DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250929003
引用格式: 黄春墁, 吴春剑, 赵文竹, 等. 基于感官评定与质构特性分析的海南富硒卤蛋加工工艺优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 92–100.
HUANG CM, WU CJ, ZHAO WZ, *et al*. Optimization of processing techniques of selenium-enriched marinated eggs from Hainan based on sensory evaluation and texture profile analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 92–100. (in Chinese with English abstract).

基于感官评定与质构特性分析的海南富硒卤蛋加工工艺优化

黄春墁[1], 吴春剑[1], 赵文竹[1], 王　兰[2], 陈福海[2], 于志鹏[1*]
(1. 海南大学食品科学与工程学院, 海口　570228; 2. 海南省农垦投资控股集团有限公司, 海口　570100)

摘　要: 目的　通过单因素试验与正交试验, 对海南富硒卤蛋的卤料配方与加工工艺进行优化, 系统分析各关键因子对卤蛋感官品质及质构特性的影响。**方法**　通过排序检验与评分法确定卤蛋的最佳配方和工艺条件, 采用质构仪进行质构剖面分析, 确定不同工艺参数对应的卤蛋质构特性参数。**结果**　卤蛋卤料的最优配方确定为: 第一类香辛料 1.50%、第二类香辛料 0.67%、白砂糖 4.00%、食盐 1.60%、生抽 5.50%。按此配方所制得的卤蛋产品, 外观呈现均匀棕褐色, 表面富有光泽; 风味上卤香浓郁协调, 口感弹性适中, 咸鲜味恰到好处, 整体感官品质优异, 在综合评分中得分最高; 卤蛋的最佳制作工艺为: 卤制 60 min, 自然冷却至室温后于 4 ℃条件下冷藏 12 h, 取出沥干后再于 60 ℃环境中烘制 60 min。在此优化工艺下制得的卤蛋, 其蛋白硬度达到(1496.06±13.53) *g*, 咀嚼度为(1169.31±126.95) *g*; 蛋黄硬度为(317.11±2.34) *g*, 咀嚼度为(196.10±8.61) *g*。各项质构指标均显著优于未经卤制的鸡蛋(P<0.05)。**结论**　本研究有效提升了卤蛋产品的感官品质与质构特性, 为海南富硒蛋的深加工产业提供标准化依据, 对该产业的规模化与高质量发展提供关键技术支撑。

关键词: 富硒鸡蛋; 卤蛋; 感官评定; 质构

Optimization of processing techniques of selenium-enriched marinated eggs from Hainan based on sensory evaluation and texture profile analysis

HUANG Chun-Man[1], WU Chun-Jian[1], ZHAO Wen-Zhu[1], WANG Lan[2], CHEN Fu-Hai[2], YU Zhi-Peng[1*]
(1. *School of Food Science and Engineering*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*; 2. *Hainan State Farms Investment Holdings Group Co*., *Ltd*., *Haikou* 570100, *China*)

ABSTRACT: Objective　To optimize the spice-brine formulation and processing technology of Hainan selenium-enriched marinated eggs by single-factor and orthogonal experiments, and systematically analyse the influence of key factors on the sensory quality and textural properties of the marinated eggs. **Methods**　The optimal

收稿日期: 2025-09-29
基金项目: 海南富硒鸡蛋高端产品创制及产业化示范项目(HKKJ202424)
第一作者: 黄春墁(2004—), 女, 主要研究方向为食品营养。E-mail: 3464864723@qq.com
***通信作者:** 于志鹏(1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为蛋白功能肽与人类健康。E-mail: yuzhipeng20086@sina.com

formulation and processing conditions for the marinated eggs were determined using ranking tests in combination with a sensory scoring method. Textural profile analysis was performed with a texture analyzer to evaluate the textural parameters of the marinated eggs under different processing conditions. **Results** The optimal spice-brine formulation for the marinated eggs was determined as follows: 1.50% of type I spices, 0.67% of type II spices, 4.00% granulated sugar, 1.60% salt and 5.50% light soy sauce. The marinated eggs prepared using this formulation exhibited a uniform brown color with a glossy surface. Sensory evaluation indicated a rich and harmonious aroma, moderate elasticity, and an appropriate level of saltiness and umami, demonstrating excellent overall sensory quality with the highest comprehensive score. The optimal processing conditions for the marinated eggs were established as follows: Marinating for 60 min, cooling naturally to room temperature, refrigerating at 4 ℃ for 12 h, followed by draining and drying at 60 ℃ for 60 min. Under these optimized conditions, the hardness and chewiness of the egg white were (1496.06±13.53) *g* and (1169.31±126.95) *g*, respectively, while the hardness and chewiness of the egg yolk were (317.11±2.34) *g* and (196.10±8.61) *g*, respectively. All textural parameters were significantly superior to those of non-marinated eggs (P<0.05). **Conclusion** This study effectively improves the sensory quality and texture properties of marinated eggs. It provides a standardized basis for the deep-processing industry of Hainan selenium-enriched eggs and offers key technical support for the large-scale and high-quality development of this industry.

KEY WORDS: selenium-enriched eggs; marinated eggs; sensory evaluation; texture

0　引　言

鸡蛋被誉为“理想的营养库”, 是人体优质蛋白质的重要来源[1], 我国鸡蛋产量持续位居世界首位。随着科技进步与消费需求的日益多元化, 休闲蛋制品市场逐年扩大[2]。为推动蛋制品行业发展, 不少学者基于鸡蛋的功能特性开展休闲蛋制品研发。风味优化与功能健康化是卤蛋研究的热点, 可通过加入地方特色调味汁优化风味[3]、添加不同茶种调整卤料液成分, 赋予卤蛋多样的滋味[4]、将唐古特白刺融入卤料, 进行合理复配, 使卤蛋具备了机体生理功能的调节作用[5]。除了传统形态的研究, 基于蛋基原料的创新性研发也取得了一定的成果, 通过交联法与海藻酸钠复合制备凝胶珠, 得到回复性和弹性优异的新型蛋基凝胶制品, 为鸡蛋的功能化、形态创新提供了新方向[6]。研究不同预煮时间对鸡蛋凝胶特性、消化特性和抗氧化性能的影响, 确定最佳预煮时间, 并在此基础上开发出可以长期储藏的特殊风味溏心卤蛋[7], 丰富了卤蛋产品的品类。针对传统卤制工艺存在的腌制效率过低、能耗高等问题, 在腌制工艺方面, 利用离子预研制技术、脉动压力腌制技术显著提高了卤蛋的腌制效率[8–9]。在卤煮与干燥工艺方面, 采用真空浸渍和烘干循环新工艺代替传统常压卤煮与烘干, 在保证品质的同时降低能耗[10]; 针对传统蛋制品普遍存在的储藏期短等问题, 通过纳米 SiO_2/TiO_2 改性聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)基复合膜[11]攻克了行业痛点。然而, 我国不同地区具有独特的资源优势和饮食文化, 具有区域特色高品质的蛋制品的开发还存在严重不足, 存在加工方式单一、产品附加值低等问题[12–16], 难以满足市场对高品质、特色化鸡蛋产品的需求。

作为全国首个全域富硒农业示范省, 海南基于其得天独厚的自然环境, 大量的硒通过生物链积累作用为海南的富硒农产品开发提供了天然优势[17], 使得海南富硒蛋在市场上具有独特的竞争力。但目前富硒蛋产业主要集中在鲜蛋销售环节, 深加工产业发展相对滞后, 产品附加值未能得到充分挖掘, 这在一定程度上制约了海南富硒蛋产业的进一步发展。硒是人体健康所必需的微量元素, 具有抗氧化、抗衰老和免疫调节等重要生理功能[18–19]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的建议, 成人每日的硒摄入量为 55~70 μg[20]。硒摄入不足会导致克山病和大骨节病, 还与生育能力下降、甲状腺功能减退和免疫系统功能薄弱有关[21–23], 硒的缺乏与多种慢性疾病的发生密切相关, 而富硒食品作为一种理想的补硒途径[24], 其相关产品的研发逐渐成为食品领域的研究热点。

本研究立足海南省富硒鸡蛋资源优势, 基于单因素试验和正交试验, 以食品感官评定的排序检验法[25]和评分法为指标优化海南富硒卤蛋的卤料配方和工艺参数, 重点考察卤制、腌制、烘制等工艺参数对卤蛋硬度、弹性等质构指标的影响, 为海南富硒蛋产业化生产提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

海南富硒鸡蛋(海南农垦海津益佳牧业有限公司); 八角、花椒、桂皮、香叶(重庆雅叔食品有限公司); 草果、白芷、小茴香(河北华润顺达食品有限公司); 良姜、食盐(安

徽省盐业投资控股集团有限公司); 白砂糖(广西财成实业投资有限公司); 生抽(广东美味鲜调味食品有限公司); 纯净水(杭州娃哈哈集团有限公司); 真空食品包装袋(市售)。

1.2 仪器与设备

9030A 电动鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); BCD-326WFPH 电冰柜(合肥华凌股份有限公司); 6MB3002 电子天平(精度 0.01 g, 南京伯尼塔科学仪器); MC-CL22X3-103 多功能电磁炉(广东美的生活电器制造有限公司); YQ-688 真空封口机(温州潮仕潮电子商务有限公司); TA.XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 卤蛋制作工艺流程

卤蛋制作工艺流程见图 1。

将洗净后的鸡蛋冷水下锅水量需完全没过鸡蛋, 煮制 15 min。捞出后迅速转入凉水内激冷 3 min, 随后去壳。将去壳鸡蛋与对应比例的纯净水、卤料、白砂糖、食盐、生抽置于小锅后小火慢煮 60 min。将降至室温的卤蛋连同卤汁于 4 ℃环境下冷藏腌制 12 h, 最后取出沥干, 于 60 ℃的烘箱中热风烘制 60 min, 冷却后在真空度为 0.1 MPa 下密封, 高温灭菌后得到成品[26–28]。

1.3.2 卤蛋料液配方优化试验

(1)单因素试验

预试验确定卤蛋料液基础配方为第一类香辛料(八角 1.25 g, 桂皮 2.00 g, 花椒 1.25 g, 小茴香 0.50 g, 良姜 2.50 g)共占 1.50%; 第二类香辛料(白芷 2.00 g, 草果 0.83 g, 香叶 1.00 g)共占 0.77%; 白砂糖 4.00%; 食盐 0.50%; 生抽 8.00%。

第一类香辛料配比优化试验: 第一类香辛料包括八角、花椒、良姜、桂皮、小茴香。根据基础配方, 固定第二类香辛料、白砂糖、食盐、生抽等其他因素, 分别设置 0.50%、1.00%、1.50%、2.00% 4 个梯度水平的第一类香辛料添加比例。按 1.3.1 的卤蛋制作工艺流程进行卤制, 对最后成品进行感官评定。

第二类香辛料配比优化试验: 第二类香辛料包括白芷、草果、香叶。根据基础配方, 固定第一类香辛料、白砂糖、食盐、生抽等其他因素, 分别设置 0.47%、0.57%、0.67%、0.77% 4 个梯度水平的第二类香辛料添加比例。按 1.3.1 的卤蛋制作工艺流程进行卤制, 对最后成品进行感官评定。

白砂糖配比优化试验: 根据基础配方, 固定第一类香辛料、第二类香辛料、食盐、生抽等其他因素, 分别设置 2.00%、3.00%、4.00%、5.00% 4 个梯度水平的白砂糖添加比例。按 1.3.1 的卤蛋制作工艺流程进行卤制, 对最后成品进行感官评定。

食盐配比优化试验: 根据基础配方, 固定第一类香辛料、第二类香辛料、白砂糖、生抽等其他因素, 分别设置 0.60%、1.10%、1.60%、2.10% 4 个梯度水平的食盐添加比例。按 1.3.1 的卤蛋制作工艺流程进行卤制, 对最后成品进行感官评定。

生抽配比优化试验: 根据基础配方, 固定第一类香辛料、第二类香辛料、白砂糖、食盐等其他因素, 分别设置 4.50%、5.50%、6.50%、7.50% 4 个梯度水平的生抽添加比例。按 1.3.1 的卤蛋制作工艺流程进行卤制, 对最后成品进行感官评定。

(2)正交试验

在单因素试验的基础上, 本研究采用 Minitab 19 软件, 以第一类香辛料配比、第二类香辛料配比、白砂糖配比、食盐配比和生抽配比 5 个因素为指标, 设计了 5 因素 2 水平加 3 个中心点的正交试验, 以优化卤蛋卤料配方, 具体因素水平见表 1。

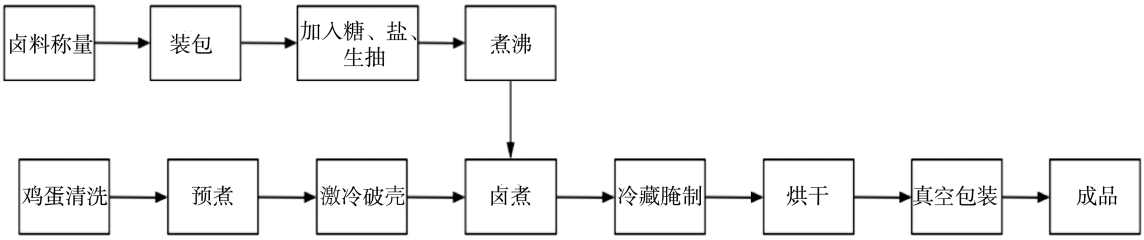


图 1 卤蛋制作工艺流程

Fig.1 Marinating process flow of marinated eggs

表 1 因素水平编码表

Table 1 Table of factor level coding

水平	因素				
	A(第一类香辛料配比)/%	*B*(第二类香辛料配比)/%	*C*(白砂糖配比)/%	*D*(食盐配比)/%	*E*(生抽配比)/%
1	1.00	0.57	3.00	1.10	4.50
2	1.50	0.67	4.00	1.60	5.50
3	2.00	0.77	5.00	2.10	6.50

1.3.3　卤蛋制备工艺优化试验

(1)卤制时间的确定

将激冷去壳后的鸡蛋放入按比例调制好的卤汁中, 分别在微沸状态下卤制 30、60、90 min。将降温后的卤蛋连同卤汁一起放入 4 ℃的冰箱冷藏腌制 12 h, 沥干后于 60 ℃热风干燥烘制 60 min, 冷却至室温后进行真空包装处理, 高温灭菌, 针对不同卤制时间, 分别开展卤蛋样品的感官评价和质构特性检测, 确定最优卤制时间。

(2)腌制时间的确定

将激冷去壳后的鸡蛋放入按比例调制好的卤汁中, 在微沸状态下卤制 60 min, 将降温后的卤蛋连同卤汁分别于 4 ℃的冰箱内冷藏腌制 0、6、12、18、24 h, 沥干后于 60 ℃烘制温度下热风干燥烘制 60 min, 冷却至室温后进行真空包装处理, 高温灭菌, 针对不同腌制时间, 分别开展卤蛋样品的感官评价和质构特性检测, 确定最优腌制时间。

(3)烘制时间的确定

将激冷去壳后的鸡蛋放入按比例调制好的卤汁中, 在微沸状态下卤制 60 min, 将降温后的卤蛋连同卤汁一起放入 4 ℃的冰箱冷藏腌制 12 h, 沥干后于 60 ℃热风干燥条件下分别烘制 30、60、90 min, 冷却至室温后进行真空包装处理, 高温灭菌, 针对不同烘制时间, 分别开展卤蛋样品的感官评价和质构特性检测, 确定最优烘制时间。

(4)烘制温度的确定

将激冷去壳后的鸡蛋放入按比例调制好的卤汁中, 在微沸状态下卤制 60 min, 将降温后的卤蛋连同卤汁一起放入 4 ℃的冰箱冷藏腌制 12 h, 沥干后分别于 40、60、80 ℃烘制温度下热风干燥烘制 60 min, 冷却至室温后进行真空包装处理, 高温灭菌, 针对不同烘制温度, 分别开展卤蛋样品的感官评价和质构特性检测, 确定最优烘制温度。

1.3.4　感官评定方法

利用排序检验法对卤蛋料液配方单因素试验的结果进行快速评定[23,27], 制定卤蛋的评分标准, 产品的感官评定标准参照表 2。感官总得分=颜色+光泽+香气+质地+滋味。感官评分[29]采用 100 分制, 由 10 位感官评定人员共同完成评估, 评分结果取平均值, 分值高低直接反映产品的综合可接受程度, 分值越高表明综合可接受性越强。

1.3.5　质构特性测定

卤蛋的质构测定参考于晨晨[30]的方法, 采用 TA.XT Plus 质构仪(P36R 型圆柱形探头)进行质构剖面分析。测试参数设置为: 前后速度 5.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 触力点: 5.0 *g*; 对 1.0 cm×1.0 cm×0.5 cm 大小的蛋白样品进行 60%的压缩, 对切半球面朝上的蛋黄样品进行 30%的压缩, 平行 4 次。

1.4　数据处理

使用单因素方差检验与独立样品 *t* 检验分析数据, 通过 SPSS 22.0 进行显著性检验(P<0.05), 组间差异显著用不同字母标记。利用软件 Minitab 19 进行正交试验设计和方差分析, 利用 Origin 2023 与 Microsoft Excel 2021 软件对试验数据进行有效处理和分析。

表 2　卤蛋感官评分标准

Table 2　Sensory scoring standards for marinated eggs

感官指标	评分标准	评分区间
颜色(10 分)	蛋白表面均匀, 呈黄褐色或棕褐色; 蛋黄呈明黄色, 且内部颜色分布极为均匀	8~10
	蛋白表面呈现深褐色; 蛋黄接近黄色, 内部颜色稍显不均	5~7
	蛋白表面颜色不均; 蛋黄颜色较深, 内部颜色杂乱不均	0~4
光泽(10 分)	蛋白质表面光滑有亮度; 蛋黄油亮	8~10
	蛋白质表面有些光滑、亮泽; 蛋黄稍油亮	5~7
	蛋白质表面暗淡无光; 蛋黄不油亮	0~4
香气(20 分)	卤香味浓郁且协调, 香气醇厚深沉, 无异味干扰	16~20
	卤香味基本协调, 无明显异味	9~15
	卤香味不协调, 香气较淡, 有明显异味或刺激味	0~8
质地(30 分)	蛋白具有良好的弹性, 入口咀嚼有力, 切面平整光滑; 蛋黄细腻软绵, 入口即化	20~30
	蛋白有一定弹性, 入口咀嚼软绵, 切面相对平整; 蛋黄颗粒感较重, 些许噎人	10~19
	蛋白无弹性, 入口咀嚼无力, 切面粗糙; 蛋黄颗粒感极强, 噎人	0~9
滋味(30 分)	咸淡适宜, 味道和谐, 卤香醇厚、持久、均匀	20~30
	咸淡适口, 整体协调性好, 卤香较持久、均匀	10~19
	偏淡或偏咸, 无独特滋味, 卤香保留时间短	0~9

2 结果与分析

2.1 卤蛋料液配方优化试验结果

2.1.1 第一类香辛料配比优化试验结果

基于排序检验与 Friedman 分析(纠偏后 F'=9.49>$\alpha_{0.05}$=7.81), 发现评价员对不同添加量的第一类香辛料喜好程度存在显著差异(P<0.05), 经多重比较确定, 在 5%显著水平下, 第一类香辛料添加量喜好程度为 1.50%>2.00%>0.50%>1.00%。综上, 1.50%的第一类香辛料为最适添加量。

2.1.2 第二类香辛料配比优化试验结果

基于排序检验与 Friedman 分析(F=27.48>$\alpha_{0.05}$=7.81), 发现评价员对不同添加量的第二类香辛料喜好程度存在显著差异(P<0.05), 经多重比较确定, 在 5%显著水平下, 第二类香辛料添加量喜好程度为 0.67%>0.77%>0.57%>0.47%。综上, 0.67%的第二类香辛料为最适添加量。

2.1.3 白砂糖配比优化试验结果

基于排序检验与 Friedman 分析(F=10.44>$\alpha_{0.05}$=7.81), 发现评价员对不同添加量的白砂糖喜好程度存在显著差异(P<0.05), 经多重比较确定, 在 5%显著水平下, 白砂糖添加量喜好程度为 4.00%>2.00%>5.00%>3.00%。综上, 4.00%的白砂糖为最适添加量。

2.1.4 食盐配比优化试验结果

基于排序检验与 Friedman 分析(F=13.44>$\alpha_{0.05}$=7.81), 发现评价员对不同添加量的食盐喜好程度存在显著差异(P<0.05), 经多重比较确定, 在 5%显著水平下, 食盐添加量喜好程度为 1.60%>1.10%>0.60%>2.10%。综上, 1.60%的食盐为最适添加量。

2.1.5 生抽配比优化试验结果

基于排序检验与 Friedman 分析(纠偏后 F'=13.94>$\alpha_{0.05}$=7.81), 发现评价员对不同添加量的生抽喜好程度存在显著差异(P<0.05), 经多重比较确定, 在 5%显著水平下, 生抽添加量喜好程度为 5.50%>4.50%>6.50%>7.50%。综上, 5.50%的生抽为最适添加量。

2.1.6 正交试验结果

在单因素试验的基础上, 对卤蛋卤料的最佳配方进行了优化试验。以第一类香辛料配比、第二类香辛料配比、白砂糖配比、食盐配比和生抽配比 5 个因素为指标, 利用软件 Minitab 19 设计 5 因素 2 水平加 3 个中心点正交试验, 对卤蛋配方进行优化, 正交试验结果见表 3。

以综合感官得分为核心指标, 卤蛋卤料的最佳配方为: $A_2B_2C_2D_2E_2$, 即第一类香辛料 1.50%, 第二类香辛料 0.67%, 白砂糖 4.00%, 食盐 1.60%, 生抽 5.50%。按此配方所制得的卤蛋产品, 外观呈现均匀棕褐色, 表面富有光泽; 风味上卤香浓郁协调, 口感弹性适中, 咸鲜味恰到好处, 整体感官品质优异, 在综合评分中得分最高。

使用软件 Minitab 19 进行方差分析, 结果见表 4。模型整体显著性水平 P<0.05, 说明模型中至少有一个项是显著的。查看模型中各个项(主效应、交互作用)的显著水平 P<0.05, 说明各项被认为是统计显著的。检查失拟(Lack-of-Fit)检验, P=0.559 (P>0.05), 统计不显著, 模型拟合良好, 没有遗漏重要项或存在系统偏差。

表 3 卤蛋卤料最佳配方正交结果

Table 3 Orthogonal results of optimal marinade for marinated eggs

实验号	A(第一类香辛料配比)/%	B(第二类香辛料配比)/%	C(白砂糖配比)/%	D(食盐配比)/%	E(生抽配比)/%	感官得分
1	2	2	2	2	2	84.43
2	3	3	3	3	3	84.29
3	3	1	1	1	1	74.43
4	2	2	2	2	2	85.00
5	1	1	3	3	1	78.57
6	3	3	1	3	1	76.57
7	2	2	2	2	2	85.29
8	1	3	1	1	3	81.57
9	3	1	3	1	3	76.43
10	1	3	3	1	1	76.14
11	1	1	1	3	3	70.00

表 4 方差分析表

Table 4 Analysis of variance table

来源	自由度	调整平方和	调整均方	F	P
1. 模型	7	260.664	37.238	235.03	0.000
线性	4	75.576	18.894	119.25	0.001
第一类香辛料	1	3.699	3.699	23.35	0.017
第二类香辛料	1	45.792	45.792	289.02	0.000
白砂糖	1	20.672	20.672	130.48	0.001
生抽	1	5.412	5.412	34.16	0.010
2. 因子交互作用	2	57.180	28.590	180.45	0.001
第二类香辛料×白砂糖	1	8.570	8.570	54.09	0.005
第二类香辛料×生抽	1	48.610	48.610	306.80	0.000
弯曲	1	127.908	127.908	807.30	0.000
误差	3	0.475	0.158		
失拟	1	0.092	0.092	0.48	0.559
纯误差	2	0.383	0.191		
合计	10	261.139			

2.2 卤蛋制备工艺优化试验结果

2.2.1 关键工艺单因素试验结果

卤蛋的感官评分在卤制时间、腌制时间、烘制时间及

烘制温度 4 个工艺参数下, 卤制时间、烘制时间与烘制温度均呈现先升后降的趋势, 腌制时间的感官评分呈现为先升后降, 并于腌制时间24 h时稍有回升, 并分别在60 min、12 h、60 min 和 60 ℃时达到峰值(图 2)。结果表明, 当加工工艺条件为: 卤制时间 60 min、腌制时间 12 h、烘制时间 60 min、烘制温度 60 ℃时, 卤蛋产品的感官评分相对较高, 此时产品既不会出现因过长或过短的卤制、腌制及烘制时间而导致卤蛋风味不足、产品口感变差, 也不会出现因烘制温度不足影响卤蛋表皮韧性和外表色泽。

2.2.2　质构特性测定结果

(1)卤制时间对产品质构特性的影响

不同卤制时间对于蛋白的硬度(*g*)影响显著(P<0.05), 对于蛋黄的质构特性, 硬度(*g*)呈现出显著性影响(P<0.05)(表 5)。卤制时间对富硒卤蛋的蛋白和蛋黄的质构特性有不同程度的影响, 蛋白的硬度、咀嚼度等质构参数受卤制时间影响较蛋黄而言更为明显, 蛋白的硬度和咀嚼度随着卤制时间的增长而缓慢升高, 蛋黄的硬度和咀嚼度缓慢降低, 卤制时间对蛋白、蛋黄硬度和咀嚼度的影响呈“反向趋势”。根据图 2 卤蛋的感官评分与表 5 蛋白的弹性和咀嚼度参数, 卤制时间为 60 min 时卤蛋的受欢迎程度最高。

(2)腌制时间对产品质构特性的影响

不同腌制时间对蛋白和蛋黄质构的影响显著。蛋白的硬度(*g*)与弹性分别在腌制时间 18 h 和 24 h 后显著高于更短时间组(P<0.05), 蛋黄的硬度(*g*)和咀嚼度(*g*)总体上随腌制时间的延长而下降。腌制时间对富硒卤蛋的蛋白和蛋黄质构特性有不同程度的影响, 蛋白的硬度、咀嚼度等质构参数受腌制时间影响较蛋黄而言更为明显, 蛋白的硬度随腌制时间的增加整体呈上升趋势, 其他参数指标较为稳定, 蛋黄的硬度、咀嚼度总体上随腌制时间的增加而缓慢下降, 其他参数指标波动较大。根据图 2 卤蛋的感官评分与表 6 蛋白的弹性和咀嚼度参数, 腌制时间为 12 h 时卤蛋的受欢迎程度最高。

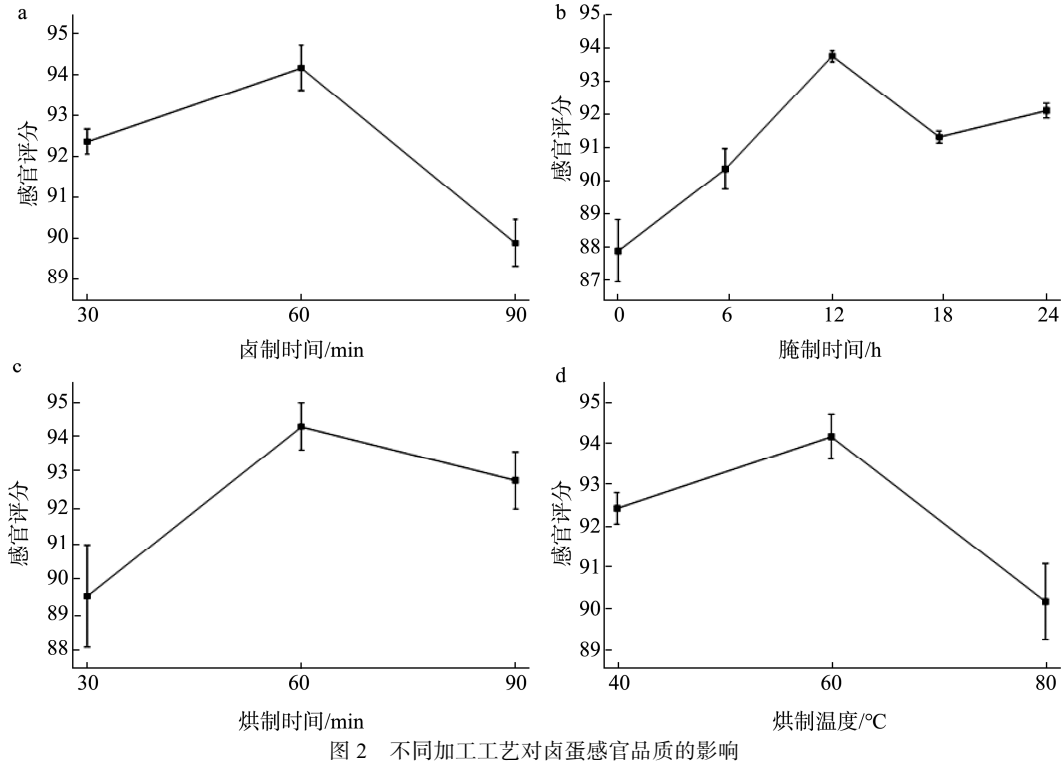


图 2　不同加工工艺对卤蛋感官品质的影响

Fig.2　Effects of different processing techniques on the sensory quality of marinated eggs

表 5　不同卤制时间的产品质构特性(n=4)

Table 5　Texture properties of samples with different braising times (n=4)

样品	时间/min	硬度/*g*	弹性	内聚性	咀嚼度/*g*	回复性
蛋白	30	1174.30±17.11^{c}	0.97±0.01^{b}	0.76±0.06^{a}	835.92±70.72^{b}	0.33±0.03^{a}
	60	1496.06±13.53^{b}	1.00±0.00^{a}	0.81±0.05^{a}	1169.31±126.95^{a}	0.32±0.04^{a}
	90	1587.93±44.52^{a}	0.98±0.02^{ab}	0.76±0.08^{a}	1188.39±173.50^{a}	0.35±0.05^{a}
蛋黄	30	338.70±5.79^{A}	0.84±0.02^{A}	0.78±0.01^{A}	225.65±11.92^{A}	0.38±0.01^{A}
	60	317.11±2.34^{B}	0.82±0.04^{AB}	0.77±0.00^{A}	196.10±8.61^{B}	0.38±0.02^{A}
	90	288.76±2.35^{C}	0.78±0.00^{C}	0.75±0.00^{B}	164.68±17.05^{C}	0.37±0.01^{A}

注: 不同小写字母表示蛋白质构参数差异显著(P<0.05); 不同大写字母表示蛋黄质构参数差异显著(P<0.05), 下表同。

表 6 不同腌制时间的样品质构特性(*n*=4)

Table 6 Texture properties of samples at different marination times (*n*=4)

样品	时间/h	硬度/*g*	弹性	内聚性	咀嚼度/*g*	回复性
蛋白	0	1408.01±57.50^{c}	0.95±0.00^{b}	0.74±0.08^{a}	1502.78±44.82^{a}	0.34±0.04^{a}
	6	1670.02±13.00^{b}	0.96±0.01^{ab}	0.74±0.08^{a}	1503.26±68.30^{a}	0.33±0.05^{a}
	12	1640.51±38.38^{b}	0.96±0.01^{ab}	0.75±0.04^{a}	1526.67±43.02^{a}	0.34±0.02^{a}
	18	2217.98±52.54^{a}	0.96±0.00^{ab}	0.74±0.07^{a}	1505.44±79.59^{a}	0.34±0.04^{a}
	24	2269.80±68.66^{a}	0.97±0.00^{a}	0.76±0.04^{a}	1527.45±71.40^{a}	0.37±0.02^{a}
蛋黄	0	446.64±4.14^{A}	0.95±0.05^{A}	0.80±0.04^{A}	333.09±34.48^{A}	0.40±0.04^{A}
	6	345.38±3.93^{B}	0.84±0.07^{B}	0.75±0.04^{A}	222.90±33.46^{B}	0.36±0.02^{A}
	12	314.23±1.22^{C}	0.91±0.06^{AB}	0.77±0.03^{A}	217.47±22.76^{BC}	0.41±0.04^{A}
	18	271.09±3.31^{E}	0.86±0.02^{AB}	0.75±0.01^{A}	176.80±6.45^{CD}	0.36±0.03^{A}
	24	280.32±3.51^{D}	0.83±0.06^{B}	0.76±0.05^{A}	171.41±15.65^{D}	0.36±0.03^{A}

(3)烘制时间对产品质构特性的影响

如表 7 所示, 不同烘制时间, 蛋白硬度、弹性、内聚性、咀嚼度、回复性各参数指标无显著差异(P>0.05); 不同烘制时间对于蛋黄的硬度具有显著性差异(P<0.05)。烘制时间对富硒卤蛋的蛋白和蛋黄质构特性有不同程度的影响, 除蛋白与蛋黄的内聚性外, 其他参数指标受烘制时间影响较小, 随着时间的增加, 蛋白内聚性后期逐渐升高, 蛋黄先升高后降低。根据图 2 卤蛋的感官评分与表 7 蛋白的硬度和弹性参数, 烘制时间为 60 min 时卤蛋的受欢迎程度最高。

(4)烘制温度对产品质构特性的影响

如表 8 所示, 不同烘制温度, 蛋白硬度随温度的升高而显著增加(P<0.05), 80 ℃的弹性显著低于 40 ℃与 60 ℃组(P<0.05), 内聚性以 60 ℃组为最低(P<0.05); 提高烘制温度, 蛋黄的硬度显著增加(P<0.05), 回复性也略有增加。烘制温度对富硒卤蛋的蛋白和蛋黄质构特性有不同程度的影响, 蛋白咀嚼度随烘制时间的变化较为显著, 回复性于烘制温度为 40 ℃与 80 ℃具有显著差异, 硬度随温度升高缓慢上升, 弹性反之; 蛋黄的硬度与回复性随温度升高而上升, 其他参数指标较稳定。根据图 2 卤蛋的感官评分与表 8 蛋白的硬度和弹性参数, 烘制温度为 60 ℃时卤蛋的受欢迎程度最高。

(5)不同加工状态的产品质构特性

不同加工状态对样品质构特性的影响, 如表 9 所示, 卤制卤蛋蛋白硬度达到(1496.06±13.53) *g*, 咀嚼度为(1169.31±126.95) *g*; 蛋黄硬度为(317.11±2.34) *g*, 咀嚼度为(196.10±8.61) *g*。不同的加工状态条件下, 蛋白的硬度、弹性、内聚性、咀嚼度具有差异显著性(P<0.05); 蛋黄的硬度、内聚性、咀嚼度三者具有差异显著性(P<0.05)。与未卤制的样品对比, 卤制工艺对富硒卤蛋的质构特性具有显著影响, 特别在硬度与咀嚼度方面, 其改善效果较为显著。

表 7 不同烘制时间的产品质构特性(*n*=4)

Table 7 Texture properties of samples at different baking times (*n*=4)

样品	时间/min	硬度/*g*	弹性	内聚性	咀嚼度/*g*	回复性
蛋白	30	1681.86±52.99^{a}	0.98±0.02^{a}	0.71±0.01^{a}	1170.96±53.39^{a}	0.30±0.01^{a}
	60	1706.43±66.83^{a}	0.99±0.01^{a}	0.73±0.05^{a}	1162.34±72.34^{a}	0.31±0.03^{a}
	90	1727.40±19.35^{a}	0.98±0.02^{a}	0.74±0.07^{a}	1254.06±122.83^{a}	0.31±0.03^{a}
蛋黄	30	355.67±5.82^{A}	0.90±0.08^{A}	0.75±0.04^{A}	242.93±35.98^{A}	0.38±0.04^{A}
	60	304.98±5.16^{B}	0.88±0.02^{A}	0.76±0.01^{A}	190.22±9.24^{B}	0.37±0.03^{A}
	90	241.50±4.42^{C}	0.84±0.03^{A}	0.70±0.02^{B}	153.29±11.15^{B}	0.36±0.02^{A}

表 8 不同烘制温度的产品质构特性(*n*=4)

Table 8 Texture properties of samples at different baking temperatures (*n*=4)

样品	温度/℃	硬度/*g*	弹性	内聚性	咀嚼度/*g*	回复性
蛋白	40	1466.90±62.22^{c}	1.00±0.00^{a}	0.81±0.08^{a}	1182.94±76.31^{b}	0.37±0.05^{a}
	60	1688.30±90.49^{b}	0.99±0.01^{a}	0.70±0.03^{b}	1215.10±33.27^{b}	0.32±0.02^{a}
	80	2037.36±52.57^{a}	0.94±0.01^{b}	0.73±0.06^{ab}	1408.72±108.54^{a}	0.35±0.06^{a}
蛋黄	40	286.14±3.46^{C}	0.81±0.07^{A}	0.75±0.00^{A}	169.08±20.46^{B}	0.35±0.02^{B}
	60	366.80±3.77^{B}	0.83±0.03^{A}	0.75±0.02^{A}	234.41±19.67^{A}	0.37±0.02^{AB}
	80	382.12±1.22^{A}	0.82±0.04^{A}	0.76±0.02^{A}	233.20±19.39^{A}	0.39±0.02^{A}

表 9　不同加工状态的样品质构特性(n=4)

Table 9　Texture properties of samples in different processing states (n=4)

样品	加工状态	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼度/g	回复性
蛋白	卤制	1496.06±13.53^{a}	1.00±0.00^{a}	0.81±0.05^{a}	1169.31±126.95^{a}	0.32±0.04^{a}
	未卤制	750.19±6.06^{b}	0.97±0.00^{b}	0.62±0.00^{b}	450.00±4.26^{b}	0.29±0.01^{a}
蛋黄	卤制	317.11±2.34^{A}	0.82±0.04^{A}	0.77±0.00^{A}	196.10±8.61^{A}	0.38±0.02^{A}
	未卤制	223.24±3.47^{B}	0.80±0.01^{A}	0.72±0.01^{B}	165.02±6.79^{B}	0.36±0.00^{A}

3　结　论

本研究以卤蛋的综合感官品质为评价依据, 系统探究了海南富硒卤蛋的卤料配比与关键加工工艺参数。试验首先通过单因素试验和正交试验设计, 优化确定了卤蛋的最佳卤料配方为: 第一类香辛料 1.50%、第二类香辛料 0.67%、白砂糖 4.00%、食盐 1.60%、生抽 5.50%; 在加工工艺优化中, 以单因素试验的感官评分结果为基础, 结合卤蛋的质构参数, 确定卤蛋的最优工艺组合为: 卤制 60 min、4 ℃环境下冷藏腌制 12 h, 60 ℃条件下烘制 60 min。本研究制得的卤蛋呈现均匀的棕褐色光泽, 具有浓郁的卤香风味。口感弹性适中、咸鲜度协调, 整体适口性良好, 该工艺所制得的富硒卤蛋, 在保留蛋品天然营养特性的同时融入传统卤制的风味特色, 实现了“营养”与“风味”的有机结合, 在满足休闲方便食品等多元市场需求的同时, 推动海南富硒蛋产业从原料输出向深加工转型, 为区域特色农业的持续发展注入新的活力。

参考文献

[1] 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 ZL, WANG JL, TONG QG. Study on key technological parameters of wew baked eggs [J]. Agricultural Products Processing, 2020(1): 21–25.

[2] 袁宇涵, 王岩, 张亮, 等. 蛋制品加工技术与副产物综合利用研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(10): 192–197.
YUAN YH, WANG Y, ZHANG L, *et al*. Research progress on processing technology of egg product and comprehensive utilization of their by-products [J]. China Condiment, 2022, 47(10): 192–197.

[3] 华霄, 王洋, 杜航, 等. 鼋汁卤蛋风味分析及贮藏过程中蛋白质构变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 133–139.
HUA X, WANG Y, DU H, *et al*. Flavor analysis of the turtle source marinated egg and the texture variation of the egg white during storage [J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 133–139.

[4] 朱建勇, 游玉明, 帅雄, 等. 不同品种茶叶对卤蛋加工品质的影响[J]. 中国调味品, 2019, 44(2): 80–82, 99.
ZHU JY, YOU YM, SHUAI X, *et al.* Effects of different tea varieties on processing quality of marinated eggs [J]. China Condiment, 2019, 44(2): 80–82, 99.

[5] 张艳珍, 朱嘉文. 特色白刺卤蛋加工工艺优化研究[J]. 青海农林科技, 2020(4): 1–4, 9.
ZHANG YZ, ZHU JW. Research on processing technology of special nitraria marinated egg [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2020(4): 1–4, 9.

[6] 刘子涵, 赵雅琪, 刘阳, 等. 海藻酸钠-鸡蛋凝胶珠的制备工艺优化与质构分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 301–308.
LIU ZH, ZHAO YQ, LIU Y, *et al*. Preparation process optimization and texture analysis of sodium alginate-egg gel beads [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 301–308.

[7] 朱敏. 溏心卤蛋加工及其微生物安全控制技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
ZHU M. Study on the processing of soft-boiled marinated eggs and itsr microbial safety control technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.

[8] 刘静波, 韩璐, 吕思雯, 等. 离子预腌制技术对贮藏期卤蛋品质的提升作用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 108–113, 124.
LIU JB, HAN L, LV SW, *et al*. Ion pre-curing enhances the quality of marinated eggs during storage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(20): 108-113, 124.

[9] 袁诺, 张清, 白洁, 等. 脉动压力技术对卤蛋腌制效率和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 164–170.
YUAN N, ZHANG Q, BAI J, *et al*. Effect of pulsed pressure on pickling efficiency and quality attributes of marinated eggs [J]. Food Science, 2020, 41(15): 164–170.

[10] 陈吉江, 王冶, 白术群, 等. 真空浸渍法优化卤蛋加工工艺的研究[J]. 农产品加工, 2017(21): 33–36.
CHEN JJ, WANG Y, BAI SQ, *et al*. Study on modified product of picking egg under vacuum circumstances [J]. Agricultural Products Processing, 2017(21): 33–36.

[11] 马磊. 不同离子及蒸煮作用对蛋清凝胶品质的影响及涂膜保鲜蛋制品方法的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
MA L. Study on effects of different ions and boiling process on albumen gel quality and coating preservation method of egg products [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.

[12] SHRESTHA S, ERDMANN JJ, RIEMANN M, *et al*. Ready-to-eat egg products formulated with Nisin and organic acids to control *Listeria monocytogenes* [J]. Journal of Food Protection, 2023, 86(5): 100081.

[13] SANGHA H, MIN WC, KYE-HWAN B, *et al*. Characterization of *Salmonella ser*. *Enteritidis*-specific bacteriophages and biocontrol strategy to reduce *S. Enteritidis* on egg products using bacteriophages and essential oil compounds [J]. Food Control, 2024, 160: 110304.

[14] 王莹. 我国再制蛋行业质量调研报告[J]. 质量与标准化, 2017(10): 49–51.
WANG Y. Quality research report on China’s reprocessed egg industry [J]. Quality and Standardization, 2017(10): 49–51.

[15] 郑东磊, 霍嘉颖, 李述刚, 等. 我国禽蛋加工研究现状、问题及趋势[J]. 中国禽业导刊, 2023, 40(12): 13–18.

ZHENG DL, HUO JY, LI SG, *et al*. Current research status, problems and trends of poultry egg processing in China [J]. Guide to Chinese Poultry, 2023, 40(12): 13–18.

[16] 饶遵全, 张卿, 顾长乐, 等. 我国禽蛋制品的发展现状综述[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(10): 4, 52.
RAO ZQ, ZHANG Q, GU CL, *et al.* Review on development status of poultry egg products in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2012, 18(10): 4, 52.

[17] 廖金凤. 海南岛生态环境中的硒[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1992, 31(3): 110–116.
LIAO JF. Selenium in the ecological environment of Hainan Island [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1992, 31(3): 110–116.

[18] NEWMAN R, WATERLAND N, MOON Y, *et al*. Selenium biofortification of agricultural crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention-a review [J]. Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands), 2019, 74(4): 449–460.

[19] 卢军霞, 王娟, 褚素乔, 等. 富硒鸡蛋的研究现状分析[J]. 今日畜牧兽医, 2021, 37(5): 78–79.
LU JX, WANG J, CHU SQ, *et al.* Analysis on research status of selenium-enriched eggs [J]. Today Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2021, 37(5): 78–79.

[20] 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022.
Chinese Nutrition Society. Chinese dietary guidelines (2022) [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2022.

[21] HAN LK, HUANG T, ZHAO ZZ, *et al.* Cardiopulmonary injury in hypoxia and selenium: A review [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2025, 92: 127767.

[22] RAYMAN MP. Selenium intake, status, and health: A complex relationship [J]. Hormones (Athens), 2020, 19(1): 9–14.

[23] 刘琪. 富硒鸡蛋蛋清的营养品质、功能特性及胃肠消化特性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
LIU Q. Study on nutritional quality, functional properties and gastrointestinal digestiven properties of selenium-enriched egg white [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

[24] 陈丽娟. 硒的营养功能及富硒鸡蛋的研究进展[J]. 山东畜牧兽医, 2024, 45(11): 88–90.
CHEN LJ. Nutritional functions of selenium and research progress on selenium-enriched eggs [J]. Shandong Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024, 45(11): 88–90.

[25] 张海茹, 李祖悦, 刘忠思, 等. 不同加工工艺卤蛋的质构与风味特征[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 315–327.
ZHANG HR, LI ZY, LIU ZS, *et al.* Texture and flavor characteristics of marinated eggs with different processing technologies [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 315–327.

[26] 张强, 黄丽燕, 刘文营, 等. 我国传统蛋制品加工方法综述[J]. 农产品加工(学刊), 2012(9): 79–81, 90.
ZHANG Q, HUANG LY, LIU WY, *et al*. Review of traditional egg product processing methods [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(9): 79–81, 90.

[27] 李晓静, 钟萍, 李萍, 等. 香烤卤蛋的工艺研究[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(5): 33–37.
LI XJ, ZHONG P, LI P, *et al*. Study the technology of roasted marinated eggs [J]. Cereal & Food Industry, 2023, 30(5): 33–37.

[28] 余秀芳. 卤蛋加工技术与品质变化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
YU XF. Study on processing technology and quality changes of marinated eggs [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.

[29] 徐树来, 王永华. 食品感官分析与实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
XU SL, WANG YH. Food sensory analysis and experiments [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

[30] 于晨晨. 特色风味卤蛋工艺及其物理特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
YU CC. Study on process and physical characteristics of featured marinated egg [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)