

复合添加物在腌制过程中对兔肉传质动力学和肌原纤维蛋白的影响

Effects of compound additives on mass transfer kinetics and myofibrillar protein of rabbit meat during curing

张维悦¹ 夏杨毅^{1,2} 侯佰慧¹ 苏燕¹ 李洪军^{1,2}

ZHANG Wei-yue¹ XIA Yang-yi^{1,2} HOU Bai-hui¹ SU Yan¹ LI Hong-jun^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Special Food Programme and Technology Research Center, Chongqing 400715, China)

摘要:以兔肉为原料,研究 5 种不同复合添加物(食盐为对照组、“食盐+亚硝酸钠”记为 Y 组、“食盐+亚硝酸钠+香辛料”记为 YY 组、“食盐+亚硝酸钠+香辛料+磷酸盐”记为 YL 组、“食盐+亚硝酸钠+香辛料+磷酸盐+调味料”记为 YW 组)在腌制过程中对兔肉传质动力学和肌原纤维蛋白的影响。结果表明:复合添加物对兔肉水分变化量、食盐变化量、总重变化量(ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 、 ΔM_t^0)有一定影响,但差异不显著($P>0.05$);复合添加物降低了腌制兔肉的 De 值,且 Y 组 De 值最小,为 $9.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$;复合添加物不同程度改变了腌制兔肉的持水力 and 硬度,相比对照组,YL、YW 组的持水力显著增加($P<0.05$)、硬度显著降低($P<0.05$)、Y、YY 组的持水力没有显著变化($P>0.05$)、但硬度变化明显($P<0.05$);复合添加物降低了肌原纤维蛋白储能模量(G')($P<0.05$),且与对照组相比,Y、YY 组肌球蛋白变性温度提高,Y、YL 和 YW 组肌动蛋白变性温度降低;SDS-PAGE 电泳分析表明,复合添加物促进肌原纤维蛋白不同程度降解,且 YL 组的降解程度最大。

关键词:兔肉;湿腌;复合添加物;传质动力学;肌原纤维蛋白

Abstract: The effects of five different compound additives were analyzed, including salt solution(control group), salt + sodium nitrite (Y), salt + sodium nitrite + spice(YY), salt + sodium nitrite + spice + phosphate (YL), salt + sodium nitrite + spice + phosphate + seasoner(YW) on the mass transfer kinetics and the

change of myofibrillar protein during wet-curing. Results: compound additives affected the changes of water content(ΔM_t^w), salt content (ΔM_t^{NaCl}), total weight(ΔM_t^0), but the difference was not significant($P>0.05$). The compound additives decreased diffusion value of rabbit meat, and Y got the lowest value($9.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Compared with the control group, the water holding capacity of YL, YW was higher($P<0.05$), and the hardness of them exhibited lower($P<0.05$), however, for YY, only the hardness changed significantly ($P<0.05$). The compound additives decreased the storage modulus of myofibrillar protein significantly($P<0.05$), and compared with the control group, the myosin thermal denaturation temperature of Y, YY was higher, the actin thermal denaturation temperature of Y, YL, YW was lower. In addition, SDS-PAGE analysis showed that compound additives promoted the degradation of myofibrillar protein, and YL got the greatest degradation degree.

Keywords: rabbit; wet curing; compound additives; mass transfer kinetics; myofibrillar protein

湿腌,是利用物质扩散和水分渗透的共同作用,使腌制剂均匀地渗入原料组织内、直至肌肉组织内外溶液浓度逐步达到动态平衡的一种腌制方法,相比于干腌具有食盐分布均匀、含水量丰富等特点。经腌制的肉不仅改善了风味、色泽、质地等品质,而且更利于贮藏。研究发现,湿腌不仅与高压^[1]、超声^[2]、滚揉^[3]及真空^[4]等外在压迫作用有关,而且受腌制液种类^[5]、温度^[6]和浓度^[7]等环境因素的影响,如果腌制液浓度过低,肉制品会寡而无味,风味品质较差,过高会增加黏度,降低腌制速率,磷酸盐复合物、亚硝酸盐等添加物则会影响蛋白质的变性、降解及肌肉的持水力与嫩度^[8-9]。因此,研究肌肉在添加物腌制过程中的 NaCl 扩散和水分迁移

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(编号:201303144);公益性行业(农业)科研专项(编号:201303082-7)

作者简介:张维悦,女,西南大学在读硕士研究生。

通信作者:夏杨毅(1970—),男,西南大学副教授,硕士生导师,博士。
E-mail:265835528@qq.com

收稿日期:2017-04-03

情况,以及蛋白质变化等状况,对于准确地控制加工过程、缩短腌制时间,改善肉品品质极具现实意义。

目前,国内外相关添加物对湿腌过程中肌肉品质特性变化及渗透规律的研究已有报道,诸如:Xiong Y L 等^[10]研究表明,磷酸盐可以促进肌原纤维横向扩张,使肌肉吸收水分、固定水分的能力增加;Cherroud S 等^[11]研究表明添加食盐、橄榄油及辣椒面可以延长腌制时间,降低微生物数量;Vladimir F 等^[12]发现,甜菜蔗糖影响猪肉腌制的传质动力学,且温度 40 ℃、时间 1.4 h、蔗糖浓度 67%时的渗透效果最好,水分流失率最低;杜磊^{[13]33-191}发现老卤的腌制方法、盐水浓度及温度会对盐水鸭的品质产生影响。综合来看,此类研究集中在多种添加物对肌肉基本理化性质的影响,或者单一添加物对渗透效果的影响等方面,相关多种复合添加物对腌制肌肉传质动力学方面的研究尚未见报道,但实际生产中腌制液种类较多,物质扩散速率难控制、品质难保证。

本试验选择兔肉为研究对象,分析复合添加物在腌制过程中对兔肉传质动力学和蛋白质变化的影响,以期获得贴近实际生产的基本理论,为实现未来兔肉加工生产过程的速率可控性、品质可保性提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

兔背最长肌取自养殖 3 个月的雄性伊拉兔(约 2 kg,西南大学养兔场),去脂肪、筋膜后,切成 1 cm×1 cm×1 cm 肉块,塑料膜包裹,-23 ℃冻藏备用。

1.1.2 主要仪器

质构仪:TA.XT2i 型,英国 Stable Microsystem 公司;
恒温水浴锅:HH-6 型,金坛市富华仪器有限公司;
流变仪:DHR-1 型,美国 TA 公司;
凝胶成像系统:G:BOX EF 型,美国 Syngene 公司;
高速离心机:TGL-16C 型,上海安亭科学仪器厂;
冷冻离心机:Avanti J-301 型,美国贝克曼库尔特公司;
电泳仪:BIO-RAD 型,美国电泳仪器公司。

1.2 方法

1.2.1 样品与腌制液制备

(1) 样品制备:兔肉使用前于 4 ℃冰箱恒温空气解冻后称重、分组,肉与腌制液按 1:1 的质量比混合,并置于 4 ℃冰箱液态腌制 48 h,分别取样测定。

(2) 香辛料水熬制:根据李忠等^[14]的方法修改如下:丁香、白芷各 0.25%,砂仁、肉蔻、小茴香各 0.44%,八角、花椒、干辣椒各 1.25%,毕卜 0.75%,桂皮 1.00%,沸水煮至约 1 h,加水恒定容积,冷却后待用。

(3) 腌制液配置:第 1 组(对照组)6%食盐,蒸馏水为溶剂;第 2 组(Y 组)6%食盐、100 mg/kg 亚硝酸钠,蒸馏水为溶剂;第 3 组(YY 组)6%食盐、100 mg/kg 亚硝酸钠,香辛料水为溶剂;第 4 组(YL 组)6%食盐、100 mg/kg 亚硝酸钠及磷酸盐(0.2%三聚磷酸钠与 0.3%焦磷酸钠),香辛料水为溶

剂;第 5 组(YW 组)6%食盐、100 mg/kg 亚硝酸钠、磷酸盐(0.2%三聚磷酸钠与 0.3%焦磷酸钠)及调味料(0.25%味精、2%白糖与 0.8%料酒),香辛料水为溶剂。

1.2.2 水分、食盐和总重指标的测定

- (1) 水分含量:按 GB/T 9695.15—2008 执行。
- (2) 食盐含量:按 GB/T 5009.44—2003 执行。
- (3) 总重:用吸水纸吸干肉块表面水分,后称重。

1.2.3 持水力与硬度指标的测定

(1) 持水力测定:称取 2.000 0 g 肉样离心(5 000 r/min,5 min),将表面水分吸干后,称重。

(2) 硬度测定:质构分析仪测定。探头型号为 TA44,测定距离为 5.0 mm;探头速度皆为 1.00 mm/s。

1.2.4 肌原纤维蛋白提取 根据 Xiong 等^[15]的方法修改如下:肉样解冻后去脂肪、结缔组织,绞碎后称 10 g,加 10 倍体积的冰混合液 I(0.1 mol/L KCl、2 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L EGTA、0.5 mmol/L LDTT 及 10 mmol/L K₂HPO₄)进行提取,冰浴匀浆 1 min(1 000 r/min),再离心 10 min(5 500 r/min),重复离心操作 3 次,收集沉淀物,即肌原纤维蛋白粗提物。沉淀物分散在 4 倍体积的冰混合液 II(1 mmol/L NaN₃, 0.1 mol/L NaCl,pH 6.25)中,冰浴匀浆 30 s(2 000 r/min),离心 10 min(5 500 r/min),重复离心操作 2 次,收集沉淀物。沉淀物再次分散在 8 倍体积冰的混合液 II 中,高速匀浆 30 s,离心 10 min(5 500 r/min),收集沉淀物,即肌原纤维蛋白。提取的肌原纤维蛋白贮存于 0~4 ℃,48 h 内用完。并用双缩脲法测定所提取肌原纤维蛋白的浓度。

1.2.5 流变学特性测定 依据 Westphalen^[16]的方法稍作修改:事先以磷酸盐缓冲液将肌原纤维蛋白稀释为 15 mg/mL 的溶液。流变条件:平行板间距 1 050 μm,频率 1 Hz,流变性能 1 000,温度从 20 ℃升至 90 ℃(1 ℃/min),降温速率 15 ℃/min。

1.2.6 SDS-PAGE 电泳分析 将蛋白质溶液浓度稀释到 5 g/mL,取 20 μL 于试管中,加 2 μL 样品缓冲液后,水浴 5 min,再离心 5 min,取 10 μL 上清液做为电泳样品。其中分离胶、浓缩胶浓度分别为 10%,5%,电泳开始时电压为 15 mA,进入分离胶后电压加大为 25 mA。电泳结束后,将浓缩胶去掉,分离胶加适量考马斯亮蓝于摇床上染色 2 h,纯水清洗后,加脱色液震荡脱色至条带清晰为止。

1.2.7 兔肉水分、盐分及总重变化值的测定 兔肉的水分、盐分及总重的变化量分别按式(1)~(3)计算:

$$\Delta M_t^w = \frac{M_t^0 \times X_t^w - M_0^0 \times X_0^w}{M_0^0}, \tag{1}$$

$$\Delta M_t^{\text{NaCl}} = \frac{M_t^0 \times X_t^{\text{NaCl}} - M_0^0 \times X_0^{\text{NaCl}}}{M_0^0}, \tag{2}$$

$$\Delta M_t^0 = \frac{M_t^0 - M_0^0}{M_0^0}, \tag{3}$$

式中:

ΔM_t^w ——兔肉的水分变化量,%;

ΔM_t^{NaCl} ——盐分变化量,%;

ΔM_t^0 ——总重变化量,%;

X_t^w ——腌制 t 时刻兔肉中的水分含量,%;

X_0^w ——腌制 0 时刻兔肉中的水分含量,%;

X_t^{NaCl} ——腌制 t 时刻兔肉中的食盐含量,%;

X_0^{NaCl} ——腌制 0 时刻兔肉中的食盐含量,%;

M_t^0 ——腌制 t 时刻时兔肉重,g;

M_0^0 ——腌制 0 时刻时兔肉重,g。

1.2.8 兔肉腌制过程中传质动力学模型的建立 假设腌制过程中兔肉的 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 与腌制时间的平方根相关,且根据式(4)可以计算三者的变化随时间的关系。

$$\Delta M_t^i = 1 + K_1 + K_2 \times t^{0.5}, \tag{4}$$

式中:

ΔM_t^i ——腌制过程中的 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 , %;

K_1 ——截距,表示 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 的动力学参数值,能够反映腌制过程在开始阶段的状况,主要受热动力学机制的腌制液浓度等压力梯度的影响;

K_2 ——斜率,表示 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 的动力学参数值,与扩散机制的传质动力学相关;

$t^{0.5}$ ——腌制时间的平方根。

1.2.9 表观扩散系数(De)的计算 随兔肉腌制的进行,当肌肉水相中的 NaCl 含量(Z_e^{NaCl})和腌制液当中的 NaCl 含量(y_e^{NaCl})相当时,腌制达到平衡点^[15], Z_e^{NaCl} 和 y_e^{NaCl} 可以根据式(5)计算得到。兔肉水相中的食盐含量 Z^{NaCl} 含量根据式(6)计算。

$$Z_e^{NaCl} = y_e^{NaCl} = \frac{\frac{M_0^{SD}}{M_0^{SS}} \times X_0^{NaCl} + y_0^{NaCl}}{\frac{M_0^{SD}}{M_0^{SS}} \times (X_0^w + X_0^{NaCl}) + (y_0^w + y_0^{NaCl})}, \tag{5}$$

$$Z^{NaCl} = \frac{X^{NaCl}}{X^w + X^{NaCl}}, \tag{6}$$

式中:

M_0^{SD} 、 M_0^{SS} ——起始兔肉的重量和腌制液的重量,g;

X_0^{NaCl} 、 X_0^w ——起始兔肉的食盐、水分含量,%;

y_0^{NaCl} 、 y_0^w ——起始腌制液的食盐、水分含量,%;

X^w 、 X^{NaCl} ——某时刻兔肉中水分、盐分含量,%。

兔肉中 NaCl 的有效扩散系数可以按照菲克第二定律关于一个半无限平板的式(7)^[17-18]计算得到。

$$1 - Y_t^{NaCl} = 1 - \frac{Z_t^{NaCl} - y_t^{NaCl}}{Z_0^{NaCl} - y_e^{NaCl}} = 2 \times \left(\frac{De \times t}{\pi \times L^2} \right)^{0.5} + K, \tag{7}$$

式中:

Y_t^{NaCl} ——兔肉水相和腌制液之间的传质驱动力;

Z_0^{NaCl} 、 Z_t^{NaCl} 、 Z_e^{NaCl} ——兔肉水相中腌制 0、 t 时刻及腌制平衡点的盐含量,%;

y_t^{NaCl} ——腌制液在 t 时刻的盐含量,%;

L ——肉厚,约 1 cm;

De ——有效扩散系数, m^2/s 。

1.3 统计分析

试验数据用 SPSS 17.0 和 Excel 进行数据处理及分析, Origin 8.1 软件作图,每组试验数据均重复 3 次,最终结果以

均数±标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 在各复合添加物腌制过程中兔肉 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 的变化

由图 1 可知,兔肉腌制过程中 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 随腌制时间的延长而增大,且由于腌制刚启动时,腌制液中的盐含量较高,渗透压差大,腌制前 4 h 盐分渗透和水分扩散较快。与对照组相比, ΔM_t^w 随添加物种类的增加而降低,且 Y 组 ΔM_t^w 值最大,主要原因:① 添加物导致腌制液黏度增加,水分子活化能降低,影响水分的扩散;② 亚硝酸盐、香辛料等添加物参与蛋白质反应,引起了肌肉微观结构变化,改变了水分渗入肌肉组织的能力^[8-9,11]。腌制过程中,各组间的 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 差异不显著($P>0.05$),这与 Gravier 等^[19]的研究结果一致,他认为腌制过程中食盐的有效扩散系数主要取决于 NaCl 的浓度。

2.2 兔肉腌制过程动力学模型的计算

由表 1 可知,兔肉腌制过程中的 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0

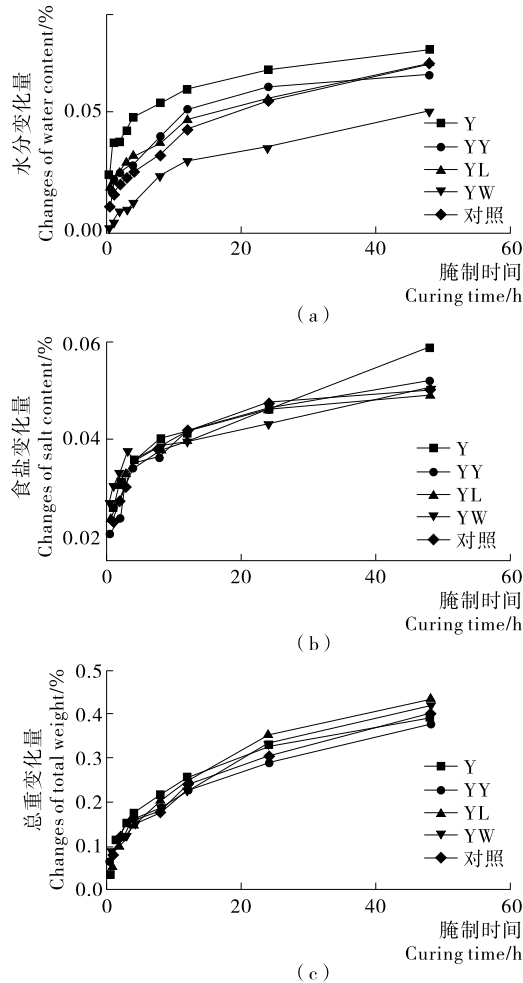


图 1 复合添加物腌制过程中兔肉 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 的变化

Figure 1 The changes of water content, salt content and total weight of rabbit meat during curing in compound additives

值与 $t^{0.5}$ 具有较好的相关性 ($R^2 \geq 0.900\ 3$), 表明该模型可以用于模拟兔肉腌制过程中传质与时间的关系。 K_2 受添加物种类的影响, 与总重变化即腌制产量有关, 且基于 ΔM_t^{NaCl} 的 K_2 值随添加物种类的增加而减小, 而基于 ΔM_t^{w} 、 ΔM_t^0 的 K_2 值随添加物种类的增加则呈现先增加后降低的趋势。 K_1 用来描述腌制开始阶段的情况, 主要受腌制初期腌制液浓度梯度等压力梯度的影响^{[13]162-163}。

表 1 式(4)的动力学参数值及其相关系数 R^2				
Table 1 Kinetic parameters obtained from Eq.(4) and fitting correlation coefficients				
变量	类别	K_1	K_2	R^2
ΔM_t^w	对照	-0.993 8	0.009 5	0.989 3
	Y	-0.972 3	0.007 7	0.908 0
	YY	-0.986 9	0.008 5	0.924 3
	YL	-0.988 3	0.008 8	0.965 8
	YW	-1.002 1	0.007 8	0.974 0
ΔM_t^{NaCl}	对照	-0.978 3	0.004 8	0.900 3
	Y	-0.975 6	0.005 1	0.969 2
	YY	-0.979 5	0.005 1	0.904 2
	YL	-0.975 2	0.004 0	0.910 5
	YW	-0.971 7	0.003 3	0.917 4
ΔM_t^0	对照	-0.971 6	0.076 6	0.994 8
	Y	-0.936 5	0.050 8	0.979 7
	YY	-0.967 0	0.051 3	0.993 1
	YL	-0.994 8	0.066 0	0.982 8
	YW	-0.976 9	0.059 5	0.985 6

2.3 表观扩散系数(De)的计算

由表 2 可知, 添加物腌制兔肉的传质驱动力与 $t^{0.5}$ 具有较好的相关性 ($R^2 \geq 0.814\ 6$), 表明几种复合添加物腌制兔肉时根据式(7)得到的方程有较好的线性关系。添加物使腌制兔肉的 De 值有所降低, 且 $YY > YW > YL > Y$, 可能是亚硝酸盐、香辛料、磷酸盐等添加物参与蛋白质反应引起肌肉微观结构变化^[8-9,11,20], 影响了物质传递过程, 具体原因还有待进一步研究。

2.4 复合添加物腌制过程中兔肉持水力、硬度的变化

由图2可知, 腌制过程中兔肉的持水力逐渐降低、硬度

表 2 式(7)的理论动力学参数值及其相关系数 R^2			
Table 2 Kinetic parameters obtained from Eq.(7) and fitting correlation coefficients			
组别	$De/(m^2 \cdot s^{-1})$	K	R^2
对照	5.46×10^{-9}	-0.026 6	0.996 9
Y	9.63×10^{-10}	0.419 8	0.915 7
YY	4.10×10^{-9}	0.279 9	0.892 2
YL	2.12×10^{-9}	0.264 1	0.930 3
YW	2.67×10^{-9}	0.544 0	0.814 6

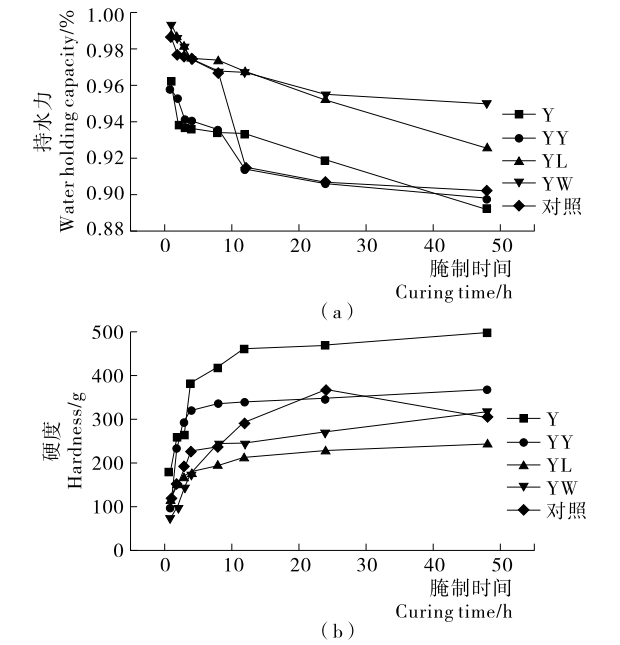


图 2 复合添加物腌制过程中兔肉持水力、硬度的变化
Figure 2 The changes of water holding capacity and hardness of rabbit meat during curing in compound additives

增大, 且腌制前 4 h 变化最快, 原因在于随时间延长肌肉组织食盐渗透增加, 离子强度发生变化, 导致兔肉持水力降低、硬度增大^[21], 且电荷发生改变、氢键受到破坏, 不易流动水含量减小^[21-22]。与对照组相比, 腌制 48 h 后, Y、YY 组硬度增加 ($P < 0.05$), 持水力降低 ($P > 0.05$), 可能是亚硝酸盐与蛋白质巯基基团反应, 分子发生交联, 形成二硫化物导致硬度增加^[20]; 腌制 48 h 后, YL、YW 组持水力增加 ($P < 0.05$), 硬度降低 ($P < 0.05$), 且持水力值 $YW > YL$, 表明磷酸盐和调味料能提高肌肉持水力、降低硬度, 尤其是磷酸盐能通过促使肌原纤维发生横向膨胀及调节 pH 值、增加肌原纤维蛋白分子间的静电斥力, 使网络结构松弛, 促使肌肉组织容纳更多的水分, 增加肌肉的持水力^[10,15], 这与 Shao J H 等^[23]的研究结果一致。

2.5 复合添加物腌制过程中兔肉流变学特性的变化

由图 3 可知, 各组流变特性变化的趋势基本一致, 都经历了水平、增加、降低的过程。储能模量 (G') 值在 42 °C 之前没有增加, 可能是肌球蛋白在此温度下并没有变性, 也可能是肌球蛋白虽然变性, 但聚集程度还没有达到引起弹性明显增加的程度^[24]; G' 在 42~65 °C 时急剧上升, 且 G' 随添加物种类的增加而增加, 说明复合添加物影响了肌原纤维蛋白稳定性; 随后 G' 下降, 可能是肌动球蛋白结构变化, 形成了高密度凝胶结构^[25]。由表 3 可知, 与对照组相比, Y、YY 组的肌球蛋白变性温度升高, Y、YL 和 YW 组的肌动蛋白变性温度降低, 原因在于腌制环境中亚硝酸钠与肌肉中的肌球蛋白反应^[8], 磷酸盐促使肌动球蛋白解离、改变肌球蛋白与肌动蛋白的比例^[11], 影响蛋白质的稳定性。

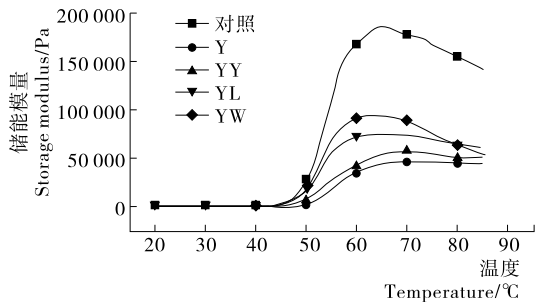


图 3 复合添加物腌制 24 h 兔肉肌原纤维蛋白的储能模量(G')

Figure 3 Myofibrillar proteins storage modulus(G') of rabbit meat cured 24 h in compound additives

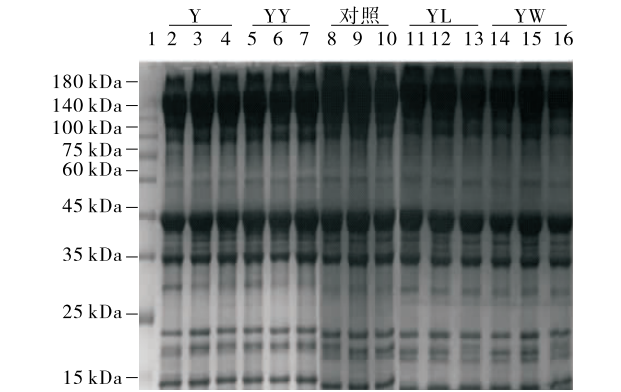
表 3 肌球蛋白和肌动蛋白的变性温度

Table 3 The thermal denaturation temperature of myosin protein and myofibril protein $^{\circ}\text{C}$

类别	对照	Y	YY	YL	YW
肌球蛋白	42.75	49.20	44.77	42.08	42.70
肌动蛋白	65.44	64.09	65.83	60.88	64.50

2.6 肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 变化

由图 4 可知,随着腌制时间的延长,兔肉肌原纤维蛋白所有条带颜色都有不同程度变淡,主要是随着肌肉中食盐含量的增加导致水溶性蛋白的渗出,溶酶体膜破裂,释放出蛋白酶,加速蛋白质的降解^[26]。以标准蛋白分子量为参照,对各条带进行分析,明显看出 Y、YY 组在 15~25 kDa 处条带数目变少,条带数目 $Y>YY$,表明亚硝酸盐促进肌原纤维蛋白降解,香辛料中的丁香、肉蔻、桂皮等酚类成分可以与蛋白质交联^[9],延缓肌原纤维蛋白变性降解^[27];与 Y、YY 组相比,YL、YW 组在 15~25 kDa 处的条带数目增加,颜色变浅,



1. 标准品 2~4. 分别为 Y 组腌制 4,24,48 h 时的样品 5~7. 分别为 YY 组腌制 4,24,48 h 时的样品 8~10. 分别为对照组腌制 4,24,48 h 时的样品 11~13. 分别为 YL 组腌制 4,24,48 h 时的样品 14~16. 分别为 YW 组腌制 4,24,48 h 时的样品

图 4 复合添加物腌制过程中兔肉肌原纤维蛋白的 SDS-PAGE

Figure 4 SDS-PAGE patterns of myofibrillar protein during curing in compound additives

且亚基数目 $YL>YW$,说明磷酸盐有利于促进蛋白质分解为小分子片段,而调味料中的有机酸会降低体系的 pH 值,影响磷酸盐的作用^[28];Y、YY 组在 15~25 kDa 处条带变浓,可能是 25~35 kDa 处的条带降解及降解的小分子发生聚合。

3 结论

与对照组相比,复合添加物对兔肉的 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 及 ΔM_t^0 影响不显著($P>0.05$),但显著改变了兔肉的持水力 and 硬度($P<0.05$),其中,YL、YW 组的持水力显著增加($P<0.05$)、硬度显著降低($P<0.05$),说明复合添加物不会明显改变腌制后兔肉总重,但可能会影响兔肉的质地、嫩度等感官特性。通过建立兔肉腌制过程中传质动力学模型,结果表明 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{NaCl} 和 ΔM_t^0 与 $t^{0.5}$ 具有较好的线性关系($R^2\geq 0.9003$),可以用来作为兔肉腌制的理论指导,同时,复合添加物降低了兔肉 De 值,影响物质传递,且 Y 组 De 值最小($9.63\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)。此外,复合添加物降低肌肉肌原纤维蛋白的 G' 值,促进肌原纤维蛋白不同程度降解,且 YL 组降解程度最大。

本研究仍存在一些未予解决的问题:① 试验所用添加物不具有代表性,并未涉及辣椒、生姜等其他常用添加物;② 试验仅从腌制速率和蛋白质特性的角度进行初步研究,并未考虑风味特性的影响。因此,后续试验可以从这两方面出发,结合生产实际,进一步研究其他常用复合添加物对物质传递及风味特性的影响。

参考文献

[1] VILLACIS M F, RASTOGI N K, BALASUBRAMANIAM V M. Effect of high pressure on moisture and NaCl diffusion into turkey bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41 (5): 836-844.

[2] SIRÓ I, VÉN C, BALLA C, et al. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 353-362.

[3] ALEXANDER C, ARRANEE C, FRANKLIN B, et al. Effects of vacuum tumbling with chitosan nanoparticles on the quality characteristics of cryogenically frozen shrimp[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 114-123.

[4] CHIRALT A, FITO P, BARAT J M, et al. Use of vacuum impregnation in food salting process[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49: 141-151.

[5] ARMENTEROS M, ARISTOY M C, BARAT J M, et al. Biochemical and sensory changes in dry-cured ham salted with partial replacements of NaCl by other chloride salts[J]. Meat science, 2012, 90(2): 361-367.

[6] TELIS V R N, ROMANELLI P F, GABAS A L, et al. Salting kinetics and salt diffusivities in farmed Pantanal caiman muscle [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2003, 38(4): 529-535.

[7] GALLART-JORNET L, BARAT J M, RUSTAD T, et al. In-

fluence of brine concentration on Atlantic salmon fillet salting[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 267-275.

[8] 董庆利, 屠康. 猪肉腌制过程中亚硝酸钠添加量对其质构的影响[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 62-66.

[9] 刘文娟, 木尼热, 吴春华, 等. 胡柚皮粉对带鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 77-83.

[10] XIONG Y L. Role of myofibrillar Proteins in water-binding in brine enhanced meats[J]. Food Research International, 2005, 38(3): 281-287.

[11] CHERROUD S, CACHALDORA A, FONSECA S, et al. Microbiological and physicochemical characterization of dry cured Halal goat meat. Effect of salting time and addition of olive oil and paprika covering[J]. Meat Science, 2014, 98(2): 129-134.

[12] VLADIMIR F, LJUBINKO L, BILJANA C, et al. Optimisation of Mass Transfer Kinetics during Osmotic Dehydration of Pork Meat Cubes in Complex Osmotic Solution[J]. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 2014, 20(3): 305-314.

[13] 杜垒. 盐水鸭老卤腌制特性与传质动力学分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.

[14] 李忠, 周路明, 陈俊, 等. HACCP 在广汉缠丝兔生产中的应用[J]. 肉类工业, 2009(6): 36-40.

[15] XIONG Y L, LOU Xing-qiu, WANG Chang-zheng, et al. Protein extraction from chicken myofibrils irrigated with various polyphosphate and NaCl solutions[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(1): 96-100.

[16] WESTPHALEN A D, BRIGGS J L, LONERGAN S M. Influence of muscle type on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2006, 72(4): 697-703.

[17] BARAT J M, GALLART-JORNET L, ANDRÉS A, et al. Influence of cod freshness on the salting, drying and desalting stages[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(1): 9-19.

[18] NGUYEN M V, ARASON S, THORARINSDOTTIR K A, et al. Influence of salt concentration on the salting kinetics of cod loin (*Gadus morhua*) during brine salting[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(2): 225-231.

[19] GRAIVER N, PINOTTI A, CALIFANO A, et al. Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(4): 533-540.

[20] PEGG R B, SHAHIDI F. Nitrite curing of meat, the N-nitrosamine problem and nitrite alternatives[M]. Trumbull, Connecticut, USA: Food & Nutrition Press, 2000: 23-104.

[21] YASHODA K P, SURYANARAYANA-RAO S V. Studies on textural and histological changes in cured fish muscle[J]. Journal of Food Science Technology, 1998, 35(1): 21-24.

[22] THORARINSDOTTIR K A, ARASON S, BOGASON S G, et al. The effects of various salt concentrations during brine curing of cod (*Gadus morhua*)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(1): 79-89.

[23] SHAO Jun-hua, DENG Ya-min, JIA Na, et al. Low field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition[J]. Food Chemistry, 2016, 200: 308-314.

[24] 常晨曦, 邹玉峰, 曹锦轩, 等. 谷氨酸螯合钙替代部分食盐对兔肉肌原纤维蛋白热凝胶和乳化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(7): 1-6.

[25] 戚军. 反复冻融对羊肉品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 49-50.

[26] 李敏. 腊鱼腌制过程中内源蛋白酶的变化及其对品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 5-25.

[27] 吕卫金, 赵进, 汪金林, 等. 茶多酚延缓冷藏大黄鱼肌原纤维蛋白变性降解机理研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 60-67.

[28] XI Feng, SEBRANEK J G, LEE H Y, et al. Effects of adding red wine on the physicochemical properties and sensory characteristics of uncured frankfurter type sausage[J]. Meat Science, 2016, 121: 285-291.

(上接第 24 页)

[11] 易宇文, 范文教, 贾洪峰, 等. 基于电子舌的微冻鲢鱼新鲜度识别研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 142-145.

[12] 曹仲文, 张晓燕, 周晓燕. 电子舌对鸡汤和人工勾兑高汤及其混合样品的识别[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 14-17.

[13] 陈全胜, 江水泉, 王新宇. 基于电子舌技术和模式识别方法的茶叶质量等级评判[J]. 食品与机械, 2008, 24(1): 124-126.

[14] 万赐晖, 贾文坤, 王纪华, 等. 基于神经网络算法的电子鼻系统在食品无损检测中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 221-225.

[15] 张瑶, 丁武. 利用电子鼻区分羊奶中不同浓度抗生素[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 144-146.

[16] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速判别[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 137-141.

[17] 申小云, 杨培林, 陈灼, 等. 锗硒对高原牦牛抗氧化功能系统的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2002, 37(4): 437-441.

[18] 马小明, 丁伟. 电子鼻对不同饲料配方饲喂后羊肉风味的评价[J]. 现代农业科技, 2015(2): 258-260.

[19] 张虹艳. 电子鼻技术对鸡肉、鸡蛋、羊奶贮藏时间的快速检测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 23-30.

[20] 廖兰, 赵谋明, 崔春. 肽与氨基酸对食品滋味贡献的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(12): 107-113.

[21] 郭淑珍, 牛小莹, 赵君, 等. 甘南牦牛肉与其他良种牛肉氨基酸含量对比分析[J]. 中国草食动物, 2009(3): 58-60.

[22] 葛长荣, 马美湖. 肉与肉制品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 78-79.

[23] 伏映萍. 日粮中添加硒对滩羊肉品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2013: 22-26.

[24] 陶妍, 王槌. 乳状鱼蛋白的营养评价[J]. 氨基酸和生物资源, 2005, 27(1): 19-21.