

# 超高压处理对绵羊肉嫩化机理的研究

白艳红<sup>1,2</sup>, 德力格尔桑<sup>3</sup>, 赵电波<sup>3</sup>, 毛多斌<sup>1</sup>, 蒋爱民<sup>2</sup>, 杨公明<sup>1,4</sup>

(1 郑州轻工业学院食品与生物工程系, 郑州 450002; 2 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌 712100;  
3 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 呼和浩特 010018; 4 华南农业大学食品学院, 广州 510642)

**摘要:** 实验研究了超高压处理条件下绵羊肌肉感官特性、显微结构、钙激活酶(Calpains)粗酶活性和剪切力值的变化, 并探讨了超高压处理对绵羊肌肉的嫩化机理。超高压处理后绵羊肌肉的感官特性发生变化, 随处理压力升高, 绵羊肌肉颜色变淡, 出现轻微类似蒸煮的成熟风味。在压力为 400 MPa, 保压时间为 10 min 的处理条件下, 绵羊肌肉显微组织结构变化明显: 肌节收缩, 肌原纤维的 Z 线断裂, M 线降解, I 带变白。当压力水平在 100~400 MPa 范围变动时, 随压力升高, Calpains 粗酶活性显著下降 ( $P < 0.01$ ); 当压力达到 400 MPa 时, Calpains 粗酶活性几乎失活。超高压处理后绵羊肌肉的剪切力值显著下降 ( $P < 0.05$ )。实验结果表明, 超高压处理促进了绵羊肉的嫩化。

**关键词:** 超高压; 绵羊肉; 嫩化; 显微结构; 钙激活酶; 剪切力

中图分类号: S852.16; Q521+.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)06-0006-05

## 0 引言

食品超高压技术(Ultra-high Pressure Processing, UHP), 可简称为高压技术(High Pressure Processing, HPP)或液态静高压技术(Hydrostatic High Pressure, HHP), 是目前新兴的食品加工高新技术之一。一般是指用 100 MPa 以上(100~1000 MPa)的静水压力在常温下或较低温度下对食品物料进行处理, 达到灭菌、物料改性和改变食品的某些理化反应速度的效果。高压处理过程中, 物料在液体介质中体积被压缩, 形成的生物高分子立体结构的氢键、离子键和疏水键等非共价键发生变化, 使蛋白质、淀粉等变性, 酶失活, 细菌等微生物被杀死<sup>[1]</sup>。高压也可以用来改善食品的组织结构或生成新型食品<sup>[2]</sup>。高压处理基本是一个物理过程, 对维生素、色素和风味物质等低分子化合物的共价键无明显影响<sup>[3]</sup>, 从而使食品较好地保持了原有的营养价值、色泽和天然风味, 这也是高压技术在目前各种食品杀菌、加工技术领域所独具的特点。关于高压技术用于乳制品、果蔬汁和水产品等的报道已有很多<sup>[4-6]</sup>, 而高压用于肉类嫩化是近几年研究的新课题。肉类进行 100 MPa 以上压力处理时, 死后僵直期前的牛肉和猪肉, 肌原纤维 A 带中间附近的 M 线消失, I 带的纤维变性和凝聚<sup>[7]</sup>; 死后僵直后期, 则 A 带和 I 带的纤维形成被称为 M 桥的结构<sup>[8]</sup>。在 150 MPa 压力处理下, I 带的纤维受到破坏, M 桥消失, I 带变得不规则; 在 200 MPa 压力处理下, A 带和 I 带的纤维被明显破坏, 在 300 MPa 时, A

带产生开裂<sup>[9]</sup>。高压还能使肌内膜和肌上膜产生分离, 导致肌原纤维间隙增大<sup>[10]</sup>。可见, 高压技术应用于肉类嫩化及肉制品加工具有一定的潜力和前景。

中国是世界上牛、羊肉生产大国。内蒙古地区是中国绵羊肉的主产区。加入 WTO 后, 中国绵羊肉在国际市场具有明显的价格优势。然而, 中国绵羊肉的综合品质与国外相比存在一定的差距, 宰后肉的成熟和嫩度较差, 直接影响了肉食品的可口性、可消化性和消费者的购买欲望, 也成为制约中国特别是内蒙古地区绵羊肉出口的主要因素。高压技术用于肉类加工可以实现杀菌、嫩化、成型, 并可以在产品包装后进行处理, 从而降低产品的二次污染, 不仅是一种具有实用意义的新方法, 也是肉制品加工的一条新途径。目前, 在中国要实现把超高压技术应用于肉类加工产业化生产还需要一个过程, 但随着高压处理技术和高压处理设备的不断改进以及人们对食品品质要求的不断提高, 高压肉食品将成为 21 世纪具有特色的新型肉食品之一。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

来自内蒙古达茂旗蒙古改良绵羊(18 个月龄), 宰后 4 h, 取后腿半腱肌, 去除可见脂肪、筋腱及结缔组织后, 顺肌纤维分割成约 200 g 左右的肉块, 分别进行真空包装(聚乙烯/聚酰胺复合膜, 92 kPa), 随机编号后, 置于 0~4 °C 条件下(冰盒中)保存, 待压力处理。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 压力处理

压力分别设定为 100、150、200、250、300、350、400 MPa 7 个水平, 保压时间为 10 min, 温度为室温。每个处理设 3 个重复, 另设对照组。将真空包装好的肉样放入高压发生器的进样腔内, 待压力上升到所需压力水平后进行保压, 保压期间压力波动 5%, 达到保压时间后卸压, 取出样品, 置于 -80 °C 的冰箱内保存备用。

#### 1.2.2 主要试剂与仪器

25% 戊二醛, 1% 四氧化钨, 二甲砷酸钠缓冲液

收稿日期: 2003-03-17 修订日期: 2004-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(29866003); 陕西省科技攻关项目(2004KG-A01)

作者简介: 白艳红(1975-), 女, 蒙古族, 内蒙古海拉尔人, 博士生, 主要从事食品加工新技术及畜产品加工与贮藏方面的研究工作。河南省郑州市东风路 5 号 郑州轻工业学院食品与生物工程系, 450002, Email: baiyh212@163.com。

通讯作者: 杨公明(1950-), 男, 陕西富平人, 留法博士, 教授, 博士生导师, 河南省政府特聘教授, 广州市五山 华南农业大学食品学院, 510642, Email: yanggongmingab@263.net

(pH 7.2), 巴比妥酸缓冲溶液(pH 7.2), 梯度乙醇溶液(梯度为50%、60%、70%、80%、90%、95%、100%), 环氧树脂(Epon812), 醋酸双氧铀, 柠檬酸铅, 乙二胺四乙酸(EDTA), 三氯乙酸(Trichloroacetic acid: TCA), 氢氧化钠, 氯化钾, 盐酸, 乙酸, 叠氮化钠, 奈氏试剂, 三羟甲基氨基甲烷(Tris),  $\beta$ -巯基乙醇( $\beta$ -Mercaptoethanol): 北京华美公司。

透析袋: 截留分子量为10 000~12 000, 直径为20 mm, 北京华美公司。

酪蛋白(Casein): 美国Sigma公司。

压力发生器: 中国兵器工业部第五二研究所高压自紧实验室提供。

LKB5型超薄切片机: 内蒙古分析测试中心提供。

日立H-700H透射电镜(日本), C-1M型嫩度计, EA 940酸度计, A-88高速组织匀浆机, LB-55M超速离心机(Beckman), SCR20BC离心机(FMAC), 岛津UV-190分光光度计。

### 1.2.3 显微结构的观察

从冰箱中取出样品, 置4℃水浴中解冻1~2 h, 去掉包装, 分割成50 g肉块, 再切成 $1\text{ mm}^3$ 小块, 用3%戊二醛前固定2 h, 用二甲砷酸钠缓冲液冲洗; 1%四氧化锇后固定1 h, 巴比妥缓冲溶液冲洗; 梯度乙醇脱水, 环氧树脂包埋, 在LKB5型超薄切片机上制备50 nm厚的超薄切片, 醋酸双氧铀、柠檬酸铅双染色, 日立H-700H透射电镜观察, 拍照。

### 1.2.4 Calpains粗酶活性的测定

Calpains粗酶的提取和活性测定方法参照Koo et al.<sup>[11-14]</sup>和靳焯<sup>[15]</sup>报道的牛肉中Calpains粗酶的提取和活性测定方法并做相应改动而确立。

#### 1) 绵羊肉中Calpains粗酶液的提取

溶液配制:

抽提液: 0.1 M Tris-HCl, 10 mM EDTA, pH 7.9, 1 N 乙酸调节

缓冲液A: 0.1 M Tris-HCl, 4 mM EDTA, pH 8.0, 1 N 乙酸调节

缓冲液B: 0.05 M Tris-HCl, 4 mM EDTA, pH 7.0, 1 N 乙酸调节

透析液: 0.01 M Tris-HCl, 2 mM EDTA, pH 7.0, 1 N 乙酸调节

所配以上溶液均置0~4℃冰箱中保存备用。

提取过程:

从冰箱中取出样品, 置4℃水浴中解冻2 h, 去掉包装, 准确分割成50 g肉块, 剪刀剪成小碎块儿后置于匀浆杯中, 加入50 mL抽提液, 用高速组织匀浆机(1000 r/min)捣碎30 s, 停1 min, 再加入50 mL抽提液, 捣碎30 s, 停1 min, 再加入50 mL抽提液, 捣碎30 s(防止温度升高, Calpains在提取过程中变性失活)。将捣碎的肌浆离心(7000 g, 30 min), 上清液用纱布过滤后用1 N 乙酸调pH至6.1~6.2, 置4℃冰箱静置20 min; 离心(6000 g, 30 min), 上清液用1 N 乙酸调pH至4.9~

5.0, 置4℃冰箱静置20 min; 离心(6000 g, 30 min), 弃去上清液, 向沉淀中加入7 mL缓冲液A和8 mL蒸馏水, 轻轻摇匀, 放在磁力搅拌器上置4层析箱中搅拌至沉淀全部溶解, 调节pH值至7.0(1 N 乙酸调节, 在冰盒中操作), 然后用冷冻离心机离心(16000 r/min, 60 min), 取上清液, 加入0~1.8 M  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (边加边搅拌, 防止盐浓度局部过高而导致酶失活, 在冰盒中操作), 静置10 min后, 离心(16000 r/min, 30 min), 弃去上清液, 每支离心试管中加入2 mL缓冲液B溶解沉淀(冰盒中进行), 待沉淀全部溶解后将溶液移入透析袋, 放入400 mL透析液中0~4℃条件下透析12~14 h, (在此期间更换透析液3~4次, 用奈氏试剂检查透析外液, 直至透析完全)。透析完全后, 将透析袋内的溶液再次离心(16000 r/min, 30 min), 上清液即为钙激活酶的粗酶液。提取后的粗酶液置4℃条件下保存备用。

#### 2) Calpains粗酶活性的测定

Calpains粗酶活性是通过测定Calpains水解蛋白质所释放的肽链数量的多少来测定。一般测定以酪蛋白为底物, 反应后测其吸光度。具体步骤如下:

反应溶剂的配制:

100 mM KCl, 10 mM Tris-HCl, 100 mM  $\beta$ -Mercaptoethanol, 1 mM  $\text{NaN}_3$ , 0.1 mM EDTA, 5 mM  $\text{CaCl}_2$ , 调pH 7.5。配好后置于4℃条件下保存备用。

反应溶液的配制:

先用0.5 N NaOH将酪蛋白溶解, 再将酪蛋白的碱性溶液加入到上述反应溶剂中, 使酪蛋白含量为5 mg/mL, 所得溶液即为反应溶液。

Calpains粗酶活性的测定:

取上述反应溶液1.5 mL, 加入0.5 mL粗酶液。空白为1.5 mL反应溶剂, 加入0.5 mL缓冲液B; 对照为1.5 mL反应溶液, 加入0.5 mL变性的粗酶液(加热变性: 将提取到的粗酶液在100℃水浴中煮沸5 min, 冷却至室温), 反应总体积均为2 mL。在室温下反应1 h, 加入2 mL 10% TCA终止反应, 反应液离心(1000 r/min, 30 min)后, 在紫外分光光度计278 nm处测OD值, 计算每50 g肌肉中Calpains粗酶液的总活性。

$$A_{\text{总}} = (\text{反应溶液在 } 278 \text{ nm 处吸光度} - \text{对照在 } 278 \text{ nm 处吸光度}) \times \text{稀释倍数}$$

Calpains粗酶活性单位为 $A_{\text{总}}/50\text{ g 肉}$ 。

### 1.2.5 剪切力值测定

仪器评定测定肉品嫩度的方法有多种, 包括剪切力值测定、穿透测定和破碎指数测定法等<sup>[16]</sup>, 本实验应用最常用的方法之一剪切力值测定仪测定, 并以肉的剪切力值作为衡量肉的嫩度的指标。从冰箱中取出样品, 置4℃水浴中解冻2 h, 去掉包装, 分割成50 g肉块, 将肉样顺肌纤维走向切成10 g左右小块, 置沸水中煮至中心温度75℃(用穿刺温度计测量)时, 取出冷却, 顺肌纤维切成厚度为1~2 mm的薄片, 然后在C-1M型嫩度计上测定剪切力值。

## 2 结果与讨论

## 2.1 超高压处理对绵羊肉感官特性的影响

### 2.1.1 色泽变化

在 100~400 MPa 范围内,随着压力的升高,绵羊肉的鲜红色逐渐淡化。压力达到 400 MPa 时,样品呈粉红色并伴有轻微的白色小斑点出现。压力处理后肌肉颜色的淡化可能是由于肌红蛋白对压力处理较敏感,在不同的压力水平下发生不同程度的变性。随压力升高,肉样中出现轻微的白色斑点,可能是由于部分脂肪组织在压力作用下发生凝结。样品颜色的变化与压力的变动范围密切相关,因实验材料的限制未能对颜色变化与相应的压力处理参数进行优化。实验中所需处理样品量较大,因肉的取样部位不同,肉的组织结构和肌红蛋白含量存在一定的差异,给实验材料的选择带来一定的难度。但是,只要压力、温度、保压时间等参数选择适当,就可以解决压力处理后肉样的颜色淡化问题。

### 2.1.2 风味变化

压力为 400 MPa 处理下的绵羊肉样品产生轻微的类型蒸煮的风味,这种蛋白质“熟化”特征的出现可能是由于压力处理导致肌肉蛋白质的高级结构遭到破坏,使蛋白质变性。这种压力变性与热处理变性不同:加热使蛋白质变性是由于分子的剧烈运动,使分子链上较弱的键断裂而发生变性;加压变性对蛋白质的共价键无影响,是非共价键遭到破坏。风味的形成可能是因为高压处理加速肌肉中腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)及腺嘌呤核苷二磷酸(ADP)的降解,其代谢产物次黄嘌呤核苷酸(MP)、5-鸟苷酸(GMP)、次黄嘌呤核苷(NO)和次黄嘌呤(HYP)含量在短时间内快速增加,而这些产物恰好是肌肉代谢成熟(Aging)过程中产生的呈味物质,这也表明超高压处理有助于提高绵羊肉的成熟和嫩度。

## 2.2 超高压处理对绵羊肉显微结构的影响

1) 图 1 是绵羊肉显微结构图。构成肌原纤维的粗丝和细丝排列在某一区域形成重叠,从而形成了显微镜下观察时所见的明暗相间的条纹即横纹。光线较暗的区域称为暗带(A-带),光线较亮的区域称为明带(I-带)。A 带的中央有一条暗线称为 M 线,将 A 带分为左右两半,在 M 线附近有一颜色较浅的区域,称为 H 区。I 带的中央也有一条暗线,称之为 Z 线,将 I 带从中间分为左右两半。两个相邻 Z 线间的肌原纤维称为肌节(Sarcomere)。肌节是肌原纤维的重复构造单元,也是肌肉收缩、松弛交替发生的基本单位。

2) 由图 2、3、4 可见,压力处理后绵羊肌肉的肌节普遍缩短。超高压处理条件下肌节的收缩是因为压力处理使得 ATP 酶被激活,ATP 向 ADP 转化释放的能量推动肌动蛋白(构成细丝的主要成分)向肌球蛋白(构成粗丝的主要成分)方向移动,使粗丝和细丝相互重合导致肌纤维收缩,肌节缩短。

3) 在 400 MPa 压力处理下,绵羊肉显微结构的 Z 盘崩解,Z 线断裂或消失,M 线降解,I 带呈现白色。而对照中 I 带呈现同 Z 线相平行的线条阴影区,M 线呈现暗黑色条带状并可看到相互平行的条纹。I 带变白可

能是因为分布在 I 带处的肌动蛋白、原肌球蛋白(Tropomyosin)和肌钙蛋白(Troponin)等主要结构蛋白在压力处理下发生变性形成凝胶状态而呈现白色条带区。M 线降解主要是分布在 M 线的肌酸激酶(Creatine Kinase)、M 蛋白(M-Protein)和肌间球蛋白(Myomesin)3 种结构蛋白在 400 MPa 压力下出现凝胶化状态,而在显微结构照片上呈现白色条带。



图 1 绵羊肉肌原纤维结构(对照)  
Fig. 1 Myofibrils of mutton skeletal muscle(control)



图 2 绵羊肉肌原纤维结构(300 MPa, 10 min)  
Fig. 2 Myofibrils of mutton skeletal muscle (300 MPa, 10 min)



图 3 绵羊肉肌原纤维结构(350 MPa, 10 min)  
Fig. 3 Myofibrils of mutton skeletal muscle (350 MPa, 10 min)



图 4 绵羊肉肌原纤维结构(400 MPa, 10 min)  
Fig. 4 Myofibrils of mutton skeletal muscle (400 MPa, 10 min)

## 2.3 超高压处理对绵羊肉中 Calpains 粗酶活性的影响

由图 5 可以看出,压力在 400 MPa 内,随着压力的升高,Calpains 粗酶活性显著下降( $p < 0.01$ )。压力由 100 MPa 升高到 200 MPa 的过程中,Calpains 粗酶活性下降速度迅速;当压力由 200 MPa 升到 400 MPa 时,Calpains 粗酶活性下降速度缓慢;压力达到 400 MPa 时,Calpains 粗酶活性接近于零。压力处理后 Calpains 粗酶活性的下降,一方面是由于高压处理瞬间提高了肌浆中钙离子浓度,Calpains 被激活,发挥水解蛋白质的作用,而随着钙离子浓度的继续升高,Calpains 发生自溶作用;另一方面,是由于钙离子浓度较高,钙激活酶抑制蛋白(Calpastatin)竞争性地与酶的活性中心结合,也抑制了酶的活性。在压力为 400 MPa 下,Calpains 已经基本变性失活,这可能是因为压力处理破坏了酶的三级结构和四级结构,使 Calpains 的空间构象和活性中心受到部分破坏而变性失活。这些结构的变化程度在不同的压力范围内有所不同。曲线上压力为 300 MPa 时的

Calpains 粗酶活性比 250MPa 时略微回升,可能是因为压力处理使酶的空间构象遭到不同程度的破坏,受破坏的酶的空间构象进行自我修复或者酶的活性中心重新暴露,使酶的活性略微上升。

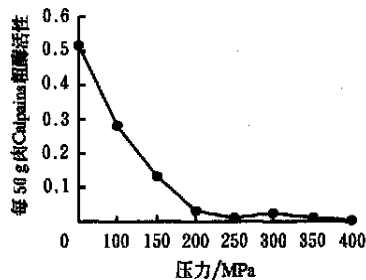


图5 超高压处理对绵羊肉 Calpains 粗酶活性的影响  
Fig 5 Effect of UHP treatment on activity of crude Calpains of mutton skeletal muscle

Calpains 是一种钙激活中性半胱氨酸内肽酶,在肌肉的成熟和嫩化中发挥重要作用<sup>[17-19]</sup>。高压处理后钙激活酶活性显著下降,同时肌肉嫩度又在增加,这并不矛盾。这是由于 Calpains 受钙离子和钙激活酶抑制蛋白(Calpastatin)的专一性调控,其表现活性所需钙离子浓度与其发生自溶作用所需钙离子浓度基本相似( $Ca^{2+}$ 浓度为 100  $\mu M$ )<sup>[20-24]</sup>,也就是说 Calpains 被激活后发挥水解肌肉蛋白的作用的同时也在发生自溶作用。Calpains 在未被激活的情况下没有活性,对细胞不产生伤害;被激活后,发生自溶作用的同时也在水解肌肉中起连接和支架作用的蛋白质,从而使肌肉的剪切力值下降,嫩度增加。可见,超高压处理后 Calpains 的表观活性下降并不说明 Calpains 的低水解能力,相反,正反映出其水解作用的进行和加强。

#### 2.4 超高压处理对绵羊肉剪切力值的影响

由图 6 可以看出,随着压力的升高,绵羊肉的剪切力值一直呈下降趋势,分析结果表明压力处理使绵羊肉的剪切力值显著下降( $P < 0.05$ )。压力处理后绵羊肉剪切力值的下降,一方面由于压力处理导致肌肉显微结构发生变化,肌节收缩,肌纤维断裂,肌原纤维小片化和结构蛋白的凝胶化。另一方面由于高压处理使肌浆网和线粒体中的钙离子被释放出来,提高了钙离子浓度,钙激活酶被激活,水解肌纤维中起连接和支架作用的蛋白质,引起细胞结构的弱化。

肌肉的嫩度受很多因素的影响,如宰前家畜的年龄、性别、营养状况、宰后尸僵和成熟以及处理方法等。近十年来,国外一些肉品科学家进行大量研究后提出:肉质改善的根本原因是横纹肌肌原纤维小片化,肌肉纤维丧失完整性。可见,实验中超高压处理使绵羊肉的肌节收缩,肌原纤维断裂,剪切力值下降,很大程度上说明了超压力处理发挥了对绵羊肉的嫩化作用。

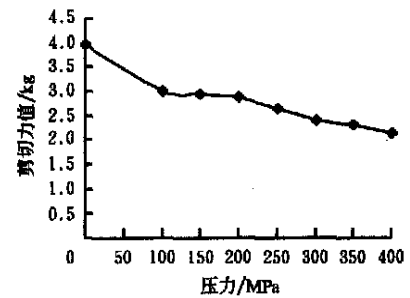


图6 超高压处理对绵羊肉剪切力值的影响  
Fig 6 Effect of UHP treatment on shear force value of mutton skeletal muscle

### 3 结论

1) 超高压处理后,绵羊肉的颜色变淡,产生轻微的类型蒸熟的成熟风味;肌节缩短,肌原纤维断裂和小片化,结构蛋白出现凝胶化状态;钙激活酶粗酶活性下降和剪切力值的下降,均表明超高压处理促进了绵羊肉的成熟和嫩化。

2) 超高压技术对肉的嫩化机理主要是高压使肌肉的显微结构和内源蛋白酶发生变化,从而提高肉的嫩度。

#### [参考文献]

- [1] 高福成 现代食品工程高新技术[M] 北京:中国轻工业出版社,1999:331-344
- [2] 杨公明 食品超高压加工技术与设备研究[D] 法国: Bourgogne 大学 DSER 论文,1996
- [3] 杨公明,马成林 食品高压加工技术的最新发展[J] 农业工程学报,1995,11:101-104
- [4] 德力格尔桑 静态高压处理食品的生物学效应[A] 全国首届高压食品暨超高压技术应用专业论文集[C],1999:8-15
- [5] 冯根源 高压在食品加工中的开发利用[J] 食品研究与开发,1999,(1):28-30
- [6] 余小颖 食品高压处理技术及应用[J] 食品科技,2000,(6):10-12
- [7] Elgasim E A. The effect of ultrahydrostatic pressure of pre-rigor muscle on characteristics of economic importance [D] M S thesis Oregon State Univ, 1977.
- [8] Kennick W H, Elgasim E A, Hoimes Z A, et al The effect of ultrahydrostatic pressurization of pre-rigor muscle on post-rigor meat characteristics[J] Meat Sci, 1980, (4): 33
- [9] Macfarlane J J. Effects of pressure treatment on the ultrastructure of striated muscle[J] Meat Sci, 1982, (2): 281.
- [10] Elgasim E A. Effect of high hydrostatic pressure on meat microstructure [J] Food Microstructure, 1982, (1): 75
- [11] Koohmaraie M, Kennick W H, Elgasim E A, et al Effect of postmortem storage on muscle protein degradation: analysis by SDS-polyacrylamide gel electrophoresis[J] J Food Sci, 1984, 49: 292

- [12] Koochmaraie M, Kennick W H, Elgasim E A, et al. Effect of prerigor pressurization on the activity of calcium-activated factor[J]. *J Food Sci*, 1984, 49: 680
- [13] Koochmaraie M, Kennick W H, Elgasim E A, et al. Effect of postmortem storage on cold-shortened bovine muscle: Analysis by SDS-polyacrylamide gel electrophoresis[J]. *J Food Sci*, 1984, 49: 290
- [14] Koochmaraie M. Role of  $\text{Ca}^{2+}$ -dependent proteases and lysosomal enzymes in postmortem changes in bovine skeletal muscle[J]. *J Food Sci*, 1988, 53 (5): 1253-1257.
- [15] 靳 焯, 南庆贤, 车荣钰. 高压处理对牛肉中主要酶活性的影响[J]. *肉类研究*, 2001(3): 13- 16
- [16] 孙玉民. 畜禽肉品学[M]. 济南: 山东科技出版社, 1993
- [17] 杜 敏, 南庆贤. 钙激活酶的结构及活性调节[J]. *生物化学与生物物理进展*, 1998, 25(1): 26- 29
- [18] Guroff G. A neutral calcium-activated proteinase from the soluble fraction of rat brain[J]. *Bio Chem*, 1964: 239, 149
- [19] Dayton W R. A  $\text{Ca}^{2+}$  activated protease possibly involved in myofibrillar protein turnover purification from porcine muscle[J]. *Biochemistry*, 1976, 15: 2150
- [20] Croall D E, Demartion G N. Calcium-activated neutral protease (Calpain) system: structure, function and regulation[J]. *Physiol Reviews*, 1991, 71: 813- 847.
- [21] Goll D E. Is calpain activity regulated by membranes and autolysis or by calcium and calpastatin[J]. *Bioessays*, 1992, 14: 549- 556
- [22] Saido T C. Calpain: new perspectives in molecular diversity and physiological/pathological involvement[J]. *FASEB J*, 1994, 8: 814- 822
- [23] 王惠昕. 钙激活酶及其在肉嫩化中的作用[J]. *中国畜产与食品*, 1997, 4: 185- 186
- [24] Koochmaraie M. Effect of prerigor pressurization on the activity of calcium-activated factor[J]. *J Food Sci*, 1984, 49: 680- 684

## Mechanism of the effect of hydrostatic high pressure on tenderness of mutton skeletal muscle

Bai Yanhong<sup>1,2</sup>, Deligeersong<sup>3</sup>, Zhao Dianbo<sup>3</sup>, Mao Duobin<sup>1</sup>, Jiang Aimin<sup>2</sup>, Yang Gongming<sup>1,4</sup>

(1. Food and Bioengineering Department, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 45002, China;

2. College of Food Science and Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry,

Yangling 712100, China; 3. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agriculture University,

Huhot 010018, China; 4. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract** Hydrostatic High Pressure (HHP) is a new and advanced technology applied in meat industry. Changes of sensory characteristic, microscopic structure of myofibrils, activities of crude Calpains and shear force value of mutton skeletal muscle under the condition of HHP treatment were studied. The tenderization mechanism that HHP improved the tenderness of mutton skeletal muscle was systematically discussed. Sensory evaluation results showed that muscle color faded and mortem flavor emerged when pressure increased to 400 MPa. Sarcomere contracted, Z-lines broke, M-lines degraded and I band whitened as mutton skeletal muscle was treated with HHP of 400 MPa and pressure keeping time of 10 min. The activity of crude Calpains ( $P < 0.01$ ) and shear force value ( $P < 0.05$ ) decreased significantly with the pressure increasing from 10 MPa to 400 MPa. At the level of 400 MPa, the activity of crude Calpains almost inactivated. As a result of these findings, HHP treatment the ageing and tenderness of mutton skeletal muscle could be improved by HHP treatment.

**Key words** Hydrostatic High Pressure (HHP); mutton skeletal muscle; tenderization; microscopic structure of myofibrils; calpains; shear force