

# 间歇超声辅助加快咸蛋腌制速度工艺优化

孙秀秀<sup>1</sup>,何立超<sup>2</sup>,杨海燕<sup>1</sup>,吴文敏<sup>1</sup>,岳丽莉<sup>1</sup>,彭伟明<sup>1</sup>,靳国锋<sup>1,\*</sup>,金永国<sup>1</sup>

(1.华中农业大学食品科技学院,湖北武汉 430070;

2.武汉设计工程学院食品与生物技术学院,湖北武汉 430205)

**摘要:**为加快咸蛋腌制速率,缩短腌制周期,本实验通过测定腌制过程中咸蛋含盐率、含水率、蛋黄出油率及蛋清粘度指标的变化,探究超声波技术对咸蛋腌制的影响。通过超声波单因素试验探究超声波处理次数、超声时间、超声功率以及超声频率对超声波辅助咸蛋腌制效果的影响,后由 $L_9(3^4)$ 正交实验对间歇超声辅助腌制咸蛋工艺进行优化,由蛋清、蛋黄含盐率以及蛋黄出油率得出最优的间歇超声辅助腌制工艺为:超声波处理3次,超声时间30 min,超声功率350 W,超声频率20 kHz,此工艺相对传统腌制工艺,蛋清含盐率6.37%,蛋黄含盐率1.58%,蛋黄出油率达到57.53%。在保证咸蛋出油率等品质上,与传统工艺相比腌制时间缩短了15~20 d,且蛋白细嫩,咸蛋黄松沙出油,蛋黄外周黑圈等优点。

**关键词:**咸蛋,超声波,含盐率,含水率,出油率

## Intermittent Ultrasound Assisted in Speeding up the Pickling Speed of Salted Eggs

SUN Xiu-xiu<sup>1</sup>, HE Li-chao<sup>2</sup>, YANG Hai-yan<sup>1</sup>, WU Wen-min<sup>1</sup>, YUE Li-li<sup>1</sup>,  
PENG Wei-ming<sup>1</sup>, JIN Guo-feng<sup>1,\*</sup>, JIN Yong-guo<sup>1</sup>

(1.College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.School of Food Science and Biotechnology, Wuhan Institute of Design and Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** In order to speed up the pickling rate of salted eggs and shorten the cycle of salting, this experiment explored the changes of salt content, moisture content, egg yolk yield and egg white viscosity index of salted eggs during salting process, and explored the effect of ultrasonic technology on pickling salted eggs. The effects of ultrasonic treatment times, ultrasonic time, ultrasonic power, and ultrasonic frequency on the ultrasonic-assisted salting of preserved eggs were investigated by ultrasonic single-factor experiments. After that, the  $L_9(3^4)$  orthogonal experiment was used to optimize the process of intermittent ultrasonic assisted salted preserved eggs. The optimum intermittent ultrasonic assisted pickling process was obtained from egg white, salt content of egg yolk, and yield rate of egg yolk; ultrasonic treatment 3 times, ultrasonic time 30 min, ultrasonic power 350 W, ultrasonic frequency 20 kHz, this process was relatively traditional in the production process, the salt content of egg white was 6.37%, the salt content of egg yolk was 1.58%, and the oil yield of egg yolk was 57.53%. In ensuring the quality of salted eggs and other qualities, compared with the traditional process, the pickling time was shortened by 15~20 d, and the protein was tender, the salted egg was yellow and the sand was out of the oil, and the egg yolk had the advantages of black circles on the periphery.

**Key words:** salted egg; ultrasonic wave; salt content; moisture content; oil yield

中图分类号: TS253.4<sup>+</sup>6

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2018)22-0204-08

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2018.22.036

引文格式: 孙秀秀,何立超,杨海燕,等.间歇超声辅助加快咸蛋腌制速度工艺优化[J].食品工业科技,2018,39(22): 204-211.

咸蛋是我国独具特色风味的传统腌制品之一,又名盐蛋、腌蛋、味蛋等<sup>[1]</sup>。因其营养丰富,含有人体几乎所有需要的营养物质,以及蛋黄独特的细、嫩、松沙口感,深受国内外消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。咸蛋传统腌制方法有盐泥法、盐水法、盐灰法,近年来,又有人提

出纸包法和泡酒涂盐法等<sup>[2]</sup>。一般认为咸蛋黄出油率达到47%左右即认为咸蛋腌制完成,传统腌制法腌制周期较长,一般35 d左右,导致蛋黄溶融,污染蛋白。另外即使腌制液的盐浓度很高,也会有部分微生物生存下来,进入蛋内,导致腐败,腌制周期越

收稿日期:2018-03-06

作者简介:孙秀秀(1993-),女,硕士研究生,研究方向:畜产品加工技术,E-mail:sunxiuxiu99@163.com。

\*通讯作者:靳国锋(1983-),男,博士,副教授,研究方向:畜产品加工及质量控制,E-mail:jgf@mail.hzau.edu.cn。

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303084)。

长,对咸蛋品质的不利影响越大<sup>[3]</sup>。

为加快咸蛋腌制速度,缩短腌制周期,实现咸蛋的工厂化生产,人们开始寻找腌制咸蛋的辅助技术手段。王晓拓<sup>[4]</sup>提出采用脉动压技术辅助腌制咸蛋,高压低压交替施加2~3 d即可腌制出合格咸蛋,但此方法操作较繁琐,经济费用较高。徐明生等<sup>[5]</sup>研究了香辛料对咸蛋腌制的影响,结果表明香辛料能促进食盐向蛋内渗透,加快咸蛋腌制速率,缺点是香辛料腌制液会造成咸蛋壳表面有污渍,影响咸蛋美观,降低消费者购买欲望。郑玉锴等<sup>[6]</sup>提出利用超声波降低蛋清粘度的原理,提高食盐进入咸蛋的速度,加快咸蛋腌制速度,但对于超声波最佳超声条件上没有研究。

近年来超声波技术在食品中的应用越来越广泛,特别是用在腌制食品中,通过超声波空化效应击碎大分子物质,扩大传质通道,加快食盐进入,改善腌制品品质等优点<sup>[7-8]</sup>。冯婷等<sup>[9]</sup>利用超声波辅助加快生鲜鸡肉的腌制并改善其腌制效果。丁捷等<sup>[10]</sup>将超声波技术应用在加快猪肝腌制过程,并优化出最佳超声条件。李鹏<sup>[11]</sup>采用超声波辅助卤蛋的腌制,证明超声波能够有效的促进卤制液的渗透,改善卤蛋的品质,提高生产效率。关于超声波技术用在咸蛋腌制的研究,近年来也有学者不断的研究,赖宜萍等<sup>[12]</sup>仅研究了超声波时间、频率、强度(功率)单因素对咸蛋腌制的影响,不够全面。为此,本实验将系统性的研究超声波四个单因素:超声次数、超声时间、超声功率、超声频率对咸蛋腌制的影响,正交试验优化出最佳超声波工艺条件。探寻一种在保证咸蛋品质的基础上加快咸蛋腌制速度的工艺。本研究对推动传统咸蛋现代化快速腌制具有一定的理论及使用价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

新鲜鸭蛋 武汉市洪山区华中农业大学农贸市场;精制食盐 湖北盐业集团有限公司;硝酸银、正己烷、异丙醇、铬酸钾、氢氧化钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

SB-500DTY 超声波多频清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司;WGL-45B 电热鼓风干燥箱 天津泰斯特仪器有限公司;FE-20 精密 pH 计 梅特勒托利多中国有限公司;DV-II + 旋转黏度仪 德国布鲁克林公司;Sigma3-30K 高速冷冻离心机 德国 sigma 公司;XHF-DY 高速分散器 宁波新芝生物科技股份有限公司;R-100 旋转蒸发仪 瑞士步琦公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 原料蛋的挑选 挑选新鲜(距产蛋后2~4 d),蛋壳坚固,颜色由钝端、中端、尖端均匀过度,无麻点以及明显色差,且表面清洁、无破裂及咯窝,灯光透射时气室鲜明,蛋黄位于中央,略见暗影,质量均一,平均质量(70±5) g。用自来水清洗干净后,放入质量分数5%的氢氧化钠溶液30 min 消毒,取出再次用自来水冲洗干净后,晾干备用。

1.2.2 腌制方法 传统腌制法:将预处理后的原料蛋放入已洗净消毒的腌制箱中,加入含盐量20%的食盐溶液,使原料蛋完全浸没在腌制液中,用竹篾压住蛋,防止上浮,放置在阴暗处室温腌制20 d;超声波辅助腌制:将预处理后的原料蛋放入已洗净消毒的腌制箱中,加入含盐量20%的腌制液,使原料蛋完全浸没在腌制液中,用竹篾压住蛋,防止上浮,放置在阴暗处室温腌制20 d,期间将鸭蛋放入超声波槽内进行超声,完成后重新放入腌制箱内腌制。

1.2.3 超声波处理单因素实验 经预处理后的鸭蛋分成5组,每组36个,采用1.2.2工艺腌制咸蛋。超声波条件固定在超声时间30 min,功率300 W,频率40 kHz,探究超声次数分别0、2、3、4、5次(不超声、每隔10 d 超声一次、7 d 超声一次、5 d 超声一次、4 d 超声一次)时对鸭蛋腌制的影响。超声波条件固定在超声次数3次,功率300 W,频率40 kHz,探究超声时间分别为0、10、20、30、40、50 min 时对鸭蛋腌制的影响。超声波条件固定在超声次数3次,时间30 min,频率40 kHz,探究超声功率分别为0、200、250、300、350、400 W 时对鸭蛋腌制的影响。超声波条件固定在超声次数3次,时间30 min,功率300 W,探究超声频率分别为0、20、40、60、80 kHz 时对鸭蛋腌制的影响。每隔5 d 取一次样,每组3个,分别检测咸蛋含盐率、含水率、出油率、pH、蛋清粘度指标,结果取平均值。

1.2.4 正交优化试验 通过超声波4个单因素试验优化出来较优的3个水平,进行4因素3水平的正交试验,测定蛋清、蛋黄含盐率,蛋黄出油率等指标,优化出最佳的超声条件。

表1 正交试验因素水平

Table 1 The factors of orthogonal test

水平	因素			
	A 超声次数	B 超声时间 (min)	C 超声功率 (W)	D 超声频率 (kHz)
1	2	20	250	20
2	3	30	300	40
3	4	40	350	60

1.2.5 蛋清、蛋黄含盐率的测定 采用硝酸银滴定法<sup>[13]</sup>:蛋清、蛋黄分离后,搅拌均匀。分别称取1 g 于锥形瓶中,加20 mL 蒸馏水,用玻璃棒搅拌混合均匀后,加入5% 铬酸钾8~9 滴,用0.1 mol/L 硝酸银溶液滴定,至溶液由黄色变成砖红色即为滴定终点,记录消耗硝酸银体积。

$$\text{含盐率}(\%) = \frac{0.05844 \times N \times V}{m} \times 100$$

式中: N 为 AgNO<sub>3</sub> 的浓度(mol/L); V 为消耗 AgNO<sub>3</sub> 的体积(mL); m 为样品重量(g); 0.05844 为 NaCl 的当量。

1.2.6 蛋清、蛋黄含水率的测定 参考饶红花<sup>[13]</sup> 蛋清蛋黄用分蛋器分离,搅拌均匀,用电子天平准确称取样品3 g 于干燥的铝盒中,记作 m。称量烘干前样品与铝盒的质量记作 W<sub>1</sub>,将称好的样品放入105 ℃ 的热风恒温干燥箱中6 h,取出后放入干燥器中冷

却,称量烘干后样品及铝盒的质量记作  $W_2$ ,直到两次称量质量差小于等于 0.4 mg 为止,同一组样品均取 3 个平行。计算公式如下:

$$\text{含水率}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{m} \times 100$$

式中: $W_1$  为干燥前样品质量 + 铝盒质量(g); $W_2$  为干燥后样品质量 + 铝盒质量(g); $m$  为样品质量(g)。

1.2.7 蛋黄出油率的测定 参考吴玲<sup>[14]</sup>方法。蛋清蛋黄经分蛋器分离后,用电子天平准确称取 3 g 蛋黄加入 35 mL 正己烷/异丙醇(3:2, V/V),在均质机 5000 r/min 转速下均质 10 min。滤纸过滤,滤液于 55 °C 旋转蒸发仪中旋蒸浓缩,后置于 105 °C 热风恒温干燥箱中烘干至恒重,称其滤渣质量记作总的脂质含量  $M_1$ 。另取 5 g 蛋黄加入 25 mL 蒸馏水,25 °C 温度 10000 r/min 离心 30 min,吸取上清液于梨形分液漏斗中,加入正己烷/异丙醇(3:2, V/V)溶解掉悬浮物,将脂质层分离出来,溶解于其中的有机溶剂在旋转蒸发仪中以 55 °C 的条件下旋蒸,105 °C 的烘箱中除去残留水分,称量残渣质量记作游离脂质含量  $M_2$ 。计算公式如下:

$$\text{出油率}(\%) = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

式中: $M_1$  为总脂肪含量(g); $M_2$  为游离脂肪含量(g)

1.2.8 蛋清、蛋黄 pH 测定 参照 GB/T 5009.47-2003 《蛋与蛋制品卫生标准的分析方法》,咸蛋煮熟后,剥壳,蛋白蛋黄分离,分别称取 10 g,加入蒸馏水至 150 mL,3000 r/min 均质 1 min,过滤掉残渣,精密 pH 计测定,记录。

1.2.9 蛋清粘度测定 每一组取 3 个样品蛋,蛋清蛋

黄分离后,蛋清用磁力搅拌器搅拌均匀,装入 50 mL 可立离心管,旋转黏度仪用 Sp1 号转子在常温,转速 60 r/min 下测定,待示数较稳定后(5 min 后),读数,每隔 5 s 记一次,取平均值。

1.2.10 统计分析 实验所得数据使用 SPSS 17.0 软件进行显著性分析,origin 8.5 软件绘图,图表中试验数据均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 超声波单因素对咸蛋各指标的影响

2.1.1 不同超声条件对咸蛋腌制过程中蛋清、蛋黄含盐率的影响 蛋清蛋黄含盐率是形成咸蛋独特风味的决定性因素。由图 1 可知,蛋清、蛋黄含盐率随腌制时间的延长而逐渐提高,且超声组蛋清蛋黄含盐率均高于未超声组(传统腌制),表明超声波可以明显提高食盐的渗透速率。这可能由于超声波通过机械振荡特性,能够加快腌制液中粒子的运动速度,清除蛋孔内的沉积物,增大传质通道,并提高蛋生物膜的通透性,改变蛋黄蛋清蛋白质的内部结构,提高食盐渗透速率<sup>[15]</sup>;另外超声波空化效应具有击碎作用,使蛋清蛋白质颗粒分子之间相互聚合减少,从而降低蛋清粘度,减少食盐在蛋内的扩散阻力,提高腌制速率<sup>[16-17]</sup>。

超声波的四个单因素在加快咸蛋腌制速度上都有显著地效果,且不同超声波处理组差异显著( $p < 0.05$ )。超声次数单因素试验中,其他条件保持不变的情况下,蛋清、蛋黄含盐率随超声次数的增加而逐渐增加,在腌制 20 d 后,超声波处理 4 次组,蛋清、蛋黄含盐率均达到最大,与传统腌制组相比,蛋清含盐率提高 38.90%,蛋黄提高 18.75%。之后,当超声次数增加到 5 次时,蛋清、蛋黄含盐率低于超声 4 次组,且蛋壳表面出现裂纹,品质降低。超声时间单因素

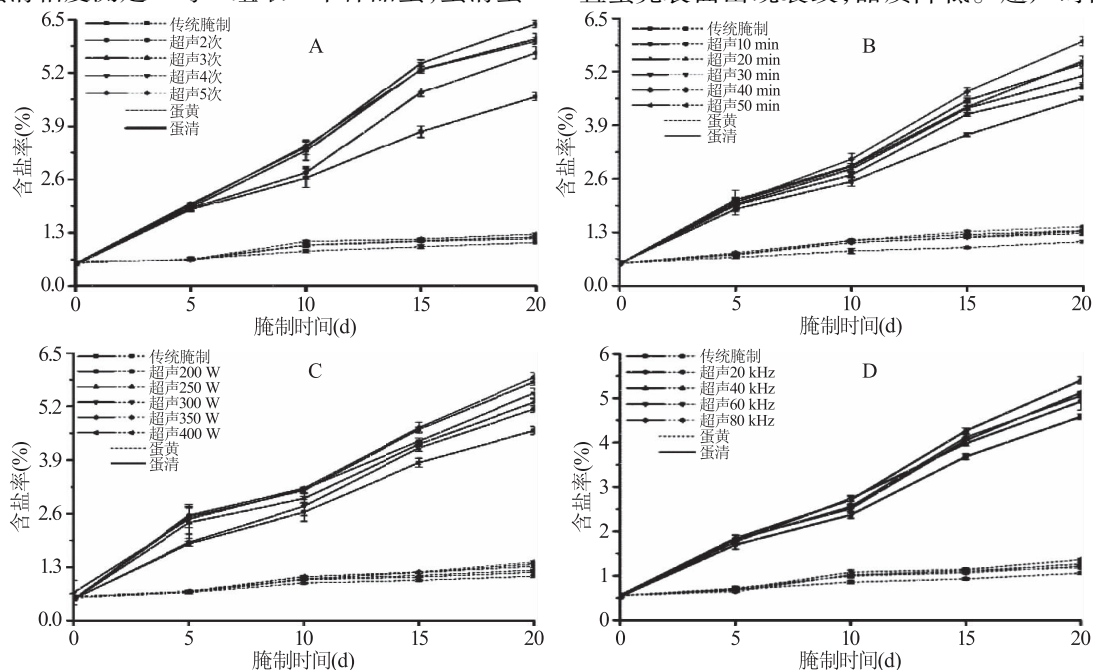


图 1 不同超声条件下蛋清蛋黄含盐率的变化

Fig.1 Changes of salt content in egg white and yolk under different ultrasound conditions

注:A 超声波次数;B 超声波时间;C 超声波功率;D 超声波频率。图 2、图 4~图 6 同。



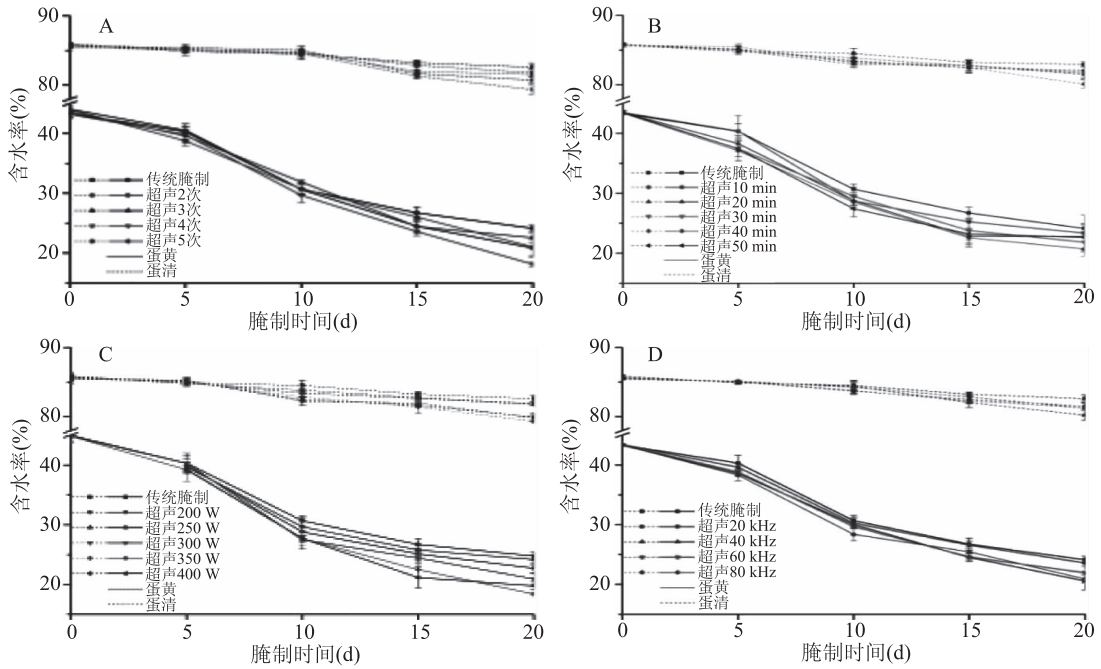


图2 不同超声条件下蛋清蛋黄含水率的变化

Fig.2 Changes of moisture content in egg white and yolk under different ultrasound conditions

试验中,在试验条件范围内,随超声时间的增加,咸蛋含盐率随之增加。在腌制 20 d 后,超声时间 40 min 组,咸蛋含盐率最大,蛋清 5.94%,比传统腌制组提高 23.27%,蛋黄含盐率 1.44%,较传统腌制组提高 34.57%,提升幅度高于蛋清。超声频率单因素试验中,超声频率 40 kHz 时,蛋清蛋黄含盐率最大,蛋清组之间的差异幅度虽没有蛋黄明显,但也差异显著( $p < 0.05$ )。超声功率的增大会加速介质粒子的运动速度,在腌制 20 d 后,超声功率 350 W 时,蛋清蛋黄含盐率最大,与传统腌制组相比,蛋清提高 28.01%,蛋黄提高 31.48%。若继续加大功率会造成蛋壳破裂。

2.1.2 不同超声条件对蛋清蛋黄腌制过程中含水率的影响 鸭蛋腌制过程,高浓度食盐腌制液在蛋壳内外形成高渗透压差,由渗透传质机理,腌制液中的食盐通过蛋壳进入蛋清蛋黄的同时,蛋清、蛋黄中的水分沿相反的方向渗透到腌制液中<sup>[18-19]</sup>。由图 2 知,随腌制时间的延长,蛋清、蛋黄含水率不断下降,且超声组均低于传统腌制组,可知超声波处理能显著降低蛋清、蛋黄含水率,提高腌制速率( $p < 0.05$ )。蛋清含水率的下降幅度低于蛋黄,由于腌制过程中,蛋清中的水转移到腌制液的同时,蛋黄中的水分因渗透压的差异又进入到蛋清中,所以蛋清下降幅度小于蛋黄<sup>[20]</sup>。

超声波四个单因素实验中,蛋清、蛋黄含水率均小于传统腌制组,且各组之间差异显著( $p < 0.05$ )。超声次数单因素实验中,在腌制 20 d 后,超声 4 次组(每隔 5 d 超声一次)蛋清蛋黄含水率降低最明显,相比较传统腌制组,蛋清含水率下降 7.14%,蛋黄下降 58.08%,而超声 5 次后下降幅度小于 4 次组。由于超声 5 次组的咸蛋煮熟后,蛋白出现蜂窝状孔洞如图 3,知超声 5 次后蛋清液有小气泡产生,延缓食

盐渗透速率且品质遭到破坏。超声时间单因素试验中,在腌制 20 d 后,超声时间 40 min 组,咸蛋含水量最少,蛋清含水率 80.11%,较传统腌制组降低 3.4%;蛋黄含水率 20.71%,较传统腌制组降低 14.14%。超声功率组,在腌制 20 d 后,超声功率 350 W 组蛋清蛋黄水分含量最低,蛋清含水率 79.32%,低于传统腌制组 3.98%,蛋黄 18.43%,较传统腌制组降低 26.02%。超声频率组,在腌制 20 d 后,超声频率 40 kHz 时,咸蛋水分损失最多,蛋清 80.21%,较传统腌制组降低 2.89%,蛋黄 20.56%,较传统腌制组降低 14.77%。

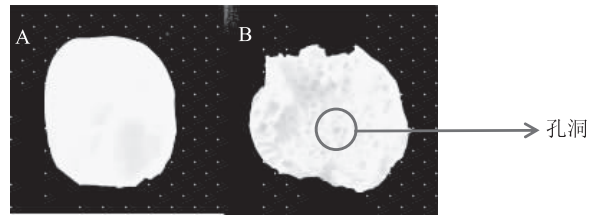


图3 传统腌制和超声 5 次蛋白剖面形态

Fig.3 Proteins preserved by traditional methods and protein cross-sections after 5 treatments

注:A 传统腌制蛋白剖面图;B 超声波处理 5 次蛋白剖面图。

2.1.3 不同超声条件对蛋清蛋黄腌制过程中 pH 的影响 咸蛋腌制过程中,食盐通过蛋壳进入咸蛋,破坏蛋清、蛋黄中的一些碱性蛋白质如溶菌酶等,另外,咸蛋含水量的降低和蛋内碳酸气的排出以及蛋黄中脂质百分含量的降低,导致 pH 有所下降,蛋清 pH 由碱性向中性方向降低,蛋黄由中性向酸性方向降低<sup>[21-22]</sup>。由图 4 知,腌制期间超声组的 pH 均低于未超声组,超声组咸蛋 pH 在腌制 5~7 d 后与传统腌制组有明显差异,超声组蛋清的降低程度大于蛋黄,且各组间差异显著( $p < 0.05$ )。

腌制期间蛋清 pH 由 9.57 降低至 8.3 左右,蛋黄相对蛋清降低幅度较小。超声 4 次、5 次时,蛋清蛋

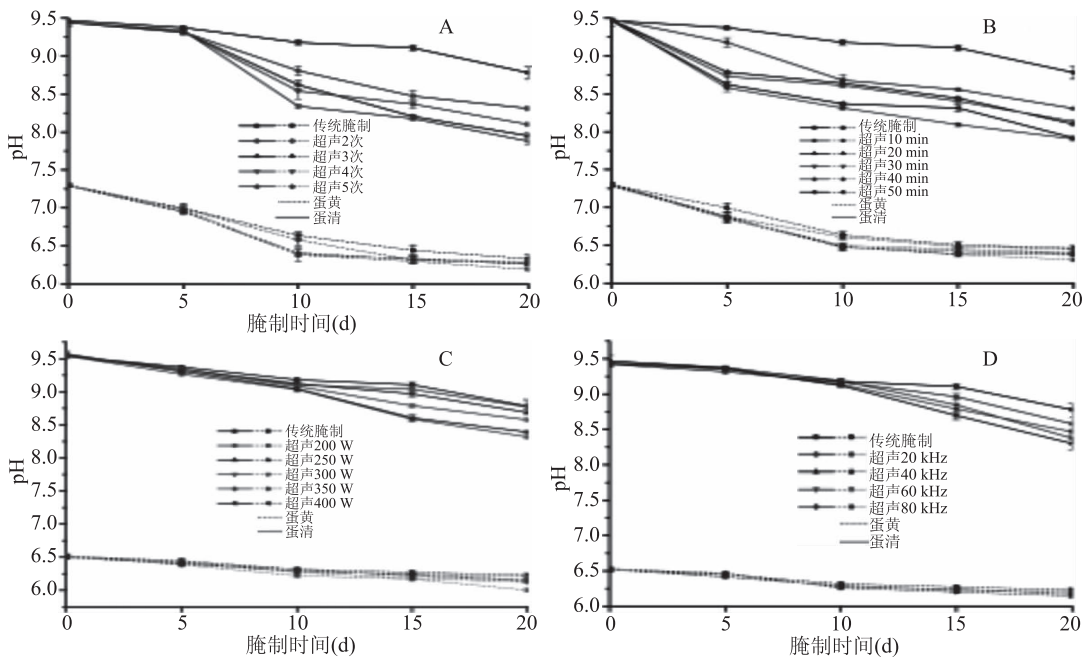


图4 不同超声条件下蛋清蛋黄 pH 的变化

Fig.4 Changes of pH of egg white and yolk under different ultrasound conditions

黄 pH 降低较大,表明咸蛋盐含量较大,对碱性蛋白质的破坏较多。超声时间 40 min 时,蛋清、蛋黄较传统腌制组降低最大,蛋清 pH7.91,比传统腌制组降低 9.9%,蛋黄 pH6.31,比传统腌制组 (pH6.46) 仅降低 2.37%。超声功率组,超声组 pH 均低于传统腌制组,蛋清蛋黄组之间均差异显著 ( $p < 0.05$ ),超声功率 350、400 W 时,蛋清 pH 降低最大。超声频率组蛋清 pH 在腌制 12 d 左右开始明显低于传统腌制组,超声频率 40 kHz 时,蛋清蛋黄 pH 降低幅度最大。

2.1.4 不同超声条件对腌制过程中蛋黄出油率的影响 蛋黄中含 22% 的颗粒部分和 72% 的浆质,蛋黄

颗粒由 17% 的卵黄高磷蛋白,70% 的高密度脂蛋白 (HDL) 和 12% 的低密度脂蛋白组成,而浆质部分由 85% 的低密度脂蛋白 (LDL) 和 15% 的卵黄球蛋白组成<sup>[23]</sup>,低密度脂蛋白部分含有 90% 的脂质。腌制后,脂蛋白结构被破坏,蛋黄中的部分脂质游离出来,但其总脂质含量不变<sup>[24-25]</sup>。蛋黄中游离脂质含量在总脂质中所占的比例即蛋黄出油率,蛋黄出油率与食盐的渗入量和水分的损益有一定的联系。随着水分的减少,促使蛋黄颗粒缩小并紧密的挤压在一起,形成咸蛋黄特有的沙粒感<sup>[26-28]</sup>。

图 5 可知,腌制 6~7 d 后,超声组蛋黄出油率开

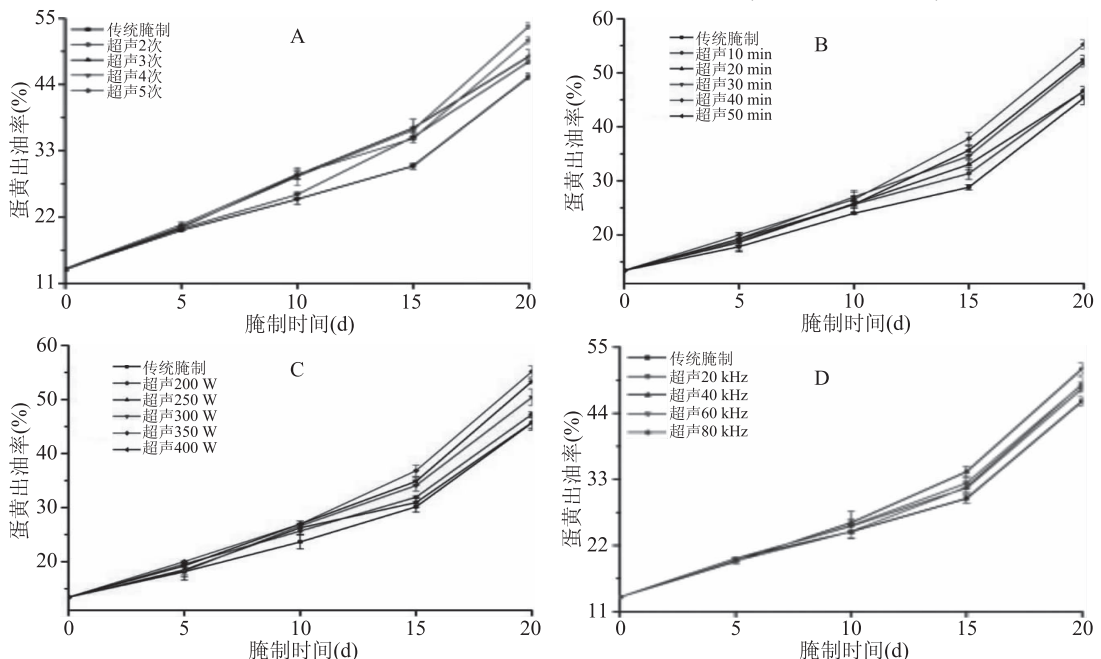


图5 不同超声条件下蛋黄出油率的变化

Fig.5 Changes of egg yolk oil yield of egg yolk under different ultrasound conditions

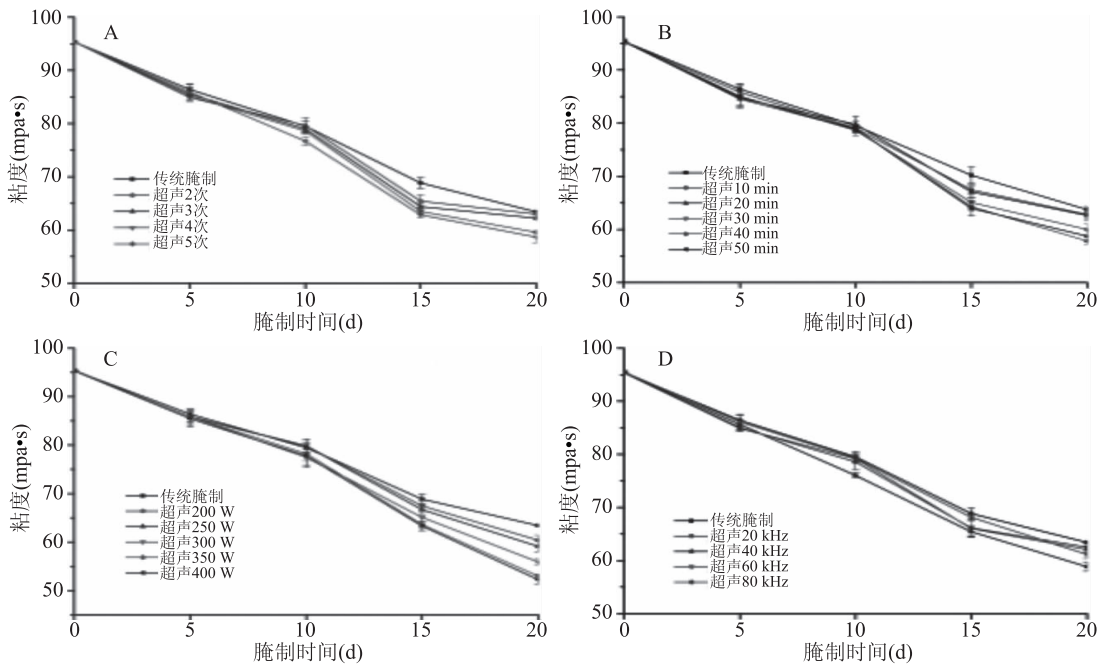


图6 不同超声条件下蛋清粘度的变化

Fig.6 Changes of viscosity of egg white under different ultrasound conditions

始显著高于传统腌制组 ( $p < 0.05$ )。超声次数单因素试验中,随超声次数的增加,出油率随之升高,超声4次时达到53.73%,比传统腌制组提高18.53%。超声时间单因素试验,超声时间40 min时,蛋黄出油率达到55.28%。超声功率试验中,超声功率350 W时,出油率55.18%。超声频率单因素试验中,超声频率40 kHz时,蛋黄出油率51.39%。在试验条件范围内,超声波四个单因素中,超声时间这一单因素对蛋黄出油率影响最大。

2.1.5 不同超声条件对腌制过程中蛋清粘度的影响 鸭蛋蛋清是一种假塑性非牛顿流体<sup>[29]</sup>,有浓厚蛋白和稀薄蛋白两种状态。实际上,在鸭蛋正常储藏过程中,浓厚蛋白变稀是其自身新陈代谢的必然结果,但速率非常缓慢。腌制过程中,随着食盐的渗入,维持蛋清蛋白质特殊结构的次级键和配位键受到破坏,特别是浓厚蛋白,蛋清粘度不断降低,加速蛋清稀化<sup>[29-31]</sup>。

图6所示,食盐的渗入破坏了蛋清蛋白的空间结构,蛋清状态逐渐呈水样化,表观粘度值降低。在腌制时间12~13 d左右,超声组开始明显高于传统腌制组,可能由于超声波的空化效应具有击碎作用,能够使蛋清蛋白质颗粒之间的相互聚合减少,降低蛋清的粘度。超声次数单因素试验中,超声4~5次,蛋清粘度降低最大。超声4次时,蛋清粘度值59.33 mpa·s,比传统腌制组降低6.42%,5次时,蛋清粘度值59.56 mpa·s,比传统腌制组降低6.06%。但超声5次时,蛋壳出现破裂,品质受到破坏,所以超声4次最佳。超声时间40 min时,蛋清表观粘度降低最多,蛋清稀样化程度较大。其他超声因素一定时,随着超声功率的增大蛋清表观粘度逐渐降低,超声功率400 W时,蛋清粘度最低52.25 mpa·s,较传统腌制组(63.39 mpa·s)低17.58%,但易造成蛋壳破裂,所以

最佳超声功率是350 W。超声频率40 kHz时,蛋清粘度值58.84 mpa·s,仅比传统腌制组降低7.18%。超声波四个单因素中,超声功率对蛋清表观粘度影响程度最大。

2.1.6 超声波单因素优化结果 实验结果得出四个单因素较优的三个水平:超声波次数2次、3次、4次;超声波时间20、30、40 min;超声波功率250、300、350 W;超声波频率20、40、60 kHz。

## 2.2 正交实验结果

正交实验结果见表2、方差分析见表3~表5。

表3 蛋清含盐率方差分析表

Table 3 Variance analysis of salt content of egg white

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	1.464	2	162.667	9.000	*
B	0.009	2	1.000	9.000	
C	0.237	2	26.333	9.000	*
D	0.104	2	11.556	9.000	*
误差	0.01	2			

注: \* 为显著 ( $p < 0.05$ ),表4~5同。

表4 蛋黄含盐率方差分析表

Table 4 Variance analysis of salt content of egg yolk

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	10.195	2	195.000	9.000	*
B	0.035	2	35.000	9.000	*
C	0.063	2	63.000	9.000	*
D	0.001	2	1.000	9.000	
误差	0.00	2			

由表2 蛋清蛋黄含盐率及蛋黄出油率直观分析表,由4个因素的均值及极差数据,分析出对蛋清含盐率影响的主次顺序是A > C > D > B,优方案是A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,对蛋黄含盐率影响的主次顺序是A > C >

表2 蛋清蛋黄含盐率及蛋黄出油率正交实验结果

Table 2 The orthogonal experimental results of salt content and yolk oil yield of egg yolk

水平	A	B	C	D	Y <sub>1</sub> 蛋清含盐率 (%)	Y <sub>2</sub> 蛋黄含盐率 (%)	Y <sub>3</sub> 蛋黄出油率 (%)
1	1	1	1	1	5.19	1.07	47.81
2	1	2	2	2	4.99	1.03	47.55
3	1	3	3	3	5.69	1.11	48.46
4	2	1	2	3	6.11	1.27	53.42
5	2	2	3	1	6.37	1.58	57.53
6	2	3	1	2	6.01	1.36	54.64
7	3	1	3	2	6.19	1.40	55.65
8	3	2	1	3	6.18	1.48	57.01
9	3	3	2	1	6.01	1.19	54.08
Y <sub>1</sub> 均值 k <sub>1</sub>	5.290	5.830	5.793	5.857			
Y <sub>1</sub> 均值 k <sub>2</sub>	6.136	5.847	5.703	5.730			
Y <sub>1</sub> 均值 k <sub>3</sub>	6.127	5.903	6.083	5.993			
Y <sub>1</sub> 极差	0.873	0.073	0.380	0.263			
因素主次				A > C > D > B			
最优方案				A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>			
Y <sub>2</sub> 均值 k <sub>1</sub>	1.070	1.247	1.303	1.280			
Y <sub>2</sub> 均值 k <sub>2</sub>	1.403	1.363	1.163	1.263			
Y <sub>2</sub> 均值 k <sub>3</sub>	1.357	1.220	1.363	1.287			
Y <sub>2</sub> 极差	0.333	0.143	0.200	0.024			
因素主次				A > C > B > D			
最优方案				A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>			
Y <sub>3</sub> 均值 k <sub>1</sub>	47.940	52.293	53.153	53.140			
Y <sub>3</sub> 均值 k <sub>2</sub>	55.197	54.030	51.683	52.613			
Y <sub>3</sub> 均值 k <sub>3</sub>	55.580	52.393	53.880	52.963			
Y <sub>3</sub> 极差	7.640	1.737	2.197	0.527			
因素主次				A > C > B > D			
最优方案				A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>			

表5 蛋黄出油率方差分析表

Table 5 Variance analysis of oil content of egg yolk

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	106.049	2	576.353	9.000	*
B	6.951	2	37.777	9.000	*
C	10.181	2	55.332	9.000	*
D	0.184	2	1.000	9.000	
误差	0.18	2			

B > D, 优方案是 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>, 对蛋黄出油率影响的主次顺序是 A > C > B > D, 优方案是 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub>, 从表 3 蛋清含盐率方差分析表得出, 超声波超声次数、超声功率、超声波频率三个单因素对蛋清含盐率影响显著 ( $p < 0.05$ )。从表 4 蛋黄含盐率方差分析表得出超声波次数、超声波时间、超声波功率对蛋黄含盐率影响显著。从表 5 蛋黄出油率的方差分析表得出超声次数、超声时间、超声功率对蛋黄出油率影响显著。由多数倾向及对各因素的指标的重要程度得出最佳工艺参数是 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>, 即超声次数 3 次、超声时间 30 min、超声功率 350 W、超声频率 60 kHz。但已做的 9 组试验中, 最佳一组是 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub>, 即超声次数 3 次、超声时间 30 min、超声功率 350 W、超声频率

20 kHz。所以要进行验证试验。

### 2.3 验证试验结果

由图 7 蛋清、蛋黄含盐率及蛋黄出油率可明显看出, 超声波工艺参数是 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub> 即超声次数 3 次、超声时间 30 min、超声功率 350 W、超声频率 20 kHz 时, 在腌制 20 d 后, 蛋清蛋黄含盐率最高, 蛋清 6.37%, 蛋黄 1.58%, 蛋黄出油率最高, 为 57.53%。

### 3 结论

本实验通过对鸭蛋腌制过程中含盐率、含水率、蛋黄出油率、pH、蛋清表观粘度指标的变化, 得出超声波技术通过有效的降低蛋清粘度, 减小食盐渗透阻力, 增大传质面积, 增大咸蛋腌制速率, 缩短腌制时间。探究了超声波 4 个单因素 (超声波次数、超声时间、超声波功率、超声波频率) 对超声辅助效果的影响, 并通过正交试验优化出最佳超声波工艺参数。结果如下: 超声波 4 个单因素对咸蛋腌制效果均有明显影响, 其中超声次数、超声功率、超声时间对辅助效果影响较大, 超声频率影响程度较低。正交试验优化出超声波最佳条件为: 超声次数 3 次、超声时间 30 min、超声功率 350 W、超声频率 20 kHz 时辅助效果最好, 在此条件下, 20 d 即可完成腌制, 与



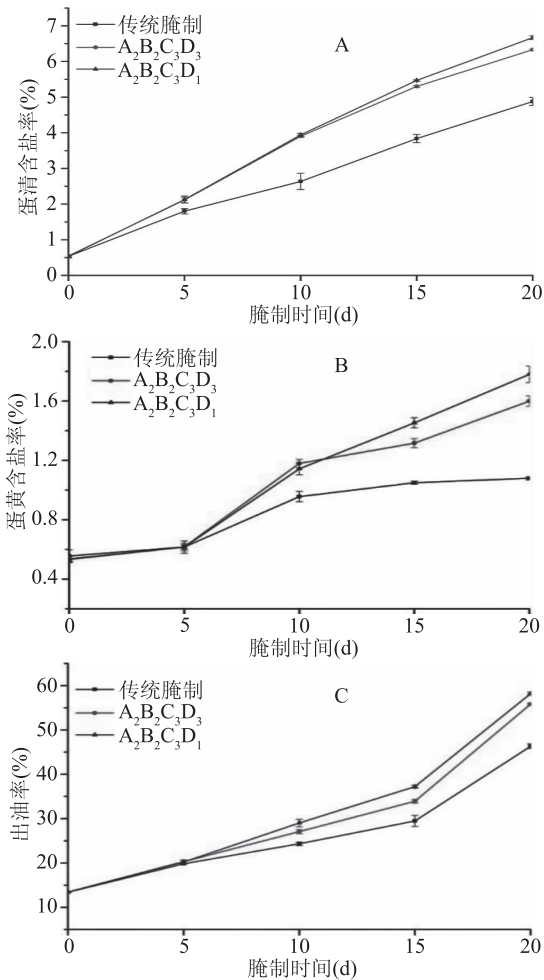


图7 腌制期间蛋清、蛋黄含盐率和蛋黄出油率的变化

Fig.7 Changes in egg white and egg yolk salt content and egg yolk output rate during pickling

传统腌制相比,提前15~20 d左右。超声波技术操作简便,经济费用低,适合在工厂规模化生产下使用。

参考文献

[1] 李祥睿,陈洪华.新型咸蛋腌制方法研究[J].食品科技,2008(2):63-66.  
 [2] 蒲跃进,杜金平,梁振华,等.循环水腌制咸蛋工艺研究[J].中国家禽,2010,32(16):25-27,31.  
 [3] 陈石头,高振江.脉动压力腌制禽蛋的试验研究[J].农业工程学报,2006(S2):163-166.  
 [4] 王晓拓,高振江.脉动压技术腌制鸡蛋工艺优化[J].食品科学,2010,31(8):97-101.  
 [5] 徐明生,董开发,鄢建芬,等.香辛料对咸蛋腌制的影响[J].肉类研究,2000(4):37-38.  
 [6] 郑玉婧,刘树滔,陈躬瑞,等.超声波技术在咸蛋腌制中的应用及其机理初探[J].福州大学学报:自然科学版,1996(3):73-76.  
 [7] Lenart I, Ausländer D. The effect of ultrasound on diffusion through membranes[J]. Ultrasonics, 1980, 18(5):216.  
 [8] Simal S, Benedito J, Sánchez E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(3):323-336.  
 [9] 冯婷,孙京新,邢新涛,等.超声波辅助滚揉对生鲜鸡肉腌制效果的影响[J].食品工业科技,2014,35(18):98-100,105.

[10] 丁捷,任正伟,何江红,等.响应面法优化泡椒猪肝超声波辅助腌制工艺[J].食品工业,2017,38(5):97-101.  
 [11] 李鹏,孙京新.超声波辅助腌制技术在铁蛋加工中的应用研究[J].食品科技,2017,42(11):84-89.  
 [12] 赖宜萍,林向阳,朱榕壁,等.超声波辅助咸蛋快速腌制方法[J].食品与机械,2011,27(1):134-135,142.  
 [13] 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.  
 [14] 吴玲.咸蛋低钠脉动压腌制新技术的研究[D].武汉:华中农业大学,2011.  
 [15] 苏鹤,杨瑞金,赵伟,等.咸鸭蛋的快速腌制及品质控制技术的研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(17):205-208.  
 [16] Lai K M, Ko W C, Lai T H. Effect of NaCl penetration rate on the granulation and oil-off of the yolk of salted duck egg[J]. Food Science & Technology Research, 2009, 3(3):269-273.  
 [17] 钟赛意,王善荣,刘寿春.超声波技术在动物性食品中的应用[J].肉类研究,2006(11):33-37.  
 [18] 范娟娟.超声波辅助快速腌制咸蛋工艺的研究[D].福州:福建农林大学,2013.  
 [19] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Effect of NaCl on thermal aggregation of egg white proteins from duck egg[J]. Food Chemistry, 2011, 125(2):706-712.  
 [20] Wang X, Gao Z, Xiao H, et al. Enhanced mass transfer of osmotic dehydration and changes in microstructure of pickled salted egg under pulsed pressure[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1):141-150.  
 [21] 廖明星,朱定和.咸蛋加工过程的腌制成熟机理初探[J].食品工业科技,2008(4):324-326.  
 [22] 荣建华,张正茂,韩晓,等.腌制过程中咸蛋品质变化的动态分析[J].华中农业大学学报,2006(6):676-678.  
 [23] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Changes in chemical composition, physical properties and microstructure of duck egg as influenced by salting[J]. Food Chemistry, 2009, 112(3):560-569.  
 [24] Lai K M, Chi S p, Ko W C. Changes in yolk states of duck egg during long-term brining[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1999, 47(2):733.  
 [25] Yang N, Jin Y, Xu Y, et al. Effect of pressure cooking on physicochemical properties of salted eggs[J]. Rsc Advances, 2016, 6(99):97089-97095.  
 [26] Zhou B, Zhang M, Fang Z X, et al. Effects of ultrasound and microwave pretreatments on the ultrafiltration desalination of salted duck egg white protein[J]. Food & Bioproducts processing, 2015, 96:306-313.  
 [27] Yang N, Jin Y, Xu Y, et al. Effect of pressure cooking on physicochemical properties of salted eggs[J]. Rsc Advances, 2016, 6(99):97089-97095.  
 [28] 冯月超,刘美玉,任发政,等.不同储藏温度对鸡蛋清表观粘度的影响[J].肉类研究,2006(9):32-34.  
 [29] Chi S P, Tseng K H. physicochemical properties of salted pickled yolks from duck and chicken eggs[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(1):27-30.  
 [30] 戴浩亮.优质清洁咸蛋生产新工艺研究[D].南昌:江西农业大学,2011.  
 [31] 荣建华,张正茂,冯磊,等.咸蛋盐水腌制动力学研究[J].农业工程学报,2007(2):263-266.