

低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化

Protein changes of buffalo meat during low temperature storage

丘 静^{1,2} 秦德丽^{1,2} 刘纯友^{1,2,3} 孙庭广^{1,2} 罗其勇^{1,2}

QIU Jing^{1,2} QIN De-li^{1,2} LIU Chun-you^{1,2,3} SUN Ting-guang^{1,2} LUO Qi-yong^{1,2}

(1. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西柳州螺蛳粉工程技术研究中心, 广西 柳州 545006; 3. 华中农业大学食品科技学院, 湖北 武汉 430070)

(1. Schools of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Engineering Technology Research Center of Guangxi Liuzhou Snail Noodle, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

摘要:目的: 探明低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化规律。方法: 以水牛肉为研究对象, 分别将肉样于4, -18, -60℃贮藏, 测定贮藏过程中水牛肉的总蛋白质含量、表面疏水性、总巯基含量、游离巯基含量及羰基值, 并对蛋白质指标之间的相关性进行分析。结果: 不同低温贮藏过程中, 随着贮藏时间的延长, 水牛肉的总蛋白质、总巯基、游离巯基含量呈不断下降趋势, 但水牛肉的表面疏水性和羰基值呈不断上升趋势。贮藏温度越高, 蛋白质氧化程度越严重。冷藏或冻藏过程中, 总蛋白质含量与总巯基、游离巯基含量呈极显著正相关($P < 0.01$), 与表面疏水性、羰基值呈极显著负相关($P < 0.01$); 表面疏水性与羰基值呈极显著正相关($P < 0.01$), 与总蛋白质、总巯基、游离巯基含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。结论: 3种贮藏温度下, -60℃冻藏的水牛肉的蛋白质氧化程度较低, 水牛肉品质特性保持得较好, 其保鲜效果优于4℃冷藏和-18℃冻藏的水牛肉。

关键词: 水牛肉; 蛋白质; 冷藏; 冻藏; 相关性

Abstract: **Objective:** The objective of this study is to investigate the protein changes mechanism of buffalo meat during low temperature storage. **Methods:** Buffalo meat samples were stored at 4, -18 and -60℃, respectively, and the contents of total protein, surface hydrophobicity, total sulfhydryl, free sulfhydryl and carbonyl values were determined, following the analysis of

the correlation among those protein indicators. **Results:** The results showed that the contents of total protein, total sulfhydryl and free sulfhydryl of buffalo meat decreased, with the extension of storage time, while the surface hydrophobicity and carbonyl value of buffalo meat increased. The protein oxidation increased showing linear relationship to the storage temperature. During cold or frozen storage, the total protein content was extremely significantly positively correlated with the contents of total sulfhydryl and free sulfhydryl ($P < 0.01$), while negatively correlated with surface hydrophobicity and carbonyl value ($P < 0.01$). The surface hydrophobicity was extremely significantly positively correlated with carbonyl value ($P < 0.01$), while negatively correlated with the contents of total protein, total sulfhydryl and free sulfhydryl ($P < 0.01$). **Conclusion:** The degree of protein oxidation of buffalo meat stored at -60℃ was the lowest, with the quality characteristics of buffalo meat maintained better, and its fresh-keeping effect was better than that of buffalo meat stored at 4℃ and -18℃.

Keywords: buffalo meat; protein; refrigerated storage; frozen storage; correlation

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(编号: 2018GXNSFAA138081); 广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目(编号: 桂教教师[2020]58号); 广西科技大学博士基金项目(编号: 校科博16Z05)

作者简介: 丘静, 女, 广西科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 刘纯友(1981—), 男, 广西科技大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: chunyoucn@126.com

收稿日期: 2021-08-17

水牛(*Bubalus bubalis*)是一种生长在热带、亚热带地区的特色畜种, 是中国黄牛、牦牛和水牛三大牛种中唯一能适应热带、亚热带地区高温高湿极端环境的特殊牛种^[1]。亚洲是全球水牛的主产区, 占世界水牛种群数量的97%以上^[2]。与普通黄牛肉相比, 水牛肉色泽更加鲜红、蛋白质含量高、脂肪和胆固醇含量较低, 食用品质比黄牛肉更高^[2-3]。

蛋白质是肉类的主要营养成分之一, 常温条件下蛋白质很容易发生氧化, 进而使蛋白质分子内或分子间发生交联, 导致肉类的色泽、嫩度、保水性和质地等食品

质严重下降^[4-5]。研究^[6-7]表明,蛋白质在低温情况下依然会发生劣变。目前,关于冷藏或冻藏过程中蛋白质氧化研究主要集中于普通黄牛肉^[6-8]和牦牛肉^[9],而有关低温贮藏过程中中国沼泽型水牛肉蛋白质变化国内外未见相关文献报道。研究拟以水牛肉为研究对象,分别将其于 4, -18, -60 ℃ 贮藏,通过测定蛋白质含量、表面疏水性、总巯基含量、游离巯基含量及羰基值等蛋白质指标,同时进行指标间的相关性分析,阐明低温贮藏过程中水牛肉蛋白质的变化规律,以期为生鲜水牛肉的贮藏保鲜及肉类品质变化机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水牛肉:背最长肌,广西冠业投资发展有限公司柳州东环分公司;

盐酸胍、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氯化钠、溴酚蓝、十二烷基磺酸钠、尿素、乙二醇四乙酸、三羟甲基氨基甲烷盐酸盐、DTNB、氯化钾、EDTA、2,4-二硝基苯肼、盐酸、硫酸等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

紫外—可见分光光度计:UV-2600 型,岛津仪器苏州有限公司;

高速冷冻离心机:Avanti J-26 XPI 型,美国贝克曼库尔特有限公司;

超低温冰箱:DW-86L386 型,青岛海尔特种电气有限公司;

冰箱:BCD-518WEC 型,中科美菱低温科技有限公司;

电子分析天平:AE2204 型,湘仪天平仪器设备有限公司;

pH 计:PHS-25CW 型,上海般特仪器制造有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4S 型,江苏金怡仪器科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品贮藏方法 将新鲜水牛肉(背最长肌)用刀去除肉眼可见的筋腱、脂肪和结缔组织,将样品切成质量 400 g,厚度 3 cm 的肉块,再将样品用聚乙烯薄膜包裹,随机分成 3 组,分别于 4, -18, -60 ℃ 贮藏。肉样于冷藏温度(4 ℃)下分别贮藏 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 d,于冻藏温度(-18, -60 ℃)下分别贮藏 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 d,冷冻样品先用保鲜膜包裹好再用自来水流水方法进行解冻,当肉样中心温度达 4 ℃ 时解冻完毕,测定肉样的蛋白质含量、表面疏水性、总巯基含量、游离巯基含量、羰基值等蛋白质品质指标,每个样品平行 3 次取平均值。

1.3.2 总蛋白质含量测定 根据 GB 5009.5—2016。

1.3.3 表面疏水性测定

(1) 肌原纤维蛋白提取:参照 Park 等^[10]的方法并修

改。先将肉样切碎称取 5 g,加入 20 mL 磷酸盐缓冲液(含 0.1 mol/L NaCl, 2 mmol/L MgCl₂, 1 mmol/L EGTA, 6.1 mmol/L NaH₂PO₄, 3.9 mmol/L Na₂HPO₄ · H₂O, pH 7.0), 8 000 r/min 均质 30 s; 4 ℃、3 650 r/min 离心 15 min,弃去上清液;粗提的肌原纤维沉淀物用 4 倍体积的磷酸盐缓冲液洗涤 2 次,再用 4 倍体积的 0.1 mol/L NaCl 溶液洗涤 3 次,并用 4 层纱布过滤,去除肉样中的结缔组织;用 0.1 mol/L 的 HCl 将肌原纤维蛋白溶液的 pH 值调至 6.0,离心,得肌原纤维蛋白备用。

(2) 表面疏水性:参照 Chelh 等^[11]的方法,按式(1)计算溴酚蓝结合量。

$$X = 200 \times \frac{A_0 - A_1}{A_0}, \quad (1)$$

式中:

X——溴酚蓝结合量,μg;

A₀——空白对照组在 595 nm 处的吸光度值;

A₁——试验组在 595 nm 处的吸光度值。

1.3.4 总巯基含量测定 参照周果等^[12]的方法。

1.3.5 游离巯基含量测定 采用 Rysman 等^[13]的方法并修改。取 1.0 mL 肌原纤维蛋白溶液,加入 4.5 mL Tris-HCl 溶液(0.2 mol/L, 2.0% SDS, 10 mmol/L EDTA, pH 6.8),混匀,加入 1.0 mL 0.2 mol/L 的 Tris-HCl 溶液(0.2 mol/L, 0.1% DTNB, pH 8.0), 40 ℃ 水浴 25 min,测定 412 nm 处吸光度值。用 0.6 mol/L 的 KCl 溶液做空白对照。按式(2)计算游离巯基含量。

$$X = \frac{A \times D}{C \times 13\ 600}, \quad (2)$$

式中:

X——游离巯基含量, mol/mg;

D——稀释倍数,为 10;

13 600——分子吸光系数;

C——样液的质量浓度, mg/mL。

1.3.6 羰基含量测定 参照马丽华等^[14]的方法并修改。称取 3.0 g 切碎的肉样,加入 30 mL Tris-HCl 溶液, 8 000 r/min 均质 30 s, 4 000 r/min 离心 15 min,取 1.0 mL 上清液,加入 1.0 mL 2,4-二硝基苯肼溶液(0.01 mol/L)混匀,黑暗环境下反应 60 min,加入 1.0 mL 三氯乙酸溶液(20%), 4 000 r/min 离心 15 min,弃去上清液;沉淀中加入 4.0 mL 盐酸胍(6.0 mol/L), 37 ℃ 水浴 15 min, 5 000 r/min 离心 10 min,测定 370 nm 处吸光度值。按式(3)计算羰基含量。

$$X = \frac{A_{370\text{ nm}} \times D}{854 \times C}, \quad (3)$$

式中:

X——羰基含量, nmol/mg;

D——稀释倍数;

$A_{370\text{ nm}}$ ——370 nm 处吸光度值;

854——所有醛类吸光系数的平均值, A/mm mol ;

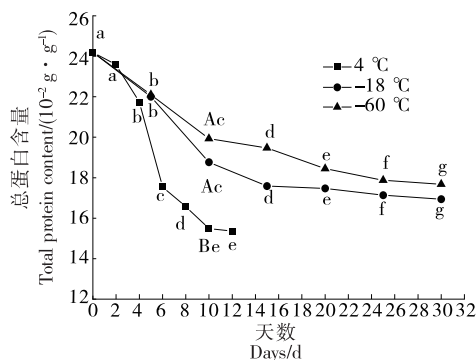
C——样品的质量浓度, g/mL。

1.3.7 数据处理 采用 SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析、邓肯氏多重差异显著性分析及皮尔逊分析, 结果以均值士标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 低温贮藏过程中水牛肉总蛋白质含量变化

由图 1 可知, 随着贮藏时间的延长, 不同贮藏温度下水牛肉中总蛋白质含量不断下降。4℃下冷藏第 2 天, 总蛋白含量为 23.55 g/100 g, 下降幅度仅为 2.57%, 随后总蛋白质含量几乎呈直线下降; 贮藏第 6 天, 总蛋白质含量从最初 24.20 g/100 g 下降至 17.55 g/100 g, 下降幅度高达 27.48%; 贮藏第 10 天, 总蛋白质含量 15.49 g/100 g, 下降幅度达 35.98%。贮藏第 10 天, -18, -60℃下的总蛋白含量分别为 18.77, 19.93 g/100 g, 下降幅度为 22.43%, 17.63%, 显著低于 4℃的 ($P<0.05$)。前期水牛肉蛋白质含量下降快, 主要是由于贮藏前期肉样中蛋白质酶活性较高; 但随着贮藏时间的延长, 蛋白酶活性不断降低, 故贮藏后期水牛肉中蛋白质含量下降变得平缓。Shafi 等^[15]研究发现 -18℃冻藏 0 d, 鲢鱼肉蛋白质含量为 20.09 g/100 g, 经 90 d 冷冻贮藏后蛋白质含量降至 17.10 g/100 g, 下降幅度达 14.18%, 其下降幅度小于冻藏的水牛肉。随着贮藏时间的延长, 低温贮藏过程中水牛肉中蛋白质含量不断降低, 可能是由于在肌肉内源酶的作用下, 水牛肉蛋白质发生氧化降解, 且贮藏温度越高, 肌肉中内源酶活性越强, 蛋白质降解速度越快, 故 4℃冷藏条件下水牛肉总蛋白质含量下降速度远远快于冻藏条件的。综上, 温度对低温贮藏过程中水牛肉总蛋白质含量的变化有显著影响, 不同肉类(水牛肉、鱼肉)低温贮藏过程中蛋白质含量下降存在较大差异, 可能与动物种类、品种、肌肉部位、肌纤维大小类型及内源酶种类及活性有关。



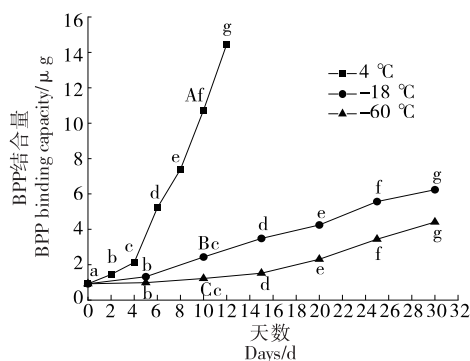
字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图 1 低温贮藏过程中水牛肉总蛋白质含量变化

Figure 1 Changes in total protein content of buffalo meat during low temperature storage

2.2 低温贮藏过程中水牛肉表面疏水性变化

由图 2 可知, 随着贮藏时间的延长, 水牛肉的表面疏水性总体呈上升趋势, 其中 4℃下的表面疏水性从第 4 天开始几乎呈直线上升, 且显著高于 -18, -60℃的 ($P<0.05$)。4℃下冷藏 0~4 d, 表面疏水性增加缓慢, 随后呈直线快速增长; 贮藏第 10 天, 表面疏水性达 10.74 μg , 增加幅度为初始值 (0.92 μg) 的 10.6 倍。-18, -60℃下贮藏第 10 天, 表面疏水性增加幅度较为缓慢, 分别为初始值的 1.6, 0.3 倍, 显著低于 4℃冷藏的 ($P<0.05$); 随后逐渐增大, 贮藏第 30 天, 二者的增加幅度分别为初始值 (0.92 μg) 的 5.8, 4.8 倍, 且 -18℃下的表面疏水性始终高于 -60℃的。贮藏过程中水牛肉表面疏水性不断增加, 主要是由于水牛肉蛋白质分子的构象被羟基自由基氧化而发生改变, 导致埋藏在蛋白质内部的疏水性氨基酸暴露^[16-17]。



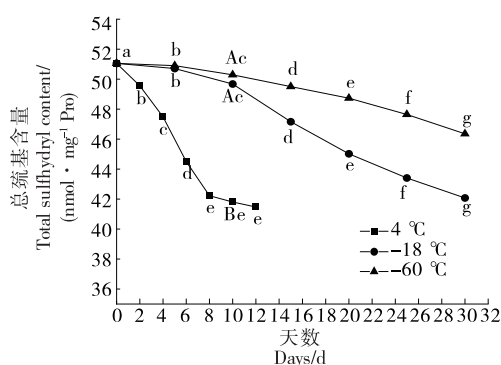
字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图 2 低温贮藏过程中水牛肉表面疏水性的变化

Figure 2 Changes in surface hydrophobicity of buffalo meat during low temperature storage

2.3 低温贮藏过程中水牛肉总巯基含量变化

由图 3 可知, 随着贮藏时间的延长, 不同贮藏温度下水牛肉总巯基含量总体呈下降趋势。4℃下贮藏 0~8 d, 总巯基含量总体呈直线快速下降, 从最初的 51.05 nmol/mg 蛋白质下降至 42.23 nmol/mg 蛋白质, 下降幅度达 17.28%; 随后下降速度趋于平缓。-18, -60℃下冻藏 0~5 d, 总巯基含量下降较为平缓, 下降幅度分别为 2.68%, 1.49%; 随后两者下降幅度快速增加; 贮藏第 30 天, 两者分别为 42.08, 46.35 nmol/mg 蛋白质, 下降幅度达 17.57% 和 9.20%, 且 -60℃下的下降幅度始终低于 -18℃的 ($P<0.05$)。Tao 等^[18]研究发现滩羊肉中总巯基含量随贮藏时间的增加不断下降, 且贮藏温度越高巯基含量越低。贮藏过程中水牛肉中巯基含量不断降低, 可能是由于水牛肉中巯基被活性氧 (ROS) 氧化所致, 且巯基含量的降低不仅与参与蛋白质氧化的酶活性有关, 还与冰晶对肌原纤维结构的破坏有关^[19]。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 低温贮藏过程中水牛肉总巯基含量的变化

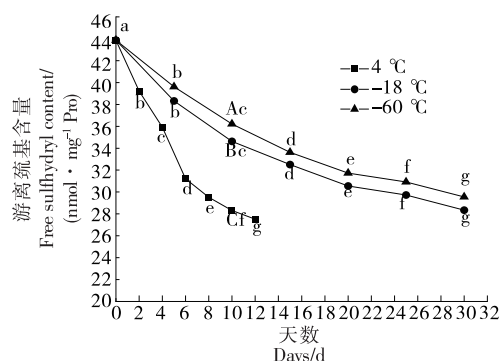
Figure 3 Changes in total sulphhydryl content of buffalo meat during low temperature storage

2.4 低温贮藏过程中水牛肉游离巯基含量变化

由图 4 可知,随着贮藏时间的延长,水牛肉的游离巯基含量总体呈下降趋势,其中 4 °C 下的下降幅度显著高于 -18, -60 °C 的。4 °C 下贮藏第 2 天,游离巯基含量为 39.21 nmol/mg 蛋白质,下降幅度仅为 10.60%,随后呈急速下降趋势;贮藏第 10 天,游离巯基含量为 28.31 nmol/mg 蛋白质,下降幅度高达 35.45%。贮藏第 5 天, -18, -60 °C 下的游离巯基含量分别为 38.32, 39.61 nmol/mg 蛋白质,下降幅度为 12.63% 和 9.69%;随后下降速度不断加快;贮藏第 30 天, -18, -60 °C 下的游离巯基含量分别为 28.35, 29.55 nmol/mg 蛋白质,下降幅度高达 35.36% 和 32.63%, -18 °C 下的下降幅度始终高于 -60 °C 的。贮藏过程中水牛肉游离巯基含量不断下降,主要是由于活性氧直接攻击水牛肉蛋白质中半胱氨酸残基上的巯基,并将巯基转变成二硫键及磺酸、亚磺酸、硫代亚磺酸等硫醇氧化产物所致^[13]。

2.5 低温贮藏过程中水牛肉羰基含量变化

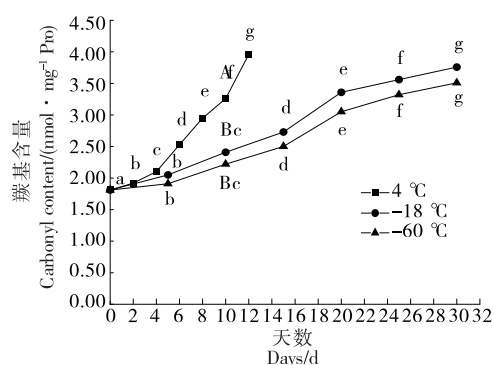
由图 5 可知,随着贮藏时间的延长,不同贮藏温度下



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 低温贮藏过程中水牛肉游离巯基含量的变化

Figure 4 Changes in free sulphhydryl content of buffalo meat during low temperature storage



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 低温贮藏过程中水牛肉羰基含量的变化

Figure 5 Changes in carbonyl content of buffalo meat during low temperature storage

水牛肉的羰基含量总体呈上升趋势。4 °C 冷藏 0~3 d, 羰基含量增长相对较为缓慢, 贮藏第 4 天, 羰基含量为 2.10 nmol/mg 蛋白质, 增幅达 16.02%; 随后呈直线快速上升; 第 10, 12 天, 羰基含量分别为 3.26, 3.96 nmol/mg 蛋白质, 增幅分别为初始值的 0.81, 1.19 倍。-18, -60 °C 下贮藏 0~5 d, 羰基含量分别为 2.05, 1.91 nmol/mg 蛋白质, 增加幅度相对缓慢; 随后增加幅度逐渐加快; 第 30 天, 二者的羰基含量分别为 3.76, 3.51 nmol/mg 蛋白质, 增幅分别为初始值的 1.08, 0.94 倍。Rysman 等^[13]研究发现随着冷藏时间的不断延长, 普通牛肉饼中羰基含量不断增加, 冷藏 7 d 后, 羰基含量增加幅度为初始值的 0.65 倍。贮藏过程中水牛肉羰基含量不断增加, 可能是由于冷藏或冻藏破坏了肌肉的超微结构, 并释放自由基, 导致蛋白质侧链氨基酸中的氨基和亚氨基氧化形成羰基化合物所致^[20]。

2.6 蛋白质品质指标的相关性

由表 1~表 3 可知, 冷藏 (4 °C) 和冻藏 (-18, -60 °C) 过程中水牛肉总蛋白质含量与表面疏水性、羰基含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。低温贮藏过程中水牛肉总蛋白质含量与总巯基含量、游离巯基含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。表面疏水性与总巯基含量、游离巯基含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 但与羰基含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。低温贮藏过程中总巯基含量与总蛋白含量、游离巯基含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 但与表面疏水性、羰基含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 游离巯基含量与总蛋白、总巯基含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 但与表面疏水性呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。低温贮藏过程中羰基含量与表面疏水性呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 但与总蛋白、总巯基和游离巯基含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。综上, 冷藏或冻藏条件下, 水牛肉蛋白质品质指标之间具有良好的相关性。

表 1 4℃冷藏过程中水牛肉蛋白质指标间的相关性[†]

Table 1 Correlation analysis between various protein indicators during 4℃ refrigerated storage

指标	总蛋白质含量	表面疏水性	总巯基含量	游离巯基含量	羰基含量
总蛋白质含量	1.000	-0.899**	0.990**	0.975**	-0.874**
表面疏水性		1.000	-0.896**	-0.872**	0.978**
总巯基含量			1.000	0.986**	-0.873**
游离巯基含量				1.000	-0.859**
羰基含量					1.000

[†] *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。

表 2 -18℃冻藏过程中水牛肉蛋白质指标间的相关性[†]

Table 2 Correlation analysis between various protein indicators during -18℃ frozen storage

指标	总蛋白质含量	表面疏水性	总巯基含量	游离巯基含量	羰基含量
总蛋白质含量	1.000	-0.859**	0.834**	0.973**	-0.823**
表面疏水性		1.000	-0.975**	-0.924**	0.973**
总巯基含量			1.000	0.901**	-0.930**
游离巯基含量				1.000	-0.903**
羰基含量					1.000

[†] *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。

表 3 -60℃冻藏过程中水牛肉蛋白质指标间的相关性[†]

Table 3 Correlation analysis between various protein indicators during -60℃ frozen storage

指标	总蛋白质含量	表面疏水性	总巯基含量	游离巯基含量	羰基含量
总蛋白质含量	1.000	-0.763**	0.861**	0.990**	-0.853**
表面疏水性		1.000	-0.920**	-0.809**	0.945**
总巯基含量			1.000	0.883**	-0.868**
游离巯基含量				1.000	-0.896**
羰基含量					1.000

[†] *表示显著相关($P<0.05$); **表示极显著相关($P<0.01$)。

3 结论

试验表明,3种贮藏温度下,随着贮藏时间的不断延长,水牛肉的总蛋白质、总巯基、游离巯基含量总体呈下降趋势,但表面疏水性和羰基含量不断上升。温度对贮藏过程中水牛肉蛋白质的氧化降解有显著影响,降低贮藏温度在一定程度上可以抑制蛋白质的氧化降解并有效延长生鲜水牛肉的货架期。3种贮藏温度下,-60℃冻藏的水牛肉蛋白质的氧化降解程度低,肉品质保持效果好。后续可从脂质角度研究贮藏过程中水牛肉品质的变化规律。

参考文献

[1] 刘纯友,付春婷,许金蓉,等.低温贮藏过程中水牛肉品质变化研究[J].食品工业科技,2020,41(2):273-278.
LIU Chun-you, FU Chun-ting, XU Jin-rong, et al. Quality changes of buffalo meat during low temperature storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 273-278.

[2] STASIO L D, BRUGIAPAGLIA A. Current knowledge on river buffalo meat: A critical analysis[J]. Animals, 2021, 11: 2 111.
[3] CRUZ L D, GIBSON T J, GUERRERO-LEGARRETA I, et al. The welfare of water buffaloes during the slaughter process: A review[J]. Livestock Science, 2018, 212: 22-33.
[4] 李倩,尉立刚,杨钰昆,等.冻藏时间对猪肉中肌原纤维蛋白氧化程度的影响[J].食品与机械,2020,36(1):157-160,165.
LI Qian, WEI Li-gang, YANG Yu-kun, et al. Effect of freezing time on the degree of oxidation of myofibrillar protein in pork[J]. Food & Machinery, 2020, 36(1): 157-160, 165.
[5] 刘爽,李翔,唐华丽.类PSE禽肉(肉鸡、火鸡)加工特性及蛋白质功能性质改善研究进展[J].食品与机械,2021,37(5):209-214.
LIU Shang, LI Xiang, TANG Hua-li. Progress in processing characteristics and improving functional properties of proteins in PSE-like poultry meat (broiler and turkey)[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 209-214.
[6] BAO Y, ERTBJERG P. Effect of protein oxidation on the texture

- and water-holding of meat: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 59(22): 3 564-3 578.
 - [7] 孟彤, 刘源, 仇春洪, 等. 蛋白质氧化及对肉品品质影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(1): 173-181.
MENG Tong, LIU Yuan, CHOU Chun-yang, et al. Research progress on protein oxidation mechanisms and its effects on meat quality[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(1): 173-181.
 - [8] LU Xiao, ZHANG Yi-min, XU Bao-chen, et al. Protein degradation and structure changes of beef muscle during superchilled storage[J]. *Meat Science*, 2020, 168: 108180.
 - [9] HOLMAN B W, COOMBS C E, MORRIS S, et al. Effect of long term chilled (up to 5 weeks) then frozen (up to 12 months) storage at two different sub-zero holding temperature on beef: 3. Protein structure degradation and a marker of protein oxidation[J]. *Meat Science*, 2018, 139: 171-178.
 - [10] PARK D, XIONG Y L, ALDERTON A L, et al. Biochemical changes in myofibrillar protein exposed to three oxidizing systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(12): 4 445-4 451.
 - [11] CHELH I, GATELLIER P, SANTE L. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. *Meat Science*, 2006, 74(4): 681-683.
 - [12] 周果, 杨文鸽, 崔燕, 等. 超高压处理对三疣梭子蟹感官及其肌原纤维蛋白生化特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 269-274.
ZHOU Guo, YANG Wen-ge, CUI Yan, et al. Effect of ultra-high pressure on sensory and biochemical properties of myofibrillar protein from *Portunus trituberculatus* [J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 269-274.
 - [13] RYSMAN T, HECKE T V, POULKE C V, et al. Protein oxidation and proteolysis during storage and in vitro digestion of pork and beef patties[J]. *Food Chemistry*, 2016, 209: 177-184.
 - [14] 马丽华, 王卫东, 宋慧, 等. 不同包装对肉品贮藏期间蛋白质氧化影响的研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(5): 106-110.
MA Li-hua, WANG Wei-dong, SONG Hui, et al. Effect of different manner of packing on protein oxidation in the storage period of meat[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(5): 106-110.
 - [15] SHAFI J, WAHEED K N, YAQOOB S S, et al. Effect of icing on quality of silver carp during frozen storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44: e14654.
 - [16] FENG Xian-chao, LI Chen-yi, ULLAH Niamat, et al. Susceptibility of whey protein isolate to oxidation and changes in physicochemical, structural, and digestibility characteristics[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(11): 7 602-7 613.
 - [17] SANO T, OHNO T, OTSUKA-FUCHINO H, et al. Carp natural actomyosin: Thermal denaturation mechanism[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 59(5): 1 002-1 008.
 - [18] TAO Ying-mei, MA Lu, LI Dong-dong, et al. Changes in oxidation and secondary structure of myofibrillar protein, water distribution, and quality of vacuum packaged Tan mutton during storage at different temperatures [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45: e15647.
 - [19] ZHANG Ming-cheng, HAILI Niu, CHEN Qian, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles[J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1-8.
 - [20] LI Fang-fei, DU Xin, REN Yan-ming, et al. Impact of ice structuring protein on myofibrillar protein aggregation behavior and structure property of quick-frozen patty during frozen storage[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 178: 136-142.
-
- (上接第 136 页)
- [26] 纪翠娟. 哈密瓜压差膨化工艺研究[J]. *现代农村科技*, 2016(20): 52-53.
JI Cui-juan. Study on pressure difference puffing technology of cantaloupe[J]. *Xiandai Nongcun Keji*, 2016(20): 52-53.
 - [27] 贾文婷, 杨慧, 吴洪斌, 等. 不同预处理方式对新疆地区哈密瓜变温压差膨化干燥的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4): 338-340.
JIA Wen-ting, YANG Hui, WU Hong-bing, et al. Effect of different pretreatment methods on puffing drying of Hami melon in Xinjiang region[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(4): 338-340.
 - [28] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of *Flos Loniceræ*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(8): 4 955-4 964.
 - [29] KUMAR Amardeep. Textural degradation, drying and rehydration behaviour of ohmically treated pineapple cubes[J]. *LWT-Food Science and Technology* Volume, 2021, 142: 1 016-1 026.
 - [30] 效碧亮, 孙静, 刘晓凤. 百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J]. *食品与机械*, 2020, 36(2): 48-55, 218.
XIAO Bi-liang, SUN Jing, LIU Xiao-feng. Drying characteristics and drying quality of lily by hot-air thin-layer drying[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(2): 48-55, 218.
 - [31] 武华文. 哈密瓜片远红外干燥特性及品质工艺试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020: 19-20.
WU Hua-wen. Experimental study on far-infrared drying characteristics and quality technology of cantaloupe slice [D]. Alar: Tarim University, 2020: 19-20.
 - [32] 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1): 382-388.
ZHANG Qian, XIAO Hong-wei, DAI Jian-wu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(S1): 382-388.