

豆粕酶解产物抑制肉丸氧化的应用研究

赵亚琦, 何伟伟, 吴长平, 苏国万

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文研究了豆粕的固态发酵-酶解产物 (Soybean Meal Hydrolysates, SMH) 的肽分子量与其抗氧化活性的相关性, 研究发现 SMH 多肽抗氧化能力与其分子量大小或 (和) 肽链长短显著相关, 肽段分子量越小, 抗氧化能力越高, 其中分子量 <3 ku 的肽段具有最高抗氧化活性, 在 SMH 功能性质中起主要贡献作用。在此基础上, 系统研究了 SMH 及其不同分子量肽段 (>10 ku、3~10 ku、<3 ku) 的添加对肉丸在 4 °C 冷藏过程中的硫代巴比妥酸值、巯基含量、色差、pH 的影响。研究发现, SMH 能够保持肉丸色泽, 有效地抑制脂肪氧化及蛋白氧化, 并减缓 pH 上升, 在 4 °C 冷藏条件下可保质至 13 d, 显著延长货架期, 表明豆粕发酵-酶解产物是一种优秀的肉制品抗氧化剂, 具有巨大的市场前景, 为实现豆粕的高附加值综合利用和肉丸品质提升提供理论和应用参考。

关键词: 肉丸; 豆粕; 酶解产物; 脂肪氧化; 蛋白氧化; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2017)5-196-201

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.5.031

Inhibitory Effects of Soybean Meal Hydrolysates on Oxidation: Application to Meatballs

ZHAO Ya-qi, HE Wei-wei, WU Chang-ping, SU Guo-wan

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The relation between antioxidant activity and molecular weight of soybean meal hydrolysates (SMH) was evaluated in this paper. The results indicated that the antioxidant activity of the SMH significantly correlated with the molecular weight and/or the length of peptide chains, and peptide fractions with lower molecular weight exerted a stronger antioxidant activity. Peptide fractions with a molecular weight of <3 ku showed the highest antioxidant activity and played a dominant role in the functional properties of the SMH. Based on this finding, the effects of addition of the SMH or its various peptide fractions (>10, 3~10, and <3 ku) into meatballs on thiobarbituric acid reactive substances, sulfhydryl content, color, and pH during the storage at 4 °C were systematically studied. The results revealed that the SMH maintained the color of meatballs, effectively inhibited oxidation of lipids and proteins, slowed down the increase in pH, and extended the shelf life to 13 d during the storage at 4 °C. Therefore, SMHs are excellent antioxidants for meat products and have bright market prospects. This paper may serve as a theoretical and practical reference for value-added utilization of soybean meal and for quality enhancement of meatball products.

Key words: meatball; soybean meal; hydrolysate; lipid oxidation; protein oxidation; antioxidation

肉丸作为人们生活中喜闻乐见的日常食品, 具有营养、方便、美味等特点。在加工贮藏运输过程中, 肉丸中丰富的蛋白质及脂肪在高温、光照、酶和氧气存在的情况下容易发生氧化反应, 且脂肪氧化与蛋白氧化之间相互促进^[1], 从而使得肉丸的色泽、风味、口感和营养等特性发生变化, 丧失食用价值。为了保证食品质量、延长货架期, 改善贮藏加工条件和使用

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31301555); 教育部专项科研基金项目 (20130172120022); 广东省科技计划项目 (2012A080800014)
作者简介: 赵亚琦 (1993-), 女, 在读硕士, 研究方向: 食品生物技术
通讯作者: 苏国万 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品生物技术

抗氧化剂是目前常用保藏手段; 虽然低温贮藏能有效降低内源酶的活性, 以及抑制微生物生长, 但无法抑制脂肪水解氧化和蛋白氧化的发生^[2]; 抗氧化剂主要是通过清除自由基、络合金属离子等途径达到延缓或抑制氧化的目的, 在现有肉制品中广泛应用, 但常用的化学抗氧化剂常伴有多种副作用, 可能会对人体造成不良影响而受到应用限制^[3]。因此, 天然食物源抗氧化的开发和利用是目前科研领域的研究新思路。

我国是大豆生产和消费大国, 年消费大豆约 8700 万 t, 其中有 60%以上的大豆被用于榨油。豆粕是大豆油的产业副产物, 每年约有 5500 万 t, 其中富含蛋白质 (46%以上) 及均衡的氨基酸组成, 是一种优质的大宗蛋白资源。但经过高温压榨和溶剂浸提, 豆粕

蛋白发生变性,难以直接利用,限制其应用领域,目前主要用作畜牧业和水产业饲料,造成资源严重浪费。因此,如何高效回收利用大豆粕中的蛋白质是大豆企业和科研工作者亟待解决的问题。微生物发酵和酶解处理均是改善豆粕营养品质的有效方法,不但能够破坏或消除豆粕中的抗营养因子,且可将豆粕蛋白降解为小分子多肽,在提升生物效价的同时赋予更多的生物活性。作者在前期实验中利用发酵和酶解技术共同水解大豆粕,不仅可得到较高的水解效率,极大利用蛋白资源,且制备得到的豆粕微生物法发酵-酶解产物(Soybean Meal Hydrolysates, SMH)具有较强的抗氧化能力,可视为一种优质的潜在食品抗氧化剂。

本研究试图通过添加 SMH,在提高肉丸营养价值的同时,抑制蛋白和油脂的氧化发生,以期达到改善肉丸品质的目的,具体研究是将 SMH 分级成不同大小分子量的肽段,在探究分子量大小与 SMH 抗氧化能力的基础上,进一步研究不同分子量肽段添加至肉丸中,对其在 4 °C 冷藏过程中硫代巴比妥反应产物(TBARS)、巯基含量、色差值及 pH 的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜猪肉:购于华南理工大学后勤综合市场;高温豆粕:由佛山市海天调味食品有限公司提供;米曲霉曲精沪酿 3.042:购于上海酿造一厂;其他化学试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

LDZX-30KBS 立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;ZJP-A1230 霉菌培养箱,上海智城分析仪器有限公司;THZ-82A 恒温振荡器,常州澳华仪器有限公司;UV-2100 型分光光度计,尤尼柯上海仪器有限公司;GL-21M 高速冷冻离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;Sartorius BP211D 分析电子天平,中科院广州化学研究所;PHS-3C 精密 pH 计,上海雷磁精密仪器厂;FJ200-S 数显高速分散均质机,上海昂尼仪器仪表有限公司;HSG-IIB-6 电热恒温水浴锅,上海仪表集团;Pellicon 超滤系统,德国赛多利斯集团;LABCONCO 冻干机,美国 LABCONCO。

1.3 试验方法

1.3.1 豆粕蛋白固态发酵-酶解产物(Soybean Meal Hydrolysates, SMH)及其不同分子量肽段的制备

以豆粕为原料,按照豆粕:水=5:4 的比例室温下浸湿 5 min,121 °C 下灭菌 15 min,即刻取出冷却至 40 °C 左右,接入 0.5% (总干重计)曲精,充分混匀,置于霉菌培养箱中培养 24 h (32 °C,湿度 95%)。发酵结束后将发酵豆粕粉碎均匀,按料液比 1:6 加入去离子水,于 55 °C 恒温振荡器中酶解 22 h 后,灭酶,在 8000 r/min 下离心 20 min,取上清液即为 SMH。采用膜通量分别为 10 ku 和 3 ku 的超滤膜对酶解液进行分级,分别获得不同分子量肽段(>10 ku、3~10 ku、<3 ku),旋转蒸发浓缩后冷冻干燥,获得 SMH 及不同分子量肽段(SMH-1、SMH-2 和 SMH-3)干粉,以备实验。

1.3.2 蛋白含量测定

采用国家标准 GB 5009.5-2010 测定 SMH 蛋白含量^[4]。

1.3.3 DPPH 自由基清除率测定

将 SMH 及其各肽段蛋白浓度均稀释至 1.0 mg/mL。取 2 mL 样液于试管内,加入 2 mL、0.2 mmol/L DPPH 溶液振荡均匀,室温下避光静置 30 min,于 517 nm 处测定吸光度值,计为 A_i ,同时测定 2 mL 样液加 2 mL 无水乙醇、(2 mL、0.2 mmol/L) DPPH 溶液加 2 mL 蒸馏水在相同反应条件下吸光度值,分别计为 A_j 和 A_c 。DPPH 清除率计算公式为:

$$\text{DPPH清除率(\%)} = \left[1 - \frac{A_i - A_j}{A_c} \right] \times 100$$

1.3.4 氧自由基清除能力(ORAC)测定

SMH 及其各肽段蛋白浓度稀释到 0.04 mg/mL。在 96 孔荧光板微孔中加入待测样品 20 μ L (以 20 μ L 磷酸盐缓冲液做空白),再加入 70 nmol/L FL,在 37 °C 下保温 15 min 后,用多道移液器迅速在各孔中加入 12 mmol/L AAPH 启动反应,酶标仪自动检测各孔荧光强度,在 37 °C 下以激发波长 485 nm,发射波长 520 nm 连续测定 100 次,每 1 min 测定 1 次,每个样品测定 3 次。ORAC 值计算以相对荧光强度计算,结果以 Trolox 当量 TE (μ mol Trolox Equivalent/g Protein)表示。

1.3.5 肉丸的制备工艺

瘦肉:白肉=3:1→绞碎成肉糜→配料(1.0% SMH 或其各肽段,1.5%食盐,0.3%复合磷酸盐,15%水)→搅拌→肉丸成型→100 °C 水浴 8 min→冷却至室温→4 °C 冰箱冷却至肉丸中心温度低于 6 °C→PE 真空包装→4 °C 冰箱保藏。

1.3.6 硫代巴比妥酸法(TBA)测定

冷藏过程中每 3 d 取样测定。取适量肉丸绞碎成肉糜,取 10 g,记为 m。添加 50 mL、7.5% TCA,均质 30 s,在 4 °C、8000 r/min 下离心 15 min,滤纸过

滤, 取上清液体积记为 V。取 2 mL 上清液及不同浓度梯度丙二醛溶液, 添加 2 mL、0.02 M TBA, 沸水浴 20 min, 冷却, 测定 532 nm 处吸光值。根据吸光值和丙二醛标准曲线计算上清液中丙二醛浓度, 记为 C。

$$\text{TBARS值}(\text{mg}/\text{kg}) = \frac{C \times V}{m}$$

1.3.7 巯基含量测定

冷藏过程中每 3 d 取样测定。取适量肉丸绞碎成肉糜, 取 10 g 加入 50 mL、pH 6.5 缓冲液 (150 mM NaCl, 25 mM KCl, 3 mM MgCl₂, 4 mM EDTA) 均质 30 s, 4 °C、6000 r/min 离心 15 min, 滤纸过滤。取 0.5 mL 滤液, 加入 2.5 mL Tris-Gly 溶液, 混合均匀, 再加入 0.02 mL、4 mg/mL 二硝基苯甲酸, 迅速混合后在 25 °C 下反应 30 min, 测定 412 nm 处吸光值, 记为 A₄₁₂。巯基含量计算如下:

$$\text{巯基含量}(\mu\text{mol}/\text{g}) = \frac{73.53 \times A_{412}}{C}$$

其中 73.53=10⁶/1.36×10⁴, 1.36×10⁴ 为摩尔消光系数, C 为上清液蛋白浓度, mg/mL。

1.3.8 色差测定

冷藏过程中每 3 d 取样测定。采用 WSC-S 色差计直接测定肉丸 L* 值及 a* 值。每个肉丸随机选取 3 处平滑面测定, 取平均值。

1.3.9 pH 测定

冷藏过程中每 3 d 取样测定。取适量肉丸绞碎成肉糜, 准确称取 3 g 于离心管中, 加入 27 g 蒸馏水, 均质 30 s, 8000 r/min 离心 10 min, 测定上清液 pH, 平行测定三次。

1.4 统计分析

每个实验重复 3 次, 结果表示为“平均值±标准差”。数据统计分析采用 SPSS 19.0 统计分析软件, 差异显著性(p<0.05)分析采用 ANOVA。采用 Origin 9.0 及 Excel 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 豆粕蛋白酶解产物 (SMH) 及其不同分子量肽段抗氧化能力

DPPH 清除率及氧自由基吸收能力 (ORAC) 通常作为可靠且有效的指标评价蛋白多肽的抗氧化能力, 但二者抗氧化机制有所不同。DPPH 清除率主要是基于转移电子反应测定还原氧化物的能力, 表征抗

氧化活性; 而 ORAC 则反映了蛋白多肽的供氢能力, 测定多肽通过竞争机制抑制底物与氢过氧自由基的相互作用从而清除氢过氧自由基的水平^[5]。

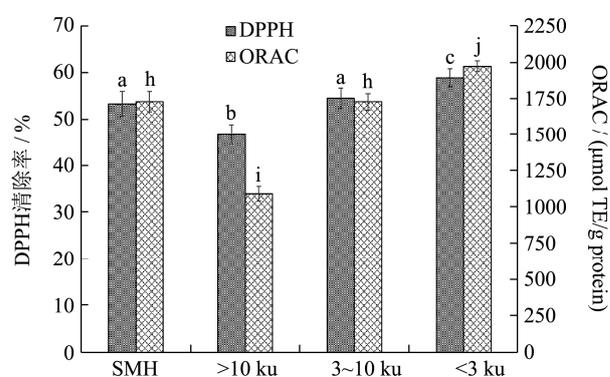


图1 SMH 及其不同分子量肽段的 DPPH 清除率及 ORAC 值

Fig.1 DPPH scavenging rate and ORAC value of the SMH and its peptide fractions of different molecular weights

注: 字母不同者表示差异显著 (p<0.05)。

如图 1 所示, 分子量<3 ku 的 SMH 肽段抗氧化能力最好, 其 DPPH 清除率及 ORAC 值分别是 59.07% 和 1976.46 μmol Trolox Equivalent/g, 显著高于其他分子量肽段 (p<0.05); 其次是 3~10 ku 肽段和 SMH; 分子量>10 ku 肽段 DPPH 清除率及 ORAC 值均为最低。由此可知, SMH 多肽抗氧化能力与其分子量大小或 (和) 肽链长短有关, 肽段分子量越小, 抗氧化能力越高。SMH 的抗氧化能力由各组分综合体现, 其中分子量<3 ku 肽段占 SMH 相对含量 78% 左右, 在 SMH 抗氧化作用中起重要作用, 另有研究表明分子量<3 ku 大豆肽具有较高的抗氧化能力^[6], 与本文结果相符。

食物蛋白源多肽作为一种潜在有效的抗氧化剂, 能够钝化活性氧、清除自由基、螯合氧化过度金属离子以及还原氢过氧化物^[7]。豆粕蛋白在微生物发酵和酶解作用下, 氨基酸基团不断暴露, 激发多肽与自由基相互作用, 降低自由基能量^[8]。SMH 具有良好的抗氧化能力, DPPH 清除率及 ORAC 值均较高, 以多种机制协同作用, 为维持肉丸新鲜、抗氧化损伤、延长货架期提供理论依据。

2.2 添加 SMH 的肉丸在保藏过程中脂质氧化

肉制品在贮藏过程中不可避免的发生脂肪氧化反应, 脂肪氧化是个复杂的过程, 一般可以分为酶促氧化和自动氧化。酶促氧化是脂肪在脂肪氧合酶作用下发生的氧化。自动氧化主要是在光、热和氧气等作用下, 产生自由基, 作用于脂肪酸, 引发链式反应发生的氧化。脂肪中脂肪酸残基含有活泼的不饱和键, 因此当油脂与空气接触时容易发生自发氧化作用。脂肪

的自动氧化是大多富含脂肪食品（肉制品）的主要变质原因。肉的败坏是过氧化物进一步分解生成低级脂肪酸、醛和酮和羧酸，并伴有不愉快的臭味。有研究表明，抗氧化肽能够通过螯合金属离子，作为供氢体或供电子体清除羟自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)，促进过氧化物的分解，竞争脂质氧化酶活性活性部位从而影响酶活性，来抑制脂肪氧化作用^[9]。目前评定脂肪氧化的方法主要有硫代巴比妥酸法(TBA)、过氧化值法(POV)、酸值法(AV)、色谱法及感官评定法等。TBA是检测肉制品最广泛使用的分析方法之一，它是利用脂肪氧化所产生的主要氧化终产物丙二醛与硫代巴比妥酸发生呈色反应，生成红色复合物，并在532 nm下有特征吸收，硫代巴比妥反应产物(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS)与肉制品的脂肪氧化程度存在定量相关性。一般来说，TBARS值越大，脂肪氧化的程度就越高，肉制品的败坏就越严重。在国外，TBARS值常用于生肉鲜度的测定，当TBARS值 >0.5 mg/kg时，氧化异味可感知。

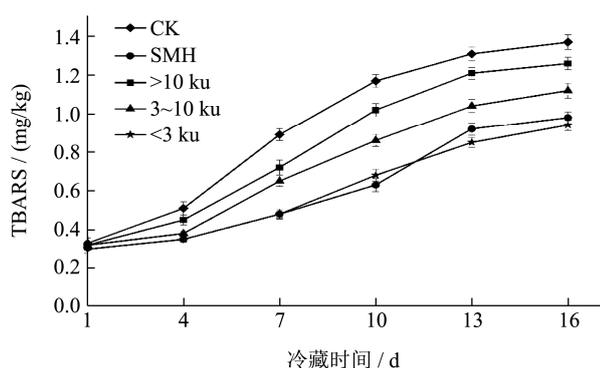


图2 添加SMH及其各肽段的肉丸保藏过程中TBARS变化
Fig.2 Changes in TBARS in the meatballs supplemented with the SMH or its peptide fractions during the preservation process

由图2可知，肉丸在冷藏过程中，TBARS值的不断增大，CK组肉丸TBARS值上升幅度最大，在冷藏第16 d已达到1.37 mg/kg，增加了近3倍；其余依次为添加 >10 ku、3~10 ku、SMH和 <3 ku肽段。冷藏第7 d时，除了SMH组和 <3 ku组外，其他组TBARS值均超过0.5 mg/kg。至16 d时，添加SMH及 <3 ku肽段组肉丸TBARS显著低于CK组($p<0.05$)，且均在国际认可范围内(0.98 mg/kg <1 mg/kg; 0.94 mg/kg <1 mg/kg)。SMH可显著抑制肉丸的脂肪氧化，其中分子量 <3 ku肽段效果显著，与之较好清除自由基的能力相匹配，表明其肽链长度大小、氨基酸组成、含量、排列顺序具有抑制肉丸脂肪氧化的特性。

2.3 添加SMH的肉丸在保藏过程中蛋白氧化

一般蛋白氧化与脂肪氧化共同发生，相互作用，相互促进。蛋白氧化是蛋白质由自由基直接诱导或及相关氧化副产物间接引发，某些特定的氨基酸残基发生反应，导致蛋白结构与功能改变，与氧化物亲和力增强，易于水解、聚合、交联^[10]。蛋白氧化导致氨基酸残基侧链氧化修饰(羰基化、巯基氧化、芳族羟基化)、肽主链断裂及蛋白分子交联聚合。肉蛋白氧化对肉制品的营养价值和功能性质产生不良影响，改变蛋白溶解度、疏水性、构象甚至酶敏感性，从而引起肉制品凝胶作用、结合作用、乳化作用、持水能力变化，使肉制品的质构、嫩度、多汁性及可消化性等品质下降^[11]。

巯基氧化(形成二硫键)在蛋白交联聚合中具有重要作用^[12]。蛋白分子中的巯基具有较高的反应活性，硫原子外层存在孤对电子，亲核性强，易发生氧化反应，巯基含量变化可表征蛋白氧化程度。

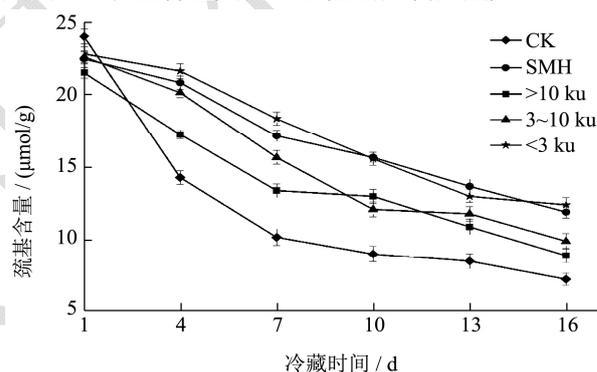


图3 添加SMH及其各肽段肉丸保藏过程中巯基含量变化

Fig.3 Changes in sulfhydryl content of the meatballs supplemented with the SMH or its peptide fractions during the preservation process

肉丸在冷藏过程中的巯基含量如图3所示，随着冷藏时间的延长，肉丸的巯基含量不断下降，蛋白氧化持续进行。CK组巯基含量显著下降($p<0.05$)，冷藏第4 d时已显著低于其他处理组($p<0.05$)，至冷藏16 d时下降了70.3%。添加SMH及分子量 <3 ku肽段肉丸抗蛋白氧化效果显著，巯基下降含量始终低于其他处理组，巯基含量在冷藏至16 d时分别下降了47.39%和46.01%。

巯基氧化形成二硫键和二硫交换导致巯基含量的下降。肌球蛋白的首尾端具有很多巯基，当肌球蛋白分子发生改变，暴露更多具有活泼性质的巯基，引发氧化反应，导致蛋白分子之间交联的形成^[13]。结果表明，添加SMH可以延缓巯基含量下降，防止蛋白交联形成二硫键，对蛋白氧化具有抑制作用。

2.4 添加 SMH 及其各肽段的肉丸保藏过程中色差变化

表 1 添加 SMH 的肉丸在保藏过程中色差变化

Table 1 Changes in color of the meatballs supplemented with the SMH during the preservation process

冷藏时间/d	CK		SMH		>10 ku	
	L*值	a*值	L*值	L*值	a*值	L*值
1	70.49±0.92 ^a	2.60±0.31 ^a	70.90±1.45 ^a	2.82±0.19 ^a	70.66±1.03 ^a	2.58±0.08 ^a
4	70.19±0.74 ^a	2.91±0.18 ^a	70.19±0.35 ^a	2.77±0.15 ^a	70.39±0.59 ^a	2.71±0.26 ^a
7	71.02±1.24 ^a	5.20±0.56 ^b	70.15±1.62 ^a	4.05±0.21 ^b	69.97±1.50 ^a	4.36±0.38 ^b
10	71.38±0.81 ^{ab}	6.38±0.14 ^c	71.24±0.86 ^a	5.48±0.21 ^c	71.15±1.48 ^a	5.92±0.20 ^c
13	71.84±0.95 ^{ab}	7.04±0.08 ^d	71.50±0.54 ^a	6.82±0.08 ^d	71.51±0.61 ^a	6.82±0.27 ^d
16	72.91±0.97 ^b	7.84±0.12 ^e	71.78±0.66 ^a	7.03±0.16 ^d	71.07±0.30 ^a	7.25±0.13 ^c

冷藏时间/d	3~10 ku		<3 ku	
	L*值	a*值	L*值	a*值
1	70.80±1.67 ^a	2.61±0.08 ^a	70.21±0.92 ^a	2.77±0.17 ^a
4	69.74±1.62 ^a	2.68±0.28 ^a	68.95±1.06 ^{ab}	2.86±0.20 ^a
7	70.32±0.95 ^a	3.35±0.34 ^b	69.41±0.92 ^{ab}	3.80±0.19 ^b
10	70.97±0.90 ^a	5.85±0.22 ^c	70.34±0.74 ^{ab}	5.14±0.43 ^c
13	70.82±0.74 ^a	6.77±0.44 ^d	70.70±1.21 ^{ab}	6.63±0.15 ^d
16	70.84±0.53 ^a	7.14±0.54 ^d	71.13±0.53 ^b	6.96±0.18 ^d

注：同一栏中字母不同者表示差异显著 ($p < 0.05$)。

肉制品的色泽是感官品质的重要指标之一，是影响消费者消费的重要因素。肉色泽的化学本质主要是肌红蛋白、血红蛋白以及血红素。而肉体系中，肌红蛋白和血红蛋白作为蛋白氧化的发起物^[14]，在保藏过程中易在氧气作用下受到自由基攻击，引起色泽变化。

由表 1 可知，在冷藏过程中不同处理组内肉丸 L* 值基本无显著差异 ($p < 0.05$)，而 a* 值逐渐增大，其中分子量 <3 ku 肽段增幅最小，其次是 SMH。在观察检测初期各处理组 L* 值及 a* 值与 CK 组相比较均无显著差异 ($p < 0.05$)，表明添加 SMH 对肉丸色泽无不良影响。

冷藏过程中，肉丸的颜色因为脂肪氧化、蛋白氧化和色素降解反应等原因而发生改，表现为肉丸 a* 值上升。SMH 分子量 <3 ku 肽段具有良好的抗氧化作用，减少自由基生成，延缓或抑制蛋白脂肪氧化，有利于保持肉丸色泽。此外，4 °C 冷藏条件适合肉丸保藏，L* 值无明显改变，肉色呈蒸煮后的灰白色。

2.5 添加 SMH 的肉丸在保藏过程中 pH 变化

pH 可以表征肉制品的新鲜程度，直接影响肉的品质，与颜色、嫩度、风味、持水性及保藏期等密切相关。肉的 pH 受到品种、宰前状况、屠宰方法、成熟过程、腐败作用及冻结方法等多重因素的影响。在加工贮藏过程中，肉制品在微生物及其酶的作用下，蛋

白质分解产生硫化物，致使血红蛋白变成含硫血红蛋白，肉色发绿，此外氨基酸进一步分解，产生不良气味，蛋白质变性生成碱性物质或微生物作用生成生物胺等碱性物质使 pH 值持续上升，失去食用价值。一般情况下，pH 处于 5.8~6.2 范围内为鲜肉，pH 值在 6.3~6.6 间为次鲜肉，pH 值 >6.7 为变质腐败肉。

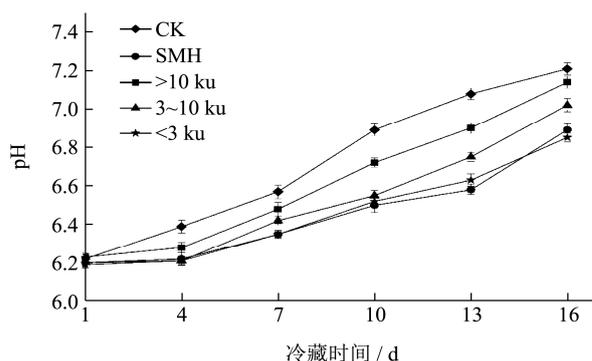


图 4 添加 SMH 及其各肽段的肉丸保藏过程中 pH 变化

Fig.4 Changes in pH of the meatballs supplemented with the SMH or its peptide fractions during the preservation process

由图 4 可知，肉丸 pH 值随着时间的延长持续增高。CK 肉丸 pH 变化最快，显著高于其他处理组 ($p < 0.05$)，在冷藏第 10 d pH 值达到 6.89 (变质)。添加 SMH 能够延缓肉丸 pH 值的增大，添加分子量 >10 ku 肽段及分子量 3~10 ku 肽段分别在 10 d (pH 6.72) 和 13 d (pH 6.75) 达到变质水平。分子量 <3 ku 肽段

及 SMH 肉丸抑制 pH 增大效果最佳, 至 16 d 变质。结果表明, 分子量<3 ku 及 SMH 对肉丸具有一定保鲜作用, 与蓝点马鲛鱼抗氧化肽段对熟肉糜 pH 值的影响结果相符^[15]。

3 结论

将豆粕经固体发酵-酶解获得的酶解产物 (SMH) 及其各分子量肽段添加至肉丸中, 可起到明显的抗氧化作用, 对保持肉丸色泽、延缓 pH 上升、抑制脂肪和蛋白的氧化发生作用显著, 其中<3 ku 肽段抗氧化能力最好, 可使得肉丸在 4 °C 保藏 13 d, 显著延长货架期。本研究提升了豆粕的利用价值, 拓展了豆粕酶解产物应用领域, 为豆粕酶解产物作为食品基料改善食品品质的产业应用提供参考。

参考文献

- [1] Utrera M, Morcuende D, Estévez M. Temperature of frozen storage affects the nature and consequences of protein oxidation in beef patties [J]. *Meat Science*, 2014, 96(3): 1250-1257
- [2] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri S, Tantratian S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 292-299
- [3] 肖峰. 肉制品脂肪氧化分析和抑制措施[J]. *肉类工业*, 2015, 11: 17-21
XIAO Feng. Analysis of lipid oxidation of meat products and its inhibition measures [J]. *Meat Industry*, 2015, 11: 17-21
- [4] GB 5009.5-2010, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定 [S]
GB 5009.5-2010, National food safety standard: determination of protein in foods [S]
- [5] Huang D, Ou B, Prior R L. The chemistry behind antioxidant capacity assays [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(6): 1841-1856
- [6] 焦宝利. 大豆肽抗氧化性及其协同作用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015
JIAO Bao-li. Antioxidant properties and synergistic effect of soybean peptides [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015
- [7] Zheng L, Su G, Ren J, et al. Isolation and characterization of an oxygen radical absorbance activity peptide from defatted peanut meal hydrolysate and its antioxidant properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(21): 5431-5437
- [8] Elias R J, Kellerby S S, Decker E A. Antioxidant activity of proteins and peptides [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2008, 48(5): 430-441
- [9] Chen H, Muramoto K, Yamauchi F. Structural analysis of antioxidative peptides from soybean. beta-conglycinin [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(3): 574-578
- [10] 朱卫星, 王远亮, 李宗军. 蛋白质氧化机制及其评价技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2011, 11: 483-486
ZHU Wei-xing, WANG Yuan-liang, LI Zong-Jun. Research progress of protein oxidation mechanism and evaluation technology [J]. *Science & Technology of Food Industry*, 2011, 11: 483-486
- [11] 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, QIU Chun-yang, et al. Research progress on protein oxidation mechanisms and its effects on meat quality [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology*, 2015, 15(1): 173-181
- [12] Traore S, Aubry L, Gatellier P, et al. Effect of heat treatment on protein oxidation in pig meat [J]. *Meat Science*, 2012, 91(1): 14-21
- [13] Nikoo M, Benjakul S, Xu X. Antioxidant and cryoprotective effects of *Amur sturgeon* skin gelatin hydrolysate in unwashed fish mince [J]. *Food Chemistry*, 2015, 181: 295-303
- [14] Baron C P, Andersen H J. Myoglobin-induced lipid oxidation. A review [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(14): 3887-3897
- [15] 彭新颜, 孟婉静, 周夕冉, 等. 蓝点马鲛鱼皮抗氧化肽段对熟肉糜脂肪和蛋白氧化抑制作用的研究[J]. *水产学报*, 2015, 39(11): 1730-1741
PENG Xin-yan, MENG Wan-jing, ZHOU Xi-ran, et al. Antioxidant peptides of *Scorpaenopsis niphonius* skin and its inhibitory effect on lipid and protein oxidation of cooked patties [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(11): 1730-1741