

超高压结合热处理对猪肉肌内脂肪酸组成的影响

黄甜, 严成, 孙娟, 黄业传

(西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010)

摘要: 为研究高压结合一定的温度处理对肉中肌内脂肪酸组成的影响, 以猪背最长肌为原料, 经不同压力 (300~700 MPa)、温度 (20~50 °C) 和时间 (10~20 min) 结合处理后, 测定各样品总脂、甘油三酯、磷脂和游离脂肪的脂肪酸组成变化。结果表明: 压力对猪肉脂肪酸组成的影响最显著, 其次是温度, 两者的交互作用也显著, 而时间的作用不显著; 脂肪酸组成变化主要由磷脂和游离脂肪酸引起, 而总脂和甘油三酯在整个处理中变化很小; 300 MPa 及以上的压力结合热处理使磷脂发生明显的降解作用, 且其中较多的 PUFA 发生降解导致其在磷脂中的比例显著降低, 而 SFA 和 MUFA 的比例显著增加, 游离脂肪酸组成的变化与磷脂恰好相反。因此, 高压结合热处理对肌内总脂肪、甘油三酯的脂肪酸组成影响不大, 而主要影响磷脂和游离脂肪酸。

关键词: 高压; 热处理; 脂肪酸组成; 猪肉

文章编号: 1673-9078(2015)5-226-236

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.036

Combined Effects of High-pressure and Thermal Treatment on Intramuscular Fatty Acid Composition in Pork

HUANG Tian, YAN Cheng, SUN Juan, HUANG Ye-chuan

(College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Pork longissimus muscles were used to study the effects of high pressure and specific temperatures on intramuscular fatty acid composition. After treatments at different pressures (300~700 MPa), temperatures (20~50 °C), or treatment durations (10~20 min), the changes in the fatty acid composition of total lipids, triglycerides, phospholipids, and free fatty acids were observed. The results showed that pressure, followed by temperature, had the most significant impact on the fatty acid composition of pork. The interaction of pressure and temperature was significant, while the effect of treatment duration was no significant. There were mainly changes in the fatty acid composition of phospholipids and free fatty acids, whereas the fatty acid composition of intramuscular total lipids and triglycerides did not change significantly throughout the treatment process. There was significant degradation of phospholipids at pressures ≥ 300 MPa combined with thermal treatment. Additionally, more PUFA was degraded, resulting in a significantly decreased percentage of PUFA in phospholipids, while SFA and MUFA increased significantly in phospholipids. Moreover, the changes in the free fatty acid composition were the opposite of those observed in the phospholipid composition. Therefore, high-pressure and thermal treatment of pork mainly affected the fatty acid composition of phospholipids and free fatty acids but not of total intramuscular lipids and triglycerides.

Key words: high pressure; thermal treatment; fatty acid composition; pork

高压处理早在 100 多年前就在食品中得到应用和研究, 而且现在在食品工业中的应用越来越广泛, 作用也越来越重要, 从某种程度上来说, 高压能在对食物营养和感官品质破坏更小的情况下就使食物中一些有害微生物失活, 也能使一些能引起食品败坏的酶丧失活性, 从而能延长食物的保质期^[1]、提高食物品质。但高压也会对食品品质造成不利, 如一定的压力会使肉中肌内脂肪发生氧化^[2], 从而使肉和肉制品品质败坏

和脂肪酸组成的变化等。

关于高压对肉中脂肪酸组成的影响国内外都有一些报道, 如 Cruz-Romero^[3]、McArdle^[4]和 Yagiz^[5]分别报道了高压处理对鲑鱼、牛肉和牡蛎中脂肪酸组成的影响, 他们都发现高压处理过程中肌内脂肪的脂肪酸组成变化不显著。高压在肉制品中的应用一般都结合热处理, 以杀灭一些耐压微生物, 虽然高压结合热处理对肉中脂肪酸组成的变化有一些研究, 如 McArdle^[6]等报道了高压结合热处理对牛肉和羊肉中脂肪酸组成的影响, 但他们只针对研究其总脂肪组成变化情况, 而肉中肌内脂肪是由甘油三酯、磷脂和游离脂肪酸组成的, 从目前能检索到的文献来看, 关于

收稿日期: 2014-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31271892)

作者简介: 黄甜 (1990-), 女, 在读硕士, 研究方向为食品应用化学

通讯作者: 黄业传 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为食品加工

高压结合热处理对肌内游离脂肪酸、甘油三酯和磷脂中脂肪酸组成影响相关报道几乎没有,因此有待深入研究。本实验以白玉黑土猪背最长肌为原料,经不同压力(300~700 MPa)、温度(20~50 °C)和时间(10~20 min)结合处理后,以未处理原料肉为空白对照组,对样品的脂肪酸组成进行分析,特别关注游离脂肪酸、甘油三酯和磷脂中脂肪酸组成的变化,以更深入了解高压结合热处理对猪肉中脂肪酸组成的影响规律。

1 材料与方法

1.1 原料

白玉黑土猪,四川绵阳天农生态食品开发有限公司提供,宰杀后冷却,取背最长肌约1 kg,快速运回实验室,按20 g/份分装于真空透明封装袋中,于-18 °C保藏待用。原料肉使用前需在4 °C下解冻24 h,修去肉眼可见脂肪及结缔组织,剪碎,按5 g/袋分装于透明包装袋中,并真空封装,封装后的样品马上进行高压处理。

1.2 主要试剂

14%三氟化硼-甲醇溶液(美国, Sigma); 三氯甲烷、正己烷、36%乙酸、甲醇、乙醚、苯等均为分析纯。

1.3 高压处理

在预备试验的基础上,将封装后样品放入高压设备(天津华泰森淼生物工程技术股份有限公司)容器中,分别在20和50 °C下经300、500和700 MPa处理10、20 min,1个处理重复3次。超高压处理装置的参数为:最高工作压力为800 MPa,最高工作温度为60 °C,升压速度约50 MPa/s,卸压速度约100 MPa/s,传压介质为癸二酸二辛酯。

1.4 肌内脂肪酸组成测定

1.4.1 脂肪酸提取

肌内脂肪提取参照 Fokh、Lees 等的方法^[7]; 肌内游离脂肪酸及磷脂的分离根据 Garcia 的方法^[8]; 肌内中性脂肪与磷脂分离参照文献^[9]Juaneda 的方法。

1.4.2 脂肪酸测定

各脂肪酸甲酯化根据 Morrison 的方法^[10]。脂肪酸甲酯的测定采用 450-GC (Varian, INC) 气相质谱联用仪、FID 检测器和 VF-5ms 毛细管色谱柱; 柱箱升温程序为: 起始温度 40 °C, 保持 3 min, 以 5 °C/min

升到 250 °C 并保持 5 min, 分流比 10:1; 进样量 1 μL; 载气为氮气, 流速 1.0 mL/min; 进样口温度为 250 °C; 溶剂延迟 0~3 min; 质谱质量扫描范围 m/z 40~650。脂肪酸定性通过 GC-450Galaxie 工作站数据处理系统, 检索谱图库, 结合相关书籍确定样品中各个脂肪酸成分; 采用面积归一化及峰面积求各脂肪酸的相对百分比。

1.5 统计分析

所有脂肪酸组成的百分比用统计软件 SPSS 13.0 计算其平均值、标准误和显著性分析。为更直观的对比高压结合热处理对猪肉脂肪酸组成的差异, 以主要设计变量(压力 P、温度 T、保压时间 t、压力*温度 PT)、PUFA/SFA 和 SFA+MUFA 值为 X 变量, 总脂肪(Z)、甘三脂(G)、磷脂(P)和游离脂肪(F)中各主要脂肪酸组成的百分比为 Y 变量进行 PLS2 分析。编号 1-13 分别代表 C11:0、C14:0、C16:0、C18:0、C20:0、C16:1、C18:1、C20:1、C18:2、C18:3、C20:2、C20:3 和 C20:4。PLS 分析采用 Unscrambler 软件, V 9.7 (CAMO ASA, Trondheim, Norway), 所有数据在分析前均进行标准化。

2 结果与分析

2.1 高压结合热处理对肌内脂肪组成的影响

高压结合热处理对肌内脂肪组成的影响如表 1、2 所示, 压力对肌内总脂肪和甘油三酯的脂肪酸组成影响不显著, 但磷脂和游离脂肪酸的组成在 300 MPa 及以下的压力结合热处理时都发生显著变化, 如在 20 °C 下经 700 MPa 处理 10 min 的样品与该条件下经 300 MPa 处理的样品相比, 磷脂在肌内脂肪中的比例降低了 24.00%, 与磷脂比例的显著下降相对应的是游离脂肪酸的比例在该条件下增加了 108.64%, 在其他条件下也有类似的规律, 说明游离脂肪酸的增加主要来源于磷脂的水解。这与杨红菊^[11]等的结论是一致的, 他们发现火腿在加工过程中磷脂会不断水解, 而游离脂肪酸不断增加, 甘油三酯降解比例很低。磷脂水解可能是由于高压结合热处理, 肉生物膜中蛋白质发生变性, 使磷脂双分子层结构被破坏, 让处理时释放的一些游离金属离子等容易攻击膜上的磷脂, 从而发生氧化和水解^[12]。

2.1.1 高压结合热处理对甘油三酯中脂肪酸组成的影响

表 1 高压结合热处理对猪肉背最长肌中脂肪组成的影响

Table 1 The effect of high-pressure and thermal treatment on the fatty acid composition of intramuscular lipid in pork M. Longissimus

脂肪酸	对照组	300 MPa				500 MPa			
		20 °C		50 °C		20 °C		50 °C	
		10 min	20 min	10 min	20 min	10 min	20 min	10 min	20 min
肌内甘油三酯 (%肌内脂肪)	73.19±0.83	73.62±0.92	73.73±1.20	73.23±1.18	73.45±0.91	74.78±1.32	74.81±1.10	73.89±0.99	74.08±1.14
肌内磷脂 (%肌内脂肪)	23.21±0.92 ^a	22.79±0.85 ^a	22.61±0.73 ^a	21.68±0.95 ^{ab}	21.53±0.87 ^{ab}	20.24±1.13 ^a	20.17±0.59 ^a	21.22±0.48 ^{ab}	21.06±1.11 ^{ab}
肌内游离脂肪 酸(%肌内脂肪)	3.60±0.54 ^c	3.59±0.19 ^c	3.66±0.38 ^c	5.09±0.28 ^b	5.02±0.48 ^b	4.98±0.26 ^c	5.02±0.19 ^c	4.89±0.45 ^b	4.86±0.27 ^b
肌内总脂肪酸 (%肌肉重)	4.87±0.23	4.91±0.15	4.97±0.26	5.01±0.18	5.06±0.21	4.89±0.16	4.82±0.09	4.95±0.11	4.91±0.24

脂肪酸	700MPa			
	P		50°C	
	10min	20min	10min	20min
肌内甘油三酯 (%肌内脂肪)	75.19±0.92	75.21±1.15	74.43±0.95	74.52±1.19
肌内磷脂 (%肌内脂肪)	17.32±1.02 ^b	17.25±0.98 ^b	18.94±0.86 ^b	18.56±0.91 ^b
肌内游离脂肪 酸(%肌内脂肪)	7.49±0.68 ^a	7.54±1.05 ^a	6.63±0.93 ^a	6.92±0.99 ^a
肌内总脂肪酸 (%肌肉重)	4.76±0.29	4.83±0.15	4.97±0.08	4.92±0.24

注: M. Longissimus 表示背最长肌。表中数据为百分数且表示为平均值±标准误, 是 3 次重复测定的结果, 同行标不同字母表示显著差异 (p<0.05), 未标注的表示各组间差异不显著 (p>0.05) (下同)。

表 2 各条件对肌内脂肪组成影响的显著性

Table 2 The effect of different conditions on the intramuscular lipid composition

脂肪酸	显著性			
	压力	温度	保压时间	压力*温度
肌内甘油三酯				
肌内磷脂	**			*
肌内游离脂肪酸	**			*
肌内总脂肪酸				

注: p<0.01 表示极显著(**), p<0.05(*)表示显著; p>0.05 表示不显著(下同)。

由表 3、4 知, 20 °C 下经 500 和 700 MPa 处理 10 min 的样品与相同条件下 300 MPa 压力水平处理的样品相比, 甘油三酯中 C11:0 和 C20:0 比例分别增加了 8.33、19.44 和 5.08、23.73%, 而 C18:2、PUFA 分别降低了 2.83、14.38 和 11.03、13.70%, 其它条件下甘油三酯中脂肪酸组成变化规律类似。说明甘油三酯中受高压结合热处理的单个脂肪酸很少且相对所占百分

比小, 因此不足以对其造成显著影响。He^[13]曾报道在 500 MPa 的压力作用下, 猪肉中甘油三酯的含量或其脂肪酸组成都不会发生显著变化, 与此结论一致。由于目前尚没有任何关于高压结合热处理对肌肉中甘油三酯脂肪酸组成影响的报道, 可推测至少在 700 MPa 的压力作用下, 猪肉中甘油三酯的脂肪酸组成都不会发生显著变化。

2.1.2 高压结合热处理对磷脂中脂肪酸组成的影响

从表 5、6 可以直观的看出高压结合热处理引起磷脂的脂肪酸组成发生较大变化, 这是由于高压结合热处理时磷脂发生降解, 但各脂肪酸降解程度不一样, 即磷脂中各脂肪酸的降解具有选择性, 与对照组相比, 其中经 700 MPa、50 °C、10 min 处理的样品 C11:0 降解的比例最大 (59.46%), 而该条件下 PUFA 的比例降低了 12.99%, MUFA 和 SFA 的比例分别增加了 13.54%, 8.97%, 其它处理的样品中各磷脂脂肪酸的降解规律相似。可能原因是肉中存在的磷脂酶对

PUFA 有优先选择性脂解作用, 或压力结合热处理使生物膜的结构受到破坏, 磷脂中的部分 PUFA 直接发生氧化分解。这与徐为民^[4]等结论一致, 他们在研究

南京板鸭时也发现磷脂中各脂肪酸有相似的选择性降解规律。

表 3 高压结合热处理对猪肉背最长肌中甘油三酯脂肪酸组成的影响

Table 3 The effect of high-pressure and thermal treatment on the fatty acid composition of triglycerides in pork *M. longissimus*

脂肪酸	对照组	300MPa				500MPa			
		20℃		50℃		20℃		50℃	
		10min	20min	10min	20min	10min	20min	10min	20min
C11:0	0.29±0.28 ^b	0.36±0.13 ^b	0.34±0.09 ^b	0.45±0.07 ^{ab}	0.44±0.15 ^{ab}	0.39±0.08 ^{ab}	0.41±0.13 ^{ab}	0.56±0.15 ^a	0.58±0.16 ^a
C14:0	2.17±0.24	2.83±0.17	3.09±0.18	2.87±0.21	2.83±0.20	2.51±0.27	2.56±0.25	2.37±0.32	2.25±0.24
C16:0	20.57±1.20	20.80±0.42	19.84±0.41	23.03±0.54	23.06±0.34	21.68±0.52	22.84±0.30	23.21±0.34	23.19±0.25
C18:0	10.65±0.53	11.54±0.35	11.37±0.45	12.45±0.19	12.46±0.21	12.08±0.59	12.57±0.24	12.93±0.38	13.02±0.29
C20:0	0.57±0.10 ^b	0.59±0.12 ^b	0.58±0.16 ^b	0.64±0.18 ^a	0.63±0.14 ^a	0.62±0.16 ^{ab}	0.60±0.11 ^{ab}	0.72±0.26 ^a	0.71±0.18 ^a
其他饱和脂肪酸	0.50±0.11	0.48±0.09	0.73±0.05	0.12±0.02	0.15±0.02	0.33±0.05	0.21±0.02	0.12±0.02	0.12±0.03
C16:1	2.27±0.60	2.90±0.13	3.07±0.19	3.50±0.17	3.51±0.32	3.13±0.29	3.18±0.18	3.61±0.26	3.73±0.22
C18:1	14.96±0.79	13.37±0.30	13.42±0.25	14.72±0.24	14.76±0.17	13.47±0.32	14.25±0.22	15.34±0.27	15.26±0.21
C20:1	0.29±0.21	0.51±0.15	0.53±0.17	0.67±0.16	0.66±0.15	0.64±0.13	0.61±0.14	0.85±0.28	0.89±0.31
其他单不饱和脂肪酸	0.09±0.01	0.12±0.01	0.86±0.09	0.18±0.04	0.12±0.02	0.28±0.03	0.18±0.04	0.11±0.02	0.13±0.02
C18:2	34.25±0.22 ^a	32.89±0.62 ^a	32.68±0.64 ^a	29.68±0.61 ^a	29.64±0.58 ^a	31.96±0.67 ^a	26.82±0.42 ^b	28.39±0.57 ^b	28.25±0.58 ^b
C20:2	0.56±0.26	0.53±0.03	0.52±0.06	0.46±0.04	0.45±0.06	0.50±0.03	0.48±0.13	0.48±0.10	0.49±0.07
C20:3	1.50±0.16	1.76±0.19	1.69±0.19	1.47±0.23	1.48±0.14	1.52±0.18	1.51±0.14	1.53±0.21	1.55±0.26
C20:4	10.74±0.10	9.75±0.34	9.69±0.28	8.85±0.28	8.89±0.30	9.53±0.57	9.52±0.45	9.02±0.28	9.01±0.19
C22:2	0.99±0.07	0.83±0.25	0.83±0.26	0.78±0.19	0.77±0.12	0.82±0.14	0.79±0.12	0.65±0.20	0.67±0.24
其他多不饱和脂肪酸	0.17±0.04	0.74±0.18	0.76±0.15	0.13±0.02	0.15±0.03	0.54±0.10	0.14±0.03	0.11±0.02	0.15±0.02
SFA	34.18±1.18	36.60±0.54	35.95±0.53	39.56±0.38	39.90±0.64	37.61±0.58	39.19±0.61	39.91±0.64	39.87±0.56
MUFA	18.61±0.48	16.90±0.45	17.88±0.29	19.07±0.46	19.05±0.27	19.07±0.43	19.05±0.22	19.91±0.56	20.01±0.42
PUFA	48.21±0.46 ^a	46.50±0.57 ^a	46.17±0.82 ^a	41.37±0.64 ^b	41.38±0.68 ^b	41.37±0.61 ^b	41.38±0.60 ^b	40.18±0.72 ^b	40.12±0.87 ^b
脂肪酸	700MPa								
	20℃		50℃						
	10min	20min	10min	20min					
C11:0	0.43±0.14 ^{ab}	0.54±0.15 ^a	0.49±0.08 ^{ab}	0.55±0.13 ^a					
C14:0	2.05±0.23	1.82±1.82	2.85±0.27	2.86±0.15					
C16:0	23.34±0.21	23.26±0.44	23.12±0.29	23.15±0.32					
C18:0	13.06±0.45	13.09±0.27	12.53±0.25	12.54±0.37					
C20:0	0.73±0.22 ^a	0.65±0.10 ^a	0.67±0.19 ^a	0.69±0.16 ^a					
其他饱和脂肪酸	0.22±0.01	0.10±0.02	0.16±0.03	0.12±0.04					
C16:1	3.75±0.17	3.68±0.24	3.54±0.19	3.57±0.21					
C18:1	15.32±0.14	16.08±0.12	15.02±0.40	14.98±0.22					
C20:1	0.85±0.24	0.82±0.26	0.71±0.35	0.73±0.24					

转下页

接上页

其他单不饱 和脂肪酸	0.12±0.01	0.11±0.04	0.11±0.01	0.11±0.03
C18:2	28.16±0.53 ^b	28.12±0.51 ^b	29.03±0.62 ^a	28.92±0.54 ^a
C20:2	0.51±0.15	0.50±0.13	0.49±0.14	0.47±0.11
C20:3	1.57±0.17	1.45±0.24	1.47±0.18	1.51±0.19
C20:4	9.09±0.10	8.98±0.19	8.93±0.32	8.95±0.23
C22:2	0.69±0.12	0.70±0.11	0.74±0.25	0.71±0.18
其他多不饱 和脂肪酸	0.11±0.03	0.10±0.02	0.11±0.01	0.14±0.02
SFA	39.83±0.51	39.46±0.53	39.85±0.57	39.91±0.63
MUFA	20.04±0.29	20.69±0.35	19.38±0.30	19.39±0.38
PUFA	40.13±0.81 ^b	39.85±0.54 ^b	40.77±0.71 ^b	40.70±0.67 ^b

注：其他饱和脂肪酸主要包括 C 10:0、C12:0、C13:0 和 C17:0；其他单不饱和脂肪酸主要包括 C14:1 和 C22:1；其他多不饱和脂肪酸主要包括 C18:3、C20:5、C22:4 和 C22:5。SFA 表示总饱和脂肪酸；MUFA 表示总单不饱和脂肪酸；PUFA 表示总多不饱和脂肪酸（下同）。

表 4 各条件对肌内甘油三酯组成影响的显著性

Table 4 The effect of different conditions on the fatty acid composition of triglycerides

显著性	脂肪酸								
	C11:0	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	其他饱和 脂肪酸	C16:1	C18:1	C20:1
压力	*						**		
温度					**		**		
保压时间									
压力*温度	*				*				

显著性	脂肪酸									
	其他单不饱 和脂肪酸	C18:2	C20:2	C20:3	C20:4	C22:2	其他多不饱 和脂肪酸	SFA	MUFA	PUFA
压力			*	*				*		
温度						*				
保压时间										
压力*温度										

表 5 高压结合热处理对猪肉背最长肌中磷脂脂肪酸组成的影响

Table 5 The effect of high-pressure and thermal treatment on the fatty acid composition of phospholipids in pork *M. longissimus*

脂肪酸	对照组	300MPa				500MPa			
		20°C		50°C		20°C		50°C	
		10min	20min	10min	20min	10min	20min	10min	20min
C11:0	0.37±0.25 ^b	0.39±0.12 ^b	0.41±0.14 ^b	0.36±0.13 ^b	0.34±0.10 ^b	0.45±0.23 ^{ab}	0.44±0.11 ^{ab}	0.49±0.12 ^{ab}	0.55±0.16 ^a
C14:0	2.62±0.30 ^{ab}	2.51±0.27 ^{ab}	2.56±0.25 ^{ab}	2.83±0.27 ^a	3.09±0.28 ^a	2.87±0.21 ^a	2.83±0.20 ^a	2.85±0.27 ^a	2.86±0.33 ^a
C16:0	21.26±0.65 ^b	21.68±0.62 ^b	22.84±0.70 ^a	20.80±0.74 ^b	19.84±0.61 ^b	23.03±0.74 ^a	23.06±0.81 ^a	23.12±0.69 ^a	23.15±0.72 ^a
C18:0	11.51±0.60 ^b	12.08±0.59 ^{ab}	12.57±0.50 ^a	11.54±0.35 ^b	11.37±0.45 ^b	12.45±0.49 ^a	12.46±0.53 ^a	12.53±0.46 ^a	12.54±0.47 ^a
C20:0	0.65±0.13	0.62±0.14	0.60±0.13	0.59±0.17	0.58±0.16	0.64±0.16	0.63±0.15	0.67±0.11	0.69±0.16
其他饱和 脂肪酸	0.14±0.02	0.33±0.05	0.21±0.02	0.48±0.09	0.73±0.05	0.12±0.02	0.15±0.02	0.16±0.03	0.12±0.01

转下页

接上页

C16:1	3.19±0.25	3.13±0.28	3.18±0.17	2.90±0.13	3.07±0.16	3.50±0.19	3.51±0.33	3.54±0.18	3.57±0.21																																																																																																																														
C18:1	13.85±0.53 ^b	13.47±0.32 ^b	14.25±0.51 ^{ab}	13.37±0.30 ^b	13.42±0.49 ^b	14.72±0.44 ^{ab}	14.76±0.47 ^{ab}	15.02±0.40 ^a	14.98±0.42 ^a																																																																																																																														
C20:1	0.52±0.33 ^b	0.64±0.15 ^b	0.61±0.12 ^b	0.51±0.15 ^b	0.53±0.17 ^b	0.67±0.17 ^b	0.66±0.18 ^b	0.71±0.14 ^a	0.73±0.11 ^a																																																																																																																														
其他单不 饱和 脂肪酸	0.09±0.02	0.28±0.03	0.18±0.04	0.12±0.01	0.86±0.37	0.18±0.0 ^t	0.12±0.02	0.11±0.01	0.11±0.03																																																																																																																														
C18:2	32.46±0.72 ^a	31.96±0.37 ^a	26.82±0.42 ^b	32.89±0.32 ^a	32.68±0.34 ^a	29.68±0.31 ^a	29.64±0.28 ^a	29.03±0.32 ^a	28.92±0.14 ^b																																																																																																																														
C20:2	0.53±0.26	0.50±0.09	0.48±0.10	0.53±0.17	0.52±0.06	0.46±0.14	0.45±0.06	0.49±0.10	0.47±0.08																																																																																																																														
C20:3	1.67±0.15	1.52±0.18	1.51±0.14	1.76±0.19	1.69±0.18	1.47±0.23	1.48±0.14	1.47±0.14	1.51±0.17																																																																																																																														
C20:4	9.61±0.62	9.53±0.57	9.52±0.45	9.75±0.21	9.69±0.25	8.85±0.28	8.89±0.30	8.93±0.32	8.95±0.23																																																																																																																														
C22:2	0.85±0.05	0.82±0.14	0.79±0.12	0.83±0.05	0.83±0.16	0.78±0.10	0.77±0.18	0.74±0.26	0.71±0.08																																																																																																																														
其他多不 饱和 脂肪酸	0.68±0.05	0.54±0.10	0.14±0.02	0.74±0.48	0.76±0.35	0.13±0.02	0.15±0.02	0.11±0.01	0.14±0.02																																																																																																																														
SFA	36.55±1.02 ^b	37.61±0.54 ^b	39.19±0.60 ^a	36.60±0.74 ^b	35.95±0.56 ^b	39.56±0.71 ^a	39.90±0.54 ^a	39.85±0.37 ^a	39.91±0.64 ^a																																																																																																																														
MUFA	17.65±0.89 ^b	17.52±0.45 ^b	18.22±0.35 ^b	16.90±0.41 ^b	17.88±0.29 ^b	19.07±0.43 ^a	19.05±0.22 ^a	19.38±0.30 ^a	19.39±0.83 ^a																																																																																																																														
PUFA	45.80±1.42 ^a	44.87±0.51 ^a	42.59±0.69 ^b	46.50±0.57 ^a	46.17±1.01 ^a	41.37±0.61 ^b	41.38±0.70 ^b	40.77±0.71 ^b	40.70±0.67 ^b																																																																																																																														
700MPa																																																																																																																																							
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2">20°C</th> <th colspan="2">50°C</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>10min</th> <th>20min</th> <th>10min</th> <th>20min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C11:0</td> <td></td> <td>0.56±0.14^a</td> <td>0.58±0.17^a</td> <td>0.59±0.14^a</td> <td>0.54±0.15^a</td> </tr> <tr> <td>C14:0</td> <td></td> <td>2.37±0.32^{ab}</td> <td>2.25±0.24^{ab}</td> <td>2.01±0.21^{ab}</td> <td>1.82±1.72^b</td> </tr> <tr> <td>C16:0</td> <td></td> <td>23.21±0.84^a</td> <td>23.19±0.75^a</td> <td>23.34±0.93^a</td> <td>23.26±0.84^a</td> </tr> <tr> <td>C18:0</td> <td></td> <td>12.93±0.46^a</td> <td>13.02±0.48^a</td> <td>13.06±0.51^a</td> <td>13.09±0.52^a</td> </tr> <tr> <td>C20:0</td> <td></td> <td>0.72±0.14</td> <td>0.71±0.19</td> <td>0.73±0.15</td> <td>0.65±0.10</td> </tr> <tr> <td>其他饱和 脂肪酸</td> <td></td> <td>0.12±0.03</td> <td>0.12±0.01</td> <td>0.10±0.01</td> <td>0.10±0.02</td> </tr> <tr> <td>C16:1</td> <td></td> <td>3.61±0.26</td> <td>3.73±0.22</td> <td>3.75±0.17</td> <td>3.68±0.24</td> </tr> <tr> <td>C18:1</td> <td></td> <td>15.34±0.58^a</td> <td>15.26±0.51^a</td> <td>15.32±0.54^a</td> <td>16.08±0.57^a</td> </tr> <tr> <td>C20:1</td> <td></td> <td>0.85±0.25^a</td> <td>0.89±0.19^a</td> <td>0.85±0.35^a</td> <td>0.82±0.16^a</td> </tr> <tr> <td>其他单不 饱和 脂肪酸</td> <td></td> <td>0.11±0.02</td> <td>0.13±0.02</td> <td>0.12±0.01</td> <td>0.11±0.04</td> </tr> <tr> <td>C18:2</td> <td></td> <td>28.39±0.27^b</td> <td>28.25±0.18^b</td> <td>28.16±0.23^b</td> <td>28.12±0.16^b</td> </tr> <tr> <td>C20:2</td> <td></td> <td>0.48±0.03</td> <td>0.49±0.15</td> <td>0.51±0.12</td> <td>0.50±0.13</td> </tr> <tr> <td>C20:3</td> <td></td> <td>1.53±0.16</td> <td>1.55±0.26</td> <td>1.57±0.13</td> <td>1.45±0.21</td> </tr> <tr> <td>C20:4</td> <td></td> <td>9.02±0.27</td> <td>9.01±0.22</td> <td>9.09±0.10</td> <td>8.98±0.19</td> </tr> <tr> <td>C22:2</td> <td></td> <td>0.65±0.20</td> <td>0.67±0.14</td> <td>0.69±0.11</td> <td>0.70±0.15</td> </tr> <tr> <td>其他多不 饱和 脂肪酸</td> <td></td> <td>0.11±0.02</td> <td>0.15±0.02</td> <td>0.11±0.03</td> <td>0.10±0.01</td> </tr> <tr> <td>SFA</td> <td></td> <td>39.91±0.53^a</td> <td>39.87±0.65^a</td> <td>39.83±0.61^a</td> <td>39.46±0.67^a</td> </tr> <tr> <td>MUFA</td> <td></td> <td>19.91±0.57^a</td> <td>20.01±0.91^a</td> <td>20.04±0.58^a</td> <td>20.69±0.45^a</td> </tr> <tr> <td>PUFA</td> <td></td> <td>40.18±0.48^b</td> <td>40.12±0.61^b</td> <td>40.13±0.64^b</td> <td>39.85±0.57^b</td> </tr> </tbody> </table>												20°C		50°C				10min	20min	10min	20min	C11:0		0.56±0.14 ^a	0.58±0.17 ^a	0.59±0.14 ^a	0.54±0.15 ^a	C14:0		2.37±0.32 ^{ab}	2.25±0.24 ^{ab}	2.01±0.21 ^{ab}	1.82±1.72 ^b	C16:0		23.21±0.84 ^a	23.19±0.75 ^a	23.34±0.93 ^a	23.26±0.84 ^a	C18:0		12.93±0.46 ^a	13.02±0.48 ^a	13.06±0.51 ^a	13.09±0.52 ^a	C20:0		0.72±0.14	0.71±0.19	0.73±0.15	0.65±0.10	其他饱和 脂肪酸		0.12±0.03	0.12±0.01	0.10±0.01	0.10±0.02	C16:1		3.61±0.26	3.73±0.22	3.75±0.17	3.68±0.24	C18:1		15.34±0.58 ^a	15.26±0.51 ^a	15.32±0.54 ^a	16.08±0.57 ^a	C20:1		0.85±0.25 ^a	0.89±0.19 ^a	0.85±0.35 ^a	0.82±0.16 ^a	其他单不 饱和 脂肪酸		0.11±0.02	0.13±0.02	0.12±0.01	0.11±0.04	C18:2		28.39±0.27 ^b	28.25±0.18 ^b	28.16±0.23 ^b	28.12±0.16 ^b	C20:2		0.48±0.03	0.49±0.15	0.51±0.12	0.50±0.13	C20:3		1.53±0.16	1.55±0.26	1.57±0.13	1.45±0.21	C20:4		9.02±0.27	9.01±0.22	9.09±0.10	8.98±0.19	C22:2		0.65±0.20	0.67±0.14	0.69±0.11	0.70±0.15	其他多不 饱和 脂肪酸		0.11±0.02	0.15±0.02	0.11±0.03	0.10±0.01	SFA		39.91±0.53 ^a	39.87±0.65 ^a	39.83±0.61 ^a	39.46±0.67 ^a	MUFA		19.91±0.57 ^a	20.01±0.91 ^a	20.04±0.58 ^a	20.69±0.45 ^a	PUFA		40.18±0.48 ^b	40.12±0.61 ^b	40.13±0.64 ^b	39.85±0.57 ^b
		20°C		50°C																																																																																																																																			
		10min	20min	10min	20min																																																																																																																																		
C11:0		0.56±0.14 ^a	0.58±0.17 ^a	0.59±0.14 ^a	0.54±0.15 ^a																																																																																																																																		
C14:0		2.37±0.32 ^{ab}	2.25±0.24 ^{ab}	2.01±0.21 ^{ab}	1.82±1.72 ^b																																																																																																																																		
C16:0		23.21±0.84 ^a	23.19±0.75 ^a	23.34±0.93 ^a	23.26±0.84 ^a																																																																																																																																		
C18:0		12.93±0.46 ^a	13.02±0.48 ^a	13.06±0.51 ^a	13.09±0.52 ^a																																																																																																																																		
C20:0		0.72±0.14	0.71±0.19	0.73±0.15	0.65±0.10																																																																																																																																		
其他饱和 脂肪酸		0.12±0.03	0.12±0.01	0.10±0.01	0.10±0.02																																																																																																																																		
C16:1		3.61±0.26	3.73±0.22	3.75±0.17	3.68±0.24																																																																																																																																		
C18:1		15.34±0.58 ^a	15.26±0.51 ^a	15.32±0.54 ^a	16.08±0.57 ^a																																																																																																																																		
C20:1		0.85±0.25 ^a	0.89±0.19 ^a	0.85±0.35 ^a	0.82±0.16 ^a																																																																																																																																		
其他单不 饱和 脂肪酸		0.11±0.02	0.13±0.02	0.12±0.01	0.11±0.04																																																																																																																																		
C18:2		28.39±0.27 ^b	28.25±0.18 ^b	28.16±0.23 ^b	28.12±0.16 ^b																																																																																																																																		
C20:2		0.48±0.03	0.49±0.15	0.51±0.12	0.50±0.13																																																																																																																																		
C20:3		1.53±0.16	1.55±0.26	1.57±0.13	1.45±0.21																																																																																																																																		
C20:4		9.02±0.27	9.01±0.22	9.09±0.10	8.98±0.19																																																																																																																																		
C22:2		0.65±0.20	0.67±0.14	0.69±0.11	0.70±0.15																																																																																																																																		
其他多不 饱和 脂肪酸		0.11±0.02	0.15±0.02	0.11±0.03	0.10±0.01																																																																																																																																		
SFA		39.91±0.53 ^a	39.87±0.65 ^a	39.83±0.61 ^a	39.46±0.67 ^a																																																																																																																																		
MUFA		19.91±0.57 ^a	20.01±0.91 ^a	20.04±0.58 ^a	20.69±0.45 ^a																																																																																																																																		
PUFA		40.18±0.48 ^b	40.12±0.61 ^b	40.13±0.64 ^b	39.85±0.57 ^b																																																																																																																																		

表 6 各条件对肌内磷脂组成影响的显著性

Table 6 The effect of different conditions on the fatty acid composition of phospholipids

显著性	脂肪酸								
	C11:0	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	其他饱和 脂肪酸	C16:1	C18:1	C20:1
压力	**	**		**	*		*	*	**
温度							*	*	
保压时间									
压力*温度	*	*	*	*				*	*

显著性	脂肪酸									
	其他单不饱 和脂肪酸	C18:2	C20:2	C20:3	C20:4	C22:2	其他多不饱 和脂肪酸	SFA	MUFA	PUFA
压力		*				**			*	
温度					**					*
保压时间										
压力*温度		*						*	*	*

2.1.3 高压结合热处理对游离脂肪酸组成的影响

如表 7、8 所示，高压结合热处理引起多数游离脂肪酸的比例发生显著变化，如与对照组相比，经 50 °C、700 MPa 处理 10 min 的样品 C20:1 降解的比例最大（37.04%），而该条件下 MUFA 和 SFA 的比例分别降低了 14.82%，6.80%，PUFA 的比例增加了 13.72%，游离脂肪酸中 SFA、MUFA 和 PUFA 的变化规律与磷脂中的刚好相反，进一步说明游离脂肪酸主

要来源于磷脂降解。游离脂肪酸中 PUFA 的变化规律与杨红菊^[12]等的报道略不同，他们发现在火腿加工过程中，肌内磷脂中 PUFA 的比例保持不变或减小，造成的原因可能是火腿加工时温度较高且加工时间较长，使游离脂肪酸中大部分 PUFA 在该条件下都发生氧化分解，而本试验中原料肉经高压结合热处理后马上进行测定，因此游离脂肪酸中仅有较少的 PUFA 在高压处理中发生了氧化。

表 7 高压结合热处理对猪肉背最长肌中游离脂肪酸组成的影响

Table 7 The effect of high-pressure and thermal treatment on the fatty acid composition of free fatty acids in pork M. longissimus

脂肪酸	对照组	300MPa				500MPa			
		20°C		50°C		20°C		50°C	
		10min	20min	10min	20min	10min	20min	10min	20min
C11:0	0.63±0.12 ^a	0.56±0.14 ^a	0.58±0.16 ^a	0.59±0.14 ^a	0.54±0.15 ^a	0.49±0.11 ^a	0.55±0.12 ^a	0.45±0.10 ^b	0.44±0.07 ^b
C14:0	2.16±0.25 ^a	2.37±0.32 ^b	2.25±0.24 ^b	2.01±0.21 ^b	1.82±0.33 ^b	2.85±0.27 ^a	2.86±0.13 ^a	2.87±0.19 ^a	2.83±0.20 ^a
C16:0	23.02±0.91 ^a	23.21±0.74 ^a	23.19±0.85 ^a	23.34±0.92 ^a	23.26±0.94 ^a	23.12±0.79 ^a	23.15±0.82 ^a	23.03±0.84 ^a	23.06±0.93 ^a
C18:0	12.53±0.57	12.93±0.35	13.02±0.38	13.06±0.51	13.09±0.37	12.53±0.35	12.54±0.37	12.45±0.49	12.46±0.41
C20:0	0.78±0.21	0.72±0.24	0.71±0.36	0.73±0.45	0.65±0.30	0.67±0.41	0.69±0.36	0.64±0.32	0.63±0.25
其他饱和 脂肪酸	0.15±0.01	0.12±0.02	0.12±0.01	0.10±0.01	0.10±0.02	0.16±0.03	0.12±0.01	0.12±0.02	0.15±0.02
C16:1	3.54±0.58	3.61±0.26	3.73±0.22	3.75±0.17	3.68±0.24	3.54±0.19	3.57±0.21	3.50±0.17	3.51±0.32
C18:1	15.44±0.77 ^a	15.34±0.47 ^a	15.26±0.51 ^a	15.32±0.54 ^a	16.08±0.62 ^a	15.02±0.40 ^a	14.98±0.53 ^a	14.72±0.54 ^{ab}	14.76±0.47 ^{ab}
C20:1	0.81±0.24 ^a	0.85±0.25 ^a	0.89±0.37 ^a	0.85±0.42 ^a	0.82±0.26 ^a	0.71±0.21 ^a	0.73±0.24 ^a	0.67±0.16 ^{ab}	0.66±0.11 ^{ab}
其他单不饱 和脂肪酸	0.05±0.01	0.11±0.02	0.13±0.02	0.12±0.01	0.11±0.04	0.11±0.01	0.11±0.03	0.18±0.04	0.12±0.02
C18:2	28.21±0.30 ^b	28.39±0.77 ^b	28.25±0.78 ^b	28.16±0.83 ^b	28.12±0.79 ^b	29.03±0.72 ^b	28.92±0.84 ^b	29.68±0.81 ^b	29.64±0.88 ^b
C20:2	0.54±0.18	0.48±0.10	0.49±0.15	0.51±0.13	0.50±0.16	0.49±0.11	0.47±0.09	0.46±0.14	0.45±0.16

转下页

接上页

C20:3	1.72±0.13	1.53±0.17	1.55±0.26	1.57±0.19 ^a	1.45±0.23 ^a	1.47±0.14	1.51±0.18	1.47±0.23	1.48±0.14
C20:4	9.38±0.37	9.02±0.82	9.01±0.67	9.09±0.56 ^a	8.98±0.43 ^a	8.93±0.32	8.95±0.49	8.85±0.75	8.89±0.80
C22:2	0.79±0.07	0.65±0.40	0.67±0.32	0.69±0.41 ^a	0.70±0.56 ^a	0.74±0.28	0.71±0.37	0.78±0.50	0.77±0.52
其他多不饱和脂肪酸	0.25±0.05	0.11±0.02	0.15±0.02	0.11±0.03	0.10±0.01	0.11±0.01	0.14±0.02	0.13±0.02	0.15±0.02
SFA	39.27±0.45 ^a	39.91±0.53 ^a	39.87±0.69 ^a	39.83±0.78 ^a	39.46±0.57 ^a	39.85±0.77 ^a	39.91±0.62 ^a	39.56±0.73 ^a	39.90±0.84 ^a
MUFA	19.84±1.17 ^a	19.91±0.57 ^a	20.01±0.54 ^a	20.04±0.67 ^a	20.69±0.75 ^a	19.38±0.81 ^a	19.39±0.73 ^a	19.07±0.45 ^a	19.05±0.72 ^a
PUFA	40.89±0.62 ^b	40.18±0.82 ^b	40.12±0.91 ^b	40.13±0.84 ^b	39.85±0.68 ^b	40.77±0.75 ^b	40.70±0.38 ^b	41.37±0.61 ^b	41.38±0.90 ^b

脂肪酸	700MPa			
	20℃		50℃	
	10min	20min	10min	20min
C11:0	0.39±0.06 ^b	0.41±0.08 ^b	0.36±0.09 ^b	0.34±0.08 ^b
C14:0	2.51±0.27 ^{ab}	2.56±0.25 ^{ab}	2.83±0.17 ^a	3.09±0.18 ^a
C16:0	21.68±0.72 ^{ab}	22.84±0.80 ^a	20.80±0.72 ^b	19.84±0.81 ^b
C18:0	12.08±0.59	12.57±0.40	11.54±0.35	11.37±0.45
C20:0	0.62±0.34	0.60±0.33	0.59±0.37	0.58±0.26
其他饱和脂肪酸	0.33±0.05	0.21±0.02	0.48±0.09	0.73±0.05
C16:1	3.13±0.28	3.18±0.15	2.90±0.13	3.07±0.19
C18:1	13.47±0.32	14.25±0.42 ^{ab}	13.37±0.50 ^b	13.42±0.49 ^b
C20:1	0.64±0.23 ^{ab}	0.61±0.12 ^{ab}	0.51±0.13 ^b	0.53±0.17 ^b
其他单不饱和脂肪酸	0.28±0.03	0.18±0.04	0.12±0.01	0.86±0.34
C18:2	31.96±0.87 ^a	26.82±0.92 ^b	32.89±0.82 ^a	32.68±0.76 ^a
C20:2	0.50±0.18	0.48±0.17	0.53±0.09	0.52±0.10
C20:3	1.52±0.22	1.51±0.24	1.76±0.21	1.69±0.19
C20:4	9.53±0.57	9.52±0.48	9.75±0.58	9.69±0.67
C22:2	0.82±0.34	0.79±0.22	0.83±0.45	0.83±0.46
其他多不饱和脂肪酸	0.54±0.10	0.14±0.02	0.74±0.38	0.76±0.35
SFA	37.61±0.54 ^b	39.19±0.90 ^a	36.60±0.64 ^b	35.95±0.56 ^b
MUFA	17.52±0.45 ^b	18.22±0.38 ^{ab}	16.90±0.45 ^b	17.88±0.89 ^b
PUFA	44.87±0.51 ^{ab}	42.59±0.67 ^b	46.50±0.57 ^a	46.17±0.68 ^a

表 8 各条件对肌内游离脂肪酸组成影响的显著性

Table 8 The effect of different conditions on the fatty acid composition of free fatty acids

显著性	脂肪酸								
	C11:0	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	其他饱和脂肪酸	C16:1	C18:1	C20:1
压力	*	**		**	**				*
温度		*	*				*	*	
保压时间									
压力*温度	**	*	*					*	*

显著性	脂肪酸									
	其他单不饱和脂肪酸	C18:2	C20:2	C20:3	C20:4	C22:2	其他多不饱和脂肪酸	SFA	MUFA	PUFA

转下页

接上页

压力		**	**	**	*	*
温度	*		*		*	*
保压时间						
压力*温度	*	*			*	*

2.1.4 高压结合热处理对肌内总脂肪酸组成的影响

如表 9、10 所示，压力、温度和保压时间的变化不引起肌内总脂肪酸组成的显著变化，而压力与温度的交互作用仅对单个脂肪酸 C20:0、C22:2 的比例影响

显著，其余均不显著。即高压结合热处理对肌内总脂肪酸组成有影响，但受影响的单个脂肪酸很少且所占百分比小，因此不足以对其造成显著影响。因此结论与 He[13]等的报道一致，他们报道的是猪肉中的总脂肪酸组成变化经高压处理后不显著。

表 9 高压结合热处理对猪肉背最长肌中总脂肪酸组成的影响

Table 9 The effect of high-pressure and thermal treatment on the fatty acid composition of intramuscular total lipids in pork M.

		Longissimus							
		300MPa				500MPa			
脂肪酸	对照组	20℃		50℃		20℃		50℃	
		10min	20min	10min	20min	10min	20min	10min	20min
C11:0	0.71±0.39	0.67±0.18	0.65±0.19	0.64±0.25	0.55±0.14	0.43±0.10	0.52±0.11	0.55±0.12	0.62±0.27
C14:0	2.82±0.16	2.73±0.47	2.87±0.28	2.62±0.27	2.59±0.31	2.48±0.27	2.26±0.33	2.19±0.24	2.76±0.25
C16:0	21.23±0.33	21.45±0.83	22.12±0.46	21.87±0.71	21.96±0.89	21.12±0.84	21.16±0.92	21.13±0.87	21.51±0.79
C18:0	14.69±0.32	14.31±0.25	13.95±0.52	14.75±0.27	14.98±0.58	15.26±0.30	15.59±0.37	15.54±0.68	14.33±0.43
C20:0	0.16±0.05 ^b	0.15±0.02 ^b	0.18±0.04 ^b	0.11±0.01 ^b	0.14±0.03 ^b	0.14±0.06 ^b	0.28±0.09 ^a	0.25±0.05 ^a	0.16±0.07 ^b
其他饱和脂肪酸	0.13±0.04	0.26±0.04	0.12±0.02	0.13±0.02	0.11±0.02	0.11±0.01	0.12±0.01	0.12±0.01	0.32±0.06
C16:1	6.65±0.23	6.43±0.30	6.05±0.41	6.04±0.32	5.91±0.41	6.05±0.28	6.74±0.77	6.69±0.29	6.41±0.45
C18:1	41.62±0.50	41.56±0.30	41.39±0.74	41.96±0.85	42.39±0.87	42.71±0.49	42.72±0.90	42.81±0.86	41.62±0.54
C20:1	0.85±0.31	0.82±0.43	0.88±0.61	0.73±0.56	0.78±0.23	0.64±0.41	0.42±0.14	0.45±0.26	0.81±0.35
其他单不饱和脂肪酸	0.09±0.03	0.32±0.02	0.13±0.03	0.11±0.01	0.13±0.02	0.12±0.01	0.13±0.02	0.12±0.02	0.11±0.02
C18:2	7.18±0.20	7.63±0.44	7.76±0.39	7.08±0.28	6.52±0.60	6.69±0.48	6.46±0.32	6.52±0.36	7.65±0.79
C20:2	0.56±0.27	0.51±0.15	0.55±0.21	0.39±0.13	0.46±0.25	0.37±0.13	0.52±0.16	0.54±0.23	0.52±0.28
C20:3	0.25±0.14	0.18±0.13	0.23±0.19	0.32±0.11	0.24±0.12	0.24±0.10	0.29±0.17	0.31±0.15	0.17±0.09
C20:4	2.48±0.15	2.37±0.21	2.59±0.20	2.65±0.26	2.51±0.21	2.95±0.28	2.31±0.29	2.32±0.31	2.42±0.24
C22:2	0.39±0.14 ^b	0.36±0.13 ^b	0.43±0.15 ^b	0.42±0.11 ^b	0.54±0.18 ^a	0.57±0.19 ^a	0.38±0.13 ^b	0.39±0.12 ^b	0.35±0.08 ^b
其他多不饱和脂肪酸	0.22±0.02	0.25±0.05	0.10±0.02	0.18±0.02	0.19±0.02	0.12±0.01	0.10±0.01	0.07±0.02	0.24±0.10
SFA	39.61±0.53	39.57±0.54	39.89±0.78	40.12±0.82	40.33±0.81	39.54±0.58	39.93±0.76	39.78±0.57	39.70±0.91
MUFA	49.31±0.50	49.13±0.57	48.45±0.66	48.84±0.51	49.21±0.45	49.52±0.84	50.01±0.58	50.07±0.69	48.95±0.64
PUFA	11.08±0.19	11.30±0.32	11.66±0.36	11.04±0.34	10.46±0.33	10.94±0.39	10.06±0.67	10.15±0.45	11.35±0.69
SFA+MUFA	88.92±1.04	88.7±0.95	88.34±1.08	88.96±1.13	89.54±0.89	89.06±1.01	89.94±1.26	89.85±0.99	88.65±0.92
PUFA/SFA	0.28±0.10	0.29±0.12	0.29±0.11	0.28±0.15	0.26±0.09	0.28±0.14	0.25±0.13	0.26±0.08	0.29±0.12
		700MPa							
脂肪酸		20℃		50℃					
		10min	20min	10min	20min				

转下页

接上页

C11:0	0.63±0.21	0.61±0.15	0.54±0.13	0.41±0.11
C14:0	2.89±0.43	2.66±0.39	2.67±0.41	2.45±0.29
C16:0	22.07±0.78	21.91±0.84	21.92±0.57	21.08±0.53
C18:0	13.96±0.57	14.72±0.53	15.01±0.46	15.20±0.27
C20:0	0.19±0.04 ^b	0.12±0.10 ^b	0.13±0.04 ^b	0.21±0.02 ^{ab}
其他饱和 和脂肪酸	0.11±0.01	0.11±0.01	0.11±0.03	0.12±0.02
C16:1	6.09±0.20	5.94±0.49	5.92±0.24	6.45±0.25
C18:1	41.52±0.89	42.03±0.75	42.37±0.78	42.38±0.72
C20:1	0.84±0.37	0.72±0.36	0.79±0.42	0.65±0.47
其他单不 饱和脂肪酸	0.13±0.02	0.13±0.01	0.12±0.02	0.13±0.03
C18:2	7.74±0.38	7.05±0.50	6.45±0.74	6.54±0.31
C20:2	0.54±0.19	0.42±0.14	0.43±0.11	0.48±0.13
C20:3	0.21±0.10	0.31±0.15	0.28±0.17	0.26±0.14
C20:4	2.56±0.21	2.68±0.28	2.65±0.33	2.84±0.27
C22:2	0.41±0.16 ^b	0.46±0.17 ^{ab}	0.51±0.09 ^{ab}	0.61±0.21 ^a
其他多不 饱和脂肪酸	0.11±0.03	0.13±0.01	0.10±0.02	0.19±0.03
SFA	39.85±0.95	40.13±0.46	40.38±0.60	39.47±0.58
MUFA	48.58±0.48	48.82±0.72	49.20±0.77	49.61±0.83
PUFA	11.57±0.27	11.05±0.26	10.42±0.59	10.92±0.40
SFA+MUFA	88.43±0.91	88.96±0.87	89.58±1.26	89.08±1.19
PUFA/SFA	0.29±0.15	0.28±0.11	0.26±0.09	0.28±0.15

表 10 各条件对肌内总脂组成影响的显著性

Table 10 The effect of different conditions on the fatty acid composition of total lipids

显著性	脂肪酸								
	C11:0	C14:0	C16:0	C18:0	C20:0	其他饱和 脂肪酸	C16:1	C18:1	C20:1
压力 温度 保压时间 压力*温度	*								
显著性	脂肪酸								
	其他单不饱 和脂肪酸	C18:2	C20:2	C20:3	C20:4	C22:2	其他多不饱 和脂肪酸	SFA	MUFA
压力 温度 保压时间 压力*温度	*								

2.2 高压结合热处理对脂肪酸组成影响的

PLS2 分析

对各主要设计变量对脂肪酸组成变化的影响进行 PLS2 分析,第 1、2 主成份的 PLS 效果如图 1 所示,第 1 主成份解释了全部变量的 69%,第 2 主成份解释了全部变量的 11%,总量达 80%,因此建立的模型能

够起到很好的解释作用。

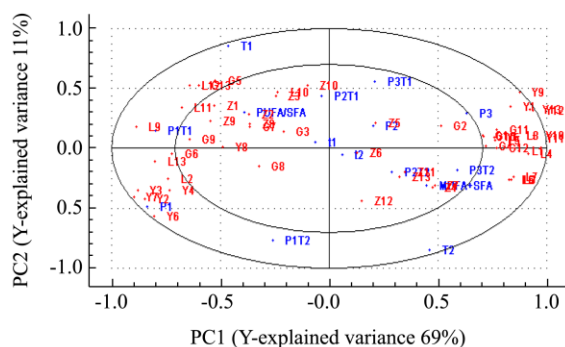


图1 PLS2分析的前二维主成份效果图

Fig.1 The PLS2 correlation loadings plot for the first two principal components(PCs)

注: X轴代表主要设计变量(压力P、温度T、保压时间t、压力*温度PT)、SFA/PUFA和SFA+MUFA值, Y轴代表脂肪酸组成, 内圆和外圆分别代表相关系数 $r^2=0.5(50\%)$ 和 $1.0(100\%)$ 。

不同压力样品间的差异主要体现在第1主成份, 不同温度样品差异同时区别于第1和第2主成份, 由于第1主成份解释的变量远大于第2主成份, 因此压力对脂肪酸的影响比温度更显著; 而不同处理时间样品间的差异不显著, 均在内圆之中。根据前面的分析易知, 高压结合热处理使较多的PUFA发生氧化分解, 尤其是磷脂和游离脂肪酸中的PUFA, 从而使PUFA的比例显著降低而SFA显著升高。从营养学上来说, PUFA/SFA值越高代表营养价值越好, 此外, 有报道认为肉中SFA+MUFA的含量越高, 肉的嫩度、多汁性和风味就越好, 相反若PUFA含量过高则嫩度、风味和多汁都较差, 因此可用SFA+MUFA值来衡量肉类及肉制品的风味等质量指标。从图1可以看出, PUFA/SFA值位于效果图的左边, 说明越靠左的样品营养价值越高, SFA+MUFA值位于效果图的右方, 因此越靠右方的样品风味越好。

对脂肪酸而言, 大部分甘油三酯和总脂肪的脂肪酸位于 $r^2=50\%$ 以内, 说明甘油三酯和总脂肪的脂肪酸几乎不受处理压力和温度的影响; 几乎所有的磷脂和游离脂肪酸的脂肪酸都位于 $r^2=50\%$ 和 100% 之间, 其中大部分都显著区别于第一主成份和第二主成份, 说明磷脂和游离脂肪酸中的脂肪酸组成受压力和温度的影响。因此, 和前面结论一致, PUFA/SFA值、SFA+MUFA值、肌内磷脂和游离脂肪酸的脂肪酸组成主要受压力和温度的影响。

3 结论

在高达700 MPa的压力结合温度(50℃)处理猪

背最长肌过程中, 压力对猪肉脂肪含量和脂肪酸组成的影响最显著, 其次是温度, 两者的交互作用也显著, 而时间的作用不显著; 脂肪酸组成变化主要由磷脂和游离脂肪酸引起, 而总脂和甘油三酯在整个处理中变化很小; 300 MPa及以上的压力结合热处理使磷脂发生明显的降解作用, 且其中较多的PUFA发生降解导致其在磷脂中的比例显著降低, 而SFA和MUFA的比例显著增加, 游离脂肪酸组成的变化与磷脂恰好相反。

参考文献

- [1] Torres J A, Velazquez G. Commercial opportunities and research challenges in the high pressure processing of foods [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(1-2): 95-112
- [2] Yechuan Huang, Zhifei He, Hongjun Li, et al. Effect of antioxidant on the fatty acid composition and lipid oxidation of intramuscular lipid in pressurized pork [J]. Meat Science, 2012, 91: 137-141
- [3] Cruz-Romero M C, Kenya J P, Kelly A L. Fatty acids, volatile compounds and colour changes in high-pressure-treated oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(1):54-61
- [4] McArdle R, Marcos B, Kerry J P, et al. Monitoring the effects of high pressure processing and temperature on selected beef quality attributes [J]. Meat Science, 2010, 86(3): 629-634
- [5] Yagiz Y, Kristinsson H G, Balaban M O, et al. Effect of high pressure processing and cooking treatment on the quality of Atlantic salmon [J]. Food Chemistry, 2009, 116(4): 828-835
- [6] McArdle R A, Marcos B, Kerry, et al. Influence of HPP conditions on selected beef quality attributes and their stability during chilled storage [J]. Meat Science, 2011, 87, 274-281
- [7] Folch J, Lees M, Sloane-Stanley G. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues [J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509
- [8] García R J A, Gibert J, Díaz I. Determination of neutral lipids from subcutaneous fat of cured ham by capillary gas chromatography and liquid chromatography [J]. Journal of Chromatography A, 1994, 667: 225-233
- [9] Juaneda P, Rocquelin G. Rapid and convenient separation of phospholipids and nonphosphorus lipids from rat heart using silica cartridges [J]. Lipids, 1985, 20(1): 40-41
- [10] Morrison W, Smith L. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride-methanol [J]. Journal of Lipid Research, 1964, 5(4): 600-608

- [11] 杨红菊.宣威火腿加工过程中肌内脂肪水解及磷脂水解酶的纯化鉴定[D].中国农业大学,博士学位论文,2005,6
- [12] Beltran E, Pla R, Yuste J, et al. Lipid oxidation of pressurized and cooked chicken: role of sodium chloride and mechanical processing on TBARS and hexanal values [J]. *Meat Science*, 2003, 64(1): 19-25
- [13] Zhifei He, Yechuan Huang, Hongjun Li, et al. Effect of high-pressure treatment on the fatty acid composition of intramuscular lipid in pork [J]. *Meat Science*, 2012, 90: 170-175
- [14] 徐为民.南京板鸭加工过程中脂类物质及挥发性风味成分变化研究[D].南京农业大学,博士学位论文,2008,6

现代食品科技