结缔组织, 滤液在 4 °C、5 000×g 离心 15 min, 弃上清液, 所得膏状物即为肌原纤维蛋白, 肌原纤维蛋白置于 4 °C 保存, 并在 24 h 内使用。

1.3.5 羰基含量的测定

参考 Wang 等^[17]的方法稍加修改。取 800 μ L 5 mg/mL 的蛋白质溶液, 加入 1.6 mL 10 mmol/L 的 2,4-二硝基苯肼 (2 mol/L HCl 溶解), 以 2 mol/L HCl 溶液作对照。样品在室温下避光反应 30 min 后, 加入 800 μ L 0.4 g/mL 的三氯乙酸沉淀蛋白质。摇匀后 4 °C、5 000×g 离心 5 min, 弃上清液。沉淀用 1 mL 乙醇-乙酸乙酯混合液 (1:1) 洗涤以除去未反应的 2,4-二硝基苯肼, 随后 4 °C、5 000×g 离心 5 min。上述洗涤过程重复 3 次后, 加入 4 mL 磷酸盐缓冲溶液 (6 mol/L 盐酸胍, 20 mmol/L, pH 值 6.0) 溶解沉淀。37 °C 水浴 15 min 后, 4 °C、12 000×g 离心 5 min, 取上清液, 在 370 nm 波长处测定吸光度。羰基含量计算公式如下:

$$Q = \frac{A_1 \times 4}{c \times 1 \times 22000} \times 10^6 \quad (1)$$

式中:

Q ——羰基含量, nmol/mg 肌原纤维蛋白;

A_1 ——370 nm 波长处的吸光度值;

4——稀释倍数;

c ——蛋白质质量浓度, mg/mL;

1——比色皿光径, cm;

22 000——摩尔吸光系数, L/(mol·cm);

10^6 ——单位转换系数。

1.3.6 表面疏水性的测定

参考 Jia 等^[18]的方法稍加修改。取 1 mL 5 mg/mL 的蛋白质溶液, 加入 200 μ L 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液, 混匀后反应 10 min, 10 000×g 离心 5 min (4 °C), 上清液稀释 10 倍后, 在 595 nm 波长处测定吸光度。空白为未加样品的磷酸盐缓冲溶液。以溴酚蓝结合量表示表面疏水性。

$$M = \frac{200 \times (A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}})}{A_{\text{空白}}} \quad (2)$$

式中:

M ——溴酚蓝结合量, μ g;

$A_{\text{空白}}$ ——空白组在 595 nm 波长处的吸光度值;

$A_{\text{样品}}$ ——加入样品后的溶液在 595 nm 波长处的吸光度值。

1.3.7 色氨酸氨酸荧光强度的测定

参考 Zhang 等^[19]的方法, 并做适当调整。调整肌原纤维蛋白浓度为 1 mg/mL。荧光分光光度计设置条件为: 激发波长 283 nm; 狭缝宽度 5; 电压 400 V; 扫描波段 300~400 nm。

1.3.8 二聚体酪氨酸荧光含量的测定

参考 Li 等^[20]的方法稍加修改。调整肌原纤维蛋白浓度为 2 mg/mL, 荧光分光光度计设置条件: 激发波长 325 nm; 发射波长 420 nm; 狭缝宽度 5 nm, 电压 400 V。二聚酪氨酸含量表示为测得的吸光值除以蛋白浓度, 为相对荧光值, 单位为 A.U.

$$F = \frac{A_2}{c} \quad (3)$$

式中:

F ——相对荧光值, A.U.;

A_2 ——为吸光度值;

c ——为蛋白质的质量浓度, mg/mL。

1.3.9 POV 值的测定

参考 Varelz 等^[21]的方法稍加修改。称取牦牛肉饼 2.0 g 与 15 mL 氯仿-甲醇 (7:3) 溶液混合, 然后在 6 000 r/min 转速下均质 30 s, 加入 3.0 mL 0.5% NaCl 溶液, 4 °C、3 000×g 离心 10 min。收集 5.0 mL 下层液相与 5.0 mL 氯仿-甲醇 (7:3) 溶液混合, 并加入 25.0 μ L 30% 的硫氰酸铵溶液和 25.0 μ L 氯化亚铁溶液 (0.4 g 氯化钡和 0.5 g 硫酸亚铁分别溶于 50 mL 去离子水中, 两者混合后 2 000×g 离心 5 min)。室温反应 5 min, 于 500 nm 波长处测定吸光度。以还原铁粉作标准曲线, 最终 POV 值表示为 mmol/kg。按下式计算:

$$C = \frac{K \times A_3 \times 0.5}{55.84 \times 2} \times 1000 \quad (4)$$

式中:

C ——过氧化值 (POV 值), mmol/kg;

K ——标准曲线斜率;

A_3 ——样品吸光度值;

0.5——O 和 Fe 的摩尔比;

55.84——铁的原子量;

2——换算因子。

1.3.10 TBARS 值的测定

参考 Jong 等^[22]的方法稍加修改。称取 5 g 牦牛肉饼, 加入 15 mL 7.5%三氯乙酸 (0.1%没食子酸、0.1%乙二胺四乙酸)溶液, 在 6 000 r/min 转速下均质 1 min, 在 70 °C 条件下水浴 30 min, 趁热过滤后吸取 3.5 mL 滤液, 加入 2.5 mL 0.02 mol/L TBA 溶液, 沸水浴反应 40 min, 迅速冷却后, 在 532 nm 波长处测定吸光度, 空白组为 3.5 mL 7.5%的三氯乙酸溶液代替滤液, 其它操作相同。按照下式计算 TBARS 值。

$$B = \frac{A_4 \times v \times 72}{156000 \times 1 \times m} \quad (5)$$

式中:

B ——TBARS 值, mg/kg;

A_4 ——为样品液吸光度值;

v ——为样品液体积, mL;

72——为丙二醛摩尔质量, g/mol;

156 000——为摩尔吸光系数, L/(mol·cm);

1——为比色皿光径, cm;

m ——为肉样质量, g。

1.4 数据统计分析

所有实验重复 3 次, 结果以平均值±标准差表示。用 SPSS 20 软件对数据进行单因素方差分析, 用 Duncan 多重比较对数据进行显著性分析。 $P < 0.05$ 表示差异显著。利用 Origin 2017 软件绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 pH 值的影响

肉类的 pH 值与其新鲜度密切相关^[23]。图 1 显示了槲皮素和不同 NaCl 添加量对牦牛肉饼 pH 值的影响。添加 2%~6% NaCl 的肉饼 pH 值显著高于未添加 NaCl 的肉饼 ($P < 0.05$), 这可能是由于 NaCl 抑制产酸微生物生长引起的。这与 Chen 等^[24]的研究结果一致, 随着 NaCl 浓度的增加, 风干猪肉香肠的 pH 值增加。随着贮藏时间延长, 未添加 NaCl 肉饼组的 pH 值先降低后增加, 于第 5 天达到最小值。这可能是由于贮藏 0~5 d 时, 乳酸菌繁殖较快, 成为优势菌株, 产生乳酸导致 pH 值降低, 在 5~15 d 时, 其他菌株逐渐

代替乳酸菌成为优势菌株, 大量繁殖产生碱性物质, 使 pH 值升高。这与 De 等^[25]的研究结果一致, 随着贮藏时间延长, 未添加抗氧化剂羊肉饼的 pH 值先降低后增加。然而, 添加 2%~6% NaCl 肉饼组的 pH 值在贮藏期间显著增加 ($P < 0.05$), 这可能是由于 NaCl 抑制乳酸菌生长, 一些菌株代替乳酸菌成为优势菌株, 大量繁殖产生碱性物质。添加槲皮素后, 肉饼的 pH 值均增加。这与 Ramírez 等^[26]的研究结果一致, 加入多酚提取物后, 猪肉饼的 pH 值增加。然而 Hayes 等^[27]发现叶黄素、芝麻酚、鞣花酸和橄榄叶提取物对牛肉饼的 pH 值没有影响。Lee 等^[28]认为抗氧化剂对猪肉饼的 pH 值没有影响。

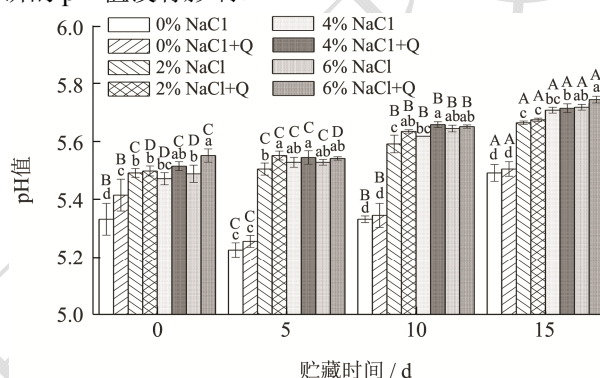


图 1 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 pH 值的影响

Fig.1 Effect of quercetin and NaCl addition on pH value of yak meat patties

注: 不同小写字母表示在同一贮藏期时, 不同处理组间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示在不同贮藏期时, 相同处理组内差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼色泽变化的影响

肉品的色泽是影响消费者购买力的重要因素之一, 肉品色泽的变化反映了其品质的变化。表 1 显示了不同 NaCl 添加量和槲皮素对牦牛肉饼 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值的影响。随着贮藏时间延长, 氧合肌红蛋白被肉饼中的自由基等促氧化因子氧化为高铁肌红蛋白, 使肉饼呈黄褐色, 牦牛肉饼表现出 L^* 和 a^* 下降 ($P < 0.05$)、 b^* 上升 ($P < 0.05$)。在贮藏过程中, 添加 2% NaCl 肉饼的 L^* 最高, 添加 2% NaCl+Q 肉饼的 a^* 和 b^* 最高。这可能是由于牦牛肉中 NaCl 添加量在 2%时, 适度促进脂质氧化, 生成氧合肌红蛋白; 而更高浓度的 NaCl 促进脂质过度氧化, 可能生成高铁肌红蛋白使肉饼呈褐色。Hayes 等^[27]证实, 脂质氧化产生的自由基可促进肌红蛋白向氧合肌红蛋白转化。在肉饼中加入槲皮素后, L^* 值降低 ($P < 0.05$)、 b^* 值增

加 ($P<0.05$)。槲皮素抑制脂质氧化,可能减缓氧合肌红蛋白被氧化为高铁肌红蛋白,使肉饼的 a^* 值增加。Fan 等^[29]同样发现,柑橘和黑葡萄提取物可增加

肉品的 b^* 值。Yu 等^[30]也发现,肉类 a^* 值的快速减少主要是由于脂质氧化,而抗氧化剂可以阻止这种减少。

表 1 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼色泽变化的影响

Table 1 Effect of quercetin and NaCl addition on color change of yak meat patties

组别		贮藏时间/d			
		0	5	10	15
L^*	0% NaCl	26.92±0.58 ^{Ad}	25.92±0.41 ^{ABd}	25.04±0.83 ^{Bc}	23.13±0.55 ^{Cc}
	0% NaCl+Q	25.54±0.42 ^{Ae}	24.87±0.30 ^{Ae}	23.73±0.54 ^{Bd}	21.85±0.22 ^{Cd}
	2% NaCl	30.51±0.85 ^{Aa}	29.02±0.64 ^{Ba}	27.89±0.57 ^{Ba}	26.61±0.52 ^{Ca}
	2% NaCl+Q	28.32±0.80 ^{Abc}	27.44±0.50 ^{Ab}	26.08±0.16 ^{Bb}	25.09±0.46 ^{Bb}
	4% NaCl	29.12±0.54 ^{Ab}	27.97±0.55 ^{bd}	26.97±0.55 ^{Cb}	25.60±0.37 ^{Db}
	4% NaCl+Q	27.82±0.69 ^{Ac^d}	27.09±0.48 ^{Ab}	26.09±0.48 ^{Bb}	25.32±0.36 ^{Bb}
	6% NaCl	27.23±0.57 ^{Ac^d}	26.22±0.48 ^{Ac^d}	25.12±0.19 ^{Bc}	23.36±1.11 ^{Cc}
	6% NaCl+Q	26.71±0.19 ^{Ad}	24.91±0.58 ^{Be}	23.99±0.23 ^{Cd}	23.08±0.28 ^{Dc}
a^*	0% NaCl	6.87±0.22 ^{Ad}	6.16±0.24 ^{Bd}	5.46±0.45 ^{Ce}	4.04±0.26 ^{De}
	0% NaCl+Q	7.34±0.94 ^{Ad}	6.39±0.61 ^{ABd}	5.75±0.25 ^{BCe}	4.77±0.27 ^{Cd}
	2% NaCl	10.32±0.51 ^{Aab}	9.27±0.26 ^{Bb}	7.92±0.32 ^{Cc}	6.37±0.43 ^{Db}
	2% NaCl+Q	11.08±0.42 ^{Aa}	10.70±0.50 ^{Aa}	9.39±0.39 ^{Ba}	8.24±0.34 ^{Ca}
	4% NaCl	9.24±0.86 ^{Abc}	7.86±0.25 ^{Bc}	7.42±0.50 ^{Bcd}	6.31±0.11 ^{Cb}
	4% NaCl+Q	10.22±0.55 ^{Aab}	8.98±0.43 ^{Bb}	8.60±0.41 ^{Bb}	6.87±0.15 ^{Cb}
	6% NaCl	8.78±0.58 ^{Ac}	7.56±0.28 ^{Bc}	6.05±0.18 ^{Ce}	5.42±0.40 ^{Cc}
	6% NaCl+Q	10.08±0.59 ^{Aab}	8.69±0.45 ^{Bb}	7.21±0.10 ^{Cd}	6.36±0.44 ^{Db}
b^*	0% NaCl	4.87±0.47 ^{Bc}	5.19±0.44 ^{ABc}	5.24±0.27 ^{ABe}	5.90±0.39 ^{Ad}
	0% NaCl+Q	5.22±0.14 ^{Cbc}	5.63±0.35 ^{BCc}	5.96±0.15 ^{ABd}	6.42±0.40 ^{Ad}
	2% NaCl	5.89±0.73 ^{Bab}	6.37±0.27 ^{Bb}	7.37±0.39 ^{Ab}	8.04±0.27 ^{Abc}
	2% NaCl+Q	6.41±0.52 ^{Ca}	7.83±0.13 ^{Ba}	8.44±0.16 ^{ABa}	8.76±0.38 ^{Aa}
	4% NaCl	5.19±0.17 ^{Cbc}	5.52±0.41 ^{Cc}	6.85±0.11 ^{Bc}	7.62±0.25 ^{Ac}
	4% NaCl+Q	6.29±0.56 ^{Ca}	6.66±0.10 ^{Cb}	7.49±0.13 ^{Bb}	8.57±0.53 ^{Aab}
	6% NaCl	5.17±0.26 ^{Cbc}	5.33±0.31 ^{Ccd}	6.41±0.24 ^{Bcd}	7.66±0.45 ^{Ac}
	6% NaCl+Q	5.97±0.27 ^{Cab}	6.25±0.18 ^{Cb}	7.33±0.44 ^{Bb}	7.93±0.27 ^{Abc}

注: 不同小写字母表示在同一贮藏期时, 不同处理组间差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示在不同贮藏期时, 相同处理组内差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白羰基含量的影响

羰基是氨基酸侧链基团受到自由基攻击而产生的, 其含量可表征蛋白质氧化程度^[31]。不同 NaCl 添加量下槲皮素对肉饼羰基含量的影响见图 2。随着贮藏时间延长, 各处理组肉饼肌原纤维蛋白羰基含量显著上升 ($P<0.05$), 表明牦牛肉饼在贮藏过程中蛋白质氧化程度增加。这与 Qu 等^[12]的研究结果一致, 使用 3%和 6%的 NaCl 腌制鸡肉后, 其肌原纤维蛋白中

羰基含量增加。NaCl 的加入创造了高离子强度环境, 使肌原纤维蛋白更容易受到自由基和其他促氧化因子的影响, 从而提高蛋白质氧化敏感性^[12]。贮藏第 15 天时, 与 4% NaCl 组相比 4% NaCl+Q 组肉饼的羰基含量降低了 27.80%。Sohaib 等^[7]发现, 添加二氢槲皮素显著减少了冷藏鸡肉饼中羰基含量。Xu 等^[32]的研究也同样表明, 在猪肉丸中添加 20.00 $\mu\text{mol/g}$ 槲皮素后, 肌原纤维蛋白羰基含量显著降低。这是由于槲皮素含有酚羟基, 具有抗氧化作用, 可在一定程度上抑制肌原纤维蛋白的氧化, 减少羰基形成, 使肉饼肌原纤维蛋白羰基含量下降。

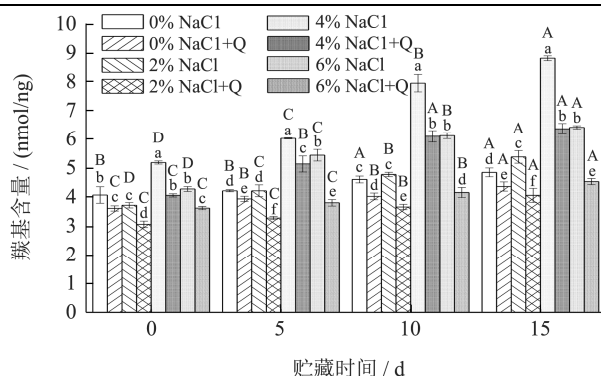


图2 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白羰基含量的影响

Fig.2 Effect of quercetin and NaCl addition on carbonyl content of yak meat patties myofibrillar protein

2.4 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

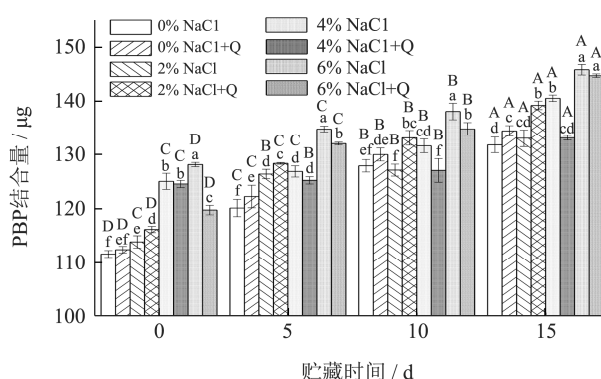


图3 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

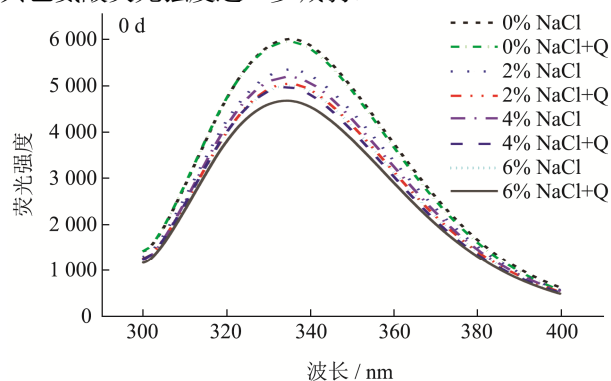
Fig.3 Effect of quercetin and NaCl addition on surface hydrophobicity of yak meat patties myofibrillar protein

蛋白质疏水性氨基酸通常被包埋在蛋白质折叠结构的内部,蛋白质氧化后结构展开、疏水性氨基酸暴露,因此表面疏水性可以反映疏水性氨基酸残基在蛋白质表面暴露的程度,还可以反映蛋白质构象的变化^[33]。图3显示了槲皮素和不同NaCl添加量对牦牛肉饼表面疏水性的影响。随着贮藏时间延长,各组肉饼表面疏水性均增加($P < 0.05$)。在同一贮藏时间,随着NaCl添加量增加,表面疏水性增加。这可能是由于NaCl的促氧化效果和盐溶作用使肌原纤维蛋白溶解和展开,非极性氨基酸暴露,肌原纤维蛋白表面疏水性增加^[34]。NaCl添加量在0%~2%时,添加槲皮素可增加牦牛肉饼肌原纤维蛋白的表面疏水性,但NaCl添加量在4%~6%时,添加槲皮素却降低了牦牛肉饼肌原纤维蛋白的表面疏水性。这可能是由于低浓度NaCl促蛋白质氧化效果较弱,蛋白质构象变化较

小,槲皮素与蛋白质相互作用,打开部分蛋白构象,适度增加了蛋白质表面疏水性。这与Cheng等^[8]的发现一致,槲皮素可增加猪肉肌原纤维蛋白的表面疏水性。但NaCl添加量在4%~6%时,NaCl促氧化效果较强,蛋白质构象变化大,活性基团暴露,大量槲皮素与蛋白质相互作用,形成聚合物,从而将疏水基团掩盖其中,降低了表面疏水性。这与Cao等^[35]的研究结果一致,在Fenton氧化体系下,猪肉肌原纤维蛋白的表面疏水性降低,但添加儿茶素后猪肉肌原纤维蛋白的表面疏水性进一步降低。

2.5 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白色氨酸荧光强度的影响

蛋白质内部的疏水区域通常含有色氨酸,当蛋白质的结构展开,色氨酸残基暴露在溶剂中时,荧光强度降低,发射波长增加。色氨酸荧光强度已广泛用于评估蛋白质三级结构的变化^[36,37]。槲皮素和不同NaCl添加量对牦牛肉饼色氨酸荧光强度的影响见图4。随贮藏时间增加,牦牛肉饼色氨酸荧光强度降低($P < 0.05$)。在贮藏过程中,未添加NaCl肉饼组的荧光强度最强,色氨酸含量最高;而6%NaCl+Q肉饼组的荧光强度最弱。Gan等^[36]报道,盐离子将色氨酸转化为自由基,后者与分子氧反应,产生色氨酸过氧自由基,这些自由基与脂质反应形成过氧化氢,然后分解成最终产物。Li等^[38]报道,在肉制品中加入NaCl,肌原纤维蛋白色氨酸荧光强度减弱。这可能归因于高浓度的NaCl使肌原纤维蛋白结构疏松,有利于色氨酸暴露和氧化^[39]。各NaCl添加量组在加入槲皮素后荧光强度均降低,这可能是由于槲皮素与肌原纤维蛋白活性基团通过共价或非共价相互作用,打开蛋白结构使色氨酸暴露于溶剂中,导致荧光淬灭^[35]。这与Cao等^[40]研究结果一致,在Fenton氧化环境下,猪肉肌原纤维蛋白的色氨酸荧光强度减弱,在加入没食子酸后其色氨酸荧光强度进一步减弱。



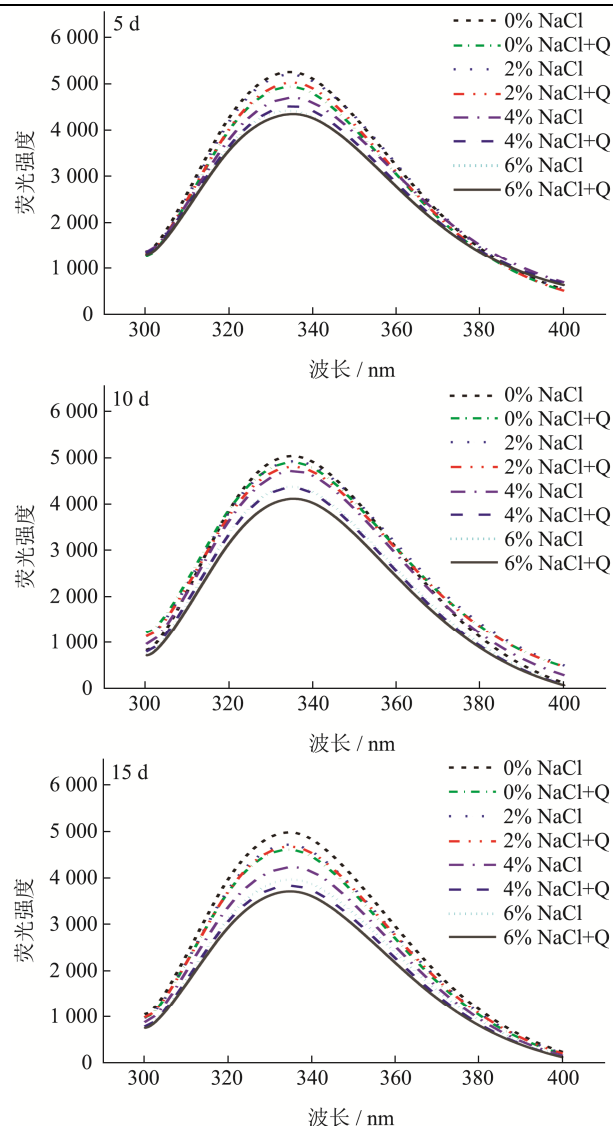


图4 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白色氨酸荧光强度的影响

Fig.4 Effect of quercetin and NaCl addition on tryptophan fluorescence intensity of yak meat patties myofibrillar protein

2.6 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白二聚酪氨酸含量的影响

酪氨酸残基容易被氧化成二聚酪氨酸,并通过共价和非共价键形成蛋白质聚集体,通过测定二聚酪氨酸的含量来表征蛋白质的氧化程度^[41]。图5显示了槲皮素和不同NaCl添加量对二聚酪氨酸含量的影响。在贮藏过程中,牦牛肉饼的二聚酪氨酸含量增加($P<0.05$),这归因于NaCl对蛋白质氧化有促进作用,使二聚酪氨酸含量增加。这与Peng等^[42]的发现一致,猪肉肌原纤维蛋白被氧化后,二聚酪氨酸含量增加,色氨酸荧光强度降低。贮藏0~10 d,4% NaCl组的二聚酪氨酸含量最高;但在贮藏第15 d时,2%

NaCl组的二聚酪氨酸含量最高,其次是4% NaCl组,6% NaCl组最低。加入槲皮素后,各组肉饼的二聚酪氨酸含量均显著降低($P<0.05$),这表明槲皮素对蛋白质氧化有显著的抑制作用。Cheng等^[8]发现,槲皮素可抑制广式香肠肌原纤维蛋白中二聚酪氨酸的产生。Li等^[20]研究表明,5 $\mu\text{mol/g}$ 和10 $\mu\text{mol/g}$ 茶多酚可有效抑制草鱼肌原纤维蛋白中二聚酪氨酸的形成。Xu等^[32]发现,单宁酸、表没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯和没食子酸均能降低猪肉丸肌原纤维蛋白中二聚酪氨酸的含量。

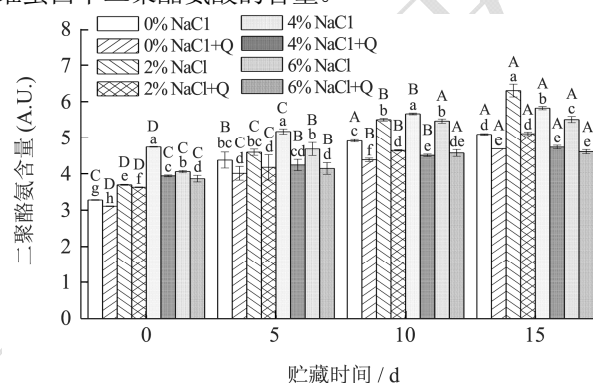


图5 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼肌原纤维蛋白二聚酪氨酸含量的影响

Fig.5 Effect of quercetin and NaCl addition on dimeric tyrosine content of yak meat patties myofibrillar protein

2.7 槲皮素和NaCl添加量对牦牛肉饼POV值的影响

脂质氧化是引起肉品变质的原因之一,限制了肉制品的货架期^[43]。脂质氧化产生氢过氧化物、共轭二烯等多种氧化产物,这些产物进一步被氧化成各种醛类^[44]。POV值可评估脂质氧化初级产物氢过氧化物的含量,表征脂质氧化程度。添加槲皮素和NaCl后牦牛肉饼POV值变化结果见图6。在贮藏过程中,所有牦牛肉饼的POV值均显著增加($P<0.05$)。有研究^[13]表明,NaCl破坏细胞膜的完整性,促进脂质与氧化剂接触、促进血红蛋白释放铁离子、抑制过氧化氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶等抗氧化酶的活性,从而加快脂质氧化。Bragagnolo等^[45]报道,添加食盐能促进鸡肉中自由基形成,促进脂质氧化。Cao等^[46]发现,在腌制、脱盐和干燥三个阶段结束时,低盐乳酸发酵鱼的POV值均低于传统腌制咸鱼。加入槲皮素后,所有肉饼的POV值均显著降低($P<0.05$),表明槲皮素能抑制牦牛肉饼的脂质氧化,这可能是由于槲皮素通过电子传递终止自由基链式反应来抑制牦牛肉饼的脂质氧化^[47]。Xu等^[48]在腌肉中添加0.05%、

0.1%、0.2%酚类提取物后,发现腌肉的 POV 值和 TBARS 值均降低。Ezz 等^[3]也报道,在鸡肉饼中加入酚类提取物可显著降低 POV 值。

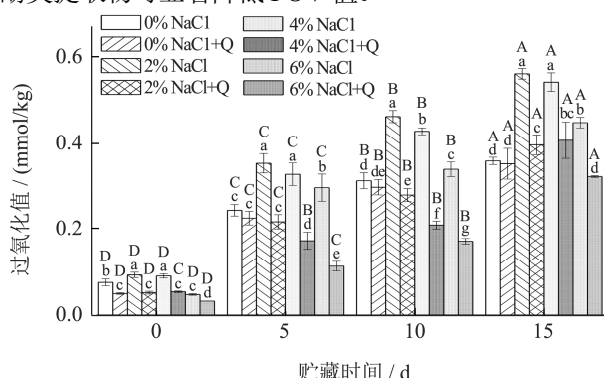


图6 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 POV 值的影响

Fig.6 Effect of quercetin and NaCl addition on POV of yak meat patties

2.8 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 TBARS

值的影响

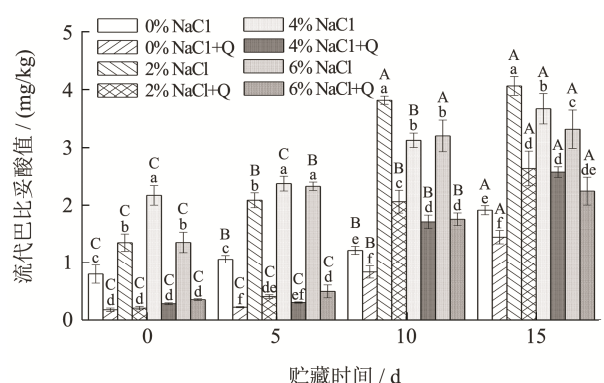


图7 槲皮素和 NaCl 添加量对牦牛肉饼 TBARS 值的影响

Fig.7 Effect of quercetin and NaCl addition on TBARS of yak meat patties

MDA 是脂质氧化的次级产物,能和 TBA 反应生成稳定的红色化合物, TBARS 值可评估 MDA 含量,表征脂质氧化程度。槲皮素和不同 NaCl 添加量对肉饼 TBARS 值的影响见图 7。随着贮藏时间延长,所有牦牛肉饼的 TBARS 值增加 ($P < 0.05$)。在 0~5 d 时,添加 4% NaCl 的牦牛肉饼 TBARS 值最高,但在第 10 天和第 15 天时,2% NaCl 添加量下牦牛肉饼的 TBARS 值最高且显著高于 4% NaCl 和 6% NaCl 组。Devatkal 等^[49]研究表明,在贮藏过程中,含有 2%食盐的羊肉糜 TBARS 值显著高于未添加食盐的羊肉糜 ($P < 0.05$)。Bess 等^[50]发现,添加食盐后,猪肉饼的 TBARS 值增加。这可能是由于 NaCl 促进血红蛋白中铁离子的释放或抑制抗氧化酶的活性导致脂质氧化加速^[13]。添加槲皮素后,各组的 TBARS 值均显著降低 ($P < 0.05$),

表明槲皮素显著抑制了牦牛肉饼的脂质氧化。这可能是由于加入槲皮素可终止脂质氧化自由基链式反应。Capitani 等^[9]发现,添加槲皮素后,可有效抑制香肠中 MDA 形成。Wu 等^[10]发现,槲皮素强烈抑制火鸡血红蛋白诱导鲑鱼肉的脂质氧化。这可能是由于加入槲皮素可终止脂质氧化自由基链式反应。

3 结论

本研究评价了槲皮素和 NaCl 添加量对冷藏过程中牦牛肉饼蛋白质氧化和脂质氧化的影响。随着 NaCl 添加量增加,牦牛肉饼羰基、表面疏水性、二聚酪氨酸、POV 和 TBARS 值增加,色氨酸荧光强度减小,但添加槲皮素后显著降低了 NaCl 处理牦牛肉饼的蛋白质和脂质氧化程度。本研究证明,槲皮素作为天然抗氧化剂可有效保护咸牦牛肉饼蛋白质和脂质免受氧化。然而,还需要进一步研究来阐明不同浓度槲皮素对 NaCl 处理牦牛肉氧化的影响。

参考文献

- [1] Muneke P, Rocchetti G, Pateiro M, et al. Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: An overview [J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 31: 81-87.
- [2] Li S N, Tang S H, Li J J, et al. Protective effects of four natural antioxidants on hydroxyl-radical-induced lipid and protein oxidation in yak meat [J]. Foods, 2022, 11(19): 3062.
- [3] Ezz El-Din Ibrahim M, Alqurashi R M, Alfaraj F Y. Antioxidant activity of *Moringa oleifera* and olive *Olea europaea* L. leaf powders and extracts on quality and oxidation stability of chicken burgers [J]. Antioxidants, 2022, 11(3): 496.
- [4] Śmiecińska K, Gugolek A, Kowalska D. Effects of garlic (*Allium sativum* L.) and ramsons (*Allium ursinum* L.) on lipid oxidation and the microbiological quality, physicochemical properties and sensory attributes of rabbit meat burgers [J]. Animals, 2022, 12(15): 1905.
- [5] Efenberger-Szmeczyk M, Nowak A, Czyżowska A. Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(1): 149-178.
- [6] Guo A, Jiang J, True A D, et al. Myofibrillar protein cross-linking and gelling behavior modified by structurally relevant phenolic compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(4): 1308-1317.

- [7] Sohaib M, Anjum F M, Arshad M S, et al. Oxidative stability and lipid oxidation flavoring volatiles in antioxidants treated chicken meat patties during storage [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2017, 16(1): 27.
- [8] Cheng J, Xiang R, Tang D, et al. Regulation of protein oxidation in Cantonese sausages by rutin, quercetin and caffeic acid [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108422.
- [9] Capitani C D, Hatano M K, Marques M F, et al. Effects of optimized mixtures containing phenolic compounds on the oxidative stability of sausages [J]. *Food Science and Technology International*, 2013, 19(1): 69-77.
- [10] Wu H, Yin J, Xiao S, et al. Quercetin as an inhibitor of hemoglobin-mediated lipid oxidation: Mechanisms of action and use of molecular docking [J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132473.
- [11] Guo A, Xiong Y L. Myoprotein-phytphenol interaction: Implications for muscle food structure-forming properties [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(3): 2801-2824.
- [12] Qu C, He Z, Wang Z, et al. Effects of NaCl content and drying temperature on lipid oxidation, protein oxidation, and physical properties of dry-cured chicken [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(6): 1651-1660.
- [13] Mariutti L R B, Bragagnolo N. Influence of salt on lipid oxidation in meat and seafood products: A review [J]. *Food Research International*, 2017, 94: 90-100.
- [14] Turan E, Simsek A. Effects of lyophilized black mulberry water extract on lipid oxidation, metmyoglobin formation, color stability, microbial quality and sensory properties of beef patties stored under aerobic and vacuum packaging conditions [J]. *Meat Science*, 2021, 178: 108522.
- [15] Khan I A, Xu W, Wang D, et al. Antioxidant potential of *Chrysanthemum morifolium* flower extract on lipid and protein oxidation in goat meat patties during refrigerated storage [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(3): 618-627.
- [16] Yang K, Wang L M, Guo J J, et al. Structural changes induced by direct current magnetic field improve water holding capacity of pork myofibrillar protein gels [J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128849.
- [17] Wang Z, He Z, Gan X, et al. Effect of peroxy radicals on the structure and gel properties of isolated rabbit meat myofibrillar proteins [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(12): 2687-2696.
- [18] Jia N, Wang L, Shao J, et al. Changes in the structural and gel properties of pork myofibrillar protein induced by catechin modification [J]. *Meat Science*, 2017, 127: 45-50.
- [19] Zhang Z, Xiong Z, Lu S, et al. Effects of oxidative modification on the functional, conformational and gelling properties of myofibrillar proteins from *Culter alburnus* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 162: 1442-1452.
- [20] Li X, Liu C, Wang J, et al. Tea polyphenols affect oxidative modification and solution stability of myofibrillar protein from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Food Biophysics*, 2020, 15(4): 397-408.
- [21] Varelz P, Hultin H O, Autio W R. Hemoglobin-mediated lipid oxidation of protein isolates obtained from cod and haddock white muscle as affected by citric acid, calcium chloride and pH [J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(1): 64-74.
- [22] Jongberg S, Skov S H, Tømrøen M A, et al. Effect of white grape extract and modified atmosphere packaging on lipid and protein oxidation in chill stored beef patties [J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(2): 276-283.
- [23] Sun S, Zhao J, Luo Z, et al. Systematic evaluation of the physicochemical properties and the volatile flavors of yak meat during chilled and controlled freezing-point storage [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(4): 1351-1361.
- [24] Chen Q, Hu Y Y, Wen R X, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose and electronic tongue [J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108338.
- [25] De Carvalho F A L, Lorenzo J M, Pateiro M, et al. Effect of guarana (*Paullinia cupana*) seed and pitanga (*Eugenia uniflora* L.) leaf extracts on lamb burgers with fat replacement by chia oil emulsion during shelf life storage at 2 °C [J]. *Food Research International*, 2019, 125: 108554.
- [26] Ramírez-Rojas M I, Vargas-Sánchez R D, Torres-Martínez B D M, et al. Inclusion of ethanol extract of mesquite leaves to enhance the oxidative stability of pork patties [J]. *Foods*, 2019, 8(12): 631.
- [27] Hayes J E, Stepanyan V, Allen P, et al. Effect of lutein, sesamol, ellagic acid and olive leaf extract on the quality and shelf-life stability of packaged raw minced beef patties [J]. *Meat Science*, 2010, 84(4): 613-620.
- [28] Lee M A, Kim T K, Hwang K E, et al. Kimchi extracts as inhibitors of colour deterioration and lipid oxidation in raw ground pork meat during refrigerated storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2735-2742.

- [29] Fan X J, Liu S Z, Li H H, et al. Effects of *Portulaca oleracea* L. extract on lipid oxidation and color of pork meat during refrigerated storage [J]. Meat Science, 2019, 147: 82-90.
- [30] Yu L, Scanlin L, Wilson J, et al. Rosemary extracts as inhibitors of lipid oxidation and color change in cooked turkey products during refrigerated storage [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2): 582-585.
- [31] Al-Dalali S, Li C, Xu B. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131881.
- [32] Xu Q, Yu Z, Zeng W. Structural and functional modifications of myofibrillar protein by natural phenolic compounds and their application in pork meatball [J]. Food Research International, 2021, 148: 110593.
- [33] Nyaisaba B M, Hatab S, Liu X, et al. Physicochemical changes of myofibrillar proteins of squid (*Argentinus ilex*) induced by hydroxyl radical generating system [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124941.
- [34] Kang Z, Zhang X, Li X, et al. The effects of sodium chloride on proteins aggregation, conformation and gel properties of pork myofibrillar protein running head: Relationship aggregation, conformation and gel properties [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(6): 2258-2264.
- [35] Cao Y, Ma W, Huang J, et al. Effects of sodium pyrophosphate coupled with catechin on the oxidative stability and gelling properties of myofibrillar protein [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105722.
- [36] Gan X, Li H, Wang Z, et al. Does protein oxidation affect proteolysis in low sodium Chinese traditional bacon processing? [J]. Meat Science, 2019, 150: 14-22.
- [37] Wang Y, Zhou Y, Wang X, et al. Origin of high-pressure induced changes in the properties of reduced-sodium chicken myofibrillar protein gels containing CaCl_2 : Physicochemical and molecular modification perspectives [J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126535.
- [38] Li Y, Xue C, Quan W, et al. Assessment the influence of salt and polyphosphate on protein oxidation and N ϵ -(carboxymethyl)lysine and N ϵ -(carboxyethyl)lysine formation in roasted beef patties [J]. Meat Science, 2021, 177: 108489.
- [39] Liu Z, Xiong Y L, Chen J. Morphological examinations of oxidatively stressed pork muscle and myofibrils upon salt marination and cooking to elucidate the water-binding potential [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(24): 13026-13034.
- [40] Cao Y, True A D, Chen J, et al. Dual role (anti- and pro-oxidant) of gallic acid in mediating myofibrillar protein gelation and gel *in vitro* digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(15): 3054-3061.
- [41] Maimon E, Samuni A, Goldstein S. Mechanistic insight into the catalytic inhibition by nitroxides of tyrosine oxidation and nitration [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, 2019, 1863(11): 129403.
- [42] Peng R, Wang L, Yu P, et al. Exacerbated protein oxidation and tyrosine nitration through nitrite-enhanced fenton chemistry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(1): 353-359.
- [43] Domínguez R, Pateiro M, Gagaoua M, et al. A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products [J]. Antioxidants, 2019, 8(10): 429.
- [44] Nachtigall F M, Vidal V A S, Pyarasani R D, et al. Substitution effects of NaCl by KCl and CaCl_2 on lipolysis of salted meat [J]. Foods, 2019, 8(12): 595.
- [45] Bragagnolo N, Danielsen B, Skibsted L H. Combined effect of salt addition and high-pressure processing on formation of free radicals in chicken thigh and breast muscle [J]. European Food Research and Technology, 2006, 223(5): 669-673.
- [46] Cao S M, Wu Y Y, Li L H, et al. Activities of endogenous lipase and lipolysis oxidation of low-salt lactic acid-fermented fish (*Decapterus maruadsi*) [J]. Journal of Oleo Science, 2018, 67(4): 445-453.
- [47] Lu T, Shen Y, Wang J H, et al. Improving oxidative stability of flaxseed oil with a mixture of antioxidants [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(3): undefined.
- [48] Xu Q D, Zhou Z Q, Yu J, et al. Effect of *Cedrus deodara* extract on the physiochemical and sensory properties of salted meat and its action mechanism [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(7): 2910-2923.
- [49] Devatkal S K, Naveena B M. Effect of salt, kinnow and pomegranate fruit by-product powders on color and oxidative stability of raw ground goat meat during refrigerated storage [J]. Meat Science, 2010, 85(2): 306-311.
- [50] Bess K N, Boler D D, Tavárez M A, et al. Texture, lipid oxidation and sensory characteristics of ground pork patties prepared with commercially available salts [J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 50(2): 408-413.