DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251002001
引用格式: 苗可心, 曹岱琳, 杨巨娜, 等. 无铅鹌鹑皮蛋配方优化及营养成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 119–127.
MIAO KX, CAO DL, YANG JN, *et al*. Formula optimization and nutritional composition analysis of lead-free *Coturnix* preserved eggs [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 119–127. (in Chinese with English abstract).

无铅鹌鹑皮蛋配方优化及营养成分分析

苗可心, 曹岱琳, 杨巨娜, 段一蓉, 刘佳琪, 刘美玉*

(河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056038)

摘 要: 目的 优化无铅鹌鹑皮蛋腌制配方, 并对腌制前后鹌鹑蛋的脂肪酸与氨基酸进行分析。**方法** 利用正交试验优化得到无铅鹌鹑皮蛋加工工艺, 通过检测其理化指标确定品质特征, 检测鹌鹑蛋腌制前后蛋清与蛋黄脂肪酸和氨基酸的变化。**结果** 无铅鹌鹑皮蛋最优配方为食品级 NaOH 添加量 4.50%、食盐添加量4.00%、食品级 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量 0.50%、红茶末添加量3.00%; 在此工艺条件下鹌鹑皮蛋的蛋清白度为29.90, 蛋黄白度为 26.24, 蛋清硬度达到 3.72 N, 蛋黄凝固度达到 87.41%, 感官评分达到 90.05 分, 最终综合评分为 0.94, 品质表现最佳。 鲜蛋黄与皮蛋黄的脂肪酸含量分别为 38.26 g/100 g、24.52 g/100 g, 氨基酸含量分别为 146.19 mg/g、126.02 mg/g, 鲜蛋清与皮蛋清的氨基酸含量分别为 126.67 mg/g、109.31 mg/g。**结论** 以此方法腌制的皮蛋蛋清呈棕褐色透明的凝胶体, 蛋黄呈墨绿色、中间有饴糖状溏心, 鲜香咸辣、清爽可口。不仅可提高鹌鹑蛋的附加值, 降低鲜蛋损耗, 同时对工厂式生产无铅鹌鹑皮蛋提供可参考的理论依据。

关键词: 鹌鹑蛋; 皮蛋; 单因素; 氨基酸; 脂肪酸

Formula optimization and nutritional composition analysis of lead-free *Coturnix* preserved eggs

MIAO Ke-Xin, CAO Dai-Lin, YANG Ju-Na, DUAN Yi-Rong, LIU Jia-Qi, LIU Mei-Yu*

(*School of Life Sciences and Food Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the curing formula of lead-free *Coturnix* preserved eggs, and analyze the fatty acid and amino acid of *Coturnix* eggs before and after curing. **Methods** The processing technology of lead-free *Coturnix* preserved eggs was optimized through orthogonal experimental. The quality characteristics were determined by detecting their physical and chemical indicators, and the changes of fatty acids and amino acids in the egg white and yolk of *Coturnix* eggs before and after pickling were detected. **Results** The optimal formula of lead-free *Coturnix* preserved eggs was 4.50% of food-grade NaOH, 4.00% of salt, 0.50% of food-grade $CuSO_4$&$ZnSO_4$ and 3.00% of black tea. Under these process conditions, the *Coturnix* preserved eggs exhibited an albumen whiteness of 29.90, a yolk whiteness of 26.24, an albumen hardness of 3.72 N, a yolk solidification degree of 87.41%, a sensory score of 90.05

收稿日期: 2025-10-02
基金项目: 河北省现代农业产业技术体系建设专项(HBCT2024260208); 中央引导地方科技发展资金项目(246Z7103G)
第一作者: 苗可心(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为蛋品科学。E-mail: miaokexin0106@163.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: lmy717@163.com

points, and a final composite score of 0.94, representing the optimal quality performance. The fatty acid content of fresh egg yolk and preserved egg yolk were 38.26 g/100 g and 24.52 g/100 g, respectively, and the amino acid content were 146.19 mg/g and 126.02 mg/g, respectively. The amino acid content of fresh egg white and preserved egg white were 126.67 mg/g and 109.31 mg/g, respectively. **Conclusion** The resulting eggs featured a brownish-transparent albumen gel, a dark green yolk with a syrup-like core and a savory, refreshing flavor. It can increase the added value of *Coturnix* eggs, reduce fresh egg loss and also provide a theoretical basis for factory-style production of this lead-free *Coturnix* preserved egg.

KEY WORDS: *Coturnix* eggs; preserved eggs; single factor; amino acids; fatty acids

0 引 言

鹌鹑蛋作为一种高营养价值的蛋类食品，因其蛋白质含量丰富、脂肪低且富含多种微量元素，受到消费者的广泛关注[1]。然而，鹌鹑蛋蛋壳薄、气孔大，易受微生物污染，导致货架期短、破损率高，影响了其商品价值。皮蛋加工历史悠久，被称为我国食品宝库中的明珠，其风味独特、食用方便，且经加工后更易消化，具有清热降火等功效[2]。研制无铅鹌鹑皮蛋不仅可解决鹌鹑蛋货架期短、破损率高的问题，而且丰富了鹌鹑蛋深加工产品的类型[3]。

无铅鹌鹑皮蛋的配方优化研究与腌制前后鹌鹑皮蛋营养成分变化的研究较少。孙悦等[4]在无铅鹌鹑皮蛋的配方研究仅选择纯碱、食盐作为腌制料，进行感官对比试验，试验设计单一，未对该配方腌制的皮蛋进行品质分析；杨勇胜等[5]在无铅鹌鹑皮蛋的研制中仅通过感官评价对NaOH 浓度、食盐用量、茶叶用量、金属盐种类进行了选择，未对无铅鹌鹑皮蛋的脂肪酸与氨基酸等营养变化进行研究。现阶段鹌鹑皮蛋的无铅研究主要集中于单一使用硫酸铜或硫酸锌，但阎华等[6]发现在溏心皮蛋中硫酸铜与硫酸锌复配使用时，所得皮蛋品质优于单一使用其中任一种金属盐。关于采用硫酸铜与硫酸锌复配替代氧化铅的腌制方法，在鹌鹑皮蛋的相关研究中较少，缺乏系统量化的工艺参数。因此，进一步开展对无铅鹌鹑皮蛋的相关工艺优化及品质研究是尤为重要的。鉴于此，本研究通过正交试验筛选出无铅鹌鹑皮蛋的最佳配方，并对腌制前后皮蛋的脂肪酸与氨基酸进行测定，为无铅鹌鹑皮蛋产品的开发提供可参考的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鹌鹑蛋(河北省中禽鹌鹑良种繁育有限公司)；红茶末(漳州神田贸易有限公司)。

NaOH(食品级，安琪酵母股份有限公司)；硫酸铜、硫酸锌(食品级，河南飞仕生物科技有限公司)；食盐(食品级，雪天盐业集团股份有限公司)；NaOH、氯化钠(分析纯，天津致远化学试剂有限公司)；乙腈(色谱纯，德国 Merck 公司)；α-氨基丁酸、十一碳酸(纯度 > 98%，美国 Sigma-Aldrich 公司)；17 种氨基酸标准品混标(浓度 2.5 mmol/mL，美国 Sigma-Aldrich 公司)；14%三氟化硼甲醇、苯酚、2,4-二硝基氯苯、冰乙酸、乙酸钠、三乙胺(分析纯，上海麦克林试剂有限公司)；乙腈、盐酸、甲醇、正庚烷、无水硫酸钠(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)；碳酸钠[分析纯，研深(天津)科技有限公司]。

1.2 仪器与设备

UltraScan XE 型色度仪(美国 Hunter Lab 公司)；CT3 型质构仪(美国 Brookfield 公司)；GL-21M 高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)；Agilent 7820a 气相色谱仪、安捷伦 HP-88 色谱柱(100 m×0.25 mm，0.2 μm)(美国安捷伦公司)；LC-2010C 液相色谱仪(日本岛津公司)；CAPCELL PAK C_{18} MGII 色谱柱(250 mm×4.6 mm，5 μm，美国赛默飞世尔科技公司)；C21-218T 电磁炉(合肥荣事达小家电有限公司)；XMTD-7000 电热恒温水浴锅(北京市永光光明医疗仪器有限公司)；DHG-9015A 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)；食品级密封袋(16 cm×26 cm×8 cm，福州旺客包装材料有限公司)；PX224ZH 型电子精密天平[精度 0.0001 g，奥豪斯仪器(常州)有限公司]。

1.3 方 法

1.3.1 皮蛋加工工艺

水中加入称量好的红茶末，煮沸 5 min 并冷却至室温，依次倒入称量好的食品级 NaOH、硫酸铜与硫酸锌，混合均匀并冷却至室温，倒入装有新鲜鹌鹑蛋(经检验、清洗、称重)的密封袋中，在料液中腌制 14 d，工艺流程见图 1。

1.3.2 单因素试验设计

通过预实验已初步确定腌制液水重与鲜蛋重比例为 1.5:1，$CuSO_4$ 与 $ZnSO_4$ 复配比 1:2 (V:V)。设计食品级 NaOH 添加量为 4.00%、4.50%、5.00%、5.50%、6.00%；$CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量为 0.30%、0.40%、0.50%、0.60%、0.70%；食盐添加量为 4.00%、4.50%、5.00%、5.50%、6.00%；红茶末添加量为 1.00%、2.00%、3.00%、4.00%、5.00%，探究不同因素水平下对蛋清白度、蛋黄白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度和感官评分的影响。

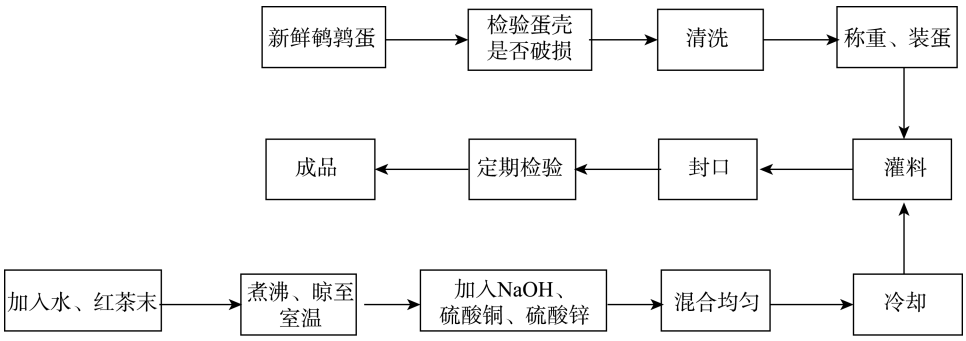


图 1　工艺流程图

Fig.1　Diagram of process flow

1.3.3　正交试验设计

在单因素试验的基础上, 按 4 因素 3 水平正交表进行正交试验, 因素水平表如下表 1。

1.3.4　蛋清蛋黄白度的测定

参考徐雯[7]研究方法并稍加修改, 将蛋清、蛋黄分开出来, 用色差仪测定样品色差, 平行测定 3 次, 记录 L、a、b 进行白度值计算。白度值(W)按下列公式(1)计算所得。

$$W=100-[(100-L)^2+a^2+b^2]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

1.3.5　蛋清硬度的测定

参考邹金玲等[8]研究方法并稍加修改, 将无铅鹌鹑皮蛋蛋清, 用质构仪测定样品硬度。测定条件: 形变量: 60%, 测定速度: 120 mm/s, 测前触发力为 0.5 N, 最大力量程 500 N, 平行测定 3 次。

1.3.6　蛋黄凝固度的测定

参考 WANG 等[9]研究方法并稍加修改, 采用重量法进行蛋黄凝固度测定, 测定蛋黄总重量(G_1), g; 取出溏心部分后测定已凝固蛋黄重量(G_2), g, 平行测定 3 次, 蛋黄凝固度按照公式(2)计算。

$$\text{蛋黄凝固度}=\frac{G_2}{G_1} \tag{2}$$

1.3.7　皮蛋感官评分

参照 GB/T 9694—2014《皮蛋》标准, 制定无铅鹌鹑皮蛋感官评分表, 采用评分检验法: 对产品进行随机编号, 选 10 名经过培训的食品专业学生作为评价人员, 分别从皮蛋的外观、离壳性和凝胶状态等 5 方面进行评定打分(满分 100 分), 具体评分标准见表 2。

1.3.8　皮蛋综合评分方法

蛋清白度、蛋黄白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度 4 个指标, 客观分析皮蛋的品质差异, 感官评价易受主观因素影响; 即设定蛋清白度、蛋黄白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度和感官评分为综合评价指标, 通过熵权法得出各判定指标的权重分别为 0.18、0.10、0.21、0.29、0.22。

参考徐雯[7]研究方法, 将各项指标的数据换算成[0,1]区间内的分数值, 计算见公式(3):

$$r_i=\frac{C_i-C_{\min}}{C_{\max}-C_{\min}} \tag{3}$$

式中: r_i 为模糊后数值, C_i 为指标测定值, $C_{\min}$ 为指标测定最小值, $C_{\max}$ 为指标测定最大值。

参考徐雯[7]研究方法, 计算指标的综合评分见公式(4):

$$Z=r_{\text{蛋清白度}}\times0.18+r_{\text{蛋黄白度}}\times0.10+r_{\text{蛋清硬度}}\times0.21+r_{\text{蛋黄凝固度}}\times0.29+r_{\text{感官}}\times0.22 \tag{4}$$

1.3.9　气相色谱法测定脂肪酸

(1)样品前处理

参照刘佳琪等[10]的方法并稍加修改, 称取 0.2 g 样品(精确至 0.001 g)于玻璃管中, 依次加入内标物(十一甘油三酯)与 5 mL 2% NaOH 甲醇溶液, 连接回流冷凝装置, 于 80 ℃水浴中回流 60 min, 至油滴完全消失。自冷凝器上端加入 5 mL 14%三氟化硼甲醇溶液, 继续回流反应 3 min。以少量水冲洗冷凝器, 停止加热, 取下刻度管, 冷却至室温。加入 10 mL 正庚烷, 振摇 2 min, 再加入 10 mL 饱和氯化钠溶液, 静置分层。吸取 5 mL 上层正庚烷提取液至离心管中, 加入 3 g 无水硫酸钠, 振摇 2 min, 静置 5 min 后用 0.22 μm 有机滤膜过滤至进样瓶中, 通过气相色谱系统进行定量分析, 平行测定 3 次。

表 1　$L_9(3^4)$正交试验设计

Table 1　$L_9(3^4)$ orthogonal experimental design

水平	因素			
	A (NaOH 添加量)/%	*B*(食盐添加量)/%	*C* ($CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量)/%	*D*(红茶末添加量)/%
1	4.00	4.00	0.30	1.00
2	4.50	4.50	0.40	2.00
3	5.00	5.00	0.50	3.00

表 2 感官评分表
Table 2 Table of sensory rating

评价指标	评价标准	评分
皮蛋外观 (10 分)	蛋壳清洁且完整; 无斑点	10
	蛋壳清洁且完整; 少量斑点	6~9
	蛋壳清洁且完整; 斑点较多	3~5
	蛋壳清洁不完整; 斑点较多	0~2
离壳性 (10 分)	皮蛋离壳性好, 蛋体完整, 有明显震颤感, 不粘壳或不粘手	7~10
	皮蛋离壳性较好, 允许部分蛋体不完整, 略有震颤感, 允许微粘壳或微粘手	4~6
	皮蛋离壳性差, 蛋体缺失大, 大面积粘壳, 粘手严重	0~3
蛋清凝胶与颜色 (30 分)	蛋清凝胶完整, 有弹性、手感适中; 颜色亮黄透明, 有光泽, 颜色均一	26~30
	蛋清凝胶小部分不完整, 弹性较差, 手感偏硬或者偏软; 颜色暗黄透明, 有光泽, 颜色均一	21~25
	蛋清凝胶小部分不完整, 弹性差, 松软无性; 颜色暗黄半透明, 光泽度较差, 颜色较为均一	11~20
	蛋清凝胶不完整, 融头现象严重或者化汤; 颜色暗黄/暗红/黑色不透明, 无光泽度, 或颜色明显分布不均	0~10
蛋黄凝固与颜色 (30 分)	蛋黄不黏手, 溏心直径 1 cm 左右, 溏心颜色亮黄色/青绿色, 有光泽, 颜色均一	26~30
	蛋黄不黏手, 溏心直径 1~0.5 cm, 亮黄色/青绿色, 有光泽, 颜色均一	21~25
	蛋黄黏手, 或者溏心直径小于 0.5 cm, 颜色暗黄色, 光泽度较差, 颜色较为均一	11~20
	蛋黄严重黏手, 或者无溏心(实心), 无黄色, 无光泽	0~10
皮蛋风味 (20 分)	具有皮蛋应有的气味与滋味, 无异味, 不苦、不涩、不辣	13~20
	具有皮蛋应有的气味与滋味, 无异味, 略带碱味	7~12
	具有皮蛋的气味和滋味, 无异味, 碱味较重, 影响风味	1~6
	缺少皮蛋应有的风味, 主要是碱味和腐败的臭味	0

(2)气相色谱测定条件

参照王文昌等[11]的方法并稍加修改, 进样口温度 270 ℃, 分流比 30:1; 色谱柱为安捷伦 HP-88 色谱柱(100 m×0.25 mm, 0.2 μm), 流量 1 mL/min; 程序升温: 100 ℃保持 1 min, 以 15 ℃/min 升温至 190 ℃, 保持 4 min, 以 1 ℃/min 升温至 200 ℃, 保持 15 min, 以 1 ℃/min 升温至 205 ℃, 保持 4 min, 以 5 ℃/min 升温至 240 ℃, 保持 9 min, 共运行 52 min; 检测器温度 280 ℃, 空气流量 400 mL/min, 氢气燃气流量 40 mL/min, 尾吹气流量 25 mL/min。

1.3.10 液相色谱法测定氨基酸

(1)样品的酸解、转移、复溶、衍生和中和

参照杨清山等[12]的方法并稍加修改, 配制标准溶液, 移取 1 mL 17 种氨基酸混标定容至 5 mL, 即 0.2 mmol/L。准确称取 25 mg *α*-氨基丁酸, 用水定容至 50 mL, 配制得 0.5 mg/mL 内标溶液。将样品混合均匀后, 称取 0.5 g 置于专用水解管中, 加入 10 mL 含 0.1%苯酚的 6 mol/L 盐酸溶液, 通入高纯氮气后密封, 于 110 ℃电热鼓风干燥箱中水解 24 h。取出冷却至室温, 将水解液转移至 25 mL 容量瓶, 加入 2 mL 2 mg/mL 内标溶液, 以 0.1 mol/L 盐酸定容, 混匀后静置 10 min。取 2 mL 上清液于 150 mL 旋蒸瓶中, 在 70 ℃电热恒温水浴中真空蒸干。加入 2 mL 0.1 mol/L 盐酸溶液回溶, 超声助溶。取 200 μL 水解液置于具塞玻璃管中, 依次加入 1 mL pH 9 碳酸钠缓冲盐溶液和 200 μL 3% 2,4-二硝基氯苯乙腈溶液, 密封后于 95 ℃水浴中避光反应 150 min。反应结束后取出冷却至室温, 加入 200 μL 10%冰乙酸, 超声去除气泡, 取上清液经有机膜过滤, 备用于液相色谱分析, 平行测定 3 次。

(2)液相色谱测定条件

色谱柱为 CAPCELL PAK C_{18} MGII 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm); 柱温 40 ℃; 检测波长 360 nm; 进样量 10 μL; 流速 1 mL/min; 运行时间 40 min; 流动相 A 乙腈; 流动相 B 乙酸-乙酸钠缓冲液(2.5 g 乙酸钠、1.5 mL 三乙胺和 1.2 mL 冰乙酸溶于 1 L 纯净水中)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 进行数据处理, Duncan 多重检验进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 食品级 NaOH 添加量对皮蛋品质的影响

不同食品级 NaOH 的添加量对鹌鹑皮蛋的白度、硬度、凝固度及感官评分的影响如表 3 所示。随着 NaOH 添加量

表 3　不同 NaOH 添加量对无铅鹌鹑皮蛋指标的影响

Table 3　Effects of different NaOH addition on the indicators of lead-free *Coturnix* preserved eggs

添加量/%	蛋清白度	蛋黄白度	蛋清硬度/N	蛋黄凝固度/%	感官评分	综合评分
4.00	19.42±0.81^{ab}	20.46±0.83^{b}	2.40±0.02^{c}	69.95±3.68^{a}	78.43±1.07^{c}	0.36
4.50	20.72±0.55^{a}	22.64±0.44^{a}	3.78±0.05^{a}	74.84±1.40^{a}	87.87±2.57^{a}	1.00
5.00	19.06±1.53^{b}	20.80±1.14^{b}	2.58±0.03^{b}	74.45±6.02^{ab}	83.90±0.60^{b}	0.64
5.50	18.41±0.66^{bc}	20.09±0.37^{b}	2.14±0.03^{d}	68.22±1.95^{ab}	76.43±1.07^{c}	0.17
6.00	17.25±0.18^{c}	19.71±0.37^{b}	2.04±0.03^{e}	69.52±1.16^{b}	69.70±0.85^{d}	0.06

注：同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表 4~7 同。

的增加，皮蛋的各项指标呈先上升后下降的趋势，当 NaOH 添加量为 4.50%时，皮蛋的各项指标均达到峰值。NaOH 添加量为 4.00%时，蛋清硬度小，凝胶偏软，蛋黄凝固度低，影响皮蛋的色泽与感官评分；NaOH 添加量 4.50%时，蛋清硬度与蛋黄凝固度均达到最大值，分别为 3.78 N 与 74.84%，蛋清凝胶完整，感官评分最高，皮蛋成型完好，软硬适中，颜色均匀。当添加量由 5.00%至 6.00%时，皮蛋的各项指标均下降，这主要是高浓度碱加速了凝胶形成速率，使皮蛋提前成熟，发生“碱伤”，表现为蛋清大面积粘壳且手感黏腻，导致感官评分显著下降并引起成品率降低[13]。基于上述结果，后续正交试验将选择 4.00%、4.50%和 5.00% 3 个水平。

2.2　食盐添加量对皮蛋品质的影响

不同食盐添加量对鹌鹑皮蛋的白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度及感官评分的影响如表 4 所示。在皮蛋腌制过程中，添加适量食盐不仅可调节碱液渗透速率，还具有抑菌作用[14]，有助于延长保质期。随着食盐添加量的增加，皮蛋的各项指标呈先上升后下降的趋势，当食盐添加量为 4.50%时，皮蛋的各项指标均达到峰值。食盐添加量为 4.00%时，蛋清硬度小，蛋清凝胶不完整，质地偏软，蛋黄凝固度较低，溏心较大，且外层凝固部分质地较软；当食盐添加量为 4.50%时，蛋清硬度与蛋黄凝固度均达到最大值，分别为 3.57 N 与 75.65%，感官评分最高，蛋清凝胶完整，蛋清与蛋黄质地软硬适中；当添加量由 5.00%至 6.00%时，皮蛋的各项指标均下降，这主要是由于较高的盐浓度导致渗透压上升，碱液渗透速率加快，促使皮蛋提早成熟，出现不同程度的碱伤[15]，表现为颜色变深，凝胶状态被破坏，感官评分显著降低。基于上述结果，后续正交试验将选择 4.00%、4.50%和 5.00% 3 个水平。

2.3　$CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量对皮蛋品质的影响

不同 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量对鹌鹑皮蛋的白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度及感官评分的影响如表 5 所示。在碱性腌制环境中，Cu^{2+}与 Zn^{2+}可模拟铅的作用机制，与硫结合生成不溶性硫化物沉淀，堵塞蛋壳与壳膜孔隙，从而调控后期碱液渗透速率，防止碱化[16–17]。随着 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量的增加，皮蛋的各项指标呈先上升后下降的趋势，当 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量为 0.40%时，除蛋黄色度外其他指标均达到峰值。当 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量为 0.30%时，蛋清凝胶强度不足，蛋黄凝固度差且溏心大，受美拉德反应不充分的影响，蛋清与蛋黄颜色较浅，且风味寡淡；当 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量为 0.40%时，蛋清硬度与蛋黄凝固度均达到最大值，分别为 3.55 N 与 75.70%，此时蛋清凝胶形态完整，色泽均匀，皮蛋已完全成熟，综合评分最高；当 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量由 0.50%至 0.70%时，皮蛋的各项指标均下降，这主要是金属离子含量高时，硫化物沉积速率会加快，导致皮蛋提前成熟，长时间浸泡在碱液中导致腐蚀速率高于堵塞速率，从而出现皮蛋凝胶持水性下降，硬度与凝固度均变差。与上述指标不同，蛋黄白度随 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量的增加而持续上升，是因为蛋黄的着色与硫化物和金属离子的反应有关，碱性环境下，含硫氨基酸分解产生 S^{2-}离子，与铜锌离子反应生成深色的金属硫化物，从而丰富了蛋黄色泽。基于上述结果，后续正交试验将选择 0.30%、0.40%和 0.50% 3 个水平。

2.4　红茶末添加量对皮蛋品质的影响

不同红茶末添加量对鹌鹑皮蛋的白度、蛋清硬度、蛋黄凝固度及感官评分的影响如表 6 所示。红茶中色素可通过物理扩散进入皮蛋蛋清与蛋黄中，使其颜色发生改变[18]，茶叶中的茶多酚可以辅助皮蛋凝胶形成。从表 6 看出，随红茶末添加量的增加，皮蛋的各项指标均呈先上升后下降的趋势，当红茶末添加量为 3.00%时，皮蛋的各项指标均达到峰值。当添加量分别为 1.00%和 2.00%时，蛋清硬度与蛋黄凝固度相对偏低，蛋清与蛋黄的白度均偏低，此时皮蛋仍处于凝胶形成期，颜色较浅，凝胶强度不足；当添加量分别为 4.00%和 5.00%时，蛋清硬度与蛋黄的凝固度均下降，皮蛋出现凝胶结构不完整的现象，色差仪测定的 a、b 值增大导致白度值降低，这可能是由于红茶添加量增加导致茶叶中的天然色素大量进入蛋内，导致颜色变深，同时可能由于茶多酚的原因，导致皮蛋提前成熟，凝胶持水性下降，使硬度和凝固度降低。基于上述结果，后续正交试验将选择 1.00%、2.00%和 3.00% 3 个水平。

表 4 不同食盐添加量对无铅鹌鹑皮蛋指标的影响

Table 4 Effects of differen salt addition on the indicators of lead-free *Coturnix* preserved eggs

添加量/%	蛋清白度	蛋黄白度	蛋清硬度/N	蛋黄凝固度/%	感官评分	综合评分
4.00	19.29±0.76^{b}	20.31±1.33^{bc}	2.76±0.16^{c}	70.17±2.08^{b}	78.27±1.06^{c}	0.39
4.50	20.69±0.86^{a}	23.25±0.53^{a}	3.57±0.06^{a}	75.65±1.33^{a}	87.70±1.20^{a}	1.00
5.00	20.04±0.48^{ab}	21.28±0.79^{b}	3.06±0.05^{b}	70.39±1.79^{b}	82.82±1.12^{b}	0.61
5.50	18.57±0.57^{bc}	20.08±0.74^{bc}	2.17±0.04^{d}	68.11±2.17^{b}	76.97±1.06^{d}	0.20
6.00	17.83±0.66^{c}	19.44±1.34^{c}	2.05±0.04^{d}	67.24±2.01^{b}	71.16±1.10^{e}	0.00

表 5 不同 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量对无铅鹌鹑皮蛋指标的影响

Table 5 Effects of differen $CuSO_4$&$ZnSO_4$ compound addition on the indicators of lead-free *Coturnix* preserved eggs

添加量/%	蛋清白度	蛋黄白度	蛋清硬度/N	蛋黄凝固度/%	感官评分	综合评分
0.30	18.96±0.49^{b}	20.87±0.58^{bc}	2.45±0.04^{d}	68.65±2.05^{b}	78.76±1.39^{b}	0.22
0.40	21.16±0.43^{a}	19.32±1.00^{c}	3.55±0.04^{a}	75.70±2.05^{a}	85.26±1.48^{a}	0.90
0.50	20.29±0.47^{ab}	19.90±0.31^{c}	2.84±0.04^{b}	71.83±2.67^{ab}	79.13±1.60^{b}	0.49
0.60	20.08±1.59^{ab}	21.69±0.98^{b}	2.75±0.04^{c}	71.58±2.74^{ab}	75.01±1.48^{c}	0.41
0.70	18.94±0.71^{b}	25.29±0.80^{a}	2.25±0.03^{e}	67.10±1.54^{b}	72.28±1.38^{d}	0.10

表 6 不同红茶末添加量对无铅鹌鹑皮蛋指标的影响

Table 6 Effects of differen black tea powder addition on the indicators of lead-free *Coturnix* preserved eggs

添加量/%	蛋清白度	蛋黄白度	蛋清硬度/N	蛋黄凝固度/%	感官评分	综合评分
1.00	19.04±0.35^{b}	21.79±1.25^{ab}	2.35±0.04^{c}	72.33±1.59^{bc}	80.15±1.00^{c}	0.33
2.00	21.82±0.58^{a}	20.16±1.78^{ab}	2.53±0.02^{b}	74.63±0.97^{b}	82.99±1.77^{b}	0.50
3.00	23.03±2.01^{a}	23.75±0.76^{a}	2.93±0.02^{a}	78.80±2.01^{a}	85.34±1.45^{a}	1.00
4.00	21.71±0.29^{a}	20.00±2.50^{ab}	2.08±0.01^{d}	70.37±1.46^{c}	80.78±1.06^{c}	0.26
5.00	18.87±0.63^{b}	19.29±3.81^{b}	2.12±0.02^{d}	70.74±2.92^{c}	77.52±2.00^{d}	0.01

2.5 正交实验结果分析

无铅鹌鹑皮蛋的配方正交优化试验结果表 7 所示。对 *A*(食品级 NaOH 添加量)、*B*(食盐添加量)、*C*(食品级 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量)、*D*(红茶末添加量)4 个因素的主次关系依次为: *A*(食品级 NaOH 添加量)>*C*(食品级 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量)>*B*(食盐添加量)>*D*(红茶末添加量), 无铅鹌鹑皮蛋的配方最佳组合为 $A_2B_1C_3D_3$, 是 9 个实验组的第 4 组, 即食品级 NaOH 添加量为 4.50%、食盐添加量为 4.00%、食品级 $CuSO_4$&$ZnSO_4$ 添加量为 0.50%、红茶末添加量为 3.00%。

2.6 腌制前后脂肪酸含量变化

脂肪酸不仅为生命活动提供能量, 也是脂溶性维生素、卵磷脂以及胆固醇等活性成分的溶解载体[19]。对鲜蛋黄与最优配方腌制的皮蛋黄进行脂肪酸测定, 测定结果得鲜蛋黄和皮蛋黄检测出 16 种脂肪酸, 其中饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)分别有 5 种、5 种、6 种。腌制后 3 类脂肪酸的含量均变少, 是因为碱性条件下, 蛋黄中的蛋白质和脂质逐渐降解为小分子风味物质和游离氨基酸, 丰富了皮蛋的风味[20]。棕榈酸与硬脂酸是蛋黄中主要的饱和脂肪酸, 其腌制前后含量变化较大, 腌制前后蛋黄中棕榈酸含量分别为 9.92 g/100 g、6.15 g/100 g, 腌制前后蛋黄中硬脂酸的含量分别 4.25 g/100 g、2.64 g/100 g。饱和脂肪酸本身氧化稳定性较高, 但碱性条件下易发生皂化反应[21], 使其转化为脂肪酸盐, 该盐类具有一定乳化性, 可能影响蛋黄脂质的分布状态, 影响蛋黄质地和口感[22]。不饱和脂肪酸作为重要的风味前体物质[23], 易于氧化降解。油酸为蛋黄中主要的单不饱和脂肪酸, 腌制后含量降低, 达 10.54 g/100 g, 碱性条件下氧化降解可生成壬醛和辛醛等醛类化合物[24], 增加皮蛋的香气。亚油酸作为蛋黄中主要的多不饱和脂肪酸, 其具有调节血脂代谢等作用, 经腌制后亚油酸含量为 3.27 g/100 g, 在碱性环境下可能会发生共轭化反应, 生成具有多种生理活性的共轭亚油酸[25]。同时, 碱性环境下使蛋壳孔径增大, 腌制液中的 Cu^{+}和 Zn^{+}加速不饱和脂肪酸分解, 生成醛类、酮类等小分子挥发性物质, 进而影响皮蛋的风味组成, 见表 8。

表 7　正交试验测定结果

Table 7　Results of orthogonal experiment measurement

实验组	*A*: NaOH	*B*: 食盐	*C*: Cu&Zn	*D*: 红茶末	蛋清白度	蛋黄白度	蛋清硬度/N	蛋黄凝固度/%	感官评分	综合评分
1	1	1	1	1	18.43±0.09^{e}	17.38±1.01^{c}	2.05±0.03^{g}	48.22±1.49^{g}	72.54±1.36^{h}	0.01
2	1	2	3	2	19.64±0.54^{de}	19.09±2.16^{c}	2.19±0.01^{f}	56.14±1.23^{f}	76.05±1.14^{g}	0.17
3	1	3	2	3	22.29±1.89^{cd}	21.96±3.81^{bc}	2.44±0.03^{e}	60.73±1.32^{e}	96.39±1.52^{a}	0.49
4	2	1	3	3	29.90±0.60^{a}	26.24±1.10^{a}	3.72±0.03^{a}	87.41±0.85^{a}	90.05±0.99^{b}	0.94
5	2	2	2	1	26.40±1.23^{b}	23.07±1.99^{ab}	2.83±0.02^{c}	70.32±1.08^{c}	88.55±1.72^{c}	0.61
6	2	1	3	2	27.68±0.89^{b}	24.68±0.85^{ab}	3.21±0.02^{b}	80.71±0.98^{b}	80.04±0.98^{e}	0.69
7	3	1	2	2	20.97±0.77^{d}	20.97±1.20^{bc}	2.22±0.02^{f}	58.38±0.33^{ef}	80.74±1.24^{de}	0.27
8	3	2	1	3	23.67±0.03^{c}	22.67±0.03^{b}	2.63±0.03^{d}	65.42±2.78^{d}	81.54±1.28^{d}	0.44
9	3	3	3	1	18.04±0.15^{e}	19.64±3.37^{bc}	2.02±0.02^{g}	46.25±0.97^{g}	78.81±1.14^{f}	0.10
*k*1	0.67	1.91	0.45	0.71						
*k*2	2.24	1.21	1.37	1.13						
*k*3	0.81	0.59	1.89	1.87						
*K*1	0.22	0.64	0.15	0.24						
*K*2	0.75	0.41	0.46	0.38						
*K*3	0.27	0.20	0.63	0.62						
R	0.52	0.44	0.48	0.39						

表 8　鲜蛋黄与皮蛋黄脂肪酸含量(g/100 g)

Table 8　Fatty acid content of fresh egg yolk and preserved egg yolk (g/100 g)

脂肪酸	脂肪酸简称	鲜蛋黄	皮蛋黄
饱和脂肪酸	SFA	14.42	8.91
豆蔻酸	C14:0	0.17±0.00^{a}	0.08±0.00^{b}
十五碳酸	C15:0	0.01±0.00^{a}	0.01±0.00^{a}
棕榈酸	C16:0	9.92±0.22^{a}	6.15±0.22^{b}
十七碳酸	C17:0	0.07±0.00^{a}	0.03±0.00^{b}
硬脂酸	C18:0	4.25±0.15^{a}	2.64±0.01^{b}
单不饱和脂肪酸	MUFA	18.11	11.86
十四烯酸	C14:1	0.10±0.13^{a}	0.01±0.00^{a}
棕榈油酸	C16:1	1.18±0.07^{a}	0.69±0.04^{b}
二十烯酸	C20:1	0.05±0.00^{a}	0.02±0.00^{b}
油酸	C18:1n9c	15.90±0.54^{a}	10.54±0.21^{b}
芥酸	C22:1n9	0.88±0.03^{a}	0.60±0.01^{b}
多不饱和脂肪酸	PUFA	5.73	3.75
DHA	C22:6n3	0.37±0.01^{a}	0.29±0.00^{b}
γ-亚麻酸	C18:3n6	0.10±0.00^{a}	0.04±0.00^{b}
a-亚麻酸	C18:3n3	0.13±0.00^{a}	0.10±0.01^{b}
亚油酸	C18:2n6c	5.06±0.12^{a}	3.27±0.11^{b}
顺-11,14-二十碳二烯酸	C20:2n6	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{b}
顺-8,11,14-二十碳三烯酸	C20:3n6	0.05±0.00^{a}	0.03±0.00^{b}
总量		38.26	24.52

注：同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。表 9 同。

2.7　腌制前后氨基酸含量的变化

对鲜蛋与最优配方腌制的皮蛋进行氨基酸测定，测定结果如表 9。氨基酸在皮蛋风味形成中扮演着关键角色，不仅因为其本身具有特殊滋味，在呈味上相互协同与平衡，还可作为前体物质通过脱羧、脱氨、转氨及美拉德反应等途径生成多种挥发性风味化合物[26–27]。由表 9 可知，鹌鹑鲜蛋和皮蛋均检测出 16 种氨基酸，其中腌制前后蛋清与蛋黄中丝氨酸与谷氨酸的含量均差异显著(P<0.05)。腌制后，蛋黄与蛋清的氨基酸总量分别减少了 20.17 mg/g、17.36 mg/g。这主要由于碱性环境使蛋白质部分水解为游离氨基酸，部分氨基酸进一步参与美拉德反应及 Strecker 降解，生成壬醛(油脂香)和苯甲醛(杏仁香)等醛类风味物质，由此消耗氨基酸[28]。腌制后蛋黄和蛋清的必需氨基酸含量分别减少了 6.78 mg/g、6.98 mg/g，该变化归因于碱性条件下蛋白质变性和降解。其中精氨酸含量变化显著，其原因可能为碱性条件下，蛋白质水解为游离氨基酸，部分游离精氨酸通过脱羧、脱氨或转氨反应生成如胺类、醛类等小分子物质，同时参与美拉德反应，导致其含量减少[29–30]。腌制后蛋黄和蛋清的非必需氨基酸的含量分别减少了 13.39 mg/g、10.38 mg/g。其中谷氨酸与丝氨酸含量变化显著，在碱性条件下，蛋白质水解为游离氨基酸，部分谷氨酸与丝氨酸作为发生美拉德反应与 Strecker 降解，生成醛类、吡嗪类等皮蛋特征风味物质[23,30]。鲜味氨基酸是衡量鹌鹑皮蛋风味鲜度的重要指标，对风味物质的形成起到关键作用，鹌鹑皮蛋中鲜味氨基酸含量较高，其中皮蛋清与皮蛋黄的鲜味氨基酸含量分别为 26.74 mg/g、28.68 mg/g，赋予了鹌鹑皮蛋的多元化的风味及营养价值。

表 9 鹌鹑鲜蛋与鹌鹑皮蛋氨基酸含量(mg/g)

Table 9 Amino acid content of fresh *Coturnix* eggs and *Coturnix* preserved eggs (mg/g)

名称	鲜蛋黄	皮蛋黄	鲜蛋清	皮蛋清
天冬氨酸	13.87±0.09^{a}	12.62±0.64^{b}	13.76±0.66^{a}	12.12±0.14^{b}
苏氨酸	7.93±0.32^{a}	6.36±0.13^{b}	6.69±0.51^{b}	6.26±0.42^{b}
丝氨酸	13.00±0.55^{a}	9.41±0.32^{b}	7.98±0.55^{c}	7.04±0.45^{d}
谷氨酸	18.39±0.38^{a}	16.06±0.60^{c}	17.46±0.23^{b}	14.62±0.36^{d}
甘氨酸	7.23±0.34^{a}	5.56±0.94^{b}	6.44±1.35^{ab}	5.00±0.28^{b}
丙氨酸	8.67±0.18^{a}	7.69±0.26^{b}	8.44±0.13^{a}	7.12±0.20^{c}
缬氨酸	9.72±0.19^{a}	8.76±0.28^{b}	9.30±0.41^{ab}	7.92±0.23^{c}
蛋氨酸	4.26±0.05^{a}	3.98±0.24^{a}	4.62±0.24^{a}	3.52±1.25^{a}
异亮氨酸	8.79±0.28^{a}	7.90±0.22^{a}	7.71±1.25^{a}	6.04±0.19^{b}
亮氨酸	13.63±0.21^{a}	12.21±0.36^{b}	11.94±0.31^{b}	10.13±0.13^{c}
酪氨酸	5.10±0.66^{a}	4.97±1.65^{a}	3.90±1.37^{a}	4.30±1.53^{a}
苯丙氨酸	6.78±0.30^{b}	6.80±0.33^{b}	7.84±0.87^{a}	7.29±0.21^{ab}
赖氨酸	9.60±0.39^{a}	7.92±0.79^{b}	6.78±1.02^{b}	6.74±0.65^{b}
组氨酸	2.64±0.35^{a}	3.20±1.09^{a}	2.92±0.87^{a}	3.00±0.36^{a}
精氨酸	10.92±1.84^{a}	7.45±2.51^{ab}	6.32±2.15^{b}	4.65±0.79^{b}
脯氨酸	5.66±0.28^{a}	5.13±0.20^{ab}	4.57±0.50^{b}	3.56±0.25^{c}
氨基酸总量	146.19	126.02	126.67	109.31
必需氨基酸总量	60.71	53.93	54.88	47.90
非必需氨基酸总量	85.48	72.09	71.79	61.41

注: 同一种氨基酸的情况下不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

3 讨论与结论

本研究开发了一种由食品级 NaOH、食盐、$CuSO_4$&$ZnSO_4$和红茶末腌制而成的无铅鹌鹑皮蛋。通过单因素试验与正交试验, 确定最优配方为食品级 NaOH 添加量 4.50%、食盐添加量 4.00%、食品级 $CuSO_4$与 $ZnSO_4$ 添加量 0.50%、红茶末添加量 3.00%。在此工艺条件下制得的鹌鹑皮蛋的蛋清白度为 29.90, 蛋黄白度为 26.24, 蛋清硬度达到 3.72 N, 蛋黄凝固度达到 87.41%, 感官评分达到 90.05 分, 最终综合评分为 0.94, 品质表现最佳。营养成分分析表明, 鲜蛋黄与皮蛋黄的脂肪酸含量分别为 38.26 g/100 g、24.52 g/100 g、氨基酸含量分别为 146.19 mg/g、126.02 mg/g, 鲜蛋清与皮蛋清的氨基酸含量分别为 126.67 mg/g、109.31 mg/g, 腌制后氨基酸与脂肪酸均出现下降趋势, 因为碱性条件下蛋白质和脂质氧化水解, 生成游离氨基酸或者小分子风味物质赋予皮蛋多元化的风味。本研究优化了无铅鹌鹑皮蛋的配方, 成品皮蛋清呈棕褐色透明的凝胶体, 蛋黄呈墨绿色、中间有饴糖状溏心, 鲜香咸辣、清爽可口, 为鹌鹑蛋的深加工提供了可行的技术方案。

参考文献

[1] 刘晗嫣, 陈雪叶, 荣智兴, 等. 恒温条件下鹌鹑蛋贮藏期间的品质变化[J]. 食品工业, 2025, 46(6): 108–111.
LI HY, CHEN XY, RONG ZX, *et al*. Quality changes of quail eggs during storage under constant temperature condition [J]. The Food Industry, 2025, 46(6): 108–111.

[2] TAN J, LIU T, YAO Y, *et al*. Changes in physicochemical and antioxidant properties of egg white during the Maillard reaction induced by alkali [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111151.

[3] 韩占兵, 陈俊亦, 张麦伟. 鹌鹑养殖现状与产业发展对策[J]. 科学种养, 2020(9): 57–59.
HAN ZB, CHEN JY, ZHANG MW. Current status of quail farming and strategies for industry development [J]. KeXue ZhongYang, 2020(9): 57–59.

[4] 孙悦, 范丽萍, 马震, 等. 无铅鹌鹑皮蛋的研制[J]. 食品安全导刊, 2021(3): 132–134.
SUN Y, FAN LP, MA Z, *et al*. Development of lead-free quail century eggs [J]. China Food Safety Magazine , 2021(3): 132–134.

[5] 杨勇胜, 颜玉华, 卢静. 基于正交试验的无铅鹌鹑皮蛋腌制液配方优化研究[J]. 金陵科技学院学报, 2008(1): 90–92.
YANG YS, YAN YH, LU J. Study on the best scheme of leed-free preserved partridge eggs based on orthogonal test [J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2008(1): 90–92.

[6] 阎华, 朱端卫, 周文兵, 等. 铜、锌、铁清料法加工溏心皮蛋的比较研究[J]. 食品工业科技, 2004(6): 64–66.
YAN H, ZHU DW, ZHOU WB, *et al*. Comparative study on the processing of preserved duck eggs with copper, zinc, and iron clarifying methods [J]. Science and Technology of Food Industry , 2004(6): 64–66.

[7] 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]. 贵州: 贵州大学, 2020.
XU W. Research on the characteristic yellow century egg existing in

guizhou sansui lead-free pickling technology and gel formation [D]. Guizhou: Guizhou University, 2020.

[8] 邹金玲, 尹珍, 曾习. 清料法加工变蛋的工艺研究[J]. 现代食品, 2022, 28(15): 97–100.
ZOU JL, YIN Z, ZENG X. Study on processing technology of century eggs by immersion method [J]. Modern Food, 2022, 28(15): 97–100.

[9] WANG L, GUO F, ZHANG J, *et al*. Proteomic analysis of the differences in heat-induced gel properties of egg white between two chinese indigenous duck breeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(13): 8084–8095.

[10] 刘佳琪, 连昭慧, 杜辉, 等. 基于代谢组学的容德小黑鸡蛋黄和北京油鸡蛋黄特征品质分析[J]. 食品科学, 2025, 46(18): 169–179.
LIU JQ, LIAN ZH, DU H, *et al*. Metabolomics-based analysis of the characteristic quality of egg yolks from rongde xiaohei chicken and beijing you chicken [J]. Food Scienceand, 2025, 46(18): 169–179.

[11] 王文昌, 吴娟娟, 杨清山, 等. 一种检测辣椒红中游离脂肪酸的气相色谱分析方法的建立[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 278–283.
WANG WC, WU JJ, YANG QS, *et al*. Establishment of a gas chromatographic analysis method for determination of free fatty acids in paprika oleoresin [J]. China Food Additives, 2024, 35(4): 278–283.

[12] 杨清山, 程远欣, 刘登帅, 等. HPLC 柱前衍生法测定棉籽蛋白中 17 种氨基酸含量[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 17–21, 27.
YANG QS, CHENG YX, LIU DS, *et al*. Determination of 17 amino acids in cottonseed protein by pre-column derivatization coupled with high performance liquid chromatography [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(12): 17–21, 27.

[13] 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.

[14] 乐立强, 吴玲, 孙静, 等. 基于机器视觉的皮蛋斑点检测和最佳生产配方研究[J] .食品科学, 2012, 33(6): 203-208.
LE LQ, WU L, SUN J, *et al*. Research on spot detection and optimal production formula of preserved eggs based on machine vision [J]. Food Science, 2012, 33(6): 203-208.

[15] JI F, XU J, OUYANG Y, *et al*. Effects of NaCl concentration and temperature on fibrillation, structure, and functional properties of soy protein isolate fibril dispersions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111862.

[16] 孙静, 杨雪, 彭旭, 等. 不同蛋壳外观皮蛋的内部品质与铜含量的比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 255–262.
SUN J, YANG X, PENG X, *et al*. Comparison of internal quality and copper content of century eggs with different eggshell appearance [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(11): 255–262.

[17] TAN J, DENG CY, YAO Y, *et al*. Effects of different copper salts on the physicochemical properties, microstructure and intermolecular interactions of century egg white [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134756.

[18] 刘焱, 罗灿, 欧阳元, 等. 茶叶种类及添加量对皮蛋品质的影响[J]. 茶叶科学, 2013, 33(2): 116–124.
LIU Y, LUO C, OUYANG Y, *et al.* Effects of tea types and adding quantity on the quality of century egg [J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(2): 116–124.

[19] 赵悦菡, 侯召华, 郭红莲. 六种禽蛋中脂肪酸、氨基酸及胆固醇的营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2022(10): 323–330.
ZHAO YH, HOU ZH, GUO HL. Analysis of fatty acids, amino acids, cholesterol nutrition components in six poultry eggs [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 323−330.

[20] XUE H, HAN TF, XU MS, *et al*. Processing technology, principle, and nutritional characteristics of century eggs: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 265–277.

[21] 赵燕, 涂勇刚, 邓文辉, 等. 皮蛋蛋白挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 289–294.
ZHAO Y, TU YG, DENG WH, *et al*. Analysis of volatile flavor compounds of century egg white [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 289–294.

[22] 王冲, 王俏君, 马国丽, 等. 不同部位牛油脂肪酸组成和挥发性风味成分分析[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 91–97.
WANG C, WANG QJ, MA GL, *et al*. Analysis of fatty acid composition and volatile flavor composition of different parts of beef tallow [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 91–97.

[23] 席斌, 李大伟, 郭天芬, 等. 不同品种鸡肌肉中氨基酸、脂肪酸及肌苷酸比较[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(2): 46–53.
XI B, LI DW, GUO TF, *et al*. Comparative study on amino acid, fatty acid and IMP of chicken from different poultry species [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(2): 46–53.

[24] 邓文辉, 赵燕, 李建科, 等. 游离脂肪酸在几种常见食品风味形成中的作用[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 422–425.
DENG WH, ZHAO Y, LI JK, *et al*. The role of free fatty acid in the flavor of several common foods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 422–425.

[25] 徐达, 陈华勇, 罗日明, 等. 高纯度共轭亚油酸的制备[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(6): 110–113.
XU D, CHEN HY, LUO RM, *et al*. Research on the preparation method of high purity conjugated linoleic acid [J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(6): 110–113.

[26] GAO BH, HU XB, XUEH, *et al*. The changes of umami substances and influencing factors in century egg yolk: pH, endogenous protease, and proteinaceous substance [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 998448.

[27] QI J, LIU DY, ZHOU GH, *et al*. Characteristic flavor of traditional soup made by stewing Chinese yellow-feather chickens [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(9): 2031–2040.

[28] REHLUND ASG, CANOY TS, NIELSEN DS, *et al*. Protein hydrolysis for amino acid analysis revisited [J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146224.

[29] WANG J, ZHANG T, WAN C, *et al*. The effect of theabrownins on the amino acid composition and antioxidant properties of hen eggs [J]. Poultry Science, 2023, 102(11): 102717.

[30] XU HN, PAN JY, DABBOUR M, *et al*. Synergistic effects of pH shift and heat treatment on solubility, physicochemical and structural properties, and lysinoalanine formation in silkworm pupa protein isolates [J]. Food Research International, 2023, 165: 112554.

(责任编辑：蔡世佳　韩晓红)