

超高压处理对牦牛肉贮藏性能的影响

陈腊梅, 唐善虎, 李思宁, 赵佳莹, 李巧艳

Effects of High-pressure Processing on the Storage Properties of Yak Meat

CHEN Lamei, TANG Shanhu, LI Sining, ZHAO Jiaying, and LI Qiaoyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022050020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AMPK活化调控的能量代谢对宰后牦牛肉肉色稳定性影响的研究

Effect of Energy Metabolism Regulated by AMPK Activation on Meat Color Stability of Postslaughter Yak Meat

食品工业科技. 2021, 42(22): 37-46 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020037>

水煮牛肉冷藏期间脂质和蛋白质氧化与质构特性变化

Changes of Lipid Oxidation, Protein Oxidation and Texture Properties in Braised Beef during Chilled Storage

食品工业科技. 2018, 39(17): 79-83,88 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.013>

添加含磷与非磷保水剂对牦牛肉肉糜蛋白质氧化的影响

Effects of phosphorus and phosphorus-free agent on protein oxidation of yak meat batters

食品工业科技. 2017(16): 234-238 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.16.044>

不同解冻方式对猪肝理化特性及氧化稳定性的影响

Effects of Different Thawing Methods on Physicochemical Properties and Oxidation Stability of Porcine Liver

食品工业科技. 2021, 42(14): 302-309 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110059>

微波加热处理对牦牛肉加热损失率、嫩度及微观结构的影响

Effect of microwave heating on heating loss rate, tenderness and microstructure of yak meat

食品工业科技. 2018, 39(11): 45-50 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.11.009>

羊肉冷藏期间蛋白与脂质氧化及风味变化分析

Analysis of Change of Protein and Lipid Oxidation and Flavor in Mutton during Refrigeration Storage

食品工业科技. 2021, 42(19): 36-42 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120233>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈腊梅, 唐善虎, 李思宁, 等. 超高压处理对牦牛肉贮藏性能的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 351–360. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050020

CHEN Lamei, TANG Shanhu, LI Sining, et al. Effects of High-pressure Processing on the Storage Properties of Yak Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 351–360. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050020

· 贮运保鲜 ·

超高压处理对牦牛肉贮藏性能的影响

陈腊梅, 唐善虎*, 李思宁, 赵佳莹, 李巧艳

(西南民族大学食品科学与技术学院, 四川成都 610041)

摘要: 牦牛肉分别经 200、400、600 MPa 超高压处理 480 s, 测定 4 °C 条件下贮藏 0、4、8、12、16 d 后感官、pH、微生物、色泽、蛋白质与脂质氧化情况, 以探讨超高压处理对牦牛肉贮藏期内品质的影响。结果表明: 超高压处理可以显著降低贮藏期内牦牛肉的菌落总数、总挥发性盐基氮含量 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) ($P<0.05$), 延长保质期, 且经贮藏 4~8 d 后能良好保持牦牛肉的感官品质。经超高压处理后牦牛肉 L^* 值、 b^* 值显著增大 ($P<0.05$), a^* 值在 400 MPa 时显著增大 ($P<0.05$) 并在贮藏期内维持在最高水平, 且 400 MPa 组各类肌红蛋白 (Myoglobin, Mb) 含量也表现出良好的肉色稳定性, 但 a^* 值在其他压力处理后显著减小 ($P<0.05$)。但经超高压处理后牦牛肉肌原纤维蛋白 (Myofibrillar Protein, MP) 羰基含量与表面疏水性增高、巯基含量降低, TBARS 值升高。Pearson 相关性分析结果也表示超高压处理后牦牛肉品质的变化与压力、蛋白质氧化、脂质氧化和微生物相关 ($P<0.05$)。综上, 超高压处理虽加速了蛋白质和脂质氧化, 而合理利用适当的压力有利于维持牦牛肉的肉色稳定性和感官品质, 提高牦牛肉的贮藏特性, 这对超高压处理牦牛肉的生产应用提供参考。

关键词: 超高压处理 (HHP), 肉色, 蛋白质氧化, 脂质氧化, 牦牛肉

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)06-0351-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050020



本文网刊:

Effects of High-pressure Processing on the Storage Properties of Yak Meat

CHEN Lamei, TANG Shanhu*, LI Sining, ZHAO Jiaying, LI Qiaoyan

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

Abstract: To investigate the effect of high-pressure processing (HPP) on the quality of yak meat, yak meat was processed under pressure at 200, 400, and 600 MPa for 480 seconds, respectively, and the sensory, pH, microorganism, color, protein, and lipid oxidation of yak meat stored at 4 °C for 0, 4, 8, 12, and 16 days was determined. The results showed that HPP significantly lowered the total number of colonies and total volatile basic nitrogen (TVB-N) during storage ($P<0.05$), and extended the shelf life of yak meat. Yak meat was well preserved for 4~8 days from sensory perception. The L^* and b^* values of yak meat with HPP increased significantly ($P<0.05$). The a^* value increased significantly at 400 MPa ($P<0.05$) and remained at the highest level throughout storage, and the contents of various myoglobin (Mb) in the 400 MPa group also demonstrated excellent meat color stability. Whereas the a^* values decreased significantly under other pressure conditions ($P<0.05$). The carbonyl content and surface hydrophobicity of yak meat myofibrillar protein (MP) were increased, while sulfhydryl content were decreased, and TBARS of yak meat were elevated. According to Pearson correlation analysis, pressure, protein oxidation, lipid oxidation, and microbes were all associated with changes in yak meat quality under HPP ($P<0.05$). In conclusion, although HPP accelerated the oxidation of protein and lipids, the use of appropriate pressure was conducive to maintaining the meat color stability and sensory quality of yak meat, providing a reference for the application of yak meat with HPP.

Key words: high pressure processing (HPP); meat color; protein oxidation; lipid oxidation; yak meat

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 西南民族大学研究生创新项目 (CX2021SZ73)。

作者简介: 陈腊梅 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与安全, E-mail: 2386641876@qq.com。

* 通信作者: 唐善虎 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 动物性食品加工与安全, E-mail: stang01@126.com。

牦牛肉具有高蛋白、低脂肪、肉色好和风味独特等特点^[1],但是,牦牛肉在屠宰、加工、运输等环节仍存在肉色与质地劣变、异味产生等诸多问题。目前,各类加工与贮藏方法被用来改善牦牛肉品质和提高经济价值。其中,超高压技术是一项新兴的非热加工技术,广泛用于食品加工与保鲜等领域^[2]。据报道,100~1000 MPa 压力处理可达到不同程度的灭菌效果,能有效提高肉制品的品质、保留营养成分并延长保质期^[3]。此外,超高压处理还能有效改善蛋白质的功能特性^[4-5]。但是,过高压处理下肉制品会产生结构改变、氧化变质等不利影响^[6],使超高压技术在肉制品方面的应用受到限制。例如,当压力超过300 MPa 时,肉色会出现“增白效应”^[7],压力超过400 MPa 时,肉色呈灰棕色^[8]。有研究表明,约在200 MPa 时肌动球蛋白变性,400 MPa 时 Mb 变性^[9],高于400 MPa 时氧合肌红蛋白(Oxymyoglobin, Omb)氧化,高铁肌红蛋白(Methemoglobin, MMb)比例急剧上升^[8]。同时,当压力大于300 MPa 时,虽然有效抑制了微生物的繁殖,但是显著促进了脂质氧化^[3,10-11],蛋白结构也发生不可逆的变化,使蛋白氧化产物增加^[12]。Guyon 等^[12]认为高压可以诱导脂质和蛋白质等成分的修饰,并通过促进自由基的形成来加速氧化,导致品质变化和营养损失。

目前,关于猪肉^[13]、牛肉^[12]、鸡肉^[14]等经超高压处理后贮藏过程中品质变化的研究有较多报道,但是,尚未见有关牦牛肉经超高压处理后贮藏过程中的品质、理化特性以及微生物变化的研究。由于肉制品的体系复杂,不同品种的肉制品体系呈现出的变化不同,而目前品质变化的相关机制仍不明确。因此,本研究以不同压力处理牦牛肉,通过测定贮藏过程中牦牛肉的理化特性、蛋白和脂质氧化以及微生物的变化,探讨牦牛肉经超高压处理后贮藏0、4、8、12、16 d 的理化品质变化规律,为超高压在牦牛肉保鲜以及牦牛肉制品中的应用提供参考价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牦牛肉 购于四川省阿坝州红原县永源肉业,牦牛在红原县集中屠宰,取背长肌,经冷却排酸处理后,-4 ℃ 运回实验室储藏于4 ℃ 的环境中;Na₂HPO₄·12H₂O、NaH₂PO₄·2H₂O、MgCl₂、EGTA、2,4-二硝基苯肼(DNPH)、氯仿、溴酚蓝、三氯乙酸、硼酸分析纯,成都科隆化学品有限公司;盐酸胍、SDS、尿素分析纯,德国 BioFroxx 公司;2-硫代巴比妥酸(TBA)、5,5-二巯基-2,2-二硝基苯甲酸(DTNB)分析纯,上海源叶生物有限公司;平板计数琼脂 杭州微生物试剂有限公司;尼龙真空袋(12×22 cm)、立式铝箔袋(35×50 cm) 成都鹏世达公司。

HPP 3-5L 超高压灭菌设备 包头科发高压科技有限责任公司;TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;CR-700d/600d 色差仪 日本

Konica Minolta 公司;Centrifuge 5804R 高速冷冻离心机 德国 Eppendorf 公司;T-25 高速匀浆机 德国 IKA 公司;UV1810S 紫外分光光度计、PHS-3C 酸度计 上海佑科仪器仪表有限公司;DHP-9052 电热恒温培养箱 上海齐欣科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理 参考 Wang 等^[11]的方法并略作修改,对牦牛肉进行超高压处理。取牦牛肉背肌去脂肪、筋膜,分割成2.5×2.5×3.0 cm 左右大小的肉块,采用尼龙真空袋真空包装,每袋50 g,测定时每组取3袋样品进行平行测定。对照组不进行处理,处理组样品置于超高压设备中,压力分别设定为200、400、600 MPa,常温下保压480 s,传压介质为水(温度保持在20±1 ℃)。处理完后用吸水纸吸干包装表面水分,置于立式铝箔袋中避光贮存于4 ℃ 冰箱中,分别测定0、4、8、12、16 d 的肉品品质。

1.2.2 感官评价 感官评分标准参考李文东等^[15]的方法并略作修改。感官评分小组由10名食品专业的研究生组成,每次评定前经过培训,熟悉评价内容和打分标准(见表1);评价时感官人员单独进行,相互不接触交流。

表1 感官评分标准
Table 1 Sensory scoring criteria

项目	评分标准	评分
色泽(10)	肉色深红且均匀,有光泽	9~10
	肉色鲜红且均匀,有光泽	6~8
	肉色红色较浅或为呈浅褐色,光泽较暗	3~5
	肉色灰白或深褐色,无光泽	1~2
组织状态(10)	肌肉纹理清晰,外表微干或略微湿润,不黏手	9~10
	肌肉纹理清晰,外表稍有出水现象,不黏手	6~8
	肌肉纹理较为不清晰,外表明显出水,黏手	3~5
	肌肉纹理模糊不可辨,外表出水多,黏手严重	0~2
弹性(10)	弹性好,指压后凹陷立即恢复	9~10
	弹性较好,指压后凹陷短时间内恢复	6~8
	弹性一般,指压后凹陷基本不能恢复	3~5
	无弹性,指压后凹陷明显	0~2
气味(10)	具有新鲜牦牛肉独特气味,无异臭、味	9~10
	具有牦牛肉正常气味,无异味	6~8
	牦牛肉气味较淡,略微异臭、味	3~5
	异臭、味明显	0~2
总体可接受度(10)	可接受性高	9~10
	可接受性较好	6~8
	接受性一般	3~5
	不能接受	0~2

1.2.3 pH 的测定 参考 Huang 等^[16]的方法略作修改,取3 g 样品加入30 mL 去离子水(pH7.0)中,10000 r/min 均质30 s 后测定,每个样品3次重复测定。

1.2.4 TVB-N 含量的测定 参考李锦锦等^[17]的方法,准确称取5 g 肉样与22.5 mL 2.2% 三氯乙酸匀浆(12000 r/min, 60 s)后离心(4 ℃, 8000×g, 10 min),取上清液5 mL 置于扩散皿外室中,3 mL 硼酸吸收

液于扩散皿内室中,用带缺口毛玻璃将扩散皿密封,于外室中再加入 5 mL 碳酸钾溶液(10 g/L),密封,37 °C 孵育 2 h。使用 0.01 mol/L 盐酸滴定内室中的硼酸液体,直到其恢复至原始颜色。通过消耗的盐酸量计算样品中 TVB-N 含量(mg/100 g)。

1.2.5 菌落总数的测定 参考 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》。

1.2.6 色差的测定 参考 Tomasevic 等^[18]的方法并稍作修改。色差仪采用 D65 光源,8 mm 孔径,近似角度 10°,经零校正、白板校正后使用。样品去除包装,无隙置于白色载物板上,随机选取 6 个测定位置进行测定,记录样品的 L^* , a^* , b^* 值。

1.2.7 Mb 含量及状态的测定 参考 Krzywicki^[19]的方法并稍作修改,取 10 g 肉样,加入 5 倍体积(v/w)的 0.04 mol/L 的磷酸钠缓冲液(pH6.8),室温下 10800 r/min 匀浆 10 s,冰浴 1 h 后离心(4 °C, 1000×g, 30 min),过滤上清液,在 525、545、565、572 nm 处测定吸光度。

$$\text{DMb}(\%) = (0.369R_1 + 1.140R_2 - 0.941R_3 + 0.015) \times 100$$

$$\text{OMb}(\%) = (0.882R_1 - 1.267R_2 + 0.809R_3 - 0.361) \times 100$$

$$\text{MMb}(\%) = (-2.514R_1 + 0.777R_2 + 0.800R_3 + 1.098) \times 100$$

式中,DMb、OMb、MMb 分别表示脱氧肌红蛋白含量、氧合肌红蛋白含量、高铁肌红蛋白含量, R_1 、 R_2 和 R_3 分别代表吸光度比值: A_{572}/A_{525} ; A_{565}/A_{525} ; A_{545}/A_{525} 。

1.2.8 肌原纤维蛋白(Myofibrillar Protein, MP)的提取 参考 Wang 等^[20]方法,将 4 倍体积(v/w)的 10 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(含 0.1 mol/L NaCl、2 mmol/L MgCl_2 、1 mmol/L EGTA, pH7.0)添加到 10 g 肉中,冰浴条件下 10000 r/min 匀浆 1 min,离心(4 °C, 2000×g, 15 min),弃去上清液,重复该过程两次。在与上述相同条件下用 4 倍体积(v/w)的 0.1 mol/L NaCl 洗涤沉淀并离心 2 次,第三次均质液通过 4 层纱布过滤去除结缔组织,滤液用 0.1 mol/L HCl 调 pH 至 6.0,离心后弃上清液,所得沉淀即为 MP。双缩脲法测定蛋白浓度,MP 保存在 4 °C 冰箱内的密闭瓶中,18 h 内使用。

1.2.9 MP 羰基含量的测定 参考王琳琳等^[21]的方法。取 0.5 mL 蛋白溶液(5 mg/mL)中加入 0.5 mL 含 0.02 mol/L DNPH 的 2 mol/L HCl 溶液,空白组加入 0.5 mL 2 mol/L HCl 溶液,混匀后在 25 °C 下反应 40 min。此后,加入 2.0 mL 20% 三氯乙酸并离心(4 °C, 10000 r/min, 5 min),除去上清液,沉淀用 1.0 mL 乙醇-乙酸乙酯溶液(V:V, 1:1)洗涤 3 次。加入 3.0 mL 6.0 mol/L 盐酸胍溶液,在 37 °C 条件下水浴保温 30 min 溶解沉淀,以空白组为对照。在 370 nm 波长处测定吸光度,以摩尔吸光系数 22000 mol/(L·cm)计算总羰基含量(nmol/mg)。

1.2.10 MP 巯基含量的测定 参考王琳琳等^[21]的方法,取 0.5 mL 蛋白溶液(2 mg/mL)依次加入 2 mL 尿素-SDS 溶液(含 8.0 mol/L 尿素,30 g/L SDS,0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液, pH8.0)和 0.5 mL 10 mmol/L DTNB 溶液(溶解于 0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液, pH 8.0),空白组不含 DTNB,室温下反应 15 min 后,412 nm 处测定吸光度,以摩尔吸光系数 11400 mol/(L·cm)计算巯基含量(nmol/mg)。

1.2.11 MP 表面疏水性的测定 参考王琳琳等^[21]的方法,向 1.0 mL 蛋白溶液(5.0 mg/mL)中加入 200 μL 1.0 mg/mL 溴酚蓝溶液,混匀离心(6000 r/min, 15 min),取上清液进行 10 倍稀释,以无蛋白的磷酸盐溶液为空白对照,在 595 nm 波长处测定吸光度,以溴酚蓝结合量来表示表面疏水性指数(μg)。

1.2.12 硫代巴比酸值(TBARS)的测定 参考 Huang 等^[16]的方法,取 0.3 g 肉样,加入 3 mL 1% TBA 溶液和 17 mL TCA-HCl 溶液均质,90 °C 水浴 40 min,冷却后加入 5 mL 氯仿,离心(4 °C, 3000 r/min, 5 min),取上清液在 532 nm 下测定吸光值,结果表示为每千克肉样中丙二醛(MDA)的毫克数。摩尔消光系数为 152000 mol/(L·cm)。

1.3 数据处理

所有指标重复测定 3 次,结果以平均值±标准差表示;原始数据统计采用 Excel 2019,采用 SPSS 24.0 进行平均值、标准差、ANOVA 方差分析;处理组平均数之间采用 Duncan 多重比较进行显著性分析,显著水平为 $P < 0.05$;采用 Pearson 相关性分析对指标相关性分析;所有图由 Origin 2019b 绘制。

2 结果与分析

2.1 超高压处理对牦牛肉感官品质的影响

感官评价是最简便直接的评价肉制品的方法。由图 1 可知,经超高压处理的牦牛肉,在不同贮藏时间感官品质有所变化。经超高压处理后牦牛肉的感官评分随着压力增大而减小;色泽随着压力增大由深红变为粉红(200~400 MPa),当压力较高时(600 MPa),牦牛肉色泽变为棕褐色,与前人的研究结果吻合^[7-8]。400 MPa 组牦牛肉在贮藏 8 d 后感官品质相较其他组更佳,这说明适当的加压处理能改善肉品质,但具体原因需要进一步确定。与对照组相比,当压力为 200 和 400 MPa 时,牦牛肉虽保留了良好的色泽和组织状态,但 12 d 后微生物的过度生长,脂质过氧化分解并产生异常气味^[22]降低了可接受度。当压力为 600 MPa 时,牦牛肉在第 0 d 时就出现明显劣变,如组织结构松散,这可能是高压使蛋白碎片化导致^[23]。

2.2 超高压处理对牦牛肉 pH 的影响

pH 是影响色泽、持水力、嫩度和微生物生长等的主要因素^[24]。由图 2 可知,与对照组相比,随着压力的增大,牦牛肉 pH 显著上升($P < 0.05$)。这是由于超高压处理使蛋白结构发生变化,酸性基团被包埋,

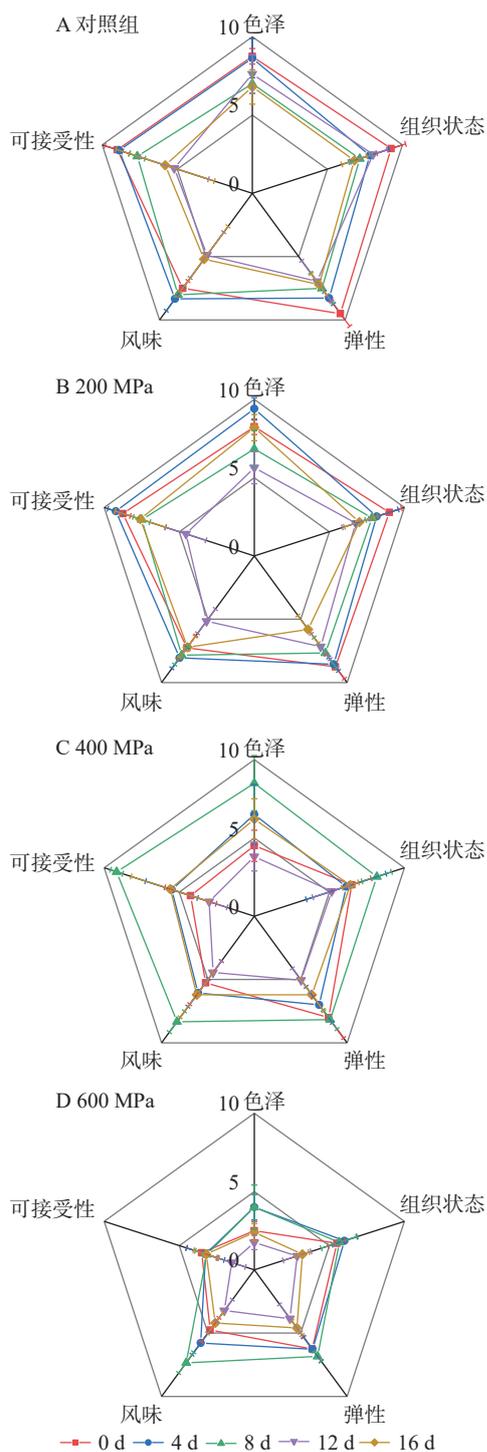


图1 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉感官品质的影响

Fig.1 Effects of HHP on the sensory quality of yak meat during storage

同时自由氨基酸进入细胞使含氮物质增加,氨基酸在压力作用下电解,导致 pH 升高^[25]。

在贮藏前期,对照组和 200 MPa 组牦牛肉的 pH 略有下降,这可能是排酸不彻底,乳酸积累所致。随着贮藏时间的延长,对照组和 200 MPa 组 pH 显著增大($P<0.05$)。这是因为微生物在肉表面积聚、活动加快,产生氨、胺等碱性物质,同时在酶的作用下蛋白质分解,pH 升高^[24]。400 MPa 组与 600 MPa 组牦牛肉的 pH 随时间增加先上升后下降。贮藏前

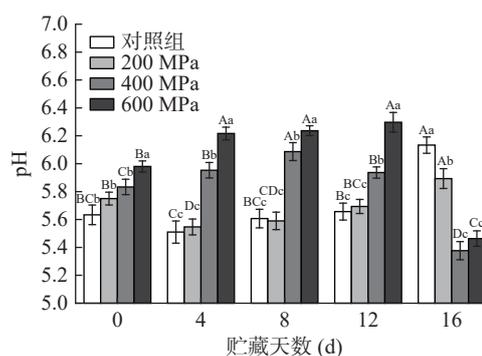


图2 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉 pH 的影响

Fig.2 Effects of HHP on pH of yak meat during storage

注:大写字母不同表示相同处理组、不同贮藏时间表示差异显著($P<0.05$),小写字母不同表示相同贮藏时间、不同处理组之间差异显著($P<0.05$);图3~图7同。

期 pH 上升可能是由于蛋白质变性脂质氧化加剧^[26],而 16 d 时 400 MPa 组和 600 MPa 组的 pH 剧烈下降可能是由于细菌在受到损伤后逐渐恢复活性,生长繁殖分泌了有机酸、酮等腐败物质^[27-28]。

2.3 超高压处理对牦牛肉新鲜度的影响

TVB-N 和菌落总数常用于评判肉制品新鲜程度^[29]。由图 3A 和图 3B 可知,超高压处理降低了牦牛肉的 TVB-N 含量和菌落总数,与 Chen 等^[30]和 Sola-doye 等^[31]的描述相吻合。随着贮藏时间的延长,牦牛肉的菌落总数和 TVB-N 含量均显著增大($P<0.05$)。这是由于微生物生长导致蛋白降解产生胺类物质,菌落总数增加,TVB-N 含量升高^[29]。贮藏 16 d 时,对照组 TVB-N 含量达 15.68 mg/100 g,超过 15.0 mg/100 g,

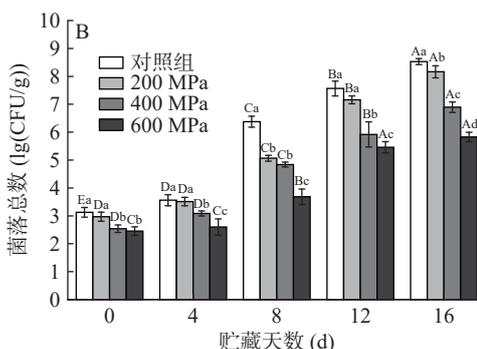
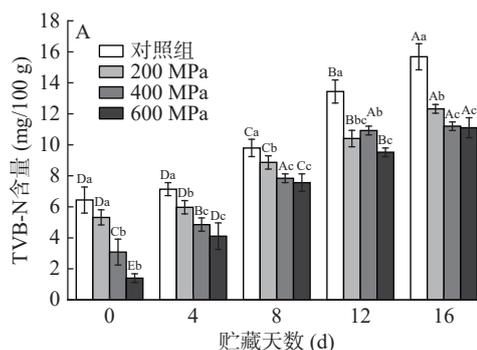


图3 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉新鲜度的影响

Fig.3 Effects of HHP on freshness of yak meat during storage

注:A. TVB-N 含量;B.菌落总数。

而各处理组牦牛肉 TVB-N 含量均低于 15 mg/100 g。同时, 对照组和 200 MPa 组 12 d 时菌落总数远高于 6 lg(CFU/g), 分别达 7.57、7.16 lg(CFU/g), 而 400 MPa 组 12 d 时菌落总数达 5.92 lg(CFU/g), 600 MPa 组 16 d 时菌落总数达 5.83 lg(CFU/g), 说明较高压力下杀菌效果更佳。综上, 超高压处理能有效提高牦牛肉新鲜度、延长其保质期。

2.4 超高压处理对牦牛肉色泽的影响

色泽直接影响了消费者的购买意愿。由图 4 可知, 随着压力增大, 牦牛肉 L^* 、 b^* 值增大, 当压力过高 (600 MPa) 时, a^* 值减小; 贮藏过程中各组 L^* 、 b^* 值变化逐渐趋于稳定, a^* 值逐渐减小。0 d 时, 较高压力下 (400 MPa 和 600 MPa), 牦牛肉 L^* 、 b^* 值显著增大 ($P < 0.05$), 并在整个贮藏期内都维持在较高的水平 (见图 4A、图 4C), 这与 Bak 等^[32] 的研究结果相似。这可能是超高压处理使纤维结构疏松和表面性质变化, 导致肉表面光学反射率改变^[7]。贮藏 0 d 时, 随着压力升高, 牦牛肉 a^* 值升高后显著降低 ($P < 0.05$) (见图 4B)。该结果与 Kruk 等^[33] 的报道相似。这或许与 MMb 含量变化有关, 中等压力 (200~400 MPa) 下减少 MMb 的酶系统可能被激活, 而较高压力 (600 MPa) 下酶系统和 MMb 的形成受到干扰^[34]。贮藏 8 d 时, 200 MPa 组牦牛肉 a^* 值显著下降 ($P < 0.05$)。研究表明 MMb 的积累是 a^* 值下降的主要原因^[35]; 同时脂质氧化与肌红蛋白氧化之间相互促进, 使肉表面 a^* 值降低、色泽褐变^[36]。

2.5 超高压处理对牦牛肉 Mb 氧化的影响

色泽的变化与肌肉中水分的状态、Mb 的氧化状态等有关, 压力对 Mb 影响显著^[7]。由图 5 可知, 与对照组相比, 处理组 DMb 含量减少, OMb、MMb 含

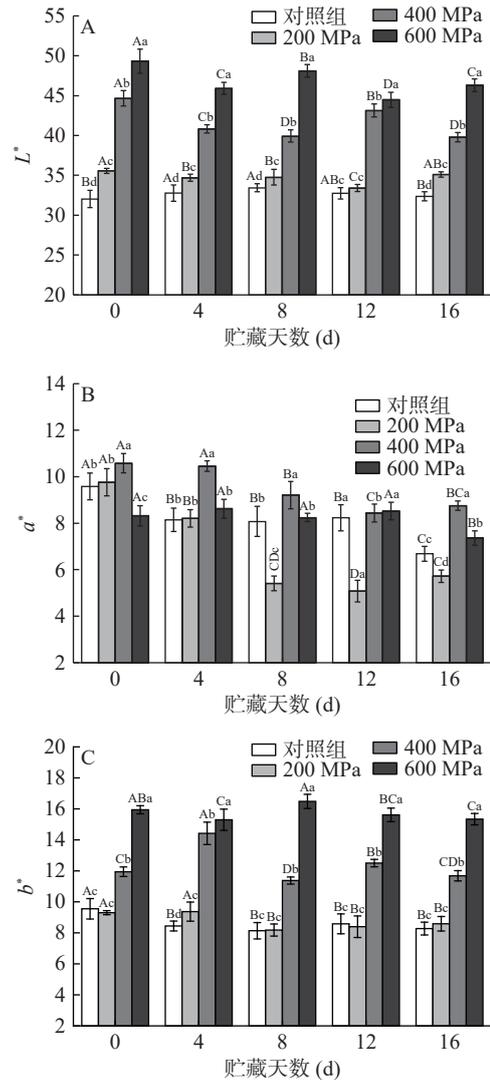


图 4 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉色泽的影响
Fig.4 Effects of HHP on the color of yak meat during storage
注: A. 亮度值 L^* ; B. 红度值 a^* ; C. 黄度值 b^* 。

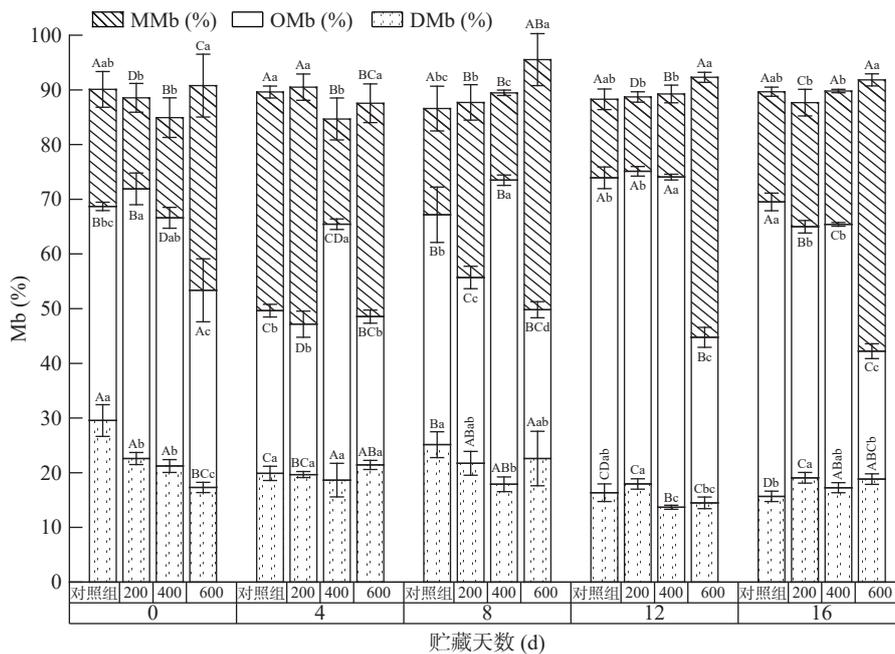


图 5 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉 Mb 氧化状态的影响
Fig.5 Effects of HHP on the Mb oxidation state of yak meat during storage

量增多,说明超高压促进 Mb 氧化。贮藏过程对照组 DMb 含量减少、OMb 含量先减少后增多、MMb 含量增多后减少。200 MPa 组和对照组的变化趋势相似,贮藏 4 d 时 MMb 含量明显增多,而后显著降低($P<0.05$)。这或许是因为:线粒体耗氧及真空条件形成了厌氧环境,同时线粒体与 OMb 的相互作用使氧气转移,促进了 DMb 的形成、MMb 的减少^[37]; MMb 可能进一步氧化形成铁酰肌红蛋白而质子化,与蛋白质形成血红素-蛋白交联物质^[35]。经超高压处理后,400 MPa 组 OMb 含量增多,600 MPa 组 MMb 含量增多,且两者在贮藏期内均维持在较高水平。这可能与还原酶系统的激活和破坏、蛋白与脂质氧化对 Mb 的氧化诱导、蛋白变性等因素有关^[7]。综上,超高压显著促进了 Mb 的氧化,400 MPa 组肉色稳定性良好。

2.6 超高压处理对牦牛肉 MP 氧化的影响

2.6.1 羰基含量变化

羰基是评估蛋白氧化的相关标志物,蛋白氧化程度越高,羰基含量越高^[38]。由图 6A 可知,0 d 时,与对照组相比,处理组羰基含量显著增多($P<0.05$),即超高压处理促进了蛋白质氧化。在处理组内,羰基含量随着压力升高而降低($P<0.05$),可能是更高的压力使蛋白系统缩至更小的摩尔体积,形成较大的不溶性蛋白聚集体,影响了蛋白结构^[7]。贮藏 4 d 时各组羰基含量相比 0 d 时显著增加($P<0.05$),可能与 Mb 和脂质的氧化诱导有关^[7,37,39]。对照组羰基含量增量比处理组小,可能是由于抗氧化蛋白的存在^[40];处理组羰基含量增量随着压力增大而减小,可能与蛋白结构的变性程度有关^[7]。8~12 d 内各组羰基含量随时间延长而下降,可能原因有:贮藏过程中蛋白质被降解^[41];或蛋白羰基进一步氧化,形成 Strecker 醛等^[39]。在贮藏 16 d 时,各组羰基含量显著增大($P<0.05$),可能是随时间延长蛋白羰基化严重导致羰基含量再次增加。整个贮藏期内羰基含量的变化与 Zhang 等^[42] 辐照处理新鲜猪肉时的结果相似,说明超高压处理对羰基化合物的形成与降解影响显著。

2.6.2 总巯基含量变化

在 MP 表面及内部含有大量巯基,容易氧化形成二硫键,使巯基含量下降,因此巯基含量的变化也反映了蛋白氧化情况^[39]。由图 6B 可知,相比对照组,处理组总巯基含量减少,即超高压促进了蛋白氧化。0 d 时,200 MPa 压力下活性巯基被加速氧化使总巯基含量显著减少($P<0.05$);400 MPa 组总巯基含量与对照组无显著差异($P>0.05$),而 600 MPa 组总巯基含量显著减少($P<0.05$),可能是蛋白内部的巯基在适当压力下暴露,而过高压力下巯基基团在蛋白重折叠过程中被包裹^[43]。Nicolas 等^[44] 也报道了约 400 MPa 的压力下兔的 MP 活性巯基含量有所增加。随着贮藏时间的延长,总巯基含量显著减少($P<0.05$),这可能是由于蛋白质氧化使结构展开,巯基基团暴露被氧化^[45]。

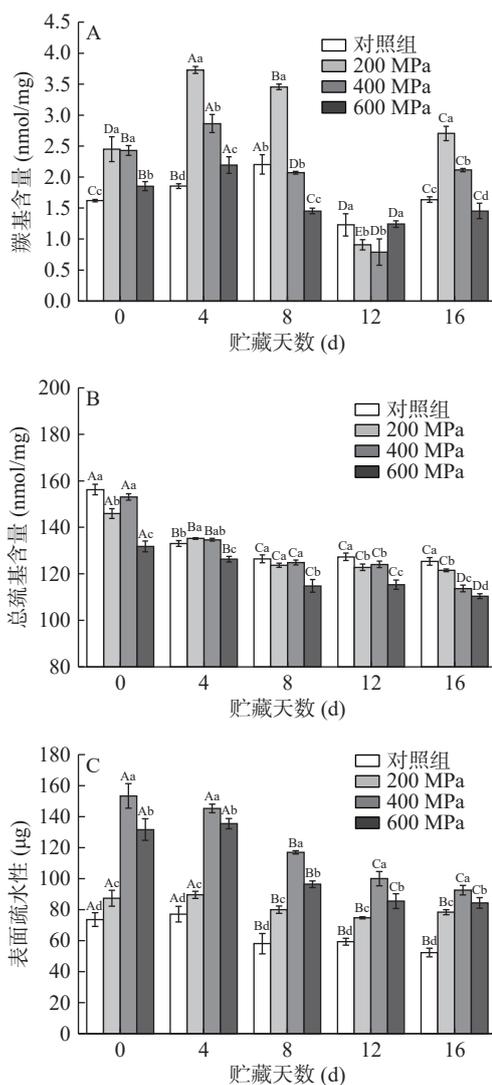


图 6 超高压处理对贮藏过程中牦牛肉蛋白氧化的影响

Fig.6 Effects of HHP on protein oxidation of yak meat during storage

注: A. 羰基含量; B. 总巯基含量; C. 表面疏水性。

2.6.3 表面疏水性变化

表面疏水性的变化反映了蛋白质三级结构的变化^[46]。由图 6C 可知,相比对照组,处理组表面疏水性升高,可能是由于超高压处理使非极性氨基酸暴露^[45]。在处理组内,随着压力的升高,表面疏水性升高后降低。研究表明,当压力超过 400 MPa 时,表面疏水性开始下降^[46]。200~400 MPa 内,表面疏水性随着压力升高而升高,与 Zhang 等^[4] 的结果吻合。600 MPa 组表面疏水性显著降低($P<0.05$)。这可能是高压力下疏水区域的暴露促进了疏水相互作用,使未折叠的蛋白重新结合或聚集^[47]。贮藏过程中,表面疏水性显著下降($P<0.05$),可能是蛋白结构过度变性所致^[45]。

2.6.4 超高压处理对牦牛肉 MP 氧化的影响

MP 是肌肉蛋白中的主要成分,多项研究表明当压力超过一定阈值后,MP 的物理化学特性会受到影响^[46,48]。由 2.6.1~2.6.3 结果可知,当压力 ≥ 400 MPa 时,超高压会显著促进牦牛肉 MP 的氧化,主要表现为羰基含量的增多、巯基含量的减少与表面疏水性的升高。

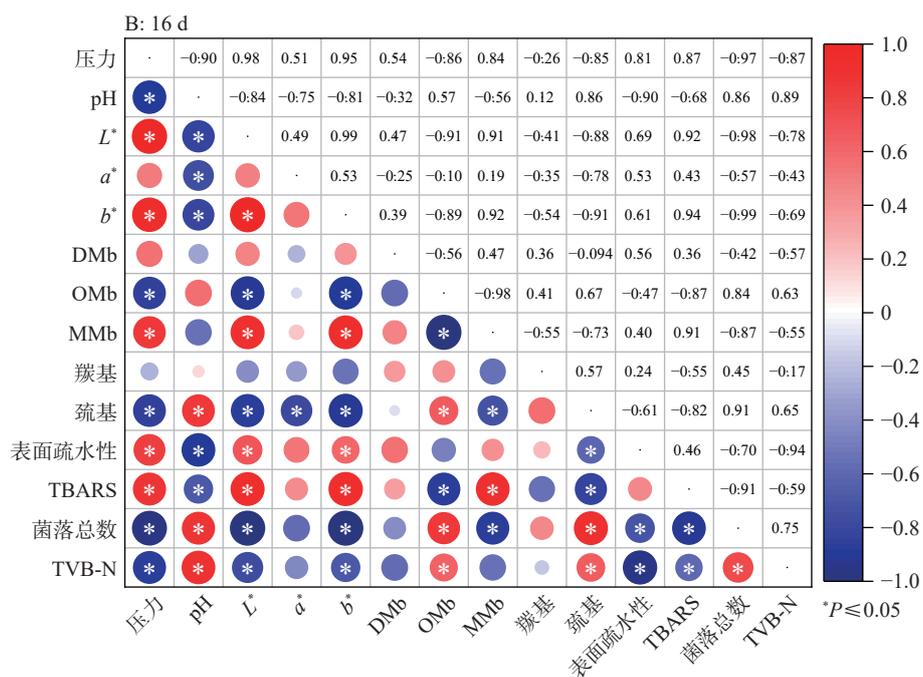


图8 各指标间 Pearson 相关性分析

Fig.8 Pearson correlation analysis among indicators

注: A.0 d 时各指标间相关性; B. 16 d 时各指标间相关性。

的增大。其中,适当的氧化有利于牦牛肉的品质,牦牛肉贮藏 4~8 d 后超高压处理组保持更好的品质,且 400 MPa 下牦牛肉的肉色稳定性更佳。Pearson 相关性结果表明经超高压处理后牦牛肉品质变化与压力显著相关,且色泽的变化与蛋白氧化、脂质氧化、微生物之间存在关联。

由于高寒低氧的生存环境,牦牛肉肌红蛋白含量高、肉色好。研究表明肉及肉制品色泽与压力、蛋白质和脂质氧化有关,关于微生物的作用却少有提及。因此,关于超高压处理后牦牛肉中在贮藏过程中的肌红蛋白自氧化、蛋白质氧化、脂质氧化、微生物与肉色的关系需要深入研究,以期为牦牛肉的保鲜与加工提供可靠参考意见。

参考文献

[1] TIAN J, HAN L, YU L, et al. Changes in tenderness and cathepsins activity during post mortem ageing of yak meat[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2013, 93(3): 321-328.

[2] de OLIVEIRA F A, NETO O C, SANTOS L M R D, et al. Effect of high pressure on fish meat quality – A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66: 1-19.

[3] GARCÍA-PARRA J, RAMÍREZ R. New preservations technologies: Hydrostatic high pressure processing and high pressure thermal processing: Encyclopedia of food security and sustainability [M]. Oxford: Elsevier, 2019: 473-480.

[4] ZHANG Z, YANG Y, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 678-686.

[5] ROOBAB U, KHAN A W, LORENZO J M, et al. A systematic review of clean-label alternatives to synthetic additives in raw and processed meat with a special emphasis on high-pressure processing

(2018~2021) [J]. *Food Research International*, 2021, 150(Part A): 110792.

[6] 刘泽超, 罗欣, 张一敏, 等. 宰后成熟对生鲜肉品质影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 202-212. [LIU Z C, LUO X, ZHANG Y M, et al. Progress in research on the effect of post-mortem aging on the quality of fresh meat[J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 202-212.]

[7] BAK K H, BOLUMAR T, KARLSSON A H, et al. Effect of high pressure treatment on the color of fresh and processed meats: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(2): 228-252.

[8] 马汉军, 周光宏, 徐幸莲, 等. 高压处理对牛肉肌红蛋白及颜色变化的影响[J]. *食品科学*, 2004(12): 36-39. [MA H J, ZHOU G H, XUE X L, et al. Effects of high pressure treatment on myoglobin changes and color changes in minced beef[J]. *Food Science*, 2004(12): 36-39.]

[9] MA H J, LEDWARD D A. High pressure processing of fresh meat — Is it worth it?[J]. *Meat Science*, 2013, 95(4): 897-903.

[10] GUYON C, MEYNIER A, de LAMBALLERIE M. Protein and lipid oxidation in meat: A review with emphasis on high-pressure treatments[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 50: 131-143.

[11] WANG Q, ZHAO X, REN Y, et al. Effects of high pressure treatment and temperature on lipid oxidation and fatty acid composition of yak (*Poephagus grunniens*) body fat[J]. *Meat Science*, 2013, 94(4): 489-494.

[12] GUYON C, le VESSEL V, MEYNIER A, et al. Modifications of protein-related compounds of beef minced meat treated by high pressure[J]. *Meat Science*, 2018, 142: 32-37.

[13] 郝娜. 超高压和 L-抗坏血酸互作调控冷却肉色泽的分子机制与应用研究 [M]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [GAO N. Study

- on the molecular mechanism and application of the interaction between ultra-high pressure and L-ascorbic acid in regulating the color of chilled meat[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.]
- [14] MARIANA C, PAOLA F P, DIEGO F, et al. Effect of high hydrostatic pressure on *Salmonella* spp inactivation and meat-quality of frozen chicken breast[J]. *LWT*, 2020, 118(C): 108873.
- [15] 李文东, 韩玲, 余群力, 等. 冷却方式对牦牛肉贮藏过程中品质变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(20): 199–207. [LI W D, HAN L, YU Q L, et al. Effect of chilling methods on the quality of yak meat during storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(20): 199–207.]
- [16] HUANG Q, DONG K, WANG Q, et al. Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131103.
- [17] 李锦锦, 莫然, 李琼帅, 等. 超声波解冻功率对猪肝品质及脂质氧化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 113–119, 127. [LI J J, MO R, LI Q S, et al. Effects of ultrasonic thawing power on quality and lipid oxidation properties of porcine liver[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(8): 113–119, 127.]
- [18] TOMASEVIC I, DJEKIC I, FONT I F M, et al. Recent advances in meat color research[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 41: 81–87.
- [19] KRZYWICKI K. The determination of hem pigments in meat[J]. *Meat Science*, 1982, 7(1): 29–36.
- [20] WANG H H, SONG Y Y, LIU Z Q, et al. Effects of iron-catalyzed and metmyoglobin oxidizing systems on biochemical properties of yak muscle myofibrillar protein[J]. *Meat Science*, 2020: 166.
- [21] 王琳琳, 陈炼红, 李璐倩, 等. 解冻方式对牦牛肉蛋白氧化、功能特性及新鲜度的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 342–349. [WANG L L, CHEN L H, LI L Q, et al. Effects of thawing methods on protein oxidation, protein functional properties and freshness of yak meat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 342–349.]
- [22] 周彬静, 刘小花, 彭菁, 等. 荧光假单胞菌和热杀索丝菌对低温贮藏期间猪肉品质变化的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 208–214. [ZHOU B J, LIU X H, PENG J, et al. Effects of *Pseudomonas fluorescens* and *Brochothrix thermosphacta* on quality changes of pork during low-temperature storage[J]. *Food Science*, 2022, 43(19): 208–214.]
- [23] BARBHUIYA R I, SINGHA P, SINGH S K. A comprehensive review on impact of non-thermal processing on the structural changes of food components[J]. *Food Research International*, 2021, 149: 110647.
- [24] SUJIWO J, KIM D, JANG A. Relation among quality traits of chicken breast meat during cold storage: Correlations between freshness traits and torrimeter values[J]. *Poultry Science*, 2018, 97(8): 2887–2894.
- [25] DONG K, LUO X, LIU L, et al. Effect of high-pressure treatment on the quality of prepared chicken breast[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(4): 1597–1607.
- [26] HUANG Y, LI H, HUANG T, et al. Lipolysis and lipid oxidation during processing of Chinese traditional smoke-cured bacon[J]. *Food Chemistry*, 2014, 149: 31–39.
- [27] WANG Z, TU J, ZHOU H, et al. A comprehensive insight into the effects of microbial spoilage, myoglobin autoxidation, lipid oxidation, and protein oxidation on the discoloration of rabbit meat during retail display[J]. *Meat Science*, 2021, 172: 108359.
- [28] SHAO L, CHEN S, WANG H, et al. Advances in understanding the predominance, phenotypes, and mechanisms of bacteria related to meat spoilage[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118(Part B): 822–832.
- [29] BEKHIT A E A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 280–302.
- [30] CHEN L, JIAO D, LIU H, et al. Effects of water distribution and protein degradation on the texture of high pressure-treated shrimp (*Penaeus monodon*) during chilled storage[J]. *Food Control*, 2022, 132: 108555.
- [31] SOLADOYE O P, PIETRASIK Z. Utilizing high pressure processing for extended shelf life meat products: Reference module in food science[M]. Elsevier, 2018.
- [32] BAK K H, LINDAHL G, KARLSSON A H, et al. Effect of high pressure, temperature, and storage on the color of porcine longissimus dorsi[J]. *Meat Science*, 2012, 92(4): 374–381.
- [33] KRUK Z A, YUN H, RUTLEY D L, et al. The effect of high pressure on microbial population, meat quality and sensory characteristics of chicken breast fillet[J]. *Food Control*, 2010, 22(1): 6–12.
- [34] JUNG S, GHOUL M, DE LAMBALLERIE-ANTON M. Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2003, 36(6): 625–631.
- [35] WANG Z, HE Z, EMARA A M, et al. Effects of malondialdehyde as a byproduct of lipid oxidation on protein oxidation in rabbit meat[J]. *Food Chemistry*, 2019, 288: 405–412.
- [36] FAUSTMAN C, SUN Q, MANCINI R, et al. Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control[J]. *Meat Science*, 2010, 86(1): 86–94.
- [37] SUMAN S P, JOSEPH P. Myoglobin chemistry and meat color[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2013, 4(1): 79–99.
- [38] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: A review[J]. *Meat Science*, 2011, 89(3): 259–279.
- [39] SOLADOYE O P, JUÁREZ M L, AALHUS J L, et al. Protein oxidation in processed meat: Mechanisms and potential implications on human health[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(2): 106–122.
- [40] JOSEPH P, SUMAN S P, RENTFROW G, et al. Proteomics of muscle-specific beef color stability[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3196–3203.
- [41] ZHANG X, HUANG W, XIE J. Effect of different packaging methods on protein oxidation and degradation of grouper (*Epinephelus coioides*) during refrigerated storage[J]. *Food*, 2019, 8(8): 325.
- [42] ZHANG M, HE L, LI C, et al. Effects of gamma ray irradiation-induced protein hydrolysis and oxidation on tenderness change

of fresh pork during storage[J]. *Meat Science*, 2020, 163: 108058.

[43] 何轩辉. 超高压对花生分离蛋白凝胶特性的影响及其机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013: 108. [HE X H. Study on the effects of ultra-high pressure on the gelation properties of peanut protein isolates and its mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013: 108]

[44] NICOLAS J C, MARIE I D L. Changes in myofibrillar proteins interactions and rheological properties induced by high-pressure processing[J]. *European Food Research and Technology*, 2003, 216(6): 470-476.

[45] JIANG S, ZHAO D, NIAN Y, et al. Ultrasonic treatment increased functional properties and *in vitro* digestion of actomyosin complex during meat storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 352: 129398.

[46] LIU H, XU Y, ZU S, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1872.

[47] JIN Y, DENG Y, QIAN B, et al. Allergenic response to squid (*Todarodes pacificus*) tropomyosin Tod p1 structure modifications induced by high hydrostatic pressure[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, 76: 86-93.

[48] YAMIRA C, MAURICIO O, ANJA E M J, et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) on protein structure and digestibility of red abalone (*Haliotis rufescens*) muscle[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 60(C): 102282.

[49] ORLIEN V, HANSEN E, SKIBSTED L H. Lipid oxidation in high-pressure processed chicken breast muscle during chill storage: Critical working pressure in relation to oxidation mechanism [J]. *European Food Research and Technology*, 2000, 211(2): 99-104.

[50] ŞAYIN SERT T, COŞKUN F. The effects of high-pressure processing on pH, thiobarbituric acid value, color and texture properties of frozen and unfrozen beef mince[J]. *Molecules*, 2022, 27(13): 3974.