

# 复热方式对预制胡萝卜玉米排骨汤品质的影响

陆佳欣<sup>1</sup>, 任唯兆<sup>1</sup>, 任婧楠<sup>1</sup>, 董会龙<sup>2</sup>, 范刚<sup>1,\*</sup>, 韦建英<sup>2</sup>, 王卓<sup>2</sup>, 黄圣伟<sup>2</sup>, 吴取芳<sup>2</sup>, 张本鹏<sup>2</sup>, 邱小筱<sup>2</sup>

(1.华中农业大学食品科学技术学院, 环境食品学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2.贵港新食记食品有限公司, 广西 贵港 537110)

**摘要:**为探究不同复热方式(微波、蒸汽、水浴、明火)对速冻预制胡萝卜玉米排骨汤品质的影响,测定了加热特性、质构、汤汁色泽、滋味物质、挥发性成分、感官品质等指标。研究显示,微波复热效率最高且受热均匀;质构方面,微波、水浴复热对排骨硬度、黏性、肉质紧实度影响较小,而微波、明火复热使玉米与胡萝卜的硬度与黏性保持更佳( $P<0.05$ );色泽方面,蒸汽复热组汤汁金黄透亮,而明火复热组汤汁因油脂乳化而变得浓白;滋味方面,蒸汽复热组样品中鲜味氨基酸能更好地与呈味核苷酸结合,呈现最强的鲜味(等效鲜味浓度为178.4 g/100 g),其次为微波、明火、水浴复热组(等效鲜味浓度分别为109.9、100.2、56.5 g/100 g);风味方面,样品中共鉴定出61种挥发性成分,微波、蒸汽、明火复热组样品分别为29、33、32种,以芳香类物质为主,水浴复热组为31种,以醇类为主,且部分挥发性成分含量差异显著( $P<0.05$ )。结合感官评价,微波与蒸汽复热样品在色泽与滋味上更受消费者青睐( $P<0.05$ ),总分最高。综合各项品质指标可得,蒸汽、微波复热是胡萝卜玉米排骨汤理想的复热方式。

**关键词:**预制食品;胡萝卜玉米排骨汤;速冻;复热方式;风味;品质

## Effects of Reheating Methods on the Quality of Prepared Pork Rib Soup with Carrot and Corn

LU Jiaxin<sup>1</sup>, REN Weizhao<sup>1</sup>, REN Jingnan<sup>1</sup>, DONG Huilong<sup>2</sup>, FAN Gang<sup>1,\*</sup>, WEI Jianying<sup>2</sup>, WANG Zhuo<sup>2</sup>,  
HUANG Shengwei<sup>2</sup>, WU Qufang<sup>2</sup>, ZHANG Benpeng<sup>2</sup>, QIU Xiaoxiao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Environment Correlative Dietology, Ministry of Education, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Guigang Xinshiji Food Co. Ltd., Guigang 537110, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different reheating methods (microwave, steam, water bath, and open flame) on the quality of quick-frozen prepared pork rib soup with carrot and corn, heating characteristics, texture, soup color, taste substances, volatile components, and sensory quality were determined. The results demonstrated that microwave reheating was the most efficient, providing uniform heating. In terms of texture, microwave and water bath reheating had less effects on the hardness, stickiness, and meat firmness of pork ribs, while microwave and open-flame reheating maintained the hardness and stickiness of corn and carrot significantly better ( $P < 0.05$ ). The steam reheated soup was golden and clear in color, whereas the open-flame reheat soup became thick and milky white due to oil emulsification. The steam reheated soup exhibited a good combination of umami amino acids and nucleotides, presenting the strongest umami taste with an equivalent umami concentration (EUC) of 178.4 g/100 g, followed by those reheated by microwave, open flame, and water bath (EUC of 109.9, 100.2, and 56.5 g/100 g, respectively). A total of 61 volatile components were identified across all samples. In total, 29, 33 and 32 volatile components were found in the microwave, steam and open-flame reheated samples, respectively, with aromatic substances being the major ones; 31 volatile components in the water bath reheated sample, alcohols being the major ones. There were significant differences in the contents of some volatile components ( $P < 0.05$ ). Sensory evaluation showed that the microwave and steam reheated soups were more favored by consumers in

收稿日期: 2024-07-13

基金项目: 影子科技-华中农大健康食品产业研究院课题(IRIFH202219)

第一作者简介: 陆佳欣(2000—)(ORCID: 0009-0002-8740-283X), 女, 博士研究生, 研究方向为果蔬加工技术理论。

E-mail: ljx0814@webmail.hzau.edu.cn

\*通信作者简介: 范刚(1982—)(ORCID: 0000-0002-9822-5421), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品加工。

E-mail: fangang@mail.hzau.edu.cn

terms of color and taste ( $P < 0.05$ ), with the highest overall sensory score. In summary, steam and microwave reheating are ideal reheating methods for frozen pork rib soup with carrot and corn.

**Keywords:** prepared food; pork rib soup with carrot and corn; quick-freeze; reheating methods; flavor; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240713-126

中图分类号: TS251.5+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 02-0193-11

引文格式:

陆佳欣, 任唯兆, 任婧楠, 等. 复热方式对预制胡萝卜玉米排骨汤品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 193-203.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240713-126. <http://www.spkx.net.cn>

LU Jiaxin, REN Weizhao, REN Jingnan, et al. Effects of reheating methods on the quality of prepared pork rib soup with carrot and corn[J]. Food Science, 2025, 46(2): 193-203. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240713-126. <http://www.spkx.net.cn>

受经济发展趋势、城市化进程、新冠疫情等多重因素的影响, 消费者在快节奏的现代生活背景下更倾向购买易于烹饪、方便快捷的食品, 这推动了预制菜市场的发展<sup>[1]</sup>。在政策和市场的双重作用下, 我国预制菜市场在2021年的规模达3 459亿元, 预计2025年将突破8 000亿元, 标志着预制菜产业正加速驶向万亿级市场的“高速发展阶段”<sup>[2]</sup>。预制菜主要包括即食食品、即热食品、即烹食品和即配食物4类<sup>[3]</sup>。其中, 汤类产品在预制菜行业扮演着至关重要的基石角色, 从个人家庭日常饮食中的膳食汤品、滋养身心的滋补汤类, 到方便快捷的即热、即食汤品, 均展现出了广阔的消费市场潜力。

猪排骨中蛋白质、脂肪、维生素、矿物质等营养成分含量丰富<sup>[4]</sup>, 搭配胡萝卜、玉米炖制成胡萝卜玉米排骨汤, 鲜香味美、营养均衡、老少皆宜, 是我国家庭烹饪中的一道常见菜肴。但其做法工序繁琐, 需要将原料经高压锅炖煮, 耗时较长。随着现代人们生活步伐日益加快, 推动了传统中式菜肴向工业化生产转型。预制菜自生产商流转至消费者手中, 历经较长的供应链流程, 其中丰富的营养成分在贮藏与运输期间易发生腐败变质<sup>[5]</sup>。为此, 采用速冻处理能够在保证产品品质的同时有效抑制微生物繁殖与酶活性, 进而延长预制菜的保质期<sup>[6]</sup>。开发速冻胡萝卜玉米排骨汤预制品, 既迎合了消费者对营养、安全、便捷的饮食追求, 又为预制汤市场开辟了新领域。

预制胡萝卜玉米排骨汤以速冻产品的形式提供给消费者, 食用前需进行复热, 不同的加热技术会造成预制菜的营养、质构及风味的差异, 因此选择合适的复热方式和复热条件至关重要<sup>[7]</sup>。随着预制类加热食品市场规模的不断扩大, 已有很多学者将研究集中在了复热技术及复热方式上, 目前食品的复热方式主要有微波复热、水煮复热、蒸汽复热、烘烤复热、欧姆复热等。Li Jianying等<sup>[8]</sup>研究了微波、蒸煮、明火和煮沸处理对土豆炖牛肉不同成分的食品品质、脂质氧化和风味特性的影响, 发现明火复热具有更好的食品品质和风味特性。Luo Xiaoying

等<sup>[9]</sup>观察到微波复热对冷冻鱼糜产品的感官性能和风味的影响小于水煮、蒸煮和油炸处理。除复热方式的选择外, 复热条件的控制也会对产品品质产生影响。随着加热温度升高和加热时间延长, 脂肪氧化过程加速, 进而加剧热异味的产生。这种异味通常是由肉类中细胞膜上磷脂的自动氧化产生的腐败、陈旧味, 但复热时间过短也会使食品感官变差, 且未完全熟化的物料也潜藏食物中毒的风险<sup>[10-11]</sup>。张凯华等<sup>[12]</sup>发现冷藏的预制猪肉饼在较短的微波复热处理期间(0~30 s)脂质氧化加速, 促进过熟味关键风味因子持续生成, 而加热时间过长(90~180 s)则造成过熟味关键风味因子含量降低, 因而适当的复热时间(60~90 s)能够较好地保持猪肉饼的风味品质。王林<sup>[13]</sup>发现冷藏预制小酥肉肉质的持水力会随着微波复热功率及复热时间的增加而有所降低, 影响食用品质。但是, 目前的研究主要集中于单一复热方式, 且鲜见不同复热方式对胡萝卜玉米排骨汤等速冻汤类产品品质影响的报道。

本研究基于速冻预制胡萝卜玉米排骨汤, 选用4种复热方式(微波复热、蒸汽复热、水浴复热、明火复热), 研究不同复热方式对胡萝卜玉米排骨汤色泽、质构、游离氨基酸、呈味核苷酸、风味及感官评价等品质的影响, 明确每种复热方式下所需的时间及复热特性, 以期为胡萝卜玉米排骨汤走向工业化生产提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

猪龙骨, 购于淘宝林夕生鲜直销店铺; 新鲜鸡架骨、猪肋排、玉米、胡萝卜、生姜、小葱购于武汉洪山区当地农贸市场。

精制食用盐 中国盐业股份有限公司; 白砂糖 安琪酵母股份有限公司; 味精、鸡精 上海太太乐食品有限公司; 白胡椒粉 王守义十三香调味品集团有限公司; 料酒 广东美味鲜调味食品有限公司; 枸杞(产

地宁夏)、红枣(产地新疆维吾尔) 北京同仁堂健康药业有限公司。

分析纯无水乙醇、磷酸、氢氧化锂、四硼酸二锂、甲酸、乙酸、硼酸、辛酸、乙二胺四乙酸、乙二醇、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、聚氧乙烯十二烷基醚、2,4,6-三甲基吡啶、5-磺基水杨酸 国药集团化学试剂有限公司; 甲醇(色谱级) 美国赛默飞科技有限公司; 茚三酮、茚三酮活化剂、游离氨基酸标准品 北京镭欧森科技发展有限公司; 5'-鸟苷-磷酸二钠盐合物、肌苷酸二钠水合物、5-腺苷-磷酸、肌苷、次黄嘌呤标准品 上海源叶生物科技有限公司。

## 1.2 仪器与设备

BSA124S分析天平 德国赛多利斯集团; Sorvall ST16R高速冷冻离心机 美国Thermo公司; UV Ultra色差仪 美国HunterLab公司; SCE10速冻机 东莞市麦大厨节能科技有限公司; G3E微波炉、MY-YL50P701电压力锅 美的集团有限公司; IH80E电磁炉、SY-23YC8062Q电压力锅 苏泊尔集团有限公司; 1712型精密分析天平 德国Sartorius公司; Tlog 10湿温度记录仪 江苏省精创电气股份有限公司; YET-6型高精度测温仪 江苏省兴化苏玛电器仪表有限公司; 便携式卡式炉 绍兴上虞野营者户外用品有限公司; TA-XT-PLUS物性测试仪 英国Stable Micro Systems公司; A300 advanced氨基酸分析仪 德国曼默博尔公司; e2695高效液相色谱仪 美国沃特世公司; 50/30  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS固相微萃取装置 美国Supelco公司; 6890N-5973气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用仪、HP-INNOWax气相色谱柱 美国Agilent公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 预制胡萝卜玉米排骨汤产品生产工艺

预制胡萝卜玉米排骨汤的工艺流程见图1。

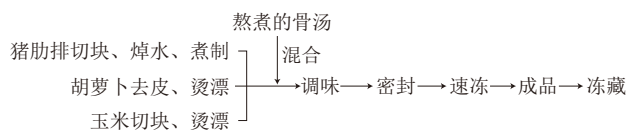


图1 胡萝卜玉米排骨汤工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart for the preparation of pork rib soup with carrot and corn

### 1.3.2 操作要点

骨汤熬制: 将新鲜的猪龙骨和鸡架骨洗净后切成长度为5~6 cm的段, 焯水后取猪龙骨((225±25) g)和鸡架骨((25±5) g)于电压力锅中, 以料液比1:3加入纯净水, 在高压锅设定压力50 kPa条件下熬煮145 min, 冷却后过滤得到骨汤。

猪肋排预处理: 猪肋排解冻后, 冷水浸泡30 min, 除去肉中杂质, 加入3 g生姜、20 g料酒, 冷水下锅焯水

至沸腾, 撇去浮沫, 捞出洗净; 将焯水后的猪肋排放入沸水中预制30 min, 捞出, 备用。

胡萝卜、玉米预处理: 胡萝卜去皮后, 切成滚刀块, 质量约20 g, 在沸水中烫漂45 s捞出, 备用; 玉米切成约30 g的块状, 沸水中烫漂1 min捞出, 备用。

混合、调味: 辅料添加量为排骨90 g、玉米60 g、胡萝卜30 g、姜片约3 g、红枣约2 g、枸杞约1 g和细香葱0.5 g。调味料添加量分别为食盐1.4 g、白砂糖1 g、味精0.3 g、鸡精0.25 g和白胡椒粉0.1 g(调味料均以骨汤200 g计)。

密封、速冻: 用纸/铝包装碗密封后, 于-60 °C条件下进行速冻处理, 置于-18 °C冻藏。

### 1.3.3 预制胡萝卜玉米排骨汤的复热

分别取-18 °C冻藏7 d的胡萝卜玉米排骨汤进行复热: 微波复热(微波炉功率1 000 W)、蒸汽复热(微波炉功率1 500 W、蒸汽温度120 °C)、水浴复热(沸水浴)、明火复热(卡式炉加热), 其中蒸汽和微波复热采用具备蒸烤功能的微波炉进行。再加热食品的中心温度需达到70 °C才可食用<sup>[14]</sup>, 结合产品本身水分高、营养丰富的特点, 在复热过程中将汤汁中心温度高于85 °C设置为复热终点。

使用红外测温仪测量并记录汤在复热过程中温度变化, 共选取15个测温点, 其中上部测温点5个, 中部测温点5个(含中心温度点), 下部测温点5个。待其中心温度超过85 °C后停止加热与测温, 并按下式计算温度均匀系数(covariance of temperature, COV<sub>T</sub>)<sup>[15]</sup>:

$$\text{COV}_T = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ 为各点温度数据标准差/°C;  $\mu$ 为各点温度数据均值/°C。

### 1.3.4 质构特性测定

各组样品复热后取出排骨、胡萝卜及玉米, 用流动蒸馏水冲淋1 min至冷却, 沥干后处理定型; 平行放置于TA-XT-PLUS物性测试仪载物台上, 分别测定各组分的硬度、胶黏性、咀嚼性、弹性、黏聚性、回复性指标, 每个处理组测定10次平行, 结果取平均值。

排骨: 取瘦肉部分, 按肌纤维方向切成2 cm×2 cm×2 cm大小。使用P100探头, 参数为测前速度2 mm/s, 测试速度1 mm/s, 测后速度2 mm/s, 间隔3 s, 压缩比例65%, 测试高度25 cm, 起点感应力5 g; 胡萝卜: 使用P6探头, 参数为测前速度1 mm/s, 测试速度2 mm/s, 测后速度1 mm/s, 间隔3 s, 压缩比例50%, 起点感应力5 g; 玉米: 取单个玉米粒, 使用P36R探头, 参数设置为测前速度2 mm/s, 测试速度0.8 mm/s, 测后速度0.8 mm/s, 两次压缩间隔时间3 s, 起点感应力5 g。

### 1.3.5 色度测定

色差仪校正后, 测定不同复热方式下汤汁的 $a^*$ (红绿值)、 $b^*$ (黄蓝值)、 $L^*$ (亮度值),  $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 、 $\Delta L^*$ 表示被测样品与未复热处理组之间色度指标的差值。



每个样品测定5次, 每组3次平行, 测定结果取平均值并按下式计算色差 $\Delta E$ 及饱和度 $C^*$ :

$$\Delta E = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (2)$$

$$C^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3)$$

### 1.3.6 游离氨基酸测定

根据Kim等<sup>[16]</sup>的方法略作修改。样品经复热后冷却, 取3 g汤汁加入30 mL超纯水中进行均质, 于4℃放置24 h, 以8 000 r/min离心5 min后经0.45 μm滤膜过滤, 取上清液加入10%磺基水杨酸溶液静置1 h, 12 000 r/min离心15 min。取200 μL样品处理液与800 μL上样缓冲液过0.45 μm滤膜, 使用氨基酸分析仪上机分析。

### 1.3.7 呈味核苷酸测定

根据韩昕苑等<sup>[17]</sup>的方法略作修改。样品经复热后冷却, 取4 mL汤汁加入20 mL 6%高氯酸溶液中, 10 000 r/min离心10 min后取上清液, 重复一次后经0.45 μm滤膜过滤, 上机待测。

核苷酸标准品处理: 分别配制5 mg/mL鸟嘌呤核苷酸(guanylate, GMP)、10 mg/mL次黄嘌呤核苷酸(inosine monophosphate, IMP)、2 mg/mL腺嘌呤核苷酸(adenylic acid, AMP)、0.5 mg/mL次黄嘌呤(hypoxanthine, Hx)、5 mg/mL肌苷(inosine, In)单一标准品溶液。等体积混合上述溶液后, 分别稀释2、3、4、5倍, 过0.45 μm滤膜, 待测。

高效液相色谱条件: Diamonsil Plus C<sub>18</sub>色谱柱; 柱温40℃; 紫外检测波长254 nm; 流动相A: 0.05 mol/L磷酸二氢钾缓冲液(用8 g/100 mL磷酸氢二钾溶液调pH值至5.4), 流动相B: 甲醇(色谱级); 洗脱程序为梯度洗脱, 条件: 0~10 min, 100% A、0% B; 11~18 min, 90% A、10% B; 19~24 min, 100% A、0% B; 流速为0.8 mL/min。

### 1.3.8 滋味活度值(taste activity value, TAV)计算

游离氨基酸和呈味核苷酸的TAV指样品中某一呈味物质的质量浓度与该物质的滋味阈值之比, 用于评估样品中特定成分对滋味强度贡献的大小, 当TAV>1时, 可认为该物质对滋味的贡献较为显著, 反之则认为该物质对滋味的影响较小<sup>[18]</sup>, TAV的计算如下式:

$$TAV = \frac{C}{T} \quad (4)$$

式中: C为呈味物质的质量浓度(mg/100 mL); T为呈味物质的阈值(mg/100 mL)。

### 1.3.9 等效鲜味浓度(equivalent umami concentration, EUC)计算

EUC表示由鲜味氨基酸(天冬氨酸(aspartic acid, Asp)、谷氨酸(glutamate, Glu))和鲜味核苷酸(GMP、IMP、AMP)协同效应产生的鲜味强度, 以同等鲜味所需的谷氨酸钠(monosodium glutamate, MSG)含量表示, 按照下式进行计算<sup>[19-20]</sup>:

$$EUC/(g/100 g) = \sum \alpha_i \beta_i + 1218 (\sum \alpha_i \beta_i) \times (\sum \alpha_i \beta_i) \quad (5)$$

式中:  $\alpha_i$ 为鲜味氨基酸含量(g/100 mg);  $\alpha_j$ 为鲜味核苷酸含量(g/100 mg);  $\beta_i$ 为鲜味氨基酸相对于MSG的鲜味系数(其中Glu为1, Asp为0.077);  $\beta_j$ 为鲜味核苷酸相对于MSG的鲜味系数(其中GMP为2.3, IMP为1, AMP为0.18); 1218为协同作用常数。

### 1.3.10 挥发性风味物质测定

固相微萃取条件: 取5 g样品置于20 mL萃取瓶中, 加入1.5 g NaCl, 密封后置于60℃水浴中以500 r/min转速磁力搅拌平衡20 min, 插入萃取针萃取30 min。萃取针使用前在GC-MS进样口250℃活化20 min, 重复3次。

GC-MS条件: 采用HP-INNOWax气相色谱柱(60 m×250 μm, 0.25 μm); 升温程序: 初始40℃, 保持5 min, 以5℃/min升温到250℃后保持10 min; 进样口温度250℃, 质谱仪接口温度250℃, 载气流速1.5 mL/min, 分流比4:1。MS条件为离子源温度230℃, 四极杆温度150℃, 电子电离源电离能70 eV, 全扫描35~550 Da。

定性与半定量分析: 经GC-MS MassHunter Workstation Software对原始数据进行分析处理, 利用自带谱库NIST20检索、鉴定, 选择匹配度大于80%的物质作为有效的挥发性成分, 结合保留时间和参考有关文献完成挥发性风味物质的最终定性; 采用峰面积归一化法计算相对含量。

### 1.3.11 感官评价

感官评价由10名食品专业师生组成的感官评价小组进行, 感官评价标准如表1所示。评价人员依次对产品的色泽、质地、风味和滋味进行评定, 最后取结果平均值。

表1 胡萝卜玉米排骨汤感官评价表  
Table 1 Criteria for sensory evaluation of pork rib soup with carrot and corn

评价项目	满分	评价标准	分值
色泽	25	汤汁呈金黄色, 玉米金黄, 胡萝卜透亮红	17~25
		汤汁暗黄, 玉米黄色, 胡萝卜暗红	10~17
		汤汁发白, 玉米黄色, 胡萝卜暗红	1~10
质地	25	汤汁质地均匀, 流动性好, 无分层, 汤汁澄清; 排骨软烂, 玉米口感软糯, 有嚼劲, 不黏牙, 胡萝卜边缘完整, 牙咬时, 无阻力	17~25
		汤汁有杂质颗粒感, 流动性较差; 排骨软烂, 玉米嚼劲略差, 胡萝卜牙咬时, 有较小阻力	10~17
		汤汁较浑浊, 颗粒感明显; 排骨不完整, 玉米黏牙, 胡萝卜口感较差	1~10
风味	25	风味浓郁, 肉香味和独特的玉米香味浓厚	17~25
		风味纯正, 肉香味和玉米香味略少	10~17
		风味很淡, 肉香味和玉米香味几乎没有	1~10
滋味	25	滋味浓郁, 汤味、排骨味和玉米味适中	17~25
		滋味纯正, 汤味和排骨玉米味略淡	10~17
		滋味略差, 缺少排骨汤味和玉米味	1~10

### 1.4 数据统计与分析

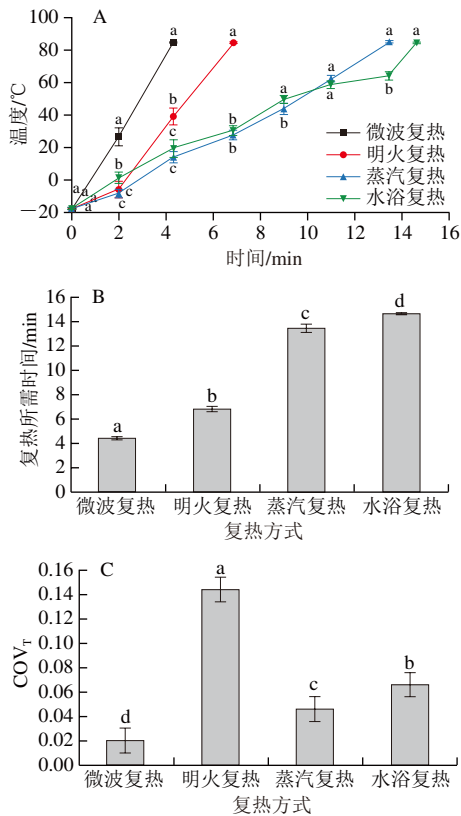
采用Excel软件进行数据制表, 采用Origin 2018软件进行图片绘制, 采用SPSS软件进行数据分析, 采用

Duncan检验在 $P<0.05$ 的水平下进行显著性分析, 数据结果以 $\bar{x}\pm s$ 的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同复热方式的加热特性

由图2A、B可看出, 微波、明火、蒸汽和水浴复热所需的时间分别为4 min 20 s、6 min 45 s、13 min 20 s和14 min 40 s。其中, 微波复热时间显著低于其他方式( $P<0.05$ ), 这归因于其特殊的加热机制: 通过电磁场高频振荡引发偶极子旋转与离子迁移, 产生摩擦热效应。汤汁中的水分子、钠离子等在微波作用下剧烈运动并摩擦碰撞, 在产品内部产生热量并持续升温<sup>[21]</sup>。微波复热时热量由内向外产生, 而其他3种方式是由外向内传递。水浴、明火和蒸汽都属于直接接触复热<sup>[22]</sup>, 其中水浴与蒸汽组复热时间较为接近, 可能是因为两种方式都是通过热传导和对流的方式将热量传递给样品, 且能提供相对均匀且稳定的加热环境, 因而样品可相对均匀地受热。而远高于蒸汽和水浴温度, 使得明火复热的复热速率能达到水浴和蒸汽复热的2倍以上。



小写字母不同表示不同复热条件下样品差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

图2 不同复热方式下产品温度变化(A)、复热所需时间(B)、COV<sub>T</sub>(C)

Fig. 2 Changes in internal temperature of frozen pork rib soup with carrot and corn during reheating (A), time required to reheat frozen pork rib soup with carrot and corn (B), and COV<sub>T</sub> (C) for different reheating methods

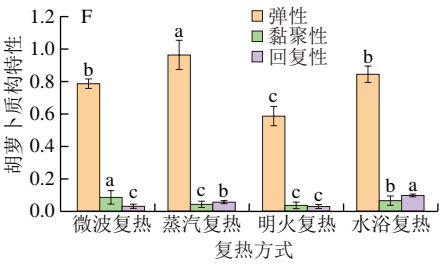
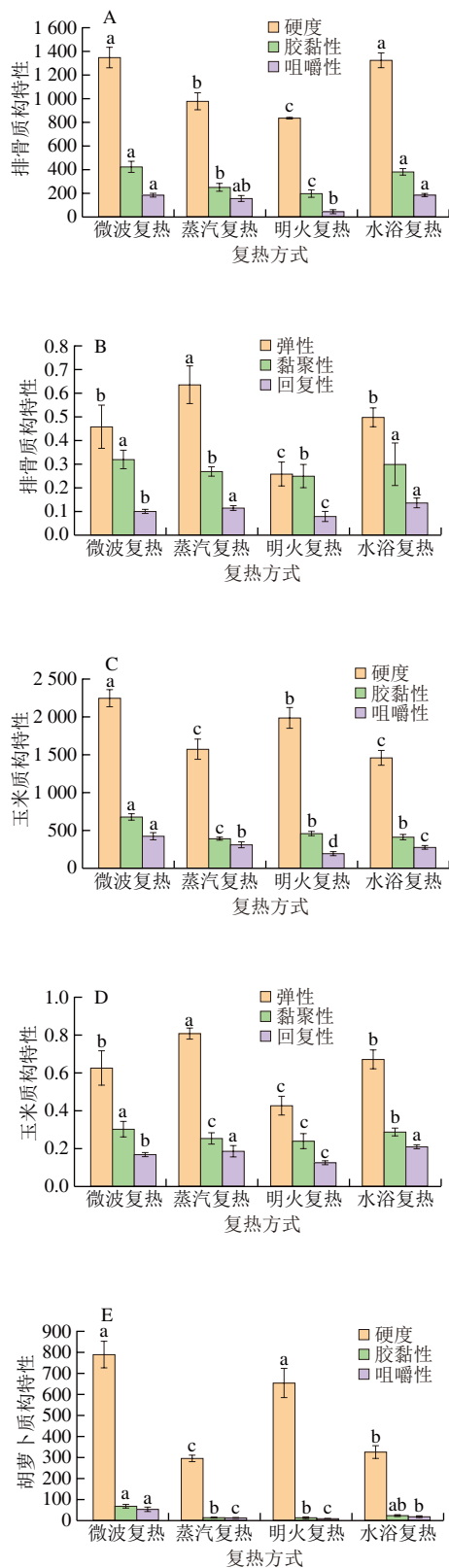
速冻食品复热要确保均匀受热, 以防出现未完全加热或过熟、烤焦乃至不能食用的情况。一般用COV<sub>T</sub>作为食品受热是否均匀的评估指标, COV<sub>T</sub>越低表明产品受热越均匀, 反之则越不均匀<sup>[23]</sup>。由图2C可知, 蒸汽复热的COV<sub>T</sub>最低(0.021), 受热最均匀; 明火复热则最高(0.134), 受热最不均匀。在水浴与明火复热时, 冻结产品下表面最先接触加热介质, 内部与上表面受热受限, 随着温度升高, 热量逐渐向上、向内传递, 并在上表面聚集, 当中心温度达到复热要求时, 下部温度已远高于中心温度, 导致复热不均匀。微波炉蒸汽复热时, 蒸汽均匀填充了整个腔体, 使得产品整体均匀受热。微波加热过程中物料吸收微波能, 通过分子极化和离子导电转换为热能, 实现整体均匀受热<sup>[12]</sup>。

### 2.2 复热方式对预制胡萝卜玉米排骨汤各固体组分质构特性的影响

质构作为评估消费者接受度的一个重要指标, 在速冻预制食品复热后的食用体验中占据重要地位。如图3A、B所示, 复热方式显著影响排骨的质构特性, 其中明火复热组排骨的硬度(835.94 g)和胶黏性(200.46 g)显著低于微波、蒸汽和水浴复热组( $P<0.05$ ), 这可能是因为明火复热条件下高强度的热量在较短时间里由外向内持续施加, 促进胶原蛋白变性溶解和肌原纤维蛋白收缩, 从而降低肉的硬度和胶黏性<sup>[24]</sup>。但蒸汽复热组硬度和胶黏性显著低于水浴复热组( $P<0.05$ ), 可能是由于蒸汽的传热效率更高, 导致排骨硬度和胶黏性降低的程度大于水浴组。这一变化趋势与Li Jianying等<sup>[8]</sup>用不同方式复热土豆炖牛肉后观察到牛肉的硬度和胶黏性由大到小依次为水浴组>蒸汽组>明火组的结果一致。另有研究表明, 肉质紧实度增加是因为连接肌肉纤维的结缔组织中水分的流失而产生收缩<sup>[25]</sup>, 经微波和水浴复热后排骨的咀嚼性和黏聚性高于明火和蒸汽复热后的样品, 可推断微波和水浴复热方式对样品的水分损失影响较小。此外, 明火组排骨弹性显著低于其他3个处理组, 说明明火复热对汤内的排骨组分的质构产生较大影响。

探究复热工艺对玉米与胡萝卜质构特性的影响, 旨在优化工艺并提升产品品质。玉米和胡萝卜经不同复热后硬度和胶黏性发生显著变化( $P<0.05$ ), 而其他参数变化不明显。如图3C、E所示, 蒸汽与水浴复热法相较于微波与明火, 降低了样品硬度和胶黏性。其中, 玉米经蒸汽复热后硬度较微波下降670.21 g, 经水浴复热后硬度较明火下降528.8 g; 类似地, 胡萝卜经蒸汽复热后硬度较微波下降493.68 g, 经水浴复热后硬度较明火下降329.62 g。蒸汽与水浴复热过程中, 样品直接与水或蒸汽接触, 且耗时较长, 这可能加剧了胡萝卜和玉米组织在复热中的破坏, 导致组织结构软化, 硬度下降<sup>[26]</sup>, 这一

结果也与土豆炖牛肉经不同复热后观察到的土豆的硬度变化规律<sup>[8]</sup>相似,这可能与样品组织中高淀粉含量有关。但4种复热方式的其他质构特性差别并不大(图3D、F)。此外,在复热过程中要确保胡萝卜、玉米完全熟化。



A、B.排骨; C、D.玉米; E、F.胡萝卜。  
质构特性中,硬度和胶黏性单位均为g。

图3 复热方式对质构特性的影响

Fig. 3 Effects of reheating methods on texture characteristics

2.3 复热方式对产品汤汁色度的影响

色泽是食品复热后最直观展现给消费者的品质指标,直接影响消费者的食用体验。不同复热方式对胡萝卜玉米排骨汤色泽的影响见表2。4种复热方法中蒸汽复热的 $L^*$ 值最大,说明蒸汽复热条件下汤汁的光泽度最好,这与Wang Jingyu等<sup>[27]</sup>关于蒸汽复热红酥鸡的研究结果一致。汤汁经不同复热处理后 $a^*$ 值无显著性差异( $P > 0.05$ ),表明复热方式对汤汁的红绿值影响较小。4种复热方式后汤汁的 $b^*$ 值范围为9.20~12.87,其中蒸汽复热后汤汁的 $b^*$ 值显著大于其他组,可知该法能较好地保持汤汁的黄色值。综上,蒸汽复热法能够获得较好的汤汁色泽。

表2 不同复热方式下产品的色泽

Table 2 Color parameters of pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

复热方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$	$C^*$
微波复热	$54.29 \pm 0.92^a$	$0.76 \pm 0.14^a$	$9.20 \pm 0.45^c$	55.11	9.23
蒸汽复热	$55.39 \pm 0.86^a$	$0.92 \pm 0.03^a$	$12.87 \pm 0.07^a$	56.89	13.07
明火复热	$41.25 \pm 0.38^b$	$1.14 \pm 0.09^a$	$11.38 \pm 0.26^b$	42.79	11.35
水浴复热	$52.43 \pm 0.42^a$	$0.79 \pm 0.22^a$	$11.46 \pm 0.14^b$	53.66	11.44

注:同列小写字母不同表示不同复热条件下样品差异显著( $P < 0.05$ ),表10同。

明火复热后的汤汁变为乳白色且变得十分黏稠,可能是由于汤汁中的脂肪被可溶性蛋白质包裹,油脂被充分乳化,使汤汁浓白黏稠<sup>[28]</sup>。

2.4 复热方式对产品游离氨基酸含量的影响

游离氨基酸既是风味前体物质,也是食品中重要的滋味物质<sup>[29]</sup>。由表3可知,在4组复热后的样品间游离氨基酸含量存在显著差异( $P < 0.05$ ),共检测出17种氨基酸。其中,蒸汽复热样品展现出最高的游离氨基酸总量(109.11 mg/100 mL),随后依次为微波复热组(74.60 mg/100 mL)、明火复热组(67.24 mg/100 mL)及水浴复热组(53.40 mg/100 mL),鲜味、苦味和甜味氨基酸含量也具有相似的规律。而朱秀曼等<sup>[30]</sup>观察到冷冻油焖对虾经复热后,微波复热组的游离氨基酸总量高于蒸汽和水浴复热组,差异可能是由于蒸汽加热的方式



不同, 该研究采用隔水浴蒸汽, 而本研究使用微波蒸汽复热, 且微波功率、时间、样品成分组成的不同也有可能造成差异。除蒸汽复热组外, 其他3组样品鲜味氨基酸含量低于甜味氨基酸, 说明复热后胡萝卜玉米排骨汤中主要的氨基酸是甜味氨基酸, 而蒸汽复热组主要为鲜味氨基酸。

表3 不同复热方式下产品游离氨基酸组成及含量

Table 3 Composition and content of free amino acids in pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

氨基酸		质量浓度/(mg/100 mL)			
		微波复热	蒸汽复热	明火复热	水浴复热
鲜味氨基酸	Glu谷氨酸	23.30±1.47 <sup>b</sup>	44.70±1.09 <sup>a</sup>	17.94±1.62 <sup>c</sup>	13.55±0.85 <sup>d</sup>
	Asp天冬氨酸	6.13±0.41 <sup>a</sup>	6.88±0.12 <sup>a</sup>	6.19±0.09 <sup>a</sup>	5.64±0.52 <sup>a</sup>
鲜味氨基酸总量		29.43	51.58	24.13	19.19
甜味氨基酸	Ser丝氨酸	2.08±0.15 <sup>ab</sup>	2.34±0.09 <sup>a</sup>	1.29±0.31 <sup>bc</sup>	1.04±0.04 <sup>c</sup>
	Gly甘氨酸	4.12±0.62 <sup>ab</sup>	6.40±0.48 <sup>a</sup>	4.70±1.01 <sup>ab</sup>	3.21±0.08 <sup>c</sup>
	Ala丙氨酸	19.74±1.15 <sup>b</sup>	26.38±2.08 <sup>a</sup>	18.64±1.08 <sup>b</sup>	16.23±0.46 <sup>b</sup>
	Pro脯氨酸	2.37±0.12 <sup>a</sup>	1.34±0.26 <sup>b</sup>	1.20±0.15 <sup>bc</sup>	0.74±0.08 <sup>c</sup>
	Thr苏氨酸	1.96±0.16 <sup>ab</sup>	2.23±0.11 <sup>a</sup>	1.60±0.17 <sup>b</sup>	0.96±0.07 <sup>c</sup>
甜味氨基酸总量	Met蛋氨酸	0.57±0.04 <sup>a</sup>	0.49±0.05 <sup>ab</sup>	0.43±0.02 <sup>ab</sup>	0.37±0.04 <sup>b</sup>
		30.84	39.18	27.86	22.55
苦味氨基酸	Arg精氨酸	3.04±0.19 <sup>a</sup>	3.56±0.68 <sup>a</sup>	3.21±0.46 <sup>a</sup>	2.72±0.27 <sup>a</sup>
	His组氨酸	0.86±0.12 <sup>a</sup>	1.17±0.21 <sup>a</sup>	0.88±0.10 <sup>a</sup>	0.63±0.46 <sup>a</sup>
	Val缬氨酸	1.62±0.42 <sup>a</sup>	2.49±1.01 <sup>a</sup>	1.90±0.14 <sup>a</sup>	1.41±0.26 <sup>a</sup>
	Ile异亮氨酸	0.93±0.07 <sup>a</sup>	1.01±0.14 <sup>a</sup>	0.79±0.05 <sup>ab</sup>	0.53±0.01 <sup>b</sup>
	Leu亮氨酸	1.87±0.04 <sup>b</sup>	2.90±0.65 <sup>a</sup>	2.29±0.46 <sup>ab</sup>	1.51±0.13 <sup>b</sup>
	Phe苯丙氨酸	1.50±0.09 <sup>ab</sup>	2.16±0.74 <sup>a</sup>	1.65±0.13 <sup>ab</sup>	0.81±0.24 <sup>b</sup>
	Trp色氨酸	1.35±0.43 <sup>a</sup>	1.34±0.15 <sup>a</sup>	1.39±0.13 <sup>a</sup>	1.26±0.17 <sup>a</sup>
苦味氨基酸总量		11.17	14.63	12.11	8.87
无味氨基酸	Lys赖氨酸	1.80±0.13 <sup>a</sup>	1.78±0.05 <sup>a</sup>	1.30±0.16 <sup>a</sup>	0.98±0.43 <sup>a</sup>
	Tyr酪氨酸	1.36±0.26 <sup>a</sup>	1.94±0.73 <sup>a</sup>	1.84±0.35 <sup>a</sup>	1.81±0.19 <sup>a</sup>
无味氨基酸总量		3.16	3.72	3.14	2.79
游离氨基酸总量		74.60	109.11	67.24	53.40

注: 同行小写字母不同表示不同复热条件下样品差异显著 ( $P<0.05$ ), 表4、8同。

游离氨基酸含量的变化主要取决于其在复热过程中的形成与损失<sup>[8]</sup>。在复热过程中, 物料中的主要物质排骨等原料发生蛋白质降解并产生氨基酸、肽和其他味觉物质, 并溶解在汤中, 进而可能增加样品中游离氨基酸含量, 受复热方式影响各异。此外, 有学者的研究也指出, 游离氨基酸的变化与美拉德反应、Strecker降解及烹饪水分流失等化学过程紧密相关<sup>[31]</sup>。由此可知复热过程中游离氨基酸含量的变化是一个复杂的动态过程。蒸汽复热后游离氨基酸含量最高, 或归因于其较低的烹饪损失率, 减少了复热过程中的氨基酸损耗并促进生成。然而, 各类氨基酸在复热中的具体生成与损耗机制尚需深入探究。

2.5 复热方式对产品呈味核苷酸含量的影响

GMP、IMP和AMP为典型的核苷酸, 它们广泛存在于富含蛋白质的食物中, 如肉类、鱼类等。此三者协同作用, 以特定比例融合产生强烈的鲜味。其中, 鲜味物质IMP性质不稳定, 易降解为Hx和In<sup>[32]</sup>。从表4可看出, 4种复热方式下样品中质量浓度最高的呈味核苷酸均为IMP, 其质量浓度最低为16.59 mg/100 mL (蒸汽复

热), 最高为21.47 mg/100 mL (明火复热), 其次为AMP与GMP。有研究指出, 产品中各成分核苷酸的溶出可能是导致复热过程中核苷酸含量变化的主导因素<sup>[8]</sup>, 可推断汤中核苷酸的差异可能主要来源于加热方式、时间和温度等因素。在4种复热方式中, 明火复热组汤汁中3种呈味核苷酸总质量浓度最高(46.32 mg/100 mL), 且IMP的分解产物Hx和In的总含量最低, 这可能是因为明火复热能够在促进核苷酸溶出的同时限制核苷酸的降解, 而微波、蒸汽、水浴复热组样品间呈味核苷酸总量无显著差异, 但蒸汽、水浴复热组的含量低于微波复热组。

表4 不同复热方式下产品呈味核苷酸含量

Table 4 Nucleotide contents in pork rib soup with carrot and corn with different reheating methods

核苷酸	质量浓度/(mg/100 mL)			
	微波复热	蒸汽复热	明火复热	水浴复热
GMP	6.87±0.02 <sup>b</sup>	6.05±0.02 <sup>b</sup>	8.86±0.09 <sup>a</sup>	5.82±0.04 <sup>b</sup>
IMP	19.08±2.04 <sup>a</sup>	16.59±1.86 <sup>b</sup>	21.47±3.21 <sup>a</sup>	17.72±0.22 <sup>b</sup>
AMP	11.72±1.48 <sup>b</sup>	11.33±0.19 <sup>b</sup>	15.99±0.05 <sup>a</sup>	11.63±0.07 <sup>b</sup>
GMP+IMP+AMP	37.67	33.97	46.32	35.17
Hx	4.87±0.12 <sup>a</sup>	3.69±0.14 <sup>b</sup>	5.13±0.09 <sup>a</sup>	4.56±0.08 <sup>a</sup>
In	16.44±0.49 <sup>a</sup>	15.22±0.63 <sup>a</sup>	12.33±0.58 <sup>b</sup>	14.23±0.35 <sup>b</sup>

2.6 基于游离氨基酸和呈味核苷酸的TAV

表5为不同复热条件下游离氨基酸含量所对应的TAV, 结果显示Glu与Ala的TAV显著高于其他氨基酸 ( $P<0.05$ )。其中, 鲜味氨基酸Glu的TAV在蒸汽复热组达1.49, 表明蒸汽复热下样品鲜味最足。各组甜味氨基酸Ala的TAV范围为0.27~0.44, Glu和Ala含量之和占样品中游离氨基酸总量的40%以上, 是样品中主要的风味氨基酸, 这与在黄羽鸡汤氨基酸含量测定中Glu和Ala含量最高的发现<sup>[33]</sup>吻合。

表5 不同复热方式下基于游离氨基酸TAV

Table 5 TAVs based on free amino acids of pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

游离氨基酸	阈值 <sup>[30]</sup> /(mg/100 mL)	TAV			
		微波复热	蒸汽复热	明火复热	水浴复热
Glu	30	0.78	1.49	0.60	0.45
Asp	100	0.06	0.07	0.06	0.05
Ser	150	0.01	0.02	<0.01	<0.01
Gly	130	0.03	0.05	0.04	0.02
Ala	60	0.33	0.44	0.31	0.27
Pro	300	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Thr	260	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Met	30	0.02	0.02	0.01	0.01
Arg	50	0.06	0.07	0.06	0.05
His	20	0.04	0.06	0.04	0.03
Val	40	0.04	0.06	0.05	0.03
Ile	90	0.02	0.03	0.03	0.01
Leu	190	<0.01	0.02	0.01	<0.01
Phe	90	0.02	0.02	0.02	<0.01
Trp	ND	ND	ND	ND	ND
Tyr	ND	ND	ND	ND	ND
Lys	50	0.03	0.04	0.04	0.03

注: ND.未检出, 下同。

表6为不同复热方式下呈味核苷酸含量所对应的TAV。结果显示,IMP的TAV在4种复热方式下均高于AMP和GMP,所以IMP可能为汤汁主要滋味贡献者。IMP、GMP、AMP的TAV虽均未达到1,表明单物质对汤汁的滋味无直接突出影响,但是呈味核苷酸之间以及与游离氨基酸之间产生的协同作用都能提升样品的鲜味<sup>[30]</sup>。

表6 不同复热方式下基于呈味核苷酸TAV  
Table 6 TAVs based on taste nucleotides of pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

核苷酸	阈值 <sup>[30]</sup> / (mg/100 mL)	TAV			
		微波复热	蒸汽复热	明火复热	水浴复热
GMP	12.5	0.55	0.48	0.71	0.47
IMP	25	0.76	0.66	0.86	0.71
AMP	50	0.23	0.23	0.32	0.23

2.7 复热方式对产品EUC值的影响

呈味核苷酸滋味单薄,但与游离氨基酸协同可产生强烈的增鲜作用<sup>[34]</sup>。由表7可知,不同复热方式下产品EUC值差异显著,Phat等<sup>[35]</sup>将EUC值划分为4个等级,分别为>1 000、100~1 000、10~100 g/100 g和<10 g/100 g,其中鲜味活性最强为蒸汽复热组(178.4 g/100 g),其次为微波复热组(109.9 g/100 g)和明火复热组(100.2 g/100 g),这3组复热后样品的EUC值处于第2水平,而EUC值最低的为水浴复热组(56.5 g/100 g),处于第3水平,说明蒸汽、微波及明火复热能较好地保留产品的鲜味强度。

表7 不同复热方式下产品EUC值  
Table 7 EUC values of pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

复热方式	微波复热	蒸汽复热	明火复热	水浴复热
EUC/ (g/100 g)	109.9	178.4	100.2	56.5

2.8 不同复热方式下产品的GC-MS分析

胡萝卜玉米排骨汤在复热过程中可以通过脂质氧化、美拉德反应等作用产生大量的挥发性化合物<sup>[36]</sup>,采用GC-MS技术解析样品中的挥发性风味成分,利于进一步分析复热方式对汤风味的影响。由表8、9可知,4种复热方式处理的胡萝卜玉米排骨汤中挥发性风味成分的种类及含量存在显著差异,共鉴定出61种挥发性成分,其中明火、微波和蒸汽复热组分别检出32、29种和33种挥发性成分,芳香类物质在这3组样品中相对含量最高,而水浴复热组样品检测出挥发性成分31种,以醇类物质为主,占比达34.65%。

表8 挥发性成分GC-MS分析结果  
Table 8 GC-MS analysis results of volatile components in of pork rib soup with carrot and corn

序号	保留 时间/min	挥发性成分	分子式	相对含量/%			
				明火复热	水浴复热	微波复热	蒸汽复热
醇类							
1	15.94	戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	ND	0.37±0.02	ND	ND
2	21.55	1-辛烯-3-醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	ND	0.26±0.03	ND	ND
3	24.30	1-辛醇	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	ND	0.30±0.03 <sup>a</sup>	ND	0.18±0.02 <sup>b</sup>
4	26.66	正癸醇	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> O	ND	1.94±0.05 <sup>a</sup>	ND	0.37±0.06 <sup>b</sup>
5	30.98	香叶醇	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2.66±0.12 <sup>b</sup>	31.78±2.94 <sup>a</sup>	2.14±0.32 <sup>b</sup>	2.58±0.22 <sup>b</sup>
6	32.46	苯乙醇	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	ND	ND	0.12±0.02 <sup>a</sup>	0.09±0.01 <sup>a</sup>
7	36.90	肉豆蔻醇	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> O	0.68±0.06	ND	ND	ND
醛类							
8	7.55	戊醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	ND	0.51±0.09	ND	ND
9	10.57	己醛	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	3.26±0.26 <sup>b</sup>	10.79±0.93 <sup>a</sup>	0.32±0.07 <sup>c</sup>	1.06±0.22 <sup>d</sup>
10	13.90	庚醛	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	ND	0.37±0.10	ND	ND
11	17.10	辛醛	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	0.28±0.09 <sup>a</sup>	0.25±0.05 <sup>a</sup>	0.07±0.02 <sup>b</sup>	0.28±0.03 <sup>b</sup>
12	20.04	茉莉醛	C <sub>14</sub> H <sub>18</sub> O	0.17±0.04	ND	ND	ND
13	20.15	壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	0.81±0.10 <sup>b</sup>	1.83±0.27 <sup>a</sup>	0.30±0.02 <sup>c</sup>	0.91±0.21 <sup>b</sup>
14	21.30	2-辛烯醛	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	ND	1.66±0.24 <sup>a</sup>	ND	0.27±0.13 <sup>b</sup>
15	23.03	庚二烯醛	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	ND	0.38±0.09	ND	ND
16	23.77	苯甲醛	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	0.27±0.07 <sup>a</sup>	0.16±0.06 <sup>a</sup>	0.27±0.08 <sup>a</sup>	0.16±0.04 <sup>a</sup>
17	28.09	壬二烯醛	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	0.29±0.04 <sup>a</sup>	ND	ND	0.17±0.04 <sup>b</sup>
18	28.69	香叶醛	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2.66±0.11 <sup>a</sup>	1.13±0.07 <sup>c</sup>	0.61±0.08 <sup>d</sup>	1.49±0.19 <sup>b</sup>
19	30.50	反-2,4-癸二烯醛	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> CHO	ND	0.11±0.03 <sup>b</sup>	0.36±0.08 <sup>a</sup>	ND
20	35.05	大茴香醛	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	1.14±0.12 <sup>a</sup>	0.10±0.02 <sup>b</sup>	0.92±0.12 <sup>a</sup>	0.73±0.09 <sup>a</sup>
21	35.41	肉桂醛	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O	0.27±0.09 <sup>a</sup>	ND	0.16±0.06 <sup>a</sup>	0.11±0.08 <sup>a</sup>
酮类							
22	18.57	甲基庚烯酮	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	ND	1.08±0.09 <sup>a</sup>	0.13±0.03 <sup>b</sup>	0.18±0.05 <sup>b</sup>
23	20.00	辛酮	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	ND	ND	ND	0.15±0.05
24	20.06	2-壬酮	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	ND	ND	0.11±0.02	ND
25	20.20	小茴香酮	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	0.66±0.12 <sup>a</sup>	ND	0.30±0.03 <sup>b</sup>	0.45±0.14 <sup>b</sup>
26	21.71	2,2-二甲基环丁酮	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O	ND	0.16±0.03	ND	ND
27	31.76	环戊酮	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O	1.28±0.04	ND	ND	ND
28	34.58	己酮	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	0.15±0.06 <sup>a</sup>	ND	0.21±0.05 <sup>a</sup>	ND
29	34.70	2-十五烷酮	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O	0.13±0.03 <sup>a</sup>	0.12±0.06 <sup>a</sup>	ND	ND
30	35.96	戊基环戊烯酮	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	0.40±0.12	ND	ND	ND
酸类							
31	38.46	辛酸	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	0.20±0.08	ND	ND	ND
酯类							
32	22.60	2-丙烯酸甲酯	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	ND	ND	ND	0.24±0.01
33	24.34	氯乙酸辛酯	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> Cl	0.21±0.02	ND	ND	ND
34	24.35	甲酸辛酯	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	ND	ND	0.09±0.04	ND
35	25.00	乙酸龙脑酯	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	ND	ND	ND	0.15±0.03
36	27.02	己酸乙酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	ND	0.73±0.04	ND	ND
37	29.04	丁酸香叶酯	C <sub>14</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	0.70±0.05	ND	ND	ND
38	44.67	酯酸甲酯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	0.35±0.05	ND	ND	ND
酚类							
39	37.48	丁香酚	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1.34±0.12 <sup>a</sup>	0.26±0.09 <sup>c</sup>	1.54±0.18 <sup>a</sup>	1.11±0.12 <sup>b</sup>
烷烃类							
40	3.30	戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	ND	2.77±0.05	ND	ND
41	3.71	庚烷	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	ND	0.45±0.04	ND	ND
42	4.34	正辛烷	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	ND	0.69±0.03	ND	ND
43	14.50	桉叶油素	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	1.48±0.24 <sup>b</sup>	0.67±0.13 <sup>c</sup>	1.24±0.02 <sup>b</sup>	1.91±0.32 <sup>c</sup>
芳香烃类							
44	30.80	茴香脑	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	18.08±1.29 <sup>c</sup>	3.34±0.28 <sup>d</sup>	44.96±4.36 <sup>a</sup>	22.21±2.12 <sup>b</sup>
烯烃类							
45	8.59	α-蒎烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.23±0.01 <sup>a</sup>	ND	0.11±0.03 <sup>b</sup>	0.14±0.02 <sup>b</sup>



续表8

序号	保留 时间/min	挥发性成分	分子式	相对含量/%			
				明火复热	水浴复热	微波复热	蒸汽复热
46	9.85	苾烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.77±0.08 <sup>a</sup>	0.09±0.02 <sup>c</sup>	0.16±0.08 <sup>e</sup>	0.33±0.07 <sup>b</sup>
47	12.96	月桂烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.44±0.09 <sup>a</sup>	ND	0.18±0.08 <sup>b</sup>	0.34±0.10 <sup>f</sup>
48	14.06	柠檬烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1.10±0.12 <sup>b</sup>	0.92±0.10 <sup>b</sup>	2.41±0.21 <sup>a</sup>	0.64±0.13 <sup>e</sup>
49	14.37	β-水芹烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	1.92±0.33 <sup>a</sup>	0.51±0.19 <sup>b</sup>	0.67±0.12 <sup>b</sup>	1.52±0.23 <sup>a</sup>
50	15.60	β-蒎烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	ND	ND	ND	0.08±0.00
51	15.61	γ-松油烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	ND	ND	0.16±0.05	ND
52	22.80	古巴烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	ND	ND	0.11±0.09	ND
53	23.51	樟脑	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	ND	ND	0.08±0.02	ND
54	25.40	反式石竹烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	ND	ND	0.74±0.07 <sup>a</sup>	0.67±0.05 <sup>f</sup>
55	26.90	2,6-二甲基-2,6-辛二烯	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>3</sub>	ND	ND	ND	0.13±0.04
56	28.26	α-姜烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.74±0.15 <sup>a</sup>	0.37±0.04 <sup>b</sup>	0.40±0.05 <sup>b</sup>	0.94±0.10 <sup>f</sup>
57	28.40	衣兰油烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.34±0.11	ND	ND	ND
58	28.80	α-合欢烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	ND	ND	ND	0.24±0.07
59	29.40	α-姜黄烯	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>	ND	ND	0.72±0.20 <sup>b</sup>	1.18±0.19 <sup>f</sup>
杂环类							
60	13.90	1,4-二甲基吡啶	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub>	0.24±0.12	ND	ND	ND
61	15.18	2-正戊基呋喃	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	0.44±0.13 <sup>a</sup>	0.52±0.09 <sup>a</sup>	ND	0.11±0.08 <sup>b</sup>

表 9 不同复热方式下产品的挥发性成分分类比较  
Table 9 Comparison of volatile component classification of products under different reheating methods

成分	明火复热		水浴复热		微波复热		蒸汽复热	
	种类	相对 含量/%	种类	相对 含量/%	种类	相对 含量/%	种类	相对 含量/%
醇类	2	3.34	5	34.65	2	2.26	4	3.22
醛类	9	9.15	11	17.29	8	3.01	9	5.18
酮类	5	2.62	3	1.36	4	0.75	3	0.78
酸类	1	0.20	ND	ND	ND	ND	ND	ND
酯类	3	1.26	1	0.73	1	0.09	2	0.39
酚类	1	1.34	1	0.26	1	1.54	1	1.11
烷烃类	1	1.48	4	4.58	1	1.24	1	1.91
芳香烃类	1	18.08	1	3.34	1	44.96	1	22.21
烯烃类	7	5.54	4	1.89	11	5.74	11	6.21
杂环类	2	0.68	1	0.52	ND	ND	1	0.11

醇类主要由脂肪氧化形成，具有木香、清新的香味，因其阈值较高，而被认为对样品的整体风味贡献较小<sup>[37]</sup>。例如，辛醇有新鲜、青、甜、柑橘、蜡、脂肪、甜味，略带草本味的香味；香叶醇有具有温和、甜的玫瑰花气息的香味<sup>[38]</sup>。这些风味物质相互作用促进胡萝卜玉米排骨汤样品产生不同的风味。水浴复热后样品挥发性风味成分中醇类物质相对含量最高，尤以香叶醇（31.78%）和正癸醇（1.94%）为主，明火、微波和蒸汽复热样品醇类物质也以香叶醇（分别为2.66%、2.14%、2.58%）为主。

酯类是由胡萝卜玉米排骨汤中的醇和羧酸经酯化反应而产生的具有水果香气的物质，对风味具有较大的贡献<sup>[37]</sup>。明火、水浴、微波和蒸汽复热组中酯类化合物相对含量分别为1.26%、0.73%、0.09%和0.39%，说明样品在明火复热过程中更利于酯类的形成，酯类物质能够赋予胡萝卜玉米排骨汤独特的弱蜡甜香和奶油香气<sup>[39]</sup>。

醛类化合物，特别是短链脂肪醛，因其气味阈值较低，在肉制品的香气构成中扮演着至关重要的角色<sup>[40]</sup>。各组复热处理对胡萝卜玉米排骨汤中醛类物质种类影响相差不大，分别为9、11、8种和9种，但组成和含量存在较大差异。明火复热组样品中醛类挥发性风味成分主要为己醛（3.26%）和香叶醛（2.66%），水浴复热组主要为己醛（10.79%）和2-辛烯醛（1.66%），蒸汽复热组主要为己醛（1.06%）和香叶醛（1.49%），微波复热样品醛类物质相对含量低，仅为3.01%。己醛是汤样品中含量丰富的化合物，具有生油脂味、果香味、木香味，是亚油酸的主要氧化产物，被认为是造成过熟味的关键风味因子之一<sup>[41-42]</sup>。各组样品己醛的相对含量间有显著差异，其中水浴复热组含量最高，明火、蒸汽复热组次之，微波复热组含量最低。月桂烯醛具有令人愉快的甜香脂气味，2-辛烯醛具有呈脂肪和肉类香气，并有黄瓜和鸡肉香味，香叶醛有强的柠檬气味<sup>[43-44]</sup>。张凯华等<sup>[43]</sup>在研究复热方法对猪耳朵制品挥发性物质时，发现微波复热后样品中醛类物质含量较水浴、水蒸和高温复热组偏低，与本研究结果相一致，可能是因为微波加热时间较其他方式短。脂肪的氧化和蛋白质降解促进了醛类物质的大量生成<sup>[45]</sup>，对胡萝卜玉米排骨汤样品风味起主要贡献作用。

烷烃类阈值较高，对整体风味影响较小<sup>[37]</sup>。各组复热方式后样品中酮类、烯炔类物质种类和相对含量较少，主要是甲基庚烯酮和小茴香酮，前者具有果香，并有清新、柑橘的味道，后者具有特殊的香辛气味，口感有轻微的辛辣感<sup>[46-47]</sup>。明火、水浴、微波和蒸汽复热后样品中芳香烃类成分茴香脑的相对含量依次为18.08%、3.34%、44.96%、22.21%，在样品挥发性物质中占比较大，具有特殊的茴香气味和相应的甜味<sup>[47]</sup>。

除了醇类、醛类、酯类、烷烃类挥发性风味物质外，还检测到了酚类、杂环类化合物等成分，这些物质也是构成汤风味的重要部分，其中丁香酚有浓烈的丁香味和温和的辛香味，2-正戊基呋喃通常被认为是肉制品最重要的风味物质<sup>[41,48]</sup>。

### 2.9 感官评价

感官评分是从色泽、质地、风味和滋味4个方面对复热后的胡萝卜玉米排骨汤进行的综合评价。由表10可知，复热方式对胡萝卜玉米排骨汤的质地、风味无显著影响（ $P>0.05$ ），而复热后的色泽和滋味则存在显著性差异（ $P<0.05$ ）。色泽得分方面，明火复热后的得分显著低于其余3组复热方式后的样品，这可能是因为经明火复热后的汤汁变成乳白且黏稠而降低了样品的可接受度。就滋味评分而言，水浴复热可能因具有较低的EUC值而获得了最低的评分。总体上看，微波和蒸汽复热样品得分间无显著差异（ $P>0.05$ ），但显著高于明火复热

和水浴复热后的样品 ( $P<0.05$ )，说明通过蒸汽和微波法复热速冻胡萝卜玉米排骨汤能够获得更好的感官品质，整体上更能被消费者接受。

表 10 不同复热方式下产品感官评价

Table 10 Sensory evaluation of pork rib soup with carrot and corn under different reheating methods

复热方式	感官得分				
	色泽	质地	风味	滋味	总分
微波复热	22.3±0.47 <sup>ab</sup>	22.5±0.41 <sup>a</sup>	22.0±0.82 <sup>a</sup>	22.2±0.24 <sup>ab</sup>	89±0.70 <sup>a</sup>
蒸汽复热	23.3±0.47 <sup>a</sup>	21.3±1.25 <sup>a</sup>	22.3±0.47 <sup>a</sup>	22.8±0.62 <sup>a</sup>	89.8±2.81 <sup>a</sup>
明火复热	17.0±0.82 <sup>c</sup>	22.0±0.81 <sup>a</sup>	22±0.81 <sup>a</sup>	21.5±.41 <sup>b</sup>	82.5±2.54 <sup>b</sup>
水浴复热	21.7±0.47 <sup>b</sup>	20.7±1.25 <sup>a</sup>	22.2±0.85 <sup>a</sup>	20.2±0.85 <sup>b</sup>	84.7±2.72 <sup>ab</sup>

3 结 论

不同复热方式对速冻胡萝卜玉米排骨汤的质构、色泽、滋味和风味具有较大的影响。研究发现，微波复热耗时最短，且热均匀性较高，蒸汽组样品整体复热最为均匀。复热后，微波、蒸汽和水浴组排骨的硬度和胶黏性显著高于明火组 ( $P<0.05$ )，且微波、水浴复热（咀嚼性、黏聚性）对肉质紧实度影响较小，这可能是因为这两种方法对样品的水分损失率较小，微波、明火复热较蒸汽、水浴法能更好保持样品中玉米和胡萝卜的硬度和胶黏性。蒸汽复热组产品具有最大的 $L^*$ 值，汤汁更为澄清透亮，但明火复热组因油脂乳化变得浓白黏稠，进而影响消费者对产品的接受度。在滋味方面，游离氨基酸质量浓度最高为蒸汽复热组（109.11 mg/100 mL），3种呈味氨基酸质量浓度最高为明火组（46.32 mg/100 mL），但结合TAV和EUC值可得，在蒸汽复热组种鲜味氨基酸Glu的TAV达1.49，对汤汁滋味的贡献较为显著，且具有最高的EUC值，其次为微波、明火组，最后为水浴复热组，EUC值依次为178.4、109.9、100.2、56.5 g/100 g。基于GC-MS分析，汤中共鉴定出61种挥发性成分，微波、蒸汽、明火、水浴复热组分别检测出29、33、32、31种，其中前3种复热方法挥发性成分以芳香类物质为主，水浴组以醇类物质为主。部分挥发性成分的含量有显著性差异 ( $P<0.05$ )，如香叶醇、己醛、茴香脑等，说明复热方式对预制胡萝卜玉米排骨汤产品的挥发性成分有显著影响。感官评价方面，微波和蒸汽复热组样品的色泽和滋味较明火和水浴复热更能被消费者接受 ( $P<0.05$ )，所获感官总分最高。综合考察上述指标，当用蒸汽和微波重新加热胡萝卜玉米排骨汤时，该菜肴具有更好的食用品质和风味特性。

参考文献：

[1] JIA Y Y, HU L L, LIU R F, et al. Innovations and challenges in the production of prepared dishes based on central kitchen engineering: a review and future perspectives[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 91: 103521. DOI:10.1016/j.ifset.2023.103521.

[2] 张宇昊, 陈海. 川渝预制菜产业现状与发展路径分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 9-19. DOI:10.16429/j.1009-7848.2022.10.002.

[3] YU Q, ZHANG M, JU R H, et al. Advances in prepared dish processing using efficient physical fields: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(13): 4031-4045. DOI:10.1080/10408398.2022.2138260.

[4] ZOU J, XU M J, ZOU Y F, et al. Chemical compositions and sensory characteristics of pork rib and Silkie chicken soups prepared by various cooking techniques[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128755. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128755.

[5] 王娟, 高群玉, 娄文勇. 我国预制菜行业的发展现状及趋势[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 99-103. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0388.

[6] 石泽雨, 刘九阳, 曹传爱, 等. 速冻中式肉类预制菜肴冻藏过程中品质提升策略研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 4166-4173. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.13.005.

[7] SONG Y, ZHANG H D, HUANG F, et al. Changes in eating quality and oxidation deterioration of pork steaks cooked by different methods during refrigerated storage[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 29: 100576. DOI:10.1016/j.ijgfs.2022.100576.

[8] 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]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 31: 100659. DOI:10.1016/j.ijgfs.2023.100659.

[9] LUO X Y, XIAO S 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131260.

[10] CUI L Q, DECKER E A. Phospholipids in foods: prooxidants or antioxidants?[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(1): 18-31. DOI:10.1002/jsfa.7320.

[11] DANG M Q, LI W R, YOU J, et al. Perilla juice and ginger juice reduced warmed-over flavor (WOF) in surimi gels: due to the inhibition of the formation of the WOF compounds and the masking of the WOF[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139739. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.139739.

[12] 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.

[13] 王林. 微波复热对预调理小酥肉食用品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(4): 124-128. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.04.024.

[14] 赵颖颖, 李三影, 闫路辉, 等. 不同复热方式对糖醋排骨品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(7): 52-59. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.07.011.

[15] CAO H W, FAN D M, JIAO X D, et al. Importance of thickness in electromagnetic properties and gel characteristics of surimi during microwave heating[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 248: 80-88. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.01.003.

[16] KIM S K, TAKEUCHI T, YOKOYAMA M, et al. Effect of dietary taurine levels on growth and feeding behavior of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[J]. Aquaculture, 2005, 250(3/4): 765-774. DOI:10.1016/j.aquaculture.2005.04.073.

- [17] 韩昕苑, 樊震宇, 从娇娇, 等. 冻融循环过程中冷冻罗非鱼片呈味物质的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 269-275. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201203-048.
- [18] QI J, LIU D Y, ZHOU G H, et al. Characteristic flavor of traditional soup made by stewing Chinese yellow-feather chickens[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(9): 2031-2040. DOI:10.1111/1750-3841.13801.
- [19] WANG S, HE Y, WANG Y Y, et al. Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis*[J]. Food Chemistry, 2016, 200: 24-31. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.12.093.
- [20] 崔妍春, 张化贤, 王爱辉, 等. 三种贝类蒸煮液主要滋味化合物的分析与比较[J]. 中国调味品, 2022, 47(1): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2022.01.001.
- [21] LI R, SUN Z L, ZHAO Y Q, et al. Effect of different thermal processing methods on water-soluble taste substances of tilapia fillets[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 106: 104298. DOI:10.1016/j.jfca.2021.104298.
- [22] LIAN F L, CHENG J H, SUN D W. Insight into the effect of microwave treatment on fat loss, fatty acid composition and microstructure of pork subcutaneous back fat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115297. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115297.
- [23] 梁怡良, 王利强, 张新昌. 基于COMSOL的中央厨房餐品微波加热包装仿真研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 262-268. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034546.
- [24] MA L, ZHANG M, XU J C, et al. Quality evaluation of Kungpao Chicken as affected by radio frequency combined with ZnO nanoparticles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110203. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110203.
- [25] 范海龙, 朱华平, 范大明, 等. 微波加热对小龙虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 8-16. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.002.
- [26] ILIC J, TOMASEVIC I, DJEKIC I. Influence of water-based and contact heating preparation methods on potato mechanical properties, mastication, and sensory perception[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2021, 25: 100401. DOI:10.1016/j.ijgfs.2021.100401.
- [27] WANG J Y, ZHANG M, FAN K, et al. Effects of reheating methods on the product quality of Hongsu chicken dish[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(11): e13823. DOI:10.1111/jfpp.13823.
- [28] 张立彦, 杜晓婷, 杨杨, 等. 常用食品乳化剂对复合骨汤乳化稳定效果的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(8): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2023.08.001.
- [29] 郭精桐, 赵圆, 孙玉敬. 番茄果实风味及其影响因素的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 169-177. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220826-323.
- [30] 朱秀曼, 宋建琳, 孙建安, 等. 不同复热方式下油焖南美白对虾预制菜的品质变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 217-228. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023110176.
- [31] 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: 36-45. DOI:10.1016/j.ulsonch.2018.04.005.
- [32] 唐修君, 樊艳凤, 葛庆联, 等. 贮藏温度和时间对鸡肉肌苷酸含量的影响[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(10): 51-55. DOI:10.3969/j.issn.1673-1182.2021.10.008.
- [33] 威军, 陈亚, 徐颖, 等. 超声辅助炖制对黄羽鸡汤香味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 153-158. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025079.
- [34] 谢诗音, 苏笑, 胡海梅, 等. 肉品鲜味物质研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 384-394. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20231227-241.
- [35] PHAT C, MOON B, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 1068-1077. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.07.113.
- [36] 李云龙, 赵月亮, 范大明, 等. 表儿茶素对牛肉汤营养成分和风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 125-132. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200305-070.
- [37] 王媛媛, 李学鹏, 王金厢, 等. 蒸煮方式对鲳鱼头汤呈味特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 58-65. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200721-289.
- [38] 万晓玉, 向昱州, 周莺茹, 等. 冷吃牛肉特征风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 272-279. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028619.
- [39] ZHANG D, JI H W, LIU S C, et al. Similarity of aroma attributes in hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*) and its different parts using sensory analysis and GC-MS[J]. Food Research International, 2020, 137: 109517. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109517.
- [40] 李素, 周慧敏, 张顺亮, 等. 不同加水量腌制酱牛肉中挥发性风味物质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 199-205. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181105-049.
- [41] 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/spkx1002-6630-20180727-325.
- [42] 王源渊, 尚珊, 丁若松, 等. 不同复热方式对预制烤鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 248-255. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034629.
- [43] 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.
- [44] 刘雅娜, 齐凤敏, 王定云, 等. 宰后成熟过程对新疆鹅肉挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(5): 138-144. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.05.026.
- [45] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201604005.
- [46] 王芝妍, 官爱艳, 吕梁玉, 等. 超高压处理对中华管鞭虾肉风味的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 156-162. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201718025.
- [47] 李永杰, 唐月, 李慧瑶, 等. 基于智能感官和气相色谱-质谱联用技术研究食盐添加量对风干肠风味特征的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 1-7. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210221-221.
- [48] 刘红娜, 梁晓琳, 田越, 等. 兰州糟肉加工过程中挥发性风味物质的分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 356-367. DOI:10.16429/j.1009-7848.2023.09.038.