

不同解冻方式对煎制牛排品质的影响

倪呈¹,贾洪锋¹,张振宇^{1*},张佳敏²,张森^{1,3},旷云璐³

(1. 烹饪科学四川省高等学校重点实验室,四川成都610100;2. 成都大学肉类加工四川省重点实验室,四川成都610106;3. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院,四川成都610100)

摘要:为探究不同解冻方式对煎制牛排品质的影响,采用水浴、低温和微波3种解冻方式对牛排解冻后,制成七成熟样品,并比较解冻方式对样品的感官、营养成分、色泽、质构和挥发性风味物质的影响。结果表明:低温解冻组样品感官总分最高,水分含量最高;3组样品间蛋白质含量差异不显著($P>0.05$),但脂肪含量呈现显著差异($P<0.05$);不同解冻方式对煎制牛排色泽的影响较小;水浴解冻组样品质构特性优于其他组。样品中的挥发性物质以醛类物质为主。水浴解冻和低温解冻的煎制牛排关键挥发性风味物质差异较小。总体而言,水浴解冻和低温解冻对煎制牛排品质的影响较小。

关键词:牛排;解冻方式;感官品质;色泽;质构;挥发性风味物质

Effects of Thawing Methods on the Quality Characteristics of Pan-fried Beef Steaks

NI Cheng¹, JIA Hongfeng¹, ZHANG Zhenyu^{1*}, ZHANG Jiamin², ZHANG Miao^{1,3},
KUANG Yunlu³

(1. Cuisine Science Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610100, Sichuan, China; 2. College of Sichuan Key Laboratory of Meat Processing, Chengdu 610106, Sichuan, China; 3. College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, Sichuan, China)

Abstract: To explore the effects of different thawing methods on the quality of pan-fried beef steaks, three thawing methods, *i.e.*, water bath, low temperature, and microwave, were used to thaw steaks, which were then prepared to a medium-well doneness. The effects of the thawing methods on the sensory attributes, nutritional composition, color, texture, and volatile flavor compounds of the samples were compared. The results showed that the samples in the low-temperature thawing group had the highest sensory scores and the highest moisture content. There were no significant differences in protein content among the three groups ($P>0.05$), but fat content showed significant differences ($P<0.05$). The different thawing methods had little effect on the color of the pan-fried steaks. The texture characteristics of samples in the water bath thawing group were superior to those in the other groups. Aldehydes were the main volatile compounds in the samples, and the key volatile flavor components of pan-fried steaks thawed by water bath and low temperature showed minimal differences. Overall, water bath thawing and low-temperature thawing had relatively little effect on the quality of pan-fried steaks.

Key words: beef steaks; thawing methods; sensory quality; color; texture; volatile flavor compounds

引文格式:

倪呈,贾洪锋,张振宇,等.不同解冻方式对煎制牛排品质的影响[J].食品研究与开发,2025,46(3):76-86.

NI Cheng, JIA Hongfeng, ZHANG Zhenyu, et al. Effects of Thawing Methods on the Quality Characteristics of Pan-fried Beef Steaks[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 76-86.

基金项目:四川旅游学院科研创新团队项目(19SCTUTY04);烹饪科学四川省高等学校重点实验室开放基金项目(PRKX2020Z21);四川旅游学院高水平科研项目培育专项(2022PY02);肉类加工四川省重点实验室科研项目(24-R-07)

作者简介:倪呈(2002—),女(汉),本科在读,研究方向:食品加工与检测。

*通信作者:张振宇(1983—),男,讲师,研究方向:烹饪工艺开发及产业化。

随着我国经济的高速发展,人们的生活水平也逐渐提高,对饮食也有了更高的要求。牛排作为西餐美食的代表之一,由于其肉质鲜美,含有丰富的氨基酸和蛋白质等营养成分,深受广大消费者的喜爱。新鲜牛排不易保存,在流通过程中,冷冻是保存牛排必不可少的手段。冷冻技术是目前广泛应用的保存方法之一,低温可以减缓生物、化学反应速度,抑制微生物的生长和代谢,从而延长肉及肉制品的货架期^[1],而肉制品经过冷冻后再进一步加工前需要进行解冻处理。如果采用不恰当的解冻方式,会对肌肉的损耗、品质和组织特性产生恶劣影响,尤其是对解冻损失率、肌肉组织形态的影响,从而对后续加工而成的熟肉的多汁性和质地等产生负面影响^[2]。冷冻肉的品质好坏不仅取决于冷冻过程,还取决于解冻过程^[3]。因此选择合适的解冻方式对于维持肉品品质具有重要意义。

现有解冻方式包括常见的空气解冻、水解冻、低温解冻、电解冻以及超声波解冻等^[4-6],不同解冻方式对肉类品质具有不同的影响。目前牛肉解冻的研究主要集中在不同解冻方式对牛肉嫩度、色泽和脂质氧化等品质、蛋白质结构变化与水分实时迁移、肌肉微观结构、蒸煮损失等的影响^[7-9],目前关于解冻方式对煎制牛排食用品质的影响研究鲜见。本文选取餐饮加工过程中常用的微波、水浴、低温3种解冻方法对牛排进行解冻处理,研究不同解冻方式对煎制牛排品质的影响,以期对牛排的合理加工及品质保持和提升提供一定的参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

冷冻肉眼牛排(原切,厚度 1.2 cm):成都天海贸易有限公司,产地阿根廷;食用植物调和油:益海嘉里集团泉州福海粮油工业有限公司。2-甲基-3-庚酮(色谱纯):斯坦福分析化学公司。

1.2 仪器与设备

YH-M10002 电子天平:五鑫衡器有限公司;C21-WK2102 电磁炉:美的集团有限公司;GCMS-QP2010Ultra 气相色谱质谱联用仪、SH-Rtx-Wax 毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm):日本岛津公司;固相萃取头[50/30 μm DVB/CAR/PDMS StableFlex/SS(1 cm) Gray]:美国 Supelco 公司;AT390 红外测温仪:希玛仪表公司;TMS-Pro 食品物性分析仪:美国 FTC 公司;DC-P3 全自动色差计:北京兴光测色仪器有限公司;MK-301 热电偶接触式测温仪:杭州美控自动化技术有限公司;Calory Answer CA-HM 食品热量成分检测仪:日本 JWP 公司;G90F23CN3LV-C2(S5)微波炉:广东格兰仕微波生活电器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品解冻及煎制

将样品从-20℃冰箱中取出后进行解冻。用测温仪测定牛排中心温度,牛排中心温度达到4℃,记为解冻终点。水浴解冻(WBT):将牛排放入密封袋中,置于25℃静水浴中解冻。低温解冻(RT):将牛排置于4℃冷藏室中解冻。微波解冻(MT):将牛排置于微波炉中,按照快速解冻程序(功率900W,频率2450MHz,时间0.9min)进行解冻。解冻完成后将牛排煎制为七成熟^[10]。

1.3.2 感官评价

参照前期研究进行感官评价,具体评分标准见表1^[10]。最后取平均值,作为感官评价最终结果。

表1 煎制牛排感官评价标准

Table 1 Standards for sensory evaluation of pan-fried steaks

评分	嫩度	风味	多汁性
7~9(好)	质地柔软,易嚼碎,易下咽	煎制牛排香气和滋味浓郁,无不良气味	汁液丰富,咀嚼时感觉不干燥
5~<7(较好)	质地较柔软、较易嚼碎,吞咽顺畅	煎制牛排香气和滋味较浓郁,无不良气味	汁液较丰富,咀嚼时感觉略干燥
3~<5(较差)	质地粗糙,难咀嚼与下咽	煎制牛排香气和滋味不明显,略有异味	肉汁量较少,咀嚼时感觉干燥
1~<3(差)	很难咬断,难以下咽	异味明显或有生肉腥味	肉汁量少,咀嚼时干燥

1.3.3 营养成分分析

采用食品热量成分检测仪测定营养成分,在 Measurement Mode 中选择“reflection”反射模式,选择对应的测试曲线,打开测试室门,放入反射标准测试盒(反色空白版),进行反射标准光测试。主要测定蛋白质、脂肪和水分含量。

1.3.4 色泽测定

采用全自动色差计测定色泽,测定前利用白板对色差计进行校准,将煎制后的牛排置于自然光线充足的平面上,垂直于牛排肌肉横断面,将镜口贴紧牛排,保证不漏光,并在同一牛排样品3个不同位置分别测定1次,记录每次所测得的L*、a*、b*值。

1.3.5 质构测定

采用全质构分析(texture profile analysis, TPA)检测牛排质构特性,对样品进行3次压缩,测定硬度、弹性、咀嚼性等指标。将牛排样品切割成5cm×3cm×1.2cm的条状。TPA测定选取P/36R探头,测前速度2mm/s,测试速度1mm/s,测后速度1mm/s,触发力20g,测定时间间隔5s,压缩比75%,每个样品平行测定3次。

1.3.6 气相色谱质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定

1.3.6.1 样品处理

称取剁碎并混合均匀的样品 3.0 g 于 10 mL 顶空瓶中,加入 20 μ L 2-甲基-3-庚酮标准内标液(3.868 μ g/ μ L),60 $^{\circ}$ C水浴平衡 5 min,顶空萃取 55 min。上机解吸 5 min。

1.3.6.2 GC-MS 条件

GC 条件:载气为氦气,流速 1.68 mL/min,不分流进样;柱箱温度 40 $^{\circ}$ C,进样温度 250 $^{\circ}$ C;升温程序:起始温度 40 $^{\circ}$ C,保持 3 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 升到 200 $^{\circ}$ C,再以 10 $^{\circ}$ C/min 升到 230 $^{\circ}$ C,恒温 3 min。

MS 条件:电子电离源,电子能量 70 eV,离子源温度 230 $^{\circ}$ C,接口温度 250 $^{\circ}$ C;扫描方式为全扫描;间隔 0.30 s;质量扫描范围 m/z 50~500。

1.3.7 挥发性物质定性和定量

利用美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)17 质谱库将质谱图中各色谱峰进行检索,同时进行人工解析,对化学成分进行定性分析。采用内标法对物质进行定量。按照如下公式计算挥发性物质含量。

$$X = A \times B / (M \times N)$$

式中: X 为挥发性物质含量, μ g/kg; A 为内标物质量, μ g; B 为挥发性物质峰面积; M 为内标物峰面积; N 为样品质量,kg。

1.3.8 气味活度值的计算

采用气味活性值(odor activity value, OAV)评价各挥发性风味物质对牛排总体风味的贡献,其计算公式如下。

$$Z = C / T$$

式中: Z 为 OAV,OAV 大于 1 时定义为气味活性物质; C 为挥发性风味物质含量, μ g/kg; T 为气味阈值, μ g/kg。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据处理,用 SPSS 20.0 统计分析软件进行显著性分析,结果以平均值 \pm 标准差表示。采用 Origin 2021 绘制聚类热图和相关性图。

2 结果与分析

2.1 感官评价

不同解冻方式煎制牛排的感官评分见表 2。

解冻方式会对煎制牛排的感官品质产生影响,从表 2 可以看出,不同解冻方式对煎制牛排的感官影响显著($P < 0.05$),其中低温解冻的牛排总分最高,为 24.08,这可能是因为低温解冻的温度低且过程较温和,有效减弱了生化反应强度并抑制微生物繁殖,品质损失较小^[11]。微波解冻的牛排感官评分最低,这可能

表 2 不同解冻方式煎制牛排的感官评分

Table 2 Sensory evaluation of pan-fried steaks under different thawing methods

解冻方式	嫩度	风味	多汁性	总分
水浴解冻	7.08 \pm 0.79 ^b	7.00 \pm 0.95 ^b	7.50 \pm 0.79 ^a	21.58 \pm 2.53 ^b
低温解冻	8.17 \pm 0.58 ^a	7.83 \pm 0.72 ^a	8.08 \pm 0.51 ^a	24.08 \pm 1.81 ^a
微波解冻	4.83 \pm 0.72 ^c	5.25 \pm 0.75 ^c	5.67 \pm 0.65 ^b	15.75 \pm 2.12 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

是因为微波解冻的不均匀性导致牛排的部分熟化,在解冻过程中温度会随着时间延长而升高,可能会导致牛排品质下降,在风味、嫩度和多汁性方面受到了影响。由此说明,低温解冻处理的煎制牛排感官品质较好。

2.2 不同解冻方式对牛排营养物质含量的影响

水分含量对加工后肉制品的品质影响较大;脂肪和蛋白质与牛排的营养价值密切相关,脂肪还影响着牛排的食用品质,对牛排的多汁性、嫩度和风味影响较大。表 3 为不同方式解冻处理后的煎制牛排中蛋白质、脂肪和水分含量的变化。

表 3 不同解冻方式对煎制牛排营养物质含量的影响

Table 3 Effect of different thawing methods on content of nutritional substances in pan-fried steaks

解冻方式	蛋白质/(g/100 g)	脂肪/(g/100 g)	水分/(g/100 g)
水浴解冻	21.40 \pm 2.26 ^a	24.87 \pm 3.38 ^a	53.43 \pm 11.35 ^b
低温解冻	23.47 \pm 0.12 ^a	16.20 \pm 0.35 ^c	60.13 \pm 0.23 ^a
微波解冻	22.17 \pm 4.30 ^a	22.23 \pm 2.51 ^b	55.23 \pm 2.10 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表 3 可知,水是牛排中含量最高的成分,牛排的组织状态和品质与其有关。牛排中水分含量也因解冻方式不同而呈现一定差异。低温解冻组的水分含量最高,为 60.13 g/100 g,水分含量高的肉类其嫩度更高。水浴解冻、低温解冻以及微波解冻处理的 3 组样品间蛋白质含量差异不显著($P > 0.05$)。样品中脂肪含量呈现显著差异($P < 0.05$),水浴解冻组牛排脂肪含量最高,为 24.87 g/100 g,低温解冻组的牛排脂肪含量最低,为 16.20 g/100 g。一方面牛排解冻时,内部冰晶融化成水,这些水分子如果不能回复到原细胞中重新被吸收,会造成牛排汁液流失,引起营养物质的流失^[12],而水浴解冻和微波解冻后的煎制牛排样品中水分含量差异不明显,与低温解冻的样品相比水分含量均较低,说明低温解冻的样品汁液流失较少。相对而言,由于水浴解冻和微波解冻的样品中水分含量较低,导致脂肪含量相对较高。

2.3 不同解冻方式对牛排色泽的影响

不同解冻方式对牛排色泽的影响见表 4。

表4 不同解冻方式对牛排色泽的影响

Table 4 Effect of different thawing methods on the color of pan-fried steaks

解冻方式	L*值	a*值	b*值
水浴解冻	51.18±2.61 ^a	13.17±0.45 ^a	10.28±1.56 ^a
低温解冻	49.95±0.89 ^a	10.86±0.73 ^b	11.51±0.06 ^a
微波解冻	49.47±1.13 ^a	11.25±0.32 ^b	11.19±0.49 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

色泽是评价肉品品质最直观的指标,直接决定着消费者的消费意向。 L^* 值表示样品的光泽和亮度, a^* 值表示样品的红度, b^* 值表示样品的黄度。由表4可知,水浴解冻、低温解冻以及微波解冻处理的3组样品间 L^* 值差异不显著($P>0.05$)。水浴解冻样品的 a^* 值最高,为13.17,这可能与水浴解冻的样品中水分含量较低有关。3种解冻方式处理的样品 b^* 值差异不显著($P>0.05$)。牛排由于在煎制过程中受热从而在表面发生焦化反应使得颜色发生改变,因此,从整体看,不同解冻方式对煎制牛排色泽的影响较小。

2.4 不同解冻方式对牛排质构的影响

牛肉的质构可以通过硬度、弹性和咀嚼性进行评价^[13]。不同解冻方式处理的煎制牛排质构测定结果见表5。

硬度反映的是使食品变形所需要的力,由表5可知,低温解冻组硬度最大,为45.16 N,水浴解冻组硬度最小,为23.22 N,说明解冻温度对牛排硬度影响较大。不同解冻方式煎制牛排的弹性差异可能是解冻过程肌肉中蛋白质发生聚集交联、变性和降解导致的^[13]。微

表5 不同解冻方式对牛排质构的影响

Table 5 Effect of different thawing methods on the texture of pan-fried steaks

解冻方式	硬度/N	弹性/mm	咀嚼性/mJ
水浴解冻	23.22±2.56 ^b	2.36±0.77 ^a	31.03±13.76 ^b
低温解冻	45.16±5.50 ^a	2.97±0.10 ^a	87.11±12.39 ^a
微波解冻	36.59±6.53 ^a	3.23±0.14 ^a	74.22±17.12 ^a

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

波解冻的牛排弹性最大,水浴解冻的牛排弹性最小,但是不同样品的弹性差异不显著。咀嚼性是指把固态食品咀嚼至能够吞咽的状态所需要的能量,咀嚼性反映牛肉对咀嚼的持续抵抗能力,该值越小,嫩度越高。咀嚼性和硬度指标变化趋势相一致。水浴解冻的咀嚼性最小,说明水浴解冻组的牛排最嫩。综上所述,水浴解冻获得的牛排质构最好,这可能是因为水浴解冻使肌原纤维间结合紧密,从而使解冻后变性的蛋白较少,对牛排的品质影响较低,其具体原因有待进一步研究。

2.5 不同解冻方式对牛排挥发性风味物质的影响

2.5.1 不同解冻方式下牛排挥发性风味物质分析

肉制品中的风味物质主要是由加工过程中风味前体物质(氨基酸类、核苷酸类、脂类、糖类、肽类及硫胺素类等)发生一系列复杂反应(美拉德反应、焦糖化反应、氨基酸、硫胺素和肽的热降解及脂类物质的氧化分解)形成的^[14]。采用固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)结合GC-MS技术检测不同解冻方式煎制牛排中所含有的挥发性风味物质,结果见表6和表7。

表6 不同解冻方式对牛排挥发性风味物质的影响

Table 6 Effect of different thawing methods on the volatile flavor compounds of pan-fried steaks

种类	序号	名称	分子式	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			阈值 ^[16] / ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
				水浴解冻	低温解冻	微波解冻	
醇类	A1	(E)-2-辛烯-1-醇	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}$	11.00±8.29 ^b	15.07±10.66 ^a	6.63±4.84 ^c	40
	A2	1-庚醇	$\text{C}_7\text{H}_{16}\text{O}$	7.73±10.94 ^b	25.10±2.92 ^a	-	50
	A3	1-十二醇	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}\text{O}$	-	3.80±2.83	-	73
	A4	1-十六醇	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{O}$	3.87±5.47	-	-	-
	A5	1-戊醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	34.53±5.37 ^a	28.80±1.99 ^a	8.70±6.52 ^b	4 000
	A6	3-甲基-1-丁醇	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	-	-	1.63±2.31	170
	A7	4,4,6-三甲基-环己-2-烯-1-醇	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}$	2.43±3.44 ^a	2.80±3.96 ^a	1.20±1.69 ^b	-
	A8	甘油	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	-	4.10±5.79 ^a	1.63±2.31 ^b	-
	A9	十九醇	$\text{C}_{19}\text{H}_{40}\text{O}$	-	26.33±3.72 ^a	2.03±1.76 ^b	-
	A10	雪松醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{26}\text{O}$	-	37.43±4.99 ^a	4.03±1.06 ^b	0.5
醚类	B1	2-丙基苯酚甲醚	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$	-	-	1.43±2.07	-
	B2	茴香脑	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}$	10.13±5.39 ^b	49.23±4.69 ^a	7.97±1.06 ^c	15
醛类	C1	2-十三烯醛	$\text{C}_{13}\text{H}_{24}\text{O}$	0.97±1.37 ^b	1.57±2.22 ^a	-	-
	C2	(E)-2-壬烯醛	C_9H_{18}	48.09±6.93 ^a	50.70±11.69 ^a	6.66±9.43 ^b	0.08
	C3	(E)-2-庚醛	$\text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}$	28.07±9.49 ^b	40.70±11.52 ^a	1.90±2.69 ^c	75
	C4	(E)-2-癸烯醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	71.6±14.83 ^b	80.00±15.68 ^a	28.50±9.81 ^c	5.6

续表6 不同解冻方式对牛排挥发性风味物质的影响

Continue table 6 Effect of different thawing methods on the volatile flavor compounds of pan-fried steaks

种类	序号	名称	分子式	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			阈值 ^[16] / ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	
				水浴解冻	低温解冻	微波解冻		
醛类	C5	(E,E)-2,4-二烯醛	C ₉ H ₁₆	21.83±30.88 ^b	26.27±18.98 ^a	2.70±3.82 ^c	0.1	
	C6	(E,E)-2,4-庚二烯醛	C ₇ H ₁₂	8.73±6.61 ^b	19.30±6.52 ^a	-	10	
	C7	(E,E)-2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₈	54.23±13.15 ^b	62.37±12.52 ^a	17.93±3.06 ^c	1.36	
	C8	(E,Z)-2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	16.50±4.79 ^a	21.00±3.14 ^a	2.23±3.16 ^b	68.67	
	C9	(Z)-2-庚醛	C ₇ H ₁₂ O	-	-	1.43±2.03	56	
	C10	2,4-十一碳二烯醛	C ₁₁ H ₁₈ O	1.10±1.56	-	-	-	
	C11	2-十一烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O	79.83±14.88 ^b	82.50±13.09 ^a	31.57±8.85 ^c	0.14	
	C12	八醛	C ₈ H ₁₆ O	84.67±10.15 ^a	53.73±17.67 ^a	35.63±26.52 ^a	0.59	
	C13	苯乙二醛	C ₈ H ₆ O ₂	-	4.73±6.69	-	-	
	C14	二十醛	C ₂₀ H ₄₀ O	1.93±2.73	-	-	-	
	C15	庚醛	C ₇ H ₁₄ O	4.73±3.72 ^b	30.87±29.77 ^a	-	3	
	C16	癸醛	C ₁₀ H ₂₀ O	11.63±3.80 ^a	11.53±2.01 ^a	10.73±3.93 ^a	0.1	
	C17	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	167.83±22.82 ^b	171.9±30.95 ^a	102.63±35.91 ^c	1	
	C18	十六醛	C ₁₆ H ₃₄	39.93±9.18 ^a	16.80±8.42 ^b	18.77±9.21 ^c	0.91	
	C19	十七醛	C ₁₇ H ₃₄ O	1.20±1.69	-	-	-	
	C20	十四醛	C ₁₄ H ₂₈ O	29.06±5.98 ^a	1.77±2.76 ^c	9.90±3.91 ^b	5	
	C21	十一醛	C ₁₁ H ₂₂ O	-	6.83±4.94	-	5	
	C22	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	647.17±168.03 ^a	396.87±25.72 ^b	184.67±103.96 ^c	4.5	
	C23	正十五醛	C ₁₅ H ₃₀ O	42.73±12.16 ^a	17.50±3.88 ^b	12.33±5.41 ^c	1 000	
	酸类	D1	8-甲基壬酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	1.96±2.78	-	-	-
		D2	己酸	C ₆ H ₁₂ O ₂	16.47±6.78 ^a	8.60±6.12 ^b	2.43±3.44 ^c	1.1
		D3	十二烯酸	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	15.40±17.26 ^a	-	0.60±0.84 ^b	700 000
		D4	十四酸	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	16.67±1.11 ^a	9.73±0.95 ^c	11.37±3.97 ^b	10 000
D5		十一烯酸	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	3.93±5.56	-	-	-	
D6		四氢-3-甲基-5-氧代-2-咪喃甲酸	C ₇ H ₈ O ₆	1.10±1.56	-	-	-	
D7		辛酸	C ₈ H ₁₆ O ₂	17.30±4.61 ^a	16.63±8.29 ^b	-	500	
D8		硬脂酸	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	4.66±5.12 ^b	15.80±22.30 ^a	1.67±2.36 ^c	-	
D9		油酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	85.47±40.89 ^a	73.70±25.80 ^b	36.87±11.09 ^c	-	
酮类	E1	1-(2,2-二甲基环戊基)乙酮	C ₉ H ₁₆ O	0.97±1.37	-	-	-	
	E2	2,3-辛二酮	C ₈ H ₁₄ O ₂	-	-	2.43±3.44	0.28	
	E3	2-羟基-2,6,6-三甲基-双环[3.1.1]庚烷-3-酮	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	-	-	4.77±6.74	-	
	E4	2-壬酮	C ₉ H ₁₈ O	-	-	0.60±0.85	190	
	E5	2-十五酮	C ₁₅ H ₃₀ O	-	3.27±2.48	-	-	
	E6	3,5-辛二烯-2-酮	C ₈ H ₁₂ O	-	2.83±2.18	-	150	
	E7	3-甲基-2,5-咪嗪二酮	C ₅ H ₈ N ₂ O ₂	-	1.57±2.22	-	-	
	E8	3-羟基-3-甲基-2-丁酮	C ₅ H ₁₀ O ₂	62.77±16.67 ^b	36.13±6.82 ^c	91.57±16.62 ^a	-	
	E9	4-辛酮	C ₈ H ₁₆ O	8.90±6.45 ^b	4.20±4.20 ^c	10.00±2.82 ^a	21.4	
	E10	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺环(4,5)十-6,9-二烯-2,8-二酮	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	-	3.50±4.95	-	-	
	E11	吡咯烷-2,4-二酮	C ₄ H ₅ NO ₂	41.20±8.82 ^a	32.87±2.90 ^b	-	-	
	E12	二氢-5-甲基-5-(2-甲基丙基)-2(3H)-咪喃酮	C ₉ H ₁₆ O ₂	31.70±9.63 ^a	19.40±6.52 ^c	28.50±6.45 ^b	-	
	E13	5-(1-甲基乙基)-双环[3.1.0]己-3-烯-2-酮	C ₉ H ₁₂ O	3.90±5.52	-	-	-	
	E14	5-庚基二氢-2(3H)-咪喃酮	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	-	-	1.90±0.51	-	
	E15	戊基环戊烯酮	C ₁₀ H ₁₆ O	3.60±5.09	-	-	-	
	E16	异亚丙基环丙基甲基酮	C ₅ H ₈ O	0.73±1.04	-	-	-	

续表6 不同解冻方式对牛排挥发性风味物质的影响

Continue table 6 Effect of different thawing methods on the volatile flavor compounds of pan-fried steaks

种类	序号	名称	分子式	含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)			阈值 ^{[16]/} ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
				水浴解冻	低温解冻	微波解冻	
烯烃类	F1	(-)-罗汉柏烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	-	0.63±4.49	-	-
	F2	10 十八烯	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}$	-	-	0.60±0.84	-
	F3	3,7,11,15-四甲基十六碳-2-烯	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}$	4.20±5.94 ^b	17.97±0.42 ^a	-	-
	F4	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	C_9H_{16}	8.27±5.84 ^a	8.56±6.22 ^a	-	-
	F5	α -律草烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	-	2.53±1.91	-	0.16
	F6	角鲨烯	$\text{C}_{30}\text{H}_{50}$	-	4.53±6.41	-	0.18
	F7	可巴烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	-	8.87±6.28	-	3
	F8	石竹烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	16.10±2.89 ^b	90.93±5.63 ^a	7.57±1.57 ^c	55
酯类	G1	2-乙基丁酸烯丙酯	$\text{C}_9\text{H}_{16}\text{O}_2$	4.03±0.86	-	-	-
	G2	十八酸 2-(2-羟基乙氧基)乙酯	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}\text{O}_5$	-	4.20±5.94	-	-
	G3	γ -四癸内酯	$\text{C}_{14}\text{H}_{26}\text{O}_2$	2.67±3.77	-	-	1
	G4	二十二酸乙酯	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}\text{O}_2$	-	-	6.50±5.01	-
	G5	甲酸庚酯	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	15.63±11.77 ^a	-	10.73±4.17 ^b	-
	G6	戊酸丁酯	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_2$	8.97±12.68 ^a	-	0.60±0.84 ^b	-
	G7	戊酸异丙酯	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	62.23±21.03 ^a	30.97±8.51 ^b	56.67±15.78 ^a	-
	G8	十六烷基异己基酯草酸	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	1.10±1.56	-	-	-
	G9	油酸乙酯	$\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$	3.63±5.14	-	-	870
烷烃类	H1	2-甲基四烷	$\text{C}_{25}\text{H}_{52}$	-	14.70±10.58	-	-
	H2	正十七烷	$\text{C}_{17}\text{H}_{36}$	-	2.63±3.72	-	3 000
苯酚类	I1	2,6-二(1,1-二甲基乙基)-4-(1-甲基丙基)苯酚	$\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}$	6.17±0.99 ^a	0.76±2.15 ^c	3.53±2.52 ^b	-
	I2	3-甲基-6-丙基苯酚	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}$	2.67±3.77	-	-	-
其他	J1	2-戊基呋喃	$\text{C}_9\text{H}_{14}\text{O}$	26.83±14.93 ^a	11.70±8.27 ^b	5.50±5.05 ^c	5
	J2	4-乙基-3-壬-5-炔	$\text{C}_{11}\text{H}_{18}$	-	4.60±6.50	-	-
	J3	甲氧基苯基肼	$\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$	25.77±8.13 ^b	65.27±79.38 ^a	16.10±5.32 ^c	-

注:-表示未检出;同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表7 不同解冻方式煎制牛排挥发性风味物质的 OAV 分析(OAV ≥ 0.1)

Table 7 OAV analysis of volatile flavor compounds in pan-fried steaks under different thawing methods (OAV ≥ 0.1)

名称	水浴解冻	低温解冻	微波解冻	阈值 ^{[16]/} ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	香气描述 ^[17-18]	名称	水浴解冻	低温解冻	微波解冻	阈值 ^{[16]/} ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	香气描述 ^[17-18]
(E)-2-辛烯-1-醇	0.28	0.38	0.16	40	青草味	壬醛	167.83	171.90	102.63	1	油脂味
1-庚醇	0.15	0.50	0	50	化学味、清香味	十六醛	43.88	18.46	20.62	0.91	草莓、杨梅味
雪松醇	0	74.86	8.06	0.5	杉木味	十四烷醛	5.81	0.35	1.98	5	鱼腥味、脂肪味
茴香脑	0.68	3.28	0.53	15	大茴香和甜香气味	十一醛	0	1.37	0	5	玫瑰香
(E)-2-壬烯醛	601.12	633.75	83.25	0.08	黄瓜、油脂香	正己醛	143.82	88.19	41.04	4.5	脂香、青草香
(E)-2-庚醛	0.37	0.54	0.02	75	青草味	己酸	14.97	7.82	2.21	1.1	类似羊的味道
(E)-2-癸烯醛	12.78	14.28	5.09	5.6	大豆酱	2,3-辛二酮	0	0	8.68	0.28	豆香味
(E,E)-2,4-二烯醛	218.30	262.70	27.00	0.1	脂肪香	4-辛酮	0.42	0.20	0.47	21.4	蘑菇味
(E,E)-2,4-庚二烯醛	0.87	1.93	0	10	油脂、烤肉香	α -律草烯	0	15.81	0	0.16	松树叶、柑橘、橙子香
(E,E)-2,4-癸二烯醛	39.88	45.86	13.18	1.36	甜橙香气、脂肪味、烤香味	角鲨烯	0	25.17	0	0.18	柑橘味
(E,Z)-2,4-癸二烯醛	0.24	0.30	0.03	68.67	油炸味	可巴烯	0	2.95	0	3	木香和甜香
2-十一烯醛	570.21	589.28	225.50	0.14	柑橘、橙皮水果味	石竹烯	0.29	1.65	0.14	55	丁香、松脂味
八醛	143.51	91.07	60.39	0.59	脂肪味、果香味	γ -四癸内酯	2.67	0	0	1	果香味
庚醛	1.58	10.29	0	3	脂肪味、柑橘味	2-戊基呋喃	5.37	2.34	1.10	5	青草、肉香、清香味
癸醛	116.30	115.30	107.30	0.1	肥皂味、橙皮味						

由表6可知,共检测出84种挥发性风味物质。样品中挥发性风味物质主要由醛类、酮类、醇类、烃类(烯炔和烷炔类)、酯类、酸类、醚类、苯酚类及其他类化合物构成。经水浴解冻、低温解冻和微波解冻后的煎制牛排中分别检测出57、56、45种挥发性物质,物质种类主要以醛类、酮类、醇类、酸类和酯类为主。水浴解冻、低温解冻和微波解冻样品中检出挥发性物质含量分别为1936.52、1786.68、803.34 $\mu\text{g}/\text{kg}$,从含量上来看主要以醛类物质为主。不同解冻方式对煎制牛排挥发性物质影响不同,微波解冻过程中较高的解冻温度加速了美拉德反应和硫胺素的热降解及脂类物质的氧化降解^[14];水浴解冻过程会导致大量的汁液流失,伴随着风味前体物质的减少;低温解冻过程中较低的温度对风味物质的形成有延缓作用^[15]。水浴解冻和低温解冻样品中检出的挥发性物质无论是在种类上还是在含量上均远高于微波解冻样品,因此,选择合适的解冻方式对煎制牛排风味至关重要。

醛类化合物作为脂质氧化的产物,煎制过程中脂肪的氧化、降解以及氨基酸Strecker热降解反应是这些醛类物质的主要来源,醛类化合物由于其阈值较低,对牛排整体气味贡献较大^[19]。研究表明,碳原子为3~4的醛类化合物具有强烈的刺激性风味,碳原子数为5~9的醛类化合物具有清香、油香、脂香风味^[20]。经水浴解冻、低温解冻以及微波解冻后样品中分别检出20、19、15种醛类化合物;3种样品中检出共同含有的醛类化合物14种。(E,E)-2,4-癸二烯醛具有桔子和新鲜的甜橙香气,带有脂肪气息^[21]。庚醛是亚油酸的氧化产物,属于饱和醛,有柑橘香味和脂肪味,在水浴解冻和低温解冻中含量分别为4.73、30.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$,微波解冻中并未检测出庚醛。正己醛含量较大,在水浴解冻、低温解冻和微波解冻样品中含量分别为647.17、396.87、184.67 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。(E,E)-2,4-二烯醛、(E)-2-壬烯醛等都可呈现令人愉快的香味。

醇类物质的前体物质主要是多不饱和脂肪酸,一般是脂质氧化而成的一类阈值较高的挥发性风味物质,当浓度足够高时可对风味起重要贡献^[22]。经水浴解冻、低温解冻以及微波解冻后样品中分别检出5、8、7种醇类化合物。OAV ≥ 1 的气味活性物质只有雪松醇,具有杉木香气。水浴解冻样品中未检出雪松醇;低温解冻及微波解冻后样品中雪松醇含量较高,且其阈值较低,对牛排风味形成的贡献较大OAV分别达到74.86和8.06。

酸类物质是脂肪氧化裂解或脂肪水解过程中变为低级脂肪酸而产生的,酸类物质阈值相对较高,但对形成肉香味有不可忽视的基底作用。因此酸类物质对牛排整体风味起着微弱的调节作用^[23]。经水浴解冻、低温解冻以及微波解冻后样品中分别检出9、5、5种酸类

化合物。其中含量最高的酸类物质是油酸。油酸是单不饱和脂肪酸,通常在多不饱和脂肪酸被氧化后才会被氧化^[24]。牛排经3种解冻方式处理后的酸类化合物种类和含量存在差异,可能是由于不同解冻方法对酸类物质还原为醛和酮的影响程度不同。

酯类化合物可通过酯化反应得到,即有机酸和醇类反应,生成酯类化合物同时生成一分子水,其中无环状的羧基酸经分子内酯化可形成内酯。水浴解冻、低温解冻和微波解冻样品中分别检测酯类物质7、2、4种,其中含量最高的是戊酸异丙酯。

酮类化合物主要来源于氨基酸的降解、醇类的氧化及不饱和脂肪酸的降解^[15],其种类和含量相对于醛类物质更少,阈值较高,对解冻后煎制牛排的气味贡献不大,可能对煎制牛排整体风味起到一定程度的修饰或增强作用。3种样品中共同含有的酮类化合物是3-羟基-3-甲基-2-丁酮、4-辛酮和二氢-5-甲基-5-(2-甲基丙基)-2(3H)-呋喃酮,均具有甜的奶油香气,丰富了肉香味。

烯炔类化合物主要是通过脂质自氧化过程从烷基自由基中衍生产生,对牛排风味可能有一定提升作用^[25]。其中OAV ≥ 1 的烯炔类化合物有 α -律草烯(松树叶、柑橘、橙子香)、角鲨烯(柑橘味)、可巴烯(木香和甜香)和石竹烯(丁香、松脂味),且大部分存在于低温解冻的煎制牛排样品中。

样品中共检出2种醚类化合物,其中茴香脑的含量较高,在3种不同解冻方式下煎制牛排样品中均存在,茴香脑表现为大茴香和甜香气味。

样品中检出其他化合物有2-戊基呋喃、4-乙基-3-壬-5-炔和甲氧基苯基胍。其中2-戊基呋喃属于杂环类,具有清香味,甲氧基苯基胍属于含氮化合物,具有霉味、肉香味,对样品风味的影响较小。此外,样品中还检出少量烷炔和苯酚类物质。

不同解冻方式处理后煎制牛排中挥发性物质的种类和含量的不同主要与解冻机制有关。不同解冻方式因解冻条件如温度、水分等对肌肉中风味前体物质影响程度不同,导致其风味发生变化。综合挥发性风味物质的分析,在本试验条件下水浴解冻和低温解冻为牛排最优的解冻方式。

2.5.2 牛排关键挥发性成分的OAV分析

OAV提供了基于食物基质和空气之间平衡的合理香气效能评价。一般认为OAV ≥ 1 的香气化合物对物质的整体香气贡献较大,可被认为是特征香气化合物;当成分的OAV为0.1~1.0时,该成分对整体风味起到辅助作用。如表7所示,在检测出的84种挥发性风味物质中,有24种化合物的OAV大于1,包括1种醇类物质、1种醚类物质、14种醛类物质、1种酸类物质、1种酮类物质、4种烯炔类物质、1种酯类物质以及1种

其他物质,它们对不同解冻方式煎制牛排的风味有较大贡献作用。其中(*E*)-2-壬烯醛、2-十一烯醛、(*E,E*)-2,4-二烯醛、壬醛、八醛、正己醛、癸醛、雪松醇、十六醛以及(*E,E*)-2,4-癸二烯醛的 OAV 相对较大,说明它们对不同解冻方式煎制牛排的风味有关键性贡献作用。(*E*)-2-壬烯醛具有独特的黄瓜和油脂香,2-十一烯醛具有柑橘、橙皮水果香, (*E,E*)-2,4-二烯醛表现为油脂香,这三类在各组中 OAV 相对较大,说明(*E*)-2-壬烯醛、2-十一烯醛和(*E,E*)-2,4-二烯醛对整体风味具有重要作用。在所有挥发性组分中含量最高的是正己醛,在一定程度上说明香气物质质量浓度的大小决定其香气值的大小。而(*E*)-2-壬烯醛的含量不是最高,但 OAV 较高,说明香气物质的 OAV 不仅取决于物质的浓度而且与香气阈值大小有关。壬醛表现为油脂味,正己醛具有脂香和青草香,八醛表现为脂肪味和果香味,十六醛表现为草莓和杨梅味, (*E,E*)-2,4-癸二烯醛表现为甜橙香气、脂肪味和烤香味。醇类物质虽能

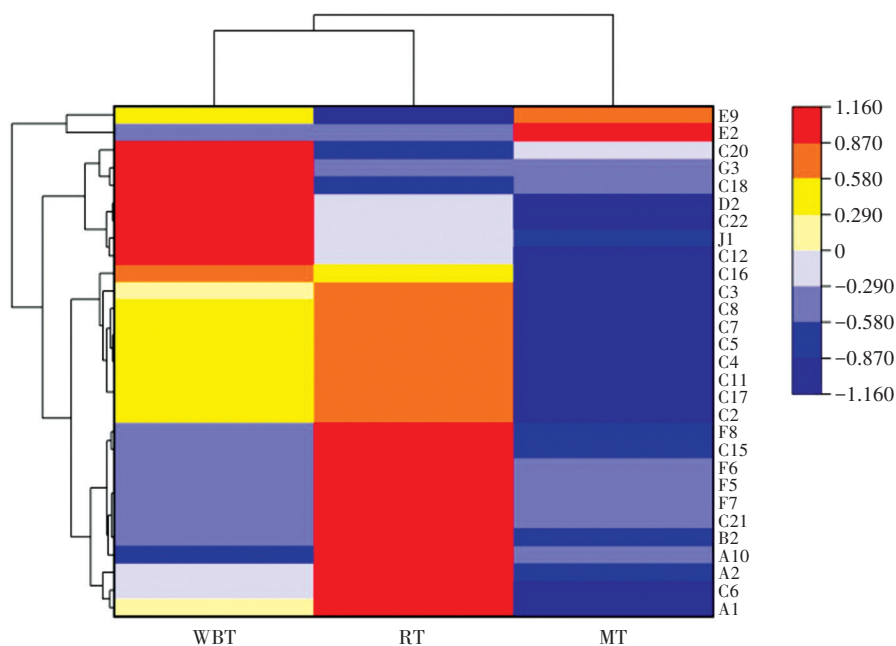
赋予牛排甜香味,但由于其阈值比醛类高,含量却较醛类低,因而,通常认为其对牛排的风味形成仅起到辅助作用。烷烃类和酯类物质由于阈值较高^[26],在样品中的含量较低,对样品整体风味贡献较小,但是有助于提高牛排的整体风味。酸类物质阈值相对较高,对风味贡献不大,但它是生成其它挥发性风味物质的重要中间体。

特征风味物质(OAV \geq 1)在水浴解冻处理组中含量最高,这也很好地解释了水浴解冻处理组脂香味更浓郁的原因。特征风味物质(OAV \geq 1)在低温解冻处理组中种类最多。综合而言,多数风味物质在水浴解冻样品中含量较为丰富,在低温解冻样品中种类最丰富。

2.5.3 牛排挥发性成分聚类分析

为了直观地呈现不同解冻方式煎制牛排关键挥发性成分(OAV \geq 0.1)的变化,对 29 种关键挥发性物质进行对数标准化并绘制热图,如图 1 所示。

由图 1 可知,水浴解冻和低温解冻处理的样品聚



编号为表 6 中序号。

图 1 牛排挥发性成分热图

Fig.1 Heatmap of volatile flavor compounds in different samples

为一类,表明水浴解冻和低温解冻的煎制牛排关键挥发性成分差异较小,微波解冻的煎制牛排关键挥发性成分的种类及含量与其他 2 个样品相比差异较大。水浴解冻处理的煎制牛排样品中检出的关键挥发性成分与其他样品的差异性主要表现在十四醛、 γ -四癸内酯、十六醛、己酸、正己醛、2-戊基呋喃和八醛;低温解冻处理的煎制牛排样品中检出的关键挥发性成分与其他样品的差异性主要表现在石竹烯、庚醛、角鲨烯、 α -律草烯、可巴烯、十一醛、茴香脑、雪松醇、1-庚醇、(*E,E*)-2,

4-庚二烯醛和(*E*)-2-辛烯-1-醇;微波解冻处理的煎制牛排样品中检出的关键挥发性成分与其他样品的差异性主要表现在 2,3-辛二酮、十四醛、己酸、正己醛、八醛、(*E*)-2-庚醛、(*E,Z*)-2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,4-二烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、2-十一烯醛、壬醛、(*E*)-2-壬烯醛、石竹烯、庚醛、茴香脑、雪松醇、1-庚醇、(*E,E*)-2,4-庚二烯醛和(*E*)-2-辛烯-1-醇。由此可见,不同解冻方式对于煎制牛排中关键挥发性成分具有不同的影响,但总体而言,水浴解冻和低温解冻处

理后煎制牛排中关键挥发性成分较为相似,即水浴解冻和低温解冻相对于微波解冻而言对牛排挥发性风味的影响更小,这与感官评价中风味评分的结果较为一致。

2.6 各指标相关性分析

为比较不同解冻方式处理后煎制牛排的品质,探究各指标之间的相关性,绘制 Pearson 相关性系数图,如图 2 所示。

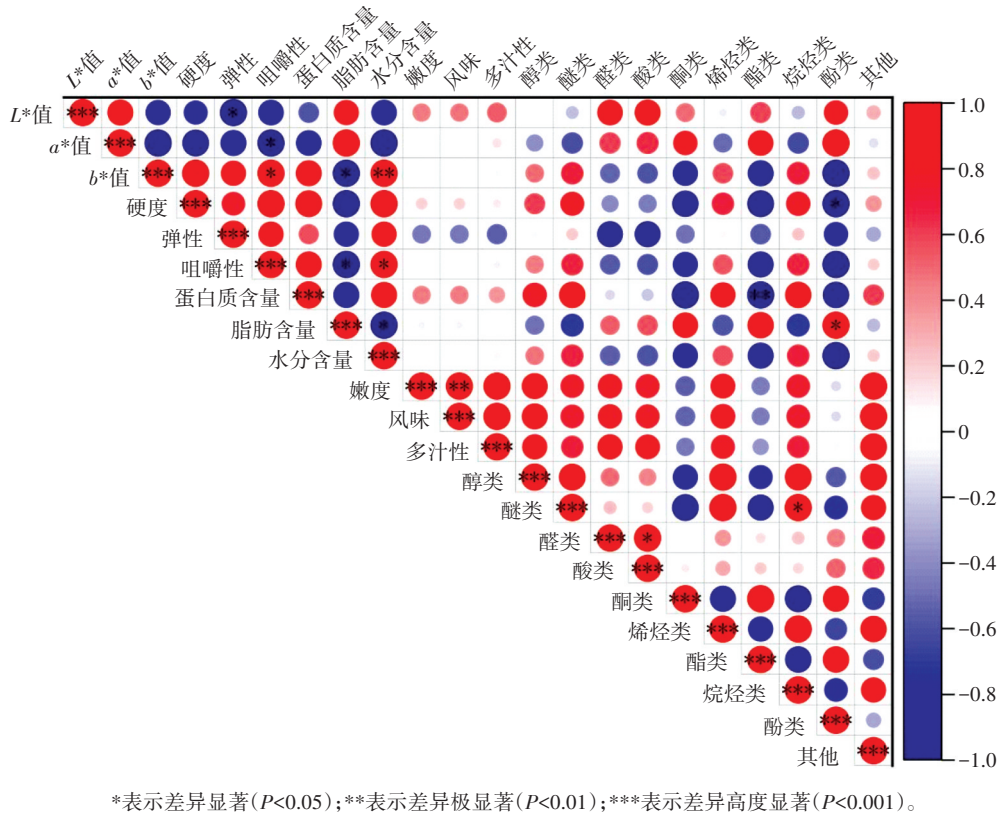


图 2 牛排相关性分析结果

Fig.2 Correlation analysis results of steak samples

如图 2 所示,样品的各项指标呈现出一定的相关性。其中, b^* 值与咀嚼性呈显著正相关($P<0.05$),与水分含量呈极显著正相关($P<0.01$),与脂肪含量、酮类、酯类和酚类物质含量呈负相关; a^* 值与脂肪含量呈正相关,表明色泽与脂肪氧化有关,氧化程度越严重, L^* 值和 a^* 值越小, b^* 值越大。色泽与脂肪氧化和蛋白氧化相关,且脂质氧化和蛋白氧化之间并非独立发生的,两者之间相互影响,有研究显示脂肪氧化程度的加深可能会在蛋白质中产生更多疏水区域,从而促进肌原纤维蛋白质的氧化和变性^[27],最终导致肉的品质变化。咀嚼性与水分含量呈显著正相关($P<0.05$),咀嚼性与硬度和弹性间均呈正相关,肉样的硬度和弹性较大时,该样品具有良好咀嚼度。硬度、弹性、咀嚼性均与脂肪含量呈负相关,肉样脂肪含量越高,硬度、弹性和咀嚼性则越低。脂肪含量与酚类物质含量呈显著正相关($P<0.05$),与酮类物质和酯类物质的生成呈正相关。感官指标中的嫩度与风味呈极显著正相关($P<0.01$),即嫩度越高,风味评分越高。感官指标中的风味与醇类、酯类、醛类、酸类、烯炔类、烷炔类和其他类物质呈正相关。酯类物质与烷炔类物质含量呈显著正相关($P<0.05$)。

煎制牛排的感官指标、色泽指标、质构指标和营养指标是多种物质共同作用的综合体现,而在本实验中仅研究了其中的挥发性物质,因此,各指标与挥发性物质之间的相关性并不能完全反映与各指标相关的全部物质基础,还有待进一步研究。

3 结论

研究表明,低温解冻的牛排煎制后的感官品质最好。低温解冻组的水分含量最高;解冻方式对煎制牛排样品的蛋白质含量、色泽影响不大,对脂肪含量影响较大。水浴解冻组样品的质构特性优于其他组。

水浴解冻、低温解冻和微波解冻后煎制牛排中分别鉴定出 57、56、45 种挥发性物质。(E)-2-壬烯醛、2-十一烯醛、(E,E)-2,4-二烯醛、壬醛、八醛、正己醛、癸醛、雪松醇、十六醛和(E,E)-2,4-癸二烯醛 10 种关键挥发性风味物质对解冻后煎制牛排总体风味形成有重要贡献。多数关键挥发性风味物质在水浴解冻样品中含量较为丰富,在低温解冻样品中种类最丰富。水浴解冻和低温解冻相对于微波解冻而言对牛排挥发性风味的影响更小,这与感官评价中风味评分的结果较为一致。

样品的 b^* 值与咀嚼性呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与水分含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与脂肪、酮类含量、酯类含量、酚类含量呈负相关, a^* 值与脂肪含量呈正相关。咀嚼性与水分含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 咀嚼性与硬度和弹性间均有正相关关系。硬度、弹性、咀嚼性均与脂肪含量呈负相关。脂肪含量与酚类含量呈显著正相关, 与酮类物质和酯类物质的生成呈正相关。感官指标中的嫩度与风味呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 感官指标中的风味与醇类、醚类、醛类、酸类、烯烃类、烷烃类和其他类物质呈正相关。

微波解冻的煎制牛排在多个指标中整体上最差。水浴解冻和低温解冻对煎制牛排品质的影响相对较小, 牛排的感官品质保持较好, 但是低温解冻耗时长, 较适合样品量小、解冻时间充足的情况下使用。

参考文献:

- [1] 武广玉, 杨川, 黄峰, 等. 交变电场辅助冻结对牛肉解冻成熟过程中能量代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 32-38.
WU Guangyu, YANG Chuan, HUANG Feng, et al. Effect of alternating electric field assisted freezing on energy metabolism in beef during thawing and aging[J]. Food Science, 2023, 44(11): 32-38.
- [2] 冯钰敏, 梁诗惠, 邓华荣, 等. 不同解冻方式对鸭腿肉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 336-345.
FENG Yumin, LIANG Shihui, DENG Huarong, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of the duck leg meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 336-345.
- [3] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 86-94.
YANG Chuan, WU Guangyu, LI Yingbiao, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water holding capacity of frozen lamb meat[J]. Food Science, 2023, 44(11): 86-94.
- [4] LI F F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in myofibrillar protein gel quality of porcine longissimus muscle induced by its structural modification under different thawing methods[J]. Meat Science, 2019, 147: 108-115.
- [5] CAI L Y, CAO M J, REGENSTEIN J, et al. Recent advances in food thawing technologies[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 953-970.
- [6] SUN Q X, KONG B H, LIU S C, et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141(16): 111080.
- [7] ZHU J Y, LI S S, YANG L, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on water migration, protein conformation and quality attributes of beef longissimus dorsi muscle by real-time low field nuclear magnetic resonance and Raman spectroscopy[J]. Food Research International, 2023, 166: 112644.
- [8] WU G Y, YANG C, BRUCE H L, et al. Effects of alternating electric field during freezing and thawing on beef quality[J]. Food Chemistry, 2023, 419: 135987.
- [9] CHEN Q M, XIE Y F, YU H, et al. Non-destructive prediction of colour and water-related properties of frozen/thawed beef meat by Raman spectroscopy coupled multivariate calibration[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135513.
- [10] 黄佳, 倪呈, 贾洪锋, 等. 煎制成熟度对牛排挥发性风味物质及感官的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(5): 305-316.
HUANG Jia, NI Cheng, JIA Hongfeng, et al. Effects of pan-fried maturity on volatile flavor compounds and sensory quality of beef steaks[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(5): 305-316.
- [11] 葛小通. 不同解冻方式对冷冻即食海参质构特性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
GE Xiaotong. Effect of different thawing methods on the textural properties of frozen instant sea cucumbers[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [12] 李辉, 高昕, 刘莲凤, 等. 冰温结合保鲜剂贮藏对牙鲆鲜度和质构的影响[J]. 渔业现代化, 2011, 38(2): 60-64.
LI Hui, GAO Xin, LIU Lianfeng, et al. Effect of the super-chilling compound preservatives on freshness and texture changes of olive flounder[J]. Fishery Modernization, 2011, 38(2): 60-64.
- [13] 包海蓉, 奚春蕊, 刘琴, 等. 两种解冻方法对金枪鱼品质影响的比较研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 338-341.
BAO Hairong, XI Chunrui, LIU Qin, et al. Effect of two thawing methods on the quality of tuna meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(17): 338-341.
- [14] 凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 等. 不同解冻方式对鳀鱼鲜度及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 322-330.
LING Shengnan, LIU Teyuan, CHEN Xueye, et al. Effect of different thawing methods on the freshness and volatile flavor compounds of anchovy (*Engraulis encrasicolus*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 322-330.
- [15] 余力, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 95-101.
YU Li, HE Zhifei, WANG Zhaoming, et al. Effect of different thawing methods on volatile flavor compounds of Hyla rabbit meat[J]. Food Science, 2015, 36(22): 95-101.
- [16] L J VAN GEMERT. Odour threshold: Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Zeist: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
- [17] 刘欢, 张德权, 王振宇, 等. 北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(2): 308-318.
LIU Huan, ZHANG Dequan, WANG Zhenyu, et al. Analysis of aroma compounds in leg skin and leg meat from Beijing roasted duck[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(2): 308-318.
- [18] 叶子, 商智勋, 李美奇, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 非靶向分析不同发酵小米辣的风味差异[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 309-316.
YE Zi, SHANG Zhixun, LI Meiqi, et al. Untargeted analysis of flavor differences among fermented *Capsicum frutescens* from different cultivars based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(6): 309-316.
- [19] SULEMAN R, WANG Z Y, AADIL R M, et al. Effect of cooking on the nutritive quality, sensory properties and safety of lamb meat: Current challenges and future prospects[J]. Meat Science, 2020, 167: 108172.
- [20] 王可. 不同部位青海高原型牦牛肉加工特性与加工适宜性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
WANG Ke. Study on processing characteristics and processing suitability of Qinghai Plateau yak meat in different parts[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.
- [21] 王永瑞, 王松磊, 陈放, 等. 基于 LF-NMR 和 HS-SMPE-GC-MS 分析烤牛脂水分分布及关键挥发性风味物质[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 278-288.
WANG Yongrui, WANG Songlei, CHEN Fang, et al. Effect of roast-

- ing time on the moisture distribution and key volatile flavor compounds of beef tallow as analyzed by low field - nuclear magnetic resonance spectroscopy and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography - mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(12): 278-288.
- [22] PEI F, YANG W J, MA N, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by headspace GC-MS and electronic nose[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 72: 343-350.
- [23] 罗杰琼, 张森, 贾洪锋, 等. 不同部位原切牛排品质对比分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 270-279.
- LUO Jieqiong, ZHANG Miao, JIA Hongfeng, et al. Comparative analysis of quality of raw cut steak in different parts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 270-279.
- [24] 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.
- LIU Meng, SHI Zhijia, YANG Zhen. Effects of different thermal processing temperatures on fatty acid composition and fat oxidation of beef jerky[J]. Meat Research, 2019, 33(2): 1-6.
- [25] FU X J, XU S Y, WANG Z. Kinetics of lipid oxidation and off-odor formation in silver carp mince: The effect of lipoxygenase and hemoglobin[J]. Food Research International, 2009, 42(1): 85-90.
- [26] 王惠惠, 马纪兵, 刘小波, 等. 甘肃牧区传统风干牦牛肉加工过程中挥发性风味物质变化分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 200-205.
- WANG Huihui, MA Jibing, LIU Xiaobo, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds during processing of traditional air-dried beef in pastoral area in Gansu Province[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(4): 200-205.
- [27] BAO Y L, ERTBJERG P, ESTÉVEZ M, et al. Freezing of meat and aquatic food: Underlying mechanisms and implications on protein oxidation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(6): 5548-5569.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2023-12-09

(上接第 61 页)

- HUANG Zehua, ZENG Yue, HUANG Chunlan. Effect and mechanism of intestinal flora on mucin 2[J]. Chinese Journal of Gastroenterology, 2019, 24(2): 111-114.
- [20] 傅伟强, 周剑波, 吴雄健, 等. 肠道菌群视角下非酒精性脂肪性肝病的治疗策略[J]. 中国全科医学, 2023, 26(6): 742-748.
- FU Weiqiang, ZHOU Jianbo, WU Xiongjian, et al. Treatment strategy of nonalcoholic fatty liver disease targeting the intestinal microbiota[J]. Chinese General Practice, 2023, 26(6): 742-748.
- [21] 侯梦凡, 胡晓. 生物活性肽对肠道菌群调节作用研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 410-423.
- HOU Mengfan, HU Xiao. Research progress on regulating effects of bioactive peptides on gut microbiota[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(11): 410-423.
- [22] SCHNEEBERGER M, EVERARD A, GÓMEZ-VALADÉS A G, et al. *Akkermansia muciniphila* inversely correlates with the onset of inflammation, altered adipose tissue metabolism and metabolic disorders during obesity in mice[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16643.
- [23] FEROLLA S M, ARMILIATO G N A, COUTO C A, et al. The role of intestinal bacteria overgrowth in obesity - related nonalcoholic fatty liver disease[J]. Nutrients, 2014, 6(12): 5583-5599.
- [24] YAO Q Y, YU Z H, MENG Q G, et al. The role of small intestinal bacterial overgrowth in obesity and its related diseases[J]. Biochemical Pharmacology, 2023, 212: 115546.
- [25] LIU H, XU J H, YEUNG C, et al. Effects of hemicellulose on intestinal mucosal barrier integrity, gut microbiota, and metabolomics in a mouse model of type 2 diabetes mellitus[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1096471.
- [26] WANG H B, LIU Y L, SHI H F, et al. Aspartate attenuates intestinal injury and inhibits TLR4 and NODs/NF- κ B and p38 signaling in weaned pigs after LPS challenge[J]. European Journal of Nutrition, 2017, 56(4): 1433-1443.
- [27] 惠登城, 孙明瑜. 基于肠-肝轴理论探讨非酒精性脂肪性肝病和肠道菌群的关系[J]. 临床肝胆病杂志, 2020, 36(7): 1627-1630.
- HUI Dengcheng, SUN Mingyu. Association between nonalcoholic fatty liver disease and gut microbiota based on the theory of gut-liver axis[J]. Journal of Clinical Hepatology, 2020, 36(7): 1627-1630.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2023-12-19