DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260521004
引用格式: 赵文慧, 李研东, 汲如芬, 等. 红泥烤鸡蛋工艺优化及其挥发性风味物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 240–248.
Zhao Wenhui, Li Yandong, Ji Rufen, et al. Optimization of processing technology and analysis of volatile flavor compounds in baked red mud eggs [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 240–248. (in Chinese with English abstract).

红泥烤鸡蛋工艺优化及其挥发性风味物质分析

赵文慧[1], 李研东[2], 汲如芬[3], 邱梦佳[1], 吴梦楠[1], 李俊姣[3], 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. 河北省兽药饲料工作总站, 石家庄 050035; 3. 邯郸市畜牧技术推广站, 邯郸 056001)

摘 要: 目的 对红泥烤鸡蛋进行工艺优化并分析其挥发性风味物质。**方法** 本研究采用泥浸法, 以氯化钾(KCl)替代部分氯化钠(NaCl)、选用红泥为辅料, 控制盐泥浓度, 并通过正交试验优化腌制工艺, 开发新型红泥烤鸡蛋。利用气相色谱-质谱技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)对产品挥发性风味物质进行测定。**结果** 结果表明酒添加量 0.6%、KCl 替代量 7%、盐泥浓度 51%时, 所得产品咸度适中、蛋黄出油率高、感官品质最佳。GC-MS 检测显示, 腌制后酯类、醇类及酮类物质相对含量升高, 醛类组分发生变化, 其中正己醛、1-辛烯-3-醇及呋喃类为主要风味贡献物。GC-IMS 结果显示, 腌制前以醇类和直链醛为主, 呈果香清香; 腌制后酯类和支链醛增多, 酯香、焦香增强, 风味更浓郁。**结论** 红泥腌制烘烤工艺, 有效促进了蛋品内部的脂肪氧化与美拉德反应, 使风味由清香型向复合型转变, 本研究不仅改善了传统咸蛋高盐、品质不稳定等缺陷, 也为低钠化、特色风味蛋制品的开发与推广提供了有价值的理论参考。

关键词: 红泥烤鸡蛋; 低钠; 工艺优化; 气相色谱-质谱法; 气相色谱-离子迁移谱法
中图分类号: TS253.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0240–09

Optimization of processing technology and analysis of volatile flavor compounds in baked red mud eggs

ZHAO Wen-Hui[1], LI Yan-Dong[2], JI Ru-Fen[3], QIU Meng-Jia[1], WU Meng-Nan[1], LI Jun-Jiao[3], LIU Mei-Yu[1*]

(1. *College of Life Science and Food Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*; 2. *Hebei Provincial Veterinary Drug and Feed Work Station*, *Shijiazhuang* 050035, *China*; 3. *Handan Animal Husbandry Technology Extension Station*, *Handan* 056001, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the processing technology of red mud roasted eggs and analyze their volatile flavor compounds. **Methods** This study adopted the mud-immersion method, used potassium chloride (KCl) to partially replace sodium chloride (NaCl) and red mud as an auxiliary material. The salt-mud concentration was controlled, and the pickling process was optimized through an orthogonal experiment to develop novel red mud roasted eggs. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)

收稿日期: 2026-05-21
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: 赵文慧(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为蛋品科学。E-mail: 1783362544@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

were utilized to determine the volatile flavor compounds of the products. **Results** The results showed that when the liquor addition was 0.6%, the KCl replacement was 7%, and the salt-mud concentration was 51%, the obtained products exhibited moderate saltiness, a high yolk oil exudation rate and the best sensory quality. GC-MS detection revealed that the relative contents of esters, alcohols and ketones increased after pickling, while the aldehyde components changed. Among them, hexanal, 1-octen-3-ol and furans were the primary flavor contributors. Furthermore, GC-IMS results demonstrated that before pickling, alcohols and straight-chain aldehydes were dominant, presenting a fresh and fruity fragrance; after pickling, esters and branched-chain aldehydes increased, which enhanced the ester and roasted aromas, resulting in a richer flavor profile. **Conclusion** The red mud pickling and roasting process effectively promotes lipid oxidation and the Maillard reaction within the eggs, which transforms the flavor from a light fragrance to a complex flavor. This study not only improves the defects of traditional salted eggs, such as high salt content and unstable quality, but also provides a valuable theoretical reference for the development and promotion of low-sodium and characteristic flavor egg products.

KEY WORDS: baked eggs with red mud; low sodium; optimization of processing; gas chromatography-mass spectrometry; gas chromatography-ion mobility spectrometry

0　引　言

咸蛋是我国传统蛋类加工制品之一, 拥有 600 余年的制作历史[1], 其富含优质蛋白质、脂肪及多种人体必需氨基酸、维生素和微量元素, 如钙、铁、磷等, 具有易消化吸收、风味独特、营养丰富等特点, 深受消费者青睐[2−3]。泥包法是传统咸蛋腌制工艺之一[4−5], 其通过将红土、食盐与水等按比例混合成泥浆, 用一定量的泥浆充分均匀包裹蛋体进行腌制, 红泥中的矿物质(如铁、钙、钾、镁等)及有机成分可与蛋内蛋白质、脂肪酸等发生反应, 生成醛类、酮类、呋喃类等风味物质, 使咸蛋具有独特口感, 进而提升蛋品营养价值, 但存在工艺烦琐、腌制成品盐分分布不均、人工成本高等不足[6]。相比之下, 泥浸法通过将蛋体浸没于泥浆中进行腌制, 腌制周期通常可缩短 7~14 d, 且具有操作简便、接触均匀、工艺参数易于调控和泥料利用率高等优点。随着消费者对低盐化、高品质化蛋制品需求的不断增加, 吴玲等[7]采用氯化钾(KCl)部分替代氯化钠(NaCl), 有效降低了咸蛋中钠离子(Na^+)含量, 减少了钠盐引发高血压的风险, 饶红花[8]以 KCl 和碳酸钾部分替代 NaCl 进行咸蛋的腌制, 显著降低咸蛋中钠盐含量, 孙静等[9]用食品添加剂部分替代 NaCl 开展咸蛋腌制试验, 结果表明, 糖醇的添加能够显著降低蛋清咸度。此外, 吴慧清等[10]研究了 3 种烤制方式对烤蛋品质的影响, 王泽琳等[11]采用冷冻、卤制、烘烤、上色这几种关键工艺, 研发出兼具优质口感与独特风味的新型烤蛋产品。

现有关于咸蛋低钠化与快速腌制技术的探讨多局限于盐水浸泡体系, 而针对传统泥包工艺的现代化改良系统性研究仍相对匮乏, 本研究创新性的在泥包法的基础上, 通过调节 KCl 替代 NaCl 量和盐泥浓度, 实现盐分的均匀渗透。采用单因素结合正交试验法, 严格控制环境温湿度[(25±2) ℃, 相对湿度 65%±5%], 通过定期取样检测盐分渗透速率及蛋黄出油率等指标来确定腌制情况。试验采用气相色谱-质谱技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 和气相色谱-离子迁移谱技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS), 两种检测方法分析风味物质, 前者检测中、小分子挥发性或半挥发性有机物(约 30~800 Da), 后者检测低分子量、高挥发性化合物(约 30~300 Da)[12−13]。两种技术联用, 可以更全面、准确地揭示腌制前后烤鸡蛋风味成分及差异, 旨在为提升烤鸡蛋品质提供理论依据。

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)。

食盐、KCl、白酒(市售); 正己烷、硝酸银、铬酸钾、异丙醇(分析纯, 天津市百世化工有限公司)。

1.2　仪器与设备

XHF-DY 高速均质机(宁波新芝生物科技股份有限公司); PX224ZH 型电子精密天平(精度 0.0001g, 奥豪斯仪器有限公司); DM0412 低速离心机(大龙兴创试验仪器股份公司); TWS-26 型电热恒温水浴锅(上海喆图科学仪器有限公司); Agilent 8890/7000E 安捷伦气相色谱质谱联用仪、DB-WAX UI 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm, 美国 Agilent 公司); FlavourSpec®气相离子迁移谱联用仪(德国 G.A.S. 公司)。

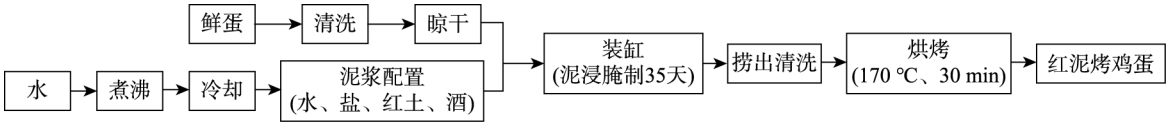
1.3　腌制方法

红泥烤鸡蛋腌制工艺如图 1 所示。

1.4　试验设计

1.4.1　单因素试验

以酒添加量、KCl 替代量以及盐泥浓度 3 个因素进行



注: 本试验后续指标检测均采用泥浸法腌制 35 d 鸡蛋。

图 1 红泥烤鸡蛋腌制工艺

Fig.1 Pickling process of baked eggs with red mud

单因素试验, 每个因素设置 5 个水平, 腌蛋总盐量 20%, 酒添加量为 0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%; KCl 替代量为 4.0%、5.5%、7.0%、8.5%、10.0%; 盐泥浓度为 48%、49%、50%、51%、52%; 判断不同因素水平下对蛋清和蛋黄含盐量、蛋黄出油率及感官评分的影响。

1.4.2 正交试验设计

正交试验设计表见表 1。

表 1 正交试验因素水平表(%)

Table 1 Factor level table of orthogonal test (%)

水平	*A*(酒添加量)	*B* (KCl 替代量)	*C*(盐泥浓度)
1	0.6	5.5	49
2	0.8	7.0	50
3	1.0	8.5	51

1.5 红泥烤鸡蛋指标测定方法

1.5.1 蛋清、蛋黄含盐量的测定

参照 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》第三法银量法进行含盐量的测定。

1.5.2 蛋黄出油率的测定

参照于沛[14]提出的方法对其进行了改进, 取 3 枚腌制好的咸蛋烤熟, 将蛋黄研碎, 称取 3 g 蛋黄加入 25 ml 正己烷-异丙醇(3:2, *V*:*V*)溶液, 均质 10 min, 4000 r/min 离心 10 min, 将上清液有机溶剂 100 ℃蒸发浓缩, 于 55 ℃烘干至恒重, 烧杯两次质量差值为总脂质质量。另取 3 g 蛋黄, 加 35 mL 蒸馏水, 均质 10 min, 4000 r/min 离心 10 min, 上清液转移至分液漏斗中, 加入 25 mL 正己烷-异丙醇, 静置分层, 将上层含脂质层的有机溶剂转移至烧杯中, 水浴蒸发浓缩, 55 ℃烘干至恒重, 烧杯两次质量差值即为游离脂质的质量。蛋黄出油率计算如公式(1)所示。

$$蛋黄出油率/\%=\frac{游离脂质质量/g}{总脂质质量/g}\times 100\% \quad (1)$$

1.5.3 感官评分

组织 10 名食品专业品评人员分别对烤鸡蛋外观、风味、口感等方面进行感官评分, 具体评分标准见表 2。

1.5.4 红泥烤鸡蛋综合评分方法

参考徐雯[15]对蛋清含盐量、蛋黄含盐量、蛋黄出油率、感官评分 4 个主要指标进行综合评分, 设定以上 4 个指标占比分别为 0.2、0.2、0.2、0.4。

由于评定烤鸡蛋品质的各指标取值范围不同, 且各指标数值高低与烤鸡蛋品质的相关性不同, 需对原始指标

表 2 烤鸡蛋感官评分标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for baked eggs

指标	性状	分值
蛋壳(10)	蛋壳应完整、无裂纹、无破裂、表面清洁、蛋壳颜色为红褐色且颜色较均匀	8~10
	蛋壳完整、无裂纹、表面清洁、斑点较少, 蛋壳颜色较浅、颜色不太均匀	6~7
	蛋壳完整、有裂纹、斑点较多、蛋壳颜色浅、颜色不均匀	0~5
蛋清(30)	口感细嫩, 蛋清咸味适中, 较为爽口	25~30
	蛋清咸味偏重但可以接受	20~24
	口感一般, 蛋清咸味重, 接受度低	15~19
	口感差, 蛋清咸味过重且发苦, 难以接受	0~14
蛋黄(30)	蛋黄整体口感松沙细腻, 轻微咸味, 且香味十足	25~30
	蛋黄口感松沙细腻, 中心口感较硬	20~24
	蛋黄仅边缘层有较弱的松沙口感, 整体口感较硬, 无咸味	15~19
	蛋黄无松沙感, 与未腌制的蛋黄差别较小	0~14
风味(30)	具有咸蛋应有的气味、无异味、有特有香味, 无酒味; 咸度适中、蛋清清嫩爽口、蛋黄口味有细砂感, 富于油脂; 品尝则有咸蛋固有的香味	25~30
	根据咸度是否适中、蛋清是否清嫩爽口、蛋黄口味是否有细沙感	20~24
	根据蛋黄蛋清是否有异味的程度	0~19

值进行模糊变换。将判断烤鸡蛋品质的各指标值 y 的分值 r 设置在[0–1]的区间。将 y 越高分值越高的指标(蛋黄出油率、感官评分)计算如公式(2)所示, 将 y 越高分值越低的指标(蛋清和蛋黄含盐量)计算如公式(3)所示。根据各指标所占总分的比重计算综合评分[16]。

$$r_i = \frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (2)$$

$$r_i = \frac{y_{max} - y_i}{y_{max} - y_{min}} \quad (3)$$

式中: r_i 为指标模糊变换后分值; y_i 为测定指标值; y_{min} 为测定指标最小值; y_{max} 为测定指标最大值。综合评分(Z)计算如公式(4)所示。

$$Z=r_{\text{蛋清含盐量}}\times0.2+r_{\text{蛋黄含盐量}}\times0.2+r_{\text{蛋黄出油率}}\times0.2+r_{\text{感官评分}}\times0.4 \quad (4)$$

1.6　GC-MS 测定方法

称取 2 g 样品加入到固相微萃取仪采样瓶中。在气相色谱质谱联用仪加热模块于 70 ℃震动平衡 10 min 后萃取纤维萃取 40 min, 热解吸 5 min, 进样口 250 ℃。仪器: Agilent 8890/7000E 气相色谱质谱联用仪。色谱柱: DB-WAX UI (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 载气为氦气, 流量 1.0 L/min。萃取纤维: 深蓝色纤维。进样方式: 不分流, 溶剂延迟时间为 1 min[17]。

1.7　GC-IMS 测定方法

样品处理: 取 2.0 g 样品, 置于 20 mL 顶空瓶中, 采用气相离子迁移谱联用仪进行测试。自动顶空进样条件: 进样量为 500 μL, 孵育时间 15 min, 孵育温度 70 ℃, 进样针温度为 75 ℃, 孵化转速为 500 r/min。GC 条件: 色谱柱温度为 60 ℃, 载气为氮气, 总 GC 时长 20 min; IMS 条件: 温度为 45 ℃, 载气为氮气。采用仪器配套软件 VOCal(版本 0.4.03)得出分析谱图, 应用软件内置的美国国家标准与技术研究院数据库(National Institute of Standards and Technology, NIST)和 IMS 数据库对挥发性风味物质进行定性、定量分析; 并使用 Reporter 和 Gallery Plot 插件对比腌制前后不同样品之间图谱差异, 以便全面分析不同样品间挥发性风味物质的种类。

1.8　数据处理

所有试验进行 3 次重复, 数据统计分析采用 Excel 2005、SPSS 25.0 对试验数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　酒添加量对烤鸡蛋品质的影响

酒添加量对烤鸡蛋品质及评分的影响见表 3。

酒添加量对烤鸡蛋综合品质有显著影响。随着酒添加量的增加, 蛋清、蛋黄的含盐量上升, 白酒不仅可以轻微破坏蛋壳表面的膜结构, 促进盐分渗透, 加快腌制进程, 还可与盐分协同作用, 促使蛋黄中的脂肪游离析出, 形成“出油”效果[18–19]。然而, 过量白酒会导致鸡蛋含盐量高, 产生明显酒味, 甚至出现苦味, 掩盖烤鸡蛋原有的焦香风味, 降低感官品质。综合分析, 当酒添加量为 1.2%时, 蛋黄出油率最高 57.69%, 但风味欠佳; 0.4%时出油率偏低、风味较清淡; 而 0.8%添加量时, 蛋清紧实且蛋黄出油率高、咸淡适中, 感官评分高达 84.5, 显著高于其他组别。

不同酒添加量对烤鸡蛋品质指标经模糊变换后的综合评分存在显著差异。酒添加量为 0.4%、0.6%时, 综合评分分别为 0.40 和 0.67, 虽蛋清、蛋黄含盐量模糊变换值较高, 但蛋黄出油率和感官评分较低, 导致整体评分偏低。随着酒添加量增至 1.0%、1.2%时, 蛋黄出油率虽提升, 但盐分过高导致口感偏咸、酒味过重, 感官得分下降, 综合评分分别降至 0.47 和 0.43。相比之下, 0.8%组烤鸡蛋咸度适中、蛋黄出油率高、感官评分及综合评分最优。结果表明, 酒添加量对红泥烤鸡蛋品质具有显著影响, 过低或过高均不利于产品风味与整体质量。经综合分析, 选择酒添加量 0.6%、0.8%、1.0%进行后续正交试验。

2.2　KCl 替代量对烤鸡蛋品质的影响

KCl 替代量对烤鸡蛋品质及评分的影响见表 4。

KCl 替代量对烤鸡蛋综合品质具有显著影响。随着 KCl 替代量的增加, 烤鸡蛋含盐量逐渐升高, 这是由于 K^+ 的水合离子半径比 Na^+小, K^+在溶液中的扩散速度更快。此外, 高浓度的 KCl 可能改变蛋壳膜或蛋清的结构, 增强离子渗透性, 导致更多 NaCl 和 KCl 进入蛋内, 从而提升含盐量[20]。同时, 随着 KCl 替代量的增加, 蛋黄出油率也显著上升, 这一现象可能与 KCl 和 NaCl 竞争性结合蛋黄脂蛋白有关, 其稳定性被破坏后促进了脂质释放[21–22]。

表 3　酒添加量对烤鸡蛋品质指标的影响

Table 3　Effects of wine addition on quality index of baked eggs

酒添加量/%	蛋清含盐量/%	蛋黄含盐量/%	蛋黄出油率/%	感官评分/分	综合评分/分
0.4	4.23±0.06^{c}	1.19±0.12^{b}	50.71±1.11^{c}	78.40±2.27^{c}	0.40
0.6	4.45±0.13^{b}	1.24±0.09^{b}	54.28±0.62^{b}	82.90±1.79^{ab}	0.67
0.8	4.52±0.11^{ab}	1.31±0.05^{ab}	54.92±1.27^{b}	84.50±2.80^{a}	0.71
1.0	4.59±0.05^{ab}	1.34±0.08^{ab}	55.85±0.98^{ab}	81.20±2.04^{b}	0.47
1.2	4.72±0.18^{a}	1.46±0.15^{a}	57.69±1.10^{a}	81.90±1.45^{b}	0.43

注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表 4~6 同。

表 4 KCl 替代量对烤鸡蛋品质指标的影响

Table 4 Effects of KCl replacement levels on quality characteristics of baked eggs

KCl 替代量/%	蛋清含盐量/%	蛋黄含盐量/%	蛋黄出油率/%	感官评分/分	综合评分/分
4.0	4.06±0.26^{b}	1.14±0.06^{b}	50.63±1.99^{c}	78.50±0.97^{c}	0.50
5.5	4.23±0.21^{ab}	1.24±0.06^{b}	54.29±0.87^{b}	81.90±2.38^{b}	0.59
7.0	4.38±0.32^{ab}	1.29±0.08^{ab}	54.57±1.43^{b}	86.00±1.89^{a}	0.67
8.5	4.50±0.15^{a}	1.33±0.12^{ab}	56.18±0.66^{b}	84.30±2.54^{a}	0.57
10.0	4.59±0.23^{a}	1.42±0.11^{a}	58.75±1.15^{a}	75.90±1.45^{d}	0.20

不同 KCl 替代量对烤鸡蛋各指标经模糊变换后所得综合评分有显著差异。当 KCl 替代量为 4.0%、5.5%时，综合评分分别为 0.50 和 0.59。蛋清、蛋黄含盐量模糊变换值高，但蛋黄出油率偏低，风味较淡，感官评分不理想。随着 KCl 替代量增加至 10.0%，蛋清、蛋黄含盐量高，且随着 KCl 替代量增加，烤鸡蛋会伴随轻微苦味[23–24]，消费者接受程度下降，导致综合评分降至 0.20。当替代量为 7.0%时，综合评分高达 0.67。此时，蛋清和蛋黄的含盐量适中，蛋黄出油率较高，且感官评分最优，表明该添加量在风味、质地和接受度之间取得了平衡。因此，选取 5.5%、7.0%、8.5% 3 个水平进行后续正交试验，以进一步优化工艺参数。

2.3 盐泥浓度对烤鸡蛋品质的影响

盐泥浓度对烤鸡蛋品质及评分的影响见表 5。

盐泥浓度对烤鸡蛋品质具有显著影响。随着盐泥浓度的升高，蛋清和蛋黄中的含盐量呈现递减趋势。主要由于高浓度盐泥黏度增加，限制盐分扩散与渗透速率，不易使其渗透蛋中[25]。相反低浓度盐泥有利于盐分渗透，盐分会改变低密度脂蛋白结构，从而增强载脂蛋白与脂质间的相互作用，促进载脂蛋白、磷脂及中性脂质的释放，提升出油率[26]。感官评分呈现先升后降的趋势，在 50%浓度时达到峰值 83.7 分。此浓度既可保证足够盐分渗透带来风味提升，又可避免过高盐分导致的质地劣变，为烤鸡蛋加工提供了理想的盐泥配比参数。

不同盐泥浓度对烤鸡蛋各指标经模糊变换后所得综合评分有显著差异。当浓度为 48%时，综合评分最低为 0.20。此时蛋清、蛋黄含盐量较高，口感偏咸，接受程度较差，导致综合评分低。相反盐泥浓度为 52%时，虽含盐量适宜，但蛋黄出油率、感官评分较低，且在腌制过程中，由于泥浓度大过于黏稠，使其不易搅拌，因此不选用 52%浓度进行后续正交试验。在 50%盐泥浓度条件下，烤鸡蛋呈现最佳品质，这一浓度既避免了低浓度导致的烤鸡蛋过咸问题，又克服了高浓度造成的工艺困难。因此，选取 49%、50%、51% 3 个盐泥浓度水平进行后续正交优化试验。

2.4 正交试验结果分析与讨论

以腌制过程中酒添加量、KCl 替代量、盐泥浓度为正交因素，正交试验表和试验方差分析结果表见表 6、7。

由表 6 可知，对酒添加量、KCl 替代量、盐泥浓度 3 个因素进行正交试验优化，分析确定了烤鸡蛋最佳工艺参数组合为 $A_1B_2C_3$(酒添加量 0.6%、KCl 替代量 7%、盐泥浓度 51%)，此工艺下腌制的咸蛋综合评分最高为 0.85，各指标表现较优，蛋清和蛋黄口感适宜，咸度适中，蛋黄出油率和感官评分较高。极差分析显示各因素影响程度依次为：盐泥浓度>KCl 替代量>酒添加量，说明盐泥浓度对烤鸡蛋综合评分影响最大，KCl 替代量次之，酒添加量对烤鸡蛋综合评分影响最小。

跟据表 7 方差分析结果可知，红泥腌蛋工艺优化试验中各因素影响程度及显著性已得到验证。C(盐泥浓度)对结果影响最为显著 P=0.031<0.05，偏差平方和最大，是决定腌蛋品质的关键因素。B (KCl 替代量)同样表现出显著影响 P=0.032<0.05，其影响程度仅次于盐泥浓度。而 A(酒添加量)的影响较小 P=0.077，未达到显著水平。各因素的 F 排序：盐泥浓度>KCl 替代量>酒添加量。这一结果与前期正交试验的极差分析结论一致，进一步验证了盐泥浓度在腌蛋工艺中的主导地位。

2.5 腌制过程中生熟蛋黄变化

生熟蛋黄变化如图 2 所示。红泥腌蛋过程中，生蛋黄色泽随腌制进程呈现出显著且规律的渐变特征。初始阶段即 0 d、7 d，蛋黄呈现明亮橙色，颜色方面和未腌制的蛋黄差别不明显，此阶段盐分和红泥中的矿物质开始缓慢渗透，

表 5 盐泥浓度对烤鸡蛋品质指标的影响

Table 5 Effects of salt mud concentration on quality indexes of baked eggs

盐泥浓度/%	蛋清含盐量/%	蛋黄含盐量/%	蛋黄出油率/%	感官评分/分	综合评分/分
48	4.62±0.16^{a}	1.43±0.14^{a}	60.64±1.16^{a}	77.30±1.83^{d}	0.20
49	4.59±0.05^{a}	1.36±0.08^{ab}	58.25±0.85^{b}	80.10±1.29^{bc}	0.39
50	4.47±0.13^{ab}	1.28±0.05^{ab}	56.19±1.20^{c}	83.70±2.31^{a}	0.69
51	4.28±0.11^{b}	1.22±0.06^{b}	52.93±1.09^{d}	81.40±2.27^{b}	0.61
52	4.19±0.24^{b}	1.17±0.12^{b}	51.47±0.98^{d}	79.60±1.65^{c}	0.54

表 6　正交试验测定结果

Table 6　Determination results of orthogonal test

试验组	*A*(酒添加量)/%	*B* (KCl 替代量) /%	*C*(盐泥浓度)/%	空列	蛋清含盐量/%	蛋黄含盐量/%	蛋黄出油率/%	感官评分/分	综合评分/分
1	3	3	1	3	4.56±0.19^{ab}	1.43±0.09^{a}	58.30±1.89^{a}	88.10±3.41^{c}	0.50
2	1	2	3	3	4.21±0.15^{bc}	1.20±0.13^{b}	56.67±1.31^{ab}	96.60±1.58^{a}	0.85
3	3	1	3	2	4.38±0.27^{b}	1.39±0.14^{ab}	50.23±0.86^{d}	93.00±2.40^{b}	0.47
4	1	3	2	2	4.35±0.17^{b}	1.35±0.07^{ab}	55.87±2.10^{b}	88.40±3.03^{c}	0.53
5	2	3	3	1	3.92±0.09^{c}	1.12±0.04^{b}	53.61±1.07^{c}	85.20±1.48^{d}	0.62
6	3	2	2	1	4.64±0.15^{ab}	1.40±0.12^{ab}	54.20±0.58^{bc}	93.50±2.07^{b}	0.51
7	2	2	1	2	4.76±0.11^{a}	1.24±0.07^{b}	50.79±1.04^{d}	85.90±1.79^{d}	0.31
8	2	1	2	3	4.69±0.24^{a}	1.51±0.06^{a}	54.88±1.30^{bc}	79.10±2.33^{e}	0.13
9	1	1	1	1	4.77±0.10^{a}	1.46±0.10^{a}	52.14±0.64^{cd}	86.70±2.41^{cd}	0.25
K_1	1.63	0.85	1.05	1.38					
K_2	1.07	1.67	1.18	1.31					
K_3	1.48	1.65	1.94	1.48					
k_1	0.54	0.28	0.35	0.46					
k_2	0.36	0.56	0.39	0.44					
k_3	0.49	0.55	0.65	0.49					
R	0.19	0.27	0.30	0.06					

表 7　正交试验方差分析结果

Table 7　Variance analysis results of orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	0.357	6	0.060	24.475	0.040
截距	1.932	1	1.932	794.014	0.001
A(酒添加量)/%	0.058	2	0.029	11.959	0.077
B (KCl 替代量)/%	0.146	2	0.073	29.973	0.032
C(盐泥浓度)/%	0.153	2	0.077	31.493	0.031
误差	0.005	2	0.002		
总计	2.294	9			

蛋黄脱水，逐渐凝固聚集[27]。随着腌制时间的推进，颜色逐步向橙红转变即 14 d、21 d，且在此阶段生蛋黄质地从软韧向紧实转变[28]。在腌制后期即 28 d、35 d，蛋黄呈现均匀深红色，部分呈现油润光泽，蛋黄含水率降至较低水平，质地致密。随着腌制时间的延长，盐分不断向蛋黄内部渗透，引起蛋黄内部的脱水、蛋白质变性及脂质乳化体系破坏，最终导致脂质由结合状态向游离状态转变，从而形成可见的“出油”现象[29–30]。

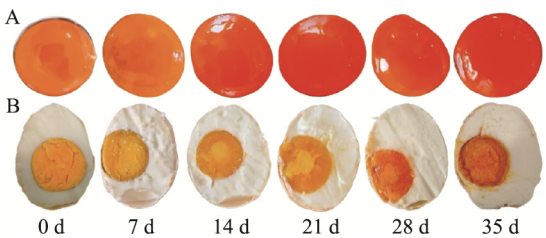


图 2　生(A)、熟(B)蛋黄在腌制过程中的变化

Fig.2　Changes in raw (A) and cooked (B) egg yolks during the pickling process

2.6　腌制前后烤鸡蛋蛋黄 GC-MS 分析

如表 8 所示，对比未腌制与腌制烘烤后的蛋黄挥发性风味物质发现，腌制前后蛋黄都检测出 22 种风味物质，但其种类和相对含量均发生了明显变化。腌制和烘烤过程中，蛋黄中的脂质、蛋白质及其他前体物质发生氧化、降解和转化反应，从而导致风味物质发生改变，其中腌制后正己醛、1-辛烯-3-醇及呋喃类为主要风味贡献物。整体来看，酯类化合物相对含量升高，组成发生了变化，未腌制样品中以棕榈酸甲酯和十一酸甲酯为主，而腌制后生成了甲酸正癸酯和甲酸辛酯，酯类物质通常由脂肪酸与醇类发生酯化反应形成，腌制和加热过程中脂质水解产生更多游离脂肪酸，同时促进酯化反应进行，从而形成新的酯类化合物，为蛋黄带来果香和脂香特征。其次，醛类物质总体含量保持基本稳定，但其组成成分和相对含量发生了变化。腌制后正己醛、壬醛、正辛醛和癸醛的含量均有所上升，其中正己醛增加明显，主要来源于亚油酸氧化降解，具有脂香和青草香气，壬醛主要来源于油酸氧化，可赋予柑橘香和油脂香。腌制过程中碱性环境促进脂质氧化，后续烘烤进一步加速脂肪酸分解，因此上述醛类含量增加[31–32]。同时，(*E*)-2-庚烯醛、反-2-辛烯醛等不饱和醛在腌制后未再检出，新生成了 3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛，多为脂质氧化的产物。这表明在腌制与加热过程中，不饱和醛可能发生降解或者氧化[33]。酮类化合物在腌制后出现，总量达 0.013%，此类化合物通常来源于脂肪酸氧化及热降解过程，具有较低的嗅觉阈值，可赋予产品奶香、果香和烘烤香气。醇类化合物相对含量增加了 0.032%，尤其是 1-辛烯-3-醇含量明显上升，腌制后新生成了正庚醇。这类物质常赋予油脂香、果香和青草香，增强了烤鸡蛋蛋黄的风味。此外，烃类和萜烯类化合物总量呈下降趋势，腌制后部分烃类含量

降低，可能是由于其在烘烤过程中挥发损失，或进一步氧化生成醛类、酮类等风味活性更强的化合物；萜烯类物质具有较强挥发性和热敏性，在烘烤过程中易挥发或发生氧化转化，因此其含量有所下降。呋喃类化合物含量相对下降，其中 2-正戊基呋喃是亚油酸氧化的重要产物，具有豆香和烘烤香气，其含量下降可能与高温条件下进一步裂解有关。酰胺类化合物在腌制后生成，这类化合物源于美拉德反应，挥发性成分的变化说明腌制烘烤过程中氨基酸和还原糖的反应发生了调整[34]。

2.7 腌制前后烤鸡蛋蛋黄 GC-IMS 分析

烤鸡蛋蛋黄在腌制前后挥发性风味物质发生了变化，图 3 为腌制前后烤鸡蛋蛋黄 GC-IMS 指纹图谱。WH1-3 为未腌制的烤鸡蛋蛋黄，YH1-3 为腌制过的烤鸡蛋蛋黄，指纹图谱中红色/黄色代表浓度或响应值较高，相反蓝色表示浓度或响应值较低。通过 GC-IMS 技术检测出烤鸡蛋蛋黄中共有 22 种挥发性风味物质，腌制前后各检测出 13 种，有酯类、醛类、酮类等。且在图 3 中可以清楚的观察到腌制前后蛋黄挥发性风味物质的种类和含量发生了明显变化。腌制前蛋黄中以醇类和直链醛类为主，如(A 区)2-戊醇、2-乙基己醇、正己醛、正戊醛、乙酸丙酯、庚醛、丁酸乙酯、戊醇、3-羟基-2-丁酮含量相对较高，这些物质多来源于脂肪氧化与蛋白质初步分解，赋予清新、脂香及果香等特征[35]。在腌制后酯类与支链醛类物质明显增多，如(C 区)2,3-丁二醇、异戊醛-*D*、乙酸乙酯、正丁醛、四氢呋喃、异戊醛-*M*、2-甲基丁醛、异丁酸乙酯、2-甲基戊醛这些挥发性物质含量较高，这是由于腌制过程中脂肪和蛋白质水解成游离脂肪酸和氨基酸，氨基酸经脱氨、还原反应生成醇，在加热烘烤过程中有机酸和醇发生酯化反应生成乙酸乙酯、异丁酸乙酯等，加热烘烤赋予蛋黄更浓郁的酯香和焦香气[36–37]。与此同时(B 区)1-辛烯-3-醇、2-丁酮、2,3-丁二酮、丙酸这 4 种物质在腌制前后均被检测到，在整个加工过程中具有较高稳定性，呈黄油香与烘焙香气[38]。总体来看，腌制烘烤过程促进了香气由清香型向复合型的转变，使蛋黄香气更加浓郁、层次更丰富，口感更为醇厚。这一变化主要受美拉德反应、脂肪氧化及微生物代谢等多重因素共同作用的影响。

表 8 腌制前后烤鸡蛋蛋黄 GC-MS 风味物质的相对含量

Table 8 Relative content of GC-MS flavor substances in roast chicken egg yolk before and after pickling

种类	化合物名称	相对含量/%		种类	化合物名称	相对含量/%	
		未腌制蛋黄	腌制蛋黄			未腌制蛋黄	腌制蛋黄
酯类	棕榈酸甲酯	0.034±0.003	0.017±0.002	醇类	1-辛烯-3-醇	0.062±0.006	0.110±0.004
	十一酸甲酯	0.010±0.001	-		正戊醇	0.010±0.001	0.011±0.002
	甲酸正癸酯	-	0.020±0.002		2-十四醇	0.022±0.004	-
	甲酸辛酯	-	0.010±0.001		正庚醇	-	0.004±0
	总计	0.044	0.047		总计	0.094	0.126
醛类	正己醛	0.309±0.031	0.334±0.029	烃类	正庚烷	0.075±0.008	0.045±0.005
	苯甲醛	0.084±0.007	0.067±0.008		十三烷	-	0.024±0.002
	壬醛	0.070±0.007	0.086±0.009		正十五烷	0.039±0.004	0.024±0.002
	正辛醛	0.034±0.003	0.054±0.005		正十六烷	-	0.025±0.001
	癸醛	0.028±0.003	0.050±0.002		7-十四碳烯	0.018±0.002	-
	(*E*)-2-庚烯醛	0.022±0.002	-		间二甲苯	0.008±0.001	-
	反-2-辛烯醛	0.039±0.005	-		总计	0.140	0.117
	丙醛	0.005±0.001	-	呋喃类	2-正戊基呋喃	0.064±0.007	0.048±0.005
	十五醛	0.017±0.003	-		2, 4, 6-三甲基吡啶	0.005±0	-
	羟乙醛	0.000±0	-		2-正丙基呋喃	-	0.006±0
	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	-	0.015±0.003		总计	0.069	0.055
	总计	0.608	0.607	萜烯类	(+)-柠檬烯	0.046±0.005	0.027±0.003
酮类	1-庚烯-3-酮	-	0.012±0.001		总计	0.046	0.027
	2-丁酮	-	0.001±0	酰胺类	丙烯酰胺	-	0.008±0
	总计	0	0.013		总计	0	0.008

注: -表示未检出。

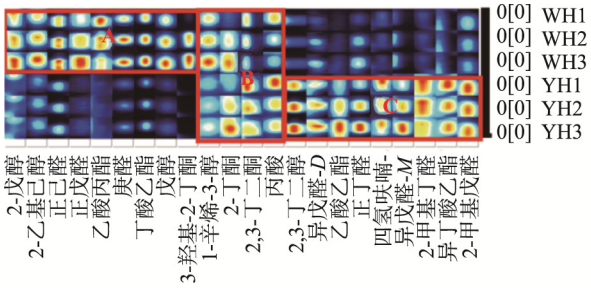


图 3　腌制前后烤鸡蛋蛋黄 GC-IMS 指纹图谱

Fig.3　GC-IMS fingerprint of roast chicken egg yolk before and after pickling

3　结　论

本研究以鸡蛋为原料，采用泥浸法并通过正交试验优化红泥烤鸡蛋腌制工艺。结果表明，最佳工艺参数为：酒添加量 0.6%、KCl 替代量 7%、盐泥浓度 51%。在此最优条件下，产品咸度适中、盐分分布均匀、蛋黄出油率高，感官品质最佳。风味分析结果显示，腌制与烘烤改变了蛋黄的挥发性成分的组成和含量。GC-MS 结果显示，腌制后酯类、醇类及酮类相对含量增加，醛类组分发生变化，正己醛、1-辛烯-3-醇及呋喃类为主要风味贡献物，增强香气层次。GC-IMS 结果表明，腌制前以醇类和直链醛为主，呈果香清香；腌制后酯类与支链醛增多，酯香、焦香突出，部分物质如 1-辛烯-3-醇、2,3-丁二酮在腌制前后稳定存在。综上，本研究优化了红泥烤鸡蛋制备工艺，阐明了腌制和烘烤对蛋品色泽、质构及风味成分影响规律。研究结果为传统咸蛋工艺改良提供了科学依据，也为低盐化、功能化蛋制品的开发与产业化应用提供了理论参考和技术支撑。

参考文献

[1] 昝沛清，程裕东，金银哲. 咸鸭蛋快速腌制工艺及咸蛋清综合利用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 210–214.
Zan Peiqing, Cheng Yudong, Jin Yinzhe. Research progress on rapid pickling process of salted duck eggs and comprehensive utilization of salted duck eggs white [J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 210–214.

[2] 顾玲荣，石福岳，徐建峰，等. 不同品种鸡产蛋性能、蛋品质及营养成分比较分析[J]. 饲料研究, 2025, 48(2): 56–61.
Gu Lingrong, Shi Fuyue, Xu Jianfeng, et al. Comparative analysis of laying performance, egg quality, and nutrition composition of different breeds of chicken [J]. Feed Research, 2025, 48(2): 56–61.

[3] Li Xiaoya, Chen Shuping, Yao Yao, et al. The quality characteristics formation and control of salted eggs: a review [J]. Foods, 2022, 11(19): 2949.

[4] 孙静，李开耀，向俊，等. 泥腌、水腌咸蛋的理化指标和滋味品质差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(21): 8342–8350.
Sun Jing, Li Kaiyao, Xiang Jun, et al. Comparison of physical and chemical indexes and taste quality of salted egg in single mud-salted and water-salted methods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(21): 8342–8350.

[5] 张晓维，郑萍，高洁，等. 3 种方法腌制咸蛋理化性质的对比[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 108–116.
Zhang Xiaowei, Zheng Ping, Gao Jie, et al. Comparison of physicochemical properties of salted eggs by three pickling methods [J]. Food Research and Development, 2020, 41(12): 108–116.

[6] 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 Yating, Chen Liyu, Fu Jiahui, et al. Changes in physicochemical properties and quality of sea duck eggs during pickling using an improved mud-packing method [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 154–163.

[7] 吴玲，孙静，乐立强，等. KCl 部分替代 NaCl 腌制咸蛋效果的比较研究[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 5–10.
Wu Ling, Sun Jing, Le Liqiang, et al. Effect of potassium chloride as partial sodium chloride substitution in salted duck eggs [J]. Food Science, 2011, 32(13): 5–10.

[8] 饶红花. 低钠咸蛋的加工工艺及保鲜研究[D]. 南昌：江西农业大学, 2014: 8–22.
Rao Honghua. Study on the processing and preservation of low sodium salted egg [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014: 8–22.

[9] 孙静，皮劲松，潘爱銮，等. 咸蛋腌制剂低盐高渗替代物的筛选[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(24): 6334–6337, 6341.
Sun Jing, Pi Jinsong, Pan Ailuan, et al. Salted eggs pickled formulation screening of low hypertonic salt substitutes [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(24): 6334–6337, 6341.

[10] 吴慧清，董婷婷，曾齐，等. 不同烤制方式工艺优化及其对卤蛋品质的改善[J]. 食品科技, 2022, 47(2): 109–117.
Wu Huiqing, Dong Tingting, Zeng Qi, et al. Optimization of different baking methods and their improvement on the quality of marinated eggs [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(2): 109–117.

[11] 王泽琳，王靖羚，仝其根. 新型烤蛋关键工艺参数的研究[J]. 农产品加工, 2020(1): 21–25.
Wang Zelin, Wang Jingling, Tong Qigen. Study on key technological parameters of new baked eggs [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2020(1): 21–25.

[12] 李明洁，凌道，李祥雨，等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析海鸭蛋腌制过程中蛋清挥发性风味物质的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 200–208.
Li Mingjie, Ling Xiao, Li Xiangyu, et al. Analysis of volatile flavor compounds in sea duck egg white during salting by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2022, 43(18): 200–208.

[13] 王一虹，郑佳，朱丽蒸，等. GC-IMS 和 SPME-GC-MS 在浓香型白酒挥发性风味物质分析中的应用比较[J]. 中国酿造, 2025, 44(9): 243–249.
Wang Yihong, Zheng Jia, Zhu Lizheng, et al. Comparison of the applications of GC-IMS and SPME-GC-MS in the analysis of volatile flavor compounds in strong-flavor Baijiu [J]. China Brewing, 2025, 44(9): 243–249.

[14] 于沛. 三穗特色咸蛋低盐腌制控制技术研究[D]. 贵阳：贵州大学, 2021: 11–12.
Yu Pei. Study on low-salt curing control technology for Sansui characteristic salted eggs [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021: 11–12.

[15] 徐雯. 贵州三穗特色黄皮蛋无铅腌制技术及凝胶形成研究[D]. 贵阳:

贵州大学, 2020: 15–16.
Xu Wen. Research on the characteristic yellow preserved egg existing in Guizhou Sansui lead-free pickling technology and gel formation [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020: 15–16.

[16] 包欢欢. 基于低盐腌制的咸蛋黄加工及保藏技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023: 27–28.
Bao Huanhuan. Study on processing and preservation technology of salted egg yolk based on low salt curing [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023: 27–28.

[17] 刘佳凡, 邸维, 李欣, 等. SPME-GC-MS 分析广西海鸭蛋挥发性成分[J]. 农产品加工, 2021(7): 72–74.
Liu Jiafan, Di Wei, Li Xin, et al. Analysis of volatile components in Guangxi Sea duck egg by SPME-GC-MS [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2021(7): 72–74.

[18] 莫晓慧, 王星月, 李晓, 等. 乙醇及乙酸预浸泡结合脱盐渗透在低盐咸蛋制备中的应用[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(5): 178–187.
Mo Xiaohui, Wang Xingyue, Li Xiao, et al. Application of pre-soaking with ethanol and acetic acid in salted duck egg desalination [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(5): 178–187.

[19] 陈艳琳, 王修俊, 包欢欢, 等. 低盐腌制咸蛋黄的影响因素及其品质评价[J]. 中国食品学报, 2025, 25(6): 239–250.
Chen Yanlin, Wang Xiujun, Bao Huanhuan, et al. Influencing factors of low salted egg yolk and their quality evaluation [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(6): 239–250.

[20] Liu Huilan, Feng Feng, Xue Hui, et al. Effects of partial replacement of NaCl by KCl and $CaCl_2$ on physicochemical properties, microstructure, and textural properties of salted eggs [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(2): 795–807.

[21] Ye Yufei, Wu Na, Yao Yao, et al. Effects of ammonium chloride on physicochemical properties, aggregation behavior and microstructure of duck egg yolk induced by salt [J]. LWT, 2025, 229: 118151.

[22] Liu Yaotong, Ma Yanqiu, Chi Yujie, et al. Change in rapid salting kinetics and characteristics of hen egg yolks [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 329: 111090.

[23] Liu Yana, Chen Jie, Zou Bo, et al. Evaluation of the quality and flavor of salted duck eggs with partial replacement of NaCl by non-sodium metal salts [J]. LWT, 2022, 172: 114206.

[24] 王玲玲, 朱子桂, 李婉宁, 等. 氯化钾替代氯化钠对腌渍黄瓜品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(2): 19–27.
Wang Lingling, Zhu Zigui, Li Wanning, et al. Effect of replacing sodium chloride with potassium chloride on quality of pickled cucumber [J]. China Condiment, 2024, 49(2): 19–27.

[25] 丁德龙, 王鹏宇. 低钠脉动压力技术对咸鸭蛋腌制渗透压及品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 91–98.
Ding Delong, Wang Pengyu. Effect of low-sodium pressure fluctuation technology on osmotic pressure and quality of salted duck eggs [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(9): 91–98.

[26] Tan Lixin, Zheng Mengting, Chen Shuping, et al. Changes in physicochemical properties, molecular structure and microstructure during vacuum assisted quick pickling of low-NaCl salted eggs [J]. LWT, 2023, 189: 115480.

[27] 陈颜红, 王修俊, 于沛, 等. 咸鸭蛋腌制过程中蛋黄凝聚变化分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 377–389.
Chen Yanhong, Wang Xiujun, Yu Pei, et al. Analysis of the changes of egg yolk coagulation in the salting process of salted egg [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 377–389.

[28] Xu Lilan, Zhao Yan, Xu Mingsheng, et al. Changes in aggregation behavior of raw and cooked salted egg yolks during pickling [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 68–77.

[29] 徐群博, 李秀华, 肖性龙, 等. 腌制条件对熟制咸鸭蛋蛋黄组织形态及组成的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 80–87.
Xu Qunbo, Li Xiuhua, Xiao Xinglong, et al. Effects of salting conditions on the morphology and composition of cooked salted duck eggs yolk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 80–87.

[30] Wu Yongyan, Xiang Xiaole, Li Xiefei, et al. Study on the mechanism of improving the quality of salted egg yolks by ultrasonic synergistic NaCl dry-curing [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 102: 106746.

[31] 包欢欢, 王修俊, 于沛, 等. 两段式腌制过程中三穗咸蛋黄挥发性风味物质的变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 283–289.
Bao Huanhuan, Wang Xiujun, Yu Pei, et al. Study on change of volatile flavor components of Sansui salted duck egg yolk during two-stage curing [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(3): 283–289.

[32] Zhou Min, Zheng Lingyan, Geng Tuo, et al. Effect of fermented *Artemisia argyi* on egg quality, nutrition, and flavor by gut bacterial mediation [J]. Animals, 2023, 13(23): 3678.

[33] Zeng Hongbo, Zhang Yue, Guo Xuezhen, et al. Comparative analysis of quality characteristics and flavor compounds in caged and cage-free eggs based on untargeted flavoromics [J]. Food Chemistry, 2026, 35: 103840.

[34] Chen Liyu, Li Xiangyu, Liu Zhaobin, et al. Sensory characterization of main flavor-producing compounds produced during thermal processing of salted egg yolks [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 147: 108090.

[35] Gao Xuejing, Zhang Mengya, Li Junhua, et al. Reducing curing time *via* a shell-less method: a comparative analysis of flavour characteristics in salted egg yolk [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(8): 5363–5375.

[36] 马可涵, Dieudonné Mahukpégo, 杨佳, 等. 禽蛋风味及其评价技术的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(8): 37–44.
Ma Kehan, Dansou D M, Yang Jia, et al. Research progress on poultry egg flavor and its evaluation techniques [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(8): 37–44.

[37] Wang Xuyue, Huang Yu, Zhou Bin, et al. Improvement of quality and flavor of salted egg yolks by ultrasonic assisted cooking [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 75: 105579.

[38] 刘程鹏, 张香美, 岳书华, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 分析不同品种鸡肉品质风味差异[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(8): 109–120.
Liu Chengpeng, Zhang Xiangmei, Yue Shuhua, et al. Analysis of quality and flavor differences of different chicken varieties based on electronic nose and GC-IMS [J]. Storage and Process, 2025, 25(8): 109–120.

(责任编辑: 曹岱琳 韩晓红)