

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.01.027

# 冻藏时间对猪肉中肌原纤维蛋白氧化程度的影响

## Effect of frozen storage time on the oxidation degree of porcine myofibrillar protein

李倩 尉立刚 杨钰昆 李美萍 郭彩霞

LI Qian YU Li-gang YANG Yu-kun LI Mei-ping GUO Cai-xia

(山西大学生命科学学院, 山西太原 030006)

(School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**摘要:**对在一18℃下贮藏不同时间(0,1,4,8,12周)的原料猪肉进行肌原纤维蛋白提取,对其羰基、总巯基、自由氨基、表面疏水性和内源性色氨酸荧光进行测定。结果表明:随着贮藏时间的延长,羰基含量显著升高( $P < 0.05$ ),总巯基、自由氨基、表面疏水性和内源性色氨酸荧光含量整体上呈下降趋势( $P < 0.05$ );贮藏时间与羰基、总巯基、自由氨基或表面疏水性之间具有显著相关性。因此,即便在冻藏条件下,肌原纤维蛋白也会出现一定程度的氧化,导致原料肉品质下降。

**关键词:** 冷冻;贮藏时间;肌原纤维蛋白;氧化

**Abstract:** In this study, myofibrillar protein was used as the research object to investigate the effect of different frozen storage time on the oxidation degree of myofibrillar protein of pork. Raw pork was stored at  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  for different time (0, 1, 4, 8, 12 weeks), and used for the extraction of myofibrillar protein. Then protein oxidation parameters (carbonyl, total sulfhydryl group, free amino groups, surface hydrophobicity and endogenous tryptophan fluorescence) were determined. The results suggested that, carbonyl content increased significantly ( $P < 0.05$ ), and total sulfhydryl group, free amino groups, surface hydrophobicity and endogenous tryptophan fluorescence content generally showed a decreasing trend ( $P < 0.05$ ). There is a correlation between storage time and carbonyls, total sulfhydryl group, free amino groups or surface hydrophobicity. Therefore, myofibrillar protein will be oxidized during the frozen storage, resulting in the degradation of raw meat quality.

**Keywords:** freezing; storage time; myofibrillar protein; oxidation

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:31801670,31701686);国家重点实验室开放课题(编号:SKLF-KF-201708)

**作者简介:**李倩,女,山西大学在读硕士研究生。

**通信作者:**尉立刚(1983—),男,山西大学副教授,博士。

E-mail: yuligang@sxu.edu.cn

**收稿日期:**2019-11-15

肉与肉制品是人们日常饮食中必不可少的组成部分。中国是肉类生产及消费大国,2018年猪肉产量超过5400万t,占肉类总产量的62.7%<sup>[1]</sup>。低温冻藏由于经济性和便捷性,在肉类工业中应用广泛<sup>[2]</sup>。然而,低温冻藏时肉类营养成分也会发生改变<sup>[3]</sup>。

目前,原料肉在贮藏过程中的品质改变已引起国内外相关学者的普遍关注。Vieira等<sup>[4]</sup>研究发现,冻藏期间原料肉的色泽改变与脂肪氧化显著相关。Bustabad<sup>[5]</sup>研究了冻藏方式对猪肉和牛肉质量损失的影响,结果表明:风冷贮藏的原料肉质量损失最大。潘君慧等<sup>[6]</sup>对冻藏方式对猪肉中蛋白氧化及凝胶特性进行研究,结果发现:冻藏过程中,未真空包装的原料肉中蛋白质更易氧化,保水能力下降更快。吴明亮等<sup>[7]</sup>研究表明,煮制时间对羊肉样品的剪切力有显著影响。李升升等<sup>[8]</sup>研究发现,随着牦牛年龄的增加,牦牛肉的食用品质明显下降。以上研究均表明加工、蒸煮时间和保存方式等对原料肉品质会有不同程度的影响,其原理仍有待探究。已有研究多集中在原料肉冻藏过程中脂肪氧化、凝胶特性及肉类品质等方面,而关于冻藏不同时间的猪肉中肌原纤维蛋白的变化情况及其相关性研究尚未见报道。

试验拟以新鲜猪肉为原料,一18℃下贮藏0,1,4,8,12周,考察冻藏时间对原料肉中蛋白羰基、总巯基、自由氨基、表面疏水性和内源性色氨酸荧光等指标的影响,以期为原料猪肉冻藏过程中理化性质的改变提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

#### 1.1.1 材料与amp;试剂

猪里脊肉:市售;

2,4-二硝基苯肼(DNPH)、三氯醋酸(TCA):分析纯,天津市光复精细化工研究所;

5-5'-二硫代二硝基苯甲酸盐(DTNB)、乙二醇二乙醚二胺四乙酸(EGTA):纯度 $\geq 98\%$ ,上海易恩化学技术有

限公司；

十二烷基硫酸钠(SDS,纯度 95%)、盐酸胍(纯度 ≥ 98.0%)、牛血清蛋白(BSA,纯度 97%)、L-亮氨酸(纯度 ≥ 98.0%)：北京索莱宝科技有限公司；

1-苯胺基-8-萘基磺酸盐(ANS)：纯度 97.0%，上海贤鼎生物科技有限公司；

2,4,6-三硝基苯磺酸(TNBS)：纯度 5%，北京百泰克生物技术有限公司。

### 1.1.2 仪器与设备

pH 计：STARTER2100 型，奥豪斯仪器(上海)有限公司；

紫外—可见光谱仪：UV-2550 型，日本日立公司；

电子天平：JA1203N 型，上海精密科学仪器有限公司；

涡旋混合器：QT-1 型，上海琪特分析仪器有限公司；

水浴锅：HHS-21-6 型，上海博迅医疗生物仪器股份有限公司；

搅拌机：MJ-WBL2501B 型，广东美的生活电器制造有限公司；

离心机：HC-3018R 型，安徽中科中佳科学仪器有限公司；

荧光分光光度计：LS-55 型，珀金埃尔默仪器有限公司。

## 1.2 方法

1.2.1 原料猪肉的贮藏 将猪里脊肉于 4℃ 下剔除肉眼可见的脂肪(白肉)，切割成 20 g 左右的肉块，保鲜袋包装后于 -18℃ 冰箱中存放备用。

1.2.2 肌原纤维蛋白的提取 根据文献[6]修改如下：将 1.2.1 中原料肉于 4℃ 解冻，并分割成均匀的条状，按 1：4 (g/mL) 的比例加入磷酸盐缓冲液(pH 7.0)，搅拌机中充分搅拌(搅拌 4 次，停顿 3 次，每次搅拌 15 s，停顿 5 s)，于 4℃、2 000×g 离心 15 min，弃上清液，重复上述步骤 3 次，随后按 1：4 (g/mL) 比例加入 NaCl 溶液(0.1 mol/L)，充分搅拌，调节 pH 至 6.25，用 100 目纱布过滤，离心，弃上清液，得肌原纤维蛋白。以牛血清蛋白(BSA)为标准蛋白，利用双缩脲法对上述肌原纤维蛋白浓度进行测定。

1.2.3 羰基含量的测定 根据文献[9]修改如下：取 800 μL 浓度为 20~40 mg/mL 的蛋白溶液，加入 8 mL DNPH(10 mmol/L)，避光反应 1 h，每隔 10 min 使用涡旋仪均匀样品。随后加入 8 mL 20% TCA 沉淀蛋白。4℃、5 000×g 离心 10 min，弃上清液，加入 16 mL 洗色液(乙醇与乙酸乙酯体积比 1：1)，捣碎沉淀，静置 10 min。清洗沉淀 3 次，弃上清液，吹干样品，加入 6 mol/L 盐酸胍 6 mL，于 50℃ 水浴 30 min，以 2 mol/L HCl 做空白，370 nm 比色。按式(1)计算羰基含量。

$$B = \frac{A \times 10^6}{\epsilon C} \quad (1)$$

式中：

B——羰基含量，nmol/mg·Pro；

A——吸光度值；

ε——摩尔消光系数，22 400 L/(mol·cm)；

C——蛋白浓度，mg/mL。

1.2.4 总巯基含量的测定 根据文献[10-11]修改如下：取 1 mL 蛋白稀释液于试管中(浓度约为 2.0 mg/mL)，加入 8 mol/L 尿素和 3% SDS(以 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液为溶剂)4 mL，充分混匀，随后加入 10 mmol/L DTNB 溶液 1 mL，涡旋振荡 30 s 后室温避光反应 15 min，以磷酸盐缓冲液做空白，测定 412 nm 处吸光度值。按式(2)计算总巯基含量。

$$S = \frac{73.53 \times A \times D}{C} \quad (2)$$

式中：

S——总巯基含量，nmol/mg·Pro；

A——412 nm 处吸光度值；

D——稀释倍数；

C——蛋白浓度，mg/mL。

1.2.5 自由氨基含量的测定 根据文献[12]修改如下：准确吸取 0.2 mL 蛋白溶液(浓度为 4 mg/mL)，依次加入 2 mL 1% SDS 和 1 mL 0.01% TNBS，充分振荡后，于 50℃ 水浴 30 min(避光)，加入 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 溶液 2 mL 终止反应，迅速冷却至室温，以蒸馏水为空白，420 nm 处比色，通过 L-亮氨酸标准曲线(y = 1.041x + 0.016, R<sup>2</sup> = 0.99)确定样品中自由氨基含量。

1.2.6 蛋白质疏水性含量的测定 根据文献[10]修改如下：制备浓度为 0.04, 0.08, 0.15, 0.30, 0.60 mg/mL 的蛋白液(稀释溶剂为含 0.6 mol/L NaCl 的 0.1 mmol/L 磷酸盐缓冲液, pH 6.25)，取 4 mL 稀释液，用稀释溶剂作为空白，加入 20 μL 8.0 mmol/L ANS 溶液(溶解于 pH 7.0 的 0.1 mmol/L 磷酸盐缓冲液)，然后涡旋震荡 10 s，避光反应 10 min。测定时仪器参数设置为狭缝宽度 5 nm，激发波长 392 nm，发射波长 492 nm，并在分析数据的过程中扣除空白对照。用荧光强度对溶液的蛋白浓度作图后所获得的斜率来表示表面疏水指数。

1.2.7 内源性色氨酸荧光的测定 根据文献[13]修改如下：用 1.2.6 的方法将蛋白溶液浓度稀释至 0.4 mg/mL，利用荧光分光光度计进行测定，仪器参数为狭缝宽度 5 nm，激发波长 279 nm，304.5~460.0 nm 的发射光谱。在分析数据的过程中扣除稀释溶剂的发射光谱，以排除试验过程中所产生的干扰。

1.2.8 数据统计分析 所有试验均平行 3 次，采用 Statistix 9.0 软件进行方差分析和显著性分析(LSD 法)，字母不同表示差异显著(P < 0.05)，使用 SPSS 20 软件进行相关性分析。采用 Origin 8.5 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 对肌原纤维蛋白羰基含量的影响

由图 1 可知，肌原纤维蛋白中羰基含量随贮藏时间

的延长而升高。羰基初始含量为  $0.25 \text{ nmol/mg} \cdot \text{Pro}$ , 贮藏 12 周后羰基含量显著升高 ( $0.56 \text{ nmol/mg} \cdot \text{Pro}$ ), 说明低温冻藏环境下, 蛋白质氧化程度随贮藏时间的延长逐渐升高。Lund 等<sup>[14]</sup> 研究发现脂肪氧化所产生的活性氧自由基或氢过氧自由基在一定程度上可诱导蛋白质发生氧化, 导致肉品体系品质下降。因此, 低温冻藏期间原料肉中的脂肪氧化可能是导致肌原纤维蛋白氧化的原因。

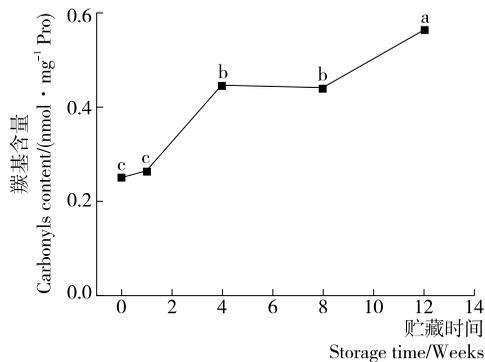


图 1 贮藏时间对肌原纤维蛋白中羰基含量的影响

Figure 1 Effects of storage time on carbonyls of myofibrillar protein

## 2.2 对肌原纤维蛋白总巯基含量的影响

由图 2 可知, 贮藏 1 周后, 总巯基含量显著下降 ( $P < 0.05$ )。随着贮藏时间的延长 (4, 8 周), 总巯基含量未见明显变化。贮藏 12 周后, 总巯基含量下降显著 ( $P < 0.05$ ), 降至  $(40.93 \pm 4.36) \text{ nmol/mg} \cdot \text{Pro}$ 。因此, 经 12 周低温冻藏后, 肌原纤维蛋白中总巯基含量整体呈下降趋势。Xiong 等<sup>[15]</sup> 研究发现氧化体系中的总巯基可氧化为  $-S-S-$ , 促使肌原纤维蛋白发生分子内交联, 导致肌原纤维蛋白质进一步聚集和沉淀, 溶解度下降。Morzel 等<sup>[16]</sup> 发现肌球蛋白中总巯基对氧化条件较为敏感, 在氧化条件下可转化为  $-S-S-$ , 从而诱导蛋白质发生聚合。因此, 随着冻藏时间的延长, 肌原纤维蛋白发生氧化可能

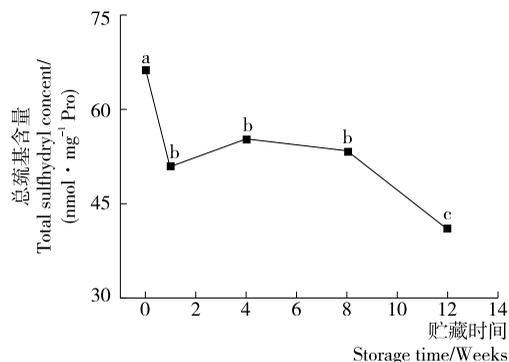


图 2 贮藏时间对肌原纤维蛋白中总巯基含量的影响

Figure 2 Effects of storage time on the total sulfhydryl levels of myofibrillar protein

是导致总巯基含量下降的直接原因。

## 2.3 对肌原纤维蛋白自由氨基含量的影响

由图 3 可知, 贮藏 1 周后, 自由氨基含量下降, 但无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。贮藏 12 周后自由氨基含量降至  $63.14 \text{ nmol/mg} \cdot \text{Pro}$ , 下降趋势显著 ( $P < 0.05$ )。因此, 肌原纤维蛋白中的自由氨基含量随贮藏时间的延长逐渐降低。李春强等<sup>[17]</sup> 研究发现, 随着氧化时间和氧化程度的增加, 自由氨基和巯基含量显著降低, 而二巯键含量显著增加; SDS-PAGE 结果也表明有大量高分子聚集体生成, 因此, 自由氨基含量下降可能是肌原蛋白氧化导致蛋白质发生聚集, 阻碍了自由氨基的暴露。

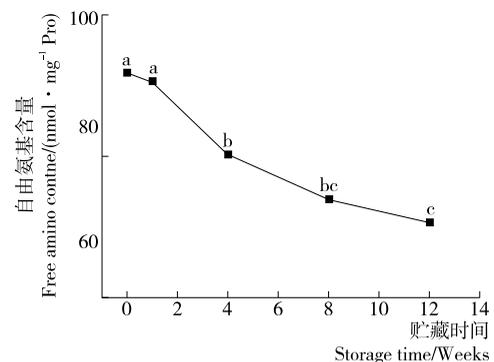


图 3 贮藏时间对肌原纤维蛋白中自由氨基含量的影响

Figure 3 Effects of storage time on free amines of myofibrillar protein

## 2.4 对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

由图 4 可知, 新鲜原料肉中表面疏水性为 282.01, 贮藏 1 周后表面疏水性无显著变化 ( $P > 0.05$ ), 贮藏 4 周后表面疏水性显著下降 ( $P < 0.05$ )。因此, 肌原纤维蛋白中表面疏水性随贮藏时间的延长整体呈下降趋势。刘宝华等<sup>[18]</sup> 研究发现, 蛋白氧化程度随贮藏时间的延长显著升高, 部分蛋白质发生聚集, 疏水性氨基酸被包埋在蛋白质

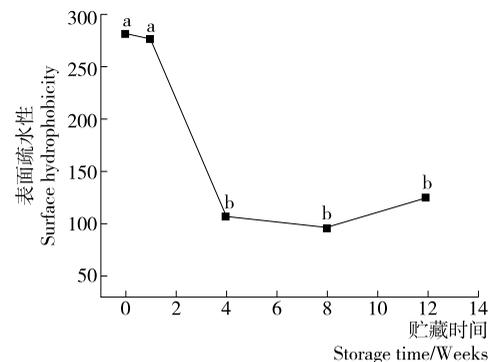


图 4 贮藏时间对肌原纤维蛋白中表面疏水性含量的影响

Figure 4 Effects of storage time on the surface hydrophobicity of myofibrillar protein

分子内部从而使蛋白质的表面疏水性下降。曹云刚等<sup>[13]</sup>研究表明,随着蛋白质氧化程度的加深,肌原纤维蛋白的结构逐渐展开,使得原先存在于蛋白质内部的疏水基团发生一定程度的暴露,疏水相互作用在一定程度上促使疏水基团聚集,导致蛋白质表面疏水性降低。因此,随着冻藏时间的延长,蛋白质结构发生改变,导致蛋白质发生交联聚集,可能是肌原纤维蛋白表面疏水性下降的原因。

### 2.5 对肌原纤维蛋白内源性色氨酸荧光含量的影响

内源性色氨酸荧光能够表示蛋白质中氨基酸残基及其微环境的变化,进而表征对蛋白结构的影响。由图 5 可知,肌原纤维蛋白中内源性色氨酸荧光含量随贮藏时间的延长显著降低。李玲等<sup>[19]</sup>研究表明:羟自由基氧化可降低内源性色氨酸荧光强度;色氨酸主要存在于蛋白质内部的疏水结构中,由于羟自由基攻击蛋白质肽链,导致肌原纤维蛋白的结构展开,蛋白质分子表面的色氨酸残基增多,致使被激发的内源性色氨酸荧光强度降低。因此,内源性色氨酸荧光强度下降可能是由低温冻藏使蛋白结构展开导致的。

### 2.6 相关性分析

由表 1 可知,贮藏时间与羰基含量呈正相关,与总巯基、自由氨基、表面疏水性含量呈负相关,且相关性极显

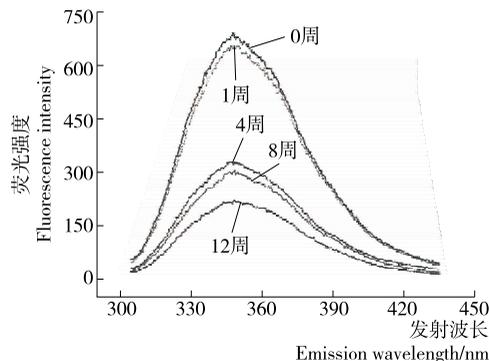


图 5 贮藏时间对肌原纤维蛋白中内源性色氨酸荧光含量的影响

Figure 5 Effects of storage time on the fluorescence spectroscopy of endogenous tryptophan of myofibrillar protein

著( $P < 0.01$ );羰基含量与总巯基、自由氨基、表面疏水性含量极显著负相关( $P < 0.01$ );总巯基含量与自由氨基含量显著正相关( $P < 0.05$ );自由氨基含量与表面疏水性含量极显著正相关( $P < 0.01$ )。进一步表明原料猪肉在低温冻藏过程中,肌原纤维蛋白的氧化程度随贮藏时间的延长逐渐加深。

表 1 各指标相关性分析<sup>†</sup>

Table 1 Correlation analysis of each index

指标	贮藏时间	羰基	总巯基	自由氨基	表面疏水性
贮藏时间	1.000				
羰基	0.932 **	1.000			
总巯基	-0.760 **	-0.695 **	1.000		
自由氨基	-0.868 **	-0.856 **	0.572 *	1.000	
表面疏水性	-0.767 **	-0.880 **	0.456	0.794 **	1.000

<sup>†</sup> \* 表示差异显著,  $P < 0.05$ ; \*\* 表示差异极显著,  $P < 0.01$ 。

## 3 结论

试验主要研究冷冻贮藏时间对原料猪肉中肌原纤维蛋白氧化程度的影响及其相关性。结果表明:随着冻藏时间的延长,肌原纤维蛋白中羰基含量逐渐上升,总巯基、自由氨基、内源性色氨酸荧光、表面疏水性含量总体呈下降趋势。相关性分析表明:随着冷冻贮藏时间的增加,肌原纤维蛋白的氧化程度加深。因此,即使在低温冻藏环境下仍不能阻止原料肉中的肌原纤维蛋白氧化,贮藏时间越长,肌原纤维蛋白氧化程度越深,原料肉品质下降愈明显。

### 参考文献

[1] 农村经济持续发展 乡村振兴迈出大步: 新中国成立 70 周年经济社会发展成就系列报告[J]. 新农业, 2019(18): 6-10.  
 [2] 张帅, 徐乐, 梁小慧, 等. 肉类冷冻解冻技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5 363-5 368.

[3] 李学鹏, 周明言, 周凯, 等. 大黄鱼冻藏过程中肌原纤维蛋白氧化及其功能性质的变化[J]. 中国食品学报, 2018, 18 (7): 171-179.  
 [4] VIEIRA C, DIAZ M T, MARTINEZ B, et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing[J]. Meat Science, 2009, 83 (3): 398-404.  
 [5] BUSTABAD O M. Weight loss during freezing and the storage of frozen meat[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41(1): 1-11.  
 [6] 潘君慧, 刘泽龙. 冻藏方式对猪肉肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(21): 313-316.  
 [7] 吴亮亮, 罗瑞明, 孔丰, 等. 蒸煮时间对滩羊肉蒸煮损失、嫩度及水分分布的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 19-23.

(下转第 165 页)

## 5 结论

试验提出了对残差网络采取替换激活函数与损失函数的方法,相比传统的 CNN 网络,识别准确率提高了 4.54%,表明引入残差学习方式且优化激活函数和损失函数后的网络分类性能更佳,采用残差网络对红枣表面缺陷检测的多分类效果较好,对其他水果的表面缺陷检测具有一定的应用价值。后续可采用 softmax 结合 center loss 的方法,或者使用交叉熵损失函数分类的方法对模型进行改进。试验中的误差来源除模型本身误差外,还有红枣照片采集时留下的高光等噪声对网络学习的干扰,后续可以考虑红色等有色光源的使用是否能减小红枣图像采集的噪声,以提供更好的分类图片。

### 参考文献

- [1] 蒋伟. 基于 OpenCV 的红枣纹理检测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017: 19-24.
- [2] 海潮, 赵凤霞, 孙烁. 基于 Blob 分析的红枣表面缺陷在线检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 126-129.
- [3] 苏军, 饶元, 张敬尧, 等. 基于 GA 优化 SVM 的干制红枣品种分类方法[J]. 洛阳理工学院学报: 自然科学版, 2018, 28(4): 68-72, 96.
- [4] YANN L C, LEON B, YOSHUA B, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86: 2 278-2 324.
- [5] 罗秀芝, 马本学, 李小霞, 等. 基于卷积神经网络干制哈密大枣纹理分级[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(12): 2 220-2 227.
- [6] 曾维亮, 林志贤, 陈永洒. 基于卷积神经网络的智能冰箱果蔬图像识别的研究[J]. 微型机与应用, 2017, 36(8): 56-59.
- [7] 彭俊. 基于卷积神经网络的交易环境下蔬果图像识别研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 18-25.
- [8] 李思雯, 吕建成, 倪胜巧. 集成的卷积神经网络在智能冰箱果蔬识别中的应用[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(1): 205-212.
- [9] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]//International Conference on Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe: [s.n.], 2012: 84-90.
- [10] KLAMBAUER G, UNTERTHINER T, MAYR A, et al. Self-normalizing neural networks [C]//Conference on Neural Information Processing Systems. Austria: Johannes Kepler University Linz, 2017: 3-7.
- [11] KAREN S, ANDREW Z. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. Computer Science, 2015(7): 1 409-1 556.
- [12] Caglar Gulcehre, Marcin Moczulski, Misha Denil, et al. Noisy activation functions[C]//International Conference on International Conference on Machine Learning. New York: [s.n.], 2016: 5-7.
- [13] 高惠琳. 基于卷积神经网络的军事图像分类[J]. 计算机应用研究, 2017(11): 323-325.
- [14] 罗会兰, 卢飞, 孔繁胜. 基于区域与深度残差网络的图像语义分割[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(11): 2 777-2 786.
- (上接第 160 页)
- [8] 李升升, 李瑞哲, 张强龙. 年龄对牦牛平滑肌食用品质的影响及其相关性分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 63-66, 180.
- [9] LIU Gang, XIONG Y L, BUTTERFIELD D A. Chemical, physical, and gel-forming properties of oxidized myofibrils and whey-and soy-protein isolates[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(5): 811-818.
- [10] CAO Yun-gang, AI N, TRUE A D, et al. Effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate incorporation on the physicochemical and oxidative stability of myofibrillar protein-soybean oil emulsions[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 439-445.
- [11] BEVERIDGE T, TOMA S J, NAKAI S. Determination of SH-and SS-groups in some food proteins using Ellman's reagent[J]. Journal of Food Science, 1974, 39(1): 49-51.
- [12] LERTITTIKUL W, BENJAKUL S, TANAKA M. Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein-glucose model system as influenced by pH[J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 669-677.
- [13] 曹云刚, 马文慧, 艾娜丝, 等. 不同氧化强度对肌原纤维蛋白结构及凝胶性能的影响[J/OL]. 食品科学. (2019-01-18) [2019-10-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20190118.1022.020.html>.
- [14] LUND M N, HEINONEN M, BARON C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: A review [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(1): 83-95.
- [15] XIONG Y L, PARK D, OOIZUMI T. Variation in the cross-linking pattern of porcine myofibrillar protein exposed to three oxidative environments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 57(1): 153-159.
- [16] MORZEL M, GATELLIER P, SAYD T, et al. Chemical oxidation decreases proteolytic susceptibility of skeletal muscle myofibrillar proteins[J]. Meat Science, 2006, 73(3): 536-543.
- [17] LI Chun-qiang, XIONG Y L, CHEN Jie. Oxidation-induced unfolding facilitates myosin cross-linking in myofibrillar protein by microbial transglutaminase[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(32): 8 020-8 027.
- [18] 刘宝华, 刘胜因, 田翔, 等. 储藏时间对大豆分离蛋白结构及凝胶性质的影响[J]. 中国食物与营养, 2018, 24(12): 36-41.
- [19] 李玲, 季慧, 段家玉. 绿原酸抑制猪肉肌原纤维蛋白氧化及 NDEA 生成的作用研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 29-33.