

真空滚揉工艺优化对复合低钠替代盐 调理牛肉的品质改善

杨书捷^{1,2}, 陈津津¹, 张龙涛^{1,2}, 徐智勇³, 郑宝东^{1,2}, 缪松^{1,2}, 邓凯波^{1,2*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 中国-爱尔兰国际合作食品物质学与结构设计研究中心, 福建福州 350002) (3. 莆田市城厢区诚味食品有限公司, 福建莆田 351100)

摘要: 为了满足复合低钠替代盐调理牛肉的工业化生产需求, 该研究在单因素试验基础上, 研究液料比、滚揉时间、真空度对腌制吸收率和蒸煮损失率的影响, 通过中心组合 (Box-Behnken) 和响应面法确定调理牛肉真空滚揉的最佳工艺, 并对静置腌制和滚揉腌制调理牛肉的质构特征、剪切力、水分分布、微观结构进行分析。结果所得最佳滚揉工艺参数: 液料比 32%、滚揉时间 3.0 h、真空度 0.06 MPa, 在此条件下得到腌制吸收率 24.65%, 蒸煮损失率为 26.39%。滚揉组调理牛肉的硬度、弹性、咀嚼性和剪切力均显著低于静腌组 ($P<0.05$), 不易流动水和自由水弛豫时间显著低于静腌组 ($P<0.05$), 并且自由水弛豫峰面积显著高于静腌组 ($P<0.05$)。扫描电镜图显示, 滚揉组的肌原纤维结构更加松散, 并且有碎片化结构附着表面。结果表明, 滚揉处理能够改善调理牛肉的质构特征, 提高嫩度, 提高保水性, 微观上使肌原纤维产生碎片化结构。该研究为复合低钠替代盐调理牛肉的滚揉工艺提供技术支持, 为营养型低钠调理肉制品工业化生产提供理论依据。

关键词: 复合低钠替代盐; 调理牛肉; 工艺优化; 嫩度; 水分分布; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2023)02-63-71

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.1144

Optimization of the Vacuum Tumbling Process for Quality Improvement of Beef Processed with Complex Low-sodium Salt Substitutes

YANG Shujie^{1,2}, CHEN Jinjin¹, ZHANG Longtao^{1,2}, XU Zhiyong³, ZHENG Baodong^{1,2}, MIAO Song^{1,2},
DENG Kaibo^{1,2*}

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2. China-Ireland International Research Centre of Food Material Science and Structure Design, Fuzhou 350002, China)

(3. Putian Chengxiang Chengwei Food Co. Ltd., Putian 351100, China)

Abstract: To meet the industrial production requirements of beef processed with complex low-sodium salt substitutes, based on the results of single-factor experiments, the effects of curing liquid/meat ratio, tumbling time, and vacuum degree on the absorption rate of curing and rate of cooking loss were investigated. Subsequently, the vacuum tumbling process was optimized using the Box-Behnken design and response surface methodology, and the textural characteristics, shear force, moisture distribution, and microstructure were compared between beef cured statically and by tumbling. The optimal vacuum tumbling process parameters were the curing liquid/meat ratio of 32%, tumbling time of 3.0 h, and vacuum degree of 0.06 MPa. Under these conditions, the absorption rate of curing was 24.65%, while the rate of cooking loss was 26.39%. The firmness, elasticity, chewiness, and shear force of beef cured by tumbling were significantly lower than those of beef cured statically ($P<0.05$), and the relaxation time of bound and free water was also significantly lower in the former group ($P<0.05$). However, the peak area of

引文格式:

杨书捷, 陈津津, 张龙涛, 等. 真空滚揉工艺优化对复合低钠替代盐调理牛肉的品质改善[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 63-71

YANG Shujie, CHEN Jinjin, ZHANG Longtao, et al. Optimization of the vacuum tumbling process for quality improvement of beef processed with complex low-sodium salt substitutes [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 63-71

收稿日期: 2022-09-09

基金项目: 福厦泉自创区协同专项 (3502ZCQXT2021005); 福建省科技计划区域发展项目 (2019N3004); 福建省高校创新团队发展计划 (闽教科[2020]12号)

作者简介: 杨书捷 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工技术, E-mail: 316157345@qq.com

通讯作者: 邓凯波 (1983-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 肉品加工技术, E-mail: dkbfst@163.com

free water relaxation was significantly higher in the tumbling group than in the static curing group ($P < 0.05$). Scanning electron micrographs showed that the myofibril structures in the tumbling group were looser, with more fragmented structures attached onto the surface. Therefore, vacuum tumbling treatment can improve the textural characteristics, tenderness, and water retention of processed beef and induce microscopic fragmentation of myofibril structures. These findings provide technical support for the tumbling treatment of beef processed with complex low-sodium salt substitutes and build a theoretical basis for industrial production of nutritional low-sodium processed meat products.

Key words: complex low-sodium salt substitutes; processed beef; process optimization; tenderness; moisture distribution; microstructure

我国的牛肉表观消费量在近十年内一直在不断增长,从2010年至2020年增幅达到40.45%^[1]。市场中对于食用方便的肉制品需求不断增长,开发简单、易于制作、具有更高营养价值的深加工肉制品具有重要意义^[2]。调理肉制品是以畜禽肉等为原料,加以辅料进行初步加工后的非即食肉制品^[3]。低钠膳食已经受到了社会的广泛关注,减盐肉制品越来越受到消费者的喜爱,具有广阔的市场前景。钠盐对肉制品的作用在于获得诱人的质地,增加风味,改善多汁性及抑制微生物生长,故直接降低钠盐含量可能对其造成不利影响,这对肉制品行业是一项挑战^[4]。采用钠盐替代物部分取代肉制品中原有的钠盐、增加风味添加剂或品质改良剂、改进腌制技术等是现有低钠肉制品加工产业的研究热点^[5]。镁盐和钙盐常作为钠盐替代物使用,氯化镁可以提高肌原纤维蛋白的溶解度^[6],抗坏血酸钙有助于腌制肉制品形成稳定的色泽^[7],乳酸钾和食盐之间具有协同作用,能增加咸味,改善保水性,提高产量^[8],因此乳酸盐也能够用来降低钠盐含量。L-赖氨酸可作为肉制品的品质改良剂,具有增添肉制品风味,减少水分流失及改善质构特性的作用^[9];山梨糖醇作为无磷保水剂,在改善肉制品的质构特性和降低蒸煮损失上也具有显著效用^[10]。将钠盐替代物与品质改良剂协同作用,从配方上降低肉制品钠含量的同时,保证产品的食用品质。

钠盐替代物和品质改良剂使用可能会影响氯化钠的吸收和扩散效率。在氯化钠与乳酸钾盐腌猪肉中,乳酸钾会减少钠的吸收,减少的部分由更高的钾来补偿^[11];Liu等^[12]发现多羟基醇(甘油、山梨糖醇、木糖醇)介导腌制会降低钠盐的扩散和水分迁移,并且阻碍盐扩散到肉中。为使盐分能够均匀扩散到肉中,需通过一定加工技术来加速盐分的渗透吸收。因此,腌制配方的差异化必然需要加工工艺配合调整,以达到最佳效果。滚揉是肉制品加工最常用的腌制手段之一,它是通过机械作用力和低压环境使腌制液与原料肉能够接触得更加均匀并加速腌制液在肉中的渗透,能够改善肉制品的品质,已经在肉制品加工中得到了广泛的应用^[13]。但要将低钠调理牛肉同生产相结合,还需要进一步调整腌制工艺,以期在较短时间提高肉

制品均匀吸收腌制液,提升品质。并且复合替代盐调理牛肉的滚揉工艺以及滚揉工艺对调理牛肉的品质影响有待进一步研究。同时,将滚揉技术与复合替代盐调理牛肉的结合,能够使调理牛肉更加具有可生产性。

课题组前期确定的最佳复合低钠替代盐配方(2.4%食盐、0.8%乳酸钾、0.4%氯化镁、0.4%抗坏血酸钙、0.2% L-赖氨酸、4%山梨糖醇,质量分数)可显著降低调理牛肉的钠含量并保证原有品质^[14,15],但含水量较低,腌制时间较长,直接影响经济效益。因此,为满足工业化生产的需求,提高调理牛肉的出品率和食用品质,本研究在此基础上,以最佳配比腌制液和牛霖肉为原材料,以腌制吸收率与蒸煮损失率为指标,调整液料比、滚揉时间和真空度参数进行真空滚揉腌制,并采用响应面分析法对复合低钠替代盐调理牛肉的真空滚揉工艺进行优化,探讨其对肉品质构、微观结构和水分分布的改善,为复合低钠替代盐调理牛肉的工业化生产奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷鲜牛霖肉,福州大润发超市;乳酸钾,北京清源食品添加剂有限公司;氯化镁、抗坏血酸钙,石药集团维生素药业有限公司;L-赖氨酸,厦门墨奕怀食品贸易有限公司;山梨糖醇液,山东天力药业有限公司;食盐,四川久大制盐有限责任公司;以上试剂均为食品级。戊二醛电镜固定液、磷酸缓冲液,北京索莱宝科技有限公司;无水乙醇,国药集团化学试剂有限公司;以上试剂均为分析级。

1.2 仪器与设备

GR-30真空滚揉机,诸城市恒顺机械有限公司;电子分析天平,德国Sartorius公司;HH-6数显恒温水浴锅,常州国华电器有限公司;NMI20系列核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;TMS-Touch物性分析仪,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;Phenom ProX台式扫描电镜,复纳科学仪器(上海)有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验材料准备与静腌工艺

将冷鲜牛霖肉制备成大小为 3.5 cm×2.5 cm×0.8 cm 的牛肉片, 于-18 ℃中保藏, 滚揉腌制前 12 h 在 4 ℃环境中解冻, 取出沥干备用。腌制液提前配制后放置 4 ℃中保存, 腌制液各成分按腌制液质量分数计算添加量: 食盐 2.4%, 乳酸钾 0.8%, 氯化镁 0.4%, 抗坏血酸钙 0.4%, L-赖氨酸 0.2%, 山梨糖醇 4% (均为质量分数)。

静置腌制处理: 将牛霖肉与腌制液以 1:2 (m/m) 置于保鲜盒中, 在 4 ℃环境中腌制 4 h 后取出沥干, 以备后续指标测定。

1.3.2 腌制吸收率测定

滚揉前对肉片进行标记并称重, 滚揉结束后, 将肉片在沥水盆中静置 10 min, 将吸水纸覆盖在肉片表面吸水后称重, 腌制吸收率计算公式:

$$A = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A —腌制吸收率, %;

m_0 —滚揉前肉片质量, g;

m_1 —滚揉后肉片质量, g。

1.3.3 蒸煮损失率测定

将腌制后肉片 (m_2) 置于蒸煮袋中, 于 78 ℃水浴锅中加热至中心温度为 72 ℃时取出, 流水冷却至室温, 去除肉片表面水分后称重 (m_3), 蒸煮损失率 (B , %) 计算公式:

$$B = \frac{m_3 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B —蒸煮损失率, %;

m_2 —蒸煮前肉片质量, g;

m_3 —蒸煮后肉片质量, g。

1.3.4 单因素试验设计

滚揉机参数设定为: 10 r/min, 采用间歇滚揉方式, 滚揉 20 min, 休息 10 min, 根据不同因素试验调整滚揉工艺参数。不同液料比 (10%、20%、30%、40% 和 50%): 滚揉时间 3 h, 真空度 0.06 MPa; 不同滚揉时间 (1、2、3、4 和 5 h): 液料比 30%, 真空度 0.06 MPa; 不同真空度 (0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.10 MPa): 滚揉时间 3 h, 液料比 30%。

1.3.5 响应面试验设计

根据表 1 的 Box-Behnken 设计因素水平表, 在单因素试验的基础上, 以液料比、滚揉时间和真空度为

试验因素, 腌制吸收率和蒸煮损失率为响应值, 采用三因素三水平设计响应面试验, 共进行 17 组试验 (具体分组见表 2), 优化复合低钠调理牛肉的滚揉腌制工艺。

表 1 Box-Behnken 设计因素水平表

Table 1 Variables and levels used in Box-Behnken design

水平	因素		
	液料比/%	滚揉时间/h	真空度/MPa
-1	20	2	0.04
0	30	3	0.06
1	40	4	0.08

1.3.6 质构特性和剪切力测定

将复合低钠调理牛肉置于 78 ℃水浴中, 加热至肉片中心温度为 72 ℃时取出, 流水冷却至室温。蒸煮后的肉片分别切成 1.0 cm×1.0 cm 正方形和 1.0 cm×2.5 cm 长方形。采用 TMS-Touch 物性分析仪分别对调理牛肉进行质构和剪切力测定。TPA 测定: 采用 P/36R 探头, 测试距离 15 mm, 测试速度 50 mm/min, 最小感应力 0.75 N, 型变量 50%; 单刀剪切测定: 采用 HDP/BS 探头, 测试距离 25 mm, 测试速度 50 mm/min, 最小感应力 0.75 N。

1.3.7 低场核磁共振测定

将复合低钠调理牛肉在室温下平衡 30 min, 制成一定质量 (3 ± 0.5) g 肉块后放置在专用测定试管中。仪器磁场强度为 0.47 T, 磁体温度为 32 ℃, 共振频率为 22.6 MHz。采用 Carr-Purcell-Mei-boom-Gill (CPMG) 脉冲序列法测定横向弛豫时间 T_2 , 采样频率 200 kHz, 等待时间 1 500.000 ms, 回波时间 0.200 ms, 累加次数 8, 回波个数 6 000。测定后通过 Contin 软件反演操作获得衰减曲线, 得到横向弛豫时间, 并计算出相应的弛豫峰面积和比值。

1.3.8 扫描电镜观察

将复合低钠调理牛肉制备成 1.0 cm×1.0 cm×0.2 cm 肉块。样品在戊二醛电镜固定液 (2.5%) 溶液中固定 (4 ℃, 24 h), 然后采用 0.1 mol/L 磷酸缓冲液漂洗 2 次, 进行 ($\varphi=25\%$ 、50%、70% 和 90%) 乙醇梯度脱水, 再使用无水乙醇脱水 2 次, 真空冷冻干燥, 喷金后进行扫描电子显微镜观察。

1.4 数据分析

用 SPSS 25.0 统计软件对数据进行单因素方差分析 (ANOVA) 评估, 在 5% 的置信水平下, 通过邓肯检验 (Duncan) 对平均数进行比较。采用 Design Expert 13 软件进行响应面试验设计及结果分析, 用 Origin 2019b 绘图软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 液料比对腌制吸收和蒸煮损失的影响

由图 1 可知,随着液料比的提高,腌制吸收率逐渐增大,液料比为 50%时最高达到 31.13%,这可能是由于腌制液添加量的增加导致牛肉片表面与腌制液的接触面积增大,腌制吸收率随之增加。蒸煮损失率随液料比提高呈先减小后增大的趋势,当液料比为 30%时蒸煮损失率最低达到 26.17%。液料比为 10%~30%时,腌制吸收率上升,蒸煮损失同时降低,这与张东等^[16]研究结果相似。当液料比为 10%~30%时,蒸煮损失率逐渐降低可能是因为,此时的腌制液主要与肌原蛋白结合,提高了调理牛肉的持水性。但随着液料比进一步增加,此时多余的腌制液则无法与肌原蛋白结合,主要以自由水的形式存在,故外部加热时容易流失^[17],蒸煮损失率也随之上升。因此,液料比 20%~40%适合作为响应面试验的因素水平。

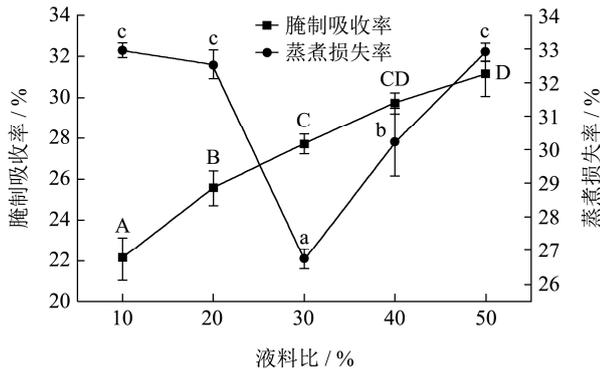


图 1 液料比对腌制吸收和蒸煮损失的影响

Fig.1 Effect of marinade/meat ratio on marinade absorption and cooking loss

注:图中不同大写英文字母表示试验组之间腌制吸收率差异显著,不同小写英文字母表示试验组之间蒸煮损失率差异显著 ($P<0.05$),下同。

2.2 滚揉时间对腌制吸收和蒸煮损失的影响

由图 2 可知,在 5 h 滚揉腌制过程内,腌制吸收率随滚揉时间的增加而逐渐升高,滚揉 5 h 时达到 34.05%。当滚揉时间增加时,调理牛肉的肌纤维因机械作用致间隙逐渐增大,腌制液渗透率增高,故腌制吸收率随之上升。随着滚揉时间的延长,蒸煮损失率在 1 h 至 3 h 呈现显著下降趋势,在 3 h 到 4 h 呈现显著上升趋势 ($P<0.05$),3 h 时蒸煮损失率最低仅为 25.46%。这可能是因为,在 3 h 时,盐溶性蛋白因滚揉作用释放到调理牛肉的表面,达到了保水效果^[18],而在 3 h 后随着滚揉时间进一步增加,调理牛肉的肌原纤维结构受到严重

的破坏,使肌原纤维蛋白内的水分向外扩散,蛋白质保水性下降,从而加剧了蒸煮损失^[19]。因此,滚揉时间 2~4 h 适合作为响应面试验的因素水平。

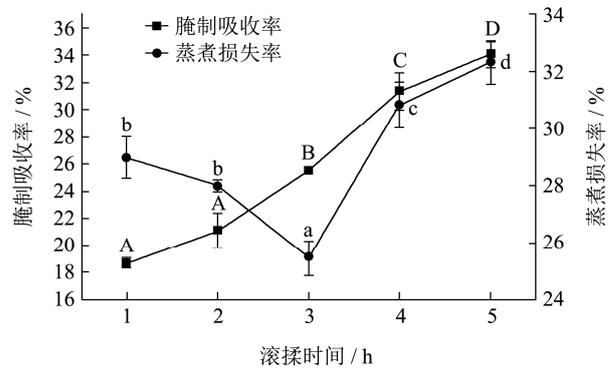


图 2 滚揉时间对腌制吸收和蒸煮损失的影响

Fig.2 Effect of tumbling time on marinade absorption and cooking loss

2.3 真空度对腌制吸收和蒸煮损失的影响

由图 3 可知,腌制吸收率随着真空度的增加不断升高,在 0.02~0.06 MPa 时显著增高 ($P<0.05$),在 0.06~0.08 MPa 时增长较为缓慢,最高为 29.64%。蒸煮损失率随着真空度增加先下降后上升 ($P<0.05$),其中在 0.06 MPa 时达到最低 26.17%,之后随着真空度上升而增高。腌制吸收率的升高可能是因为滚揉机内部产生的负压,使肌肉内部空气因内外部的压力差而被排出,所以腌制液能够有效渗透进肉块中^[20],同时因为负压作用排出空气,调理牛肉能够在蒸煮过程中不会因为空气膨胀现象造成结构变化,减少了汁液流失。但真空度过高时则挤压出原料肉的水分,所以腌制吸收率增速放缓^[21],同时真空度过高会严重破坏调理牛肉的肌纤维组织结构^[22],降低调理牛肉的保水性。综上所述,在一定范围内提高真空度,能够促进调理牛肉对腌制液的吸收,同时降低蒸煮损失,因此选择真空度 0.04~0.08 MPa 作为响应面试验的因素水平。

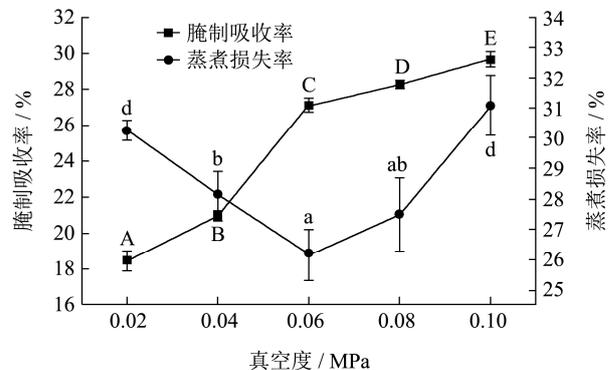


图 3 滚揉时间对腌制吸收和蒸煮损失的影响

Fig.3 Effect of vacuum degree on marinade absorption and cooking loss

2.4 复合低钠替代盐调理牛肉的滚揉腌制工

艺响应面优化结果

Design Expert 13 软件拟合出腌制吸收率 (Y_1) 和蒸煮损失率 (Y_2) 的二次多项式回归方程, 分别为:

$$Y_1=25.20+4.87A+0.94B+0.56C-0.18AB+0.61AC-0.92BC-1.40A^2-1.83B^2-0.45C^2 \quad (R^2=0.9714);$$

2.4.1 回归方程的建立与方差分析

$$Y_2=25.73+2.23A+0.19B+0.32C+0.34AB+0.33AC+0.002BC+1.55A^2=2.43B^2+1.19C^2 \quad (R^2=0.9827)。$$

表 2 为响应面试验结果, 根据表中的数据, 采用

表 2 Box-Behnken 试验设计表及结果

Table 2 The design and results of Box-Behnken experiments

试验号	液料比/%	滚揉时间/h	真空度/MPa	腌制吸收率/%	蒸煮损失率/%
1	20	2	0.06	16.70	27.48
2	40	2	0.06	26.62	31.78
3	20	4	0.06	17.68	26.94
4	40	4	0.06	26.87	32.60
5	20	3	0.04	18.61	26.26
6	40	3	0.04	27.33	29.56
7	20	3	0.08	18.17	26.72
8	40	3	0.08	29.31	31.33
9	30	2	0.04	19.71	28.95
10	30	4	0.04	24.68	29.58
11	30	2	0.08	23.00	29.11
12	30	4	0.08	24.30	29.75
13	30	3	0.06	25.57	25.17
14	30	3	0.06	23.69	25.88
15	30	3	0.06	25.27	25.75
16	30	3	0.06	25.37	25.80
17	30	3	0.06	26.12	26.03

表 3 腌制吸收率回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression equation for marinade absorption rate

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	229.62	9	25.51	26.39	0.000 1	**
A 液料比	189.83	1	189.83	196.34	<0.000 1	**
B 滚揉时间	7.01	1	7.01	7.25	0.030 9	*
C 真空度	2.49	1	2.49	2.57	0.152 8	
AB	0.133 2	1	0.133 2	0.137 8	0.721 5	
AC	1.46	1	1.46	1.51	0.258 2	
BC	3.39	1	3.39	3.50	0.103 5	
A ²	8.29	1	8.29	8.58	0.022 1	*
B ²	14.15	1	14.15	14.64	0.006 5	**
C ²	0.836 6	1	0.836 6	0.865 3	0.383 2	
残差	6.77	7	0.966 9			
失拟项	3.47	3	1.16	1.40	0.364 4	
纯误差	3.30	4	0.824 3			
总离差	236.39	16				

注: **表示差异极显著 ($P<0.01$), *表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

表4 蒸煮损失率回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of the regression equation for cooking loss

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	87.06	9	9.67	44.24	<0.000 1	**
A 液料比	39.92	1	39.92	182.58	<0.000 1	**
B 滚揉时间	0.300 3	1	0.300 3	1.37	0.279 5	
C 真空度	0.819 2	1	0.819 2	3.75	0.094 1	
AB	0.462 4	1	0.462 4	2.12	0.189 2	
AC	0.429 0	1	0.429 0	1.96	0.204 0	
BC	0.000 0	1	0.000 0	0.000 1	0.991 8	
A ²	10.08	1	10.08	46.09	0.000 3	**
B ²	24.80	1	24.80	113.44	<0.000 1	**
C ²	6.01	1	6.01	27.48	0.001 2	**
残差	1.53	7	0.218 6			
失拟项	1.10	3	0.366 4	3.40	0.134 1	
纯误差	0.431 3	4	0.107 8			
总离差	88.59	16				

通过 Design Expert 13 软件进行方差分析,腌制吸收率回归模型相关结果如表 3 所示。方程中因素 A、B² 对腌制吸收率影响极显著 (P<0.01), 因素 B、A² 影响显著 (P<0.05), 因素 C、AB、AC、BC、C² 影响不显著 (P>0.05)。根据二次多项回归方程一次项系数的大小, 可以判断出各因素对腌制吸收率影响的大小依次为液料比、滚揉时间、真空度, 液料比对腌制吸收率的影响最显著。以腌制吸收率为响应值时, 模型 P 值小于 0.01, 表明该二次项方程模型极显著。同时该模型失拟性在 0.05 水平上不显著 (P=0.366 4>0.05), 表示试验结果和数学模型拟合良好, 即模型选择合适, 可用该模型推测试验结果。该回归方程的相关系数 R²=0.971 4, 说明腌制吸收率的变化有 97.14% 来源于所选变量。同理, 从表 4 可以判断出各因素对蒸煮损失率影响的大小依次为液料比、真空度、滚揉时间, 液料比对腌制吸收率的影响最大, 模型选择合适。

2.4.2 响应面结果分析

响应面图能够反映各因素之间的相互作用, 表面坡度越陡峭, 因素对响应值影响越大。图 4 为各因素对调理牛肉腌制吸收率的交互影响, 图 4a、4b 响应面较陡, 腌制吸收率随着液料比与滚揉时间、液料比与真空度的提高呈现逐渐增大趋势, 说明前两组因素的交互作用对调理牛肉腌制吸收率的影响较大; 图 4c 响应面相对平缓, 说明真空度和滚揉时间的交互作用对腌制吸收率的影响较小。

图 5 反映各因素对调理牛肉蒸煮损失率的交互影响, 图 5a~c 响应面坡度较陡, 蒸煮损失率分别随液料

比、滚揉时间和真空度的增加均呈现先降低后升高的趋势, 在各因素的中心水平有最低值, 各因素之间存在明显的交互作用。

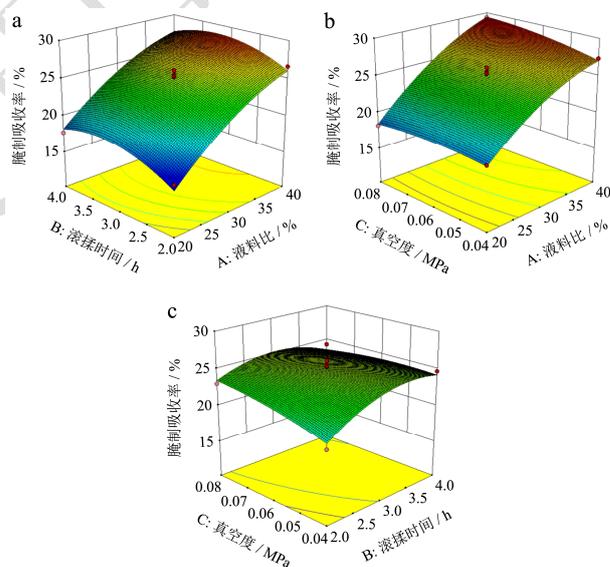
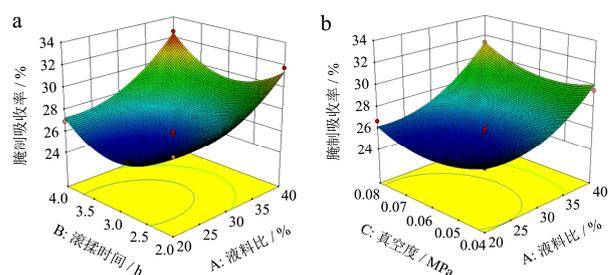


图4 因素交互作用对腌制吸收率影响的响应面图

Fig.4 Response surface plots showing the interactive effects of factors on the marinate absorption rate



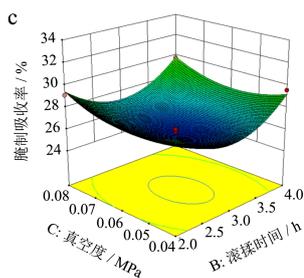


图 5 因素交互作用对蒸煮损失率影响的响应面图

Fig.5 Response surface plots showing the interactive effects of factors on cooking loss

2.5 工艺优化结果

通过 Design-Expert 13 数据分析软件优化, 得到调理牛肉最佳滚揉腌制工艺参数为液料比 32.021%、滚揉时间 3.046 h、真空度 0.060 MPa, 在此最佳工艺条件下, 腌制吸收率理论值为 26.177%, 蒸煮损失率理论值为 26.263%。考虑到可操作性, 将最优滚揉腌制条件调整为液料比 32%、滚揉时间 3.0 h、真空度 0.060 MPa。将调整后的参数进行验证实验, 得到调理

表 5 滚揉工艺对复合低钠替代盐调理牛肉质构和剪切力的影响

Table 5 Effects of tumbling process on texture and shearing force of beef marinated with compound low-sodium substitution salts

腌制方式	硬度/N	弹性/mm	内聚性	咀嚼性/mj	回复性	剪切力/N
静腌	21.30±1.03 ^a	1.85±0.13 ^a	0.45±0.07 ^a	18.35±0.78 ^a	0.20±0.00 ^a	42.94±3.78 ^a
滚揉	17.91±0.64 ^b	1.69±0.15 ^b	0.40±0.00 ^a	13.35±0.49 ^b	0.20±0.00 ^a	32.07±2.46 ^b

注: 表中英文字母表示同一指标下试验组之间的差异性 ($P < 0.05$), 下同。

2.7 低场核磁共振分析

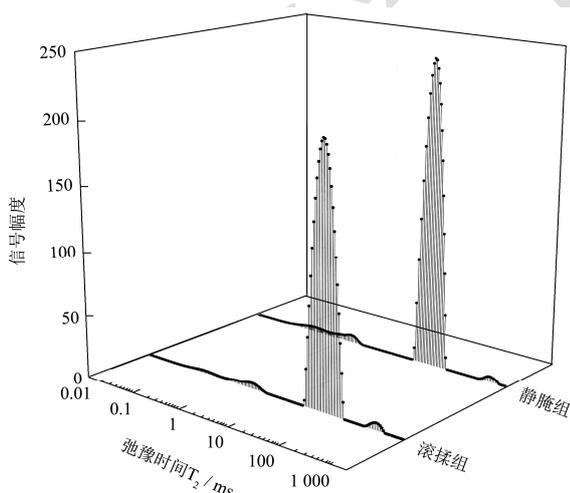


图 6 复合低钠替代盐调理牛肉 T₂ 弛豫图谱

Fig.6 Tumbling process on T₂ relaxation spectrum of marinated beef with compound low-sodium substitution salts

如图 6 所示, 复合替代盐调理牛肉的低场核磁共振 T₂ 弛豫时间在 0.1~1 000 ms 的范围内皆表现出四个区间。其中, 0.1~1 ms 的 T₂₀ 和 1~10 ms 的 T₂₁ 被归为

牛肉滚揉腌制吸收率平均值为 24.65%, 蒸煮损失率为 26.39%, 与响应面理论预测值接近, 说明通过响应面优化后得出的方程具有一定的实践指导意义, 模型能够较好地预测调理牛肉在滚揉腌制后腌制吸收率和蒸煮损失率的变化情况。

2.6 质构特性、剪切力分析

质地特征是用来评价肉质的关键因素, 而剪切力值是用来评价肉制品嫩度的重要指标。表 5 为复合低钠替代盐调理牛肉在静置腌制和滚揉腌制两种方式下的质构特性和剪切力值。真空滚揉工艺可通过低压和滚揉作用, 对细胞造成机械损伤, 使肌原纤维断裂, 促进盐溶性蛋白的溶解, 从而提高肉制品的嫩度^[23]。由表可知, 经过滚揉调理牛肉的硬度、弹性、咀嚼性均显著低于静腌组 ($P < 0.05$)。滚揉腌制调理牛肉的剪切力(32.07 N)显著低于静腌组(42.94 N)($P < 0.05$), 说明滚揉处理对牛肉的嫩度起到了积极作用。因此, 优化后的滚揉腌制可有效改善调理牛肉的质构特性和嫩度。

结合水, 水分子与蛋白质表面紧密结合, 不易受到蛋白质结构或外力影响^[24]。T₂₂ 为不易流动水, 弛豫时间在 30~100 ms, 为主要位于肌原纤维中的水^[25], 与肌原纤维的网络结构有关。T₂₃ 的弛豫时间大于 100 ms, 指位于细胞外间隙的水^[26]。弛豫时间 T₂ 的信号幅度越低, 表明水与调理牛肉的肌原纤维蛋白结合越紧密, 如果 T₂ 向延长方向移动, 表明部分水的波动变大^[27]。

表 6 显示出三种成分的水在调理牛肉中的变化, 滚揉处理 T₂₀ 由 0.19 ms 延迟至 0.43 ms, T₂₁ 由 1.34 ms 延迟至 1.73 ms, 表明肉中的水分与蛋白质和肌原纤维成分的结合更加松散。滚揉处理的 T₂₂ 和 T₂₃ 显著低于静腌组, 表明滚揉处理可以增强调理牛肉中不易流动水与蛋白质的结合能力, 增加水与蛋白质的物理化学相互作用。滚揉组调理牛肉中 P₂₀、P₂₁ 略有下降, 但无显著变化 ($P > 0.05$)。滚揉组 P₂₂ (95.47%) 与 P₂₃ (1.3%) 均高于静腌组 P₂₂ (94.74%) 与 P₂₃ (0.4%), 这与 Li Y 等^[21]研究中 P₂₂ 的增加是由自由水转变而来的结果不同。推测本研究结果的原因可能是滚揉作用破坏了某些蛋白质的高级结构, 增加了肌原纤维之间的间隙^[28], 导致部分结合水向不易流动水和自由水转

变。综上所述,滚揉处理能够增强调理牛肉吸水能力,增加肌纤维细胞内外的水分含量。

表 6 滚揉工艺对复合低钠替代盐调理牛肉横向弛豫时间 T_2 的影响

Table 6 Effects of tumbling process on transverse relaxation time T_2 of marinated beef with compound low-sodium substitution salts

组别	T_2 /ms				P_2 /%			
	T_{20}	T_{21}	T_{22}	T_{23}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}
静腌组	0.19±0.03 ^a	1.34±0.07 ^a	54.79±0.00 ^b	821.43±0.00 ^b	1.75±0.61 ^b	2.58±0.26 ^a	94.74±0.36 ^a	0.94±0.00 ^a
滚揉组	0.43±0.32 ^a	1.73±0.53 ^a	51.11±0.00 ^a	554.57±22.48 ^a	1.44±0.61 ^a	1.80±0.72 ^a	95.47±0.31 ^a	1.30±0.11 ^b

2.8 扫描电镜分析

图 7 为复合低钠替代盐调理牛肉横截面的扫描电镜图,可以观察到,静腌状态下的调理牛肉肌原纤维结构较完整,大小均匀,均呈现椭圆形状。滚揉组的肌原纤维发生了明显变形,由于较为剧烈的机械运动,导致肌原纤维之间的间隙明显增大,产生了碎片化结构,这与滚揉腌制调理牛肉的剪切力较低结果互相印证。

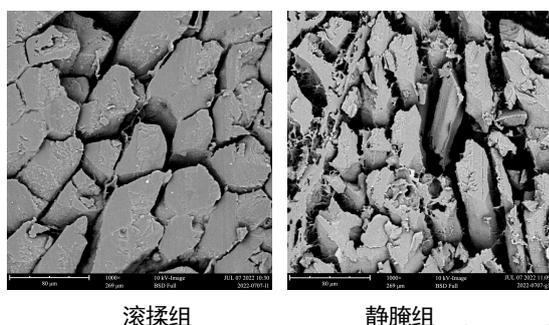


图 7 复合低钠替代盐调理牛肉扫描电镜图 ($\times 1\ 000$)

Fig.7 SEM image of marinated beef with compound low-sodium substitute salts ($\times 1\ 000$)

3 结论

本研究以复合低钠替代盐调理牛肉片为研究对象,腌制吸收率和蒸煮损失率为参考指标,在单因素试验确定液料比、滚揉时间和真空度最佳范围的基础上,通过响应面分析建立回归模型,得到复合低钠替代盐调理牛肉最佳真空滚揉工艺参数为:液料比 32%、滚揉时间 3.0 h、真空度 0.06 MPa。工艺优化得到参考指标与各因素变量的两个二次方程模型,模型回归均极显著,对试验拟合较好。滚揉处理的调理牛肉硬度、弹性、咀嚼性、剪切力均显著降低,不易流动水和自由水弛豫时间显著低于静腌组,且其自由水弛豫峰面积显著高于静腌组 ($P < 0.05$),滚揉操作使肌肉组织持水能力显著增强。这说明真空滚揉工艺对调理牛肉的品质和结构皆有显著影响 ($P < 0.05$),表现为可明显改善复合低钠替代盐调理牛肉的质构特性,提高肉品嫩度,增大肌纤维内外的水分含量,并可使肌原纤维产生一定的碎片化结构。本研究为复合替代盐调理牛肉滚揉工艺合理性提供理论依据,也为低钠调理肉

制品的工业化应用提供技术参考。

参考文献

- [1] 陈来华,李娟,王亚辉.中国肉牛产业发展概况分析、存在问题及对策[J].中国食物与营养,2022,28(3):5-9
- [2] Gurikar A M, Lakshman V, Gadekar Y P, et al. Effect of meat chunk size, massaging time and cooking time on quality of restructured pork blocks [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2014, 51(7): 1363-1369
- [3] 李祥勇,潘邦翔.预制调理肉制品相关技术要求标准化研究[J].质量技术监督研究,2020,6:15-18
- [4] Kim T, Yong H I, Jung S, et al. Effect of reducing sodium chloride based on the sensory properties of meat products and the improvement strategies employed: a review [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2021, 63(4): 725-739
- [5] Inguglia E S, Zhang Z, Tiwari B K, et al. Salt reduction strategies in processed meat products - A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59: 70-78
- [6] 魏朝贵,吴菊清,邵俊花,等.KCl 和 $MgCl_2$ 部分替代 NaCl 对猪肉肌原纤维蛋白乳化凝胶特性的影响[J].食品科学,2014, 35(5):89-95
- [7] Gimeno O, Astiasaran I, Bello J. Calcium ascorbate as a potential partial substitute for NaCl in dry fermented sausages: effect on colour, texture and hygienic quality at different concentrations [J]. Meat Science, 2001, 57(1): 23-29
- [8] Choi Y M, Jung K C, Jo H M, et al. Combined effects of potassium lactate and calcium ascorbate as sodium chloride substitutes on the physicochemical and sensory characteristics of low-sodium frankfurter sausage [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 21-25
- [9] Zhang Y, Zhang D, Huang Y, et al. Effects of basic amino acid on the tenderness, water binding capacity and texture of cooked marinated chicken breast [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 129: 109524
- [10] 朱圣刚,钟玉虎,邹延军.山梨醇对预调理猪肉糜制品品质的影响[J].肉类研究,2012,26(10):9-12
- [11] Costa-Corredor A, Muñoz I, Arnau J, et al. Ion uptakes and diffusivities in pork meat brine-salted with NaCl and

- K-lactate [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1226-1233
- [12] Liu L, Zhou Y, Wan J, et al. Mechanism of polyhydroxy alcohol-mediated curing on moisture migration of minced pork tenderloin: On the basis of molecular docking [J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 15:100401
- [13] Pietrasik Z, Shand P J. The effect of quantity and timing of brine addition on water binding and textural characteristics of cooked beef rolls [J]. *Meat Science*, 2003, 65(2): 771-778
- [14] 杨书捷,马晓丽,陈津津,等.L-赖氨酸和山梨糖醇复配改善低钠替代盐调理牛肉品质作用研究[J].*食品科技*,2022,47(7):71-78
- [15] 马晓丽,杨书捷,张龙涛,等.复合替代盐对调理牛肉品质的影响[J].*肉类研究*,2020,34(12):30-36
- [16] 张东,李洪军,甘潇,等.响应面优化腊肉脉动真空滚揉腌制工艺[J].*食品与发酵工业*,2017,43(10):124-130
- [17] 汤春辉,黄明,樊金山,等.调理鸭胸肉制品滚揉腌制工艺优化[J].*食品科学*,2013,34(14):63-67
- [18] Dolata W, Piotrowska E, Wajdzik J, et al. The use of the MRI technique in the evaluation of water distribution in tumbled porcine muscle [J]. *Meat Science*, 2004, 67(1): 25-31
- [19] Krause R J, Plimpton R F, Ockerman H W, et al. Influence of tumbling and sodium tripolyphosphate on salt and nitrite distribution in porcine muscle [J]. *Journal of Food Science*, 1978, 43(1): 190-192
- [20] 刘振东,何丽华,马长中,等.嫩化技术应用于青椒牦牛肉丝的研究[J].*食品与发酵科技*,2015,51(1):44-47
- [21] 于秋影,赵宏蕾,常婧瑶,等.新型滚揉技术在肉制品加工中应用的研究进展[J].*食品科学*,2022,43(17):380-388
- [22] 廖彩虎.基于微观结构研究优化真空预冷技术对西式火腿品质及安全的影响[D].广州:华南理工大学,2020
- [23] 谢媚,曹锦轩,潘道东,等.滚揉对成熟过程中鹅肉品质及其蛋白质结构的影响[J].*现代食品科技*,2014,30(10):205-211
- [24] 李鹏,王红提,孙京新,等.超声辅助变压滚揉对鸡肉蛋白质结构及含水量的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(16):308-314
- [25] Sun S, Wang S, Lin R, et al. Effect of different cooking methods on proton dynamics and physicochemical attributes in spanish mackerel assessed by low-field NMR [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 364
- [26] Bertram H C, Karlsson A H, Andersen H J. The significance of cooling rate on water dynamics in porcine muscle from heterozygote carriers and non-carriers of the halothane gene - a low-field NMR relaxation study [J]. *Meat Science*, 2003, 65(4): 1281-1291
- [27] 林婉瑜,林晶晶,林向阳,等.利用核磁共振技术研究食盐对鱼糜加工的影响[J].*食品科学*,2013,34(5):105-109
- [28] Han M, Bertram H C. Designing healthier comminuted meat products: Effect of dietary fibers on water distribution and texture of a fat-reduced meat model system [J]. *Meat Science*, 2017, 133: 159-165