

高温处理对牛肉脂肪酸及脂肪氧化的影响

Effect of high temperature treatment on beef fatty acid and fat oxidation

柯海瑞¹康怀彬^{1,2}程伟伟^{1,2}蔡超奇¹KE Hai-rui¹ KANG Huai-bin^{1,2} CHENG Wei-wei^{1,2} CAI Chao-qi¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 食品加工与安全国家级实验教学示范中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Food Processing and Safety Education, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:对新鲜牛背最长肌进行高温处理(110, 115, 121 °C),并分别保持 5, 10, 15, 20 min, 采用气相色谱法研究高温对牛背最长肌肌肉脂肪酸组成和脂肪氧化的影响。结果表明, 121 °C 高温处理时, 肌肉脂肪氧化速度显著大于 110, 115 °C 的($P < 0.05$); 饱和脂肪酸(SFA)含量明显增加($P < 0.05$), 不饱和脂肪酸(UFA)含量降低($P < 0.05$); SFA 受处理温度(110, 115 °C)影响不显著($P > 0.05$), 受处理时间影响显著($P < 0.05$), 而热处理温度和时间对 UFA 含量均有显著影响($P < 0.05$); 长链饱和脂肪酸出现一定程度的断裂和降解, 短链及中链脂肪酸含量显著上升($P < 0.05$)。

关键词: 高温处理; 牛肉; 脂肪酸; 脂肪氧化

Abstract: Fresh cattle longissimus dorsi muscle was heated at 110, 115 and 121 °C for 5, 10, 15, 20 min respectively. The effects of high temperature on fatty acid composition and fat oxidation in cattle longissimus dorsi muscle were researched by gas chromatography. The results showed that: at 121 °C, the oxidation rate of intramuscular fat was significantly higher than that at 110 °C and 115 °C ($P < 0.05$); the content of saturated fatty acid (SFA) increased significantly ($P < 0.05$), and the content of unsaturated fatty acid (UFA) decreased ($P < 0.05$); SFA was not significantly affected by high temperature treatment temperature (110, 115 °C) ($P > 0.05$), and was significantly affected by treatment time ($P < 0.05$), while heat treatment temperature and time had significant effects on UFA content ($P < 0.05$); the con-

tent of short chain and medium chain fatty acids increased due to the fracture and degradation of long chain saturated fatty acids.

Keywords: high temperature treatment; beef; fatty acid; fat oxidation

目前, 高温肉制品仍是市场主要的熟肉制品。高温肉制品是指加热介质温度高于 100 °C (通常为 115 ~ 121 °C), 中心温度高于 115 °C 并恒定适当时间的肉制品^[1]。而肉制品热处理过程中脂肪发生的一系列氧化及水解反应都直接影响肉制品嫩度、多汁性以及风味^[2]。

李洪军等^[3]研究发现, 加工时间对猪肉脂肪酸组成和风味变化有一定影响, 而加工方式则对脂肪含量有影响。周慧敏等^[4]研究发现 100 °C 以上的高温对乳化脂肪比例破坏严重, 并可显著促进脂肪氧化。刘梦等^[5]研究发现高温干燥、低温熟制对牛肉干脂肪氧化的影响较小, 且在此条件下处理得到的牛肉干 UFA、MUFA 和 PUFA 含量均达到最高, SFA 含量最低, 牛肉干营养价值损失最小。王瑞花等^[6]研究发现烹制后猪肉脂肪氧化程度加大, SFA 和 UFA 含量有所下降, UFA/SFA 比值上升, 营养价值和食用价值也有所上升。

目前, 国内外对肉制品脂肪氧化的研究多集中在加工处理过程中压力大小的影响, 而 100 °C 以上热处理对牛肉肌肉脂肪影响的研究较少^[7]。试验拟研究不同高温处理对牛肉脂肪酸及脂肪氧化的影响, 以期对牛肉加工过程中热处理温度、时间的控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛背最长肌(排酸处理后): 秦川公牛(2~3 岁), 重庆恒都农业开发有限公司;

硫代硫酸钠标准溶液: 分析纯, 北京北方伟业计量技

基金项目: 河南省重大科技专项(编号: 161100110700)

作者简介: 柯海瑞, 女, 河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 康怀彬(1963—), 男, 河南科技大学教授, 硕士。

E-mail: khbin001@163.com

程伟伟(1991—), 男, 河南科技大学讲师, 博士。

E-mail: 379062396@163.com

收稿日期: 2019-10-16

术研究院；

乙二胺四乙酸(EDTA):分析纯,天津市永大化学试剂有限公司；

硫代巴比妥酸、三氯化硼:分析纯,上海源叶生物科技有限公司；

冰乙酸、碘化钾、无水硫酸钠、可溶性淀粉、重铬酸钾、三氯甲烷、石油醚、三氯乙酸、甲醇、异丙醇、氯化钠、乙酸、乙醚、盐酸、氢氧化钠:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司；

37 种脂肪酸甲酯混合标准品、十九烷酸:色谱纯,美国 Sigma 公司；

正己烷、2,2-二甲氧基丙烷:色谱纯,上海阿拉丁生化科技有限公司；

色谱柱:SP-2560 毛细管柱(100 m×0.25 mm×0.2 μm),美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

高速分散均质机:FJ-200 型,上海标本模型厂；

高压蒸汽灭菌锅:TYAIB 型,宁波久兴医疗器械有限公司；

紫外—可见分光光度计:T6 新世纪型,北京普析通用仪器有限公司；

旋转蒸发器:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂；

干式氮吹仪:YY-N100 型,上海允延仪器有限公司；

分析天平:ATY124 型,日本岛津有限公司；

高速多功能粉碎机:RHP-100 型,浙江荣浩工贸有限公司；

气相色谱仪:7890A 型,美国 Aglient 公司。

1.3 方法

1.3.1 牛肉的修正及高温处理 生鲜牛背最长肌去除表面及夹层脂肪和筋膜组织,切割成 5 cm×5 cm×1 cm 肉块,用蒸煮袋进行真空包装,放入高压蒸汽灭菌锅中进行高温处理。根据张莉莉^[8]的处理方法修改如下:高温处理条件为压力 0.12 MPa,当中心温度达到(110±1), (115±1), (121±1) °C 后分别保持 5, 10, 15, 20 min,处理后的样品静置冷却后存放在 4 °C 冷藏室待测。

1.3.2 过氧化值(POV)的测定 按 GB 5009.227—2016 执行。

1.3.3 硫代巴比妥酸值(TBARS)的测定 参考 Marianne 等^[9]的方法并修改如下:称取 20 g 牛肉样品,切块,用粉碎机粉碎,用含 0.05 g 乙二胺四乙酸的 7.5 g/100 mL 三氯乙酸溶液 50 mL 浸没,匀浆 30~60 s,静置 6 h 充分浸提,过滤,取 10 mL 滤液,加入同体积 0.02 mol/L 的 TBA 水溶液,90 °C 水浴 40 min;取出冷却至室温,继续加入 10 mL 三氯甲烷摇匀,静置分层后,取上层有色液体分别在 532, 600 nm 处测定吸光度。按式(1) 计算 TBARS 值。

$$C = \frac{A_1 - A_2}{Y_{532}} \times \frac{1}{10} \times M \times 100, \quad (1)$$

式中:

C——TBARS 值,mg/100 g；

A₁——上层液体在 532 nm 处的吸光度；

A₂——上层液体在 600 nm 处的吸光度；

Y₅₃₂——丙二醛在 532 nm 处的毫摩尔消光系数,115；

M——丙二醛相对分子质量,72.6。

1.3.4 脂肪酸的测定 参考 GB 5009.168—2016 并进行修改。

(1) 肌肉脂肪的提取:根据 Folch 等^[10]的方法,略作修改。准确称量 100 g 牛肉样品,真空密封高温处理后,粉碎机粉碎,加入 200 mL 三氯甲烷—甲醇溶液(2:1,体积比),8 000 r/min 均质;静置 5 h,过滤,留取滤液,滤渣继续加入 100 mL 三氯甲烷—甲醇溶液,重复上述步骤,合并滤液,加入约 60 mL 生理盐水,振荡摇匀;静置 5 h,去除上层溶液,用加有无水硫酸钠的滤纸过滤下层有机溶剂,将过滤后的下层液体移入烧瓶中,45 °C 下旋转蒸发,待其浓缩成黏稠油状液体后转移至 10 mL 离心管中进行氮吹直至恒重,得到固体提取物。

(2) 皂化:称取 0.2 g 脂肪提取物于 20 mL 离心管中,准确加入 1 mL 十九烷酸内标物和 6 mL 质量分数 2% 的氢氧化钠—甲醇溶液,60 °C 水浴 30 min。

(3) 甲酯化:皂化后的溶液加入 5 mL 质量分数 15% 三氯化硼甲醇溶液,60 °C 水浴 15 min。

(4) 脂肪酸甲酯的提取:冷却至室温,加入 2 mL 正己烷,震荡 2 min,再加入 1 mL 饱和氯化钠水溶液和 2 mL 蒸馏水剧烈震荡,待静置分层后,吸取上层正己烷溶液至 10 mL 试管中,加入 1~2 g 无水硫酸钠,振摇 1 min,静置 5 min,过滤,滤液经 0.25 μm 滤膜再次过滤到进样瓶中,待测定。

1.4 数据处理与分析

每次试验做 3 次平行,结果用(均值±标准差)表示,测定结果采用 DPS 软件进行数据分析,采用 Origin 9.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 对牛肉脂肪 POV 值的影响

由图 1 可知,牛肉 POV 值随加热时间的延长而显著上升(P<0.05)。其中,121 °C 下处理 10 min 时,POV 值出现小幅度下降,可能是随着热处理时间的延长,脂肪二级氧化速率进一步增大,氢过氧化物的氧化分解加快,导致 POV 值下降^[11]。110, 115 °C 下处理 10 min 时,POV 值无明显下降,一方面可能是随着加热时间的延长,脂肪初级氧化速率进一步增大,与二级氧化达到了动态平衡,

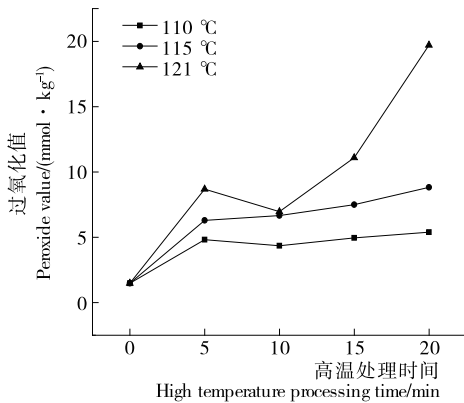


图1 不同高温处理条件对牛肉肌肉脂肪 POV 值的影响

Figure 1 Effect of different high temperature treatment conditions on intramuscular fat peroxide value of beef

氢过氧化物含量持续积累^[12],另一方面在高温处理后期,牛肉汁液流失严重,牛肉水分含量下降导致金属离子表面水化层消失且无法进行美拉德反应产生抗氧化物质,从而进一步加速脂肪氧化^[13-15]。

2.2 对牛肉脂肪 TBARS 值的影响

由图2可知,牛肉肌肉脂肪 TBARS 值随加热时间的延长而显著上升($P < 0.05$)。其中,115 °C 下处理 15 min 时,TBARS 值出现小幅度下降,可能是以丙二醇为代表的二级氧化产物与氨基反应,或与氨基酸、糖原结合导致 TBARS 值下降^[16-17],也有可能是丙二醛进一步氧化成醇、醛、羧酸等挥发性化合物^[18]。不同加热时间牛肉样品 TBARS 值虽有波动,但整体均随处理温度的升高而增大,与马汉军等^[19]的研究结论一致。121 °C 下处理牛肉样品中,次级氧化产物积累严重,TBARS 值均高于其他

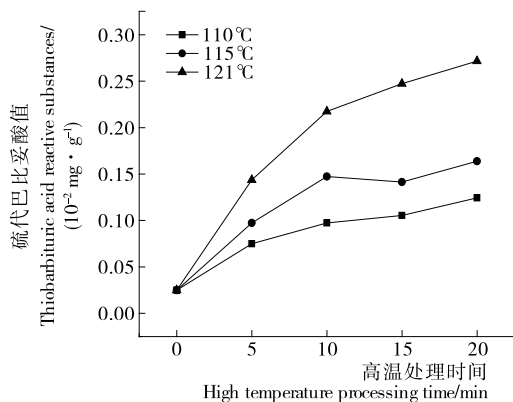


图2 不同高温处理条件对牛肉肌肉脂肪 TBARS 值的影响

Figure 2 Effects of different high temperature treatment conditions on TBARS value of beef intramuscular fat

温度(110,115 °C)下的($P < 0.05$),且随处理时间的延长呈明显上升趋势($P < 0.05$),表明传统商业无菌要求的热处理温度(121 °C)处理下的牛肉样品脂肪氧化速率较快,需及时进行时间控制。

2.3 对牛肉脂肪酸的影响

2.3.1 饱和脂肪酸 由表1可知,110,115 °C 处理下,长链脂肪酸(LCFA)含量均随加热时间的延长而显著上升($P < 0.05$);121 °C 下处理 15,20 min 时,除月桂酸($C_{12:0}$)缓慢上升外($P > 0.05$),其他几种 LCFA 均出现了一定程度的下降,其中 $C_{16:0}$ 、 $C_{17:0}$ 、 $C_{18:0}$ 、 $C_{20:0}$ 下降不显著($P > 0.05$),可能是不饱和脂肪酸不断氧化补充所致。未进行高温处理时,棕榈酸($C_{16:0}$)、硬脂酸($C_{18:0}$)含量分别为 24.58,20.13 g/100 g 脂肪,都有一定的降低血清胆固醇功能,且均在 121 °C 下处理 10 min 时达到最大含量;肉豆蔻酸($C_{14:0}$)是人体主要 SFA,其含量与血清胆固醇有一定相关性,在 115 °C 下处理 20 min 时含量达到最大;丁酸($C_{4:0}$)、己酸($C_{6:0}$)、辛酸($C_{8:0}$)和癸酸($C_{10:0}$)含量在 121 °C 下处理 15,20 min 时出现明显上升($P < 0.05$),可能是由于高温对作用对象产生大分子化合物解聚作用,使肌肉脂肪中一些 LCFA 断裂成为短链脂肪酸(SCFA)和中链脂肪酸(MCFA),从而影响食物中脂肪酸的组成^[20]。丁酸属于 SCFA 的一种,在人体内有调节肠道菌群、抗炎症、免疫抑制和提供能量等重要的生理功能^[21]。己酸、辛酸和癸酸作用于微生物,抑制病原菌活性,对人体健康有一定的益处^[22]。

2.3.2 单不饱和脂肪酸 由表2可知,除油酸($C_{18:1c}$)外,MUFA 含量随高温处理程度的加深而显著下降($P < 0.05$),可能是由于超过 100 °C 高温使 MUFA 中的双键加氢形成 SFA^[23]。此外,油酸含量随热处理时间的延长先上升后下降($P < 0.05$),在 110,115,121 °C 下分别处理 15,10,5 min 达到该温度下的最大值,其中 110 °C 下处理 15 min 时的含量最高,为 33.62 g/100 g 脂肪,主要是因为热处理初期 $C_{18:2n6}$ 、 $C_{18:3n3}$ 、 $C_{18:3n6}$ 转化成油酸的速率大于油酸进一步加氢转化成硬脂酸的速率^[24];110 °C 下处理 15 min 后,随着热处理程度的加深,油酸氧化分解速率进一步加大,使得油酸含量下降。油酸是肉中主要的脂肪酸,占 MUFA 的 85% 以上^[25],其不仅能很好地改善牛肉风味^[26],还有预防动脉硬化的生理功能;其效果与亚油酸相似^[27],同时对于其他脂肪酸的吸收也有一定的促进作用^[28]。

2.3.3 多不饱和脂肪酸 由表3可知,PUFA 含量随高温处理程度的加深而显著下降($P < 0.05$),其中 $C_{20:3n3}$ 、花生四烯酸、EPA、DHA 4 种功能性脂肪酸随热处理程度的加深逐渐全部氧化降解;PUFA 含量受热处理温度和时间的影响均有明显变化($P < 0.05$)。

2.3.4 脂肪酸组成及比例 由表4可知,SFA 含量在

110, 115 °C 下处理时显著上升 ($P < 0.05$), 在 121 °C 下因受棕榈酸和硬脂酸这两种主要 SFA 的影响整体先上升 (0~15 min) 后下降 (20 min); UFA、PUFA 含量整体下降 ($P < 0.05$), 在 121 °C 下处理 20 min 时的含量达到最低, 可能是由于 PUFA 结构中不稳定的双键含量较高, 高温下进行 PUFA 的加氢反应, 导致 MUFA 和 SFA 含量上升; MUFA 含量在 110 °C 下处理 15 min 时达到最高

(37.92 g/100 g 脂肪), 主要是因为此时 PUFA 转化成 MUFA 的速率大于 MUFA 氧化分解的速率。

SFA 含量并非越少越好, 其与人体的生理功能有很多潜在的关联。Wood 等^[29]提出用 PUFA 和 SFA 的比率 (P/S) 来衡量脂肪酸营养价值, 认为 P/S 为 0.40 或稍高于 0.40 较好, Enser 等^[30]则建议 P/S 应高于 0.45, 而肉类的自然比例多在 0.1 左右^[31]。试验中生鲜牛背最长肌

表 1 不同高温处理对牛肉主要饱和脂肪酸含量的影响[†]

Table 1 Effects of different high temperature treatments on the content of main saturated fatty acids in beef

		g/100 g					
处理温度/°C	处理时间/min	C _{4:0}	C _{6:0}	C _{8:0}	C _{10:0}	C _{12:0}	C _{14:0}
110	0	0.04±0.003 1 ^d	0.01±0.002 2 ^d	0.03±0.001 7 ^d	0.12±0.001 9 ^d	0.07±0.010 9 ^c	1.12±0.012 6 ^d
	5	0.05±0.002 5 ^{dB}	0.04±0.002 1 ^{cB}	0.04±0.001 7 ^{cdA}	0.14±0.001 9 ^{cdA}	0.07±0.008 9 ^{bcB}	1.14±0.014 6 ^{dC}
	10	0.06±0.002 5 ^{cB}	0.05±0.002 4 ^{bcC}	0.05±0.002 7 ^{bcB}	0.15±0.002 1 ^{cA}	0.08±0.007 9 ^{abcB}	1.19±0.013 6 ^{cC}
	15	0.09±0.002 7 ^{bB}	0.06±0.002 2 ^{bC}	0.06±0.002 5 ^{bC}	0.18±0.001 9 ^{bB}	0.09±0.009 1 ^{abB}	1.27±0.016 6 ^{bB}
	20	0.12±0.003 4 ^{aB}	0.08±0.002 7 ^{aB}	0.10±0.003 5 ^{aB}	0.20±0.001 3 ^{aB}	0.09±0.007 7 ^{aB}	1.35±0.012 6 ^{aB}
115	0	0.04±0.003 1 ^d	0.01±0.002 2 ^d	0.03±0.001 7 ^d	0.12±0.001 9 ^d	0.07±0.010 9 ^c	1.12±0.012 6 ^d
	5	0.05±0.002 4 ^{cAB}	0.05±0.001 6 ^{cAB}	0.04±0.001 5 ^{dA}	0.14±0.001 7 ^{dA}	0.08±0.008 7 ^{bcB}	1.20±0.011 6 ^{dB}
	10	0.07±0.001 6 ^{bB}	0.06±0.002 4 ^{cB}	0.05±0.002 7 ^{cB}	0.16±0.002 4 ^{cA}	0.09±0.008 1 ^{bB}	1.25±0.009 6 ^{cB}
	15	0.10±0.002 5 ^{aB}	0.08±0.002 3 ^{bB}	0.07±0.001 7 ^{bB}	0.19±0.002 6 ^{bA}	0.09±0.008 0 ^{abB}	1.33±0.007 6 ^{bA}
	20	0.12±0.002 5 ^{aB}	0.10±0.002 4 ^{aB}	0.09±0.001 7 ^{aB}	0.21±0.003 4 ^{aB}	0.11±0.009 1 ^{aB}	1.47±0.015 6 ^{aA}
120	0	0.04±0.003 1 ^d	0.01±0.002 2 ^d	0.03±0.001 7 ^d	0.12±0.001 9 ^d	0.07±0.010 9 ^c	1.12±0.012 6 ^d
	5	0.06±0.002 5 ^{dA}	0.05±0.002 1 ^{dA}	0.05±0.001 7 ^{dA}	0.14±0.002 3 ^{cA}	0.10±0.007 4 ^{cA}	1.26±0.012 6 ^{bA}
	10	0.12±0.002 4 ^{cA}	0.07±0.001 7 ^{cA}	0.07±0.001 5 ^{cA}	0.16±0.001 9 ^{cA}	0.12±0.007 1 ^{bA}	1.37±0.013 6 ^{aA}
	15	0.18±0.002 5 ^{bA}	0.13±0.002 4 ^{bA}	0.11±0.001 7 ^{bA}	0.19±0.002 2 ^{bAB}	0.15±0.008 3 ^{aA}	1.24±0.013 6 ^{cB}
	20	0.26±0.001 6 ^{aA}	0.19±0.002 5 ^{aA}	0.18±0.002 7 ^{aA}	0.24±0.003 3 ^{aA}	0.16±0.007 3 ^{aA}	1.20±0.021 6 ^{dC}
处理温度/°C	处理时间/min	C _{15:0}	C _{16:0}	C _{17:0}	C _{18:0}	C _{20:0}	
110	0	0.21±0.006 5 ^c	24.58±0.233 1 ^b	0.72±0.013 5 ^c	20.13±0.255 2 ^d	0.12±0.007 6 ^b	
	5	0.24±0.016 6 ^{cB}	25.25±0.273 3 ^{abA}	0.75±0.009 5 ^{bcB}	20.87±0.305 1 ^{cdA}	0.15±0.009 6 ^{bcA}	
	10	0.25±0.020 6 ^{cC}	25.85±0.403 0 ^{abB}	0.80±0.022 5 ^{bB}	21.33±0.265 0 ^{bcB}	0.17±0.008 6 ^{abcA}	
	15	0.30±0.013 6 ^{bB}	26.41±0.343 0 ^{abB}	0.87±0.020 5 ^{aA}	22.06±0.265 0 ^{abA}	0.20±0.016 2 ^{baB}	
	20	0.37±0.010 6 ^{aA}	26.86±0.383 0 ^{aB}	0.90±0.020 5 ^{aA}	22.95±0.235 0 ^{aA}	0.24±0.009 6 ^{aA}	
115	0	0.21±0.006 5 ^c	24.58±0.233 1 ^b	0.72±0.013 5 ^c	20.13±0.255 2 ^d	0.12±0.007 6 ^b	
	5	0.26±0.012 6 ^{cB}	25.54±0.323 0 ^{bcA}	0.79±0.001 1 ^{bcAB}	21.38±0.205 0 ^{bcA}	0.17±0.009 6 ^{bcA}	
	10	0.33±0.011 6 ^{bB}	25.98±0.436 0 ^{abB}	0.82±0.008 5 ^{bcB}	22.09±0.255 0 ^{abAB}	0.21±0.009 6 ^{abA}	
	15	0.36±0.009 6 ^{bA}	27.39±0.186 0 ^{abA}	0.91±0.012 5 ^{abA}	22.62±0.235 0 ^{abA}	0.26±0.012 6 ^{aA}	
	20	0.40±0.014 4 ^{aA}	27.82±0.196 0 ^{aA}	0.99±0.008 5 ^{aA}	23.08±0.288 0 ^{aA}	0.29±0.013 6 ^{aA}	
120	0	0.21±0.006 5 ^c	24.58±0.233 1 ^b	0.72±0.013 5 ^c	20.13±0.255 2 ^d	0.12±0.007 6 ^b	
	5	0.28±0.012 4 ^{cA}	26.70±0.226 0 ^{aA}	0.85±0.007 5 ^{aA}	22.12±0.288 0 ^{abA}	0.19±0.013 6 ^{aA}	
	10	0.35±0.020 4 ^{aA}	28.50±0.266 0 ^{aA}	0.92±0.012 5 ^{aA}	23.46±0.318 0 ^{aA}	0.24±0.013 6 ^{aA}	
	15	0.31±0.013 4 ^{bAB}	27.60±0.346 0 ^{aA}	0.95±0.012 5 ^{aA}	22.78±0.358 0 ^{aA}	0.23±0.021 6 ^{aAB}	
	20	0.28±0.013 4 ^{cB}	26.91±0.506 0 ^{aB}	0.87±0.020 5 ^{aA}	21.02±0.328 0 ^{bcB}	0.18±0.030 6 ^{abA}	

[†] 小写字母不同表示同一温度组内差异显著 ($P < 0.05$), 大写字母不同表示不同温度组间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 不同高温处理对牛肉主要单不饱和脂肪酸含量的影响[†]

Table 2 Effects of different high temperature treatments on the content of main monounsaturated fatty acids in beef g/100 g

处理温 度/℃	处理时 间/min	C _{14:1}	C _{16:1}	C _{17:1}	C _{18:1t}	C _{18:1c}
110	0	0.42±0.020 1 ^a	2.97±0.046 1 ^a	0.47±0.028 2 ^a	0.66±0.021 1 ^a	30.29±0.330 2 ^d
	5	0.40±0.012 2 ^{aA}	2.83±0.026 1 ^{abA}	0.40±0.022 1 ^{abA}	0.70±0.011 1 ^{abA}	30.92±0.313 1 ^{cdC}
	10	0.41±0.017 2 ^{aA}	2.80±0.036 1 ^{abA}	0.37±0.019 2 ^{abA}	0.61±0.017 2 ^{bA}	31.95±0.640 2 ^{bcB}
	15	0.35±0.022 0 ^{abA}	2.72±0.032 2 ^{bcA}	0.32±0.019 0 ^{bA}	0.49±0.025 3 ^{cA}	33.62±0.322 1 ^{aA}
	20	0.23±0.017 1 ^{bA}	2.55±0.033 1 ^{cA}	0.29±0.020 3 ^{bA}	0.41±0.018 1 ^{dA}	33.04±0.271 2 ^{abA}
115	0	0.42±0.020 1 ^a	2.97±0.046 1 ^a	0.47±0.028 2 ^a	0.66±0.021 1 ^a	30.29±0.330 2 ^d
	5	0.34±0.017 2 ^{bAB}	2.80±0.028 1 ^{bAB}	0.39±0.026 3 ^{abA}	0.56±0.018 2 ^{bB}	31.76±0.250 2 ^{cB}
	10	0.28±0.022 7 ^{cB}	2.80±0.028 1 ^{bAB}	0.36±0.029 2 ^{bcA}	0.47±0.022 1 ^{cB}	33.47±0.191 1 ^{aA}
	15	0.23±0.022 7 ^{dB}	2.69±0.043 1 ^{bA}	0.30±0.021 2 ^{bcA}	0.38±0.018 1 ^{dB}	32.49±0.331 0 ^{bB}
	20	0.17±0.022 7 ^{eB}	2.47±0.036 2 ^{cAB}	0.26±0.021 1 ^{cAB}	0.28±0.023 1 ^{eB}	31.08±0.282 2 ^{dB}
121	0	0.42±0.020 1 ^a	2.97±0.046 1 ^a	0.47±0.028 2 ^a	0.66±0.021 1 ^a	30.29±0.330 2 ^d
	5	0.28±0.014 7 ^{bB}	2.72±0.034 2 ^{bB}	0.38±0.018 1 ^{abA}	0.50±0.021 1 ^{bB}	32.71±0.262 1 ^{aA}
	10	0.21±0.018 7 ^{bcB}	2.60±0.042 2 ^{bcB}	0.31±0.022 1 ^{bcA}	0.36±0.018 2 ^{cC}	31.75±0.312 1 ^{bB}
	15	0.19±0.009 3 ^{cB}	2.49±0.032 4 ^{cB}	0.27±0.023 3 ^{cA}	0.26±0.019 2 ^{dC}	29.25±0.442 4 ^{dC}
	20	0.16±0.015 3 ^{cB}	2.20±0.025 3 ^{dB}	0.22±0.022 1 ^{cB}	0.20±0.023 3 ^{dC}	27.26±0.292 4 ^{cC}

† 小写字母不同表示同一温度组内差异显著(P<0.05),大写字母不同表示不同温度组间差异显著(P<0.05)。

表 3 不同高温处理对牛肉主要多不饱和脂肪酸含量的影响[†]

Table 3 Effects of different high temperature treatments on the content of main polyunsaturated fatty acids in beef g/100 g

处理温 度/℃	处理时 间/min	C _{18:2 n 6}	C _{18:3 n 3}	C _{20:3 n 6}	C _{20:3 n 3}	C _{20:4 n 6}	C _{20:5 n 3}	C _{22:6 n 3}
110	0	8.56±0.082 0 ^a	1.26±0.047 0 ^a	0.35±0.004 4 ^a	0.62±0.005 4 ^a	5.10±0.060 0 ^a	0.17±0.002 7 ^a	0.20±0.002 9 ^a
	5	7.14±0.091 0 ^{bA}	1.10±0.061 0 ^{abA}	0.28±0.004 7 ^{bA}	0.43±0.007 5 ^{bA}	3.36±0.074 0 ^{bA}	0.06±0.004 1 ^{bA}	0.08±0.004 3 ^{bA}
	10	6.79±0.104 0 ^{bA}	0.97±0.077 0 ^{bcA}	0.23±0.005 6 ^{bA}	0.34±0.008 8 ^{cA}	2.49±0.064 0 ^{cA}	0.02±0.003 1 ^c	0.04±0.003 5 ^c
	15	5.80±0.080 0 ^{cA}	0.86±0.062 0 ^{cA}	0.16±0.004 7 ^{cA}	0.18±0.007 4 ^{dA}	1.56±0.076 0 ^{dA}	—	—
	20	5.33±0.081 0 ^{cA}	0.79±0.064 0 ^{cA}	0.09±0.004 2 ^{cA}	0.09±0.006 6 ^{eA}	0.76±0.064 0 ^{eA}	—	—
115	0	8.56±0.082 0 ^a	1.26±0.047 0 ^a	0.35±0.004 4 ^a	0.62±0.005 4 ^a	5.10±0.060 0 ^a	0.17±0.002 7 ^a	0.20±0.002 9 ^a
	5	6.98±0.072 0 ^{bA}	0.94±0.049 0 ^{bAB}	0.25±0.004 6 ^{bAB}	0.38±0.006 7 ^{bAB}	2.80±0.058 0 ^{bAB}	0.04±0.002 9 ^{bB}	0.05±0.004 0 ^{bB}
	10	5.83±0.081 0 ^{cB}	0.78±0.047 0 ^{bcB}	0.20±0.003 9 ^{bA}	0.28±0.005 4 ^{cB}	2.05±0.052 0 ^{bcAB}	—	—
	15	5.48±0.089 0 ^{dB}	0.68±0.058 0 ^{cB}	0.12±0.003 8 ^{cB}	0.14±0.006 1 ^{dB}	1.40±0.065 0 ^{cdA}	—	—
	20	4.79±0.092 0 ^{eB}	0.56±0.038 0 ^{cB}	0.06±0.004 6 ^{dB}	0.06±0.006 5 ^{dB}	0.49±0.073 0 ^{dB}	—	—
121	0	8.56±0.082 0 ^a	1.26±0.047 0 ^a	0.35±0.004 4 ^a	0.62±0.005 4 ^a	5.10±0.060 0 ^a	0.17±0.002 7 ^a	0.20±0.002 9 ^a
	5	6.26±0.085 0 ^{bB}	0.87±0.052 0 ^{bB}	0.20±0.004 7 ^{bB}	0.32±0.007 1 ^{bB}	2.18±0.061 0 ^{bB}	0.02±0.003 3 ^{bC}	0.04±0.003 5 ^{bB}
	10	5.45±0.096 0 ^{cB}	0.72±0.047 0 ^{bcB}	0.15±0.003 9 ^{cB}	0.19±0.006 4 ^{cC}	1.37±0.077 0 ^{cB}	—	—
	15	4.82±0.077 0 ^{dC}	0.60±0.052 0 ^{cB}	0.09±0.003 7 ^{dB}	0.08±0.007 3 ^{dC}	0.36±0.084 0 ^{dB}	—	—
	20	3.94±0.090 0 ^{eC}	0.38±0.050 0 ^{dC}	0.05±0.004 7 ^{dB}	—	—	—	—

† 小写字母不同表示同一温度组内差异显著(P<0.05),大写字母不同表示不同温度组间差异显著(P<0.05),—表示未检测。

表 4 不同高温处理对牛肉脂肪酸组成及比例的影响[†]

Table 4 Effects of different high temperature treatments on fatty acid composition and proportion of beef

g/100 g

处理温 度/℃	处理时 间/min	SFA	UFA	MUFA	PUFA	P/S	<i>n</i> -6 : <i>n</i> -3
110	0	47.79±1.445 7 ^d	51.98±2.223 0 ^a	35.36±4.213 3 ^b	16.62±1.143 2 ^a	0.35±0.031 3 ^a	6.41±0.579 1 ^a
	5	49.44±1.772 3 ^{cdB}	48.48±2.531 3 ^{bA}	35.75±4.941 3 ^{bA}	12.73±1.373 3 ^{bA}	0.26±0.039 2 ^{bA}	6.64±0.543 3 ^{aA}
	10	50.70±1.457 3 ^{bB}	47.69±2.575 1 ^{bcA}	36.62±4.357 5 ^{abAB}	11.07±1.201 2 ^{cA}	0.22±0.033 3 ^{bcA}	7.10±0.483 9 ^{aA}
	15	52.41±1.701 1 ^{bB}	46.62±2.123 1 ^{cA}	37.92±4.247 7 ^{aA}	8.70±1.079 8 ^{dA}	0.17±0.030 6 ^{cA}	7.34±0.632 2 ^{aA}
	20	55.08±1.213 7 ^{aA}	44.08±2.433 0 ^{dA}	36.92±4.741 3 ^{abA}	7.16±1.123 5 ^{cA}	0.13±0.029 6 ^{cA}	7.21±0.670 1 ^{aB}
115	0	47.79±1.445 7 ^d	51.98±2.223 0 ^a	35.36±4.213 3 ^b	16.62±1.143 2 ^a	0.35±0.031 3 ^a	6.41±0.579 1 ^a
	5	50.38±2.431 7 ^{cB}	47.87±2.767 1 ^{bA}	36.22±5.118 8 ^{abA}	11.65±1.133 6 ^{bA}	0.23±0.032 3 ^{bAB}	7.26±0.575 4 ^{abA}
	10	51.86±1.633 5 ^{bB}	46.94±2.321 0 ^{bA}	37.65±4.533 5 ^{aA}	9.29±1.203 5 ^{cB}	0.18±0.035 7 ^{bcA}	7.79±0.618 3 ^{abA}
	15	54.31±1.322 5 ^{aA}	44.27±2.673 2 ^{cB}	36.36±4.265 4 ^{abB}	7.92±1.311 1 ^{dA}	0.15±0.028 1 ^{cdAB}	8.64±0.559 5 ^{aA}
	20	55.60±1.443 1 ^{aA}	40.49±2.220 1 ^{dB}	34.46±4.073 1 ^{cB}	6.03±1.123 2 ^{cB}	0.11±0.027 8 ^{dAB}	8.69±0.587 5 ^{aB}
121	0	47.79±1.445 7 ^d	51.98±2.223 0 ^a	35.36±4.213 3 ^b	16.62±1.143 2 ^a	0.35±0.031 3 ^a	6.41±0.579 1 ^a
	5	52.54±1.122 5 ^{bA}	46.95±2.452 1 ^{bA}	36.87±4.775 4 ^{aA}	10.08±1.402 1 ^{bB}	0.19±0.026 6 ^{bB}	7.05±0.543 2 ^{bcA}
	10	56.30±1.005 7 ^{aA}	43.47±2.224 3 ^{cB}	35.47±4.463 3 ^{bB}	8.00±1.078 7 ^{cC}	0.14±0.033 7 ^{bcA}	7.77±0.702 1 ^{bcA}
	15	54.80±2.042 3 ^{aA}	38.61±2.146 3 ^{dC}	32.59±4.263 5 ^{cC}	6.02±1.133 2 ^{dB}	0.11±0.036 5 ^{cB}	7.91±0.539 8 ^{bA}
	20	52.40±1.897 5 ^{bB}	34.61±2.523 2 ^{cC}	30.21±3.785 1 ^{dC}	4.40±1.176 3 ^{cC}	0.08±0.036 8 ^{cB}	10.49±0.556 9 ^{aA}

[†] 小写字母不同表示同一温度组内差异显著(P<0.05),大写字母不同表示不同温度组间差异显著(P<0.05)。

中的 P/S 为 0.35,接近推荐值,热处理后牛肉样品中 P/S 进一步减小;此外,*n*-6 : *n*-3 也是衡量肉品脂肪酸比例营养的另一个重要指标^[32],中国营养学会提出 *n*-6 : *n*-3 的值 4 : 1~6 : 1 为最佳^[33],试验中 *n*-6 : *n*-3 普遍过高,因此在肉制品脂肪酸平衡方面仍需要不断研究改善。

3 结论

研究发现牛肉肌内脂肪氧化程度随热处理程度的加深显著上升,且 121 ℃高温处理时,肌内脂肪氧化速度较其他温度处理组显著上升。热处理温度和处理时间对 UFA 含量均有显著影响,但高温处理时间对 SFA 影响显著、高温处理温度对 SFA 影响不显著。长链饱和脂肪酸在高温热处理条件下可能出现断裂或降解,生成有抗癌、降血脂功能的短链脂肪酸或中链脂肪酸。后续可将牛肉全程置于氮气环境下进行高温处理,通过分析牛背最长肌挥发性风味物质的变化,研究脂肪酸氧化降解与挥发性风味物质产生的作用机理。

参考文献

[1] 邹良亮,康怀彬,张慧芸,等. 高温处理对牛肉蛋白质组分及其降解的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 18-22, 27.
[2] 沈晓玲,李诚. 脂类物质与肉的风味[J]. 肉类研究, 2008 (3): 25-28.
[3] 黄业传,李洪军,秦刚,等. 不同加工方式与时间对猪肉脂肪含量和脂肪酸组成的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33

(1): 159-163, 174.
[4] 周慧敏,赵燕,任双,等. 杀菌温度对乳化肠中脂肪酸组成和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 26-31.
[5] 刘梦,史智佳,杨震. 不同热加工温度对牛肉干脂肪酸及脂肪氧化的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(2): 1-6.
[6] 王瑞花,汪倩,姜万舟,等. 烹制方式对猪肉肌内脂肪脂质氧化及脂肪酸组成的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(7): 61-68.
[7] 杨春,王明利. 2012 年我国肉牛产业的发展动态[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(2): 37-41.
[8] 张莉莉. 高温(100~120 ℃)处理对鱼糜及其复合凝胶热稳定性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 44.
[9] LUND M N, HVIID M S, SKIBSTED L H. The combined effect of antioxidants and modified atmosphere packaging on protein and lipid oxidation in beef patties during chill storage[J]. Meat Science, 2007, 76(2): 226-233.
[10] FOLCH J. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. J Bid Chem, 1957, 226(1): 497-509.
[11] 王帮国. 白鲢鱼肌肉脂肪氧合酶构象和酶学特性及其脂肪氧化调控研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2017: 17-18.
[12] ANA I A, RAMÓN C, MAYORAL A I, et al. Oxidative stability and fatty acid composition of pig muscles as affected by rearing system, crossbreeding and metabolic type of muscle fibre[J]. Meat Science, 2001, 59(1): 39-47.
[13] EICHNER K, KAREL M. Influence of water content and

- water activity on the sugar-amino browning reaction in model systems under various conditions[J]. *Verslas Teorija Ir Praktika*, 2010, 11(11): 168-175.
- [14] CİNER-DORUK M, EICHNER K. Bildung und stabilität von amadori-verbindingen in wasserarmen Lebensmitteln[J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1979, 168(1): 9-20.
- [15] 孙丽琴, 孙立君, 郑刚. 不同的存放条件对油脂酸价和过氧化值的影响[J]. *粮油检测与加工*, 2007(2): 45-46.
- [16] CHO C Y. Fish nutrition, feeds, and feeding: With special emphasis on salmonid aquaculture[J]. *Food Reviews International*, 1990, 6(3): 333-357.
- [17] GARDNER H W. Lipid hydroperoxide reactivity with proteins and amino acids: A review[J]. *J Agric Food Chem*, 1979, 27(2): 220-229.
- [18] 李静, 杨勇, 杨钦鹏, 等. 不同氧化程度的脂肪对四川香肠加工贮藏过程中理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(10): 57-64.
- [19] 马汉军, 王霞, 周光宏, 等. 高压和热结合处理对牛肉蛋白质变性和脂肪氧化的影响[J]. *食品工业科技*, 2004, 25(10): 63-65, 68.
- [20] KOH A, DEVADDER F, KOVATCHEVA-DATCHARY P, et al. From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites[J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1 332-1 345.
- [21] 王建军, 王恬. 中链脂肪酸的生物学特性及其在动物生产中的应用[J]. *动物营养学报*, 2011, 23(7): 1 073-1 078.
- [22] BAGGIO S R, BRAGAGNOLO N. The effect of heat treatment on the cholesterol oxides, cholesterol, total lipid and fatty acid contents of processed meat products[J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(4): 611-619.
- [23] ANDERSON V L, ILSE B R, LARDY G P, et al. Effects of timing of flax feeding on feedlot performance, carcass traits and fatty acid profile in beef muscle[J]. *Journal of Animal Science*, 2005, 66: 237-242.
- [24] 曹芝. 内蒙古不同杂交品种肉牛生产性状比较研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012: 47-48.
- [25] DALEY C A, ABBOTT A, DOYLE P S, et al. A review of fatty acid profiles and antioxidant content in grass-fed and grain-fed beef[J]. *Nutr J*, 2010, 9(1): 10.
- [26] MONTEIRO A C G, SANTOS-SILVA J, BESSA R J B, et al. Fatty acid composition of intramuscular fat of bulls and steers-Livestock Science[J]. *Livestock Production Science*, 2006, 99(1): 13-19.
- [27] 魏晋梅, 罗玉柱, 张丽, 等. GC-MS 测定小白牛肉脂肪酸[J]. *食品与生物技术学报*, 2015, 34(3): 330-335.
- [28] WOOD J D, ENSER M, FISHER A V, et al. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review[J]. *Meat Science*, 2008, 78(4): 343-358.
- [29] WOOD J D, RICHARDSON R I, NUTE G R, et al. Effects of fatty acids on meat quality: A review[J]. *Meat Science*, 2004, 66(1): 21-32.
- [30] ENSER M, HALLETR K G, HEWELT B, et al. Fatty acid content and composition of UK beef and lamb muscle in relation to production system and implication for human nutrition[J]. *Meat Science*, 1998, 49(3): 329-341.
- [31] 陈艳美, 李清, 毛华明, 等. 不同月龄槟榔江公牛牛肉中胆固醇及脂肪酸含量的比较研究[J]. *肉类研究*, 2017, 31(7): 1-6.
- [32] 马骋, 梁琪, 文鹏程, 等. 年龄对甘南牦牛肉中脂肪酸与氨基酸含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(19): 361-365.
- [33] 周恒量, 李诚, 刘爱平, 等. 九龙牦牛不同部位肉中脂肪酸组成分析评价[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(11): 1 225-1 231.

(上接第 35 页)

- [13] 李进, 武雪菲, 米晓培, 等. 原儿茶酸烷基酯在水包油乳液中的抗氧化行为[J]. *精细化工*, 2019, 36(6): 1 173-1 179, 1 216.
- [14] ALMEIDA J, LOSADA-BARREIRO S, COSTA M, et al. Interfacial concentrations of hydroxytyrosol and its lipophilic esters in intact olive oil-in-water emulsions: Effects of antioxidant hydrophobicity, surfactant concentration, and the oil-to-water ratio on the oxidative stability of the emulsions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64: 5 274-5 283.
- [15] DOYLE M P, BRYKER W J. Alkyl nitrite-metal halide deamination reactions 6: Direct synthesis of arenediazonium tetrafluoroborate salts from aromatic amines, *tert*-butyl nitrite, and boron trifluoride etherate in anhydrous media[J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 1979, 44(9): 1 572-1 574.
- [16] GUNASEELAN K, ROMSTED L S, GALLEGÓ M J P, et al. Determining α -tocopherol distributions between the oil, water, and interfacial regions of macroemulsions: Novel applications of electroanalytical chemistry and the pseudo-phase kinetic model[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2006, 123/124/125/126: 303-311.
- [17] ANSELMINI C, CENTINI M, GRANATA P, et al. Antioxidant activity of ferulic acid alkyl esters in a heterophase system: A mechanistic insight[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(21): 6 425-6 432.
- [18] 韩立亚. 具有邻苯二酚结构的天然抗氧化剂酯化及抗氧化构效关系研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015: 50-82.
- [19] VILLANO D, FERNÁNDEZ-PACHÓN M S, MOYÁ M L, et al. Radical scavenging ability of polyphenolic compounds towards DPPH free radical[J]. *Talanta*, 2007, 71(1): 230-235.
- [20] SHAHIDI Fereidoon, ZHONG Ying. Revisiting the polar paradox theory: A critical overview[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59: 3 499-3 504.