

不同复热方式对鹿肉预制菜品质特性的影响

路昊东^{1,2}, 李鹏¹, 吴浩然^{1,3}, 卢忠魁^{1,2,3}, 钟宝^{1,2,3}, 刘超^{1,2,3*}, 李凤林^{1,2,3*}

(1. 吉林农业科技学院食品科学与营养工程学院, 吉林吉林 132101) (2. 吉林省酿造技术科技创新中心, 吉林吉林 132101) (3. 吉林农业科技学院“国家食物与营养教育示范基地”, 吉林吉林 132101)

摘要: 为了推动梅花鹿产业的加速发展, 并深入研究预制鹿肉食品在复热后的品质特性, 本研究采用质构分析、气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 技术, 以及电子鼻三种技术手段, 对复热后的品质进行了综合性的分析。空气炸锅复热处理后的鹿肉预制食品口感最佳, 质构参数为: 硬度 14.25 N, 弹性 4.82 mm, 咀嚼性 44.78 mJ。复热后经 GC-IMS 检测表明预制红烧鹿肉中含有 41 种主要挥发性成分, 基于正交偏最小二乘法判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA), 筛选出 12 种可作为区分不同复热样品中影响关键特征风味相对含量。电子鼻检测结果表明, 红烧鹿肉食品中含有苯醛、醇类物质、芳香族等 5 种主要香气, 与 GC-IMS 的检测特征香气一致。该研究有助于提升鹿肉预制菜的开发和推广, 以期为肉制品预制菜复热提供参考依据。

关键词: 梅花鹿肉; 品质特性; 复热; 气相色谱-离子迁移谱法; 电子鼻

文章编号: 1673-9078(2025)12-138-146

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1375

Effects of Different Reheating Methods on the Quality Characteristics of Deer Meat

LU Haodong^{1,2}, LI Peng¹, WU Haoran^{1,3}, LU Zhongkui^{1,2,3}, ZHONG Bao^{1,2,3}, LIU Chao^{1,2,3*}, LI Fenglin^{1,2,3*}

(1.School of Food Science and Nutritional Engineering, Jilin Institute of Agricultural Science and Technology, Jilin 132101, China)(2.Brewing Technology Innovation Center of Jilin Province, Jilin 132101, China)(3.Jilin Institute of Agricultural Science and Technology “National Food and Nutrition Education Demonstration Base”, Jilin 132101, China)

Abstract: To develop the deer meat industry, it is vital to elucidate the quality characteristics of prepared venison after reheating. Mass texture analysis, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), and three additional techniques, including an electronic nose, were used for a comprehensive analysis of reheated deer meat. The texture parameters of prepared venison after heat treatment in an air fryer were as follows: hardness 14.25 N, elasticity 4.82 mm, and chewability 44.78 mJ. The GC-IMS test revealed 41 main volatile components in the precast braised venison after reheating. Based on orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), 12 flavors were selected to distinguish the relative content of key characteristic flavors among different reheating samples. The electronic nose results revealed that braised venison contains five primary aromas, including benzaldehyde, alcohol, and aromatic compounds, consistent with the GC-IMS detection characteristics. The results of this study provide a scientific basis for the development and popularization of venison and serve as reference data for the reheating of prefabricated meat dishes.

Key words: Sika deer meat; quality characteristic; reheating; gas chromatography-ion mobility spectrometry; electronic nose

引文格式:

路昊东,李鹏,吴浩然,等.不同复热方式对鹿肉预制菜品质特性的影响[J].现代食品科技,2025,41(12):138-146.

LU Haodong, LI Peng, WU Haoran, et al. Effects of different reheating methods on the quality characteristics of deer meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 138-146.

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-12-17; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 吉林省科技厅重大科技专项 (20220304002YY); 国家级大学生科技创新项目 (202411439016)

作者简介: 路昊东 (2002-), 男, 本科生, 研究方向: 预调理食品加工及安全检测, E-mail: 15567526887m@sina.cn

通讯作者: 刘超 (1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 生物活性物质开发及食品加工技术方面的研究, E-mail: liuchaocarrol@163.com; 共

同通讯作者: 李凤林 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能性食品及食品营养健康方向研究, E-mail: 568169115@qq.com

梅花鹿肉,作为吉林省特有的物种之一,不仅因其独特的营养价值和鲜明的地域特色而备受瞩目,更为其市场拓展提供了坚实的基础,展现出一片广阔的市场前景。根据《中医百科全书》的详细记载,梅花鹿的药用部位多达28个,其功效显著,不仅具有丰富的营养价值,而且在药食同源的理念下,成为了一种珍贵的原料。在传统观念中,梅花鹿肉被誉为“高级野味”,它不仅富含营养,还具有特殊的保健功能,使其在美食界和健康领域都备受推崇^[1]。

在当今社会,随着民众对食品多样性、营养价值和健康饮食需求的持续增长,梅花鹿肉作为一种富含高营养价值的食材,逐渐赢得广大消费者的普遍认可。为满足民众及市场的需求,开发以梅花鹿肉为原材料的预制食品已成为一个新兴研究方向。通过研制多样化的梅花鹿肉预制食品,不仅能够丰富市场上的鹿肉食品种类,还能为消费者提供更多元化的选择,以符合不同消费群体的饮食偏好。这不仅具有便捷高效的特点,也能带来全新的味觉体验,从而进一步推动梅花鹿肉在食品市场中的普及与应用。然而,消费者未能采用正确的食用方法,可能会影响其口感。因此,需要给消费者提供合理复热方法,以期实现鹿肉制品健康功效最大化^[2]。目前家庭常用复热方法包括水煮、蒸汽、微波、空气炸锅、炒制等方法^[3]。蒸汽复热方法属于传统复热技术,但是处理过程中容易导致风味和营养物质流失;微波复热从食物内部升温,具有导热快速的特点^[4],适合现在人们快速的生活节奏^[5];空气炸锅复热方法的核心原理是通过高速循环的热空气代替油脂进行食物烹饪加热^[6],可快速脱除冷冻食物表面的水分和多余油脂,从而使非油炸食品表面变得金黄酥脆,口感不油腻,适合肉制品复热,符合现代人低油饮食要求^[7]。水煮和炒制属于传统中餐复热方式,适合家庭操作^[8],但前者增加产品含水量^[9],降低滋味和风味,后者易破坏原有风味物质,降低预制食品口感。本论文通过对比不同复热技术对预制鹿肉制品口感和风味的影响,确定最佳复热方式和条件,为梅花鹿肉预制食品工业化生产提供一定的理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

梅花鹿肉(鹿肉为本团队前期嫩化后成品,嫩化指标参数:游离氨基酸含量153.25 mg/100 g;肌原纤维小片化指数64.82),吉林省长春市双阳区洪元梅花鹿养殖场(社会信用代码:92220112MA143PXB7E)。

1.2 主要仪器与设备

Brookfield CT3 质构分析仪,合测实业有限公司; FlavourSpec[®] 气相色谱-离子迁移谱仪,德国 G.A.S 公司; cNose 电子鼻,上海保圣实业发展有限公司; C22-WH2202 电磁炉,广东美的生活电器制造公司; ML-L213B 型微波炉,广东美的厨房电器制造有限公司; KKZG-5006-M 空气炸锅,深圳市康家佳品智能电器科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 鹿肉预制食品的制作

将梅花鹿肉修整,去脂,去筋膜,随后对鹿肉采用超声波-酶法嫩化处理,清水泡1 h,用葱姜料酒煮,清洗备用。预热锅,加植物油和冰糖炒至枣红,放入鹿肉和黄豆酱上色,加香辛料煮沸10 min。加啤酒、清水、调味料,煮30 min后加入配菜,大火煮沸10 min。冷却后抽气包装。巴氏杀菌。速冻保藏:4℃冰箱贮藏。

1.3.2 复热方式筛选

4℃冷藏后红烧鹿肉预制食品(每包100 g)分别采用微波复热、空气炸锅复热、隔水蒸汽复热三种复热方法处理后,对其质构和挥发性成分进行分析。

1.3.2.1 复热条件设定

微波复热:复热额定功率600 W,处理时间15 s。

空气炸锅复热:空气炸锅预热温度120℃,复热处理温度160℃,时间5 min。

隔水蒸汽复热:隔水大火蒸制15 min。

1.3.2.2 鹿肉质构测定

参考李加双等^[10]采用的质构测定方法。样品切成15 mm×15 mm×15 mm方块,选择探头TA-10,测试速度0.5 mm/s;测后速度:0.5 mm/s;下压得体积分数:30%;触发力:5 g,循环2次,测定复热后梅花鹿肉预制食品的硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性、内聚性五项质构指标。

1.3.2.3 鹿肉挥发性风味物质测定

GC-IMS测定:参考Zou等^[11]的方法并适当修改,将2 g复热后的红烧鹿肉置于20 mL的顶空瓶中,孵育时间10 min,温度为60℃后进样。利用检测仪器自带的VOCal软件内置数据库,对样品中检测出的化合物峰进行比对和定性分析,根据峰体积^[12,13]计算出各挥发性化合物的相对含量。

电子鼻测定:将20 g复热后的红烧鹿肉置于50 mL的顶空瓶中,设定采样参数:清洗时间为120 s,采样时间为60 s,流量为1.4 L/min,将进样针准确插入进样瓶中开始测试操作^[14]。

1.4 数据处理

采用 Origin 2022 软件分析实验数据。IBM SPSS 26 分析质构参数；GC-IMS 结合 NIST 数据库和 IMS 系统分析挥发性成分。SIMCA 进行正交 - 偏最小二乘法判别 (OPLS-DA)，绘制置换检验图与分析变量重要性因子 (Variable Important for the Projection, VIP)^[15]，识别复热方式下红烧鹿肉预制菜挥发性成分差异关键变量 (VIP>1)。

2 结果与讨论

2.1 预制鹿肉食品复热工艺参数

2.1.1 复热后鹿肉质构特性分析

复热后红烧梅花鹿肉质构特性见图 1。图 1 表明预制红烧梅花鹿肉经三种不同复热处理，其质构特性有一定差异。空气炸锅复热的梅花鹿肉在硬度、弹性、咀嚼性、胶着性 4 种质构参数对比微波复热和隔水蒸汽复热，均呈现出优势，内聚性方面的三者差异相对最小。复热后样品在经历第 1 次压缩后对第 2 次压缩的相对抵抗能力，其与弹性之间呈正相关趋势，这种差异主要归因于热处理过程中肌肉纤维的减少以及复热过程中水分的大量损失，这些变化对红烧鹿肉的弹性产生显著影响。然而，弹性之变化源于胶原蛋白受热后发生的变性效应，空气炸锅复热对比未复热组弹性提升 20.06%。Joshy 等^[16]使用空气炸锅复热食物，测定质构参数，也得到相似结论。三种不同的复热方式中，空气炸锅在保持食品质构特性方面表现相对优越。

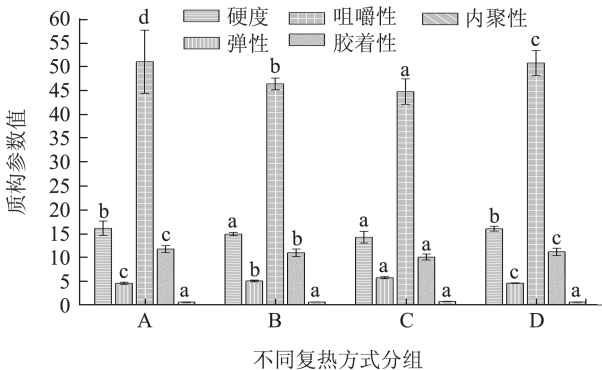


图 1 不同复热方式处理质构参数

Fig.1 Texture parameters of different reheating methods

注：A 为未处理组，B 为微波复热，C 为空气炸锅复热，D 为隔水蒸汽复热。图中柱上不同字母表示同一指标下不同字母表示差异显著 (P<0.05)。

2.1.2 复热后鹿肉预制食品挥发性物质GC-IMS检测

2.1.2.1 GC-IMS谱图分析

如图 2 所示，对离子迁移时间和离子峰位置进行

归一化，进一步得到二维图谱^[17]。经过谱图的详细对比，对 4 组共 12 个样品进行全面的比较分析。在此谱图中，X 轴代表迁移时间 (m/s)，Y 轴代表保留时间 (m/s)^[18]。针对于红烧鹿肉预制菜的主要挥发性成分，三种复热方式的肉制品风味物质分布情况主要集中在相对迁移时间为 1.0~1.75 ms、保留时间为 200~1 400 s 的特定区域内。在微波复热和空气炸锅复热方式下，挥发性化合物的种类呈现丰富多样的特点，这些化合物共同构成红烧鹿肉预制菜复热后独特的挥发性风味特征。

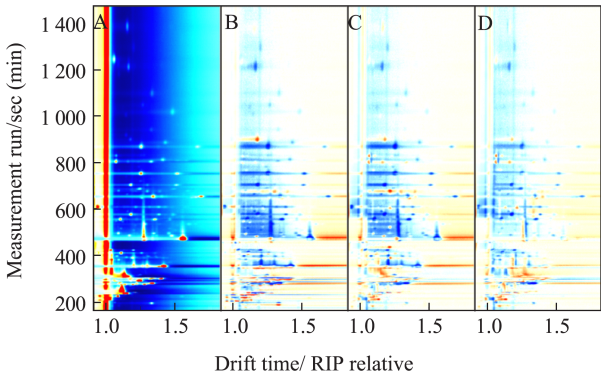


图 2 不同复热方式处理 GC-IMS 二维图

Fig.2 Two dimensional GC-IMS diagram processed by different reheating methods

注：A 为未处理组，B 为微波复热，C 为空气炸锅复热，D 为隔水蒸汽复热。

2.1.2.2 复热后鹿肉中挥发性物质的定性、定量分析

通过对比迁移时间与保留时间，对挥发性成分的特征风味物质进行定性分析。基于表 1 中数据，不同复热处理下的红烧鹿肉预制菜中共检测出 41 种挥发性物质，其中醛类 16 种，醇类 7 种，酯类 5 种，酮类 4 种，酸类 2 种，吡嗪类 1 种，以及其他类化合物 5 种。这些物质各自代表不同的呈香风味。

在三种复热方法中，检测到的醛类化合物相对含量为 39.02%，占比最高。这些化合物主要源于脂质氧化过程。醛类物质是肉制品挥发性化合物的关键来源^[19]。对比分析显示，异丁醛和 2-甲基丁醛在空气炸锅中的相对含量明显高于其他两种复热方法；反式-2-己烯醛 D、M 和反式-2-庚烯醛 D 在三种复热方法后的相对含量则相近^[20]。

检测到的醇类化合物相对含量为 17.07%，位居第二的占比，它们对提升肉制品的香气层次具有潜在的积极作用，主要源自于辅料成分。对比分析显示，乙醇在隔水蒸汽复热中的相对含量保留较低，而其余两种复热方式保留度较好；正戊醇 D 在微波复热中的相对含量最低；异戊醇、正丙醇在空气炸锅复热中的相对含量最高。

表 1 不同复热方式的挥发性成分分析及香味辨别
Table 1 Volatile component analysis and aroma identification using different reheating methods

序号	保留 时间/s	物质名称	CAS 号	分子式	分子 质量	保留 指数	迁移 时间/s	相对含量/%			香味物质	
								未处理组	微波复热	空气炸锅		隔水蒸煮
1	701.97	反式-2-己烯醛 D	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	98.1	1 227.7	1.518 28	0.627 ^a	0.136 ^b	0.178 ^b	0.135 ^b	青草香气及刺激味
2	701.97	反式-2-己烯醛 M	C6728263	C ₆ H ₁₀ O	98.1	1 227.7	1.184 75	1.258 ^a	0.441 ^b	0.419 ^b	0.508 ^b	
3	863.22	反式-2-庚烯醛 D	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	112.2	1 327.5	1.670 22	1.249 ^a	0.652 ^b	0.708 ^b	0.652 ^b	脂肪味、果味
4	868.77	反式-2-庚烯醛 M	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	112.2	1 330.5	1.257 72	3.282 ^a	0.892 ^c	1.382 ^b	1.233 ^b	
5	553.64	反式-2-戊烯醛 D	C1576870	C ₅ H ₈ O	84.1	1143	1.358 71	1.284 ^a	0.356 ^b	0.386 ^b	0.436 ^b	刺鼻的气味
6	553.64	反式-2-戊烯醛 M	C1576870	C ₅ H ₈ O	84.1	1143	1.105 57	1.425 ^a	0.833 ^b	0.660 ^c	0.824 ^b	
7	606.05	月桂烯	C123353	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1 169.9	1.218 34	0.576 ^{ab}	0.394 ^b	0.736 ^a	0.735 ^a	胡椒辛辣气味、辛辣气味
8	572.43	正丁醇	C71363	C ₄ H ₁₀ O	74.1	1 152.9	1.183 55	1.478 ^a	0.715 ^b	0.641 ^{bc}	0.550 ^c	强烈的酒精味
9	194.42	1,4-二氧六环	C123911	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	739.1	1.333 89	0.858 ^a	1.176 ^b	0.901 ^b	0.757 ^b	果香味、酒味
10	748.44	正戊醇 D	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	1 259.2	1.520 68	1.584 ^a	0.447 ^c	0.478 ^c	0.643 ^b	发酵香气
11	750.42	正戊醇 M	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	1 260.5	1.255 54	2.033 ^a	0.996 ^b	0.979 ^b	1.089 ^b	
12	409.27	正丙醇	C71238	C ₃ H ₈ O	60.1	1 044.5	1.113 97	1.626 ^b	1.686 ^b	1.850 ^a	0.996 ^c	酒精香气、发酵香气、辛辣味
13	291.51	2-丁酮	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	910.2	1.248 35	6.791 ^{bc}	6.416 ^c	7.817 ^a	7.125 ^b	果香味
14	357.10	2-乙基-5-甲基吡嗪	C13360640	C ₇ H ₁₀ N ₂	122.2	995.9	1.200 88	1.056 ^c	1.619 ^a	1.532 ^a	1.384 ^b	豆类气味、水果气味、甜香气味
15	646.59	2-庚酮	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	1 189.2	1.263 93	0.255 ^b	0.228 ^c	0.297 ^a	0.211 ^c	草本植物香气，辛辣味、肉桂气味
16	223.93	异丁醛	C78842	C ₄ H ₈ O	72.1	798.8	1.092 27	2.194 ^b	2.305 ^b	2.889 ^a	2.866 ^a	湿的谷物或稻草味道
17	1 382.93	2-甲基丙酸	C79312	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	1 547.2	1.155 31	2.254 ^a	2.135 ^{ab}	2.212 ^{ab}	1.931 ^b	酸奶酪气味
18	277.59	2-甲基丙烯醛	C78853	C ₄ H ₆ O	70.1	889.5	1.221 98	0.672 ^b	0.681 ^b	0.786 ^a	0.711 ^b	发酵烘焙味
19	299.51	2-甲基丁醛	C96173	C ₅ H ₁₀ O	86.1	921.7	1.405 5	1.879 ^b	2.399 ^a	2.571 ^a	1.344 ^c	
20	801.24	2-甲基吡嗪	C109080	C ₅ H ₆ N ₂	94.1	1 292.7	1.072 69	1.952 ^a	1.680 ^b	2.071 ^a	1.975 ^a	苹果气和樟脑气味
21	802.50	2-辛酮	C111137	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1 293.4	1.334 88	0.622 ^a	0.389 ^b	0.656 ^a	0.595 ^a	
22	684.17	异戊醇	C123513	C ₅ H ₁₂ O	88.1	1 215.1	1.248 34	0.866 ^b	0.863 ^b	1.056 ^a	0.468 ^c	苹果白兰地香气和辛辣味

续表1

序号	保留 时间/s	物质名称	CAS 号	分子式	分子 质量	保留 指数	迁移 时间/s	相对含量/%			香味物质	
								未处理组	微波复热	空气炸锅		
23	896.77	甲基庚烯酮	C1110930	C ₈ H ₁₄ O	126.2	1345.3	1.178 75	0.398 ^b	0.884 ^a	0.728 ^a	0.429 ^b	胡椒刺激气味、坚果气味、榛子香气
24	1 240.63	醋酸	C64197	C ₂ H ₄ O ₂	60.1	1 496.6	1.059 22	4.510 ^{ab}	4.242 ^b	4.688 ^{ab}	4.867 ^a	醋的气味
25	279.58	乙酸乙酯	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	892.6	1.338 9	1.825 ^a	0.917 ^b	0.723 ^c	0.291 ^d	果香气味、清香型白酒香气
26	276.27	正丁醛	C123728	C ₄ H ₈ O	72.1	887.5	1.285 27	0.736 ^a	0.351 ^b	0.480 ^b	0.700 ^a	可可甜香气, 果味
27	1 213.33	3-羧基丁酸乙酯	C5405414	C ₆ H ₁₂ O ₃	132.2	1 486.2	1.169 49	1.252 ^a	0.502 ^b	0.657 ^b	0.546 ^b	果香、葡萄味
28	387.52	丁酸乙酯	C105544	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.2	1 025.1	1.194 35	1.396 ^{ab}	1.370 ^b	1.562 ^a	1.491 ^{ab}	菠萝芳香气味
29	252.42	二烯丙基硫醚	C592881	C ₆ H ₁₀ S	114.2	849.4	1.120 89	18.978 ^b	19.022 ^b	18.895 ^b	19.519 ^a	大蒜、洋葱刺激香气
30	310.39	乙醇	C64175	C ₂ H ₆ O	46.1	936.7	1.140 36	12.053 ^{ab}	12.226 ^a	11.816 ^b	8.301 ^c	酒精味
31	650.55	庚醛 D	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	1191	1.698 24	1.935 ^a	0.693 ^b	0.680 ^b	0.818 ^b	油香味、青草香气
32	649.56	庚醛 M	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	1 190.5	1.344 32	2.118 ^a	1.508 ^b	1.445 ^b	1.516 ^b	
33	469.59	正己醛	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	1 093.5	1.563 87	12.058 ^a	7.471 ^c	7.281 ^c	9.517 ^b	新鲜脂肪味、果香味
34	1 012.55	己基丁酸酯	C2639636	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	172.3	1 401.9	1.493 98	1.209 ^a	0.781 ^b	0.854 ^b	0.835 ^b	湿的谷物或稻草味道
35	298.96	丙酸甲酯	C554121	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	920.9	1.424 7	2.570 ^c	2.498 ^c	2.846 ^b	3.328 ^a	果香味、酒味
36	351.92	正戊醛	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	989.8	1.420 78	5.635 ^a	3.980 ^c	3.636 ^d	5.091 ^b	发酵面包的香气、水果气味、坚果气味
37	810.78	辛醛	C124130	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1 298.3	1.149 9	0.747 ^a	0.336 ^b	0.381 ^b	0.383 ^b	带果香气味、茉莉香气、甜橙香气
38	234.53	丙醛	C123386	C ₃ H ₆ O	58.1	818.3	1.277 13	6.788 ^a	6.000 ^{bc}	5.777 ^c	6.245 ^b	丁香、花香气味、风信子香味
39	483.43	四氢芳樟醇	C78693	C ₁₀ H ₂₂ O	158.3	1 102.7	1.357 51	2.349 ^a	1.668 ^b	1.589 ^b	2.325 ^a	丁香香气、油性味、木质香气,
40	494.31	十一烷 D	C1120214	C ₁₁ H ₂₄	156.3	1 109.3	1.093 57	0.403 ^{ab}	0.299 ^c	0.362 ^b	0.434 ^a	玫瑰花香、柑橘香气、菠萝 样的果香味
41	495.30	十一烷 M	C1120214	C ₁₁ H ₂₄	156.3	1 109.9	1.424 7	0.732 ^b	0.977 ^a	1.007 ^a	0.845 ^b	脂肪味、果味

注: 同一行中不同小写字母表示显著性差异, $P<0.05$ 。

检测到的酯类化合物相对含量为 12.20%，酯类使源自游离脂肪酸与醇的酯化反应^[21]。乙酸乙酯散发出清香型白酒和酯类香气；对比分析显示，丁酸乙酯在空气炸锅复热中的相对含量最高；丙酸甲酯在隔水蒸汽复热中的相对含量最高；而 3-羟基丁酸乙酯和己基丁酸酯在三种复热方法中的相对含量差异并不显著。

检测出的酮类化合物含量为 9.77%，这些化合物普遍被认为在肉制品的挥发性风味中发挥着协调作用^[22]。2-丁酮主要源自 β -酮酸的脱羧反应、 β -氧化过程，并且被认为是脂肪风味形成的关键前体物质。通过对比分析三种不同的复热方法，发现空气炸锅复热对酮类化合物的保留效果尤为突出，特别是 2-丁酮的含量显著高于微波复热和隔水蒸汽复热方法。

检测到酸类、吡嗪及其他类化合物的相对含量为 21.95%。对比分析后发现，使用空气炸锅复热方式在酸类和吡嗪化合物的含量上显著高于其他两种复热方法。

2.1.2.3 复热后鹿肉中挥发性指纹图谱分析

复热后红烧鹿肉挥发性成分相对含量变化结果如图 3 所示。经过对各实验组与未处理组的对比分析，观察到空气炸锅复热方式下的鹿肉风味信号峰值

浓度相较于其他两种方式更为显著，且其香气表现也更为醇厚浓郁。在指纹图谱中单个样品区域内红色越深代表离子流信号强度越大，面积越大代表浓度越高^[23]。如图 3 所示，三种不同的复热方法对样品产生不同的影响^[24,25]，通过信号峰强度的差异，可以将样品分为三个区域进行深入分析。A 区域代表所有样品中 VOCs 的相似区；B 区域则显示三种复热方法处理后的样品与未复热样品在 VOCs 上的显著差异，其中复热组的化合物相对浓度明显低于未复热组；C 区域则显示三种复热方法处理后的样品在 VOCs 相对浓度上与未复热组的区别，其中隔水蒸汽复热组的乙酸乙酯含量显著低于其他复热方法，而微波复热组的 2-辛酮含量则与其他复热方法有显著差异。指纹图谱分析表明，空气炸锅复热方法对红烧鹿肉风味的影响较小，其 VOCs 浓度变化与未复热组的差异相对较小，而其他两种复热方法则导致较大幅度的化合物浓度下降。特别是隔水蒸汽复热，不仅乙酸乙酯的浓度降低，甲基庚烯酮和 B 区域中的异戊醇浓度也有所下降，而空气炸锅复热处理后鹿肉制品中乙酸乙酯、甲基庚烯酮和异戊醇浓度较高，证明其复热后预制鹿肉食品风味物质保存较好，产品品质高。

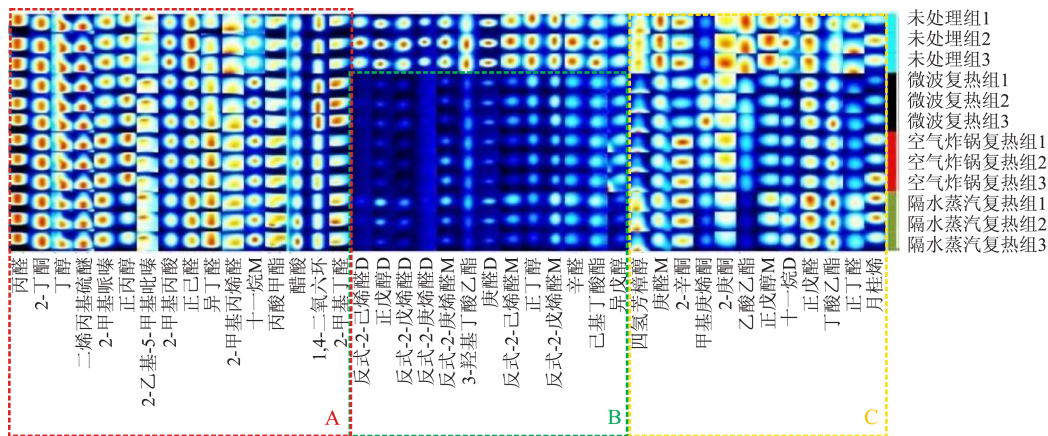
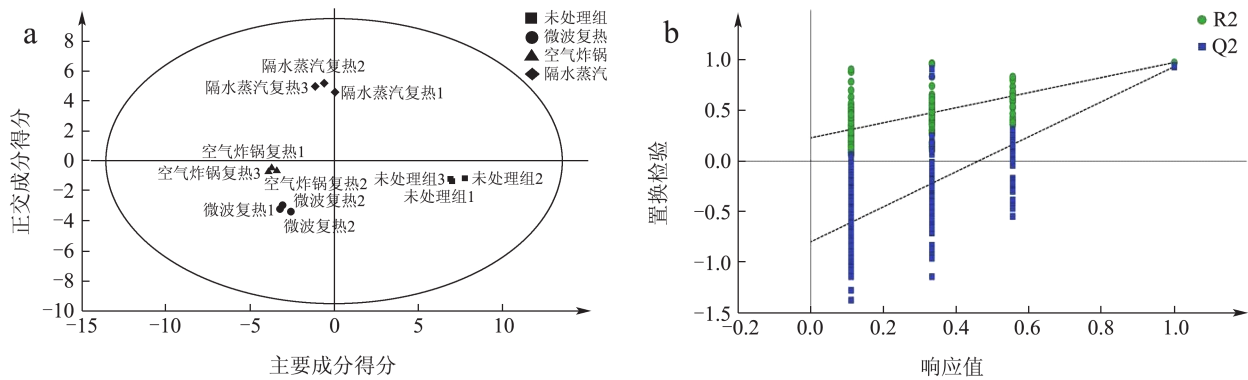


图 3 不同复热方式处理 Gallery Plot 图

Fig.3 Gallery Plot of different reheating modes



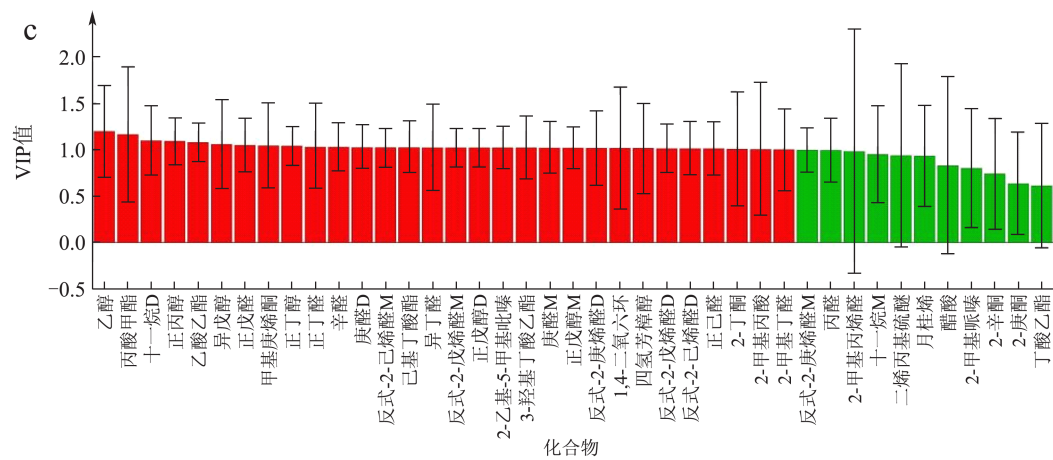


图 4 不同复热方式处理的 OPLS-DA 图、置换检验图和 VIP 图

Fig.4 OPLS-DA diagram, displacement test and VIP diagram of different reheating methods

2.1.2.4 复热后鹿肉中挥发性成分的OPLS-DA分析

OPLS-DA 模型是一种为了筛选出对分类具有显著贡献的方法^[26]。通过构建 OPLS-DA 分析模型，对三种不同的复热方式进行 OPLS-DA 分析，探讨其挥发性成分的特性差异。如图 4 中的图 a 所示，不同的复热方式对产品的挥发性成分产生显著影响。在模型中，隔水蒸汽复热方式的组分主要分布于第 1 象限，而微波复热及空气炸锅复热则主要集中于第 3 象限，未处理组（对照组）的组分则分布于第 4 象限。这些分组显著形成 4 个处理群，即未处理组（对照组）、微波复热组、空气炸锅复热组和隔水蒸汽复热组。微波复热和空气炸锅复热在处理后的挥发性成分上虽然位于同一象限。空气炸锅相较于其他两种复热方法优势显著。而隔水蒸汽复热在加热过程中，由于水将香味物质稀释，导致挥发性成分物质减少，其中特别是红烧鹿肉预制菜中的醇类、醛类和酯类物质的显著降低，这与 Luo 等^[23]的研究结论相同。三种不同复热方式的风味存在差异，其中自变量拟合模型（拟合数） $R^2X=0.83$ ， $R^2Y=0.737$ ，模型预测能力参数 $Q^2=0.90$ ，以上参数值超过 0.5^[27]，即该分析模型对三种不同复热处理红烧鹿肉预制菜的预测能力较强，能更好地解释其中不同处理组中不同成分差异。

OPLS-DA 模型建立出现拟合现象，为了防止过拟合现象发生，再次操作当中运用 200 次的置换检验说明模型的拟合性，如图 4b 所示， $R^2=0.22$ ， $Q^2=-0.75$ ， Q^2 回归线呈现出显著的线性正相关趋势。结果表明所建立的模型并未出现过拟合现象，从而验证了模型的有效性^[28]，该模型预测结果可用于鉴别红烧鹿肉预制菜在不同复热方式下的挥发性风味物质。

如图 4c 所示，OPLS-DA 模型中 VIP 变量投影重要性因子，常用作 OPLS-DA 模型关键变量分析，VIP

值越大，说明贡献率越大。通过 OPLS-DA 模型筛选出 30 种 VIP 值 >1 的挥发性化合物（表 2）。因此，OPLS-DA 能够有效地判别挥发性特征风味和各组分的差异。如表 2 所示，乙醇、丙酸甲酯、十一烷 D、正丙醇、乙酸乙酯，作为贡献率前五的重要因子，主要以酒味、果香味、发酵香气及辛辣味香气为主要贡献因素，鉴于在加工及烹调过程中，啤酒与香辛料在预制菜中发挥着至关重要的作用。啤酒不仅能够去除腥味，同时一定程度上促进嫩化效果，使最终产品口感更佳；而香辛料则在一定程度上提升预制菜的味道与风味。

2.2.2 复热后鹿肉预制食品挥发性物质电子鼻检测

电子鼻检测中，不同的传感器对于挥发性成分的检测阈值呈现差异。各类传感器对于挥发性成分的检测限均有所不同，电子鼻传感器针对三种不同的红烧鹿肉预制菜复热方式所产生的响应数据的雷达图分析。如图 5a 所示，该图为电子鼻传感器在感应三种不同红烧鹿肉预制菜复热方式后所绘制的雷达通过该雷达图，可观察到电子鼻在三种复热过程中对不同气味特征的差异感知。在这 S2、S4、S5、S6、S8、S9 这 6 个传感器中，三种复热样品呈现出相对较高的差异显著，主要包含：含氮氧类化合物、氢化物类、烷烃芳香类物质、甲基类化合物、苯醛、醇类物质、芳香族、硫化氢等，这些物质的浓度差异较大。相对而言，S1、S3、S7、S10 这 4 个传感器所检测到的挥发性成分差异信号值较小，涉及的挥发性成分包括芳香族、烃类化合物、氨类、芳香族物质、硫化物和萜烯类、烷烃类物质等，这些物质的浓度差异较小。如图 5b 所示，预制鹿肉隔水蒸汽时，与水分接触面较大，挥发性风味物质损失较多；微波复热过程时，鹿肉中小分子物质吸收微波，分子间碰撞剧烈产生大量热能^[30]，导致

挥发性气味损失显著；空气炸锅较其他两种复热方法，挥发性风味物质损失较小。综上分析，预制食品复热处理均会对风味物质产生一定影响，但是空气炸锅以其独特的设计和复热原理，较其他两种复热方法能在一定程度保留风味物质，风味损失较小，复热后品质较高。因此，红烧鹿肉预制食品适合采用空气炸锅方式复热。

表 2 不同复热方式特征风味物质VIP值
Table 2 VIP values of characteristic flavor substances in different reheating methods

序号	特征风味物质名称	VIP 值
1	乙醇	1.200 93
2	丙酸甲酯	1.168 46
3	十一烷 D	1.100 59
4	正丙醇	1.094 37
5	乙酸乙酯	1.081 6
6	异戊醇	1.062 01
7	正戊醛	1.051 72
8	甲基庚烯酮	1.048 03
9	正丁醇	1.045 11
10	正丁醛	1.032 61
11	辛醛	1.032 31
12	庚醛 D	1.028 34
13	反式-2-己烯醛 M	1.027 48
14	己基丁酸酯	1.026 33
15	异丁醛	1.025 71
16	反式-2-戊烯醛 M	1.025 67
17	正戊醇 D	1.024 7
18	2-乙基-5-甲基吡嗪	1.023 7
19	3-羟基丁酸乙酯	1.023 46
20	庚醛 M	1.023 16
21	正戊醇 M	1.021 76
22	反式-2-庚烯醛 D	1.019 89
23	1,4-二氧六环	1.019 24
24	四氢芳樟醇	1.018 57
25	反式-2-戊烯醛 D	1.014 34
26	反式-2-己烯醛 D	1.014 01
27	正己醛	1.013 65
28	2-丁酮	1.009 92
29	2-甲基丙酸	1.008 12
30	2-甲基丁醛	1.003 71

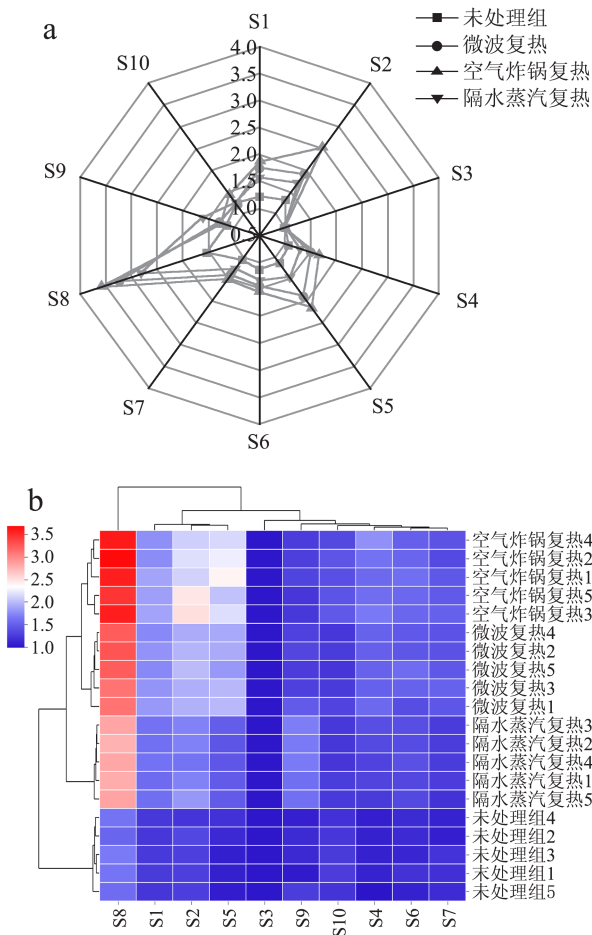


图 5 不同复热方式的电子鼻雷达图和差异香气分类多聚图
Fig.5 Radar diagram of electronic nose and multimergation diagram of differential aroma classification of different reheating methods

3 结论

本研究以梅花鹿肉为主要原料，针对红烧鹿肉预制食品的开发及其复热后口感与风味的研究。通过质构仪、GC-IMS 及电子鼻检测技术，对 3 种不同复热方式处理后的梅花鹿肉预制食品进行检测质构和风味特性检测，确定适合鹿肉预制食品的复热方法，为鹿肉制品开发提供了理论基础。经空气炸锅复热处理后的鹿肉预制食品质地软嫩，硬度适中，咀嚼感良好，且展现出良好的弹性。挥发性风味方面，通过 GC-IMS 与电子鼻结合技术的检测，3 组样品在挥发性风味上有显著差异。3 组样品中的挥发性风味存在显著差异，微波复热与空气炸锅组在香气表现上更为接近，但空气炸锅复热在风味物质浓度方面优于微波复热。而隔水蒸汽复热中，由于水分对香气的稀释作用，使综合品质相对较低。通过对 GC-IMS 数据结果进行 OPLS-DA 分析、置换检验及 VIP 图分析，筛选出的挥发性化合物与电子鼻多聚热图及雷达图所响

应的结果相同, 且与 GC-IMS 检测出的关键差异性特征化合物相符, 进一步证实不同复热方式对梅花鹿肉预制菜的挥发性化合物存在差异性。空气炸锅在复热过程中能够较好地保留其原有香气, 且复热时间较短, 使鹿肉香气柔和, 口感更佳; 隔水蒸汽复热在香气保留方面较弱, 口感较差; 微波复热处理效果则介于上述两种方法之间。为梅花鹿肉预制食品的开发及食用前的复热环节提供参考依据, 有助于推动未来梅花鹿肉加工产业的发展。

参考文献

- [1] 彭章蓉, 毕融冰, 任雨贺, 等. 不同年龄梅花鹿肉品质感官评价与食用品质分析[J]. 畜牧与兽医, 2024, 56(7): 28-35.
- [2] KIM T, HWANG K, KIM Y, et al. Effects of pre-cooking methods on quality characteristics of reheated marinated pork loin [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2018, 38(5): 970-980
- [3] 黎梓杭, 黄凯雯, 江伟烽, 等. 冷冻家禽类预制菜加工及复热技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 213-223.
- [4] 吴振华. 无麸质玉米发糕发酵及老化调控机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [5] WANG S W, CHEN H T, SUN J, et al. Effects of cooking methods on aroma formation in pork: A comprehensive review [J]. Food Chem X, 2023, 20: 100884.
- [6] CHEN X X, LIAO Y X, LIN B W, et al. The concentration of benzo[a]pyrene in food cooked by air fryer and oven: A comparison Study [J]. Toxics, 2024, 12(6): 416.
- [7] NAVRUZ-VARH S, MORTAS H. Acrylamide formation in air-fried versus deep and oven-fried potatoes [J]. Front Nutr, 2024, 10: 1297069.
- [8] 彭斯. 清以来中国菜肴烹饪方法地理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- [9] COLASANTO A, TRAVAGLI F, BORDIGA M, et al. Cooking of artemide black rice: impact on proximate composition and phenolic compounds [J]. Foods, 2021, 10(4): 824.
- [10] 李加双, 张良, 王晶, 等. 热处理方式对豆腐品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 142-148.
- [11] ZOU Y H, KANG D C, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36.
- [12] 魏登, 韩冰, 魏超强, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱联用技术对不同发酵黏豆包面坯气味特征的判别分析[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 336-345.
- [13] TIAN H, WEN H, YANG X, et al. Exploring the effects of *anthocyanins* on volatile organic metabolites of *Alzheimer's* disease model mice based on HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. Microchem J, 2021, 162: 105848.
- [14] SUN X X, YU Y M, SALEH A S M, et al. Comprehensive characterisation of taste and aroma profiles of Daokou red-cooked chicken by GC-IMS and GC-MS combined with chemometrics [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58(8): 4288-4300.
- [15] WANG Z L, MI S, WANG X H, et al. Characterization and discrimination of fermented sweet melon juice by different microbial strains via GC-IMS-based volatile profiling and chemometrics [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, (4): 1241-1247.
- [16] JOSHY C G, RATHEESH G, NINAN G, et al. Optimizing air-frying process conditions for the development of healthy fish snack using response surface methodology under correlated observations [J]. Food Sci Technol, 2020, 57(7): 2651-2658.
- [17] ZHANG K H, ZANG M W, ZHANG Z Q, et al. Effects of water bath reheating time on volatile compounds in cooked minced pork [J]. Food Science, 2019, 40(2): 186-191.
- [18] LI M, YANG R, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer [J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39.
- [19] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: a review [J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415-424.
- [20] 胡海敏, 田佳乐, 孙思霖, 等. 固相微萃取-气相色谱-质谱结合电子鼻技术分析发酵乳中挥发性风味物质[J]. 微生物学通报, 2023, 50(1): 273-288.
- [21] ZHANG L, BADAR I H, CHEN Q, et al. Changes in flavor, heterocyclic aromatic amines, and quality characteristics of roasted chicken drumsticks at different processing stages [J]. Food Control, 2022, 139: 109104
- [22] HUANG Q, DONG K, WANG Q, et al. Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131103
- [23] LUO X Y, XIAOS T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.
- [24] GU S, ZHANG J, WANG J, et al. Recent development of HS-GC-IMS technology in rapid and non-destructive detection of quality and contamination in agri-food products [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2021, 144: 116435.
- [25] LI J Y, HAN D, HUANG F, et al. Effect of reheating methods on eating quality, oxidation and flavor characteristics of braised beef with potatoes dish [J]. Int J Gas Food Sci, 2023, 31: 100659.
- [26] LIU Y N, SU L Y, WEI X X, et al. Effect of eating quality and the volatile flavor in roast whole lamb by different reheating ways [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(6): 123-127.
- [27] YUN J, CUI C J, ZHANG S H, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
- [28] SONG X, WANG G, ZHU L, et al. Comparison of two cooked vegetable aroma compounds, dimethyldisulfide and methional, in Chinese Baijiu by sensory-guided approach and chemometrics [J]. LWT, 2021, 146: 111427.
- [29] 马娜娜, 旦正杰, 韩丽娟, 等. 基于GC-IMS分析不同品种藏羊羔肉的风味特征成分[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 145-151.