

不同熟化方式对咸蛋黄品质的影响

程谦伟, 魏新悦, 符诗晏, 干莉娜, 钟秋, 吴权丹, 程缘

Effect of Different Cooking Methods on Quality of Salted Egg Yolk

CHENG Qianwei, WEI Xinyue, FU Shiyang, GAN Lina, ZHONG Qiu, WU Quandan, and CHENG Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040349>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

腌制条件对熟制咸鸭蛋蛋黄组织形态及组成的影响

Effects of Salting Conditions on the Morphology and Composition of Cooked Salted Duck Eggs Yolk

食品工业科技. 2023, 44(11): 80-87 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060301>

咸蛋清凝胶性能改良及其在咸蛋清香干加工中的应用

Improvement of the Gel Properties of Salted Egg White and Its Application in the Processing of Dried Salted-Egg-White Curd

食品工业科技. 2023, 44(17): 251-262 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110122>

不同熟化方式对藜麦酱品质的影响

Effects of Different Cooking Methods on the Quality of Quinoa Sauce

食品工业科技. 2022, 43(21): 60-68 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120205>

不同腌制方式对煮制猪肉品质、组织形态和蛋白结构的影响

Effects of Different Salting Methods on the Quality Traits, Histomorphology and Protein Structure of Cooked Pork Steaks

食品工业科技. 2022, 43(23): 103-111 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030282>

脂质过氧自由基对蛋黄蛋白结构和加工性能的影响

Effect of Lipid Peroxyl Radicals on the Structure and Processing Properties of Egg Yolk Protein

食品工业科技. 2024, 45(20): 98-104 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110330>

基于高光谱成像的咸鸭蛋腌制品质快速检测

Rapid Detection on the Quality of Salted Duck Eggs Based on Hyperspectral Imaging

食品工业科技. 2024, 45(2): 260-268 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030356>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程谦伟, 魏新悦, 符诗晏, 等. 不同熟化方式对咸蛋黄品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 65–72. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040349

CHENG Qianwei, WEI Xinyue, FU Shiyan, et al. Effect of Different Cooking Methods on Quality of Salted Egg Yolk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 65–72. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040349

· 研究与探讨 ·

不同熟化方式对咸蛋黄品质的影响

程谦伟^{1,2}, 魏新悦^{1,2}, 符诗晏¹, 干莉娜³, 钟 秋¹, 吴权丹¹, 程 缘^{1,2,*}

(1. 广西科技大学生物与化学工程学院, 广西柳州 545006;

2. 广西柳州螺蛳粉技术创新中心, 广西柳州 545006;

3. 广西生态工程职业技术学院, 广西柳州 545004)

摘 要: 本研究分别采用烤制、超声波和蒸制三种熟化方式对分离腌制的咸蛋黄进行熟化处理, 以水分含量、含盐率、表观出油率、色泽、质构特性、感官指标为品质指标, 探究不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄品质的影响, 并结合拉曼光谱探究咸蛋黄的品质指标和结构特征之间的相关性。结果表明烤制温度和时间对咸蛋黄水分含量、含盐率和质构特性的影响较小, 对表观出油率和色泽影响较大; 蒸制 30 min 的咸蛋黄的含盐率显著低于其他熟化方式 ($P<0.05$); 控制烤制温度后, 表观出油率随烤制时间的增加而显著上升 ($P<0.05$); 熟化后咸蛋黄的色差值依次增加的顺序为: 蒸制<超声波<烤制; 120 °C 烤制 10 min 的咸蛋黄感官综合评价较高。拉曼光谱分析表明未熟化咸蛋黄的蛋白质二级结构以 α -螺旋和 β -折叠构象为主, 烤制熟化后 α -螺旋含量明显降低, 超声波和蒸制熟化后 β -折叠含量明显降低, 色氨酸残基暴露的更多; 酪氨酸残基在超声波的作用下暴露的最多, 无规则卷曲含量均明显增加。相关性分析表明 β -折叠结构含量越高, 咸蛋黄色泽越亮; 无规则卷曲结构含量越高, 咸蛋黄的水分含量越低, 形态越好; 色氨酸残基对咸蛋黄出油、形态和色泽都有显著影响; 酪氨酸残基主要影响咀嚼性。本研究从微观结构的视角解释了不同熟化工艺对咸蛋黄宏观特征的影响, 为分离腌制咸蛋黄的熟化研究提供了部分数据支撑。

关键词: 咸蛋黄, 熟化方式, 拉曼光谱, 相关性分析

中图分类号: TS253.4⁺

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0065-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040349

本文网刊:



Effect of Different Cooking Methods on Quality of Salted Egg Yolk

CHENG Qianwei^{1,2}, WEI Xinyue^{1,2}, FU Shiyan¹, GAN Lina³, ZHONG Qiu¹, WU Quandan¹, CHENG Yuan^{1,2,*}

(1. School of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology,

Liuzhou 545006, China;

2. Guangxi Liuzhou Luosifen Center of Technology Innovation, Liuzhou 545006, China;

3. Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, China)

Abstract: In this study, three cooking methods, namely baking, ultrasonic treatment and steam, were employed for cooking salted egg yolk (SEY). The effects of different cooking methods on the quality of SEY were investigated by considering moisture content, salt content, apparent oil yield, color, texture characteristics, and sensory indexes as quality indicators. The correlation between the quality indicators and structural characteristics of SEY was examined using Raman spectroscopy based on the above research results. The results showed that the impact of baking temperature and time on moisture content, salt content, and texture characteristics of SEY was minimal. However, it had a significant effect on apparent oil yield and color. Steaming for 30 minutes resulted in significantly lower salt content compared to other cooking methods ($P<0.05$). After controlling for baking temperature, there was a significant increase in apparent oil yield with longer baking time ($P<0.05$). Following the cooking process, the color value of SEY increased in the following order: steam<ultrasonic treatment<baking. Sensory evaluation indicated that SEY baking at 120 °C for 10 minutes had higher

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 广西自然科学基金 (2023JJB130219); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2023KY0348); 广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目 (S202410594107); 广西科技大学博士基金项目 (校科博 22Z25)。

作者简介: 程谦伟 (1979-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品加工技术, E-mail: foglan@163.com。

* 通信作者: 程缘 (1990-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品蛋白质构效关系研究及资源化综合利用, E-mail: ycheng90@126.com。

comprehensive scores. Raman spectrum analysis revealed that α -helix and β -fold conformations dominated the protein secondary structure of uncooked SEY. However, after baking process, α -helix content decreased significantly while β -fold content decreased notably after ultrasonic and steaming treatments with more tryptophan residues exposed. Under ultrasonic treatment tyrosine residues were most exposed. A significant increase in random crimp contents was observed after all three cooking methods. The correlation analysis revealed a positive relationship between the content of β -fold structure and the brightness of SEY color. Additionally, an increase in the content of irregular curly structure was found to be associated with lower moisture content and improved shape of SEY. Furthermore, tryptophan residues were found to have a significant impact on oil yield, morphology, and color of SEY, while tyrosine residues primarily influenced mastication. This study elucidated the effects of different cooking methods on the macroscopic characteristics of SEY from a microstructural perspective and provided valuable data support for further research on its cooking techniques.

Key words: salted egg yolk; cooking methods; Raman spectrum; correlation analysis

近年来,随着烘焙和快消产业的发展,以咸蛋黄为主要原料的食品在日常生活中愈加常见^[1]。整蛋腌制获取咸蛋黄的方式存在研制时间长、造成蛋清浪费等问题,故蛋黄分离腌制成为近几年研究咸蛋黄腌制的主流方向^[2-3]。但此种方式腌制的咸蛋黄的风味并不稳定,咸蛋黄的风味不仅受到原料蛋的种类和腌制工艺的影响,同时熟化工艺对咸蛋黄的品质影响也是不能忽视的。在熟化的过程中,咸蛋黄中的蛋白质发生变性,并使蛋黄产生丰润松沙的口感,故熟化工艺是咸蛋黄质地和口感发生改变的关键工艺^[4]。刘斯琪^[5]以沸水蒸煮的方式对蛋黄进行熟化处理,研究发现熟化时间对蛋黄的出油率、色差、质构有显著影响。Somwang等^[6]将咸鸭蛋在沸水中煮20 min得到咸蛋黄,并将其色泽和pH与未熟化的咸蛋黄进行比较,研究发现咸蛋黄在熟化过程中色泽显著增加,pH显著下降。Woodward等^[7]将分离的咸蛋黄放入密封的烧杯中水浴加热,探究了不同熟化时间和熟化温度对咸蛋黄质地的影响,研究发现当蒸煮时间固定,硬度随蒸煮温度的增加而增大,粘性和弹性在一定范围内随温度的增加而增大。Wang等^[8]将咸蛋黄放入密封袋中在超声的作用下水浴加热并与未进行超声熟化的咸蛋黄进行比较,研究发现超声处理增加了水分的损失,增加了油脂的分泌。Yang等^[9]对咸蛋黄进行加压蒸煮,研究发现加压蒸煮的盐蛋的盐含量总体下降,而蛋黄的出油量增加。咸蛋黄是一个复杂的多元体系,对物理场,特别是对温度等因素极为敏感^[10]。但目前对于咸蛋黄熟化的研究还不全面、不系统。

因此,本研究以新鲜蛋黄为原料,通过分离腌制技术制作咸蛋黄,采用烤制、超声波和蒸制三种方式对咸蛋黄进行熟化加工,探究不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄品质的影响。并通过分析咸蛋黄的品质指标和脂蛋白结构特征之间的相关性,揭示结构特征对品质指标的影响。为咸蛋黄分离腌制技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜鸡蛋 正大蛋业(广西)有限公司;食盐 广东省盐业集团广州有限公司;羧甲基纤维素钠

(CMC)、氯化钙、柠檬酸、维生素C 食品级,睢县甘淳商贸有限公司;其他试剂均为分析纯级 四川西陇科学有限公司。

CT3 质构仪 美国 Brookfield 公司;LS171 色差仪 深圳林上科技有限公司;Dxr2xi 激光共聚焦拉曼光谱仪 赛默飞世尔科技有限公司;MDKXD-E1ACM 烤箱 32 L,小米科技有限责任公司;KQ 52001 超声波仪 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 咸蛋黄的制备

1.2.1.1 模具制作 购买市面上用于烘焙的软硅胶半圆形模具(直径约为3.8 cm),在每个半圆上剪出8~12个小洞,供腌制液渗入(直径约为2 mm),上下两张为一套模具。

1.2.1.2 腌制液配制 参考李斌等^[11]的研究结果,按如下配方配制腌制液(wt%):蒸馏水 77.4、食盐 20、羧甲基纤维素钠(CMC)1、氯化钙 1、维生素C 0.3、柠檬酸 0.3。

1.2.1.3 咸蛋黄腌制 新鲜鸡蛋→打蛋、分蛋→蛋黄放入模具→模具放入腌制液→室温腌制 48 h→50 ℃ 加热鼓风固化 30 min→室温固化 24 h→成熟生咸蛋黄。

1.2.1.4 熟化咸蛋黄 a.烤制熟化咸蛋黄:待蛋黄室温固化完成后,将咸蛋黄放置在烤盘中,调节烤箱的温度和时间分别为 110 ℃ 烤制 20(烤制 1)、30 min(烤制 2);120 ℃ 烤制 10(烤制 3)、20 min(烤制 4);130 ℃ 烤制 10(烤制 5)、20 min(烤制 6)。

b.蒸煮熟制咸蛋黄:待蛋黄室温固化完成后真空包装,将真空包装后的咸蛋黄置于蒸锅上,蒸制时间分别为 20(蒸煮 1)、30 min(蒸煮 2)。

c.超声波熟制咸蛋黄:待蛋黄室温固化完成后真空包装置于超声波仪中,控制超声波仪的温度为 80 ℃,超声波功率为 200 W,熟化的时间为 30 min^[12](超声波)。

1.2.2 指标的测定

1.2.2.1 水分含量测定 参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》第一法^[13]。

1.2.2.2 含盐率测定 参照 GB 5009.44-2016《食品

安全国家标准食品中氯化物的测定》第三法^[14]。

1.2.2.3 表观出油率的测定 根据 Ai 等^[15] 的方法进行咸蛋黄表观出油率的分析, 并进行了一些修改。称取熟化的咸蛋黄的质量为 M_1 , 准备若干张吸油纸在蛋黄的表面多次进行吸附至吸油纸上无明显油迹, 吸附完成后, 吸油纸质量为 M_2 , 未收集油的吸油纸质量为 M_3 。表观出油率由以下公式计算:

表观出油率(%) = $\frac{M_2 - M_3}{M_1} \times 100$

1.2.2.4 色度的测定 参考 Dong 等^[16] 的方法, 使用色差仪根据操作手册测定咸蛋黄 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 色差计算的标准品为腌制完成后未经过熟化的咸蛋黄, 其色泽数值分别为: $L_0=57.77$ 、 $a_0=14.84$ 、 $b_0=36.88$, 并通过以下等式获得色差值 ΔE 。

$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$

1.2.2.5 质构的测定 参考 Thammarat 等^[17] 的方法。将蛋黄熟化后, 切成体积 1 cm^3 、重量相近的平行样品。质构特性用 TPA 程序, P/36 R 探头, 设置测前速度 2.00 mm/s , 测试速度 2.00 mm/s ; 测后速 2.00 mm/s ; 压缩程度 50% ; 停留时间 5 s ; 数据采集速度 500 p/s ; 触发值 5 g ^[18]。测定咸蛋黄的硬度、弹性、咀嚼性。

1.2.2.6 感官评价 将产品随机编码, 然后邀请 10 名有品尝经验的专业人员进行品尝, 统计气味、形态、色泽、出油、口感五个方面的得分, 表 1 为咸蛋黄熟化后感官评价标准^[5]。

表 1 咸蛋黄感官评分标准
Table 1 Sensory score criteria for SEY

指标	性状描述	评分
色泽	橙红色或淡红色, 透亮且油色均匀	8~10
	橙黄色, 油色不足	5~7
	淡黄或黄褐色, 无油色	0~4
	切开倒置有明显的油滴	8~10
出油	切开可以挤出油滴	5~7
	出油不明显	0~4
形态	蛋黄形态完整, 圆润, 表面无明显凸起或凹陷	8~10
	蛋黄形态较为完整, 表面有较少的凸起或凹陷	5~7
	蛋黄形态不完整, 表面有较大的凸起或凹陷	0~4
口感	质地松软, 有明显沙性, 有咸蛋黄固有香味, 咸度适中	8~10
	质感较硬, 有沙性, 蛋黄稍咸或稍淡	5~7
	质感较硬, 无沙性, 无咸蛋黄应有的香味, 蛋黄过咸或没有明显咸味	0~4
	香味浓郁, 无不良风味	8~10
气味	有淡淡的咸蛋黄气味, 无明显不良风味	5~7
	无咸蛋黄应有的气味, 有不良风味	0~4

1.2.2.7 拉曼光谱分析 取适量咸蛋黄置于载玻片上, 使用拉曼光谱仪进行扫描。激发光波长为 532 nm , 扫描范围 $400\sim 2000\text{ cm}^{-1}$, 曝光时间 60 s 。因苯丙氨酸环在 1001 cm^{-1} 缩振动强度不随蛋白质结构变化而变化, 可将其作为内标对拉曼光谱数据进行归一

化。使用 PeakFit 4.0 软件对蛋白质二级结构进行峰分离和曲线拟合^[19]。

1.3 数据处理

单个指标的测定均采用同批次不同咸蛋黄进行三次平行实验, 利用 SPSS 22.0 软件进行数据处理和相关性分析。结果以平均值±标准差表示, 采用比较平均值单因素方差进行统计显著性分析, Duncan 的事后多重比较确定数据之间的显著性差异, $P<0.05$ 为差异显著。利用 Origin 2021 软件对实验结果进行图谱绘制。

2 结果与分析

2.1 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄水分含量和含盐率的影响

咸蛋黄的水分含量和含盐率主要由腌制过程的渗透作用决定。在腌制完成后, 咸蛋黄的水分含量和含盐率会稳定在一个范围, 通过不同的熟化方式可以适当改变咸蛋黄的水分含量和含盐率^[20]。如图 1(a) 所示, 烤制的咸蛋黄的水分含量整体低于超声波熟化和蒸制熟化的咸蛋黄。超声波和蒸制的咸蛋黄由于真空包装的缘故, 水分的蒸发受到限制^[21]。烤制咸蛋黄的水分含量除 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烤制 20 min 外其余五组不存在显著性差异, 说明烤制温度和烤制时间对咸蛋黄水分含量的影响不显著。超声波熟化的咸蛋黄的水分含量为 30.82% , 低于蒸制的咸蛋黄, 但是并不存在显著性差异, 说明真空包装后, 热效应和超声波的空化效应对咸蛋黄水分含量的影响不显著。Xu 等^[22]

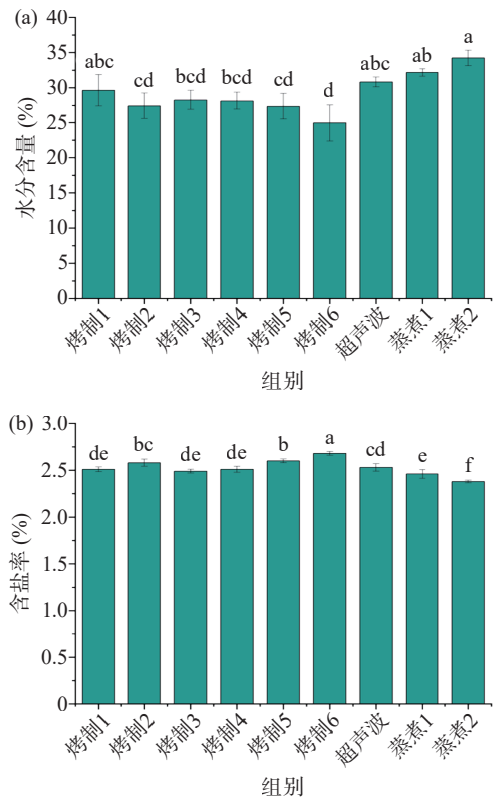


图 1 不同熟化方式的咸蛋黄的水分含量和含盐率
Fig.1 Moisture content and salt content of SEYs with different cooking methods

报道了热处理可以减小蛋白质颗粒的大小,使蛋黄中的脂质球更细小,导致蛋黄结构较弱,释放出水分,并且随着温度升高,时间延长释放出更多的水分。本研究超声波的处理温度为 80 ℃,蒸制的温度为 100 ℃左右,并且随着蒸制时间延长,水分含量增加,与上述研究结果一致。如图 1(b)所示,烤制的咸蛋黄的盐浓度整体高于超声波熟化和蒸制熟化的咸蛋黄,且当蒸制时间达到 30 min 时,含盐率为 2.38%,显著低于其他组($P<0.05$)。与水分含量的研究结果相反,含盐率整体呈现水分含量越高盐分越低趋势^[23]。因此,烤制组整体盐分的变化规律呈现出控制烤制温度,盐分含量随烤制时间的增加而上升的趋势。

2.2 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄表现油率的影响

食物的风味很大程度上取决于食物中的油脂含量^[24],在咸蛋黄的品质鉴定中,出油性是非常重要的判断标准。如图 2 所示,烤制的咸蛋黄的表现出油率总体上高于超声波和蒸制熟化的咸蛋黄,其中 130 ℃ 烤制 20 min 表现出油率最高,达到了 2.02%。在烤制的咸蛋黄中,控制烤制温度后,表现出油率随烤制时间的增加而显著上升($P<0.05$)。这可能由于剧烈的高温加热,致使咸蛋黄原有的体系被破坏,蛋黄蛋白质变性,自由水和结合水流失,蛋黄释放大量的脂质,导致出油率上升。超声波熟化的咸蛋黄的表现出油率显著高于($P<0.05$)蒸制的咸蛋黄,可能是由于超声处理导致蛋白质表面暴露更多的疏水基团使更多的油脂聚集在表面^[25]。

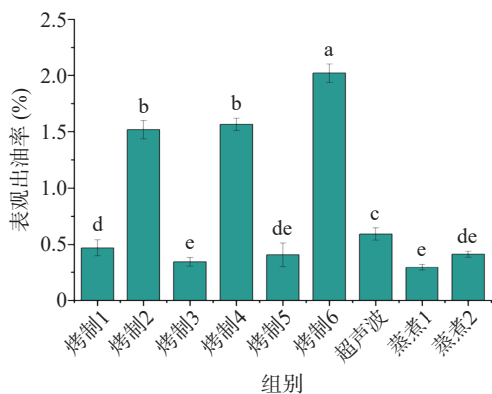


图2 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄的表现出油率

Fig.2 Apparent oil yield of SEYs with different cooking methods

2.3 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄色泽的影响

鲜蛋黄呈黄色,源于其含有的胡萝卜素、叶黄素和玉米黄素^[26]。熟化后咸蛋黄的颜色变化和水分流失以及大量游离脂肪酸的产生有关,水分影响着色素的浓度,游离脂肪酸可以萃取色素,两者的相互作用使得色素浓度发生改变,进而使得咸蛋黄在腌制和熟化过程中呈现不同的颜色^[27]。由表 2 可知,除 110 ℃ 烤制 20 min 外,烤制熟化的咸蛋黄之间的 L^* 值没有显著差异,且烤制咸蛋黄的 L^* 值整体要高

于超声波和蒸制的咸蛋黄,这可能是由于在烘烤过程中,咸蛋黄中的油脂融化并在其表面形成一层油膜,这层油膜能够反射光线,增加食品的光泽度,使咸蛋黄看起来更加明亮^[28],与出油率的结果一致,随着出油率的增加,咸蛋黄看起来更加明亮。超声熟化和蒸煮熟化的 a^* 值均没有烤制熟化的 a^* 值高,但烤制熟化的 b^* 值较后两种熟化方式偏低,说明烤制熟化促进蛋黄由黄色向红色转化。熟化后咸蛋黄的 ΔE 依次增加的顺序为:蒸煮<超声波<烤制。总体来说烤制对咸蛋黄色泽的影响比其他熟化方式更大。

表2 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄色泽指标

Table 2 Color indexes of SEYs with different cooking methods

组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
烤制1	86.22±0.15 ^b	1.59±0.31 ^{abc}	4.64±0.15 ^c	45.00±0.19 ^b
烤制2	87.51±0.43 ^a	1.41±0.25 ^{bcd}	4.69±0.19 ^c	45.84±0.47 ^a
烤制3	87.70±0.25 ^a	1.36±0.03 ^{bcd}	4.28±0.24 ^{cd}	46.27±0.01 ^a
烤制4	87.40±0.32 ^a	1.87±0.07 ^a	4.53±0.53 ^c	45.76±0.57 ^a
烤制5	87.30±0.24 ^a	1.69±0.09 ^{ab}	3.81±0.06 ^d	46.24±0.19 ^a
烤制6	87.62±0.18 ^a	1.53±0.03 ^{abc}	4.42±0.37 ^{cd}	46.07±0.38 ^a
超声波	86.49±0.20 ^b	1.23±0.43 ^{cde}	5.91±0.36 ^b	44.38±0.06 ^c
蒸煮1	86.20±0.71 ^b	1.04±0.32 ^{de}	9.81±0.80 ^a	41.63±0.22 ^d
蒸煮2	86.31±0.35 ^b	0.92±0.04 ^e	9.61±0.38 ^a	41.86±0.08 ^d

注:表中数值以平均值±标准差表示($n=3$);同一指标字母不同表示不同熟化方式之间差异显著($P<0.05$);表3、表4同。

2.4 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄质构特性的影响

蛋黄的质构特性是影响咸蛋黄口感的重要指标。由表 3 可知,烤制熟化的硬度和咀嚼性较高,蒸制的硬度和弹性适中,经超声波熟化后的咸蛋黄硬度、弹性、咀嚼性均偏低可能是因为超声处理时蛋黄固体物质间出现空隙,水分更容易渗透进入蛋黄内部^[29]。130 ℃ 烤制 10 min 的硬度最高,为 50.46 N,弹性较小,为 4.35 mm,结合感官评分结果(表 4)说明 130 ℃ 烤制 10 min 的质构指标并不好。蒸制咸蛋黄的硬度随蒸制时间显著降低($P<0.05$),而咀嚼性增加,说明随蒸制时间的延长,可以有效提高咸蛋黄的口感;结合感官评分结果可知适口咸蛋黄的质构指标为:硬度 30~40 N;弹性 5 mm 左右;咀嚼性在 110 J 上下。

表3 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄的质构特性

Table 3 Texture characteristics of SEYs with different cooking methods

组别	硬度(N)	弹性(mm)	咀嚼性(J)
烤制1	27.25±3.49 ^e	4.44±0.96 ^{bc}	68.27±31.27 ^c
烤制2	38.02±8.98 ^{bcd}	5.19±0.4 ^{ab}	112.90±29.66 ^{abc}
烤制3	44.06±5.14 ^{abc}	5.23±0.51 ^{ab}	111.87±26.85 ^{abc}
烤制4	37.89±3.43 ^{bcd}	5.73±0.05 ^a	139.30±28.77 ^a
烤制5	50.46±5.33 ^a	4.35±1.03 ^{bc}	116.40±28.53 ^{abc}
烤制6	41.30±5.34 ^{abc}	4.63±0.52 ^{ab}	133.10±19.6 ^{ab}
超声波	33.79±1.58 ^{cde}	3.51±0.36 ^{cd}	79.67±3.46 ^c
蒸煮1	46.45±4.76 ^{ab}	4.86±0.26 ^{ab}	89.47±22.28 ^{bc}
蒸煮2	30.28±8.52 ^{de}	5.10±0.41 ^{ab}	110.83±1.94 ^{abc}

表 4 不同熟化方式的咸蛋黄的感官评分
Table 4 Sensory score of SEYs with different cooking methods

组别	气味	形态	色泽	出油	口感	总分
烤制1	6.60±1.58 ^{ab}	7.90±0.88 ^a	8.10±0.88 ^a	6.50±1.08 ^c	6.90±1.29 ^{ab}	36.0±3.71 ^{bcd}
烤制2	7.60±1.96 ^{ab}	8.10±0.99 ^a	7.50±1.08 ^{ab}	7.50±0.85 ^{ab}	6.80±1.23 ^{ab}	37.50±2.92 ^{abc}
烤制3	8.00±1.33 ^a	7.90±0.88 ^a	8.00±1.25 ^{ab}	7.80±1.03 ^a	7.70±1.34 ^a	39.40±2.88 ^a
烤制4	7.60±1.90 ^{ab}	7.60±0.97 ^a	8.20±1.32 ^a	7.80±1.03 ^a	7.50±1.27 ^{ab}	38.70±3.27 ^{ab}
烤制5	6.60±1.84 ^{ab}	7.80±0.79 ^a	8.20±0.63 ^a	6.70±1.25 ^{bc}	6.40±1.17 ^b	35.70±3.71 ^{cd}
烤制6	7.10±1.52 ^{ab}	7.80±0.92 ^a	7.80±1.40 ^{ab}	7.90±1.10 ^a	7.10±1.1 ^{ab}	37.70±3.65 ^{abc}
超声波	7.50±1.08 ^{ab}	7.70±0.95 ^a	7.50±0.53 ^{ab}	6.70±0.48 ^{bc}	7.10±0.57 ^{ab}	36.50±1.58 ^{abc}
蒸煮1	6.30±1.25 ^{ab}	7.40±0.70 ^a	7.00±0.67 ^b	6.30±0.48 ^c	6.40±0.97 ^b	33.40±1.71 ^d
蒸煮2	7.20±1.23 ^{ab}	7.70±0.82 ^a	7.60±0.84 ^{ab}	6.90±0.57 ^{bc}	7.10±0.88 ^{ab}	36.50±1.65 ^{abc}

2.5 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄感官特性的影响

通过对 9 组熟化方式不同的咸蛋黄从外观形态、色泽、出油、风味和口感等进行五点标度评价后发现,出油性好、咸淡适中、有沙质感的咸蛋黄更受评审员欢迎^[30]。蛋黄形态评分没有较大差异,得分集中在 7.40~8.10 之间。咸蛋黄的口感影响着感官总评分,其中 120 ℃ 烤制 10 min 的咸蛋黄的口感得分和总分均最高,分别为 7.70 分和 39.40 分。120 ℃ 烤制 20 min 和 130 ℃ 烤制 10 min 的咸蛋黄色泽较好。蒸制 20 min 的咸蛋黄出油最少,说明蒸制的熟化方式对咸蛋黄出油的影响较大,这与表现出油率的结果一致,同时也能进一步说明色泽中 L^* 指标与出油情况有关。整体来看,烤制的熟化方式对出油的影响较大,超声熟化的各项得分在蒸制熟化和烤制熟化之间,蒸制熟化的口感不如其他两种熟化方式。

2.6 不同熟化方式对分离腌制咸蛋黄脂蛋白结构特征的影响

拉曼光谱提供的丰富结构信息为研究食品中物质的结构特性与功能特性的关系提供了可能^[31]。因此,本研究根据感官评分情况,在每种处理方式中选择最优的一组(120 ℃ 烤制 10 min、超声熟化、蒸制 30 min)与未熟化的蛋黄一起进行拉曼光谱分析,测定不同熟化方式对蛋黄脂蛋白结构变化的影响。

2.6.1 光谱特征峰和峰位归属 蛋黄脂蛋白的蛋白质和脂质的化学键的拉曼光谱特征峰和峰位归属见表 5。图 3 为不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄与未熟化的分离腌制咸蛋黄拉曼光谱。从宏观上看,并未

出现新的特征峰,但是峰的位置发生不同程度的位移,熟化后的咸蛋黄的峰强度弱于未熟化的咸蛋黄,这些均反映出脂蛋白空间构象的变化。

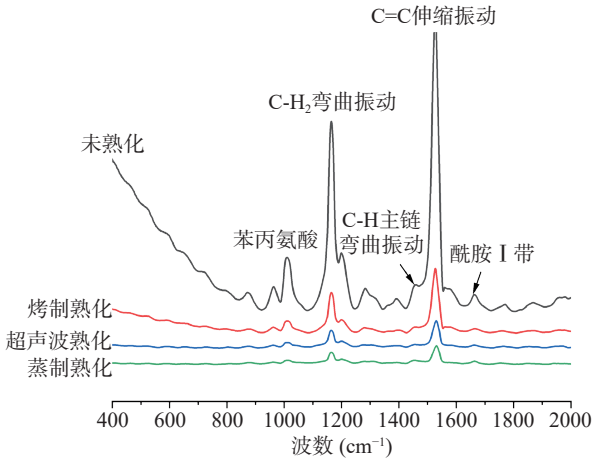


图 3 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄与未熟化的分离腌制咸蛋黄拉曼光谱

Fig.3 Raman spectra of SEYs with different cooking methods and uncooked

2.6.2 酰胺 I 带变化 通过对酰胺 I 带的光谱进行拟合和分峰处理,可以定量分析蛋白质二级结构的相对含量,分析蛋白质主链结构的变化。如图 4,未熟化的咸蛋黄的蛋白质二级结构以 α -螺旋和 β -折叠构象为主,分别为 42.2% 和 39.6%,表明咸蛋黄中蛋白质分子内部氢键相互作用较强^[33]。烤制的咸蛋黄的 α -螺旋含量为 22.68%,明显低于未熟化组,无规则卷曲相对含量为 36.13%,明显增加,说明烤制的过程中咸蛋黄的 α -螺旋主要转化为无规则卷曲。可见,120 ℃ 烤制 10 min,维持 α -螺旋结构的氢键遭到破坏,分子结构趋于暴露式,可能出现了氧化断键。超声波和蒸制的咸蛋黄 β -折叠相对含量均明显低于未熟化组,无规则卷曲相对含量明显增加,而 α -螺旋相对含量无明显变化,说明超声波和蒸制熟化的咸蛋黄蛋白质的 β -折叠转化为了无规卷曲结构。一般情况,蛋白质的 α -螺旋结构对高温比较稳定,而 β -折叠结构则相对较不稳定。可见,超声波熟化和蒸制熟化主要破坏了蛋白质的 β -折叠结构,对 α -螺旋结构几乎无影响。经超声处理后,蛋白分子刚性结构减弱,

表 5 蛋黄中的蛋白质和脂质的拉曼光谱特征峰和峰位归属
Table 5 Raman spectral characteristic peaks and peak position attribution of proteins and lipids in egg yolk

波数(cm^{-1})	峰位归属 ^[32]
872、1010、1390	色氨酸残基
850/830	酪氨酸残基
1003	苯丙氨酸残基
1645~1660	酰胺 I 带 α -螺旋
1665~1680	酰胺 I 带 β -折叠
1680~1690	酰胺 I 带 β -转角
1660~1760	酰胺 I 带无规则卷曲

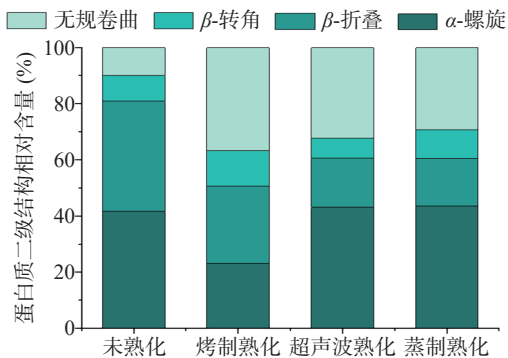


图4 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄与未熟化的分离腌制咸蛋黄蛋白质二级结构的相对含量

Fig.4 Relative contents of secondary structures of proteins of SEYs with different cooking methods and uncooked

柔性结构增加,有序的分子结构向无序发展^[34]。

2.6.3 氨基酸残基微环境变化

2.6.3.1 色氨酸残基 色氨酸吡咯环引起的谱线分别在 544、577、761、879、1014、1388、1363、1553 和 1620 cm^{-1} 附近^[35]。本研究发现色氨酸在 879、1010 和 1388 cm^{-1} 附近有明显的强峰,分别为 872、1010 和 1390 cm^{-1} 。因此选取这三个峰来表征色氨酸残基的变化。虽然三个峰的强度有明显差异,但是三个峰表征色氨酸残基的变化规律基本是一致的。由图 5 可见,未熟化咸蛋黄的色氨酸残基强度较高,说明色氨酸被包埋着^[36]。而经过熟化后,色氨酸残基的强度均明显降低,说明色氨酸暴露,并且超声波熟化与蒸制熟化的色氨酸暴露比烤制熟化的更多,与 β -折叠含量变化规律类似。

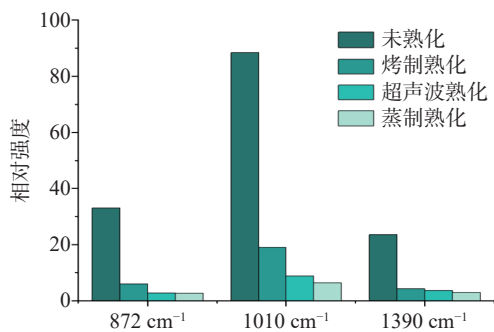


图5 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄与未熟化的分离腌制咸蛋黄色氨酸残基的变化

Fig.5 Changes of tryptophan residues in SEYs with different cooking methods and uncooked

2.6.3.2 酪氨酸残基 通常用 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 作为判定蛋白质中酪氨酸残基的暴露或者埋藏情况^[37]。当 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 的相对强度比在 1.0~2.5 的较高范围时,表明酪氨酸残基暴露于水相环境,能够参与温和的或者微弱的氢键作用,然当而 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 的相对强度低于 1.0 时,表明酪氨酸残基埋藏在疏水环境,倾向于充当氢键供体,起到增强氢键的作用^[38]。由图 6 可见,未熟化咸蛋黄和烤制咸蛋黄的酪氨酸 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 双峰比值接

近 1.0,分别为 0.98 和 0.99,表明酪氨酸残基埋藏在疏水环境和暴露于水相的比例基本一致。而超声波和蒸制熟化的咸蛋黄的酪氨酸 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 双峰比值在 1.0~2.5 的较高范围,这说明咸蛋黄中蛋白质的酪氨酸残基趋于暴露,能够参与温和或者微弱的氢键作用^[8]。超声波熟化的咸蛋黄的酪氨酸 1850 cm^{-1} /1830 cm^{-1} 双峰比值最高,说明酪氨酸残基在超声波的热效应和空化效应下暴露的最多。

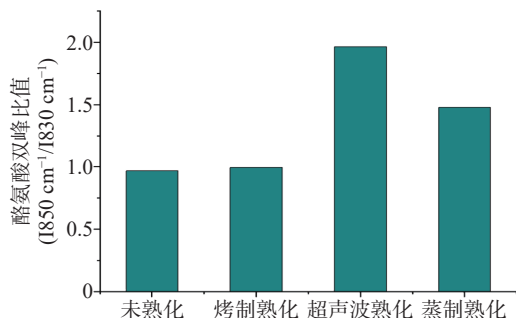
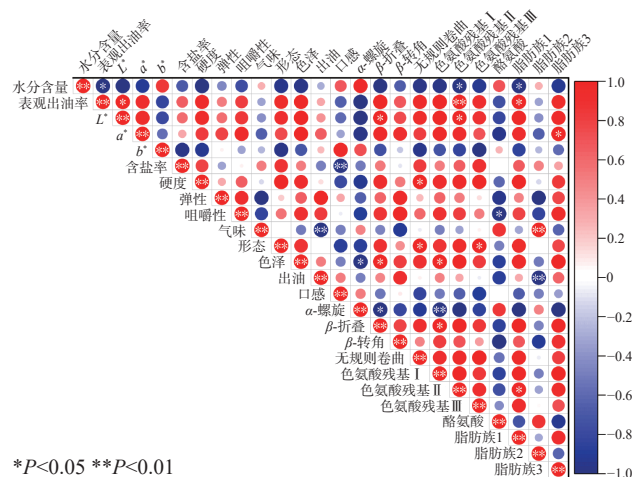


图6 不同熟化方式的分离腌制咸蛋黄与未熟化的分离腌制咸蛋黄色氨酸残基的变化

Fig.6 Changes of tyrosine residues in SEYs with different cooking methods and uncooked

2.7 咸蛋黄品质特性指标和脂蛋白结构特征的相关性分析

由图 7 可见,水分含量与 11010 cm^{-1} 色氨酸残基呈显著负相关($P<0.05$)。表观出油率与 11010 cm^{-1} 色氨酸残基和 11270 cm^{-1} 脂肪族残基分别呈极显著正相关($P<0.01$)和显著正相关($P<0.05$)。色差值 L^* 与 β -折叠含量呈显著正相关($P<0.05$)。色差值 a^* 与 11450 cm^{-1} 脂肪族残基呈显著正相关($P<0.05$)。硬度与无规则卷曲含量呈显著正相关($P<0.05$)。咀



* $P<0.05$ ** $P<0.01$

图7 咸蛋黄品质指标与结构特征的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between quality index and structural characteristics of SEYs

注:色氨酸残基 I(1872 cm^{-1} 色氨酸残基峰强);色氨酸残基 II(1010 cm^{-1} 色氨酸残基);色氨酸残基 III(1390 cm^{-1} 色氨酸残基峰强);脂肪族 1(11270 cm^{-1} 脂肪族残基峰强);脂肪族 2(11350 cm^{-1} 脂肪族残基峰强);脂肪族 3(11450 cm^{-1} 脂肪族残基峰强)。

嚼性和酪氨酸双峰比($1850\text{ cm}^{-1}/1830\text{ cm}^{-1}$)呈显著负相关($P<0.05$)。感官指标气味与 11350 cm^{-1} 脂肪族残基峰强呈极显著正相关($P<0.01$)。感官指标形态与无规则卷曲含量和 11390 cm^{-1} 色氨酸残基峰强均呈显著正相关($P<0.05$)。感官指标色泽与 α -螺旋含量呈显著负相关($P<0.05$), 与 β -折叠含量和 1872 cm^{-1} 色氨酸残基峰强均呈显著正相关($P<0.05$)。感官指标出油与 11350 cm^{-1} 脂肪族残基峰强呈极显著负相关($P<0.01$)。

可见, β -折叠结构含量越高, 咸蛋黄色泽越亮。无规则卷曲结构含量越高, 咸蛋黄的水分含量越低, 形态较好。色氨酸残基对咸蛋黄出油、形态和色泽都有显著影响。酪氨酸残基主要影响咀嚼性。

3 结论

熟化的方式对咸蛋黄的水分、色泽等宏观品质具有重要影响。烤制咸蛋黄的水分含量整体低于超声波熟化和蒸制熟化的咸蛋黄, 烤制咸蛋黄的 L^* 值整体高于其他熟化方式。本研究进一步从微观结构的角度解释了不同熟化工艺对咸蛋黄宏观品质的影响。烤制使咸蛋黄蛋白质的 α -螺旋结构主要转化为无规则卷曲。超声波和蒸制熟化的咸蛋黄蛋白质的 β -折叠结构转化为了无规卷曲结构。无规则卷曲结构含量越高, 咸蛋黄的水分含量越低, 形态越好。色氨酸残基对咸蛋黄出油、形态和色泽都有显著影响。酪氨酸残基主要影响咀嚼性。目前我国对咸蛋黄熟化方式的研究较少, 本研究对咸蛋的熟化工艺的发展具有重要意义, 同时也能促进熟咸蛋黄质量的提高, 促进高附加值、绿色健康产品的发展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 聂嘉文, 吴雨青, 陈雨琴, 等. 咸蛋清凝胶性能改良及其在咸蛋清香干加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 251–262. [NIE Jiawen, WU Yuqing, CHEN Yuqin, et al. Improvement of the gel properties of salted egg white and its application in the processing of dried salted-egg-white curd[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 251–262.]
- [2] 全其根, 宁静, 徐艺青, 等. 咸蛋黄快速腌制方法的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 155–157. [TONG Qigen, NING Jing, XU Yiqing, et al. Study on rapid salting methods of egg yolk[J]. Food Science, 2008, 29(9): 155–157.]
- [3] 王一亭. 咸蛋黄分离腌制技术研究进展[J]. 现代食品, 2020(24): 79–82. [WANG Yiting. Research progress of SEY separation and curing technology[J]. Modern Food, 2020(24): 79–82.]
- [4] XIE Yunxiao, WANG Jinqu, WANG Yi, et al. Effects of high-intensity ultrasonic (HIU) treatment on the functional properties and assemblage structure of egg yolk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104767.
- [5] 刘斯琪. 快速制备优质咸蛋黄的研究[D]. 福州: 福州大学, 2016. [LIU Siqi. Study on rapid preparation technique of high quality

- ty SEY[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.]
- [6] SOMWANG L, KARTHIKEYAN V, PARAMEE N. Influence of prolonged ambient storage condition on the physicochemical properties of uncooked and cooked salted duck egg yolk[J]. Journal of King Saud University-Science, 2024, 36: 103072.
- [7] WOODWARD S A, COTTERILL O J. Texture and microstructure of cooked whole egg yolks and heat-formed gels of stirred egg yolk[J]. Journal of Food Science, 1987, 52: 63–67.
- [8] WANG Xuyue, HUANG Yu, ZHOU Bin, et al. Improvement of quality and flavor of SEYs by ultrasonic assisted cooking[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 75: 105579.
- [9] YANG Na, JIN Yamei, XU Yue, et al. Effect of pressure cooking on physicochemical properties of salted eggs[J]. Rsc Advances, 2016, 6: 97089–97095.
- [10] 黄丹, 马美湖, 蔡朝霞, 等. 磷脂酶 A₁ 改性制备高乳化性蛋黄粉的工艺条件优化[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 20–25. [HUANG Dan, MA Meihu, CAI Zhaoxia, et al. Phospholipase A₁ modification for preparation of egg yolk powder with high emulsifying properties[J]. Food Science, 2010, 31(6): 20–25.]
- [11] 李斌, 范劲松, 李晶. 湿法快速腌制咸蛋黄的方法: 中国, CN 102885327 A[P]. 2013-01-23. [LI Bin, FAN Jinsong, LI Jing. The method of wet rapid pickling of SEYs: China, CN 102885327 A[P]. 2013-01-23.]
- [12] MA Y, LIU Y, YU H Y, et al. Biological activities and in vitro digestion characteristics of glycosylated α -lactalbumin prepared by microwave heating: Impacts of ultrasonication[J]. LWT-food Science and Technology, 2022, 158: 113141.
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2016.]
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.44-2016 食品中氯化物的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.44-2016 Determination of chloride in food[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2016.]
- [15] AI M M, GUO S G, ZHOU Q, et al. The investigation of the changes in physicochemical, texture and rheological characteristics of salted duck egg yolk during salting[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 88: 119–125.
- [16] DONG Kai, LUO Xin, LIU Lan, et al. Effect of high-pressure treatment on the quality of prepared chicken breast[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 56: 1597–1607.
- [17] THAMMARAT K, SOOTTAWAT B, WONNOP V. Effect of acetic acid and aommercial protease pretreatment on salting and characteristics of salted duck egg[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 5: 1–9.
- [18] 段春红, 潘思轶. 7S 球蛋白水解产物的功能特性及其对猪肉肠质构的影响[J]. 肉类研究, 2008, 22(11): 15–18. [DUAN Chunhong, PAN Siyi. Functional properties of 7S Globulin hydrolysed enzymatically and affection to pork sausage quality[J]. Meat Research, 2008, 22(11): 15–18.]
- [19] 叶阳, 刘小琴, 李安娇, 等. 咸蛋黄直腌式工艺优化[J]. 中国调味品, 2023, 48(2): 120–126. [YE Yang, LIU Xiaoqin, LI Anjiao, et al. Optimization of direct pickling process of SEY[J]. China Condiment, 2023, 48(2): 120–126.]
- [20] 晔沛清. 腌制方法和熟制方式对咸鸭蛋品质的影响[D]. 上

- 海:上海海洋大学,2022. [ZAN Peiqing. Effects of pickling methods and cooking methods on the quality of salted duck eggs[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.]
- [21] 谢云霄. 高强度超声处理对蛋黄特性的影响机理研究[D]. 成都:成都大学,2020. [XIE Xiaoyun. Study on the mechanism of high-intensity ultrasonic treatment on the characteristics of egg yolk [D]. Chengdu: Chengdu University, 2020.]
- [22] XU Lilan, ZHAO Yan, XU Mingsheng, et al. Changes in aggregation behavior of raw and cooked SEYs during pickling[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 80: 68–77.
- [23] THAMMARAT K, SOOTTAWAT B, WONNOP V. Changes in chemical composition, physical properties and microstructure of duck egg as influenced by salting[J]. *Food Chemistry*, 2009, 112: 560–569.
- [24] 沈雪丽, 蒲媛媛, 曹亚楠, 等. 脂肪模拟物及其在食品中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(15): 351–359. [SHEN Xueli, PU Yuanyuan, CAO Yanan, et al. Progress in research on fat mimics and its application in food[J]. *Food Science*, 2024, 45(15): 351–359.]
- [25] WU Di, TU Maolin, WANG Zhenyu, et al. Biological and conventional food processing modifications on food proteins: Structure, functionality, and bioactivity[J]. *Biotechnology Advances*, 2020, 40: 107491.
- [26] 黄晨燕. 脱壳湿腌咸蛋黄的生产工艺优化及品质改良[D]. 南昌:南昌大学,2023. [HUANG Chenyan. Optimization of production process and quality improvement of deshelled wet pickled SEY[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [27] 王梦林. 优质咸蛋黄腌制新工艺及品质分析[D]. 南昌:南昌大学,2015. [WANG Menglin. Study on new pickling technique of high quality SEY and its quality analysis[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.]
- [28] 杨萍芳. 油脂在焙烤食品中的作用[J]. *农产品加工*, 2008(8): 12. [YANG Pingfang. The role of fats and oils in baked goods[J]. *Farm Products Processing*, 2008(8): 12.]
- [29] 邵萍, 刘会平, 邹乾, 等. 酸浸减压法腌制咸蛋与传统咸蛋的对比[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 8–13. [SHAO Ping, LIU Huiping, ZOU Qian, et al. The contrast of salted eggs produced by soaking in acid combined with reduced pressure vacuum technology and the traditional method of brine immersion[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 8–13.]
- [30] XIANG X L, LIU Y Y, LIU Y, et al. Changes in structure and flavor of egg yolk gel induced by lipid migration under heating[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105257.
- [31] 徐霞, 郭照敬, 柯志刚, 等. 冷冻食品中冰晶检测技术的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(22): 380–388. [XU Xia, GUO Zhaojing, KE Zhigang, et al. Advancements in ice crystal detection technologies for frozen food[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(22): 380–388.]
- [32] 徐楠, 赵英, 迟玉杰. 热处理对酶改性蛋黄液乳化性的影响及拉曼光谱分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 28–34. [XU Nan, ZHAO Ying, CHI Yujie. Effect of heat treatment on emulsifying properties and Raman spectroscopic characteristics of enzymatically modified egg yolk liquid[J]. *Food Science*, 2019, 40(21): 28–34.]
- [33] 辛小娟. 醉蛋加工及其蛋黄凝胶化机制研究[D]. 南昌:南昌大学,2023. [XIN Xiaojuan. Study on the process and the yolk gelation mechanism of drunk egg[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [34] 包中宇. 超声波技术对大豆分离蛋白功能性、结构及凝胶特性的影响[D]. 南昌:南昌大学,2015. [BAO Zhongyu. Effects on the functional, structural and gelation property of soybean-protein isolate treated by ultrasound[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.]
- [35] 王培军, 王滨, 徐海波, 等. 中华影像医学[M]:人民卫生出版社,2020:719. [WANG Peijun, WANG Bin, XU Haibo, et al. Chinese imaging medicine[M]: People's Health Publishing House, 2020: 719.]
- [36] LIU Yaotong, QING Mingmin, ZANG Jingnan, et al. Effects of CaCl_2 on salting kinetics, water migration, aggregation behavior and protein structure in rapidly salted separated egg yolks[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112266.
- [37] 陈卫军, 朱巧岚, 汪海洋, 等. 超声预处理对酪蛋白酸钠-EGCG相互作用及其复合物抗氧化活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(21): 30–36. [CHEN Weijun, ZHU Qiaolan, WANG Haiyang, et al. Effects of ultrasound pretreatment on sodium caseinate-EGCG interactions and the antioxidant activity of their complexes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(21): 30–36.]
- [38] 范广琦, 王俊彤, 李丹, 等. Protamex 酶水解对玉米谷蛋白泡沫性质及结构特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(24): 41–49. [FAN Guangqi, WANG Juntong, LI Dan, et al. Effect of protamex hydrolysis on foaming properties and structural properties of corn glutelin[J]. *Food Science*, 2023, 44(24): 41–49.]