doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.043

Fenton 体系氧化诱导下猪肉蛋白质与脂质氧化作用及其对品质的影响研究

刘佳雯[1]　杨　柳[1]　谢心蕊[2]　李保国[1]　王　欣[1]

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 乌鲁木齐技师学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 采用 Fenton 氧化体系(Fendon oxidation system,FOS)研究了不同氧化水平(0、1、5、10、20 mmol/L H_2O_2)下猪背最长肌的蛋白质及脂质的氧化作用及其与品质指标、挥发性风味物质的相关性。结果表明,随氧化程度的升高,猪背最长肌的离心损失率、蒸煮损失率、S_{23}(自由水比例)、L^*、过氧化值(Peroxide value,POV)、TBARS(Thiobarbituric acid reactive substances)值、羰基含量等均显著增加,而 a^*、b^*、硬度、咀嚼性、黏性、表面疏水性先增加后降低,S_{22}(不易流动水比例)、巯基含量、弹性、回复性、内聚性均减小;典型挥发性化合物组成变化显著,二聚体(2-戊酮 D、2-丁酮 D)、杂环类化合物(2,6-二甲基吡嗪、吡啶)及酸类(乙酸)物质增多。相关性分析表明,肉品品质变化是脂质和蛋白交互氧化的结果,脂质和肌原纤维蛋白氧化进一步导致了样品保水性的降低,色泽、风味和质构的劣变。

关键词: 猪背最长肌; Fenton 氧化体系; 脂质氧化; 蛋白氧化; 品质; 挥发性风味物

中图分类号: TS251.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0453-10　　**OSID**:

Oxidation of Pork Proteins and Lipids Induced by Fenton System and Its Effects on Quality

LIU Jiawen[1]　YANG Liu[1]　XIE Xinrui[2]　LI Baoguo[1]　WANG Xin[1]

(1. *School of Health Science and Engineering*, *University of Shanghai for Science and Technology*, *Shanghai* 200093, *China*
2. *Urumqi Technology College*, *Urumqi* 830000, *China*)

Abstract: The Fenton oxidation system (FOS) was used to investigate the oxidation of protein and lipid in porcine *Longissimus dorsi* muscle at different oxidation levels (0 mmol/L, 1 mmol/L, 5 mmol/L, 10 mmol/L and 20 mmol/L H_2O_2) and its correlation with quality indicators and volatile flavor compounds. The results showed that increasing trend of oxidation level significantly enhanced centrifugal loss, cooking loss, S_{23} (proportion of free water), L^*, POV, TBARS, and carbonyl content. Meanwhile, initially increasing pattern was observed in a^*, b^*, hardness, chewiness, adhesiveness, and surface hydrophobicity was decreased at the end of process, and S_{22} (proportion of immobile water), sulfhydryl content, springiness, resilience, and cohesiveness showed a decreasing trend. Additionally, a significant change occurred in composition of typical volatile compounds, and the number of dimers (2-pentanone D and 2-butanone D), heterocyclic compounds (2,6-dimethyl pyrazine and pyridine), and acids (acetic acid) was increased. Correlation analysis revealed that change in meat quality was due to the cross-oxidation of lipids and proteins, while lipid oxidation and myofibrillar proteins further led to a reduction in water retention, color deterioration, flavor, and texture of the samples. This study is of great significance for further understanding the oxidation modification of raw meat during storage or processing, explaining the deterioration of meat quality, and selecting reasonable antioxidant measures.

Key words: porcine *Longissimus dorsi* muscle; Fenton oxidation system; lipidoxidation; protein oxidation; quality; volatile flavor compounds

0　引言

原料肉的品质与肉制品的口感、外观、营养价值和食品安全性密切相关,但由于其内部组织结构被破坏,原料肉在加工和贮藏过程中不可避免地会发生脂肪氧化和蛋白质降解,这对肉制品的品质具有

收稿日期: 2024-01-27　修回日期: 2024-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF110110)

作者简介: 刘佳雯(1997—),女,硕士生,主要从事食品安全与控制研究,E-mail: 2507948594@qq.com

通信作者: 王欣(1975—),女,教授,博士,主要从事食品安全控制与检测研究,E-mail: 18918629281@126.com

双重作用。适度氧化可以提高产品的质构、色泽和风味等品质,过度氧化则造成品质劣变和腐败。脂质和蛋白质氧化均为自由基链式反应,且氧化过程中产生的自由基等活性氧(Reactive oxygen species, ROS)物质可以介导脂质和蛋白质的交互氧化反应[1]。文献[2]研究了富氧包装中的牛肉品质特性,发现脂质氧化可以驱动氧合肌红蛋白(Oxymyoglobin, MbO_2)和红度的变化,且二者与硫代巴比妥酸反应产物含量显著相关。现有研究多围绕氧化作用对蛋白质结构、功能及肉类品质的影响开展试验[3],而围绕原料肉中的脂质和蛋白质的氧化作用及其对风味、品质相关性的研究相对较少,需进一步研究。

一般可通过建立不同的氧化体系对肉类氧化过程中脂质、肌原纤维蛋白(Myofibrillar protein, MP)等的变化规律进行研究[4]。其中,Fenton 氧化体系(Fe^{3+}/H_2O_2/抗坏血酸)是肉类加工中普遍存在的一种氧化体系,Fe^{3+}和 H_2O_2可产生反应性中间活性氧,抗坏血酸则不断还原金属离子,推动氧化还原循环使反应持续进行[5]。通过调整 H_2O_2浓度和反应条件,可以精确控制氧化反应的速率和程度,满足不同研究需求。目前文献中报道的 Fenton 体系各组分的浓度虽有一定差异,例如,Fe^{3+}浓度为 0.01 ~ 0.1 mmol/L,抗坏血酸浓度为 0.1 ~ 1 mmol/L,H_2O_2浓度为 0 ~ 20 mmol/L,但这些条件均可导致肌原纤维蛋白或肌浆蛋白的氧化交联[6-7]。这种较高氧化水平有助于解释易产生较高水平的活性氧的辐照、冷冻/解冻等加工中存在的非自然氧化问题及其对肉适口性的影响[8]。

基于以上分析,本文采用 Fenton 氧化体系进行猪肉的模拟氧化研究,分析羟自由基氧化体系中 H_2O_2浓度对肉的保水性、质构、色泽、脂质氧化(POV、TBARS 值)、蛋白质氧化(羰基、巯基、表面疏水性)及挥发性风味物的影响,并通过皮尔逊相关性分析探讨脂质、蛋白质氧化与肉类品质及风味变化的相关性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜猪背最长肌,购于当地菜市场,于 1 h 内运送至实验室。

氯化铁($FeCl_3$)、30% H_2O_2、抗坏血酸、乙二胺四乙酸(Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA)、氯化钠、磷酸钠(磷酸三钠)、无水氯化镁、盐酸、牛血清蛋白、2, 4-二硝基苯肼(2, 4-Dinitrophenylhydrazine, DNPH)、三氯乙酸、乙醇(体积分数 95%)、乙酸乙酯、尿素、盐酸胍、磷酸氢二钠、2-硝基苯甲酸(2-Nitrobenzoic acid, DTNB)、溴酚蓝、氢氧化钠(粒状)、冰乙酸(优级纯)、三氯甲烷、硫代巴比妥酸、硫代硫酸钠、可溶性淀粉、碘化钾等。

1.2 仪器与设备

3 - 18R 型高速冷冻离心机,湖南恒诺仪器设备有限公司;UV - 9100 D 型紫外-可见分光光度计,北京莱伯泰科仪器股份有限公司;S210K 型 pH 计,Mettler Toledo 公司;Mini - PROTEAN Tetra 型电泳仪,美国 Bio - rad 公司;PQ001 - 020 - 015V 型核磁共振分析仪(氢谱,共振频率 19 MHz,磁体温度 35℃,配套 T - invfit 反演拟合软件和 15 mm 核磁试管),苏州纽迈分析仪器股份有限公司;TA. XT. Plus 型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;CR - 400 型色差计,日本 Chroma Meter 公司;FlavourSpec 型 GC - IMS 联用仪,德国 G. A. S mbH 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品预处理

剔除新鲜猪背最长肌可见脂肪及结缔组织,沿肌纤维方向切割成 2 cm × 2 cm × 2 cm 的立方体,超纯水清洗干净后,用滤纸吸干表面水分,再进行氧化操作。

1.3.2 模拟氧化系统建立

为了模拟较高的氧化水平,在文献[9]基础上略作修改构建 Fenton 氧化体系,具体如下:$FeCl_3$浓度为 0.1 mmol/L,抗坏血酸浓度为 0.1 mmol/L,H_2O_2浓度分别为 0、1、5、10、20 mmol/L。将样品按液料比 2 mL/g 置于不同 H_2O_2浓度的氧化体系中进行模拟氧化,4℃氧化 24 h 后,添加 1 mL 1 mmol/L 的 EDTA 终止氧化反应,擦干样品,4℃贮藏备用。

1.3.3 肌原纤维蛋白提取

参考文献[10]的方法并略作修改,将搅碎的样品与 4 倍体积的分离缓冲液(0.1 mol/L NaCl, 10 mmol/L Na_3PO_4, 2 mmol/L $MgCl_2$, 1 mmol/L EDTA,pH 值 7.0)混合均质后离心(4℃,8 000 r/min, 15 min),收集沉淀,上述操作重复 3 次。所得沉淀按液料比 4 mL/g 加入 0.1 mol/L NaCl,分别洗涤,离心 2 次,并在最后 1 次离心前用 2 层纱布过滤,得到的白色膏状物即为肌原纤维蛋白。以牛血清蛋白为标准蛋白,双缩脲法测定蛋白质浓度。

1.3.4 离心损失测定

参考文献[11]的方法稍作修改。准确称量肉样(10.0 ± 0.5) g,吸水纸吸干表面水分后,滤纸包裹并置于 50 mL 离心管中,5 000 r/min 离心 10 min。去除滤纸,再次称量,离心损失率计算公式为

$$C_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中　C_1——离心损失率，%

m_0——离心前肉样质量，g

m_1——离心后肉样质量，g

1.3.5　蒸煮损失测定

参考文献[12]的方法并适当修改。准确称量肉样并置于聚乙烯袋中，80℃水浴 30 min 后流动水冷却，吸水纸吸干表面水分后称量，蒸煮损失率计算公式为

$$C_2 = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中　C_2——蒸煮损失率，%

m_2——蒸煮前肉样质量，g

m_3——蒸煮后肉样质量，g

1.3.6　低场核磁共振检测（Low field nuclear magnetic resonance，LF－NMR）

参考文献[13]的方法并适当修改。准确称取样品 3 g 置于核磁试管中，32℃恒温水浴 10 min 后置于核磁探头。测试条件：选择硬脉冲回波序列（Carr－Purcell－Meiboom－Gill，CPMG），采样频率 250 kHz，重复采样等待时间 3 000 ms、重复采样次数 4 次，回波数为 5 000，半回波时间 200 μs。应用 T－invfit 软件进行单/多组分反演拟合，可得到样品的单组分弛豫时间 T_{2W}，多组分弛豫时间 T_{2i}（i = 1，2，…）、信号幅值及峰面积比例 S_{2i}（i = 1，2，…）等核磁信息。

1.3.7　羰基含量测定

参照文献[14]略加修改。取 1 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液，加入 1 mL 0.2% 的 2，4-二硝基苯肼（2 mol/L HCl 溶液配制），室温（20℃）暗处静置 1 h，在此期间每 15 min 涡旋振荡一次。加入 1 mL 20% 的三氯乙酸溶液，10 000 r/min 离心 5 min，弃上清。用 1 mL 乙醇-乙酸乙酯（体积比 1∶1）清洗沉淀 3 次后。将沉淀加入 3 mL 盐酸胍溶液（6 mol/L），37℃水浴 15 min，10 000 r/min 离心 3 min，取上清于 370 nm 波长处测定蛋白溶液吸光度。羰基含量（质量摩尔浓度）计算公式为

$$C_O = \frac{A_1 n}{\varepsilon_1 \rho} \times 10^6 \quad (3)$$

式中　C_O——羰基含量，nmol/mg

A_1——370 nm 波长处吸光度

ε_1——羰基摩尔吸光系数，取 22 000 L·cm/mol

ρ——肌原纤维蛋白质量浓度，mg/mL

n——稀释倍数

1.3.8　巯基含量测定

参考文献[7]的方法并略加修改。取 1 mL 5 mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液加入 9 mL 50 mmol/L 的磷酸盐缓冲液（含 0.6 mol/L NaCl，10 mmol/L EDTA，8 mol/L 尿素，pH 值 7.0），混合均匀。取 5 mL 加入 0.5 mL 0.2 mmol/L 的 DTNB，室温静置反应 25 min，取上清液在 412 nm 处测定吸光度。巯基含量（质量摩尔浓度）计算公式为

$$S_H = \frac{A_2 n}{\varepsilon_2 \rho} \times 10^6 \quad (4)$$

式中　S_H——巯基含量，nmol/mg

A_2——412 nm 波长处吸光度

ε_2——巯基摩尔吸光系数，取 13 600 L·cm/mol

1.3.9　表面疏水性测定

参考文献[15]的方法并略作修改。取 1 mg/mL 溴酚蓝溶液 0.2 mL 添加到 1 mL 5 mg/mL 肌原纤维蛋白溶液中，混匀后离心 15 min（4℃、4 000 r/min）。取上清稀释 10 倍，在 595 nm 波长处测定吸光度。磷酸盐缓冲液（20 mmol/L，pH 值 6.0）为对照。表面疏水性以溴酚蓝结合量（BPB）表示，计算公式为

$$B_{PB} = \frac{200(A_0 - A_1)}{A_0} \quad (5)$$

式中　A_0——对照组吸光度

B_{PB}——溴酚蓝结合量，μg

A_1——样品吸光度

1.3.10　POV 测定

参考 GB 5009.227—2016《食品中过氧化值的测定》方法测定 POV。

1.3.11　TBARS 测定

参考 GB 5009.181—2016《食品中丙二醛的测定》方法测定 TBARS。

1.3.12　色差测定

参考文献[16]的方法略作修改。测定样品亮度 L^*、红度 a^*、黄度 b^*，计算色差 ΔE。

1.3.13　质构特性测定

参考文献[17]的方法略加修改。将样品置于测试平台，测试参数如下：测试探头 P/50，触发力 5 g，测试前速度 2 mm/s，测试速度 1 mm/s，测试后速度 1 mm/s，压缩深度 60%，时间间隔 5 s，压缩次数 2。TPA－macro 软件分析，计算其硬度以及咀嚼性、黏性（取绝对值）、弹性、内聚性和回复性指数。每组实验平行 6 次。

1.3.14　挥发性风味物质测定

参考文献[18]的方法并略作修改。精确称量 2 g 搅碎肉样，置于 20 mL 顶空瓶（IMS 专用瓶）中，

加装盖子、垫圈、旋紧瓶盖,编号待检。进样条件为:60℃孵育 15 min;进样针温度 65℃,顶空自动进样 500 μL,转速 500 r/min。分析条件为:MXTWAX 型毛细管柱(30 m × 0.53 mm,1 μm),色谱柱温度 60℃。载气为 N_2(纯度 99.999% 以上)。载气流速程序为:初始流速 2 mL/min,保持 2 min,18 min 内流速匀速升至 100 mL/min,保持 100 mL/min 至 30 min;漂移气流速保持 150 mL/min;IMS 温度 55℃。

数据分析:利用 Flavor Spec 型风味分析仪配备的分析插件进行风味物质图谱分析。以正构酮 C4 ~ C9 为外标计算各挥发性物质的保留指数(Retention index,RI),并基于保留指数和相对迁移时间与内置 GC × IMS Library Search 软件中的 NIST 数据库对化合物定性分析,采用检测峰颜色和面积(即峰信号强度)以及 quantification 功能进行半定量分析。

1.4 数据处理

试验均为 3 次重复。采用 SPSS 20.0 软件进行平均值和标准差计算,并进行方差分析和 Pearson 相关性分析;使用 Duncan 多重比较进行组间显著性分析($P < 0.05$,差异显著);采用 Origin 2023 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 保水性

离心损失和蒸煮损失是反映肉制品保水性的重要指标。图 1 为不同 H_2O_2 时的猪背最长肌保水性,图中不同大小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。由图 1 可知,随羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度的增加,样品的离心损失率相对增大($P < 0.05$),尤其是当 H_2O_2 浓度为 20 mmol/L 时,样品的离心损失率高达 29.7%,比对照增加 14.7%。蒸煮损失也有类似的变化,在低 H_2O_2 浓度(1 mmol/L 和 5 mmol/L)下,二者的蒸煮损失差异不显著($P > 0.05$)。当 H_2O_2 浓度为 20 mmol/L 时,样品蒸煮损失率高达 35.9%。H_2O_2 浓度增加加剧了蛋白质氧化变性,使水分子与肌纤维间的作用力相对减弱,导致保水性降低[19]。

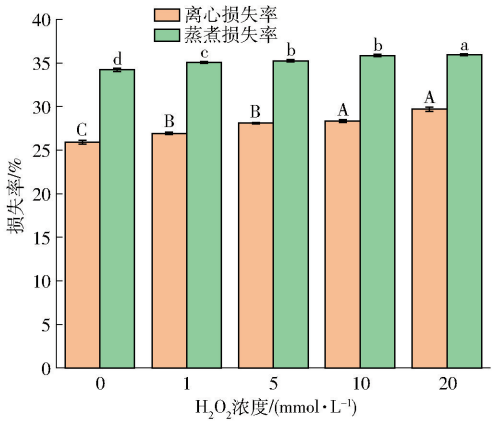

图 1 H_2O_2 浓度对猪背最长肌保水性的影响

Fig. 1 Effect of H_2O_2 concentration on water holding capacity of porcine *Longissimus dorsi* muscle

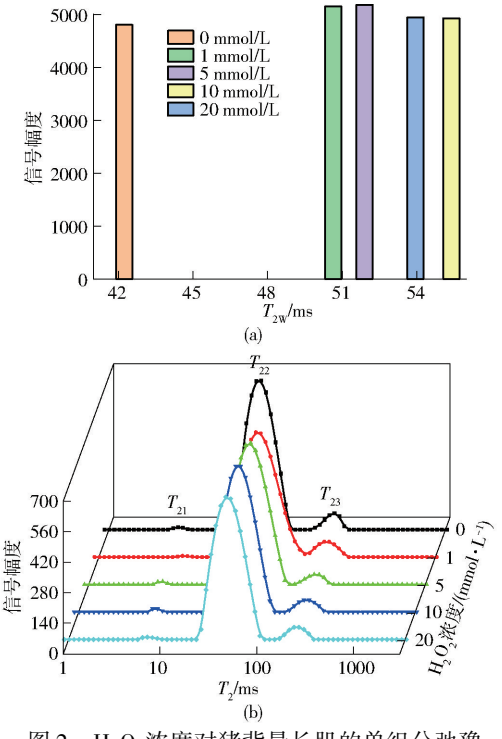

图 2 H_2O_2 浓度对猪背最长肌的单组分弛豫图谱和多组分弛豫图谱的影响

Fig. 2 Effects of H_2O_2 concentration on single-component relaxation spectra and multi-component relaxation spectra of porcine *Longissimus dorsi* muscle

2.2 水分分布特征

2.2.1 单组分弛豫图谱

低场核磁共振(LF - NMR)中单组份弛豫时间 T_{2W} 可以反映样品的整体弛豫特性。样品的 T_{2W} 随羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度变化如图 2a 所示。随 H_2O_2 浓度的增加,样品体系的 T_{2W} 逐渐增大,当 H_2O_2 浓度为 10 mmol/L 时,T_{2W} 最大(55.38 ms),比对照组显著增加 31.1%,但与20 mmol/L H_2O_2 组的 T_{2W}(53.94 ms)无显著差异。说明随着样品氧化程度增加,其保水性降低,这可能是由于氧化加剧了肌原纤维的横向收缩,使肌细胞径向减小而细胞间距增大,水分在肌肉组织内的扩散通道增加,使样品中水分子流动性相对增强[20]。

2.2.2 多组分弛豫图谱

多组分弛豫图谱(T_2)可以进一步反映样品中不同状态(自由度)水分的分布,T_2 越大,水分子自由度越高,与其他物质结合程度越不紧密[21]。不同

浓度 H_2O_2 氧化处理后的样品多组分弛豫(T_2)图谱如图 2b 所示。样品的 T_2 图谱均表现为 3 个弛豫峰,其中 T_{21} 峰(1 ~ 10 ms)为与蛋白质分子表面的极性基团紧密结合的结合水;T_{22}(10 ~ 100 ms)为存在于肌纤丝、肌原纤维及细胞膜之间的不易流动水,这也是肌肉中水分的主要存在形式;T_{23} 峰(100 ~ 1 000 ms)则为存在于细胞外间隙中可自由流动的水[19]。

将各弛豫峰的弛豫时间(T_{21}、T_{22}、T_{23})及峰面积比例(S_{21}、S_{22}、S_{23})列于表 1。结合图 2b 及表 1 可以看出,随羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度的升高,各弛豫峰均相对右移,弛豫时间延长,表明样品中各状态水分子流动性均相对增强。这与 2.1 节中保水性的变化相符,水分子所受的束缚力相对减弱而自由度增大。从峰面积比例的变化可知,S_{21} 和 S_{23} 均低于 6%,表明体系中结合水和自由水占比较小,而不易移动水是体系中主要的水分状态,S_{22} 占比为 90% 以上。随 H_2O_2 浓度的增加,S_{21} 和 S_{22} 相对减小,而 S_{23} 相对增大,这与保水性降低的结果相符,20 mmol/L H_2O_2 处理后样品的 S_{23} 增至 5.63%。氧化作用降低了蛋白质分子与水分子间的作用力,使一部分不易流动水转变为自由水[22],另一方面,氧化导致肌球蛋白与肌动蛋白结合形成肌动球蛋白,即蛋白氧化形成横桥,导致肌丝内的水分被排到肌纤维束与肌束膜之间,这部分水分也极易损失[23]。

表 1　H_2O_2 浓度对猪背最长肌弛豫时间及峰面积比例的影响

Tab. 1　Effects of H_2O_2 concentration on relaxation time and peak area ratio of porcine *longissimus dorsi* muscle

H_2O_2 浓度/(mmol·L^{-1})	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	S_{21}/%	S_{22}/%	S_{23}/%
0	(2.59 ± 0.05)^{d}	(18.74 ± 0.10)^{e}	(120.47 ± 0.02)^{d}	(2.06 ± 0.03)^{a}	(94.68 ± 0.05)^{e}	(3.26 ± 0.02)^{e}
1	(3.85 ± 0.11)^{b}	(21.05 ± 0.04)^{d}	(151.99 ± 0.40)^{c}	(1.94 ± 0.03)^{c}	(94.35 ± 0.03)^{d}	(3.45 ± 0.14)^{d}
5	(3.64 ± 0.10)^{c}	(22.65 ± 0.17)^{a}	(152.45 ± 0.41)^{c}	(1.60 ± 0.03)^{b}	(94.71 ± 0.05)^{c}	(3.89 ± 0.04)^{c}
10	(3.87 ± 0.17)^{b}	(22.05 ± 0.05)^{c}	(158.31 ± 0.30)^{b}	(1.54 ± 0.09)^{b}	(93.40 ± 0.04)^{b}	(5.06 ± 0.08)^{b}
20	(4.22 ± 0.20)^{a}	(22.35 ± 0.04)^{b}	(161.13 ± 0.58)^{a}	(1.59 ± 0.10)^{b}	(92.78 ± 0.22)^{a}	(5.63 ± 0.15)^{a}

注:同列数据不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

2.3　蛋白质氧化

2.3.1　羰基

羰基含量越高表明蛋白质氧化程度越高。羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度对 MP 羰基化的影响如图 3 所示。结果表明,MP 的羰基含量随 H_2O_2 浓度的增加而显著增大($P < 0.05$)。20 mmol/L 的 H_2O_2 时,样品的羰基含量高达 14.88 nmol/mg,比空白对照(0 mmol/L)增加 52.9%。蛋白侧链羰基基团的形成与赖氨酸、脯氨酸、精氨酸等敏感氨基酸在自由基的攻击下的直接氧化密切相关[24]。羰基的形成对 H_2O_2 有浓度依赖性,随体系中羟自由基浓度的增加,其对猪肉肌原纤维蛋白的氧化修饰作用增强,加剧了羰基化。

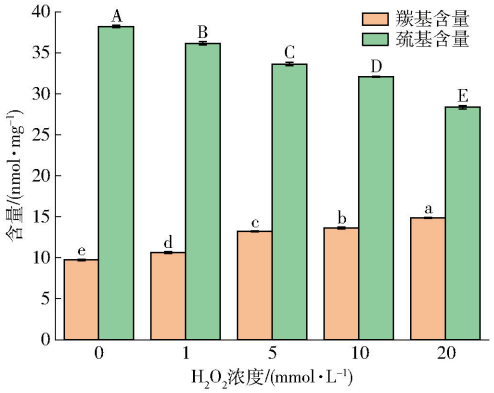

图 3　H_2O_2 浓度对猪背最长肌 MP 羰基含量、巯基含量的影响

Fig. 3　Effects of H_2O_2 concentration on carbonyl content and sulfhydryl content of MP in porcine *Longissimus dorsi* muscle

2.3.2　巯基

巯基含量也是表征蛋白氧化程度的重要指标。图 3 表明,随着羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度的增加,MP 样品中的总巯基含量显著降低($P < 0.05$)。与对照组(38.19 nmol/mg)相比,1 mmol/L H_2O_2 处理后样品的总巯基含量已显著降低,20 mmol/L H_2O_2 处理组的总巯基含量显著降至 28.38 nmol/mg,较对照下降了 25.69%。这与文献[9]在猪外脊的氧化处理中的发现相符。蛋白质氧化引发了氨基酸侧链的反应,导致了巯基的丢失和二硫键的形成。二硫键对 MP 凝胶的形成及功能特性有重要影响[25]。适度氧化时,蛋白质结构暴露出的巯基形成二硫键,疏水基团聚集,有助于形成具有一定强度的三维网络结构,但当氧化程度过高则会破坏二硫共价键,使凝胶强度降低[26]。2.6 节的质构结果也表明适度氧化可使样品的硬度、咀嚼性提高,而当 H_2O_2 浓度超过 5 mmol/L 时,硬度、咀嚼性显著降低。

2.3.3 表面疏水性

蛋白质表面疏水性可以反映表面疏水性氨基酸的相对含量，与蛋白质空间结构的变化密切相关[27]。羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度对 MP 表面疏水性(以溴酚蓝结合量表示)的影响如图 4 所示。结果表明，MP 的表面疏水性在 H_2O_2 浓度介于 1 ~ 5 mmol/L 时相对降低，尤其是当 H_2O_2 浓度为 1 mmol/L 时，MP 的表面疏水性最低；氧化导致 MP 结构展开，进而又通过疏水作用聚集，蛋白表面颗粒聚集体增多，从而使表面疏水性下降[7]。当浓度超过 10 mmol/L 时，蛋白质的表面疏水性显著增大，尤其是当 H_2O_2 浓度为 20 mmol/L 时，MP 的表面疏水性指数(溴酚蓝结合量)高达 79.23 μg。说明随着氧化程度的增大，蛋白质构象更多地趋向于无序松散状态，使疏水基团更多的暴露，从而降低了蛋白质的水合能力[28]。

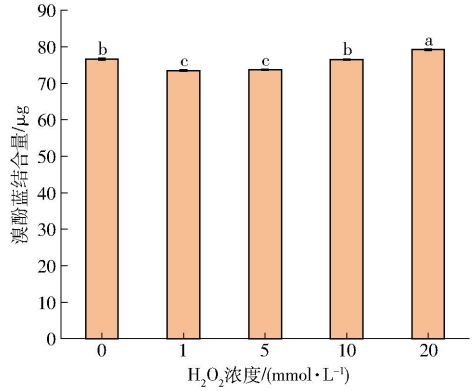

图 4 H_2O_2 浓度对猪背最长肌 MP 表面疏水性的影响

Fig. 4 Effect of H_2O_2 concentration on surface hydrophobicity of MP in porcine *Longissimus dorsi* muscle

2.4 脂质氧化

2.4.1 POV

肌肉脂肪与肉类品质也关联紧密。作为脂肪氧化的初级产物，过氧化物是形成羰基和羟基的重要中间产物，不仅会影响蛋白结构和功能，还会进一步分裂形成醛、酮和环氧衍生物等终产物，从而影响肌肉的风味和口感[29]。羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度对样品 POV 的影响如图 5 所示。结果表明，H_2O_2 浓度较低(1 mmol/L)时，样品的 POV 与对照组无显著差异，但当 H_2O_2 浓度在 5 mmol/L 以上时，样品的 POV 显著增大，当 H_2O_2 浓度上升至 20 mmol/L 时，样品的 POV 显著增至 0.149 g/(100 g)，比对照组增加了 43.3%。这可能是因为随着 H_2O_2 浓度的增加，脂肪氧化生成大量性质不稳定的游离脂肪酸，进而在脂肪氧化酶作用下生成过氧化物，表现为 POV 的增加[30]。

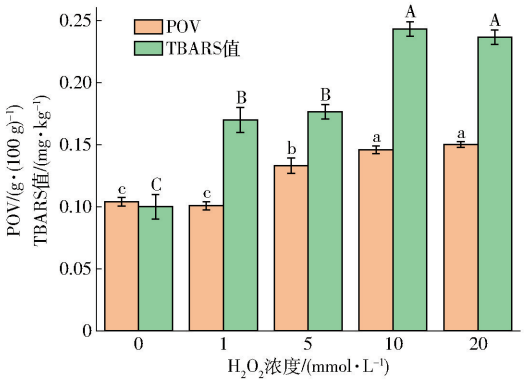

图 5 H_2O_2 浓度对猪背最长肌 POV 和 TBARS 值的影响

Fig. 5 Effect of H_2O_2 concentration on POV and TBARS values of porcine *Longissimus dorsi* muscle

2.4.2 TBARS

TBARS 值可反映脂肪次级氧化程度[31]。由图 5 可知，随 H_2O_2 浓度的增加，样品的 TBARS 值相对增大；H_2O_2 浓度为 10 mmol/L 时，TBARS 值最大，比对照增加了 140%，当 H_2O_2 浓度进一步增加至 20 mmol/L，TBARS 略有下降，但变化不显著。猪背最长肌中的不饱和脂肪酸的初级氧化产物在氧化作用下迅速分解为丙二醛(Malondialdehyde，MDA)等低分子物质，使 TBARS 值快速上升。但强氧化条件下，脂肪氧化次级产物容易进一步与其他化学物质(例如蛋白质)发生反应，减少了可与硫代巴比妥酸结合的 MDA，表现为 TBARS 值的相对降低[32]。

2.5 色值

肉色与其新鲜度及消费者的购买意愿密切相关。由表 2 可知，随羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度的增加，样品 L^* 值相对增大，与对照相比，H_2O_2 浓度为 20 mmol/L 时，L^* 增加至 70.45。L^* 值与肌肉表面水分对入射光的反射和散射相关[33]，较高的 H_2O_2 浓度加剧了蛋白的变性程度，使样品的保水性降低，样品表面水分增多使其光折射增强，表现为 L^* 值增大[34]。而 a^* 及 b^* 随 H_2O_2 浓度的升高均呈先上升后下降的趋势。当 H_2O_2 浓度为 5 mmol/L 时，二者均达最大值，在此过程中肌红蛋白更多地被氧化为樱桃红的 MbO_2。但随着 H_2O_2 浓度的进一步增加，样品氧化加剧，MbO_2 进一步被氧化为褐色的高铁肌红蛋白(MetMb)，样品 a^*、b^* 值相应降低[35]。色差 ΔE 可反映颜色稳定性[36]，样品 ΔE 随 H_2O_2 浓度的增加相对增大，说明随着氧化程度的加剧，猪背最长肌色泽逐步发生劣变。

2.6 质构特性

质构特性也可以反映肉样新鲜度。羟自由基氧化体系中 H_2O_2 浓度对样品质构特性的影响如表 3 所示。从表 3 可知，样品硬度、咀嚼性及黏性

表 2　H_2O_2浓度对猪背最长肌色值的影响

Tab. 2　Effect of H_2O_2 concentration on color value of porcine *longissimus dorsi* muscle

H_2O_2浓度/(mmol·L^{-1})	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	(69.01 ±0.15)^{d}	(7.06 ±0.02)^{d}	(10.16 ±0.02)^{c}	
1	(69.77 ±0.04)^{c}	(7.41 ±0.05)^{c}	(11.07 ±0.12)^{b}	(1.53 ±0.22)^{c}
5	(70.16 ±0.02)^{b}	(7.95 ±0.05)^{a}	(12.54 ±0.09)^{a}	(2.79 ±0.03)^{a}
10	(70.33 ±0.01)^{a}	(7.71 ±0.02)^{b}	(11.60 ±0.05)^{b}	(2.06 ±0.13)^{b}
20	(70.45 ±0.03)^{a}	(7.47 ±0.02)^{c}	(9.67 ±0.08)^{d}	(1.58 ±0.14)^{c}

表 3　H_2O_2浓度对猪背最长肌质构特性的影响

Tab. 3　Effects of H_2O_2 concentration on texture properties of porcine *longissimus dorsi* muscle

H_2O_2浓度/(mmol·L^{-1})	硬度/g	咀嚼性指数/g	弹性指数	黏性指数/(g·s)	内聚性指数	回复性指数
0	(7 915.81 ±9.17)^{b}	(3 975.44 ±7.80)^{b}	(0.65 ±0.05)^{a}	(21.81 ±0.75)^{c}	(0.79 ±0.06)^{a}	(0.38 ±0.08)^{a}
1	(8 445.97 ±9.48)^{a}	(4 255.34 ±9.14)^{a}	(0.64 ±0.04)^{a}	(35.43 ±0.43)^{b}	(0.79 ±0.09)^{a}	(0.38 ±0.01)^{a}
5	(7 763.81 ±9.86)^{c}	(3 406.86 ±28.03)^{c}	(0.64 ±0.01)^{a}	(48.57 ±0.90)^{a}	(0.76 ±0.01)^{a}	(0.37 ±0.04)^{a}
10	(6 972.5 ±10.64)^{d}	(3 096.12 ±22.19)^{d}	(0.55 ±0.02)^{b}	(47.58 ±1.74)^{a}	(0.78 ±0.03)^{a}	(0.31 ±0.02)^{b}
20	(6 325.37 ±8.67)^{e}	(2 183.39 ±15.18)^{e}	(0.59 ±0.08)^{b}	(33.94 ±1.08)^{b}	(0.75 ±0.02)^{a}	(0.32 ±0.02)^{b}

均随 H_2O_2浓度的增加而呈先上升后下降的趋势，当 H_2O_2浓度为 1 mmol/L 时，硬度和咀嚼性指数均最大，分别为 8 445.97 g 和 4 255.34 g，而黏性指数在 H_2O_2浓度为 5 mmol/L 时达到最大(48.57 g·s)，适度的氧化使蛋白发生交联形成了较为紧密的三维结构，导致硬度、咀嚼性及黏性的增大[37]。然而，H_2O_2浓度提升至 10 mmol/L 时，样品硬度相比对照组显著减小，这可能与肌原纤维蛋白水解加剧组织结构崩解，肌肉细胞间结合力下降引起的汁液流失有关[38]。弹性、回复性、内聚性均随着 H_2O_2浓度的增加相对降低，较高的 H_2O_2浓度(10 ~ 20 mmol/L)影响更为显著。

2.7　挥发性风味物质

利用挥发性风味物质的指纹图谱比较样品间挥发性有机物的动态变化。样品的指纹图谱是根据峰值信号形成的，每行显示样品的挥发性化合物信号峰，信号越强颜色越亮(图 6)。共测得 64 个信号峰，可明确定性的主要挥发性风味物质 57 种，其中酮类 15 种、醇类 13 种、醛类 8 种、酯类 7 种、酸类 1 种、烯烃类 1 种、杂环类 8 种，其他类物质 4 种。不同 H_2O_2浓度下猪背最长肌氧化后的挥发性风味组分相对含量如图 6a 所示，醇类和酮类相对含量较高，分别为 30.64% ~ 35.01%，30.04% ~ 31.91%，其次为醛类(5.90% ~ 9.47%)、酯类(6.96% ~ 10.91%)，杂环类化合物相对含量为 6.89% ~ 8.77%，酸类及烯烃类相对含量较低，分别为 0.55% ~ 2.29%，0.25% ~ 0.58%；其他化合物相对含量为 9.47% ~ 11.67%。1 mmol/L H_2O_2处理组的挥发性物质与对照组相似，随 H_2O_2浓度进一步增加，醇类物质先增加后减少，酮类、醛类物质则先减少后增加，这可能是因为随着氧化的加剧，醛类、酮类还原为醇的速率大于脂肪酸降解为醛的速率[39-40]。酯类物质含量呈波动性变化，且在高浓度H_2O_2(20 mmol/L)处理组中，酸类物质含量明显增加。可能是由于脂肪在氧化过程中不断产生醇类和脂肪酸等小分子物质，醇类和酸类物质进一步发生酯化反应生成酯类物质[41]。图 6b 表明，各样品中均检出了 2,3-丁二酮、2-丁酮、2,3-戊二酮等猪背最长肌的主要挥发性物质；低浓度 H_2O_2处理组和对照组的的典型挥发性化合物(A 区域)相似，主要有乙酸己酯、2-戊酮、2-己酮、2-丁酮、甲基庚烯酮、乙烯基戊烯酮、1-戊烯-3-酮、1-辛烯-3-酮、2-乙基-1-己醇、戊醇、己醇、辛醇等。不饱和脂肪酸的氧化降解和氨基酸降解会产生酮类物质[42]。脂肪的氧化降解或者羰基化合物的还原则会形成醇类物质[43]。随着氧化程度的增加，单体化合物逐渐聚集形成二聚体，2-戊酮 M，2-丁酮 M 的含量在 H_2O_2浓度达到5 mmol/L 后相对下降，而 2-戊酮 D、2-丁酮 D 的含量显著增加。图中 B 区域中的化合物是中浓度H_2O_2(5 ~ 10 mmol/L)处理组的特征峰。主要化合物为吡啶和 2,6-二甲基吡嗪等杂环类化合物。吡嗪类化合物与氨基酸降解生成的 a-氨基酸酮缩合反应相关[39]。C 区域的化合物是高浓度 H_2O_2(20 mmol/L)处理组的特征峰，主要由 2-丁醇、乙酸、戊醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛等化合物组成。醛类主要是不饱和脂肪酸的衍生物或脂质氧化过程中烷氧基自由基分解的产物[43]。(E)-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛含量在 H_2O_2浓度为 20 mmol/L 时显著上升，表明脂肪氧化程度加剧。此外，该组出现了唯一的酸类物质

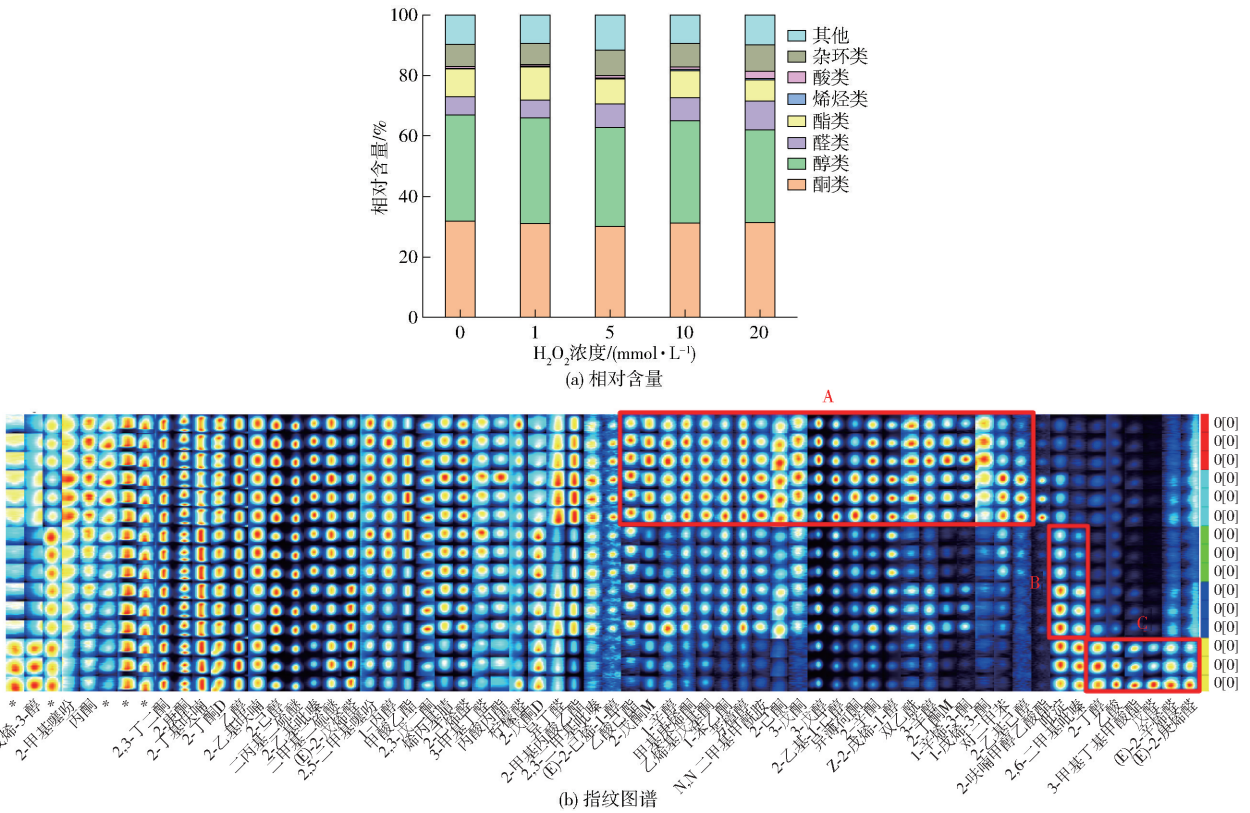

图 6 不同 H_2O_2 浓度下猪背最长肌挥发性化合物的组成

Fig. 6 Composition of volatile compounds in porcine *longissimus dorsi* muscle under different H_2O_2 concentrations

(乙酸),乙酸主要来源于脂肪氧化的产物,是腐败肉酸臭味的重要来源[41]。

2.8 脂质氧化、蛋白氧化与肌肉品质相关性分析

脂质氧化、蛋白氧化与肌肉品质相关性分析结果见图 7。H_2O_2 浓度与离心损失率、羰基含量显著正相关($P<0.05$),与 S_{23} 极显著正相关($P<0.01$),与硬度、S_{22} 显著负相关($P<0.05$),与巯基含量、咀嚼性指数呈极显著负相关($P<0.01$)。这与文献

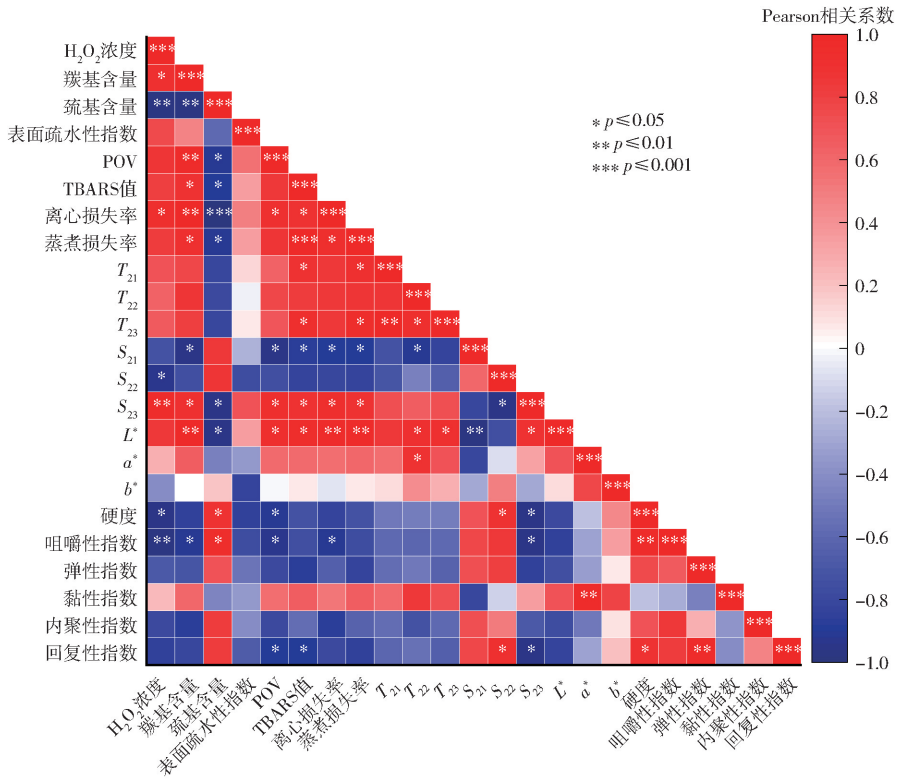

图 7 脂质、蛋白氧化与肌肉品质的 Pearson 相关性分析

Fig. 7 Pearson correlation analysis of lipid, protein oxidation and muscle quality

[22]得到的结果类似，表明 H_2O_2 浓度是影响猪背部最长肌保水性、蛋白质氧化及质构的重要因素。其次，离心损失率与蒸煮损失率、S_{23} 显著正相关（$P<0.05$），与 L^* 极显著正相关（$P<0.01$）。说明保水性的降低主要与体系中自由水比例的增加相关，且会对样品的亮度产生影响。另一方面，POV、TBARS 值与羰基含量显著正相关（$P<0.05$），与巯基含量则显著负相关（$P<0.05$），表明脂质和蛋白氧化密切相关。

3　结论

（1）氧化水平的升高加剧了蛋白结构的改变，从而影响蛋白质与水的结合能力，表现为离心损失、蒸煮损失，以及 S_{23}（自由水比例）的增加、S_{22}（不易流动水比例）的降低。

（2）轻度氧化有助于改善猪背最长肌的质构及色泽，表现为 H_2O_2 浓度为 0 ~ 1 mmol/L 时，硬度、咀嚼性相对增大；H_2O_2 浓度为 0 ~ 5 mmol/L 时，黏性、a^*、b^* 值增加。而高度氧化（10 ~ 20 mmol/L）时则导致质构及色泽劣化，表现为硬度、咀嚼性、黏性、弹性、回复性、内聚性、a^*、b^* 的显著下降。

（3）H_2O_2 浓度的增加会促进猪背最长肌的脂质及蛋白质氧化，加剧肌原纤维蛋白的降解和不饱和脂肪酸氧化，影响肉的风味。表现为 POV、TBARS 值、羰基含量的增加，巯基含量的降低；典型挥发性化合物组成变化显著，二聚体、杂环类化合物及酸类物质增多。

（4）皮尔逊（Pearson）相关分析表明，在猪背最长肌氧化过程中脂肪和蛋白质的氧化有一定交互作用并影响其品质特征。

参　考　文　献

[1] 王兆明，贺稚非，李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. 食品科学，2018，39(11)：295－301.
WANG Zhaoming，HE Zhifei，LI Hongjun. A review of the effect of lipid and protein oxidation on meat quality and their interrelationship[J]. Food Science，2018，39(11)：295－301.（in Chinese）

[2] ZAKRYS P I，HOGAN S A，O'SULLIVAN M G，et al. Effects of oxygen concentration on the sensory evaluation and quality indicators of beef muscle packed under modified atmosphere[J]. Meat Science，2008，79(4)：648－655.

[3] 蒋祎人，李涛，刘友明，等. 丙二醛氧化修饰对白鲢肌原纤维蛋白结构性质的影响[J]. 食品科学，2020，41(6)：1－7.
JIANG Yiren，LI Tao，LIU Youming，et al. Effect of malondialdehyde-induced protein oxidation on structural properties of myofibrillar protein from silver carp（*Hypophthalmichthys molitrix*）[J]. Food Science，2020，41(6)：1－7.（in Chinese）

[4] 陈腊梅，唐善虎，李思宁，等. 丙二醛氧化对牦牛肉肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品科学，2023，44(8)：46－54.
CHEN Lamei，TANG Shanhu，LI Sining，et al. Effect of malondialdehyde oxidation on the structure and functional properties of myofibrillar protein in yak meat[J]. Food Science，2023，44(8)：46－54.（in Chinese）

[5] ESTÉVEZ M，VENTANAS S，HEINONEN M. Formation of Strecker aldehydes between protein carbonyls－α-Aminoadipic and γ-glutamic semialdehydes－and leucine and isoleucine[J]. Food Chemistry，2011，128(4)：1051－1057.

[6] 邓小蓉，雷用东，卢士玲，等. 蛋白质氧化对高白鲑肌浆蛋白理化特性的影响[J]. 食品科学，2019，40(18)：22－27.
DENG Xiaorong，LEI Yongdong，LU Shiling，et al. Effect of protein oxidation on biochemical properties of *Coregonus peled* sarcoplasmic proteins[J]. Food Science，2019，40(18)：22－27.（in Chinese）

[7] 曹云刚，马文慧，艾娜丝，等. 氧化强度对肌原纤维蛋白结构及凝胶性能的影响[J]. 食品科学，2019，40(20)：21－27.
CAO Yungang，MA Wenhui，AI Nasi，et al. Effects of different oxidation intensities on the structure and gel properties of myofibrillar protein[J]. Food Science，2019，40(20)：21－27.（in Chinese）

[8] 薛梅. 蛋白质氧化对牛肉成熟过程肌原纤维蛋白降解和食用品质的影响[D]. 南京：南京农业大学，2014.
XUE Mei. Influence of protein oxidation on myofibrillar proteins degradation and meat eating quality from bovine during postmortem ageing[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2014.（in Chinese）

[9] LIU Z，XIONG Y L，CHEN J. Protein oxidation enhances hydration but suppresses water-holding capacity in porcine longissimus muscle[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2010，58(19)：10697－10704.

[10] PARK D，XIONG Y L，ALDERTON A L，et al. Biochemical changes in myofibrillar protein iolates exposed to three oxidizing systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2006，54(12)：4445－4451.

[11] SHEN X，ZHAO C，GUO M. Effects of high intensity ultrasound on acid-induced gelation properties of whey protein gel[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2017，39：810－815.

[12] 李银. 蛋白氧化对肌肉保水性的影响机制研究[D]. 北京：中国农业科学院，2014.
LI Yin. Effect-mechanism of protein oxidation on water-holding capacity of muscle[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2014.（in Chinese）

[13] 王志永，王欣，夏义苗，等. 生鲜猪肉低场核磁检测参数优化[J]. 食品科学，2015，36(12)：177－184.
WANG Zhiyong，WANG Xin，XIA Yimiao，et al. Assessment of fresh pork quality by LF－NMR：parameter optimization[J]. Food Science，2015，36(12)：177－184.（in Chinese）

[14] ZHOU F, ZHAO M, SU G, et al. Gelation of salted myofibrillar protein under malondialdehyde-induced oxidative stress[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 153 – 162.
[15] CHEN L, ZHOU G H, ZHANG W G. Effects of high oxygen packaging on tenderness and water holding capacity of pork through protein oxidation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(11): 2287 – 2297.
[16] 袁静, 冯美琴, 孙健. 热加工方式对猪肉品质及氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 114 – 120.
YUAN Jing, FENG Meiqin, SUN Jian. Effects of thermal processing methods on the quality and oxidation characteristics of pork[J]. Food Science, 2023, 44(21): 114 – 120. (in Chinese)
[17] LI D Y, HUANG Y, WANG K X, et al. Microstructural characteristics of turbot (*Scophthalmus maximus*) muscle: effect of salting and processing[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1291 – 1302.
[18] 张浩, 易宇文, 朱开宪, 等. 基于 GC – IMS 结合化学计量法分析烧烤过程中温度对牦牛肉风味物质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 337 – 344.
ZHANG Hao, YI Yuwen, ZHU Kaixian, et al. Effect of temperature on flavor substances of yak meat during roasting as analyzed by chromatography – ion mobility spectrometry and chemometrics[J]. Food Science, 2023, 44(22): 337 – 344. (in Chinese)
[19] XIA M, CHEN Y, GUO J, et al. Effects of oxidative modification on textural properties and gel structure of pork myofibrillar proteins[J]. Food Research International, 2019, 121: 678 – 683.
[20] 王欣, 王志永, 陈利华, 等. 注水肉糜的低场核磁弛豫特性及判别分析[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 79 – 84.
[23] 李龙祥, 赵欣欣, 夏秀芳, 等. 食盐对调理重组牛肉制品品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 143 – 148.
LI Longxiang, ZHAO Xinxin, XIA Xiufang, et al. Effect of salt on quality and water distribution characteristics of ready-to-eat restructured beef products[J]. Food Science, 2017, 38(19): 143 – 148. (in Chinese)
[22] 朱文慧, 宦海珍, 李月, 等. 蛋白氧化对秘鲁鱿鱼肌肉品质及其结构的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 25 – 29,37.
[23] 李璇, 孙栋, 胡婷, 等. 高盐氧化体系对牦牛肉肌纤维蛋白的理化特性及结构的影响[J]. 食品科学,2024,45(15): 49 – 58.
LI Xuan, SUN Dong, HU Ting, et al. Effect of high salt oxidation system on physicochemical properties and structure of yak myofibrillar proteins[J]. Food Science, 2024,45(15):49 – 58. (in Chinese)
[24] 张丽, 余群力, 孙宝忠. 肌肉蛋白氧化对肉类品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(5): 268 – 276.
[25] 冯美琴, 刘雯燕, 孙健, 等. 不同 NaCl 浓度条件下亚麻籽胶对肌原纤维蛋白凝胶作用力及乳化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(22): 26 – 31.
FENG Meiqin, LIU Wenyan, SUN Jian, et al. Effect of flaxseed gum on the gelling forces and emulsifying properties of myofibrillar protein at different NaCl concentrations[J]. Food Science, 2018, 39(22): 26 – 31. (in Chinese)
[26] 张海萍, 余小月, 程梦颖, 等. 羟自由基氧化对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 9 – 16.
ZHANG Haiping, YU Xiaoyue, CHENG Mengying, et al. Effect of hydroxyl radical-induced oxidation on gel properties of silver carp myofibrillar protein[J]. Food Science, 2023, 44(6): 9 – 16. (in Chinese)
[27] 李学鹏, 刘慈坤, 周明言, 等. 羟自由基氧化对草鱼肌原纤维蛋白结构和凝胶性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 30 – 37.
LI Xuepeng, LIU Cikun, ZHOU Mingyan, et al. Effect of hydroxyl radical oxidation on structural and gel properties of myofibrillar protein from grass carp[J]. Food Science, 2017, 38(21): 30 – 37. (in Chinese)
[28] 顾如霞, 兰艳丽, 葛凤芹, 等. 猪肉肌原纤维蛋白氧化对亚硝化的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 116 – 124.
[29] 柯海瑞, 康怀彬, 蔡超奇. 脂肪氧化对肉品风味影响的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(6): 58 – 62,71.
KE Hairui, KANG Huaibin, CAI Chaoqi. Advances in research on the effects of fat oxidation on meat flavor[J]. Farm Products Processing, 2020(6): 58 – 62,71. (in Chinese)
[30] HU Y, ZHAO G, YIN F, et al. Effects of roasting temperature and time on aldehyde formation derived from lipid oxidation in scallop (*Patinopecten yessoensis*) and the deterrent effect by antioxidants of bamboo leaves[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130936.
[31] CAO Y, GU W, ZHANG J, et al. Effects of chitosan, aqueous extract of ginger, onion and garlic on quality and shelf life of stewed-pork during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 1655 – 1660.
[32] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 242 – 248.
ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu, ZHANG Zheqi, et al. Effect of reheating methods on volatile flavor constituents and lipid oxidation in cooked pig ear[J]. Food Science, 2018, 39(14): 242 – 248. (in Chinese)
[33] GAGAOUA M, COUVREUR S, LE BEC G, et al. Associations among protein biomarkers and pH and color traits in *Longissimus thoracis* and *Rectus abdominis* muscles in protected designation of origin maine-anjou cull cows[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(17): 3569 – 3580.

(下转第 473 页)

[27] 刘钇汛,刘志浩,高钦和,等. 基于周向应变分析的重载轮胎垂向力估计算法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(10): 1273 – 1281.
LIU Yixun, LIU Zhihao, GAO Qinhe, et al. Vertical force estimation of heavy-loaded radial tire based on circumferential strain analysis[J]. Journal of Shanghai Jaotong University, 2023, 57(10):1273 – 1281. (in Chinese)
[28] MITUSCH S K, FUNKE S W, KUCHTA M. Hybrid FEM – NN models: combining artificial neural networks with the finite element method[J]. Journal of Computational Physics, 2021, 446: 110651.
[29] DE MENDONKA W S, ZIMMERMANN G G, MORENO F G, et al. Validation of an electro-hydraulic press for dynamic measurement of elastic deformations in agricultural tires[J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 6: 100329.
[30] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Parameter sensitivity for tractor lateral stability against Phase I overturn on random road surfaces[J]. Biosystems engineering, 2016, 150: 10 – 23.
[31] DONG H, WANG Z, YANG C, et al. Liquid metal-based flexible sensing and wireless charging system for smart tire strain monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(2): 1304 – 1312.
[32] 常禧龙,梁琨,李文涛. 深度学习优化器进展综述[J]. 计算机工程与应用,2024,60(7):1 – 12.
CHANG Xilong, LIANG Kun, LI Wentao. Review of development of deep learning optimizer[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(7): 1 – 12. (in Chinese)
[33] KINGA D, ADAM J B. A method for stochastic optimization[C]// International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015.
[34] LOSHCHILOV I. Decoupled weight decay regularization[J]. arXiv Preprint, arXiv:1711.05101, 2017.

(上接第 462 页)

[34] HOPKINS D L, LAMB T A, KERR M J, et al. Examination of the effect of ageing and temperature at rigor on colour stability of lamb meat[J]. Meat Sci., 2013, 95(2): 311 – 316.
[35] 王琳琳, 陈炼红, 张岩. 不同部位牦牛肉宰后成熟过程中肉色稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 29 – 35.
WANG Linlin,CHEN Lianhong,ZHANG Yan. Study on the flesh color stability of different parts of yak meat during postmortem aging[J]. Food and Fermentation Industries,2022,48(20): 29 – 35. (in Chinese)
[36] HE X, LIU R, NIRASAWA S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245 – 250.
[37] DOMÍNGUEZ R, PATEIRO M, MUNEKATA P E S, et al. Protein oxidation in muscle foods: a comprehensive review[J]. Antioxidants, 2021, 11(1):60.
[38] OCAÑO-HIGUERA V M, MAEDA-MARTÍNEZ A N, MARQUEZ-RÍOS E, et al. Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods[J]. Food Chemistry, 2011, 125(1): 49 – 54.
[39] GE S, CHEN Y, DING S, et al. Changes in volatile flavor compounds of peppers during hot air drying process based on headspace – gas chromatography – ion mobility spectrometry (HS – GC – IMS)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(7): 3087 – 3098.
[40] FENG Y, CUI C, ZHAO H, et al. Effect of koji fermentation on generation of volatile compounds in soy sauce production[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(3): 609 – 619.
[41] MAHMOUD M A A, BUETTNER A. Characterisation of aroma-active and off-odour compounds in german rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Part Ⅱ: case of fish meat and skin from earthen-ponds farming[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 841 – 849.
[42] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 水浴复热时间对猪肉糜制品挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 186 – 191.
ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu, ZHANG Zheqi, et al. Effects of water-bath reheating time on volatile compounds in cooked minced pork[J]. Food Science, 2019, 40(2): 186 – 191. (in Chinese)
[43] 赵玉欣, 韩丽娟, 葛世鹏, 等. 基于 GC – IMS 分析不同提取方法对藏羊油脂挥发性风味的影响[J/OL]. 中国油脂, https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230517.