

微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分分布特性的影响

张凯华, 臧明伍*, 张哲奇, 李 丹, 李笑曼, 陈文华

(中国肉类食品综合研究中心, 北京食品科学研究院, 肉类加工技术北京市重点实验室, 北京 100068)

摘 要: 以预制猪肉饼为模型, 研究微波复热时间 (0、30、60、90、120、180 s) 对其复热过熟味 (warmed-over flavor, WOF)、脂肪氧化和水分分布特性的影响。结果表明, 采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用仪从不同处理组样品中共鉴定出25种挥发性风味物质, 以醛类物质为主; 在较短复热时间 (30 s) 下, 预制猪肉饼中脂肪氧化加速, 促进WOF关键风味因子产生, 不同状态水弛豫时间和比例变化不显著 ($P>0.05$); 微波复热时间持续延长 (120~180 s), WOF关键风味因子含量下降, 水分质量分数显著下降 ($P<0.05$), 不易流动水弛豫时间 T_{21} 和自由水弛豫时间 T_{22} 向较短时间移动。主成分分析结果表明, 适度微波复热 (60~90 s) 可以降低预制猪肉饼复热WOF关键风味因子含量, 较好地保持预制猪肉饼的风味品质。

关键词: 预制猪肉饼; 微波复热; 过熟味; 脂肪氧化; 水分分布

Effect of Microwave Reheating Time on Warmed-Over Flavor, Lipid Oxidation and Water Distribution in Precooked Pork Patties

ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu*, ZHANG Zheqi, LI Dan, LI Xiaoman, CHEN Wenhua

(China Meat Science Research Center, Beijing Academy of Food Sciences,

Beijing Key Laboratory of Meat Processing Technology, Beijing 100068, China)

Abstract: The volatile profiles and warmed-over flavor (WOF) of precooked pork patties reheated by microwave for different periods of time (0, 30, 60, 90, 120 and 180 s) were investigated to analyze the correlation among lipid oxidation, water distribution and WOF. The results showed that a total of 25 volatile compounds were identified using solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry, with aldehydes being predominant. Microwave reheating treatment for 30 s could accelerate lipid oxidation, and promote the formation of volatile flavors, especially WOF, but did not result in a significant change in the relaxation time and proportion of water in different states ($P>0.05$). The content of WOF decreased with increasing reheating time up to 120–180 s, and the water content declined significantly ($P<0.05$), together with a shift of T_{21} (bound water) and T_{22} (immobilized water) to a shorter relaxation time. Principal component analysis demonstrated that moderate microwave reheating (60–90 s) could play a critical role in inhibiting WOF and maintaining the flavor quality of precooked minced pork.

Keywords: precooked minced pork; microwave reheating; warmed-over flavor; lipid oxidation; water distribution

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190816-173

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2020) 09-0050-07

引文格式:

张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 50-56. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190816-173. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Kaihua, ZANG Mingwu, ZHANG Zheqi, et al. Effect of microwave reheating time on warmed-over flavor, lipid oxidation and water distribution in precooked pork patties[J]. Food Science, 2020, 41(9): 50-56. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190816-173. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2019-08-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项 (2016YFD0400403)

第一作者简介: 张凯华 (1990—) (ORCID: 0000-0003-0647-1375), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为肉品科学与食品安全。

E-mail: zhkh.happy@163.com

*通信作者简介: 臧明伍 (1981—) (ORCID: 0000-0002-1302-316X), 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为肉品科学与食品安全。E-mail: cmrcfood@126.com

当前,人们生活节奏加快,预制调理肉制品因美味、方便快捷、节省家庭备餐时间而广受消费者青睐^[1]。预制调理肉制品大多需经复热处理,复热在促进产品应有风味形成的同时,也可能产生过熟味(warmed-over flavor, WOF)^[2]等不良风味,影响产品品质和市场可接受度。

微波技术具有加热时间短、热效率高、节能降耗、较好地保持产品品质等特点^[3],广泛应用于食品物料加热^[4]、杀菌^[5]、解冻^[6]、干燥^[7]及天然产物提取^[8-9]等多个领域。微波技术的产物——微波炉已成为众多家庭烹饪、复热食物的必备选择。不同于传统加热由外及内的升温模式,物料在微波电磁场中吸收微波能,经分子极化和离子导电效应转换为热能,实现物料内外均匀加热^[4]。

肉经微波复热时,极性分子加速碰撞、摩擦产热,水分含量及分布状态也发生变化,挥发性风味物质及其前体物质也可能参与其中,因此微波复热过程中肉的WOF变化和脂肪氧化可能有其特殊性。国内学者针对微波复热预制调理肉制品出品率、质构和感官品质等已开展了较多研究与工艺优化^[10-13],但对微波复热过程中WOF产生及变化、脂肪氧化及水分变化规律研究较少。本研究选取预制猪肉饼为研究模型,采用固相微萃取-气相色谱-质谱(solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)分析微波复热预制猪肉饼WOF和整体风味变化,基于微波复热过程中脂肪氧化、水分质量分数及分布特性等指标变化,探究微波复热对WOF生成的影响,以期为肉制品复热风味变化及WOF控制机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷鲜猪后腿肉 北京永辉超市有限公司; 2-甲基-3-庚酮、C₈~C₂₀正构烷烃 美国Sigma公司; 正己烷(色谱纯) 美国Fisher公司。

1.2 仪器与设备

50/30 μm二乙烯基苯/Carboxen/聚二甲基硅氧烷 1 cm SPME针 美国Supelco公司; GC-MS联用仪、TG-Wax MS极性柱 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; EM720KG1-PW微波炉 美的集团股份(广州)有限公司; MesoMR23-060H-I低场核磁共振(low field-nuclear magnetic resonance, LF-NMR)分析仪及成像系统 上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

剔除猪后腿肉可见脂肪、筋膜,用筛孔直径为5 mm

的绞肉机将肉绞成肉糜。将每100 g肉糜用圆饼形模具定型成直径10 cm、厚度1 cm的肉饼。将肉饼放入蒸锅,沸水蒸制30 min,冷却后得到预制猪肉饼。蒸煮样品经真空包装于4℃条件下冷藏5 d,以促进WOF的生成^[14]。将冷藏5 d的样品置于微波炉(功率700 W)中,分别复热0、30、60、90、120 s和180 s,复热完毕后将样品取出,流水冷却至室温。

1.3.2 样品SPME处理及GC-MS分析

将样品在室温下切碎混匀。准确称取3 g样品装入萃取瓶中,加入1 μL 0.816 μg/μL的2-甲基-3-庚酮作为内标物,旋紧瓶盖。将萃取瓶置于55℃水浴锅中平衡40 min,随后将SPME针头插入瓶中,纤维头处于顶空状态吸附40 min后取出,插入GC进样口,热解吸5 min。每个样品3个平行。

GC条件: TG-Wax MS极性柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度250℃; 升温程序: 起始柱温40℃,保持2 min,以4℃/min升至200℃,保持1 min,再以8℃/min升至230℃,保持5 min; 载气(He)纯度不小于99.999%,流速1.0 mL/min。

MS条件: 电子电离源: 电子能量70 eV; 传输线温度230℃; 离子源温度280℃; 检测器电压1.2 kV; 质量扫描范围 m/z 40~400。

定性分析: 通过计算机检索NIST和Willey谱库,选取正反匹配比均大于800的化合物; 同时借助系列正构烷烃计算挥发性风味化合物的保留指数(retention index, RI),与标准化化合物的RI进行比对确定化合物,对挥发性风味物质进行定性鉴定。

定量分析: 根据已知内标2-甲基-3-庚酮含量及对应峰面积,按照化合物峰面积与含量呈正比的原理,计算待测样品中挥发性风味物质的含量。

1.3.3 脂肪氧化测定

采用硫代巴比妥酸反应产物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)值分析预制猪肉饼冷藏及微波复热过程中的脂肪氧化情况。取10 g切碎的肉样,加入50 mL质量分数7.5%的三氯乙酸溶液(含质量分数0.1%乙二醇四乙酸二钠),振摇30 min,双层滤纸过滤2次。取5 mL滤液,加入5 mL 0.02 mol/L硫代巴比妥酸溶液,100℃水浴30 min,取出冷却1 h,然后加入5 mL三氯甲烷摇匀静置分层后,取上层有机相分别在532 nm和600 nm波长处测定吸光度,按下式计算TBARS值。每个样品测定3次取平均值。

$$\text{TBARS值}/(\text{mg}/100\text{ g}) = \frac{(A_{532\text{ nm}} - A_{600\text{ nm}}) \times 0.1 \times 72.6 \times 100}{155}$$

1.3.4 水分质量分数及水分状态分布测定

按照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法测定样品水分质量分数。水分状态

分布测定参照钱书意等^[15]的方法,将样品置于核磁共振成像仪永磁场中心位置的射频线圈中心,进行磁共振波谱测定。样品弛豫时间 T_2 使用Carr-Purcell-Miniboom-Gill (CPMG)程序测定,CPMG脉冲序列参数为:主频率23 MHz,偏移频率291.673 68 kHz,90°脉冲时间19 μ s,180°脉冲时间38 μ s;采样点数287 522,重复时间4 000 ms;累加次数4次;回波时间回波数5 000。通过CONTIN软件对谱图进行反演,得到不同状态水分弛豫时间(T_{2b} 、 T_{21} 和 T_{22})及峰面积比例(P_{2b} 、 P_{21} 和 P_{22})。不同状态水分相对含量以其对应峰面积比例表示。

1.4 数据统计与分析

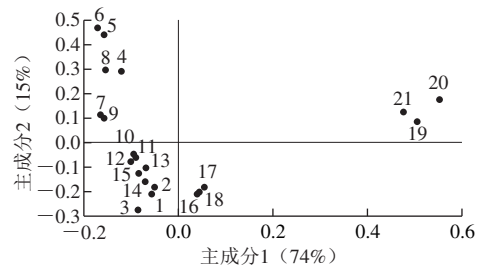
采用Microsoft Excle 2007软件处理数据,结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。利用IBM SPSS 17.0统计分析软件进行单因素方差分析,用UnscrambX 10.1软件进行主成分分析,用Pearson相关系数法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 微波复热对预制猪肉饼WOF关键风味因子的影响

基于SPME-GC-MS分析,猪肉饼经加热、冷藏和微波复热后共鉴定出25种挥发性风味物质,其中醛类15种、酮类2种、醇类4种、烃类3种、杂环类1种;各组猪肉饼均为醛类物质含量最高,约占挥发性风味物质总量70%。如表1所示,经冷藏后(即复热0 s),猪肉饼中醇类、杂环类物质含量及总量显著增加($P < 0.05$)。微波加热在形成产品风味的同时,也会因水分和挥发性风味物质挥发带来一定的风味损失,导致产品风味弱化^[16-17]。本研究中,随微波复热时间的延长,醛类、酮类、醇类和杂环类物质含量均呈先升后降趋势,微波复热30 s时,猪肉饼中上述4种挥发性风味物质含量均最高;较长时间(120、180 s)的微波复热,使挥发性风味物质总量显著降低,烃类物质含量显著增加($P < 0.05$)。在微波场中,混合物体系中偶极矩越大的物质对微波能的响应越大,也更易从混合物体系中分离^[18]。烃类物质偶极矩小于醛、酮、醇类等极性分子,在微波场中较难扩散分离,这可能是长时间微波复热后烃类物质含量增加的原因。

不同复热方式对猪肉饼挥发性风味物质的影响各异,水浴复热65 min,酸类物质显著增加($P < 0.05$)^[2],本研究中微波复热180 s,其烃类物质含量显著增加($P < 0.05$),这可能是受不同复热方式传热模式及挥发性风味萃取方式影响。



1~3.预制猪肉饼; 4~6.复热0 s; 7~9.复热30 s; 10~12.复热60 s; 13~15.复热90 s; 16~18.复热120 s; 19~21.复热180 s。

图1 微波复热预制猪肉饼挥发性风味物质主成分载荷图

Fig. 1 Bi-dimensional loading plot of principal component analysis for volatile compounds in precooked minced pork reheated by microwave for different periods

对经加热、冷藏及不同时间微波复热处理猪肉饼中的挥发性风味物质进行主成分分析,得到风味成分载荷图。由图1可知,主成分1和主成分2贡献率达到89%,能够较好地反映样品特征;微波复热0、30 s的猪肉饼位于第2象限,预制猪肉饼和微波复热60、90 s的猪肉饼位于第3象限,微波复热120、180 s的猪肉饼分别位于第4、1象限。可见冷藏(复热0 s)和微波复热30、120、180 s后,猪肉饼的挥发性风味成分与预制猪肉饼差异较为显著,微波复热60 s和90 s时,其风味与预制猪肉饼风味最为相似。这表明冷藏及微波复热时间对预制猪肉饼风味有明显影响,适度的复热时间(60~90 s)能够较好地保持猪肉饼风味。

WOF是肉经加热-冷藏-再加热产生的不良风味,戊醛、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃等脂质氧化降解产物多被视为预制肉制品复热WOF关键风味因子^[12,19-22]。不同时间微波复热处理预制猪肉饼中WOF关键风味因子含

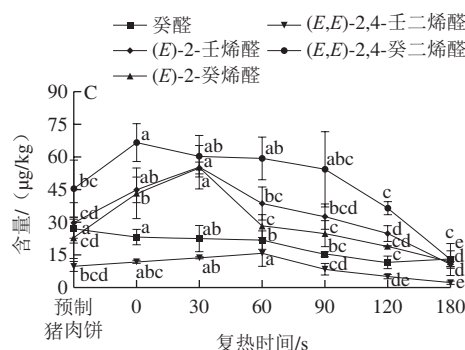
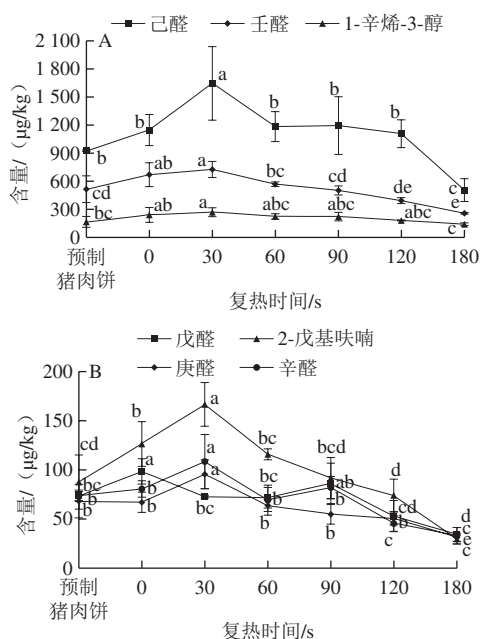
表1 微波复热预制猪肉饼挥发性风味成分种类及含量变化

Table 1 Volatile compounds in cooked minced pork subjected to microwave reheating treatment

分类	预制猪肉饼		复热0 s		复热30 s		复热60 s		复热90 s		复热120 s		复热180 s	
	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)	种类	含量/(μ g/kg)
醛类	15	1 934.90 \pm 267.69 ^b	14	2 445.01 \pm 405.76 ^b	15	3 105.80 \pm 593.96 ^c	15	2 305.74 \pm 272.97 ^b	15	2 223.35 \pm 461.50 ^b	15	1 888.21 \pm 241.68 ^b	14	1 037.45 \pm 176.94 ^c
酮类	1	427.28 \pm 108.71 ^b	2	510.75 \pm 42.26 ^{ab}	2	577.18 \pm 76.48 ^d	2	432.53 \pm 41.70 ^b	2	462.19 \pm 44.68 ^b	2	457.74 \pm 48.99 ^b	2	236.48 \pm 19.54 ^c
醇类	2	178.57 \pm 62.32 ^{bc}	4	391.37 \pm 127.44 ^c	4	403.62 \pm 64.32 ^a	4	281.46 \pm 34.71 ^b	4	265.50 \pm 52.15 ^b	3	191.40 \pm 6.37 ^{bc}	3	147.16 \pm 17.30 ^c
杂环类	1	87.35 \pm 27.67 ^{cd}	1	126.33 \pm 22.81 ^b	1	166.66 \pm 22.21 ^a	1	115.70 \pm 5.63 ^{bc}	1	91.36 \pm 21.04 ^{cd}	1	73.45 \pm 16.87 ^d	1	29.65 \pm 5.49 ^e
烃类	1	10.08 \pm 1.42 ^e	1	10.55 \pm 1.43 ^e	1	10.55 \pm 2.52 ^e	1	7.12 \pm 0.98 ^e	1	9.80 \pm 1.93 ^c	2	24.42 \pm 3.77 ^b	3	59.96 \pm 6.73 ^a
合计	20	2 638.18 \pm 467.82 ^c	22	3 484.01 \pm 599.70 ^b	23	4 263.81 \pm 759.51 ^a	23	3 142.54 \pm 355.98 ^{bc}	23	3 052.20 \pm 581.28 ^{bc}	23	2 635.22 \pm 317.68 ^c	23	1 510.71 \pm 226.00 ^d

注:同行肩标小写字母不同表示含量差异显著($P < 0.05$)。

量变化如图2所示。12种WOF关键风味因子中,己醛含量最高,接近或超过1 000 $\mu\text{g}/\text{kg}$,壬醛和1-辛烯-3-醇含量次之,其他物质含量均低于200 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (图2A)。在不同加工阶段,戊醛和(*E,E*)-2,4-癸二烯醛在冷藏(复热0 s)阶段含量最高,在微波复热阶段,(*E,E*)-2,4-癸二烯醛含量呈下降趋势,戊醛含量呈波动变化(图2B、C);己醛、庚醛、辛醛、壬醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃、(*E*)-2-壬烯醛、(*E*)-2-癸烯醛含量均随微波复热时间的延长呈先升后降的趋势,且在微波复热30 s时含量最高;微波复热120 s时,戊醛、辛醛和癸醛含量显著低于预制猪肉饼样品($P<0.05$),其他WOF关键风味因子含量较预制猪肉饼变化不显著($P>0.05$);微波复热180 s时,(*E*)-2-癸烯醛和1-辛烯-3-醇含量较预制猪肉饼变化不显著($P>0.05$),其他WOF关键风味因子含量均显著低于预制猪肉饼样品($P<0.05$)。因此,冷藏和短时微波复热促进WOF风味因子含量增加。己醛、(*E*)-2-辛烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃是亚油酸的氧化裂解产物,辛醛、壬醛是油酸的氧化产物^[22-23],推测亚油酸作为多不饱和脂肪酸,其氧化对猪肉饼加热-冷藏-复热过程中WOF关键风味因子的产生发挥主要作用。由以上结果可知,微波复热0~30 s时,猪肉饼中WOF关键风味因子含量升高,微波复热120~180 s时,猪肉饼中WOF关键风味因子含量持续降低,结合主成分分析结果,微波复热0~30 s和120~180 s时,其整体风味均与预制猪肉饼风味差异显著,可见,较短和较长时间的微波复热均对猪肉饼的整体风味具有不利影响。

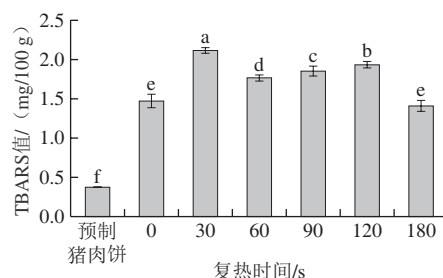


同一指标不同复热时间小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图2 微波复热对预制猪肉饼WOF关键风味因子含量的影响

Fig. 2 Contents of WOF-related key volatile compounds in precooked minced pork subjected to microwave reheating treatment

2.2 微波复热对预制猪肉饼脂肪氧化的影响



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图3 微波复热对预制猪肉饼TBARS值的影响

Fig. 3 TBARS values of precooked minced pork at different microwave reheating times

肉制品加工及食用过程中,WOF的形成及变化主要归因于脂肪氧化^[24]。TBARS值是客观反映肉制品脂肪氧化程度的重要指标,加热-冷藏-微波复热过程中猪肉饼TBARS值变化情况如图3所示。预制猪肉饼经冷藏5 d(复热0 s)后,猪肉饼TBARS值显著升高($P<0.05$),由0.37 mg/100 g增加到1.47 mg/100 g。Rhee等^[25]发现,烤制猪肉饼于4℃冷藏3 d和6 d,其TBARS值显著增加,与本研究结果变化趋势一致。随微波复热时间的延长,TBARS值呈波动变化,复热30 s时,猪肉饼TBARS值为2.11 mg/100 g,氧化程度最高;复热60~120 s时,TBARS值由1.76 mg/100 g增加至1.93 mg/100 g,复热180 s时,又降低至1.41 mg/100 g,且与复热0 s时无显著差异($P>0.05$)。水煮熟制的鲑鱼片经冷藏(5℃、2 d)-微波复热(2 450 Hz、4 min)后,其TBARS值由1.08 mg/kg增加至1.88 mg/kg^[26],与本研究结果变化趋势相一致。赵力等^[27-28]研究发现,亚麻酸、亚油酸和油酸经电炉加热和微波复热均可产生自由基信号,且微波复热后产生的自由基信号强度与微波复热时间成正比。因此,本研究中猪肉饼经冷藏和微波复热30 s,TBARS值

增加,可能是由于水蒸气加热时油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸产生自由基,启动脂肪自动氧化,冷藏期间自动氧化持续进行,微波复热继续产生自由基,并加速了脂质自动氧化。预制猪肉饼经较长时间微波复热后TBARS值下降,推测可能是由于较长时间的微波加热导致脂肪氧化终产物丙二醛在高温下发生聚合形成新产物或受热挥发扩散到空气中。

2.3 微波复热对预制猪肉饼水分质量分数及分布特性的影响

表2 微波复热预制猪肉饼水分质量分数及水分分布状态
Table 2 Effect of microwave reheating on water content and distribution in precooked minced pork

复热时间/s	水分质量分数/%	T_{2b} /ms	T_{21} /ms	T_{22} /ms	P_{2b} /%	P_{21} /%	P_{22} /%
预制猪肉饼	64.55±0.19 ^d	0.57±0.08 ^d	25.53±0.00 ^d	410.27±0.00 ^d	4.26±0.22 ^d	86.79±0.94 ^d	8.95±0.72 ^d
0	60.91±1.27 ^b	0.42±0.00 ^c	23.82±0.00 ^b	300.36±10.42 ^b	4.34±0.11 ^d	87.74±0.60 ^{bc}	7.92±0.48 ^b
30	59.19±0.25 ^{bc}	0.46±0.03 ^c	22.22±0.00 ^c	300.36±10.42 ^b	4.42±0.02 ^{cd}	88.28±0.11 ^a	7.29±0.13 ^c
60	58.84±0.24 ^c	0.42±0.00 ^c	22.22±0.00 ^c	300.36±10.42 ^b	4.73±0.05 ^c	87.55±0.15 ^{abcd}	7.72±0.21 ^b
90	57.65±0.67 ^c	0.36±0.04 ^{cd}	18.69±0.65 ^d	261.42±9.07 ^c	5.76±0.53 ^b	87.34±0.14 ^{cd}	6.90±0.39 ^{cd}
120	53.19±0.82 ^d	0.34±0.01 ^d	17.44±0.61 ^d	243.89±8.46 ^d	6.01±0.14 ^d	87.42±0.05 ^{cd}	6.57±0.19 ^d
180	44.11±1.64 ^e	0.43±0.06 ^c	13.67±0.00 ^e	172.36±5.98 ^e	6.63±0.11 ^e	88.23±0.10 ^b	5.14±0.01 ^e

注:同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

微波热效应和非热效应能够改变受热食品基质的水分含量及分布状态,进而影响脂肪氧化及风味品质^[29-30]。如表2所示,预制猪肉饼冷藏5 d(复热0 s)后,猪肉饼水分质量分数由64.55%显著降至60.91%($P<0.05$);微波复热30 s时,水分质量分数稍有降低,继续延长复热时间,水分质量分数显著下降($P<0.05$),复热180 s时,猪肉饼水分质量分数降至44.11%,这与微波复热速冻鱼香牛肉丝水分含量的变化规律^[12]相一致。微波复热60~120 s时,猪肉饼TBARS值小幅增加,可能与肉饼中水分质量分数持续降低导致丙二醛等反应产物相对含量增加有关。水分大幅降低使肉制品硬度增加,因此较长时间的微波复热不利于其食用品质的保持。

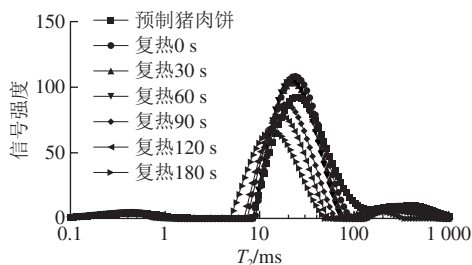


图4 不同微波复热时间预制猪肉饼水分弛豫时间 T_2 变化

Fig. 4 Effect of microwave reheating time on T_2 of precooked minced pork

LF-NMR技术通过测定弛豫时间,能够获取食品中水分的状态、分布及迁移规律等信息。采用CPMG序列和 T_2 反演软件得到微波复热猪肉饼的 T_2 图谱,如图4所示。经反演的 T_2 图谱有3个峰,分别为 T_{2b} (0~10 ms)、 T_{21} (10~100 ms)和 T_{22} (100~1 000 ms),分别对应结

合水、不易流动水和自由水3种状态。结合表2和图4,微波复热猪肉饼以 T_{21} 为主要峰,说明猪肉饼经加热-冷藏-微波复热后,水分主要以不易流动水状态存在,相对含量为86.79%~88.28%,与张欢^[11]、李可^[31]等研究结果相似,可能是肉糜热诱导形成的凝胶网络增加了水分的不易流动性。经不同时间微波复热后,预制猪肉饼中3种状态水分的峰值均向较短弛豫时间迁移,不易流动水弛豫时间 T_{21} 和自由水弛豫时间 T_{22} 分别由复热0 s时的23.82、300.36 ms缩短至复热180 s时的13.67、172.36 ms。 T_2 可反映不同状态水分的流动性, T_2 越小,水的流动性越差^[32],因此,随微波复热时间的延长,猪肉饼中水分的不易流动性增强。微波复热30 s和60 s时,猪肉饼水分质量分数及3种状态水分的弛豫时间和相对含量变化不显著($P>0.05$);微波复热120 s和180 s时, T_{2b} 、 T_{22} 和 P_{2b} 、 P_{22} 显著降低($P<0.05$)。随微波复热时间的延长,自由水仍以一定比例存在,未完全脱除,可能是猪肉饼在微波复热时吸收微波能,不同状态的水分存在相互转换^[33]。

2.4 预制猪肉饼微波复热WOF关键风味因子与TBARS值、水分质量分数及分布的相关性

不同微波复热时间处理预制猪肉饼,其TBARS值、水分质量分数及分布状态与WOF关键风味因子的相关性分析如表3所示。己醛、庚醛、2-戊基呋喃与TBARS值呈极显著正相关($P<0.01$), r 分别为0.700、0.597、0.525;辛醛、(E)-2-壬烯醛和1-辛烯-3-醇与TBARS值呈显著正相关($P<0.05$),其他WOF关键风味因子与TBARS值相关性不显著。有研究表明,熟肉制品TBARS值与己醛含量存在相关性^[34-35]。St Angelo等^[35]发现烤牛肉经复热处理,其己醛含量与TBARS值呈正相关,相关系数为0.92,高于本研究结果,这可能与加热方式不同有关。水分质量分数、不易流动水(T_{21})和自由水(T_{22})弛豫时间与12种WOF关键风味因子含量均呈极显著正相关($P<0.01$);结合水相对含量(P_{2b})与12种WOF关键风味因子均呈极显著负相关($P<0.01$);自由水相对含量(P_{22})与癸醛含量呈显著正相关($P<0.05$),与其余11种WOF关键风味因子含量均呈极显著正相关($P<0.01$)。

微波加热能够促进肉类脂质氧化^[36-38],生成醛、酮等氧化产物。本研究结果表明,短时(0~30 s)微波复热时,猪肉饼TBARS值增加,3种不同状态水分弛豫时间和相对含量变化不显著,WOF关键风味因子含量增加,推测该阶段脂肪氧化持续进行,促进WOF生成,水分质量分数及其分布状态对WOF含量变化影响不显著。长时(90~180 s)微波复热时,TBARS值较复热30 s时有所降低,水分质量分数下降,不同状态水(T_{2b} 、 T_{21} 和 T_{22})峰值均向短弛豫时间迁移,WOF关键风味因子含量持续降低。Tornberg等^[39]研究发现, T_{21} 与肉的风味有关。推测水分质量分数降低及 T_{21} 的缩短降低了水分的可移动

表3 预制猪肉饼微波复热WOF关键风味因子含量与TBARS值、水分分布的相关性

Table 3 Pearson correlation coefficients among WOF-related key flavors contents, TBARS value and water distribution

项目	戊醛含量	己醛含量	庚醛含量	辛醛含量	壬醛含量	癸醛含量	(E)-2-壬烯醛含量	(E)-2-癸烯醛含量	(E,E)-2,4-壬二烯醛含量	(E,E)-2,4-癸二烯醛含量	2-戊基呋喃含量	1-辛烯-3-醇含量	P_{2b}	P_{21}	P_{22}	T_{2b}	T_{21}	T_{22}	TBARS值	水分质量分数
戊醛含量	1.000	0.468*	0.501*	0.636**	0.750**	0.591**	0.688**	0.640**	0.553**	0.819**	0.584**	0.676**	-0.658**	-0.346	0.768**	-0.042	0.747**	0.741**	0.107	0.813**
己醛含量		1.000	0.911**	0.836**	0.826**	0.614**	0.883**	0.756**	0.591**	0.757**	0.844**	0.841**	-0.706**	-0.033	0.674**	0.196	0.694**	0.779**	0.700**	0.735**
庚醛含量			1.000	0.857**	0.921**	0.745**	0.952**	0.902**	0.690**	0.725**	0.936**	0.841**	-0.818**	0.182	0.683**	0.449*	0.769**	0.804**	0.597**	0.728**
辛醛含量				1.000	0.850**	0.668**	0.888**	0.816**	0.617**	0.808**	0.830**	0.791**	-0.758**	0.123	0.654**	0.369	0.728**	0.777**	0.485*	0.764**
壬醛含量					1.000	0.814**	0.978**	0.942**	0.773**	0.880**	0.927**	0.912**	-0.913**	0.032	0.839**	0.400	0.904**	0.894**	0.393	0.857**
癸醛含量						1.000	0.815**	0.733**	0.686**	0.714**	0.738**	0.687*	-0.821**	0.250	0.656*	0.584**	0.782**	0.741**	0.054	0.650**
(E)-2-壬烯醛含量							1.000	0.931**	0.743**	0.882**	0.939**	0.901**	-0.896**	0.064	0.809**	0.404	0.876**	0.893**	0.468*	0.841**
(E)-2-癸烯醛含量								1.000	0.641**	0.752**	0.887**	0.851**	-0.850**	0.229	0.692**	0.456*	0.798**	0.756**	0.391	0.714**
(E,E)-2,4-壬二烯醛含量									1.000	0.757**	0.743**	0.600**	-0.836**	-0.004	0.782**	0.366	0.842**	0.827**	0.309	0.783**
(E,E)-2,4-癸二烯醛含量										1.000	0.776**	0.818**	-0.865**	-0.197	0.895**	0.156	0.904**	0.926**	0.321	0.923**
2-戊基呋喃含量											1.000	0.807**	-0.884**	0.042	0.807**	0.412*	0.868**	0.877**	0.525**	0.832**
1-辛烯-3-醇含量												1.000	-0.733**	-0.107	0.732**	0.291	0.731**	0.749**	0.414*	0.703**
P_{2b}													1.000	-0.083	-0.897**	-0.460*	-0.978**	-0.925**	-0.254	-0.871**
P_{21}														1.000	-0.366	0.644**	-0.104	-0.180	-0.099	-0.282
P_{22}															1.000	0.144	0.959**	0.944**	0.281	0.939**
T_{2b}																1.000	0.325	0.231	-0.166	0.097
T_{21}																	1.000	0.961**	0.253	0.937**
T_{22}																		1.000	0.440*	0.965**
TBARS值																			1.000	0.414*
水分质量分数																				1.000

注：*：显著相关 ($P<0.05$)；**：极显著相关 ($P<0.01$)。

性，一定程度上延缓了脂肪氧化，同时，WOF关键风味因子作为极性物质，参与微波场运动，随水分扩散到空气中。可见，较长时间微波复热时，水分质量分数的降低及 T_{21} 的缩短对降低WOF关键风味因子含量具有重要影响。预制猪肉饼除自身所含水分外，无外界水分参与，多数预制调理肉制品尤其是预制菜肴类肉制品多含汤汁，水分的存在可能对复热风味及WOF具有不同影响，其复热风味变化仍有待进一步研究。

3 结论

结合SPME-GC-MS、LF-NMR等技术分析微波复热时间对预制猪肉饼WOF、TBARS值、水分质量分数及分布特性的影响及各指标间的相关性。不同时间微波复热处理预制猪肉饼中共鉴定得到25种挥发性风味物质，主要为醛类（15种）。短时（0~30 s）微波复热导致猪肉饼WOF关键风味因子含量、TBARS值显著增加（ $P<0.05$ ），不同状态水弛豫时间和相对含量变化不显著（ $P>0.05$ ）；微波复热时间延长至120~180 s，WOF关键风味因子含量呈下降趋势，水分质量分数显著下降（ $P<0.05$ ）， T_{21} 和 T_{22} 向较短弛豫时间移动。因此，短时（0~30 s）微波复热时，脂肪氧化占主导，促进WOF生成；长时（120~180 s）微波复热时，水分质量分数降低及 T_{21} 向较短弛豫时间移动对降低WOF含量具有重要作用。主成分分析结果表明，适度微波复热（60~90 s）降低了预制猪肉饼复热WOF关键风味因子含量，同时较好地保持了预制猪肉饼的风味品质。

参考文献：

- [1] GARCÍA-LOMILLO J, GONZALEZ-SANJOSE M L, PINOGARCÍA R D, et al. Antioxidant effect of seasonings derived from wine pomace on lipid oxidation in refrigerated and frozen beef patties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 85-91. DOI:10.1016/j.lwt.2016.11.038.
- [2] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 水浴复热时间对猪肉糜制品挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 186-191. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180727-035.
- [3] 张柔佳, 王易芬, 栾东磊. 微波加工过程中食品温度分布规律及其均匀性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 270-278. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014993.
- [4] GUO Qiushan, SUN Dawen, CHENG Junhu, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 236-247. DOI:10.1016/j.tifs.2017.07.007.
- [5] 李星, 布丽君, 张晓春, 等. 微波杀菌对卤鹅挥发性风味成分的影响研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 97-100; 105. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.019.
- [6] 余力, 贺雅非, 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201522017.
- [7] DUAN Xu, LIU Wenchao, REN Guangyue, et al. Browning behavior of button mushrooms during microwave freeze-drying[J]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1373-1379. DOI:10.1080/07373937.2015.1117487.
- [8] PONGMALAI P, DEVAHASTIN S, CHIEWCHAN N, et al. Enhancement of microwave-assisted extraction of bioactive compounds from cabbage outer leaves via the application of ultrasonic pretreatment[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 144: 37-45. DOI:10.1016/j.seppur.2015.02.010.
- [9] CHIZOBA EKEZIE F G, SUN Dawen, HAN Zhang, et al. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: a review of recent developments[J]. Trends

- in Food Science & Technology, 2017, 67: 58-69. DOI:10.1016/j.tifs.2017.05.014.
- [10] 赵钜阳, 石长波, 张琪. 微波复热功率及时间对速冻红烧肉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3519-3525. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2017.09.040.
- [11] 张欢, 董福家, 陈倩, 等. 面粉组分对预油炸微波复热鸡米花品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 57-62. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201806010.
- [12] 孙莹, 孟宁, 江连洲. 微波复热对速冻鱼香牛肉丝品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 86-90. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.016.
- [13] 丁阳月, 郑环宇, 张林, 等. 改性大豆分离蛋白对微波复热鸡米花品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 230-233; 242. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.03.045.
- [14] BYRNEA D V, BREDIEA W L P, MOTTRAM D S, et al. Sensory and chemical investigations on the effect of oven cooking on warmed-over flavour development in chicken meat[J]. Meat Science, 2002, 61(2): 127-139. DOI:10.1016/S0309-1740(01)00171-1.
- [15] 钱书意, 李侠, 孙圳, 等. 不同冻结温度下牛肉的肌原纤维蛋白变性与肌肉持水性[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 24-30. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815004.
- [16] GUZMÁN-GERÓNIMO R I, LÓPEZ M G, DORANTES-ALVAREZ L. Microwave processing of avocado: volatile flavor profiling and olfactometry[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2008, 9(4): 501-506. DOI:10.1016/j.ifset.2008.05.003.
- [17] LORENCE M W, PESHECK P S. Development of packaging and products for use in microwave ovens[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009: 176-191.
- [18] LIU Zaizhi, DENG Baoqin, LI Shuailan, et al. Optimization of solvent-free microwave assisted extraction of essential oil from *Cinnamomum camphora* leaves[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 124: 353-362. DOI:10.1016/j.indcrop.2018.08.016.
- [19] O'SULLIVAN M G, BYRNE D V, JENSEN M T, et al. A comparison of warmed-over flavour in pork by sensory analysis, GC/MS and the electronic nose[J]. Meat Science, 2003, 65(3): 1125-1138. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00342-x.
- [20] 黄业传, 李凤, 严成. 再次方式和次数对猪肉风味品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(9): 224-231. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2014.09.040.
- [21] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 242-248. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814036.
- [22] KIM S, LI J L, LIM N R, et al. Prediction of warmed-over flavor development in cooked chicken by colorimetric sensor array[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 440-447. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.05.084.
- [23] 王建辉, 王秀, 陈奇, 等. 氧化分解过程中亚油酸组成成分及挥发性物质的变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 5-10. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.05.002.
- [24] PEGG R B, KERRIHARD A L, SHAHIDI F. Cooking of meat: warmed-over flavor[J]. Encyclopedia of Meat Sciences, 2014, 1: 410-415. DOI:10.1016/b978-0-12-384731-7.00131-8.
- [25] RHEE K S, ANDERSON L M, SAMS A R. Lipid oxidation potential of beef, chicken, and pork[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(1): 8-12. DOI:10.1111/j.1365-2621.1996.tb14714.x.
- [26] BAKAR J, RAHIMABADI E Z, CHE MAN Y B. Lipid characteristics in cooked, chill-reheated fillets of Indo-Pacific king mackerel (*Scomberomorus guttatus*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41: 2144-2150. DOI:10.1016/j.lwt.2007.12.004.
- [27] 赵力, 梁妮, 张绪超, 等. 不同热处理条件对亚麻酸中持久性自由基产生的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(06): 1207-1213. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2018082906.
- [28] ZHAO Li, LIANG Ni, LANG Di, et al. Heating methods generate different amounts of persistent free radicals from unsaturated fatty acids[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 16-22. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.03.444.
- [29] 阙建全. 食品化学[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 12.
- [30] PARLIAMENT T H, MORELLO M J, MCGORRIN R J. Thermally generated flavors. Maillard, microwave, and extrusion processes[M]. Washington: American Chemical Society Publication, 1994: 386-394. DOI:10.1021/bk-1994-0543.
- [31] 李可, 赵颖颖, 康壮丽, 等. NaCl对猪肉糜加工特性和蛋白质二级结构的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 77-81. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715013.
- [32] 栗俊广, 柳红莉, 何菲, 等. 冰温和冷鲜贮藏对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶性能和水状态的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 236-240. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201719038.
- [33] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116-123. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20171123-289.
- [34] 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. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00132-8.
- [35] ST ANGELO A J, VERCELLOTTI J R, LEGENDRE M G, et al. Chemical and instrumental analyses of warmed-over flavor in beef[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(5): 1163-1168. DOI:10.1111/j.1365-2621.1987.tb14034.x.
- [36] SONG Shiqing, TANG Qi, FAN Li, et al. Identification of pork flavour precursors from enzyme-treated lard using Maillard model system assessed by GC-MS and partial least squares regression[J]. Meat Science, 2017, 124: 15-24. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.10.009.
- [37] DOMÍNGUEZ R, GÓMEZ M, FONSECA S, et al. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat[J]. Meat Science, 2014, 97(2): 223-230. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.01.023.
- [38] 王瑞花, 姜万舟, 汪倩, 等. 烹制方法对猪肉脂质氧化和挥发性风味物质的作用研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 175-182; 312. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.1.028.
- [39] TORNBERG E, ANDERSSON A, GORANSSON A, et al. Water and fat distribution in pork in relation to sensory properties[M]// PUOLANNE E, DEMEYER D I, RUUSUNEN M, et al. Pork quality, genetic and metabolic factors. Wallingford: CAB International, 1993: 239-258.