# 温度对无铅腌制皮蛋凝胶特性的影响

**包欢欢** <sup>1a,2</sup>, **王修俊** <sup>1a,1b,2</sup>, **沈畅萱** <sup>1a,2</sup>, 何春霞 <sup>1a,2</sup>, 李佳敏 <sup>1a,2</sup>, 许九红 <sup>1a,2</sup> (1.贵州大学 a.酿酒与食品工程学院 b.辣椒产业技术研究院,贵阳 550025; 2.贵州省发酵工程与生物制药重点实验室,贵阳 550025)

摘要:目的 研究腌制温度对皮蛋凝胶特性的影响机制,为无铅皮蛋的控温腌制技术提供理论基础。 方法 以皮蛋的无铅腌制工艺为基础,分析皮蛋凝胶形成过程中感官性状、蛋清游离碱度、质构特性、蛋白质维系结构的化学键等的变化情况。结果 当腌制温度在 30 ℃以上时,皮蛋凝胶快速形成,但凝胶并不稳定,在后期皮蛋容易出现烂头和化汤等现象;当腌制温度为 15~25 ℃时,与前面相反。当腌制温度为 25 ℃及以上时,蛋清游离碱度快速升高,并在后期维持在 3.03 g/kg,明显高于腌制温度为 15 ℃和 20 ℃时的 2.20 g/kg。在凝胶强度指标上,腌制温度为 15 ℃和 20 ℃组皮蛋的弹性、硬度、内聚性均高于腌制温度 25 ℃以上实验组。腌制温度 15 ℃组皮蛋的蛋白质总巯基含量相对最低,而离子键和二硫键含量相对最高。结论 当腌制温度为 15 ℃时,皮蛋内总巯基含量相对最小,转换的二硫键含量相对最高,能够促进离子键和二硫键等化学键的生成,使得皮蛋的凝胶强度较好,氢键和疏水相互作用基本不受温度或碱液的影响,因此对不同温度腌制皮蛋的凝胶结构产生的影响较小。

关键词:皮蛋凝胶;腌制温度;质构特性;化学作用力

中图分类号: TS253.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)09-0100-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.013

# Effects of Temperature on the Gel Properties of Lead-free Pickled Preserved Egg

BAO Huan-huan<sup>1a,2</sup>, WANG Xiu-jun<sup>1a,1b,2</sup>, SHEN Chang-xuan<sup>1a,2</sup>, HE Chun-xia<sup>1a,2</sup>, LI Jia-min<sup>1a,2</sup>, XU Jiu-hong<sup>1a,2</sup>

(1. a. School of Liquor and Food Engineering b. Industrial Technology Institute of Pepper, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Fermentation Engineering and Biopharmacy, Guiyang 550025, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the influence and its mechanism of curing temperature on the gel characteristics and provide a theoretical basis for the lead-free pickling technology of preserved eggs. Based on the lead-free pickling process of preserved eggs, the changes of sensory properties, free alkalinity, texture and chemical bond of protein retention structure during the formation of preserved egg gel were analyzed. The results showed that when the temperature of marinating is above 30 °C, preserved egg gel is formed quickly but the gel is not stable. In the later period, preserved eggs are prone to rotten head and soup, while the 15-25 °C group is the opposite. The temperature of 25 °C and above can increase the free alkalinity of egg white rapidly and maintain it at 3.03 g/kg in the later stage, which is significantly higher

收稿日期: 2021-09-09

基金项目:贵州省朝天椒产业集群建设项目(黔农函[2020]43号);贵州省科技计划重点项目(黔科合支撑[2022]重点 010号);中央引导地方科技发展专项(黔科中引地[2018]4020)

作者简介:包欢欢(1997-),男,贵州大学硕士生,主攻农产品加工与贮藏。

通信作者:王修俊(1965—),男,贵州大学教授,主要研究方向为食品科学与工程。

than 2.20 g/kg at 15 °C and 20 °C; In terms of gel strength, the elasticity, hardness and cohesion of preserved eggs at 15 °C and 20 °C All are higher than the test group above 25 °C; the total sulfhydryl content of protein in 15 °C groups is the lowest, while the content of ionic bond and disulfide bond is the highest. In summary, when the pickling temperature was 15 °C, the content of total sulfhydryl groups in preserved eggs was relatively the smallest, and the content of converted disulfide bonds was relatively highest, which could promote the formation of chemical bonds such as ionic bonds and disulfide bonds, making the gel strength of preserved eggs better. Hydrogen bonds and hydrophobic interactions are hardly affected by temperature or lye, hence there is less influence on the gel structure of preserved eggs cured at different temperatures.

KEY WORDS: preserved egg gel; pickling temperature; texture properties; chemical force

皮蛋,别名松花蛋或变蛋,作为我国传统鸭蛋制品,其具有独特的风味、细腻顺滑的口感和诱人的外形色彩,是一种中国特有的食品。皮蛋含有种类丰富的脂质、蛋白质、维生素等营养成分<sup>[1]</sup>,使得其能够有效完善人体的膳食结构<sup>[2]</sup>。在中医理论中,皮蛋味苦、凉,属于寒性食物,因此具有清凉解暑、降压、润肺、养阴止血、凉肠和止泻等特殊功效,可以作为治疗咽喉及口腔炎症的辅助食疗食品<sup>[3-4]</sup>。

皮蛋凝胶的形成区别于蛋白质的热凝固,其原理是通过强碱改变蛋白质的结构,使其不需要加热便能形成独特的半透明状凝胶网状蛋清结构和层次分明的蛋黄结构。皮蛋的最终形成一般需要经过化清期、凝固期、转色期和后熟期等 4 个阶段<sup>[5]</sup>,整个过程实质上是蛋白质的变性。已有研究表明,碱液浓度、腌制环境温度和金属离子等因素能够直接影响皮蛋的品质和风味<sup>[6-7]</sup>。王晓涧等<sup>[8]</sup>利用交叉试验得到了皮蛋的最佳腌制条件: NaOH 的体积分数为 3.5%; 温度为 20 ℃。孙静等<sup>[9]</sup>指出热处理能够改善皮蛋的碱伤问题。罗文翔<sup>[10]</sup>的研究表明,温度和明胶基复合涂抹剂能够控制皮蛋的贮藏期。由此可以看出,目前对皮蛋的研究主要集中在优化腌制工艺和延长保存期等方面,而关于温度对皮蛋凝胶特性的影响及其机制方面的研究较少。

文中以三穗特色麻鸭蛋为主要原料,在笔者所在研究团队前期对无铅腌制技术的研究成果基础上,研究不同温度条件下各个腌制阶段中皮蛋的感官性状、游离碱度、质构、蛋白质分子间化学作用力的变化情况,探究腌制温度对皮蛋凝胶的影响及机制,以期为控温腌制无铅皮蛋的加工工艺提供理论指导。

# 1 实验

# 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 原料与试剂

实验原料:麻鸭蛋、食盐、红茶末(食品级), 贵阳市花溪区吉麟农贸市场。 主要试剂: Tris、甘氨酸、SDS(分析纯), 北京 Solarbio 科技有限公司; DTNB[5,5'-二硫代双(2-硝基)苯甲酸]、ANS(8-苯胺基-1-萘基磺酸盐)、β-巯基乙醇、考马斯亮蓝 G-250(分析纯), Sigma公司; 牛血清蛋白标品, 国药集团化学试剂有限公司; EDTA、NaCl、KBr、尿素、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠(分析纯)、硫酸铜、氢氧化钠、邻苯二甲酸氢钾、盐酸(分析纯), 天津市瑞金特化学品有限公司。

# 1.1.2 仪器

主要仪器: FA2002B 型电子精密天平,上海越平科学仪器有限公司; XHF-D 型高速分散器,宁波新芝生物科技股份有限公司; PHS-3C 型 pH 计,上海鸿盖仪器有限公司; CT3-1000 型质构分析仪,美国 Brookfield Engineering Laboratories; SPX-150C型恒温培养箱,上海博讯实业有限公司医疗设备厂; TDL-5 型台式离心机,上海安亭科学仪器厂; Varioskan Falsh 型酶标仪,美国 Thermo Scientific公司。

# 1.2 方法

根据笔者所在团队前期的研究成果 $^{[11-13]}$ ,采用腌制料液配比(均用体积分数表示)为 CuSO<sub>4</sub> 0.4%、NaOH 4.5%、NaCl 4%、红茶 2%,腌制时间为 20 d,期间每隔 4 d取样检测,设置腌制温度梯度分别为 15、20、25、30、35 °C。

工艺流程:原料蛋清洗→裂纹检验→腌制液配制与控温腌制→定期抽样检测。

#### 1.2.1 皮蛋感官性状评价

以 GB/T 9694—2014《皮蛋》<sup>[14]</sup>中对皮蛋的感官要求作为参照,对实验组各时期皮蛋的外观和质地等进行描述和分析。

#### 1.2.2 碱液浸泡各阶段游离碱度的测定

以 NaOH 计,采用 GB 1886.20—2016《食品安全国家标准 食品添加剂 氢氧化钠》<sup>[15]</sup>中皮蛋游离碱度测定方法。

### 1.2.3 成品皮蛋凝胶强度(质构)的测定

用刀片切取蛋清头部成块(1 cm×1 cm、立方块),置于仪器测试区域中心。调节压缩模式,即测前、测试和返回的速率分别为1.0、0.5、0.5 m/s,目标距离为6 mm,触发点负载为0.15 N,循环1次;选择质构特性分析(Texture Properties Analysis, TPA)模式,其他参数不变,将测试和返回速率调整为1.0 m/s,目标距离为7 mm。

# 1.2.4 总巯基含量的测定

取 3 g 皮蛋凝胶部分作为测试样,加入 27 mL Tris—HCl 溶液(200 mmol/L, pH 8.8),均质后离心 20 min(离心机速度 4 000 r/min),测定和计算上清液蛋白质的浓度(C)。取 0.2 mL 上清液,加入 2.8 mL 的缓冲溶液(0.1 mol/L Tris, 0.1 mol/L 甘氨酸,4 mmol/L EDTA,5 g/L SDS,8 mol/L 尿素,pH 8.0)和 0.02 mL Ellman 试剂(将 4 mg/mL DTNB 溶于Tris—HCl 溶液中),混匀后静置 15 min(40 °C),于412 nm下测定其吸光度,用 3 mL 缓冲溶液加 0.02 mL Ellman 试剂作为空白对照[ $^{16}$ ]。总巯基含量( $^{\mu}$ mol/g, $^{\mu}$ G<sub>SH</sub>)的计算见式(1)。

$$G_{\rm SH} = \frac{73.53 \times A_{412} \times D}{C} \tag{1}$$

式中: 73.53 为系数,由摩尔消光系数计算所得;  $A_{412}$  为样品在 412 nm 处的吸光度; D 为测定前样品的稀释倍数(此实验中为 15.01); C 为样品上清液中蛋白质的浓度。

#### 1.2.5 表面疏水性测定

参考 Zhao 等<sup>[17]</sup>的方法测定表面疏水性。根据所得曲线计算分子表面的疏水指数。

# 1.2.6 蛋白质溶解性和凝胶化学作用力的测定

配制含 0.6 mol/L NaCl 的 S1 液,含 0.6 mol/L NaCl 和 1.5 mol/L 尿素的 S2 液,含 0.6 mol/L NaCl 和 8 mol/L 尿素的 S3 液,含 0.6 mol/L NaCl、8 mol/L 尿素和 0.5 mol/L β-巯基乙醇的 S4 液。分别取 0.1 g 样品与上述溶液混合均质,在 4 000 r/min 下离心 20 min,取上清液,用考马斯亮蓝法测定上清液中蛋白质的含量。用溶解于 S1 中的蛋白质含量表示离子键的大小,溶解于 S1、S2 中蛋白质含量之差表示氢键的大小,溶解于 S2、S3 中蛋白质的含量之差表示 疏水作用的大小,溶解于 S3、S4 中的蛋白质含量之差表示 流水作用的大小,溶解于 S3、S4 中的蛋白质含量之差表示 流水作用的大小,溶解于 S3、S4 中的蛋白质含量之差表示 流球作用的大小,溶解于 S3、S4 中的蛋白质含量之差表示 流域的大小[17]。

#### 1.2.7 数据处理与分析

在同一条件下每个指标各测定 3 次,采用 Excel 5.0 进行数据处理和计算,采用 SPSS 25 进行方差分析(P<0.05),并采用 Origin 9.0 绘制图形。

# 2 结果与分析

## 2.1 感官变化

从表 1 中可以看出,腌制 4 d 时,各实验组均表现为化水、黏稠度下降,说明蛋清蛋白遇碱会快速改变结构;在腌制 8~20 d 期间,15~25 ℃组皮蛋从外观上看差距不明显,因此还需用更微观的品质参数来进行对比;在腌制 8 d 时,30~35 ℃组皮蛋已有部分出现烂头现象。随着腌制时间的延长,高温继续促进 NaOH 的渗透<sup>[18]</sup>。虽然高温加快了蛋黄的凝固,但皮蛋出现烂头和化汤等品质劣化等情况逐渐加重。由此可知,30 ℃以上的温度不利于皮蛋凝胶的形成和稳定。

# 2.2 腌制各阶段蛋清游离碱度的变化

由图 1 可知,在 15~35 ℃内,同一时间各组皮蛋 的蛋清游离碱度存在显著性差异(P<0.05)。腌制温 度越高,游离碱度上升得越快,说明较高温度更能促 进 OH 穿过蛋壳孔进入蛋清部分, 使蛋清原有的蛋白 质结构和化学键被破坏。在腌制8d后,各实验组皮 蛋的游离碱度变化速率明显放缓,原因之一是 OHT 由蛋清部分逐渐向蛋黄渗透;其二是强碱使蛋清分解 出小分子物质, 其与金属离子结合成细小颗粒难溶 物,将蛋壳表面微孔堵塞,从而阻碍了 NaOH 的继续 渗透[19]。此外还有研究指出,在腌制后期,碱的作用 使蛋黄的部分水分通过蛋黄膜转移到蛋清,从而在一 定程度上稀释了游离碱的浓度[20]。在高温下,虽然前 期游离碱度会快速升高,但是中后期 OHT含量没有明 显下降,容易导致已形成的凝胶被破坏,从而发生烂 头甚至化汤等现象。在腌制前期,15℃和20℃组皮 蛋的游离碱度的升高速率也较大,在腌制后期其变化 速率较平缓且维持在较低水平,结合感官变化情况, 说明在腌制后期 15~20 ℃的腌制温度更适于皮蛋凝 胶的形成。

# 2.3 腌制各阶段皮蛋凝胶强度的变化

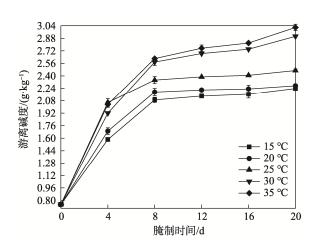
由图 2 可知,各组样品的硬度存在显著性差异(P<0.05);在腌制 8 d 后,30 ℃和 35 ℃组皮蛋由于凝胶被破坏而无法测定其硬度值。另外,结合感官变化分析可知,15 ℃和 25 ℃组皮蛋在腌制 20 d 后凝胶已形成,但是组间差异不明显。为了更准确地分析皮蛋凝胶的稳定性,取 15 ℃和 25 ℃组腌制 20 d 的皮蛋样品进行弹性和内聚性等质构特性的附加对比分析,具体差异见表 2。

皮蛋凝胶网状结构内部分子的结合紧密程度可分别用弹性和内聚性表示<sup>[21]</sup>,而内聚性还能直观显示特殊凝胶结构被外力破坏的难易程度。由表 2 可知,各组的硬度和弹性存在显著性差异(*P*<0.05),

下降

# 表 1 感官变化分析 Tab.1 Sensory change analysis

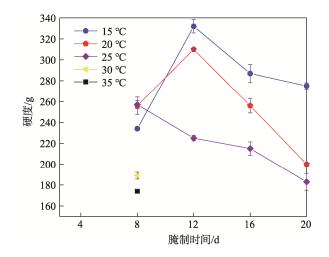
Tab.1 Sensory change analysis					
腌制温	腌制时间/d				
度/℃	4	8	12	16	20
15		胶基本形成,略有	蛋清凝胶已完整,色泽微 黄,震颤感增强;蛋黄外部 凝固层厚度 1~2 mm	=	透明状;青绿色蛋黄分
20		胶基本形成,略有	蛋清凝胶已完整,色泽微黄,震颤感增强;蛋黄外部凝固层厚度 1~2 mm		黄分层,凝固层厚度
25		胶基本形成,略有	蛋清凝胶已完整,色泽微黄,震颤感增强;蛋黄外部凝固层厚度 1~2 mm		黄分层,凝固层厚度
30		整,但个别出现烂		粥状;蛋黄分层,变为墨	化汤,为棕黄色粥状;
35		震颤感, 个别出现	黏壳现象严重,蛋清烂头, 呈棕黄色,蛋黄凝固层厚度 2~3 mm	粥状,蛋黄凝固层厚度	部分化汤,为棕黄色;



黏壳现象,呈淡棕 2~3 mm

色半透明状

图 1 蛋清游离碱度变化 Fig.1 Changes of free alkalinity of egg white under different temperatures treatment



蛋黄凝固层厚度 3~

4 mm, 呈墨绿色

 $3\sim4$  mm

图 2 皮蛋凝胶硬度变化 Fig.2 Changes of gel strength of preserved eggs

表 2 皮蛋凝胶硬度、弹性、内聚性对比 Tab.2 Comparison in hardness, springiness and cohesiveness of preserved egg gel

腌制温度/℃	硬度/g	弹性/mm	内聚性/g
15	$368 \pm 16.37^{a}$	$4.12{\pm}0.06^{a}$	$0.92{\pm}0.01^a$
20	$320 \pm 19.18^{b}$	$3.98{\pm}0.05^{b}$	$0.91{\pm}0.01^a$
25	252±24.71°	$2.46 \pm 0.05^{c}$	$0.90{\pm}0.01^a$

注: a、b、c表示相同测定指标、不同实验组之间存在显著性差异(P<0.05)。

且 15 ℃组的质构特性优于其他组。分析其原因可知,低浓度金属离子可以与其附近的特殊氨基酸形成交联,增强了蛋白凝胶的网状结构<sup>[22]</sup>,但过多的离子会占据蛋白质分子的阴离子位点,而对相邻聚合物链之间的连接造成阻碍作用。由此可见,联合区域的斥力可能会减少多肽链的聚合螺旋,影响凝胶结构的稳定性<sup>[23]</sup>,而温度可能通过这一过程影响皮蛋的凝胶质构特性。通过分析不同实验组的硬度、弹性和内聚性等指标差异可知,腌制温度 15 ℃能够很好地配合腌制辅料对蛋白质结构进行改变,并且能够稳定已形成的皮蛋凝胶网状结构。

# 2.4 总巯基含量测定

巯基(-SH)在蛋白质中具有特殊的生理活性 功能。在适宜的条件下, 巯基会发生氧化反应, 经过 脱氢生成二硫键(—S—S—),而二硫键是蛋白质高 级结构的重要维系化学键[24]。已经有研究发现,皮蛋 在化水阶段结束后皮蛋的凝胶开始形成, 巯基含量逐 渐下降,而二硫键含量逐渐升高。原因可能是腌制液 进入蛋内后形成了碱性环境, OHT将蛋白质的疏水区 域打开,促进了氨基酸中游离巯基的移动,从而促使 巯基向二硫键转换,并最终形成维持皮蛋凝胶结构的 重要作用力[25]。若腌制完成后或腌制条件控制不佳 时,已形成的二硫键会被还原为巯基,体系内巯基含 量又出现升高的情况,因此可以通过测量蛋内的总巯 基含量从侧面反应蛋清的凝胶性质和稳定性。由表 3 可知,实验组皮蛋的总巯基含量与腌制温度呈正相 关,即温度越高,腌制完成后皮蛋的总巯基含量越高。 说明在其他腌制条件相同的情况下, 较低温度能够在 凝胶形成期结束后稳定总巯基的含量,同时能够抑制 巯基与二硫键的逆向转换,从而使已形成凝胶较稳定。

表 3 皮蛋中的总巯基含量 Tab.3 Total SH content of preserved eggs under different treatments

 腌制温度/℃	总巯基含量/(μmol·g <sup>-1</sup> )
15	19.81±0.75°
20	$22.43 \pm 1.72^{c}$
25	$38.67 \pm 1.33^{b}$
30	$64.46{\pm}1.50^a$
35	$65.88 \pm 0.71^{a}$

注: a、b、c 表示相同测定指标、不同实验组之间存在显著性 差异(*P*<0.05)。

## 2.5 表面疏水性测定

由表 4 可知, 15 ℃组皮蛋的凝胶表面疏水性较低,随着温度的升高其有增长的趋势。说明皮蛋凝胶的形成会将疏水基团锁住,从而表现为较低的疏水

性;随着腌制温度的升高,皮蛋凝胶会被部分或全部破坏,疏水基团又重新暴露出来,从而形成较高水平的表面疏水性。

表 4 表面疏水性的测定结果
Tab.4 Measurement results of surface hydrophobicity

腌制温度/℃	表面疏水性
15	1 722.82 ± 21.58 <sup>d</sup>
20	$1954.49 \pm 9.17^{\circ}$
25	$2\ 555.31 \pm 32.68^{b}$
30	$3\ 264.75 \pm 74.46^{a}$
35	$3\ 226.08 \pm 71.96^{a}$

注: a、b、c、d 表示相同测定指标、不同实验组之间存在显著性差异(P<0.05)。

# 2.6 蛋白质溶解性化学作用力的测定

在皮蛋的腌制过程中,维持蛋白质高级结构的分 子间作用力会发生改变。测定腌制完成后皮蛋的凝胶 蛋白质化学作用力结果表明,同组间不同化学作用力 存在差异,其值由高到低排序为离子键、氢键、疏水 作用和二硫键。从表5可以看出,不同样品间离子键 的相对含量存在显著性差异,而氢键、疏水作用和二 硫键的相对含量差异不显著(P<0.05)。说明蛋清蛋 白质在强碱条件下离子键最容易发生断裂,并且离子 键是影响皮蛋凝胶特性的主要化学作用力。离子键 (静电相互作用)的类型包括"盐桥"和"水-离子 键"[26]。结合游离碱度的测定结果进行分析可知, 25 ℃及以上实验组皮蛋的 OH 含量较多, 带来了过 多的静电斥力,这样不利于蛋白质分子的聚集,而 较低的温度能够限制碱液的过量渗入和促进 Cu<sup>2+</sup>对 负电荷的中和, 因此较低温度组的离子键相对含量 较低。

在蛋白质变性过程中,金属离子在一定程度上促进了 β-折叠和高分子交联蛋白的形成,而疏水作用可以促进蛋白质的重新折叠。在此过程中,部分疏水残基会被蛋白质固定,因此表现出较低水平的疏水相互作用。由表 5 可知,组间疏水相互作用和氢键相对含量差异不显著,推测温度和碱液对两者的影响较小,但与其他 2 类化学键共同影响蛋白质的分子吉布斯自由能和多肽链的构象熵<sup>[27]</sup>,从而维持蛋清蛋白质的高级结构。不同温度腌制实验组所测得的二硫键相对含量结果表明,巯基—二硫键相互作用有助于皮蛋凝胶的构成,这与总巯基含量的测定结果一致。Yang等<sup>[28]</sup>用类似方法测量皮蛋黄凝胶分子间作用力得到了相似结果,说明蛋黄与蛋白凝胶的维系化学键组成可能不存在差异。

表 5	皮蛋中化学作用力的对应值
Tab.5 Content o	f chemical bonds in preserved eggs

mg/kg

腌制温度/℃	离子键	氢键	疏水作用	二硫键
15	$226.00{\pm}6.99^{d}$	$73.13\pm1.26^{a}$	$140.00 \pm 1.86^{b}$	$280.00 \pm 1.76^{b}$
20	$248.58 \pm 2.25^{c}$	$70.63 \pm 0.52^{b}$	$142.00 \pm 8.81^{b}$	$277.00\pm0.33^{c}$
25	$278.00 \pm 9.66^{b}$	$69.76 \pm 0.64^{b}$	$151.00\pm1.72^a$	$283.00{\pm}2.32^a$
30	$301.00 \pm 5.42^a$	$70.31 {\pm} 0.89^b$	134.00±3.21°	$210.00{\pm}1.67^{d}$
35	$298.00 \pm 2.56^a$	$69.86 \pm 0.38^{b}$	133.00±0.89°	$189.00 \pm 0.87^{e}$

注: a、b、c、d、e 表示相同测定指标、不同实验组之间存在显著性差异(P<0.05)。

# 3 结语

腌制温度是影响皮蛋凝胶特性的重要因素。在25 ℃以上时,腌制温度与 NaOH 的渗透速率呈正相关,但也极易导致皮蛋凝胶被破坏;20 ℃和15 ℃组在腌制后期游离碱度维持在2.20 g/kg 左右,能够稳定皮蛋的凝胶特性。15 ℃组皮蛋的硬度、弹性和内聚性分别为368 g、4.12 mm 和0.92 g,在所有实验组中最高。随着腌制温度的升高,腌制后期蛋清总巯基含量逐渐增大,其中15 ℃组的含量最小,而转换的二硫键相对含量较高。15 ℃组离子键和二硫键的相对含量分别为226.00、280.00 mg/kg,各组氢键和疏水作用的相对含量差异不显著,即温度或碱液对蛋白质分子的聚集过程影响较小,而较低温度能够促进离子键和二硫键的生成,共同促进皮蛋凝胶网状结构的形成,并保持其质构特性的稳定。

## 参考文献:

- [1] FERNÁNDEZ-MARTÍN F, PÉREZ-MATEOS M, DADASHI S, et al. Impact of Magnetic Assisted Freezing in the Physicochemical and Functional Properties of Egg Components. Part 2: Egg Yolk[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 49: 176-183.
- [2] 周有祥,夏虹,彭茂民,等.鲜鸭蛋及其制品的营养成分初步分析[J]. 湖北农业科学,2009,48(10):2553-2556.
  - ZHOU You-xiang, XIA Hong, PENG Mao-min, et al. Preliminary Nutritional Analysis of Fresh Duck Egg and Its Products[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(10): 2553-2556.
- [3] 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 Yan, TU Yong-gang, DENG Wen-hui, et al. Analysis of Volatile Flavor Compounds of Preserved Egg White[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 289-294.
- [4] 孙晓生. 王士雄《随息居饮食谱》的五个养生特色[J]. 新中医, 2011, 43(10): 109-110.

- SUN Xiao-sheng. Five Health-Preserving Characteristics of Wang Shixiong's "Suixiju Diet"[J]. Journal of New Chinese Medicine, 2011, 43(10): 109-110.
- [5] 梁庆祥, 史琦云. 皮蛋加工过程中的分期及色泽研究 [J]. 甘肃农业大学学报, 1992, 27(2): 171-176. LIANG Qing-xiang, SHI Qi-yun. Studies on the Stage Division and Colour Formation in Preserved Egg Processing[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 1992, 27(2): 171-176.
- [6] JI Ling, LIU Hui-ping, CAO Chun-ling, et al. Chemical and Structural Changes in Preserved White Egg during Pickled by Vacuum Technology[J]. Food Science and Technology International Cienciay Tecnologia De Los Alimentos Internacional, 2013, 19(2): 123-131.
- [7] 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 Yan, LUO Can, OUYANG Yuan, et al. Effects of Tea Types and Adding Quantity on the Quality of Preserved Egg[J]. Journal of Tea Science, 2013, 33(2): 116-124.
- [8] 王晓洵, 周小燕, 张向前. NaOH 和温度对鸡蛋皮蛋加工的影响[J]. 绿色科技, 2015(10): 289-292. WANG Xiao-jian, ZHOU Xiao-yan, ZHANG Xiang-qian. Research on the Effects of NaOH and Temperature on the Processing of Preserved Chicken Egg[J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(10): 289-292.
- [9] 孙静, 杜金平, 卢立志, 等. 热处理对改善皮蛋白碱 伤效果研究[J]. 食品安全导刊, 2018(31): 69-74. SUN Jing, DU Jin-ping, LU Li-zhi, et al. Effect of Heat Treatment on Improving Skin Protein Alkali Injury[J]. China Food Safety Magazine, 2018(31): 69-74.
- [10] 罗文翔. 温度和明胶基复合涂膜剂对贮藏期皮蛋品质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 17-31.

  LUO Wen-xiang. Effects of Temperature and Gelatin-Based Composite Coatings on the Quality of Preserved Eggs during Storage[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 17-31.
- [11] 徐雯, 王修俊, 沈畅萱, 等. CuSO<sub>4</sub>对皮蛋腌制过程的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(8): 106-109.
  XU Wen, WANG Xiu-jun, SHEN Chang-xuan, et al. Effect of CuSO<sub>4</sub> Concentrationin Pickling Solution on Processing of Preserved Eggs[J]. The Food Industry,

- 2019, 40(8): 106-109.
- [12] 于沛,王修俊,徐雯,等.贵州三穗特色黄皮蛋加工过程中凝胶形成及颜色变化分析[J].食品科学,2021,42(19):65-73.
  - YU Pei, WANG Xiu-jun, XU Wen, et al. Analysis of Gel Formation and Color Change during the Processing of Yellow Preserved Eggs in Sansui, Guizhou[J]. Food Science, 2021, 42(19): 65-73.
- [13] 陈颜红,王修俊,徐雯,等.贵州三穗特色黄皮蛋无铅腌制过程中色泽及蛋黄凝固度变化分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 180-188.

  CHEN Yan-hong, WANG Xiu-jun, XU Wen, et al. Changesin Color and Extent of Yolk Coagulation of Characteristic Yellow Preserved Eggs of Sansui in Guizhouduring Lead-Free Curing[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 180-188.
- [14] GB/T 9694—2014, 皮蛋[S]. GB/T 9694—2014, Preserved Egg[S].
- [15] GB 1886.20—2016, 食品安全国家标准 食品添加剂 氢氧化钠[S].GB 1886.20—2016, Food Safety National Standard Food Additive Sodium Hydroxide[S].
- [16] CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, TU Yong-gang, et al. Changes in Gel Characteristics of Egg White under Strong Alkali Treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 1-8.
- [17] ZHAO Yan, CHEN Zhang-yi, LI Jian-ke, et al. Changes of Microstructure Characteristics and Intermolecular Interactions of Preserved Egg White Gel during Pickling[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 323-330.
- [18] 吴汉东. 不同温度对皮蛋质量影响的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(1): 36-38.

  WU Han-dong. Effects of Different Temperatures on Quality of Pidan[J]. The Food Industry, 2013, 34(1):
- [19] 马力,谢林,苏赵. 松花蛋形成过程中碱液含量控制机理的微观研究[J]. 四川工业学院学报,2001,20(2):43-45.
  - MA Li, XIE Lin, SU Zhao. Study of the Controlling Mechanism for Alkali Content in the Process of Soohua-Egg Formation[J]. Sichuan University of Science and Technology, 2001, 20(2): 43-45.
- [20] 张大程,王洋,雷蕾,等.腌制剂及复配对无重金属 盐皮蛋品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(6):

43-49.

- ZHANG Da-cheng, WANG Yang, LEI Lei, et al. Effect of Curing Agent and Recombination on Quality of Salted Preserved Eggs without Heavy Metal[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 43-49.
- [21] 阎华, 朱端卫. 铜、锌、铁在皮蛋加工中作用差异研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 164-167.
  YAN Hua, ZHU Duan-wei. Study on Different Effect of Copper, Zinc and Iron in Preserved Eggs Processing[J]. Food Science, 2006, 27(12): 164-167.
- [22] TOTOSAUS A, MONTEJANO J G, SALAZAR J A, et al. A Review of Physical and Chemical Protein-Gel Induction[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(6): 589-601.
- [23] SHAO Yao-yao, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, et al. Effects of Copper Ions on the Characteristics of Egg White Gel Induced by Strong Alkali[J]. Poultry Science, 2017, 96(11): 4116-4123.
- [24] WANG Li-mei, WANG Xian, MA Jing, et al. Effects of Radio Frequency Heating on Water Distribution and Structural Properties of Grass Carp Myofibrillar Protein Gel[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128557.
- [25] 艾民珉, 汤婷, 蒋爱民, 等. 化学作用力对皮蛋蛋黄 凝胶形成的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 5-9. AI Min-min, TANG Ting, JIANG Ai-min, et al. Effect of Intermolecular Interaction on Gel Formation of Preserved Egg Yolk[J]. Food & Machinery, 2018, 34(6): 5-9.
- [26] 张晓维, 刘旭辉, 高洁, 等. 真空减压加速皮蛋蛋清凝胶形成的机理[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 172-180.

  ZHANG Xiao-wei, LIU Xu-hui, GAO Jie, et al. Mechanism of Accelerating the Formation of Preserved Egg White Gel by Vacuum Decompression[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(6): 172-180.
- [27] 赵国华. 食品化学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 103-104.

  ZHAO Guo-hua. Food Chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2014: 103-104.
- [28] YANG Yuan, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, et al. Changes in Physico-Chemical Properties, Microstructure and Intermolecular Force of Preserved Egg Yolk Gels during Pickling[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 131-142.