DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250918004
引用格式: 曹岱琳, 李研东, 杨巨娜, 等. 低盐小包装咸蛋腌制过程中理化指标及蛋清蛋黄凝胶变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 80–91.
CAO DL, LI YD, YANG JN, *et al*. Physicochemical indicators and gel changes of egg white and egg yolk during the pickling process of low-salt small-package salted eggs [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 80–91. (in Chinese with English abstract).

低盐小包装咸蛋腌制过程中理化指标及蛋清蛋黄凝胶变化

曹岱琳[1], 李研东[2], 杨巨娜[1], 段一蓉[1], 苗可心[1], 刘美玉[1*]
(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056038; 2. 邯郸市畜牧技术推广站, 邯郸 056001)

摘 要: 目的 研究小包装腌制低盐咸蛋的理化指标以及蛋清蛋黄凝胶变化。**方法** 本研究使用前期工作筛选出的低盐小包装咸蛋最佳工艺配方腌制咸蛋, 使用钾盐替代部分钠盐再加入白酒、香辛料采用小包装腌制咸鸡蛋, 检测在盐分作用下蛋清蛋黄凝胶变化部分的蛋白质相关指标的变化。**结果** 低盐小包装咸蛋蛋黄蛋白质离子键在腌制第 14 d时含量升高最高达到 122.47 mg/100 g之后下降, 疏水作用的含量呈先上升后下降的趋势, 新鲜蛋黄疏水作用含量由 7.95 mg/100 g 在腌制 21 d 上升至 16.62 mg/100 g, 氢键、二硫键含量下降, 蛋黄游离巯基呈先上升后下降趋势, β-折叠与β-转角均呈上升趋势, α-螺旋结构含量下降, 低密度脂蛋白含量由 0.211 mmol/g 下降至 0.110 mmol/g; 与新鲜蛋清相比, 腌制后蛋清弛豫时间结合水变化不显著, 不易流动的水显著下降, 自由水则显著上升(P<0.05), 蛋清 α-螺旋含量由 20.36%逐渐下降 16.33%, β-折叠与 β-转角均呈先上升后下降趋势, 无规则卷曲变化不大。**结论** 盐分的进入改变了蛋清蛋黄结构, 蛋黄颗粒更加紧密油脂渗出出现交联作用, 蛋清自由水增多, 空间结构发生变化, 蛋白分子结构展开, 导致蛋清稀化。

关键词: 低盐; 凝胶变化; 理化指标; 蛋白质二级结构

Physicochemical indicators and gel changes of egg white and egg yolk during the pickling process of low-salt small-package salted eggs

CAO Dai-Lin[1], LI Yan-Dong[2], YANG Ju-Na[1], DUAN Yi-Rong[1],
MIAO Ke-Xin[1], LIU Mei-Yu[1*]
(1. *College of Life Sciences and Food Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*;
2. *Handan Animal Husbandry Technology Extension Station*, *Handan* 056001, *China*)

ABSTRACT: Objective To study the physicochemical indicators of low-salt salted eggs in small packages and its gelation changes of egg white and egg yolk. **Methods** This study used the optimal process formula for low-salt

收稿日期: 2025-09-18
基金项目: 河北省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(HBCT2024260208); 中央引导地方科技发展资金项目(246Z7103G)
第一作者: 曹岱琳(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为蛋品科学。E-mail: 1227068772@qq.com
***通信作者:** 刘美玉(1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为蛋品科学。E-mail: lmy200751@163.com

salted eggs in small packages selected in previous work to pickle salted eggs. Replace some of the sodium salt with potassium salt, add Baijiu, spices, and use small packaging to pickle salted eggs. The changes in protein-related indicators of the gelation changes of egg white and egg yolk under the action of salt were detected. **Results** The content of ionic bonds in the egg yolk protein of low-salt salted eggs in small packages increased to a maximum of 122.47 mg/100 g on the 14th day of pickling and then decreased. The content of hydrophobic interactions showed a trend of first increasing and then decreasing. The hydrophobic interaction content of fresh egg yolks increased from 7.95 mg/100 g to 16.62 mg/100 g after 21 days of pickling. The content of hydrogen bonds and disulfide bonds decreased, and the free sulfhydryl groups in the egg yolk showed a trend of first increasing and then decreasing. Both *β*-pleated sheets and *β*-turns showed an upward trend, while the content of α-helical structure decreased. The content of low-density lipoprotein decreased from 0.211 mmol/g to 0.110 mmol/g. Compared with fresh egg whites, the relaxation time and bound water changes of pickled egg white were not significant, the immobile water significantly decreased, and the free water significantly increased (P<0.05). The *α*-helical content of egg white gradually decreased from 20.36% to 16.33%, both *β*-pleated sheets and *β*-turns exhibited a trend of first increasing and then decreasing, and the random coil changes were not significant. **Conclusion** The introduction of salt alters the structure of egg white and egg yolk, causing the egg yolk particles to become more compact, oil to seep out, and cross-linking to occur. The free water in egg whites increases, the spatial structure changes, and the protein molecular structure unfolds, leading to the thinning of egg whites.

KEY WORDS: low salt; gel change; physicochemical indicators; protein secondary structure

0　引　言

咸蛋是东亚和东南亚地区历史悠久的传统腌制食品, 在我国传统蛋制品可追溯到上千年, 主演包括皮蛋、松花蛋、咸蛋、卤蛋、糟蛋(酒糟腌制)、醉蛋(酒类腌制), 不仅作为日常菜肴被消费者青睐, 还是咸蛋黄粽子、流沙包等食材的核心材料[1]。咸鸡蛋富含蛋白质、磷脂、矿物质、维生素等, 营养价值十分丰富[2]。在中小型企业生产中, 咸蛋的腌制工艺主要以盐水浸泡、盐泥腌制、草木灰法 3 种方法为主[3]。盐水浸泡存在食盐大量使用以及废弃料液排放导致环境污染的问题[4], 盐泥腌制时间一般在 30~40 d, 受环境因素影响较大[5], 草木灰法腌制咸蛋步骤复杂, 耗费人力, 灰料也不易处理。

过多的食盐摄入会导致心脑血管疾病等不良并发症, 因此降低咸蛋中氯化钠含量值得推动。QIAN 等[6]研究发现随着 KCl 替代比例的增加, 肌原纤维蛋白的 *α*-螺旋含量减少, *β*-折叠含量增加, 从而增强了水分保持能力。最佳的 KCl 替代比例(1.5% NaCl+1.94% KCl)不仅维持了理想的口感, 还改善了凝胶特性。蛋清蛋黄在盐分渗透下理化性质发生改变, 由于盐分经过蛋清向蛋黄内部持续渗透, 蛋黄会分为流动态和凝聚态两个部分[7]。有研究表明[8]蛋黄凝聚部分出油率高于未凝聚部分, 因此蛋黄凝胶变化过程与蛋黄脂质分子有关。蛋清中水分是主要分散介质和成分, 在腌制过程中蛋清会逐渐变稀并且黏度降低[9], 经过蛋白质组分分析, 蛋清中已经发现 100 多种蛋白质, 其中溶菌酶、卵清蛋白、卵类黏蛋白、卵转铁蛋白、卵黏蛋白、卵糖蛋白的含量达到了蛋清蛋白质总含量的 86%[10]。

目前咸蛋低盐腌制技术对钾盐替代部分钠盐咸蛋黄凝胶变化机制尚不明确, 咸蛋清腌制过程中稀化的原因和过程中理化性质的变化研究较少, 因此本研究在了解食盐作用下咸蛋成熟机制基础上进一步对钾盐替代部分钠盐下咸蛋的成熟机制进行探究, 系统阐明钾盐替代钠盐影响咸蛋清和蛋黄凝胶品质的关键机制, 为低盐咸蛋工艺提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新鲜鸡蛋(邯郸冀南新区青英养鸡专业合作社); 麻椒、八角、桂皮、香叶、白酒(52°)、食盐(市售); 氯化钾(食品级, 江苏科伦多食品配料有限公司); 包装袋(10 cm×15 cm, 新华区容庞塑料制品销售中心); 硝酸银(分析纯, 广东鑫铖远科技有限公司); 正己烷(分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司); 异丙醇、甲醇(分析纯, 天津市百世化工有限公司); 考马斯亮蓝(分析纯, 天津欧博凯化工有限公司); 乙醇、氯化钠(NaCl)、*β*-巯基乙醇、尿素、戊二醛、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)[5,5'-dithiobis (2-nitrobenzoic acid), DTNB](分析纯)、溴化钾(光谱级)、三羟甲基氨基甲烷缓冲液(Tris 缓冲液)、低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)试剂盒、高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)试剂盒[研深(天津)科技有限公司]。

1.2 仪器与设备

UV1601 紫外可见分光光度计(日本岛津公司); MesoMR23-06OH-1 低场核磁成像仪(苏州纽迈分析仪器股份有限公司); GL-21M 大容量高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); XHF-DY 高速匀浆机(宁波新芝生物科技股份有限公司); BPG-9100BH 高温鼓风干燥箱(上海蓝豹试验设备有限公司); PX224ZH 型电子精密天平[精度 0.0001 g, 奥豪斯仪器(常州)有限公司]; Nicolet Avatar-370 傅立叶红外光谱仪(美国赛默飞世尔科技公司); Hitachi SU-8220 场发射扫描电子显微镜(日本日立公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 咸蛋样品制备

水中加入香辛料(麻椒、八角、桂皮、香叶, 比例为 3:2:3:2 (*m*:*m*:*m*:*m*)[11])与食盐煮沸 10 min, 放凉后倒入白酒, 配制成前期研究筛选的最优配方, 腌制液盐浓度 18.6%情况下使用前期实验工艺优化配方, 料液与蛋重比 1:1 (*V*:*m*)、钠盐替代量 4%、香辛料添加量 0.7%、白酒添加量 0.8%, 腌制新鲜鸡蛋(经分级、清洗、晾干处理), 装入小包装后于常温真空腌制 35 d。

1.3.2 咸蛋水分的测定

采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定中的直接干燥法测定》。

1.3.3 咸蛋 pH 的测定

使用磷酸盐缓冲液对 pH 剂校正, 每隔 7 d 取一次样品, 分离蛋黄蛋清进行测定[12]。

1.3.4 咸蛋氯化物含量

参照 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》第三法银量法测定。

1.3.5 蛋黄出油率测定

结合参考 LAI 等[13]提出的方法进行测定。

总脂质: 煮熟 3 枚鸡蛋后准确称取 3 g 蛋黄, 加入 25 mL 正己烷-异丙醇(3:2, *V*:*V*, 下同), 使用高速匀浆机以 5000 r/min 速度均质 10 min, 使用离心机 8000 r/min 离心 30 min 后取上层清液, 在水浴锅中蒸发浓缩后在恒温干燥箱中 105 ℃进行烘干至恒重, 称其质量为总脂质。

游离脂质: 另取 3 g 蛋黄, 加入 25 mL 蒸馏水使用高速匀浆机以 5000 r/min 速度均质 10 min, 使用离心机 8000 r/min 离心 30 min 后取上层悬浮物于分液漏斗中, 加入 25 mL 正己烷-异丙醇(3:2)进行分离萃取, 收集脂质层的溶剂与水浴锅中蒸发浓缩后在恒温干燥箱中 105 ℃进行烘干至恒重, 称其质量为游离脂质。蛋黄出油率的计算如公式(1)。

$$出油率/\%=\frac{游离脂质}{总脂质含量}\times 100\% \quad (1)$$

1.3.6 咸蛋质构测定

咸蛋蛋清蛋黄质构测定指标均采用质构剖面分析程序进行测定。

测定前先预处理样品, 将咸蛋煮熟后蛋清蛋黄分离, 将蛋白切 1 cm×1 cm×0.5 cm 均一方块, 将蛋黄切成两个半球。样品采用柱状铝探针压缩, 在 0.5 N 的触发力, 蛋黄 20%、蛋清 50%的形变条件下, 力矩形变测定速率为 1 mm/s, 通过配套分析软件得到内聚性、黏性、胶黏性、咀嚼性质构参数。

1.3.7 蛋清蛋黄蛋白质化学键作用力测定

配制 4 种不同蛋白质变性溶液, 分别为 S1 (0.6 mol/L NaCl)、S2 (0.6 mol/L NaCl+1.5 mol/L 尿素)、S3 (0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素)、S4 (0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素+0.5 mol/L *β*-巯基乙醇)。将蛋黄打散混匀, 取 0.6 g 置于 5.4 mL S1 中 12000 r/min 均质 2 min, 10000 r/min 速度下离心 20 min。取上清液采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量。离心所得的沉淀加入 5.4 mL S2 溶液中, 重复上述均质、离心、测上清液蛋白质浓度操作。所得沉淀中加入 5.4 mL S3 溶液, 重复上述均质、离心、测上清液蛋白质浓度操作。最后加入 5.4 mL S4 溶液, 重复上述均质、离心、测上清液蛋白质浓度。上清液置于 S1 溶液中透析 24 h, 以去除 *β*-巯基乙醇对蛋白质测定的干扰。S1 蛋白质含量表示离子键含量, S1 与 S2 蛋白质含量差值为氢键含量, S2 与 S3 蛋白质含量差值为疏水作用, S3 与 S4 蛋白质含量差值为二硫键。

1.3.8 游离巯基测定

游离巯基: 取 0.1 g 样本, 加入 0.4 mL 提取液(NaCl)冰浴匀浆, 然后加入 0.8 mL 甲醇, 室温振荡 10 min(防止室温蒸发, 可用甲醇补齐), 12000 r/min、4 ℃离心 10 min, 取上清冰上待测。在 96 孔板中测定组依次加入 30 μL 样品以及 120 μL Tris 缓冲液混匀, 加入 20 μL DTNB 试剂。对照组 30 μL 样品以及 140 μL Tris 缓冲液混匀为对照, 25 ℃静置 2 min, 测定 412 nm 吸光度值, 蛋白质游离巯基含量按照公式(2)进行计算。

$$游离巯基/(\mu mol/L)=1.12\times(\Delta A-0.0012)/W \quad (2)$$

式中: ΔA=测定样品吸光度–对照样品吸光度, W 为样品质量, g。

1.3.9 低场核磁共振的测定

采用低场核磁共振对蛋黄、蛋清腌制过程中水分状态进行分析。采样频率为 100 kHz, 射频延时为 0.002 ms, 等待时间为 1500 ms, 取不同腌制时期蛋黄、蛋清放在核磁共振专用试管中, 置于磁场中心采集信号, 使 Multi Exp Inv Analysis (V4.0)软件对数据进行反演。

1.3.10 LDL 和 HDL 含量测定

咸蛋煮熟后取 0.1 g 咸蛋黄加入 1 mL 乙醇冰浴匀浆, 12000 r/min, 4 ℃离心 10 min, 取上清液待测。测定管中加入 2.5 μL 上清液与 180 μL 显色剂, 对照管中加入 2.5 μL 蒸馏水与 180 μL 显色剂, 标准管中加入 2.5 μL 标准品振荡与 180 μL 显色剂, 摇匀后 37 ℃孵育 5 min, 546 nm 读取吸光度值, 再加入 60 μL 反应剂 37 ℃孵育 10 min, 546 nm 读取吸光度值, LDL 与 HDL 含量按照公式(3)、(4)进行计算。

$$\text{LDL 含量/(mmol/L)}=C_{\text{标准}}\times\frac{\Delta A_{\text{测定}}-\Delta A_{\text{空白}}}{\Delta A_{\text{标准}}-\Delta A_{\text{空白}}} \quad (3)$$

$$\text{HDL 含量/(mmol/L)}=C_{\text{标准}}\times\frac{\Delta A_{\text{测定}}-\Delta A_{\text{空白}}}{\Delta A_{\text{标准}}-\Delta A_{\text{空白}}} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{标准}}$为试剂盒配套标准品浓度, mmol/L。

1.3.11　傅里叶变换红外光谱测定

测定方法参考 JIANG 等[14]的方法进行, 每隔 7 d 取一次样品, 用真空冷冻干燥机冻干后研磨成粉末备用。1 mg 样品混合 150 mg 溴化钾研磨压片后, 在 4000~400 cm^{-1} 波长进行红外光谱扫描。数据使用 OMNIC 9.2 软件进行基线校正, 并用 Peakfit 4.12 软件进行多次拟合二阶导数谱和傅里叶去卷积至残差值最小, 并计算蛋黄蛋白质的二级结构相对含量。

1.3.12　微观结构

使用场发射扫描电子显微镜观察腌制过程中咸蛋清、蛋黄的微观结构。取腌制一定时期的咸蛋熟制后分离蛋清蛋黄, 分别切成 1.0 cm×1.0 cm×0.5 cm 的立方块放入冰块格内, 每格加入 2.5%戊二醛后固定过夜, 然后用磷酸盐缓冲溶液(pH=7.0)冲洗 15 min, 润洗 3 次。随后使用 60%、80%、95%乙醇分别浸泡 30 min 以脱去水分, 待乙醇挥发完毕后冻干。将冻干样品安装在扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)短桩上喷金处理, 调试仪器在真空模式下适当倍数观察并拍照。

1.4　数据处理

所有实验进行 3 次重复, 数据统计分析采用 Origin 2021 软件作图, 采用 IBM SPSS 26.0 对数据统计分析。

2　结果与分析

2.1　蛋黄蛋清水分的变化

腌制过程中蛋黄蛋清水分变化如图 1 所示。

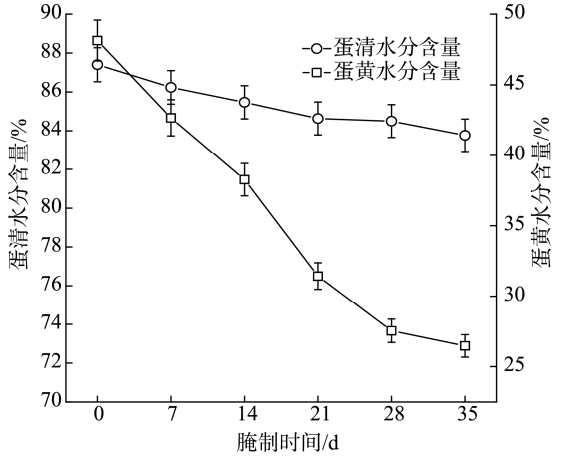


图 1　蛋清蛋黄水分变化

Fig.1　Changes in moisture content of egg white and egg yolk

由图 1 可知, 蛋黄蛋清中的水分含量在腌制过程中呈下降趋势, 蛋清水分由 87.40%下降至 83.77%, 蛋黄水分由 48.13%下降至 26.47%, 下降幅度与蛋清相比较为明显。腌制料液中的盐分先通过蛋壳上的空隙进入到蛋清中再穿过蛋黄膜进入到蛋黄中造成渗透压。结合本节 2.3 可得, 蛋清蛋黄中水分含量与氯化物含量呈负相关, 蛋清中 80%均为水分, 所含固形物较少因此不易脱水; 腌制时间增加蛋黄中盐分上升, 促使蛋黄中的结合水逐渐转化为自由水转移到蛋清或通过蛋清转移到腌制料液中, 蛋黄中的亲水基团与亲油基团的分离也会迫使蛋黄水分含量下降[15]。

2.2　蛋黄蛋清 pH 的变化

腌制过程中蛋黄蛋清 pH 变化如图 2 所示。

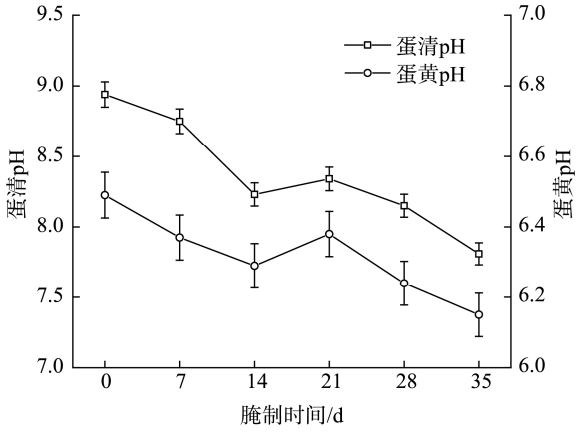


图 2　蛋黄蛋清 pH 的变化

Fig.2　Changes in pH of egg yolk and egg white

根据图 2 可知, 新鲜蛋清、蛋黄的 pH 分别为 8.94、6.49, 随着腌制天数的增加蛋清、蛋白的 pH 最终下降至 7.81、6.15。原因可能为盐分子渗入影响蛋白质分子构象稳定, 碱性蛋白被破坏, 如溶菌酶等, 并且采用真空小包装浸泡腌制对蛋内的 CO_2 排除有一定影响。蛋黄 pH 下降能够促使 LDL 表面电荷强度与静电相互作用增强, 对蛋黄凝胶形成有重要作用, 加快蛋黄凝固。

2.3　蛋黄蛋清氯化物含量的变化

使用银量法测定腌制过程中蛋黄蛋清氯化物含量变化如图 3 所示。

由图 3 可知, 咸蛋的蛋黄蛋清在腌制过程中氯化物含量呈上升趋势, 蛋黄、蛋清氯化物含量分别升高至 3.95%、1.25%, 蛋清的氯化物上升速率明显高于蛋黄, 分析原因为, (1)蛋清与腌制料液之间仅隔蛋壳, 氯化物渗透蛋壳后首先接触蛋清, 蛋清主要成分为水分, 更有利于盐分渗透。(2)从结构上分析, 食盐经过蛋壳、蛋壳膜、蛋清、卵黄膜等, 渗透阻力相对较大, 因此蛋清蛋黄氯化物含量随着腌制时间的延长差异越大。

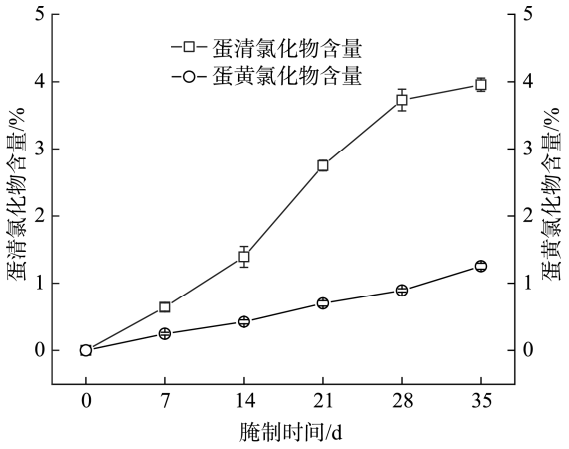


图 3 蛋黄蛋清氯化物含量的变化

Fig.3 Changes in chloride content of egg yolk and egg white

2.4 蛋黄出油率的变化

将腌制一定时期的咸蛋取出观察生蛋黄以及熟制后的蛋黄状态，观察结果如图 4 所示。

图 4 可知，随着腌制时间的增加，生蛋黄由外至内逐渐凝固颜色变深，熟制后的蛋黄从外圈开始颜色加深，腌制前 7 d 蛋黄内部并无明显变化，因为盐分从外层向中心是由蛋清到蛋黄扩散的，更能证明盐分是改变蛋黄状态的主要因素。咸蛋黄氯化物与蛋黄出油率呈正相关，盐分的渗入程度决定了咸蛋的腌制品质。如图 5，新鲜蛋黄的出油率在 21.81%左右，腌制 35 d 后出油率变为 62.61%左右，说明钾盐部分替代钠盐并不会降低咸蛋出油品质。并且 K^+有助于破坏蛋黄颗粒以及脂蛋白结构，一定程度上有利于油脂分离。

由图 6 可知，咸蛋蛋黄蛋清的质构特性值在不断发生变化，腌制进行到 21 d 时，蛋黄的胶黏性、咀嚼性、内聚性达到最大值之后呈下降趋势，说明在腌制 21 d 前盐分不断渗入而水分从蛋黄转移到其他部分、蛋黄蛋白质发生适度变性和凝胶网络形成起到积极作用，脱水效应使得蛋黄中蛋白质、脂质等固形物浓度增加，分子间距缩小，相对作用力增强，促进凝胶网络形成，因此腌制 21 d 前的胶黏性、咀嚼性、内聚性呈上升趋势。腌制 21 d 后胶黏性、咀嚼性、内聚性，原因为盐分持续渗入，蛋黄逐渐严重脱水，蛋黄蛋白质凝胶网络在条件下会发生收缩现象，挤压包裹在蛋黄颗粒上的油滴，造成出油现象[16]。凝胶网络被“油”分割，持续紧压反而会导致胶黏性、咀嚼性、内聚性下降[17–18]。

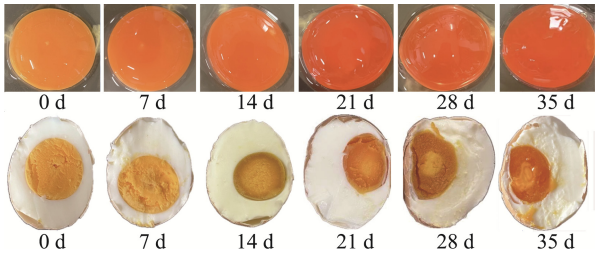


图 4 腌制过程中咸蛋黄状态变化

Fig.4 Changes in the state of salted egg yolk during the pickling process

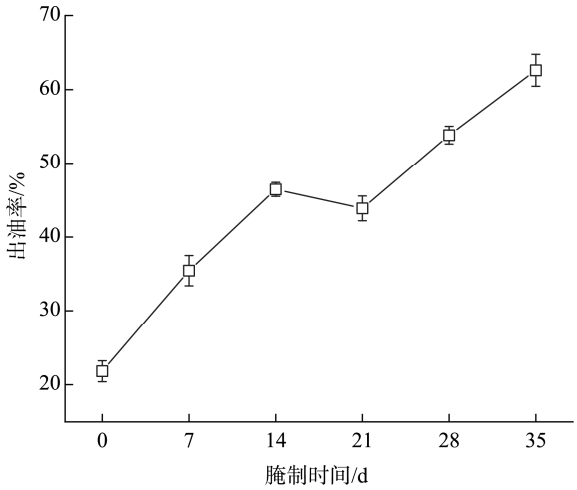


图 5 蛋黄出油率的变化

Fig.5 Change in egg yolk oil yield

2.5 蛋黄蛋清质构的变化

图 6 表示不同腌制时期熟蛋清、蛋黄之后变化规律。

对低盐小包装咸蛋腌制过程中蛋黄理化指标与质构特性进行结合分析可知，蛋黄凝聚过程是由外向内的，与盐分渗入有着直接关联，蛋黄由腌制前可流动的溶胶转变为固体的，具有特殊结构的(起沙、出油)的凝胶状态。咸蛋黄中的油脂(甘油三酯、胆固醇等)被紧密地包裹在蛋白质与磷脂中，形成脂蛋白颗粒，因此蛋黄的主要组成成分为 LDL 与卵黄球蛋白[19]。蛋黄在腌制过程中油脂渗出形成出油现象，与盐分进入蛋黄水分脱出改变蛋黄蛋白质-脂肪体系有直接关联，LDL 结构变化导致游离脂质从体系中脱离。

咸蛋蛋清在腌制过程中胶黏性、咀嚼性、内聚性和弹性均下降，最终熟化后的咸蛋清质地变得松软丧失韧性，与咸蛋黄变化趋势截然相反。蛋清与料液相隔仅有蛋壳以及蛋壳膜，并且蛋清的主要成分为水分，腌制时，蛋内外强大的渗透压差导致盐分大量进入蛋清，蛋清中的蛋白质溶解度暂时下降并发生聚集，盐分中的 K^+、Na^+、Cl^-争相与蛋白质分子竞争结合水分子，阻止蛋白质与水分形成氢键，破坏维持蛋白质二级结构，对蛋白质分子表面的电荷进行中和，蛋白质分子间斥力减小。作用力被盐分子破坏后，蛋白质分子间的联系变得松散，因此胶黏性、咀嚼性、内聚性和弹性呈下降趋势。

2.6 蛋黄蛋白质化学键作用力的变化

图 7 可知，低盐小包装咸蛋在腌制过程中离子键含量呈现先上升后下降最终趋于平稳的趋势。离子键在腌制至第 14 d 时含量升高最高达到 122.47 mg/100 g，腌制 14 d 后离子键含量下降趋于平稳，原因为在腌制前期 NaCl、KCl 从料液中经过蛋清向蛋黄扩散，带负电荷蛋白质分子间的静电作用被 Na^+、K^+屏蔽，削弱静电作用，离子键数量上升。腌制 14 d 后盐分子不断渗入，蛋黄内部盐含量上升，大量的 Na^+、K^+、Cl^-紧密地包围在蛋白质分子带电基团周围，蛋白质分子间的静电作用持续削弱，相互作用增强，形成新的离子键变得尤其困难，甚至离子键被破坏，数量下降[20]。

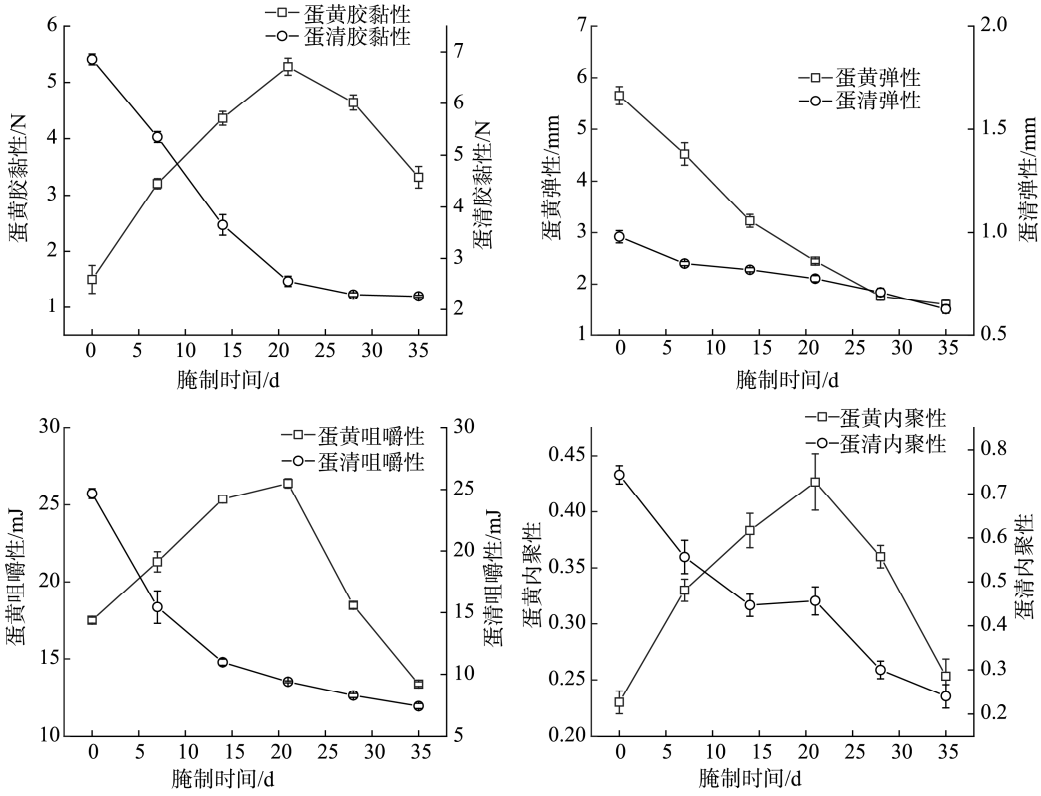


图 6　腌制过程中蛋清蛋黄质构变化

Fig.6　Changes in texture of egg white and egg yolk during the pickling process

由图 7 可知，低盐小包装咸蛋腌制时期氢键含量呈下降趋势，新鲜蛋黄的氢键含量为 49.68 mg/100 g，腌制成熟后咸蛋黄氢键含量为 15.26 mg/100 g。说明盐分会破坏蛋黄中低密度脂蛋白的结构，使其发生盐析变性，蛋白质结构有紧密折叠状态转变为伸展状态，使氢键被破坏，含量下降[21]。

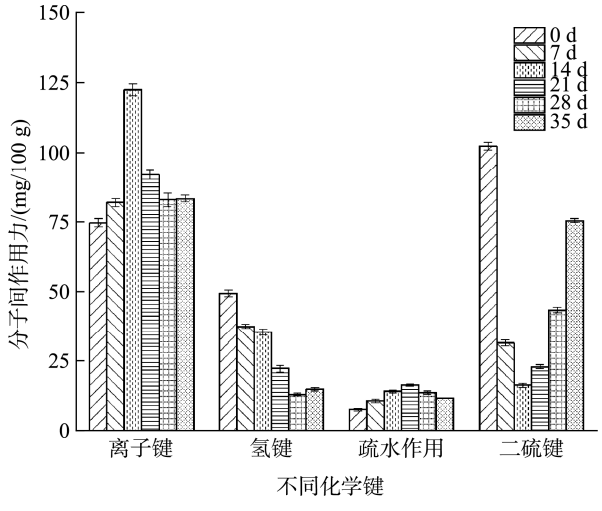


图 7　蛋黄化学键作用力的变化

Fig.7　Changes in chemical bond forces of egg yolk

由图 7 可知，疏水作用的含量呈先上升后下降的趋势，腌制前21 d疏水作用含量由7.95 mg/100 g上升至16.62 mg/100 g，低盐小包装咸蛋使用 KCl 替代部分 NaCl 腌制，Na^+、K^+都会破坏蛋黄脂蛋白稳定性引发蛋白质盐析变性，原本紧密折叠的蛋白质结构变得伸展，内部疏水基团暴露在环境中，非极性基团或分子由于其疏水的特性强烈聚集在一起。腌制 21 d 至 35 d 疏水作用呈下降趋势，腌制后期蛋黄中含水量下降，环境中水分子减少后非极性基团重新排列。

根据图 7 可知二硫键含量趋势变化为先下降再上升。在腌制至 14 d 时，盐分渗透破坏蛋黄 LDL 结构，蛋白质原有紧密折叠分子结构变为伸展的过程使原有二硫键断裂，并且盐离子在局部生成强还原环境直接干扰了维持二硫键稳定的化学环境，加剧二硫键断裂。随着腌制进行，14 d 后二硫键含量开始上升，蛋白质变性暴露出疏水集团在疏水作用下聚集使得分子间距变小，不同蛋白质分子的巯基变得相互靠近形成新的二硫键，有利于蛋白质分子有序聚合。

综上可知低盐小包装咸蛋蛋黄蛋白质在腌制前 14 d、21 d 时离子键与疏水作用增强，氢键二硫键含量下降的主要原因为盐分渗入导致蛋黄蛋白质 LDL 变性，但凝胶结构并未聚集，原因分析为 Na^+、K^+均为一价金属离子，腌制前期盐浓度未达到最高，离子强度较弱。腌制前期蛋黄外部开始聚集说明蛋黄在盐分作用下开始脱水，蛋黄颗粒开始变得紧密，同时蛋黄 LDL 结构破坏，油脂开始渗出。腌制后期离子键强度减弱，疏水作用与二硫键含量增加，新的化学键开始生成说明蛋黄蛋白质开始构建新的网络，蛋白

质分子发生聚集。在 Na^+、K^+作用下，蛋白质分子之间形成盐桥促进凝胶网络形成。疏水作用与二硫键主导凝胶网络稳定与形成，4 种作用力协同作用最终赋予咸蛋黄特有松沙质地。

2.7 蛋黄蛋清游离巯基的变化

由图 8 可知，低盐小包装咸蛋蛋清蛋黄游离巯基呈先上升后下降趋势。该结果符合二硫键含量变化趋势。在腌制前期，蛋黄中维持蛋白质天然结构的化学键被盐分渗透作用破坏，导致蛋白质分子结构从紧密折叠状态转变为伸展状态，蛋白质内部的巯基(-SH)被暴露出来。腌制后期，暴露出来的游离巯基迅速与其他巯基发生氧化反应，逐渐形成二硫键导致蛋白质分子之间相互关联、聚集，进而形成稳定的凝胶网络结构[22]。

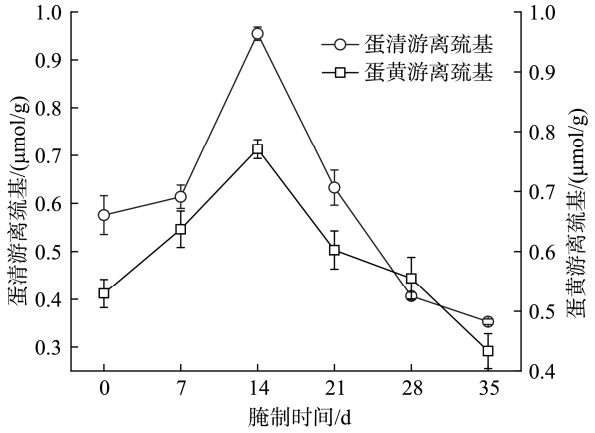


图 8 蛋黄蛋清游离巯基变化

Fig.8 Changes in free sulfhydryl groups in egg yolk and egg white

2.8 蛋黄蛋清水分状态的变化

低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)的原理是利用氢质子在地磁场中自旋-弛豫现象表示水分子状态，主要指标为横向弛豫时间(T_2)与对应峰面积占比，从而表示食品中水分状态、迁移规律与分布[23]。横向弛豫时间(T_2)表示水分子的自由度，T_2 值越大表示水分子越自由，T_2 值越小表示水分子与非水组分结合紧密，运动受限[24]。相关研究根据峰出现的顺序以及时间将水分子状态进行分类：T_{21} 表示结合水(与蛋白质结合紧密的非交换水)，含量也就是峰面积占比即为 P_{21}；T_{22} 表示不易流动的水(与蛋白质结合的交换水)，含量为 P_{22}；T_{23} 表示自由水，含量为 P_{23}。

在腌制过程中蛋黄的 T_2 总体呈下降趋势(P<0.05)。结合图 9 与表 1 分析，蛋黄随着腌制的进行逐渐脱水引起凝胶形成，大量的脂质分子以及水分子被固定在凝胶网络中，蛋黄收缩脱水后蛋白质之间的空隙减小，蛋白质结合更加紧密，对氢质子的束缚性增强。蛋黄 P_{23} 在腌制 21 d 后显著上升(P<0.05)的原因为盐分渗透会导致 LDL 结构变化，腌制后期脂质分子被释放自由度大于凝胶网络对氢质子束缚性。XU 等[25]的研究表明 NaCl 处理后的蛋黄中的脂质氢质子自由度上升。

从图 9 可以看出，与新鲜蛋清相比，腌制后蛋清 T_{21} 变化不显著(P<0.05)，T_{22} 先上升后下降，T_{23} 则显著上升(P<0.05)，说明腌制前后对蛋清水分状态有一定影响，不易流动的水与蛋白质结合更紧密。T_{23} 向右显著偏移，说明咸蛋清中氢质子受到的束缚力减弱。蛋清峰面积占比如表 1 所示，结合水 P_{21} 变化不显著(P<0.05)，不易流动的水 P_{22} 腌制后显著降低(P<0.05)，自由水 P_{23} 则显著上升(P<0.05)，说明在盐分作用下不易流动的水转化为了自由水，咸蛋清中自由水含量上升，这也就是咸蛋清在腌制过程中变稀、呈水样稀化且黏度降低的原因之一。

2.9 咸蛋腌制过程中 LDL 和 HDL 的变化

本研究使用试剂盒测定蛋黄中 LDL、HDL 含量，使用显色剂标记 LDL、HDL 特异性受体显色作为含量结果。由表 2 可知，腌制时间的增加蛋黄 LDL 含量逐渐下降，蛋黄 LDL 含量从 0 d 新鲜未腌制的 0.211 mmol/g 到 35 d 的

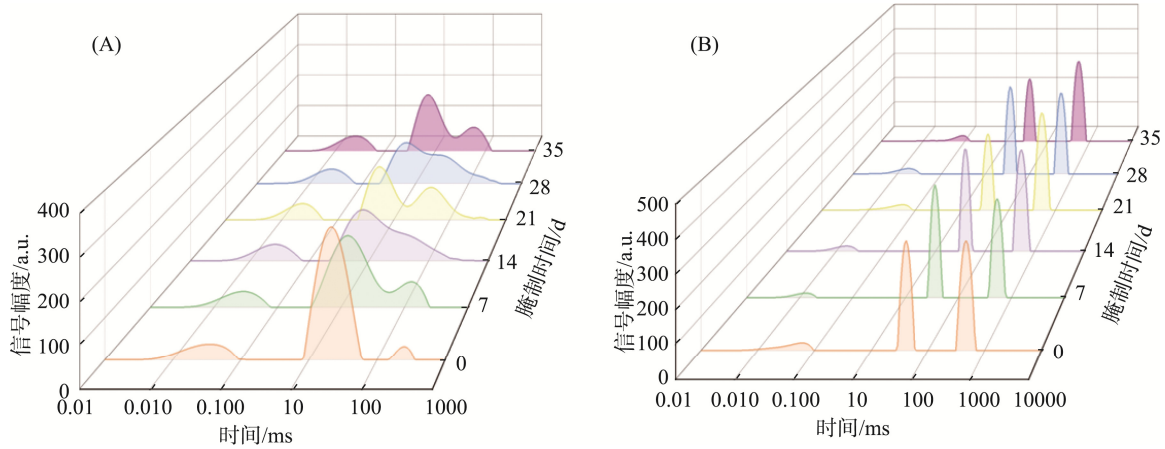


图 9 蛋黄(A)、蛋清(B)的 T_2 弛豫时间分布

Fig.9 T_2 relaxation time distribution of egg yolk (A) and egg white (B)

表 1　咸蛋腌制过程中蛋黄、蛋清弛豫时间与峰面积占比变化

Table 1　Changes in relaxation time and peak area ratio of egg yolk and egg white during the pickling process of salted eggs

	天数/d	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	P_{21}/%	P_{22}/%	P_{23}/%
蛋黄	0	0.35±0.04^{a}	21.23±0.86^{a}	264.45±10.47^{ab}	13.67±0.74^{b}	82.19±0.39^{a}	4.13±0.35^{b}
	7	0.27±0.01^{b}	10.69±1.79^{b}	193.70±59.13^{b}	16.08±1.12^{a}	76.81±6.41^{a}	7.10±7.45^{b}
	14	0.28±0.00^{b}	8.45±1.05^{c}	309.18±113.40^{a}	16.74±0.31^{a}	82.66±1.02^{a}	1.05±0.85^{b}
	21	0.27±0.02^{b}	6.99±0.28^{cd}	59.11±8.19^{c}	16.98±0.62^{a}	54.21±5.35^{b}	23.51±3.61^{a}
	28	0.26±0.02^{b}	6.40±0.74^{d}	57.96±9.92^{c}	17.07±0.59^{a}	62.08±18.35^{b}	27.54±6.55^{a}
	35	0.25±0.01^{b}	7.15±0.28^{cd}	56.19±4.40^{c}	17.34±1.24^{a}	60.29±1.36^{b}	22.31±1.58^{a}
蛋清	0	0.11±0.02^{a}	37.98±3.95^{b}	455.38±27.71^{b}	6.37±1.79^{a}	51.38±4.27^{a}	36.50±1.90^{d}
	7	0.16±0.03^{a}	39.78±4.28^{ab}	534.59±10.44^{a}	6.85±1.31^{a}	46.08±2.98^{b}	47.56±2.90^{bc}
	14	0.20±0.03^{a}	39.65±1.61^{ab}	534.25±8.08^{a}	6.74±1.24^{a}	42.23±2.06^{bc}	42.92±0.89^{c}
	21	0.21±0.03^{a}	36.18±2.51^{ab}	512.37±26.39^{a}	7.00±0.35^{a}	43.56±3.03^{b}	50.03±4.74^{ab}
	28	0.31±0.19^{a}	36.99±1.50^{b}	502.26±10.82^{ab}	7.08±0.40^{a}	37.89±2.11^{c}	50.40±4.54^{ab}
	35	0.21±0.04^{a}	25.37±21.54^{ab}	550.44±52.11^{a}	6.37±1.79^{a}	32.05±1.66^{d}	56.12±3.18^{a}

注：不同字母表示同一指标不同腌制时间，具有显著性差异，P<0.05。

0.110 mmol/g, HDL 含量 0 d 新鲜未腌制的 0.007 mmol/g 上升至 0.022 mmol/g，相对于 LDL 变化幅度较小。在腌制过程中盐分逐渐渗透，外层环绕的载体蛋白变性失活无法维持结构，结构解体后核心内部的甘油三酯、胆固醇被释放并与周围其他变性蛋白或者析出的游离脂肪聚集，这也是咸蛋黄出现流油现象并且质地变得松沙的原因之一[26–27]。

表 2　腌制过程中蛋黄 LDL 与 HDL 的变化

Table 2　Changes in egg yolk LDL and HDL during the pickling process

腌制时间/d	LDL 含量/(mmol/g)	HDL 含量/(mmol/g)
0	0.211 ± 0.004^{a}	0.007 ± 0.002^{d}
7	0.198 ± 0.008^{b}	0.011 ± 0.002^{c}
14	0.174 ± 0.004^{c}	0.014 ± 0.003^{bc}
21	0.155 ± 0.003^{d}	0.017 ± 0.002^{b}
28	0.139 ± 0.005^{e}	0.018 ± 0.003^{b}
35	0.110 ± 0.004^{f}	0.022 ± 0.002^{a}

2.10　咸蛋腌制过程中二级结构变化分析的变化

2.10.1　腌制过程中蛋清蛋黄红外光谱分析

傅里叶红外变换光谱是研究蛋白质二级结构变化快捷、有效的方法。通过波数 4000~400 cm^{-1} 之间与蛋黄结构变化相关的吸收峰有数十个。低盐小包装咸蛋腌制过程中蛋黄、蛋清红外谱图如 10 所示。酰胺带指的是由酰胺基团的振动产生的，其核心为一个羰基(C=O)和一个氨基(N-H)连接一起形成(-CONH-)。如图所示蛋黄在腌制过程中峰型无明显差别，且主要有 3440、2930、1790、1160 cm^{-1} 等酰胺带，其中 3440 cm^{-1} 为 N-H、O-H 的伸缩振动，说明存在强作用力的氢键。2930 cm^{-1} 为 C-H 的伸缩振动，2850 cm^{-1} 为 C=O 的伸缩振动。蛋清在波数为 3440 cm^{-1} 处能够明显看出波型变化，主要为 N-H、O-H 的伸缩振动，1650 cm^{-1} 处为酰胺I带的 C=O 伸缩振动，1540 cm^{-1} 处为酰胺II带的 N-H 伸缩振动，表明随着腌制进行分子间氢键发生变化[28]。

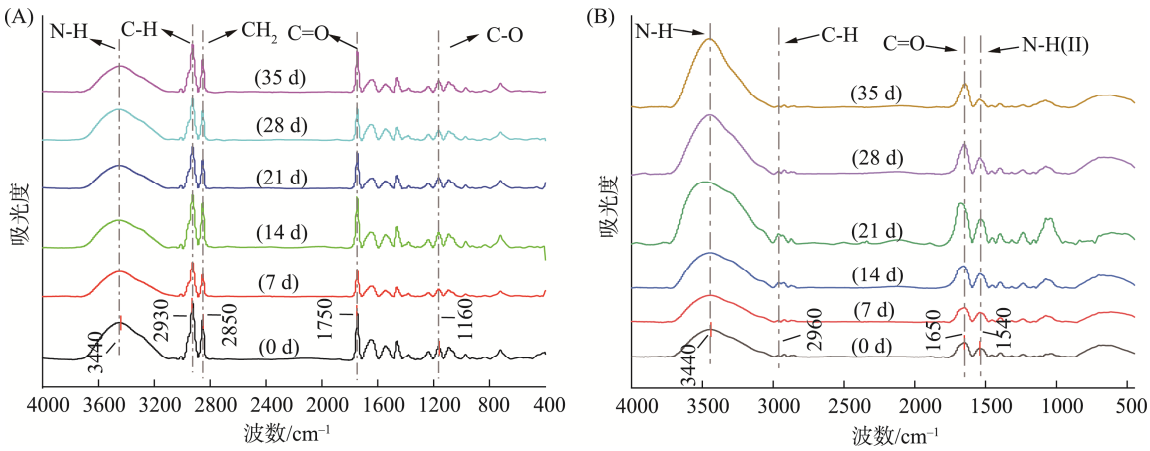


图 10　蛋黄(A)、蛋清(B)红外谱图分析

Fig.10　Infrared spectrum analysis of egg yolk (A) and egg white (B)

2.10.2 腌制过程中蛋清蛋黄二级结构变化分析

对红外光谱结果使用 Ominc 6.0 软件进行基线校正后转化为吸光度，使用 Peakfit V4.12 软件去卷积处理、高斯函数分峰拟合后结果如图 11、12。根据前人研究可将酰胺 I带区域各个子峰作出如下归属[29]: 1600~1640 cm^{-1} 为 β-折叠(蛋白质分子的非平面弱氢键), 1640~1650 cm^{-1} 为无规则卷曲(γ-随机结构), 1650~1660 cm^{-1} 为 α-螺旋, 1660~1700 cm^{-1} 为 β-转角, α-螺旋与 β-转角为蛋白质分子内总相互作用氢键[30]。

(1)蛋黄二级结构变化分析

拟合结果见表 3 所示，在 0 d 新鲜鸡蛋蛋黄蛋白质二级结构主要为 β-折叠和 α-螺旋，分别占比为 30.13%、28.91%，β-转角占比最少，为 16.24%，蛋黄的蛋白质主要为 LDL 以及 HDL，为保证这些载体蛋白能够稳定包裹运送疏水脂分子，使其稳定分散在蛋黄中则需要 β-折叠和 α-螺旋的贡献，α-螺旋在氢键维持下结构十分稳定，能够为脂蛋白颗粒提供致密的框架，β-折叠也在氢键帮助下形成二维网状结构为脂蛋白颗粒抵消外界物理压力，β-转角是一种回折结构，是 β-折叠和 α-螺旋的“连接部件”，因此含量较少，郑华等[31]在研究氯化钠对咸鸭蛋蛋黄蛋白质特性的影响时蛋白质二级结构发生了显著变化，新鲜蛋黄的蛋白质以 α-螺旋和 β-折叠为主要结构单元，与其功能特性密切相关。

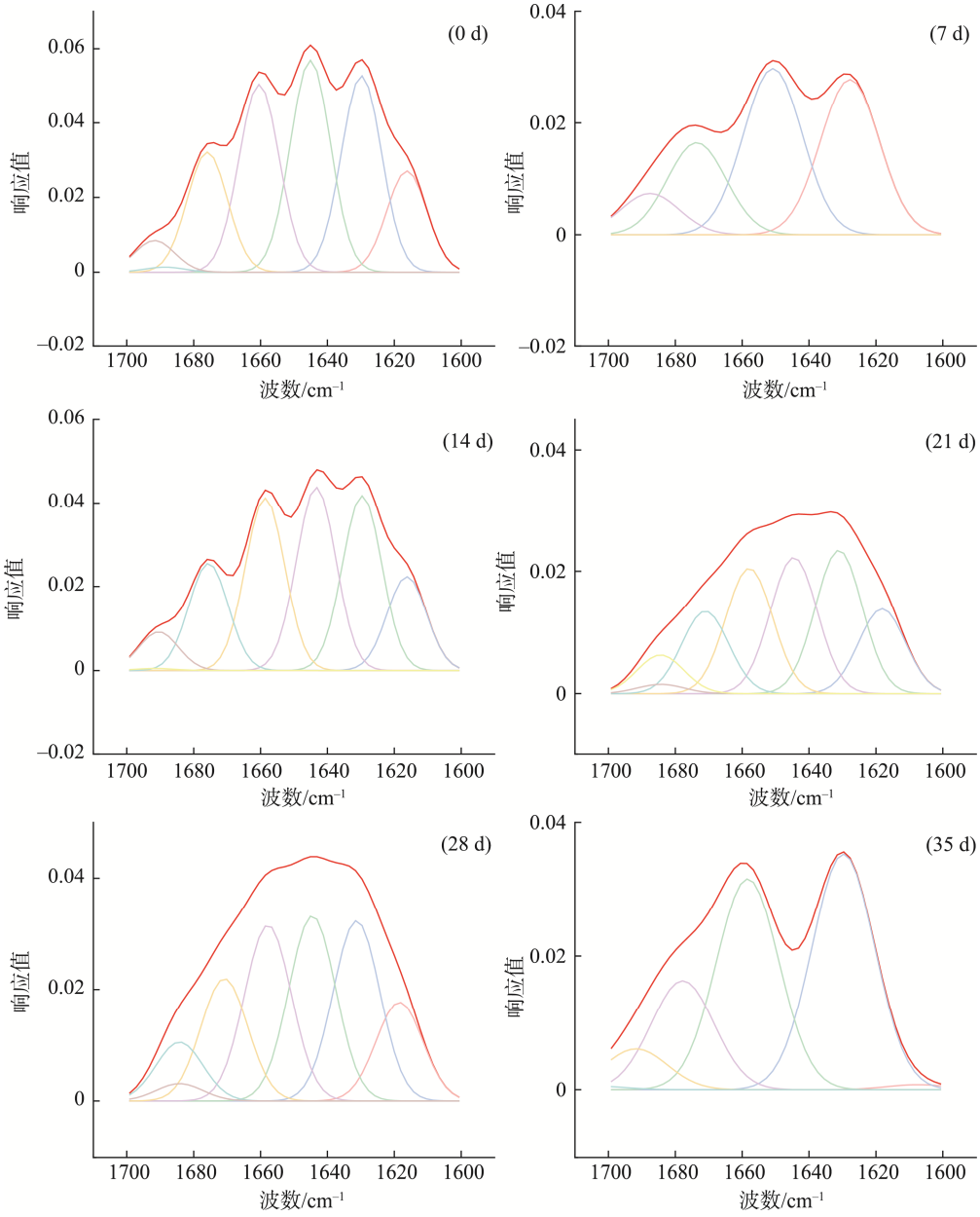


图 11 咸蛋黄腌制过程中的高斯曲线拟合图

Fig.11 Gaussian curve fitting diagram during the pickling process of salted egg yolk

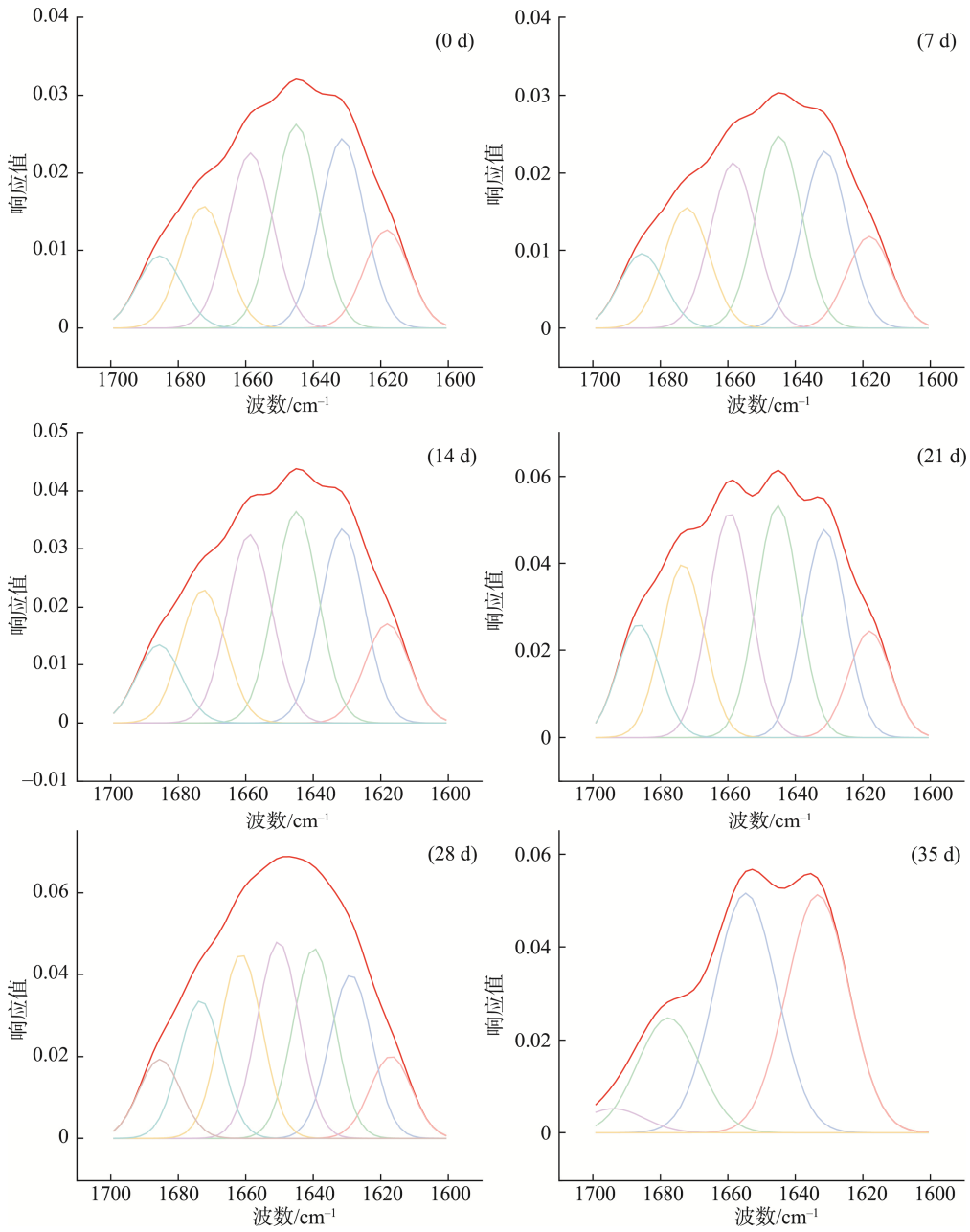


图 12　咸蛋清腌制过程中的高斯曲线拟合图

Fig.12　Gaussian curve fitting diagram during the pickling process of salted egg whites

表 3 中还能看出随着腌制的进行，*β*-折叠与 *β*-转角均呈上升趋势，*α*-螺旋结构含量下降，ULRICHS 等[32]发现在金属盐对蛋白质分子间静电屏蔽作用下能够改变溶剂氢键含量，*α*-螺旋结构向 *β*-折叠与 *β*-转角结构转变。在腌制 7~14 d 时盐分渗透速率加快，这说明蛋黄蛋白质分子开始聚集形成凝胶结构后新的化学键产生，与 *α*-螺旋结构向 *β*-折叠与 *β*-转角结构转变有关，*β*-折叠作为连接部件能够促进蛋白质分子产生更多连接及交互。李可等[33]在研究 NaCl 对猪肉糜加工特性和蛋白质二级结构的影响时，NaCl 添加量上升促进 *α*-螺旋结构解折叠，形成 *β*-折叠结构。腌制前后蛋黄 *β*-折叠上升了 8.99%，*α*-螺旋下降了 14.27%，*β*-折叠结构相对于 *α*-螺旋更加稳定，在同一蛋白质分子使用氢键相互作用形成 *β*-折叠结构，促进蛋黄凝胶的进行。

(2)蛋清二级结构变化分析

蛋清蛋白质 4 种二级结构变化如表 3 所示，*α*-螺旋含量由 20.36%逐渐下降 16.33%，*β*-折叠与 *β*-转角均呈先上升后下降趋势，无规则卷曲变化不大，说明在腌制过程中蛋清 *α*-螺旋被金属离子破坏了稳定的蛋白质氢键和静电相互作用，被破坏的蛋白质经过变性后重组为新的凝胶结构，说明 *α*-螺旋下降也许是导致咸蛋清水样化的原因。

表 3 蛋清蛋黄蛋白质二级结构分析

Table 3 Secondary structure analysis of egg white and egg yolk proteins

	腌制时间/d	β-折叠/%	无规则卷曲/%	α-螺旋/%	β-转角/%
		1600~1640 cm^{-1}	1640~1650 cm^{-1}	1650~1660 cm^{-1}	1660~1700 cm^{-1}
蛋黄	0	30.13	24.72	28.91	16.24
	7	33.83	21.21	26.21	18.75
	14	35.04	23.67	22.28	19.01
	21	36.81	22.00	20.25	20.94
	28	33.28	24.09	18.99	23.64
	35	39.12	20.26	14.64	25.98
蛋清	0	33.38	23.63	20.36	22.63
	7	32.71	23.37	20.13	23.79
	14	32.37	23.44	20.83	23.36
	21	29.68	21.98	21.28	27.06
	28	26.31	19.02	19.02	35.65
	35	38.10	22.14	16.33	23.43

2.11 咸蛋腌制过程中微观结构的变化

通过场发射电子扫描显微镜观察经过戊二醛固定后的蛋黄、蛋清腌制前、中、后的微观结构，如图 13 所示。能够看出蛋黄腌制前蛋黄呈多面体颗粒，且颗粒之间没有交联作用，腌制中期蛋黄颗粒表面有部分油脂析出，腌制后期蛋黄颗粒之间变得紧密并出现交联作用，与腌制前蛋黄相比边缘棱角更少，颗粒表面有黏性物质包裹覆盖，猜测黏性物质是蛋黄油以及脂蛋白破裂得到的游离脂质，蛋黄颗粒之间由于游离脂肪的阻隔导致蛋黄出现松沙现象，与熊雅婷等[34]研究得出相同结论。

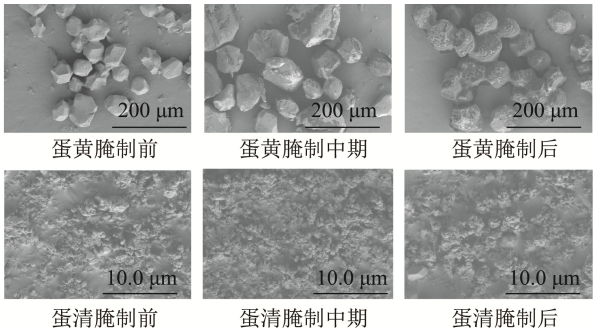


图 13 腌制过程中蛋黄、蛋清微观结构变化

Fig.13 Microstructural changes of egg yolk and egg white during pickling

相关研究表明，蛋清中的卵清蛋白能够通过非共价键与其他蛋白质形成聚集体。腌制前蛋清颗粒连接紧密，有较大颗粒出现。金属离子逐渐渗入促进非共价键形成，腌制中后期蛋清逐步转变为松散絮状物，加热过程中钾盐替代加剧了加热过程中卵清蛋白的胶凝作用[35]。

3 结 论

本研究揭示了低盐小包装咸蛋在复合盐(NaCl 与 KCl)腌制过程中蛋白结构与质构的变化。实验表明，Na^+与 K^+的渗透可改变低密度脂蛋白结构，破坏蛋黄原有的蛋白质-脂肪复合体系，促使油脂渗出，形成松沙质地。腌制 14 d 前后为蛋白质构象转变的关键阶段：前期离子键增强、二硫键下降，蛋白质未充分聚集；后期疏水作用与二硫键上升，二级结构中 α-螺旋减少、β-折叠与 β-转角增加，显示蛋白质发生有序聚集并逐步形成凝胶网络。同时，蛋清中不易流动水向自由水转化，蛋白质凝聚作用减弱，微观结构松散化，导致蛋清稀化。上述发现为低盐咸蛋品质调控提供了理论依据，可通过调控离子强度与腌制时间以协调蛋白凝胶形成与油脂释放，优化产品品质。

参考文献

[1] GAO Z, ZHENG J, XU G. Research progress and technological application prospects of comprehensive evaluation methods for egg freshness [J]. Foods, 2025, 14(9): 1507.

[2] LI X, CHEN S, YAO Y, *et al.* The quality characteristics formation and control of salted eggs: A review [J]. Foods, 2022, 11(19): 2949.

[3] ZHENG M, CHEN S, YAO Y, *et al.* A review on the development of pickled eggs: Rapid pickling and quality optimization [J]. Poultry Science, 2023, 102(3): 102468.

[4] YAO X, XU J, ADHIKARI B, *et al.* Mooncake production waste: Nutritional value and comprehensive utilization of salted duck egg white [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(8): e16772.

[5] XUE H, LIU H, ZHANG G, *et al.* Changes in physicochemical properties and lipid oxidation lead to the formation of mud on salted egg yolks during storage [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135341.

[6] QIAN X, LIN S, CHEN T, *et al.* Evaluation of the texture characteristics and taste of shrimp surimi with partial replacement of NaCl by non-sodium metal salts [J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140403.

[7] ZHAO Y, FENG F, YANG Y, *et al.* Gelation behavior of egg yolk under physical and chemical induction: A review [J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129569.

[8] ZHANG M, LI J, CHANG C, *et al.* Effect of egg yolk on the textural, rheology and structural properties of egg gels [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 1–6.

[9] 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 JW, WU YQ, CHEN YQ, *et al.* Improvement of gel properties of salted egg white and its application in the processing of salted egg fragrant dried [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 251–262.

[10] 王倩, 贺萍, 林如歌, 等. 鸭蛋卵清蛋白的结构、组成分析及其功能活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 67–73.
WANG Q, HE P, LIN RG, *et al.* Study on the structure, composition and functional activity of duck egg ovalbumin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 67–73.

[11] 黄奕源, 潘竞龙, 欧阳宏佳, 等. 咸鸭蛋腌制过程相关指标变化规律及最佳配方的筛选研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 142–149.
HUANG YY, PAN JL, OUYANG HJ, *et al.* Study on the change rules of relevant indexes and the screening of the best formula during the pickling process of salted duck eggs [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(6): 142–149.

[12] 窦文浩, 王海岭, 黄子龙, 等. 基于电导率的多指标联合技术在蛋液组分检测中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 94–101.
DOU WH, WANG HL, HUANG ZL, *et al.* Application of multi-index combined technology based on conductivity in the detection of egg liquid components [J]. Food Science, 2024, 45(5): 94–101.

[13] LAI KM, CHUNG WH, JAO CL, *et al.* Oil exudation and histological structures of duck egg yolks during brining [J]. Poultry science, 2010, 89(4): 738–744.

[14] JIANG M, CHEN P, WANG X, *et al.* Effect of ultrasonic vacuum drying on the structural characteristics of whole-egg protein powder [J]. LWT, 2024, 191: 115490.

[15] 徐佛言, 赵欣, 张晓瑞, 等. 基于高光谱成像的咸鸭蛋腌制品质快速检测[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 260–268.
XU FY, ZHAO X, ZHANG XR, *et al.* Rapid detection of the pickling quality of salted duck eggs based on hyperspectral imaging [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 260–268.

[16] LU Y, CHEN L, LI J, *et al.* The effect of raw egg storage time on the quality, fatty acid composition and volatile organic compounds of salt-baked marinated eggs [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2025, 40: 101146.

[17] DAI Y, CAI GX, LIANG Y, *et al.* Comparative investigation of various protein or protein-based powders addition on texture properties of egg white and yolk gels [J]. International Journal of Food Properties, 2024, 27(1): 870–882.

[18] TANG T, XU M, YANG Y. Influence of storage time on the flavor and texture of egg yolk gel [J]. Food Chemistry: X, 2025: 102513.

[19] 王宁, 马美湖. 鸡蛋黄低密度脂蛋白理化及加工特性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(12): 140–146.
WANG N, MA MH. Research progress on the physical, chemical and processing characteristics of egg yolk low-density lipoprotein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30 (12): 140–146.

[20] DING Y, ZHANG C, JIN C, *et al.* Hard yolk characteristics and mechanism of salted duck eggs [J]. LWT, 2024, 212: 116916.

[21] TAN J, DENG C, YAO Y, *et al.* Regulation of different copper salts on alkali-induced egg white gels: Physicochemical characteristics, microstructure and protein conformation [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137346.

[22] MUHEDANER M, BAKO HK, ZHOU G, *et al.* Impact of egg white protein on mycoprotein gel: Insights into rheological properties, protein structure and Molecular interactions [J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141366.

[23] EZEANAKA MC, NSOR-ATINDANA J, ZHANG M. Online low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) for food quality optimization in food processing [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(9): 1435–1451.

[24] HU M, ZHAO M, QI L, *et al.* Non-destructive inspection method for egg freshness evaluation via low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(9): 7295–7307.

[25] XU L, ZHAO Y, XU M, *et al.* Changes in physico-chemical properties, microstructure, protein structures and intermolecular force of egg yolk, plasma and granule gels during salting [J]. Food Chemistry, 2019, 275: 600–609.

[26] 于智慧, 王宁, 蔡朝霞, 等. 鸡蛋蛋黄高密度脂蛋白结构、组成、来源及功能研究进展[J]. 中国家禽, 2016, 38(4): 38–43.
YU ZH, WANG N, CAI ZX, *et al.* Research progress on the structure, composition, source and function of egg yolk high-density lipoprotein [J]. China Poultry, 2016, 38(4): 38–43.

[27] 王旭英, 马艳秋, 杨晓雪. 乳酸菌发酵提升蛋液品质及功能特性的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(8): 310–318.
WANG XY, MA YQ, YANG XX. Research progress on the improvement of egg liquid quality and functional properties by lactic acid bacteria fermentation [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(8): 310–318.

[28] KONG J, YU S. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures [J]. Acta biochimica et biophysica Sinica, 2007, 39(8): 549–559.

[29] CHEN R, GUO W, LI L, *et al.* Aerobic granulation in a continuous-flow simultaneous nitrification, endogenous denitrification, and phosphorus removal system fed with low-strength wastewater: Granulation mechanism and microbial succession [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 487: 150598.

[30] AL-SHABIB NA, KHAN JM, MALIK A, *et al.* Allura red rapidly induces amyloid-like fibril formation in hen egg white lysozyme at physiological pH [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127: 297–305.

[31] 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.
ZHENG H, PENG H, LIN J, *et al.* Effect of salt on the protein properties of salted duck egg yolk [J]. Food Science, 2013, 34(1): 83–87.

[32] ULRICHS T, DROTLEFF AM, TERNES W. Determination of heat-induced changes in the protein secondary structure of reconstituted livetins (water-soluble proteins from hen's egg yolk) by FTIR [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 909–920.

[33] 李可, 赵颖颖, 康壮丽, 等. NaCl 对猪肉糜加工特性和蛋白质二级结构的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 77–81.
LI K, ZHAO YY, KANG ZL, *et al.* Effect of NaCl on the processing characteristics and protein secondary structure of pork mince [J]. Food Science, 2017, 38(15): 77–81.

[34] 熊雅婷, 陈礼宇, 傅佳慧, 等. 盐泥腌制过程中海鸭蛋理化性质及品质特征的变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(3): 154–163.
XIONG YT, CHEN LY, FU JH, *et al.* Changes in the physical and chemical properties and quality characteristics of sea duck eggs during the salt mud pickling process [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 154–163.

[35] 陈艺, 郑萍, 刘会平, 等. 咸蛋真空腌制过程中蛋清的理化性质变化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(3): 6–13.
CHEN Y, ZHENG P, LIU HP, *et al.* Changes in the physical and chemical properties of egg white during the vacuum pickling process of salted eggs [J]. Food Research and Development, 2022, 43(3): 6–13.

(责任编辑: 韩晓红　冯东慧)