

化学作用力对皮蛋蛋黄凝胶形成的影响

Effect of intermolecular interaction on gel formation of preserved egg yolk

艾民珉^{1,2} 汤婷^{1,3} 蒋爱民^{1,4} 杨益嘉¹ 游玉婷¹

AI Min-min^{1,2} TANG ting^{1,3} JIANG Ai-min^{1,4} YANG Yi-jia¹ YOU Yu-ting¹

(1. 华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642; 2. 畜禽产品精准加工与安全地方联合工程研究中心, 广东 广州 510642; 3. 广东省畜禽产品加工工程技术研究开发中心, 广东 广州 510642; 4. 广东省食品质量安全重点实验室, 广东 广州 510642)

(1. College of Food Science and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2. Livestock and Poultry Product Precision Processing and Safety Research Center, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. Guangdong Livestock Products Processing Research Center, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Food Quality and Safety, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

摘要:采用清料法腌制皮蛋,利用荧光光度计、傅里叶红外光谱(FTIR)等技术监测腌制和后熟过程中化学作用力对蛋黄凝胶形成的影响。结果表明:在强碱作用下,外层蛋黄蛋白质二级结构 α -螺旋与 β -折叠之和下降了54.17%,表面疏水性显著降低($P < 0.05$),离子键和二硫键含量的显著增加($P < 0.05$)促使蛋白质发生交联聚集生成外层蛋黄凝胶;溏心蛋白质二级结构 α -螺旋与 β -折叠之和上升了54.05%,表面疏水性下降不明显($P > 0.05$),疏水相互作用及二硫键含量的显著增加($P < 0.05$)促使溏心逐渐转化为外层蛋黄,增强了蛋黄凝胶强度;凝胶电泳结果显示,外层蛋黄蛋白质较溏心蛋白质先发生碱变性,其中较稳定存在的蛋白质为高密度脂蛋白。

关键词:皮蛋;蛋黄;凝胶强度;表面疏水性;巯基;二级结构

Abstract: The preserved eggs were processed by immersion method. The effect of internal interactions on the formation of egg yolk gel during salting and ageing were determined by fluorescence spectrophotometer and FTIR et al. The sum of α -helical and β -turn of the secondary structure of the exterior egg yolk protein decreased by 54.71% under strong alkaline environment, with the surface hydrophobicity decreased significantly ($P < 0.05$), and the dramatic increase of ion bonds and disulfide bonds promoted the egg yolk proteins to form a gel. The sum of α -helical and β -turn of the secondary structure of the interior egg yolk protein increased by 54.05%, and the changes of surface hydrophobicity was not obviously ($P > 0.05$).

基金项目:广东省畜禽产品加工工程技术研究开发中心建设项目(编号: E15391)

作者简介:艾民珉,男,华南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:蒋爱民(1957—),男,华南农业大学教授,博士。

E-mail: jiangaimin20000@163.com

收稿日期:2018-03-01

The obvious increase of hydrophobic interaction and disulfide bond caused the interior egg yolk to transform into the exterior egg yolk gradually, which also enhanced the gel strength of the egg yolk. The result of gel electrophoresis showed that the exterior egg yolk protein was alkaline denatured earlier than interior egg yolk, and the more stable protein was high-density lipoprotein.

Keywords: preserved egg; egg yolk; gel strength; surface hydrophobicity; sulfhydryl groups; secondary structure

皮蛋是中国传统的生食蛋制品之一,具有色泽美观、风味浓郁、营养丰富等特点^[1-2]。皮蛋的形成主要是利用氢氧化钠与蛋白质等成分作用,使其发生物理化学变化形成凝胶状态^[3-5]。传统腌制工艺里会添加氧化铅,而铅的作用目前比较认可的说法是“堵孔”学说^[6],即铅能与蛋白质等生成难溶物沉积于蛋壳和壳膜表面阻止氢氧化钠进一步进入蛋内部,避免蛋清“碱伤”现象的发生^[7]。但是铅会在人体内积累,对人体健康造成危害,尤其对婴幼儿智力发育有不良影响^[8]。故近年来,学者对于皮蛋无铅工艺研究较多^[9-11],比如采用添加锌、铜等来替代铅的作用,同时与氢氧化钠等混合制成碱液,即清料法腌制液,解决了传统腌制泥中重金属超标和腌制出的皮蛋品质不稳定等问题。

蛋黄主要由33.8%的脂肪和14.5%的蛋白质^[12]组成,也是皮蛋的主要构成部分。蛋清凝胶是依靠离子键与二硫键作用形成球状蛋白质聚集体,而蛋黄凝胶的形成受水分和盐分的影响^[13]。目前,对于皮蛋中蛋清凝胶的形成机理及改性研究较多,也较为成熟,但对于蛋黄凝胶形成机理及金属离子调控等研究较少且仍未阐明^[1]。本试验采用清料法腌制皮蛋,对皮蛋腌制过程中蛋黄内部化学作用力和凝胶强度进行了监测,旨在为蛋黄凝胶形成机理的探究及皮蛋品质控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鸭蛋:广州市天河区长湴市场;

8-苯胺基-1-萘磺酸铵(ANS):分析纯,上海科顺生物科技有限公司;

5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB):分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器设备

紫外分光光度计:UV-2600型,日本岛津公司;

荧光分光光度计:RF-5301PC型,日本岛津公司;

均质机:HPH2000/4型,德国IKA公司;

傅里叶变换红外光谱仪:Vertex70型,德国Bruker公司;

高速冷冻离心机:Eppendorf 5804R型,德国艾本德科技公司;

物性分析仪:TA.XT.Plus型,英国SMS公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程 选取65~75 g新鲜鸭蛋数枚,用流动水冲洗表面脏物,晾干后备用。按照以下配方配制腌制液:4.5% NaOH,3.5%食盐,0.1% CuSO₄,0.1% FeSO₄,0.1% ZnSO₄,0.1%红茶末。将晾干后的新鲜鸭蛋浸泡于腌制液中,腌制4周后出缸,流水冲净鸭蛋表面残留碱液后晾干,用石蜡包裹皮蛋,后熟2周。分别在腌制7,14,21,28,35,42 d时随机选取10枚进行分析测试。

1.3.2 凝胶强度测定 使用直径为50 mm的圆柱型探头P/50,对每个样品进行单轴向压缩,压缩距离4 mm,触发力4.0 g。测试前速0.5 mm/s,测试速度0.5 mm/s,测试后速0.5 mm/s。

1.3.3 表面疏水性的测定 称取1 g皮蛋黄,加入10 mL pH 7.0的磷酸缓冲液,均质后于4 000×g离心10 min,取上清液备用。将离心后的样品上清液蛋白质浓度稀释为0.01 mg/mL。取4 mL稀释液,添加20 μL 8 mmol/L的ANS为荧光探针,激发波长为390 nm,扫描范围为400~600 nm。

1.3.4 傅里叶变换红外光谱分析 精确称取100 mg KBr和1.2 mg冷冻干燥后的样品,用玛瑙研钵研磨至没有光泽后压片。将压好的样品置于全反射附件(ATR)上进行全波段(4 000~600 cm⁻¹)扫描,扫描次数为16次,分辨率为4 cm⁻¹。以相应未添加样品的KBr为背景,扣除背景后得到红外光谱图。利用OMNIC 6.0数据处理软件和Peakfit 4.12软件对数据进行处理,拟合后使残差<0.01,根据各积分面积计算二级结构所占百分含量。

1.3.5 游离巯基和总巯基的测定 参考文献[14]。

1.3.6 离子键、氢键、疏水相互作用和二硫键的测定 参考文献[15]。

1.3.7 凝胶电泳(SDS-PAGE) 凝胶电泳使用5%和12%分离叠加凝胶。称取3 g蛋黄加入27 mL 5% SDS,并于12 000 r/min的匀浆器中快速分散1 min,将匀浆在85℃下

加热1 h后,于7 500×g离心10 min。用样品处理液将蛋白质浓度调整到1 mg/mL,取20 μL进行电泳,凝胶电泳单元的恒定电压为200 V/板,凝胶的染色用考马斯亮蓝R-250(0.125%)、25 mL/100 mL甲醇和10 mL/100 mL醋酸。脱色用40 mL/100 mL甲醇和10 mL/100 mL醋酸。

1.3.8 统计分析 运用Origin 8.5和SPSS 16.0统计软件进行多重比较、LSD检验以及作图。

2 结果与分析

2.1 蛋黄凝胶强度的变化

由图1可知,腌制过程中蛋黄的凝胶强度变化显著($P < 0.05$),而在后熟期间变化不显著($P > 0.05$)。腌制过程中氢氧化钠逐渐透过蛋壳与蛋壳膜进入蛋清和蛋黄内,使得蛋清呈透明凝胶状,而蛋黄逐渐呈外部凝胶、溏心黏稠状。氢氧化钠与蛋黄中油脂发生皂化反应使得表面蛋黄开始凝固,同时蛋白质发生碱变性,生成的变性蛋白质之间发生交联,使得原本柔软的外层蛋黄呈凝胶状,凝胶强度在腌制期间显著增加。皮蛋出缸后,没有氢氧化钠的持续渗透,且水分逐渐散失,使得蛋黄凝胶强度在28~35 d时显著增加($P < 0.05$),而后熟期间皮蛋内部微环境趋于稳定,故在后熟过程中凝胶强度变化不明显($P > 0.05$)。

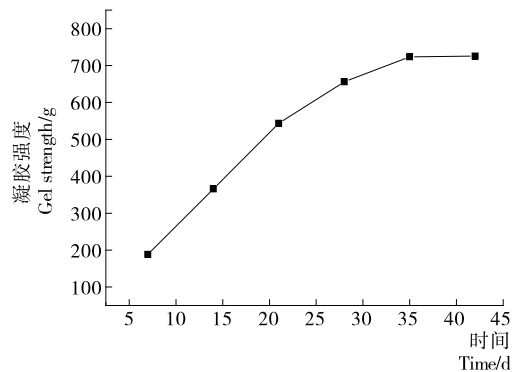


图1 凝胶强度的变化

Figure 1 Changes in gel strength of preserved egg yolk

2.2 蛋黄表面疏水性的变化

ANS可用作荧光标记来反映蛋白质的表面疏水特性及监测蛋白质的变性过程,其常与阴离子蛋白结合^[6]。皮蛋在腌制和后熟过程中的外源性荧光光谱见图2。外层蛋黄和溏心蛋白质的荧光峰值随腌制时间的延长逐渐降低,其中外层蛋黄峰值在14~42 d时下降显著($P < 0.05$),而溏心峰值在7~14 d时下降显著($P < 0.05$),在14~42 d时下降不明显($P > 0.05$),说明外层蛋黄在14~28 d时发生了明显的变性,而溏心在整个腌制和后熟过程中的蛋白质变性较缓慢。氢氧化钠的渗入,改变了酸碱平衡环境,变性后的蛋白质结构逐渐变得有序,空间结构变得可延伸,使得更多极性基团暴露。极性基团以非共价键的方式与渗透的阴离子及蛋白质相结合,导致非极性基团和阴离子增加,荧光强度也相应增加。而蛋清凝胶的形成使得氢氧化钠渗透进入蛋黄的速率下降,凝固的外层蛋黄进一步减缓了氢氧化钠渗透进入溏心的速率,说明蛋黄蛋白质的变性会使表面疏水性下降。同

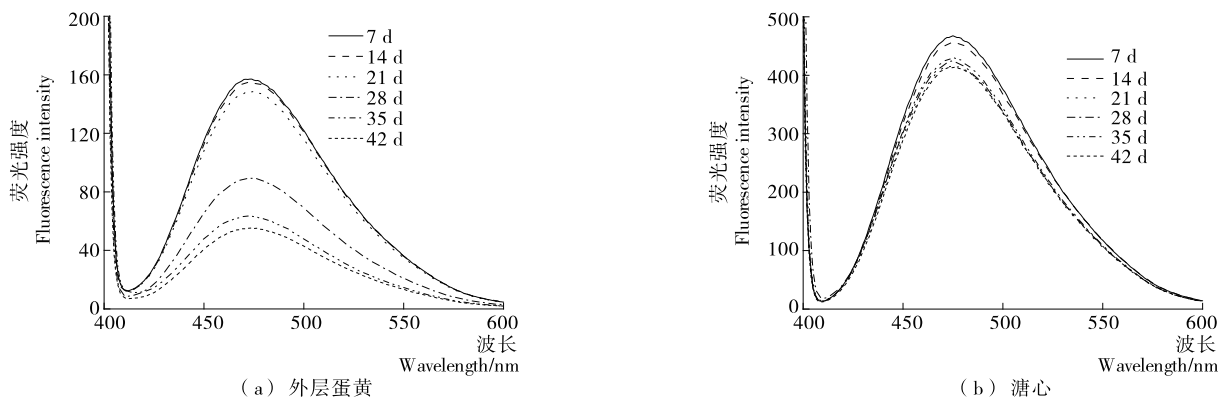


图 2 表面疏水性的变化

Figure 2 Changes in surface hydrophobicity of preserved egg yolk

时,溏心蛋白质的荧光峰值是外层蛋黄的 3~10 倍,说明外层蛋黄蛋白质比溏心蛋白质变性严重。

2.3 FTIR 结果分析

酰胺 I 带常用于反映蛋白质二级结构,主要是靠 C=O 的伸缩振动引起红外的吸收变化^[17]。1 600~1 640 cm^{-1} 被划分为 β 折叠,1 640~1 650 cm^{-1} 为 γ -随机结构,1 650~1 660 cm^{-1} 为 α -螺旋结构,1 660~1 700 cm^{-1} 为 T-转角^[18]。蛋白质的紧密程度可由 β -折叠和 α -螺旋结构之和反映,同时这也能代表蛋白质分子内总相互作用氢键。Ji 等^[19]和郑华等^[20]曾报道过,新鲜蛋黄的 β -折叠、 γ -随机结构、 α -螺旋结构和 T-转角的比例分别为 46.04%,0.00%,41.97%,18.62%。皮蛋腌制和后熟过程中蛋黄蛋白质的二级结构变化见表 1。其中外层蛋黄蛋白质的 β -折叠下降明显($P<0.05$),T-转角显著增加($P<0.05$), γ -随机结构在腌制 28 d 时开始出现,而 α -螺旋在 28 d 时消失,溏心蛋白质各部分二级结构的变化与外层蛋黄相反,说明外层蛋黄蛋白质二级结构比溏心蛋白质被破坏的严重。因为外层蛋黄中氢氧化钠含量的增加速率快于溏心部分,所以外层蛋黄蛋白质较快发生碱变性,使得溏心部分发生相应的物理状态变化慢于外层蛋黄,这也表明

溏心部分发生的变化是外层蛋黄变化的延续。蛋黄蛋白质二级结构的变化与蛋黄在腌制过程中出现的外层蛋黄凝胶化、溏心部分变得黏稠相一致。外层蛋黄蛋白质的 α -螺旋和 β -折叠之和呈下降趋势,而溏心蛋白质的 α -螺旋和 β -折叠之和比例上升,说明总相互作用氢键对稳定的外层蛋黄凝胶作用较小,而对逐渐转变为外层蛋黄的溏心有重要作用。

2.4 蛋黄腌制过程中游离巯基与总巯基的变化

皮蛋在腌制和后熟过程中游离巯基和总巯基的变化见图 3。外层蛋黄的游离巯基下降缓慢($P>0.05$),溏心的游离巯基和总巯基均下降显著($P<0.05$),而外层蛋黄总巯基呈先增加后下降趋势,在第 14 天时达到最大值(32.34 $\mu\text{mol/g} \cdot \text{Pro}$)。郑华等^[20]曾报道新鲜蛋黄的巯基含量为 57 $\mu\text{mol/g} \cdot \text{Pro}$ 。说明蛋黄在腌制 0~7 d 时,巯基含量大幅度下降,而在腌制和后熟过程中游离巯基变化不明显,原因可能是外层蛋黄蛋白质的变性等因素使得巯基在前期转化成了二硫键。外层蛋黄总巯基含量比游离巯基平均高 3.44 $\mu\text{mol/g} \cdot \text{Pro}$,而溏心总巯基含量比游离巯基高 0.29 $\mu\text{mol/g} \cdot \text{Pro}$,表明外层蛋黄中分子内部巯基的数量要比溏心多。蛋黄中的蛋白质是与不同质量脂质结合的磷蛋白,共有 316 种,占比较高的有

表 1 二级结构的变化

Table 1 Variation of secondary structure constitution

腌制时间/d	样品	1 600~1 640 cm^{-1} β 折叠/%	1 640~1 650 cm^{-1} γ -随机结构/%	1 650~1 660 cm^{-1} α -螺旋/%	1 660~1 700 cm^{-1} T-转角/%	α -螺旋+ β -折叠/%
7	外层蛋黄	31.43	0.00	43.69	24.88	75.12
	溏心	24.34	27.76	0.00	47.89	24.34
14	外层蛋黄	29.37	0.00	45.61	25.03	74.98
	溏心	24.09	26.64	0.00	49.26	24.09
21	外层蛋黄	31.33	0.00	44.49	21.54	75.82
	溏心	23.86	26.65	0.00	49.49	23.68
28	外层蛋黄	20.59	29.00	0.00	50.42	20.59
	溏心	34.67	0.00	42.41	22.92	77.08
35	外层蛋黄	21.16	28.38	0.00	50.47	21.16
	溏心	34.12	0.00	41.41	24.47	75.53
42	外层蛋黄	20.95	28.57	0.00	50.48	20.95
	溏心	36.24	0.00	42.15	21.62	78.39

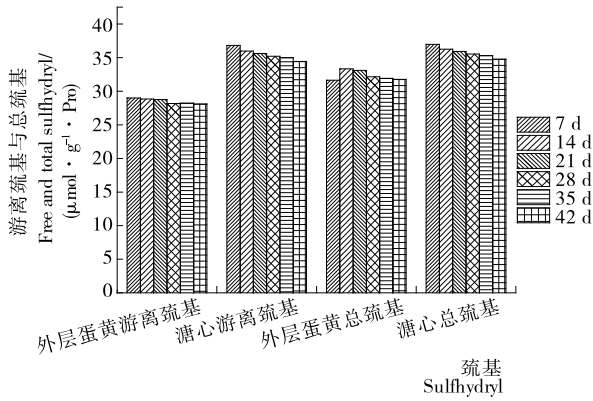


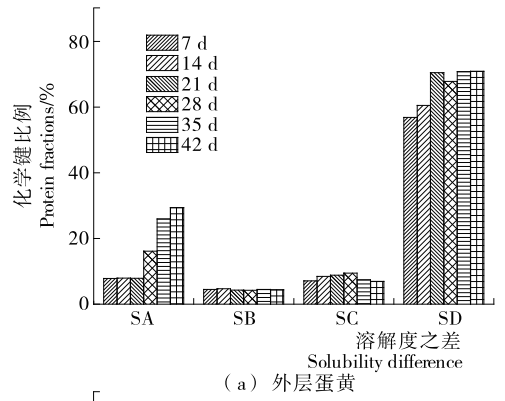
图3 腌制和后熟过程中蛋黄游离巯基和总巯基的变化
Figure 3 Changes in total and free sulfhydryl content of preserved egg yolk

低密度脂蛋白(65%)、高密度脂蛋白(16%)、卵黄球蛋白(10%)和卵黄高磷蛋白(4%)^[21]。其中高密度脂蛋白能在高碱度下形成聚集体但并不是依靠巯基或二硫键的作用,而二硫键是球形蛋白质形成凝胶的主要作用力,表明蛋黄中蛋白质巯基的变化主要来自于卵黄球蛋白^[22-23]。蛋黄接触氢氧化钠的时间晚于蛋清,变性后的卵黄球蛋白快速通过化学键与其它蛋白质发生交联而形成凝胶,进一步渗透的氢氧化钠与溏心中油脂发生皂化反应,不同等电点的蛋黄蛋白质逐渐变性聚集转变为外层蛋黄凝胶,形成了皮蛋黄黄色层分明的特点。

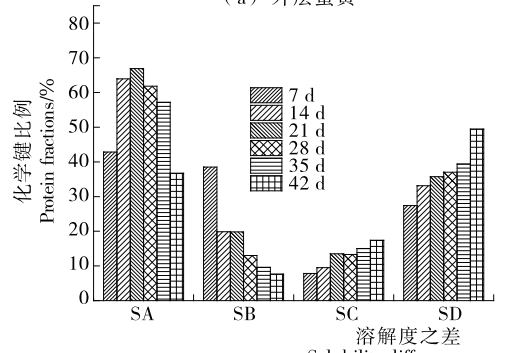
2.5 蛋黄离子键、氢键、疏水相互作用和二硫键的变化

蛋黄在不同腌制和后熟期间的化学作用力变化见图4。由图4可知,外层蛋黄中的SA和SD显著增加($P < 0.05$),溏心中的SA、SC和SD占比较大,表明外层蛋黄分子间作用力主要是离子键和二硫键,而溏心分子间作用力主要是离子键、疏水相互作用和二硫键。

离子键主要受负电荷的影响,能阻碍凝胶的形成,但外层蛋黄形成了凝胶,且其比例显著增加($P < 0.05$)。在腌制前期氯化钠较氢氧化钠渗透速度快,外层蛋黄表面正电荷较多,而后期氯化钠渗透速率下降及蛋白质变性使得表面覆盖较多负电荷,离子键含量增加。溏心离子键占比较大且呈先增大后降低趋势,在21 d时达到最大值66.41%。表明在前21 d时由于水分的降低以及氢氧化钠的渗入使得蛋白质表面负电荷增加,而后期氯化钠含量的增加降低了表面负电荷的相互作用,离子键降低。氢键是维持蛋白质二级结构的主要作用力,疏水相互作用是维持蛋白质三级结构的主导作用力,它对蛋白质结构的稳定和功能性性质具有重要的作用。有研究^[24]表明蛋白质的疏水性对蛋白质分子的凝聚作用有显著影响。外层蛋黄的SB与SC占比较小,说明氢氧化钠的渗透造成多肽链末端官能团被电离,使得氢键和疏水相互作用占比较小。溏心的SB下降显著($P < 0.05$),SC增加明显($P < 0.05$),表明溏心蛋白质在腌制过程中逐渐发生变性而聚集形成凝胶,增加凝胶强度。二硫键是形成凝胶的重要化学键,也是维持蛋白质空间结构的重要次级键,当蛋白质受到外界环境的影响时,二硫键会转化为巯基,从而破坏蛋白



(a) 外层蛋黄



(b) 溏心

SA表示蛋黄在溶剂A中的溶解度,代表离子相互作用;SB表示蛋黄在溶剂A与B的溶解度之差,代表氢键;SC表示蛋黄在溶剂B与C的溶解度之差,代表疏水相互作用;SD表示蛋黄在溶剂C与D的溶解度之差,代表二硫键^[13]

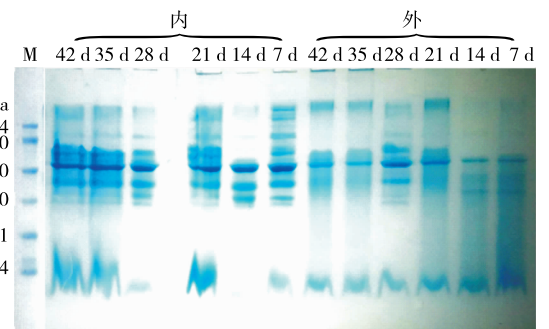
图4 化学作用力的变化

Figure 4 The changes of intermolecular interaction

质的空间结构。外层蛋黄和溏心的SD占比均较大,变化也显著($P < 0.05$),说明在强碱作用下蛋黄蛋白质在腌制和后熟过程中发生了变性,多肽链之间的巯基转化为二硫键,促进了蛋白质之间发生交联并形成凝胶,提高了凝胶强度。

2.6 SDS-PAGE 分析

由图5可知,标准蛋白的分子量为14.4~97.2 kDa。以标准蛋白的迁移率作为对照,根据样品的相对迁移率,来判断不同腌制时期蛋黄蛋白质的变化。对比各样品的电泳结果发现,外层蛋黄蛋白质的主要条带集中在43.0 kDa附近,且条带数量从3条减少至1条,溏心蛋白质在7 d时主要有



M. 标准蛋白 外, 外层蛋黄 内, 溏心

图5 蛋黄凝胶电泳图

Figure 5 SDS-PAGE patterns of preserved egg yolk

7条,碱浓度的增加使得部分溏心蛋白质分解,条带数量减少。外层蛋黄和溏心凝胶电泳中均在43.0 kDa附近存在条带,该蛋白质可能是高密度脂蛋白,说明与其它蛋白质相比,高密度脂蛋白能在碱性环境中稳定存在。在氢氧化钠的作用下,蛋黄脂蛋白被破坏,蛋白质与油脂分离,油脂与碱发生皂化反应使得外层蛋黄开始凝固,蛋白质分解成小片段多肽,这些多肽通过内部化学键发生交联包裹水分而富有弹性,凝胶强度增加。蛋黄蛋白质的电泳结果与其二级结构的变化一致。

3 结论

研究皮蛋加工过程中蛋黄内部化学作用力及其凝胶强度的变化,对揭示蛋黄凝胶的形成机理具有重要意义。结论如下:① 外层蛋黄蛋白质的变性程度强于溏心蛋白质,且其表现出的蛋白质表面疏水性显著下降,影响着蛋黄内蛋白质的聚集;② 外层蛋黄凝胶的形成主要依靠离子键和二硫键的作用,氢键和疏水相互作用贡献较小;③ 溏心逐渐转变为外层蛋黄凝胶,形成色层分明的特点,增强了蛋黄凝胶强度,其中疏水相互作用和二硫键起主要作用,离子键和氢键作用显著减弱;④ 皮蛋中大部分蛋黄蛋白质分解成小片段多肽,比较稳定的蛋白质可能是高密度脂蛋白。本试验对蛋黄的形成机理进行了讨论,但仅监测了各种化学作用力对蛋黄凝胶形成的影响,对于蛋黄内部各种成分对其凝胶形成的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 赵燕,徐明生,涂勇.皮蛋加工相关机理研究进展[J].食品科学,2010,31(17):472-475.
- [2] 黄琼,吕峰.无铅皮蛋保鲜工艺的研究[J].现代食品科技,2009,25(7):804-806.
- [3] ZHAO Yan-yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Changes of microstructure characteristics and intermolecular interactions of preserved egg white gel during pickling[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 323-330.
- [4] 周黎,张雅玮,刘玮,等.低钠盐对皮蛋的钠钾含量、硬度及蛋白质二级结构的影响[J].食品工业科技,2016,37(12):139-143.
- [5] 张蓉真,刘树滔,林晓辉,等.皮蛋加工过程中蛋白质变化的研究[J].福建农业科技,1998(S1):69-70.
- [6] 万速文,张声华.皮蛋加工中OH⁻的渗透过程[J].食品科学,1998,19(6):27-29.
- [7] 刘焱,刘伦伦,周赞,等.金属盐对清料法腌制皮蛋品质的影响[J].现代食品科技,2015,31(2):196-204.
- [8] 张献伟,郭善广,蒋爱民,等.锌铜法加工无铅皮蛋技术[J].食品与机械,2011,27(2):149-152.
- [9] 郭伶,李慧.温度对加锌工艺皮蛋质量的影响[J].中国家禽,2015,37(2):42-44.
- [10] 周赞.不同腌制方法和不同金属盐类对皮蛋质量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2012:28-29.
- [11] BU Hong-yu, MA Mei-hu. Different effects of zinc salts on preserved egg processing [J]. Food Science, 2011, 32(13): 136-144.
- [12] 陈有亮,刘竹青,李永,等.鸭蛋加工技术的创新研究[J].中国家禽,2017,39(6):1-4.
- [13] EISER E, MILES C S, GEERTS N, et al. Molecular cooking: physical transformations in Chinese 'century' eggs[J]. Soft Matter, 2009, 5(14): 2725-2730.
- [14] 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.
- [15] PEREZ-MATEOS M, LOURENCO H, MONTERO P, et al. Rheological and biochemical characteristics of high-pressure-and heat-induced gels from blue whiting (Micromesistius poutassou) muscle proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(1): 44-49.
- [16] 王守业,余华明.荧光探针在蛋白质研究中的应用[J].大学化学,1998,13(3):5-10.
- [17] JACKSON M, MANTSCH H H. The use and misuse of FTIR spectroscopy in the determination of protein structure[J]. Critical Reviews in Biochemistry & Molecular Biology, 1995, 30(2): 95-120.
- [18] SUREWICZ W K, MANTSCH H H, CHAPMAN D. Determination of protein secondary structure by Fourier transform infrared spectroscopy: a critical assessment[J]. Biochemistry, 1993, 32(2): 389-394.
- [19] LI Jing, LIU Hui-ping, CAO Chun-ling, et al. Chemical and structural changes in preserved white egg during pickled by vacuum technology [J]. Food Science and Technology International, 2013, 19(2): 123-131.
- [20] 郑华,彭辉,林捷,等.食盐对咸蛋黄蛋白质特性的影响[J].食品科学,2013,34(1):83-87.
- [21] 马美湖.蛋与蛋制品加工学[M].北京:中国农业出版社,2003:59.
- [22] HUOPALAHTI R, LOPEZ-FANDINO R, ANTON M, et al. Bioactive egg compounds[M]. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1-31.
- [23] HWANG J S, LAI K M, HSU K C. Changes in textural and rheological properties of gels from tilapia muscle proteins induced by high pressure and setting [J]. Food Chemistry, 2007, 104(2): 746-753.
- [24] YOUNG L, JERNIGAN R L, COVELL D G. A role for surface hydrophobicity in protein-protein recognition [J]. Protein Science A Publication of the Protein Society, 2010, 3(5): 717-729.