

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.04.009

贮藏过程中蛋黄蛋白质结构与功能特性变化

朱庆香¹, 刘钰¹, 牟俊臣², 杨毅², 王庆玲^{1*}

(1. 石河子大学 食品学院, 新疆 石河子 832003; 2. 图木舒克丝路驼铃商贸有限责任公司, 新疆 图木舒克 843900)

摘要: 为明确贮藏过程中鸡蛋品质与蛋黄蛋白质结构的变化, 该文将新鲜鸡蛋于(22±1) °C、相对湿度 45% 条件下贮藏 28 d, 探究贮藏过程中鸡蛋新鲜度、蛋黄蛋白质理化性质和加工特性的变化。研究表明: 随贮藏时间(0~28 d) 延长, 鸡蛋哈氏单位和蛋黄指数明显下降, 鸡蛋品质持续劣变。蛋黄蛋白质羰基含量明显增加、总巯基含量明显下降, 表明蛋黄蛋白质的氧化反应持续进行。贮藏过程中, 蛋黄蛋白质表面疏水性先上升至 12.21 后下降至 7.23, 二级结构则由有序向无序转变, 蛋黄蛋白质结构被破坏。贮藏至 14 d 与 21 d 时, 蛋黄乳化性能和起泡性能分别达到最优, 贮藏对蛋黄凝胶性能的影响不显著($p>0.05$)。综上, 贮藏导致蛋黄蛋白质结构改变, 进而改变蛋黄的加工性能。
关键词: 鸡蛋; 贮藏; 蛋黄; 蛋白质; 结构; 功能

Changes in Structure and Functional Properties of Egg Yolk Protein during Storage

ZHU Qingxiang¹, LIU Yu¹, MU Junchen², YANG Yi², WANG Qingling^{1*}(1. College of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;
2. Tumushuke Silk Road Camel Bell Trade Co., Ltd., Tumushuke 843900, Xinjiang, China)

Abstract: To clarify the changes in egg quality and yolk protein structure during storage, fresh eggs were stored for 28 d with a temperature of (22±1) °C and relative humidity of 45%. The changes in egg freshness, physicochemical properties and processing characteristics of yolk protein during storage were investigated. It was found that with the prolongation of storage time (0–28 d), there was a significant decrease in the Haugh unit and yolk index of eggs and a continued deterioration in the quality of eggs. The carbonyl content of egg yolk protein increased significantly, but the total sulfhydryl content decreased significantly, indicating the ongoing oxidation reaction of egg yolk protein. During storage, the surface hydrophobicity of egg yolk protein went first up to 12.21 and then down to 7.23, with the secondary structure changing from order to disorder and the structure of egg yolk protein being destroyed. The emulsifying properties and foaming properties of egg yolk were optimal at 14 d and 21 d storage respectively and the effect of storage on the gel properties of egg yolk was not significant ($p>0.05$). In conclusion, storage leads to changes in the protein structure of egg yolk, which in turn changes the processing performance of egg yolk.

Key words: eggs; storage; egg yolk; protein; structure; function

引文格式:

朱庆香, 刘钰, 牟俊臣, 等. 贮藏过程中蛋黄蛋白质结构与功能特性变化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 61-67.

ZHU Qingxiang, LIU Yu, MU Junchen, et al. Changes in Structure and Functional Properties of Egg Yolk Protein during Storage[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 61-67.

蛋黄是由蛋黄膜包裹的、富含脂质与蛋白质的液体体系。因具有较高的营养价值和良好的加工性能,

蛋黄被广泛地用于各类食品中, 如蛋黄酱、沙拉酱和冰淇淋。其中, 蛋黄最优良的加工性能是乳化性, 而低密

基金项目: 兵团科技创新人才计划(2023CB013); 兵团指导性科技计划(2022ZD061)

作者简介: 朱庆香(2001—), 女(汉), 本科在读, 研究方向: 食品科学与工程。

*通信作者: 王庆玲(1981—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 蛋品科学。

度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)被认为是蛋黄良好乳化活性的主要贡献者^[1]。蛋黄也因其含有卵磷脂和蛋白质等成分而具有起泡性。此外,蛋黄在热、碱或冷冻处理后可分别形成热诱导凝胶、碱诱导凝胶和冷冻凝胶。

食品中蛋白质的结构决定了其功能性质,但蛋白质结构易受贮藏或加工条件的影响。贮藏过程中,随着时间延长,鸡蛋品质的劣变、蛋清和蛋黄微环境(如pH值和水分含量改变)变化、组分氧化持续进行^[2-3]。研究表明,贮藏环境改变可能会导致蛋白质结构的变化,进而影响其功能特性。Sheng等^[4]发现在22℃贮藏过程中鸡蛋卵清蛋白的结构从有序向无序转变,导致其乳化性和起泡性下降。Huang等^[5]将新鲜鸡蛋于22℃、相对湿度65%条件下贮藏50d,发现蛋黄蛋白质发生氧化降解、总巯基含量下降、羰基含量上升,证明贮藏会影响蛋黄蛋白质的结构。目前已有关于对食品蛋白质结构和功能性质之间关系展开研究,Liu等^[6]将低pH值处理与超声处理相结合,通过改变大豆分离蛋白的空间结构,可以有效地提高大豆分离蛋白的乳化性能。此外,Zang等^[7]发现在贮藏过程中全蛋粉的蛋白质氧化会导致羰基、表面疏水性和荧光强度显著变化,进而影响其品质和功能特性。

贮藏过程中,蛋白质结构变化是影响蛋黄加工特性的关键因素。当前针对鸡蛋贮藏过程中的品质变化和随蛋黄蛋白质结构改变的功能特性变化研究尚不全面。为深入地了解贮藏过程中鸡蛋的变化,本文测量鸡蛋的新鲜度、蛋黄蛋白质理化性质和加工特性,以期对鸡蛋产业的贮藏管理和加工技术提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜未受精鸡蛋(产蛋24h内):新疆宏新生物科技有限公司;2,4-二硝基苯肼(2,4-dinitrophenylhydrazine, DNPH)、十二烷基磺酸钠(sodium dodecyl sulfonate, SDS)、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)[5,5'-dithio-bis(2-nitrobenzoic acid), DTNB]、8-苯胺-1-酸(8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS)、溴酚蓝(均为分析纯):上海麦克林生化科技有限公司;考马斯亮蓝R-250(电泳纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

酶标仪(X7):美国Biotek仪器有限公司;荧光分光光度计(Beta 2-8 LD plus):美国Varian公司;恒温恒湿培养箱(150SD):上海一恒科学仪器有限公司;恒温水浴锅(DK-8D):江苏省金坛市医疗仪器厂;蛋白质电泳仪(D Code™ System):美国赛默飞世尔科技有限公司;凝胶成像仪(Universal Hood II):美国Bio-Rad公司;激光拉曼光谱仪(Senterra II):德国Bruker公司;

游标卡尺(DL91300):中国DELI公司。

1.3 方法

1.3.1 鸡蛋品质测定

将鸡蛋随机分为5组,每组30枚。于(22±1)℃、相对湿度45%条件下贮藏28d,每7d取样一次。其中15枚鸡蛋用于品质指标测定,其余鸡蛋用于理化指标测定。

将鸡蛋质量记为*W*,人工破壳后置于玻璃板上,用游标卡尺测定蛋白高度(*H*)。

哈氏单位(Haugh unit, HU)的计算公式如下。

$$U = 100 \times \lg(H + 7.57 - 1.75W^{0.37})$$

式中:*U*为哈氏单位;*H*为蛋白高度,mm;*W*为鸡蛋质量,g;7.57为调整蛋白高度的测量值;1.75为调整鸡蛋蛋白高度和质量关系的常数;0.37为经验性系数,用于调整鸡蛋质量对哈氏单位计算结果的影响。

游标卡尺测定蛋黄的直径(*D*,mm)和高度(*H*,mm)。蛋黄指数(york index, YI)的计算公式如下。

$$Y = H/D$$

式中:*Y*为蛋黄指数。

1.3.2 蛋黄蛋白质的提取

参考Liu等^[8]的提取方法并略作修改。鸡蛋手工破壳,分离蛋黄与蛋清,刺破蛋黄膜收集蛋黄,将蛋黄混合均匀。用9倍体积去离子水稀释蛋黄,调整pH值至5,冰浴中搅拌1h,4℃、5000r/min离心10min,收集蛋白质上清液。以牛血清蛋白制备标准曲线($y=1.62x+0.0013, R^2=9992$),采用双缩脲法测定蛋白质浓度。

1.3.3 蛋黄蛋白质氧化指标测定

用羰基含量和总巯基含量来表征蛋黄蛋白质的氧化程度。参考Yuan等^[9]的羰基含量测量方法并略作修改。取1mL蛋白质溶液(1mg/mL)与3mL 2,4-二硝基苯肼溶液(10mmol/L),在室温下黑暗反应1h后,加入三氯乙酸溶液静置10min,5000r/min离心10min,沉淀用乙醇-乙酸乙酯溶液(1:1,体积比)洗涤3次后溶于3mL 6mol/L盐酸胍中,37℃孵育15min,5000r/min离心10min。测定370nm处吸光度,根据吸收系数22000L/(mol·cm)计算蛋白质样品中的羰基浓度^[10],羰基含量(*T*,nmol/mg)计算公式如下。

$$T = \frac{A_{370} \times 10^6}{22000 \times C}$$

式中: A_{370} 为370nm下的吸光度; 10^6 为摩尔基础单位,ng/mL;*C*为测得的蛋白质浓度,mg/mL。

蛋白质的总巯基含量参考Wang等^[11]的DTNB法测定。在412nm处测定样品吸光度。以摩尔吸光率13600L/(mol·cm)计算蛋白质中总巯基含量,总巯基含量(*Z*,nmol/mg)计算公式如下。

$$Z = \frac{A_{412} \times 10^6}{13600 \times C}$$

式中: A_{412} 为412 nm下的吸光度; 10^6 为摩尔基础单位,ng/mL; C 为测得的蛋白质浓度,mg/mL。

1.3.4 蛋黄蛋白质表面疏水性测定

采用8-苯胺-1-萘磺酸(ANS)荧光法测定蛋白质的表面疏水性。将蛋白质溶液分别稀释为0.005、0.01、0.05、0.1、0.2、0.3 mg/mL。在4 mL不同浓度蛋白质溶液中加入20 μ L 8 mmol/L ANS,分别设置激发波长和发射波长为395 nm和475 nm,测量溶液的荧光强度。荧光强度与蛋白质浓度的初始斜率为蛋白质表面疏水性(H_0)。

1.3.5 蛋黄蛋白质的拉曼光谱分析

采用激光拉曼光谱仪(配有532 nm光源),在室温下对蛋黄蛋白质进行拉曼光谱分析。在激光功率50 mW条件下,记录样品在50~4 500 cm^{-1} 的拉曼光谱,每个样品扫描3次。在PeakFit 4.12采用Gaussian IRF deconvolution和Gaussian peak fitting处理拉曼光谱(1 600~1 700 cm^{-1})。

1.3.6 十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gelelectrophoresis, SDS-PAGE)分析

参考袁湖川等^[12]的方法并略作修改。用SDS-PAGE缓冲液将样品溶解,沸水加热10 min,均质,上样量为10 μ L。采用恒电流凝胶电泳,在120 V的起始电压下,待条带跑至分离胶处再调整到160 V,直至染料的前端移动到胶体的底部,完成电泳。

1.3.7 乳化性测定

蛋黄用蒸馏水稀释至10%(质量分数)。取21 mL样品溶液与7 mL大豆油混合,10 000 r/min匀浆1 min,立即取底部乳液(0 min),并用1 g/L SDS溶液以1:500(体积比)稀释,测定溶液在500 nm处的吸光度。15 min后重复上述操作。乳化活性(emulsifying activity, EA)以溶液在0 min时的吸光度表示。乳化稳定性(emulsion stability, ES)的计算公式如下。

$$E = A_0 \times 15 / (A_0 - A_{15})$$

式中: E 为乳化稳定性; A_0 为0 min时SDS溶液的吸光度; A_{15} 为15 min时SDS溶液的吸光度;15为时间间隔,min。

1.3.8 起泡性测定

参考Li等^[13]的方法并略作修改。取100 mL蛋黄溶液(10 mg/mL)于200 mL烧杯中,14 200 r/min高速剪切2 min后,立即转移到200 mL量筒中,将溶液(包括溶液和泡沫)的总体积记为 V_0 。静置30 min,总体积记录为 V_{30} 。蛋黄的起泡性(foaming characteristics, FC)和起泡稳定性(foam stability, FS)计算公式如下。

$$C = (V_0 - 100) / 100 \times 100$$

$$S = (V_{30} - 100) / (V_0 - 100) \times 100$$

式中: C 为起泡性,%; S 为起泡稳定性,%; V_0 为初

始时溶液(包括溶液和泡沫)的总体积,mL; V_{30} 为静置30 min时溶液的总体积,mL。

1.3.9 凝胶特性测定

制备蛋黄溶液(50%,质量分数),匀浆后600 r/min离心15 min进行消泡,于90 $^{\circ}$ C水浴处理40 min,凝胶冷却至室温后,4 $^{\circ}$ C静置过夜。用P0.5的探头对蛋黄凝胶性质进行测定。测试参数设置:测试前速度2 mm/s、测试速度1 mm/s、测试后速度2 mm/s、触发力10 g、应变度30%。

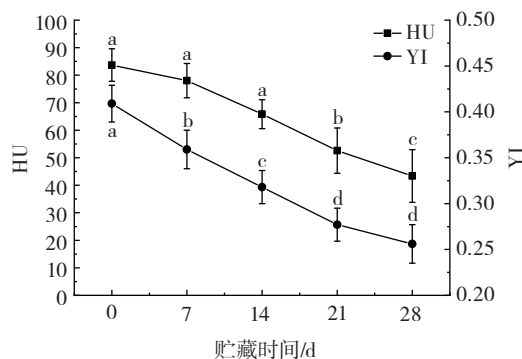
1.4 数据处理

每项指标重复测定3次,结果以平均值 \pm 标准差的形式表示。采用SPSS 25软件进行单因素方差分析($p < 0.05$),运用OriginPro 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 鸡蛋贮藏过程中新鲜度指标变化

考察鸡蛋贮藏过程中的新鲜度变化,鸡蛋的哈氏单位和蛋黄指数变化见图1。



同一指标不同小写字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

图1 鸡蛋贮藏过程中鸡蛋品质变化

Fig.1 Changes in egg quality during storage

由图1可知,随贮藏时间延长,HU呈明显下降趋势,新鲜鸡蛋HU为83.68,贮藏28 d后下降至43.36。新鲜鸡蛋可根据HU进行分级,HU>72为特级鲜鸡蛋,HU为60~72是一级鲜蛋,HU为31~59是二级鲜蛋^[14],结果表明,22 $^{\circ}$ C即常温贮藏28 d后鸡蛋由特级鲜蛋降为二级鲜蛋,鸡蛋品质明显下降。这是由于浓厚蛋白水解致使蛋清变薄^[15]。Omana等^[16]发现鸡蛋中簇集蛋白和卵抑制剂浓度的增加与卵白蛋白含量的变化可能是导致蛋清在贮藏期间变薄的主要原因。

YI通过评价蛋黄的自然形状以表征蛋黄品质。由图1可知,新鲜鸡蛋的YI为0.409,随着贮藏时间延长,YI持续下降,在贮藏28 d后下降至最小值0.256。鸡蛋贮藏过程中,通过蛋壳气孔进行内外物质的交换,具体表现为呼吸作用持续进行,蛋清中水分向外蒸发,鸡蛋质量损失。同时,蛋清水分通过蛋黄膜向内迁移,最终导致蛋黄液化^[17]。研究表明,涂膜处理或气调处

理鸡蛋可抑制其呼吸作用,使鸡蛋内部系统保持一定的稳态,达到抑制蛋黄液化的目的^[14,18]。总之,随贮藏时间延长,HU和YI持续下降,蛋清和蛋黄品质变化明显,说明鸡蛋贮藏过程中内部环境不断发生变化。

2.2 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质氧化程度表征

蛋白质的氧化可用羰基含量与总巯基含量进行表征,贮藏过程中蛋黄蛋白质氧化程度的变化如图2所示。

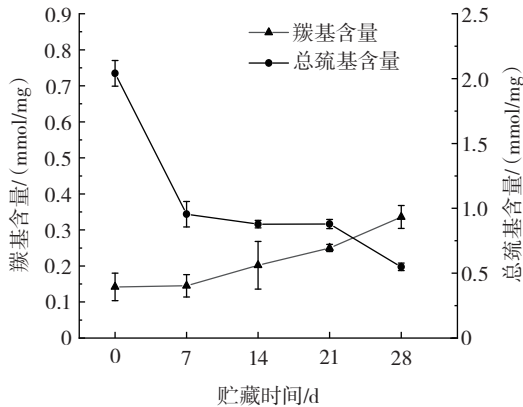


图2 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质氧化程度变化

Fig.2 Changes in oxidation degree of egg yolk protein during storage

羰基衍生物的形成是蛋白质最常见的氧化损伤,该反应是非酶修饰且不可逆,因此羰基含量用于表征蛋白质氧化程度。由图2可知,贮藏过程中蛋黄蛋白质羰基含量总体呈上升趋势。贮藏0~7d,蛋黄蛋白质羰基含量变化不明显,但在14d后增加至0.202 nmol/mg,28d时达到最大值0.336 nmol/mg。这可能与活性氧(reactive oxygen species, ROS)、活性氮(reactive nitrogen species, RNS)含量及蛋黄脂质氧化有关。

此外,巯基的损失也可反映蛋白质的氧化情况^[19]。由图2可知,贮藏过程中,蛋黄蛋白质总巯基含量总体呈下降趋势。贮藏至14d时,蛋黄蛋白质总巯基含量由2.041 nmol/mg降低至0.878 nmol/mg。贮藏至21d时略微上升,随后又下降至最小值0.549 nmol/mg。随贮藏时间延长,蛋黄蛋白质结构被破坏,导致蛋黄中的巯基暴露,暴露的巯基被氧化活性物质攻击,巯基总量最终减少。通过对蛋黄成分氧化程度的监测发现,贮藏早期(0~7d),蛋黄成分的氧化程度较小,这与类胡萝卜素、磷脂、维生素D等内源性抗氧化组分的作用有关^[12]。但随着蛋黄微环境的变化、氧化过程的持续和氧化产物的积累,蛋黄成分的氧化程度不断加深。

2.3 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质 SDS-PAGE 分析

图3为蛋黄蛋白质的电泳试验结果,揭示了分子质量为25~250 kDa的蛋白质随贮藏时间延长的变化情况。

蛋黄蛋白质大部分为脂蛋白,约占蛋黄干重的17%,蛋黄蛋白主要有LDL、高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)、卵黄高磷蛋白、卵黄球蛋白等。

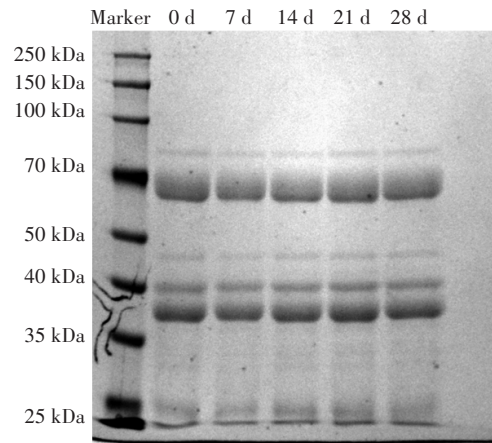


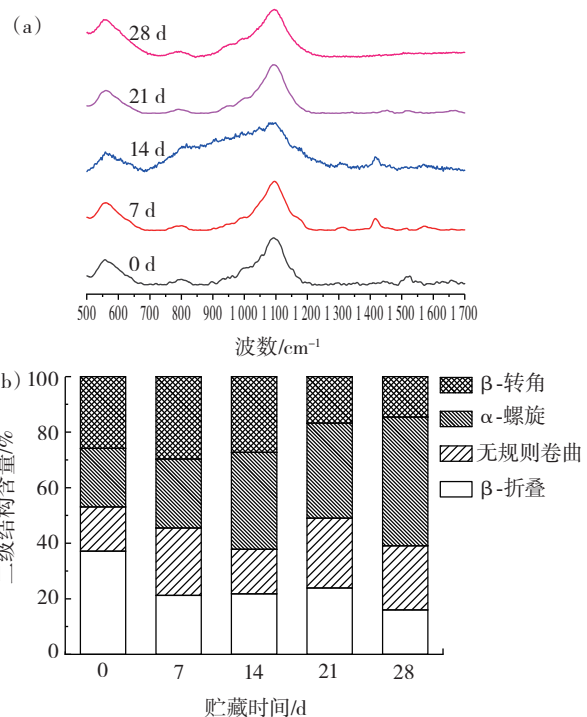
图3 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质 SDS-PAGE 分析图谱

Fig.3 SDS-PAGE pattern of egg yolk protein during egg storage

由图3可知,在贮藏期间,HDL载脂蛋白(85 kDa)与卵黄高磷蛋白(38 kDa)在0d时丰度较高,蛋黄蛋白质条带在7d时整体略浅,此时蛋黄蛋白质丰度略有下降, α -卵黄球蛋白(70 kDa)、 β -卵黄球蛋白(40 kDa)、LDL载脂蛋白(49 kDa)在贮藏期间呈上升趋势。结果表明,鸡蛋贮藏至28d蛋黄蛋白质分子量并未发生明显变化。

2.4 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质结构变化

蛋白质的空间结构对蛋白质的功能特性起着决定性的作用,其中二级结构是蛋白质复杂空间构象的基础。图4为贮藏期间蛋黄蛋白质的拉曼光谱与二级结构的分布情况。



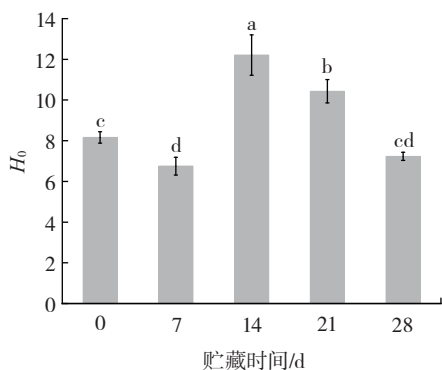
(a)拉曼光谱;(b)二级结构含量。

图4 贮藏过程中蛋黄蛋白质二级结构变化

Fig.4 Changes in secondary structure of yolk protein during storage

由图4(a)可知,贮藏0~28 d蛋黄蛋白质的拉曼光谱发生变化,表明贮藏过程中蛋黄蛋白质发生了变性。蛋白质的二级结构在拉曼光谱中最容易反映在两个主要波段:酰胺 I 段(1 600~1 700 cm^{-1})和酰胺 III 段(1 200~1 300 cm^{-1})。为进一步明确4种二级结构的含量,对酰胺 I 段进行了提取和分析。采用 PeakFit v4.1.2 软件对 1 600~1 700 cm^{-1} 的光谱进行分析,分别用 α -螺旋(1 645~1 660 cm^{-1})、 β -折叠(1 670~1 680 cm^{-1})、 β -转角(1 640~1 645 cm^{-1} 、1 680~1 690 cm^{-1})和无规则卷曲(1 660~1 670 cm^{-1})的峰面积计算二级结构的比例^[20]。如图4(b)所示,蛋黄蛋白质二级结构由37.15%的 β -折叠、21.10%的 α -螺旋、25.85%的 β -转角和15.90%的无规则卷曲组成。贮藏28 d后, α -螺旋和无规则卷曲含量增加, β -折叠和 β -转角含量减少,表明贮藏对蛋黄蛋白质二级结构有明显影响。

蛋白质的表面疏水性直接反映了蛋白质疏水性基团的暴露程度,是衡量蛋白质构象变化的重要指标。采用 ANS 作为荧光探针测定贮藏鸡蛋蛋黄蛋白质的表面疏水性,结果如图5所示。



不同小写字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

图5 贮藏过程中蛋黄蛋白质表面疏水性的变化

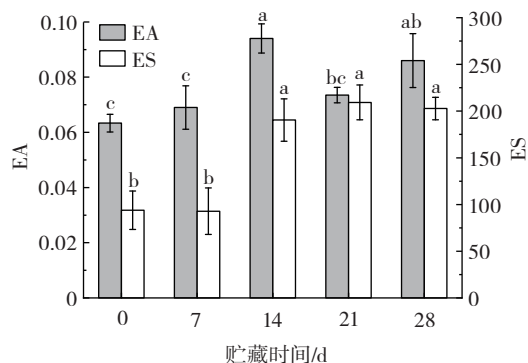
Fig.5 Changes in surface hydrophobicity of yolk protein during storage

由图5可知,随贮藏时间延长,蛋黄蛋白质的表面疏水性总体呈波动变化趋势,贮藏0~7 d表面疏水性下降,由8.16显著下降至6.75,贮藏14 d时上升至最大值12.21,随后持续下降至7.23($p < 0.05$)。这可能是由于蛋白质在贮藏初期有轻微的折叠,疏水基团被包裹,随着氧化加剧,疏水基团暴露,导致表面疏水性增加。14 d后随着氧化程度进一步加深,蛋白质分子发生聚集,疏水基团被包埋在其中。

2.5 鸡蛋贮藏过程中蛋黄加工性能变化

2.5.1 鸡蛋贮藏过程中蛋黄的乳化性能

蛋黄的良好加工性能体现在乳化性能上,蛋白质的乳化活性(EA)和乳化稳定性(ES)分别反映了蛋白质促进乳状液形成和稳定乳液的能力。贮藏过程中蛋黄乳化性能的变化见图6。



同一指标不同小写字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

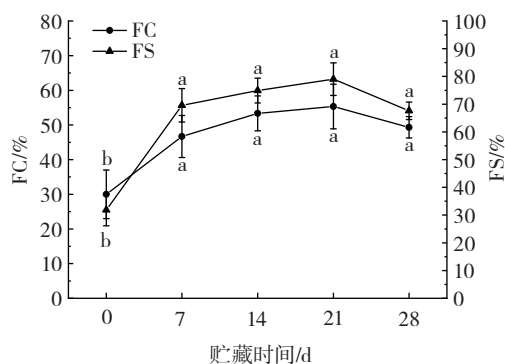
图6 贮藏过程中蛋黄乳化性能的变化

Fig.6 Changes in emulsifying properties of egg yolk during storage

由图6可知,在贮藏至14 d时蛋黄乳化活性由0.063提高至最大值0.094,随后下降再上升至0.086,总体呈上升趋势。乳化稳定性则随贮藏时间延长总体呈上升趋势。蛋黄乳化活性的变化可能是由于贮藏过程中蛋白质氧化引起蛋白质分子结构和表面电荷变化,影响蛋白质在油水界面的结构重排。有研究表明,疏水基团的暴露可以促进蛋白质在油滴表面的吸附^[21]。本研究结果表明,表面疏水性在贮藏14 d时达到最大值,疏水基团的增加可能会增强蛋白质之间的疏水相互作用和静电斥力。随后,在表面疏水性降低的同时,蛋黄蛋白质二级结构由有序变为无序,分子结构被破坏,蛋白质更加无序分散,表现为乳化性的提高,这与马婕等^[22]的研究结论一致。

2.5.2 鸡蛋贮藏过程中蛋黄的起泡性能

蛋白质的起泡能力由蛋白质的溶解度和表面活性决定,而泡沫稳定性则由蛋白质的黏度和成膜性决定。贮藏过程中蛋黄起泡性能的变化见图7。



同一指标不同小写字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

图7 贮藏过程中蛋黄起泡性能的变化

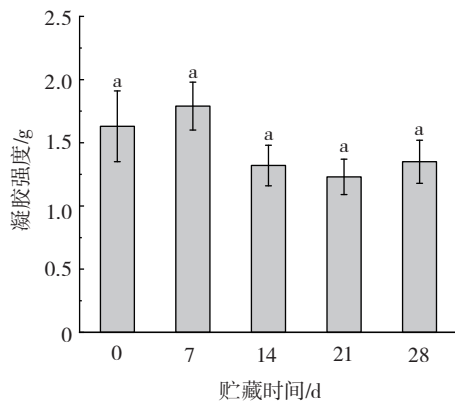
Fig.7 Changes in foaming properties of egg yolk during storage

由图7可知,随贮藏时间延长,蛋黄的起泡性与起泡稳定性均整体呈上升趋势。在贮藏21 d时起泡性由30.00%上升至最大值55.33%,泡沫稳定性则由

31.87% 上升至最大值 79.03%, 之后均略下降。结果表明, 在贮藏过程中, 蛋黄蛋白质持续氧化, 可能会导致蛋白质分子内的空间结构发生变化, 使得疏水性氨基酸残基暴露在蛋白质表面, 这些疏水性氨基酸残基可能与水相互作用, 使蛋白质起泡能力有所增强。Li 等^[13]的研究表明, 在一定范围内, 蛋清的起泡能力随着氧化程度的增加而增加, 与本研所得结果一致。

2.5.3 鸡蛋贮藏过程中蛋黄的凝胶性能

鸡蛋在加热处理后会形成热凝胶, 这与蛋白质的胶凝性质密不可分。蛋黄热诱导凝胶的形成被认为是蛋黄颗粒(包含 LDL 胶束和 HDL 颗粒)受热后的不稳定过程, 是由其表面稳定的蛋白质变性引起的, 变性蛋白质之间的相互作用形成凝胶网络结构。贮藏过程中蛋黄热凝胶强度的变化见图 8。



相同小写字母表示差异不显著, $p > 0.05$ 。

图 8 贮藏过程中蛋黄热凝胶强度的变化

Fig.8 Changes in heat-induced gel hardness of egg yolk during storage

由图 8 可知, 随贮藏时间延长, 蛋黄凝胶硬度总体呈波动变化趋势。在贮藏 0 d 时, 蛋黄凝胶硬度为 1.631 g, 贮藏 7 d 时达到最大值 1.793 g, 随后蛋黄凝胶硬度下降, 变化趋势不显著 ($p > 0.05$)。结果表明, 鸡蛋贮藏过程中蛋黄蛋白质结构发生变化, 导致蛋黄蛋白质凝胶性能变化但不显著。

3 结论

本文探究了鸡蛋贮藏期间蛋黄蛋白质结构与其功能特性变化的潜在规律性。研究表明, 随贮藏时间延长鸡蛋品质不断下降, 蛋黄蛋白质氧化持续发生。拉曼光谱和荧光分析结果表明, 蛋黄蛋白质 α -螺旋和无规则卷曲含量增加, 表面疏水性改变, 蛋白质结构的变化可能影响了蛋黄的乳化活性和起泡特性, 但对蛋黄热凝胶性能无显著影响。蛋黄蛋白质结构引起加工性能显著变化的机理仍需进一步探讨。本研究为深入解析鸡蛋贮藏过程中的品质和结构变化提供了科学依据, 为禽蛋的科学贮藏管理奠定技术基础。

参考文献:

- [1] ANTON M. Egg yolk: Structures, functionalities and processes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12): 2871-2880.
- [2] WANG Q L, JIN G F, WANG N, et al. Lipolysis and oxidation of lipids during egg storage at different temperatures[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2017, 35(3): 229-235.
- [3] PIRES P G S, LEUVEN A F R, FRANCESCHI C H, et al. Effects of rice protein coating enriched with essential oils on internal quality and shelf life of eggs during room temperature storage[J]. Poultry Science, 2020, 99(1): 604-611.
- [4] SHENG L, HUANG M J, WANG J, et al. A study of storage impact on ovalbumin structure of chicken egg[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 219: 1-7.
- [5] HUANG Q, LIU L, WU Y Y, et al. Mechanism of differences in characteristics of thick/thin egg whites during storage: Physicochemical, functional and molecular structure characteristics analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130828.
- [6] LIU G N, HU M, DU X Q, et al. Correlating structure and emulsification of soybean protein isolate: Synergism between low-pH-shifting treatment and ultrasonication improves emulsifying properties [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 646: 128963.
- [7] ZANG J N, QING M M, CHI Y J, et al. Predicting quality of the whole egg powder during storage: Based on Arrhenius and radial basis function model[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 124: 105666.
- [8] LIU Y P, SHENG L, MA M H, et al. Proteome-based identification of chicken egg yolk proteins associated with antioxidant activity on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 1093-1103.
- [9] YUAN H C, LIU Y, LUO R F, et al. Effects of lutein-phospholipids emulsion on oxidatively stressed egg yolk protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112187.
- [10] GUO X, WANG Y Q, LU S L, et al. Changes in proteolysis, protein oxidation, flavor, color and texture of dry-cured mutton ham during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111860.
- [11] WANG Z M, HE Z F, GAN X, et al. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage[J]. Meat Science, 2018, 146: 131-139.
- [12] 袁湖川, 刘钰, 冉丽丹, 等. 鸡蛋贮藏过程中蛋黄内源抗氧化组分与氧化进程的关系[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 233-240. YUAN Huchuan, LIU Yu, RAN Lidan, et al. Potential relationship between endogenous antioxidant components and egg yolk oxidation process during hen egg storage[J]. Food Science, 2021, 42(13): 233-240.
- [13] LI S G, HUANG Y, AN F P, et al. Hydroxyl radical-induced early stage oxidation improves the foaming and emulsifying properties of ovalbumin[J]. Poultry Science, 2019, 98(2): 1047-1054.
- [14] 刘钰, 胡辉, 冉颖, 等. 不同涂膜方式对贮藏鸡蛋品质影响及货架期模型的构建[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(6): 674-679. LIU Yu, HU Hui, RAN Ying, et al. Effect of different coatings on the quality of stored eggs and the construction of shelf life model[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2021, 39(6): 674-679.
- [15] KEMPS B J, DE KETELAERE B, BAMELIS F R, et al. Albumen freshness assessment by combining visible near-infrared transmission and low-resolution proton nuclear magnetic resonance spec-

- troscopy[J]. Poultry Science, 2007, 86(4): 752-759.
- [16] OMANA D A, LIANG Y, KAV N N V, et al. Proteomic analysis of egg white proteins during storage[J]. Proteomics, 2011, 11(1): 144-153.
- [17] WARDY W, TORRICO D D, HERRERA CORREDOR J A, et al. Soybean oil-chitosan emulsion affects internal quality and shelf-life of eggs stored at 25 and 4 °C[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(6): 1148-1156.
- [18] 马逸霄. 贮藏方法对鸡蛋呼吸&品质的影响规律及气调控制系统开发[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- MA Yixiao. Effect of storage conditions on the respiration&quality of eggs and development of atmosphere control system[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [19] 陈曦. 脂肪氧合酶诱导氧化对大豆分离蛋白结构和消化性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- CHEN Xi. Study of the effects of lipoygenase-induced oxidation on the structure and digestibility of soybean protein isolate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [20] WANG J Y, YANG Y L, TANG X Z, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 225-233.
- [21] ZHANG Q T, TU Z C, XIAO H, et al. Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. Food and Bioprocesses Processing, 2014, 92(1): 30-37.
- [22] 马婕, 杨晓雪, 迟玉杰, 等. 超声协同壳聚糖处理对蛋黄液乳化性质及蛋黄蛋白质结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 81-89.
- MA Jie, YANG Xiaoxue, CHI Yujie, et al. Effect of ultrasound-assisted chitosan treatment on emulsification properties of liquid egg yolk and structure of egg yolk proteins[J]. Food Science, 2023, 44(21): 81-89.

加工编辑:张昱

收稿日期:2023-12-11

(上接第 60 页)

- HE Wentao. Effects of different drying modes on the quality and biological activity of *Dendrobium candidum* produced in Zhejiang Province[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [25] 欧阳伟虹, 肖艺, 卢秋静, 等. 不同干燥工艺对铁皮石斛有效成分及抗氧化活性影响[J]. 药物生物技术, 2017, 24(2): 133-136.
- OUYANG Weihong, XIAO Yi, LU Qiuqing, et al. Effects of different drying processes on effective components and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* kimura et migo[J]. China Industrial Economics, 2017, 24(2): 133-136.
- [26] 张悦, 孔菲菲, 张周菊, 等. 铁皮石斛不同干燥方法的质量对比研究[J]. 湖北中医杂志, 2022, 8(9): 54-58.
- ZHANG Yue, KONG Feifei, ZHANG Zhouju, et al. Comparative quality of different drying methods of *Dendrobium officinale*[J]. Hubei Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 8(9): 54-58.
- [27] 王小军, 高睿嘉, 郁桦, 等. 牛初乳冻干粉和常乳冻干粉的降血糖及抗氧化作用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 262-267, 274.
- WANG Xiaojun, GAO Ruijia, YU Hua, et al. Hypoglycemic and antioxidant effect of lyophilized bovine colostrums and lyophilized milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 262-267, 274.
- [28] 马厚雨, 邢丽, 缪冶炼. 干燥温度对铁皮石斛颗粒中多糖溶出特性的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 109-115.
- MA Houyu, XING Li, MIAO Yelian. Effects of drying temperature on the dissolving-out properties of polysaccharides in *Dendrobium officinale* particles[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 109-115.

加工编辑:张岩蔚

收稿日期:2024-03-07