

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.020

苹果枝烘烤鸡蛋的理化性质、微观结构和蛋白组成的变化研究

周宁, 韩东晶, 王志花, 汪文君, 杨少华, 刘国庆

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章研究苹果枝对烘烤鸡蛋的理化性质、微观结构和蛋白组成的影响,采用质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)对蛋白的质构特性进行评价。TPA 结果表明,苹果枝烘烤鸡蛋(apple branches treated baked eggs, ATBE)和烘烤蛋(baked eggs, BE)在烘烤过程中弹性先增加后下降,且 ATBE 比 BE 更具有弹性。利用冷场发射扫描电子显微镜(field emission scanning electron microscope, FESEM)分析蛋白的微观结构, ATBE 蛋白凝胶比 BE 蛋白凝胶更加致密,形成细凝胶束。通过傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)分析苹果枝对蛋白二级结构的影响,苹果多酚通过氢键作用与蛋白结合促进蛋白的聚集,从而提高蛋白的凝胶性质。利用超高效液相色谱(ultra-high performance liquid chromatography, UPLC)-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱(quadrupole-orbitrap high-resolution mass spectrometry, Q-Orbitrap HRMS)技术验证 ABTE 蛋白比 BE 蛋白多 87 种物质,蛋白组分发生明显变化。

关键词:苹果枝条;鸡蛋;结构;蛋白

中图分类号:S879.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)02-0270-06

Changes in physicochemical properties, microstructure and egg white composition of apple branches treated baked eggs

ZHOU Ning, HAN Dongjing, WANG Zhihua, WANG Wenjun, YANG Shaohua, LIU Guoqing
(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: The effects of apple branches on the physicochemical properties, microstructure and egg white composition of baked eggs were studied. The texture properties of the egg white were evaluated using texture profile analysis (TPA). The results of TPA showed that the elasticity of baked eggs (BE) and apple branches treated baked eggs (ATBE) first increased and then decreased during the baking process with ATBE being more elastic than BE. The microstructure of the egg white was analyzed by cold field emission scanning electron microscope (FESEM), the ATBE egg white gels were denser than BE egg white gels, forming a thin gel bundle. Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) was used to analyze the effect of apple branches on the secondary structure of egg white. Apple polyphenols promote protein aggregation by binding to proteins through hydrogen bonding, thus enhancing the gel properties of egg white. Ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap high-resolution mass spectrometry (UPLC-Q-Orbitrap HRMS) technology was used to verify that ABTE egg white has 87 more substances than BE egg white, and the egg white composition has changed significantly.

Key words: apple branch; eggs; structure; egg white

收稿日期:2021-08-09;修回日期:2021-09-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFD0502105)

作者简介:周宁(1995—),女,安徽淮南人,合肥工业大学硕士生;

刘国庆(1963—),男,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:13675512000@163.com.

鸡蛋营养成分丰富,不仅包括蛋白质和脂类,还包括硫胺素、核黄素、维生素A、B、D、E等多种维生素和钙、磷、钾、钠、镁、铁、锌等矿物质^[1]。鸡蛋是优质蛋白质和必需营养素的主要来源,它提供许多理想的功能属性,如发泡、乳化、凝胶、着色、调味^[2],有助于食品的质地特性。我国是消费鸡蛋最多的国家,但目前消费形式单一,对鸡蛋制品的深度加工程度较低。蛋制品的种类并不丰富,在中国餐桌上受欢迎是传统的蛋制品,如皮蛋、咸蛋、酒蛋等。这些蛋制品耗时长,用强碱腌制会导致皮蛋中大量赖氨酸、丙氨酸等的形成,降低蛋白质的营养价值,对人体健康造成潜在的危害^[3]。为了延长加工鸡蛋的货架期,同时提高其利用价值,亟待探索新的鸡蛋加工方法和工艺。

苹果枝条富含纤维素、半纤维素和木质素,除此之外还含有多酚类化合物,其中苹果多酚具有抗氧化、保鲜、抗肿瘤等功效。酚类化合物易与蛋白质结合并对其结构进行修饰,从而改变蛋白凝胶的物理性质^[4],修剪后的苹果枝条作为农业副产物,经常被丢弃或焚烧,从而造成宝贵资源的浪费,甚至污染环境^[5]。为促进果园废弃物的资源综合化利用,本文利用苹果枝烘烤鸡蛋(apple branches treated baked eggs, ATBE),同时对成品蛋的品质特性、微观结构及组分分析进行研究,为蛋制品加工工艺方法的拓展和农业废弃物的高值化利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

新鲜鸡蛋(50~60 g)购于合肥市经济技术开发区大润发超市;苹果枝条购于陕西咸阳;无水乙醇、甲醇、2.5%的戊二醛、磷酸二氢钾、磷酸氢二钠、8-苯胺-1-萘磺酸(ANS)、光谱级溴化钾(KBr)均购于阿拉丁试剂(上海)有限公司。

多功能粉碎机(永康市红太阳机电有限公司);GZX-9030MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司);H/T16MM 台式高速离心机(湖南赫西仪器装备有限公司);Vertex70 型傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)(德国布鲁克公司);TAXTplus 物性测试仪(英国 Stable 公司);FD-1-50 Plus 真空冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司);Agilent HP7890-5975C 型气相色谱-质谱联用仪(美国安捷伦科技公司);F98 荧光分光光度计(上海棱光技术有限公司);SU8020 冷场发射扫描电子显微镜(field emis-

sion scanning electron microscope, FESEM)(日本);UltiMate 3000 RS 色谱仪、Q Exactive 高分辨质谱仪(high-resolution mass spectrometry, HRMS)(赛默飞世尔科技有限公司);JP-040S 超声波清洗器(深圳洁盟清洗设备有限公司);磁力加热搅拌器(德国 IKA 公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 烤鸡蛋的准备

将晒干的苹果枝条使用多功能粉碎机粉碎,过40目筛子。将新鲜鸡蛋清洗干净,用如下方法得到2种鸡蛋:在食品级烧杯里放入鸡蛋和苹果枝条粉末于烘箱100℃烘烤数小时,即苹果枝烤鸡蛋 ATBE;将放在食品级烧杯里的鸡蛋置于烘箱100℃烘烤数小时,即烘烤蛋(baked eggs, BE)。2种鸡蛋都在烘箱里烘烤12~20 h,每隔2 h取出样品。

1.2.2 质构的测定

使用 TAXTplus 物性测试仪测定^[6],但略有修改。烘烤的鸡蛋样品用手术刀切成立方体(10 mm×10 mm×10 mm),进行质地剖面分析(texture profile analysis, TPA)。用压缩 P/36R 圆柱探针圆柱形探头将制备好的样品压缩2次,压缩比为60%,触发力为5 g,环境温度为25℃,测试前、后速度分别为1.0、2.0 mm/s,恢复时间为5 s。实验重复5次,取其平均值。

1.2.3 蛋壳的微观结构测定

按照文献^[7]测定烘烤鸡蛋蛋壳的微观结构。分别取 BE、ATBE 的半个蛋壳,把蛋壳膜撕掉,用蒸馏水清洗每片蛋壳的内外表面,放在红外干燥灯下至干燥;用手术刀沿垂直于蛋壳表面切取长约50 mm、宽30 mm的块状样品,将其用导电胶粘于样品台上,喷金后放在电镜下进行观察拍照。

1.2.4 蛋白的微观结构测定

参照文献^[8],取 BE、ATBE 中间部分的蛋白,将凝胶样品中心部位切成小块,用2.5%的戊二醛溶液浸泡固定,4℃条件下放置4 h。固定好的样品在室温条件下用磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L、pH 值为7.0)漂洗3次,每次10 min,分别将其用体积分数梯度为10%、30%、50%、70%、90%、100%(2次)每次5~10 min的乙醇溶液进行逐级脱水,脱水过程中轻微摇晃,脱水后的样品冻干。干燥后的样品用导电双面胶固定到样品台上,经溅射仪喷金后拍照观察。

1.2.5 荧光光谱测定

使用8-苯基-1-萘磺酸荧光探针方法测定鸡

蛋白蛋白质样品的表面疏水性,在文献[9]研究的基础上,用磷酸盐缓冲液(50 mmol/L、pH 值为 7.0)分别将样品稀释到 0.5 mg/mL,荧光探针稀释到 8 mmol/L,然后取 20 μ L 的荧光探针加入到 4 mL 样品稀释液中。在黑暗中,25 $^{\circ}$ C 下孵育 15 min,在 25 $^{\circ}$ C 下进行荧光扫描。激发波长和发射波长分别设定为 380 nm 和 400~600 nm。发射和激发波长的狭缝均为 5 nm。

1.2.6 FTIR

在红外干燥灯下将干燥的 1 mg 鸡蛋白粉末与 200 mg 纯 KBr 在玛瑙研钵中充分研磨,在压片机上压成透明薄片,以空气为背景,在分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描 32 次,在 4 000~400 cm^{-1} 波数范围内测定其红外光谱。

1.2.7 蛋白的化学物质测定

1.2.7.1 样品处理

称量冻干后的样本约 200 mg,加入 1 mL 的甲醇和 1 mL 的水,涡旋混匀。加入 2~3 颗二氧化锆研磨珠,研磨提取 3 min;4 $^{\circ}$ C 条件下离心 10 min,上清液用 0.22 μm 滤膜过滤,取滤液上机分析。

1.2.7.2 条件

1) 质谱条件。电喷雾离子源(electrospray ionization,ESI)的电压为 3.8 kV,毛细管温度为 300 $^{\circ}$ C,采用正负离子切换扫描,扫描范围为 100.0~1 500.0 m/s,检测方式 Full Mass/dd-MS²。碰撞气为高纯氩气(纯度 \geq 99.999%);鞘气为氮气(纯度 \geq 99.999%),相对压力为 40;辅助气为氮气(纯度 \geq 99.999%),350 $^{\circ}$ C。数据采集时间为 30 min。

2) 色谱条件。色谱柱为 RP-C18 150 mm \times 2.1 mm,1.8 μm ,检测方式为 Full Mass/dd-MS²,流速为 0.30 mL/min,水相为 0.1%甲酸水溶液,有机相为 0.1%甲酸乙腈,洗针液为甲醇,柱温箱温度为 35 $^{\circ}$ C,自动进样器温度为 10 $^{\circ}$ C,进样针高度为 2.00 mm,自动进样器清洗设置为 Both,自动进样器洗针体积为 200.00 μL 。自动进样器进针清洗时浸泡时间为 3.00 s,自动进样器进样体积为 5.00 μL 。高分辨液质采集的数据通过 CD 2.1(Thermo Fisher)完成数据初步整理后进行数据库检索比对(mzCloud 数据库、mz-Vault 数据库、ChemSpider 数据库)。

1.2.8 数据统计分析

每个单独实验至少重复 3 次,所有实验数据均以(平均值 \pm 标准差)表示,并利用 SPASS

17.0 软件进行数据统计处理,采用 ANOVA 进行不同试验组间的邓肯差异分析($P < 0.05$),采用 Origin 2019 软件绘制数据图。

2 结果与分析

2.1 蛋白的质构分析

蛋白凝胶从 8~20 h 的质构变化如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着烘烤时间的延长,BE 和 ATBE 硬度迅速增加($P < 0.05$),分别从 3 272.23、2 530.05 增加到 5 346.49、4 659.64,与 BE 相比,苹果枝使蛋白硬度降低($P < 0.05$)。弹性反映产品在第 1 次压缩变形后的物理回弹情况,BE 和 ATBE 在烘烤过程中弹性先升高再缓缓降低,在 16 h 后,BE 和 ATBE 的弹性基本保持一致。说明苹果枝对蛋白凝胶的质构产生了影响,与 BE 相比,在 16 h 前蛋白的弹性增加($P > 0.05$),说明蛋白之间的相互作用增强。高弹性说明蛋白聚集程度高、凝胶网络结构^[10]紧密。因此 16 h 的蛋白具有良好的硬度、弹性和相对优良的食用性能,与文献[11]的结论一致。

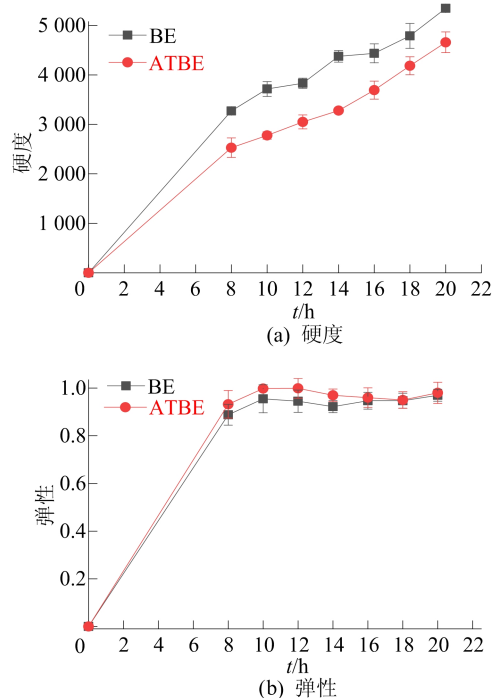


图 1 蛋白的硬度和弹性变化

2.2 鸡蛋微观结构分析

通过 FESEM 可以观察样品的微观结构,BE、ATBE 蛋壳的 FESEM 图如图 2 所示。从图 2 可以看出,两者气孔的数目均很多,但是图 2b 相比图 2a,蛋壳的外观结构更疏松多孔,可能在

持续高温下,苹果枝里的部分多酚类物质与鸡蛋壳中的碳酸钙发生反应,腐蚀蛋壳,使蛋壳表面变得疏松多孔。BE、ATBE蛋白的 FESEM 如图 3 所示,从图 3a 可以看出,蛋白凝胶网络结构连续性差,不均匀。从图 3b 可以看出,蛋白凝胶结构更致密规则,间隙小,较光滑,形成细凝胶束。这可能是由于苹果多酚含有的活性羟基与蛋白主链或侧链上的活性基团发生了交联作用,增强了氢键进而形成更加均匀的网络结构,结构越均匀致密,其凝胶性越好,这与文献[12]的研究结果一致。FESEM 显示出一些颗粒状物质,这可能是天然物质(苹果多酚)与蛋白质结合的结果。

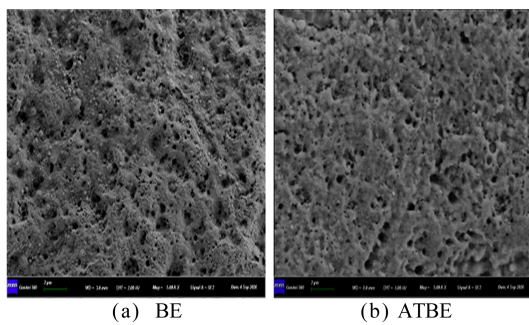


图 2 BE、ATBE 蛋壳的 FESEM 图

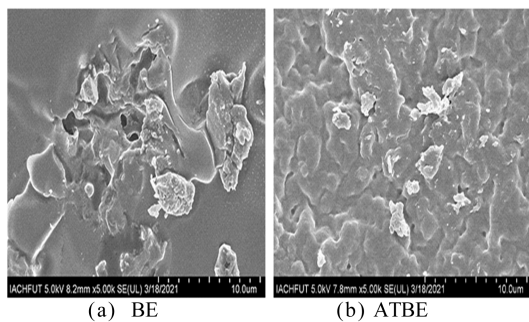


图 3 BE、ATBE 蛋白的 FESEM 图

2.3 表面疏水性变化分析

蛋白的表面疏水性如图 4 所示。

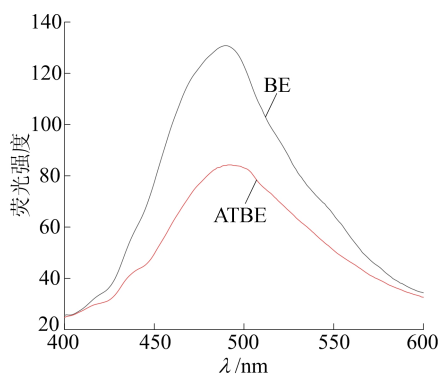


图 4 蛋白的荧光光谱图

苹果枝处理后蛋白的表面疏水性降低,表明蛋白质发生聚集,这种聚集保护了蛋白质的疏水区域,这种现象的发生可能是由于添加了苹果枝鸡蛋的蛋白质被展开,暴露出蛋白质分子内部的疏水氨基酸残基^[13]。部分暴露的疏水氨基酸通过疏水键与多酚交联或蛋白质重新聚合^[14]。此外,蛋白质的聚合和蛋白质与多酚的交联可以产生更多的大分子,这些大分子的聚集有助于增强凝胶结构,这也是 ATBE 凝胶强度增加的原因。

2.4 二级结构分析

通过 FTIR 分析苹果枝对蛋白二级结构的影响,蛋白的二级结构如图 5 所示,图 5 中不同字母表示显著性差异。

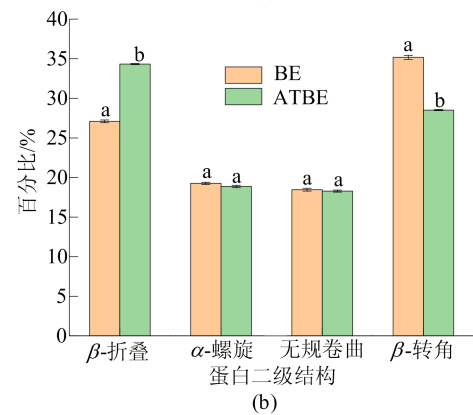
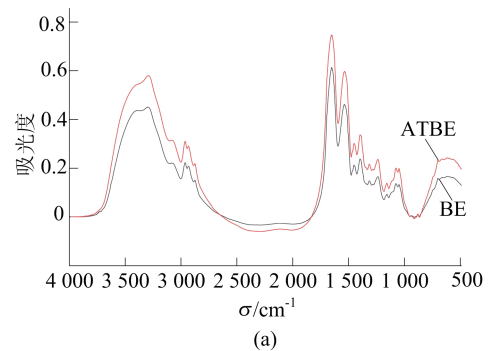


图 5 蛋白的二级结构分析

在 $3\ 200\sim 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 的特征吸收波段分别是 —OH 和 —CH 基团的伸缩振动^[15]。蛋白在 $3\ 200\sim 3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 处出现吸收峰,ATBE 比 BE 的吸收峰更高、更宽,说明分子间和分子内存在较强的氢键。使用 PeakFit 4.12 软件对蛋白在酰胺 I 波段($1\ 700\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$)的 FTIR 光谱数据进行基线校正、高斯反褶积和二阶导数拟合。FTIR 通常根据蛋白质在酰胺 I 区($1\ 700\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$)的吸收情况对蛋白质二级结构进行分类。峰分布如下^[16]: $1\ 600\sim 1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 为 β -折叠; $1\ 640\sim 1\ 650\ \text{cm}^{-1}$ 为无规卷曲; $1\ 650\sim 1\ 660\ \text{cm}^{-1}$ 为 α -

螺旋; $1\ 660\sim 1\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 为 β 转角。ATBE 的 β 折叠所占百分比最高,其次是 β 转角、 α -螺旋和无规卷曲,而 BE 的 β 转角所占百分比最高。ATBE 和 BE 的无规卷曲和 α -螺旋基本上不变。ATBE 相比 BE, β 折叠显著增加 ($P < 0.05$), β 转角 ($P < 0.05$) 显著降低。 β 折叠结构表明强大的氢键相互作用,这是维持蛋白质二级结构的主要力量,其含量增加表明分子间氢键作用增强^[17],导致蛋白质分子间聚集程度增加。在简单持续的高温和苹果枝共同作用下, β 折叠有助于凝胶网络结构的增强和弹性,使凝胶结构更加致密。综上所述,苹果枝能使蛋白的凝胶结构更紧凑和富有弹性。这一变化充分说明苹果枝对蛋白质二级结构有一定的影响。

2.5 蛋白化学成分测定

每组样本的数据由正电离模式中超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱 (ultra-

high performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap high-resolution mass spectrometry, UPLC-Q-Orbitrap HRMS) 系统获得。ATBE 和 BE 分别检测到 146、85 个物质。其中有 59 种鸡蛋所共有的物质,87 个与对照组显著不同,根据峰的精确质量和碎片模式,结合文献和数据库进行鉴定,筛选出蛋白化学成分的多酚化合物,见表 1 所列。

苹果多酚主要由黄酮类化合物、黄酮酚、异黄酮、二羟基葡聚糖和其他酚醛酸组成^[18]。根皮素是苹果多酚普遍存在的一种天然二氢查尔酮类黄酮,主要分布于苹果、梨等多汁果皮或根皮中。根皮素具有多种药理特性,如抗糖尿病、抗氧化、抗炎和抗肿瘤活性^[19]。

通过分析 FESEM、表面疏水性以及二级结构的变化,推测蛋白中的多酚是多酚进入蛋白并与蛋白结合,从而对蛋白产生了影响。

表 1 蛋白多酚类物质的 UPLC-Q-Orbitrap HRMS 分析

| 序号 | 多酚化合物 | 保留时间/ min | 分子式 | 质荷比 | 误差/ 10^{-6} | 二级质谱 | 离子形式 |
|----|----------------|--------------|--|------------|---------------|---|--------------------|
| 1 | Nootkatone | 9.35 | C ₁₅ H ₂₂ O | 219.173 89 | 2.1 | 219.174 12/201.163 82/161.132 49/145.101 18 | [M+H] ⁺ |
| 2 | Phloretin | 10.52 | C ₁₅ H ₁₄ O ₅ | 275.090 88 | 1.8 | 107.049 49/275.120 82 | [M+H] ⁺ |
| 3 | Daidzein | 11.32 | C ₁₅ H ₁₀ O ₄ | 255.064 79 | 0.9 | 253.050 38 | [M+H] ⁺ |
| 4 | Glycitein | 11.59 | C ₁₆ H ₁₂ O ₅ | 285.075 20 | 1.3 | 283.061 19/268.037 72/240.042 36/161.023 40 | [M+H] ⁺ |
| 5 | Genistein | 12.20 | C ₁₅ H ₁₀ O ₅ | 269.045 75 | 0.3 | 241.050 42/151.002 49 | [M-H] |
| 6 | Sinapinic acid | 12.51 | C ₁₁ H ₁₂ O ₅ | 207.064 87 | 1.4 | 207.065 20/192.041 76/164.046 77 | [M-H] |
| 7 | Nobiletin | 14.23 | C ₂₁ H ₂₂ O ₈ | 403.137 97 | 1.9 | 403.138 21/373.091 49/211.023 79/118.068 56 | [M+H] ⁺ |
| 8 | Tangeritin | 14.90 | C ₂₀ H ₂₀ O ₇ | 373.127 32 | 2.3 | 373.128 14/343.081 02 | [M+H] ⁺ |

3 结 论

在苹果枝的存在下,烘烤鸡蛋的理化性质、微观结构和蛋白组成发生了显著变化。与苹果枝共同烘焙,可以有效改善鸡蛋的质地,使鸡蛋的弹性增加,硬度下降,蛋白凝胶变得光滑致密。在烘焙过程中,ATBE 的蛋壳气孔数量增加,多酚类物质进入蛋白中,表面疏水性降低以及氢键作用增强,该现象表明苹果枝中的多酚酸等活性物质通过蛋壳孔和蛋壳膜进入鸡蛋中,通过氢键和疏水作用与鸡蛋中的蛋白质结合,促进了蛋白的聚集。本文的研究为苹果多酚在食品中的应用奠定了基础,提高了苹果多酚的功能性和适用性。

[参 考 文 献]

[1] 武书庚. 鸡蛋的营养价值和对人体健康的益处[J]. 养生大

世界,2020(9):80-81.

- [2] LECHEVALIER V, GUERIN-DUBIARD C, ANTON M, et al. Pasteurisation of liquid whole egg: optimal heat treatments in relation to its functional, nutritional and allergenic properties [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 137-149.
- [3] ZHAO Y, LUO X, LI J, et al. Effect of basic alkali-pickling conditions on the production of lysinoalanine in preserved eggs [J]. Poultry Science, 2015, 94(9): 2272-2279.
- [4] HATANAKA Y, YAMAUCHI A, KOBAYASHI O, et al. Electron microscopic analysis of the effects of tea extract on strength improvement of egg white gels [J]. Food Science and Technology Research, 2009, 15(1): 5-10.
- [5] YANG X, KANG K, QIU L, et al. Effects of carbonization conditions on the yield and fixed carbon content of biochar from pruned apple tree branches [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1691-1699.
- [6] 黄丽燕, 张强, 刘文营, 等. 不同热处理方式对卤蛋白的质构影响 [J]. 食品工业, 2012(9): 75-78.

(下转第 282)

- Chemistry Research, 2012, 51(11):4222-4229.
- [16] MOTOYAMA M, VENIEN A, LOISON O, et al. In situ characterization of acidic and thermal protein denaturation by infrared microspectroscopy[J]. Food Chemistry, 2018, 248:322-329.
- [17] NAWAZ A, IRSHAD S, ALIKHANI I, et al. Protein oxidation in muscle-based products; effects on physicochemical properties, quality concerns, and challenges to food industry[J]. Food Research International, 2022, 157:111322.
- [18] ÁLVAREZ C, TIWARI B K, RENDUELES M, et al. Use of response surface methodology to describe the effect of time and temperature on the production of decolorized, antioxidant and functional peptides from porcine hemoglobin by sub-critical water hydrolysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73:280-289.
- [19] WANG Y H, WANG J M, WAN Z L, et al. Corn protein hydrolysate as a new structural modifier for soybean protein isolate based O/W emulsions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118:108763.
- [20] SHEVKANI S K, SINGH N, RANA J C, et al. Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolates [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49:541-550.
- [21] KOSTERS H A, WIERENGAL P A, GRUPPEN H. SELDI-TOF-MS as a rapid tool to study food related protein-peptide interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24:667-673.
- [22] LIU F F, LI Y Q, WANG C Y, et al. Physicochemical, functional and antioxidant properties of mung bean protein enzymatic hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2022, 393:133397.
- [23] KELLERBY S S, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Role of proteins in oil-in-water emulsions on the stability of lipid hydroperoxides [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2006, 54(20):7879-7884.
- [24] WANG G, WANG T. Oxidative stability of egg and soy lecithin as affected by transition metal ions and pH in emulsion[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2008, 56(23):11424-11431.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 274 页)

- [7] 王绍清, 曹红, 曹宝森. 扫描电镜法观察鸡蛋壳超微结构形貌[J]. 食品科学, 2013, 34(13):110-114.
- [8] CHEN Z Y, LI J K, TU Y G, et al. Changes in gel characteristics of egg white under strong alkali treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45:1-8.
- [9] CHANG C H, SU Y J, GU L P, et al. Microwave induced glycosylation of egg white protein; study on physicochemical properties and baking performance[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118:106596.
- [10] LI J H, ZHANG Y F, FAN Q, et al. Combination effects of NaOH and NaCl on the rheology and gel characteristics of hen egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 250:1-6.
- [11] AI M M, ZHOU Q, GUO S G, et al. Characteristics of intermolecular forces, physicochemical, textural and microstructural properties of preserved egg white with Ca(OH)₂ addition[J]. Food Chemistry, 2020, 314:126206.
- [12] ZHOU X X, CHEN T, LIN H H, et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids 2019, 90:82-89.
- [13] XUE H, TU Y G, XU M, et al. Changes in physicochemical properties, gel structure and in vitro digestion of marinated egg white gel during braising[J]. Food Chemistry, 2020, 330:127321.
- [14] CHEN S X, NI Z J, THAKUR K, et al. Effect of grape seed powder on the structural and physicochemical properties of wheat gluten in noodle preparation system[J]. Food Chemistry, 2021, 355:129500.
- [15] AI M M, TANG T, ZHOU L D, et al. Effects of different proteases on the emulsifying capacity, rheological and structure characteristics of preserved egg white hydrolysate[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87:933-942.
- [16] AI M M, ZHOU Q, GUO S G, et al. Effects of tea polyphenol and Ca(OH)₂ on the intermolecular forces mechanical, rheological, and microstructural characteristics of duck egg white gel [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94:11-19.
- [17] AI M M, ZHOU Q, XIAO N, et al. Enhancement of gel characteristics of NaOH-induced duck egg white gel by adding Ca(OH)₂ with/without heating[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103:105654.
- [18] BAO M J, SHEN J, JIA Y L, et al. Apple polyphenol protects against cigarette smoke-induced acute lung injury [J]. Nutrition, 2013, 29:235-243.
- [19] 徐怀德, 王临宾, 张立佳. 苹果叶多酚的纯化及其抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(20):72-78.

(责任编辑 张 镗)