李金林, 孙亚男, 王豪, 等. 预熟化小龙虾冻藏复热后挥发性风味物质变化 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 436−445. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060344

LI Jinlin, SUN Yanan, WANG Hao, et al. Changes of Volatile Flavor Compounds in Pre-cooked Crayfish after Frozen Storage and Reheating[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 436−445. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060344

· 贮运保鲜 ·

预熟化小龙虾冻藏复热后挥发性风味物质变化

李金林[1,2], 孙亚男[1], 王　豪[3], 余诚玮[1,2], 胡明明[2], 彭　斌[2], 唐丽君[4], 钟比真[2,*]

（1.江西师范大学生命科学学院, 江西南昌 330022;
2.江西师范大学国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022;
3.江西师范大学化学与化工学院, 江西南昌 330022;
4.江西省检验检测认证总院食品检验检测研究院, 江西南昌 330052）

摘　要: 为探究预熟化小龙虾经冻藏复热后风味变化，本研究采用电子鼻（E-nose）和顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）测定挥发性风味化合物，结合正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）和相对气味活度值（ROAV）筛选关键风味物质。结果表明，预熟化时间为 4 min 时小龙虾感官评价得分最高，冻藏复热处理后，Y4-D30-F2（预熟化 4 min、冻藏 30 d、复热 2 min）感官评价得分最高。电子鼻在 W1W、W1S、W2W 传感器上的响应值明显高于其他传感器，表明预熟化小龙虾中无机硫化物、烷烃类、芳香成分和有机硫化物等物质含量较高。GC-MS 检测出预熟化处理的小龙虾中含有 39 种挥发性风味物质，经冻藏复热处理后增加到 75 种。经 OPLS-DA 模型筛选得到 21 种差异挥发性物质（VIP≥1），进一步通过 ROAV 分析确定，（E）-2-壬烯醛、十二醛和芳樟醇等化合物为影响预熟化小龙虾风味品质的关键物质。综上，适当延长预熟化时间可增强小龙虾贮藏期风味特性，冻藏时间与复热时间均会影响其挥发性风味物质组成，且延长两者处理时间会增加风味物质种类。本研究结果可为预熟化小龙虾产品贮藏过程中风味调控提供科学依据。

关键词: 预熟化小龙虾, 挥发性风味物质, 冻藏, 复热

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0436−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060344　　本文网刊:

Changes of Volatile Flavor Compounds in Pre-cooked Crayfish after Frozen Storage and Reheating

LI Jinlin[1,2], SUN Yanan[1], WANG Hao[3], YU Chengwei[1,2], HU Mingming[2], PENG Bin[2], TANG Lijun[4], ZHONG Bizhen[2,*]

（1.College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
2.National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
3.College of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
4.Food Inspection and Testing Research Institute of Jiangxi General Institute of Testing and Certification, Nanchang 330052, China）

Abstract: To investigate the flavor changes of pre-cooked crayfish after frozen storage and reheating, flavor analysis was performed using an electronic nose (E-nose) combined with headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-

收稿日期: 2025−06−26

基金项目: 江西省自然科学基金（20242BAB20327）; 横向项目:（0901/12022889）江西师范大学“农产品高值化综合利用研究中心”。

作者简介: 李金林（1983−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产加工、风味化学与副产物高值化利用, E-mail: lijinlin405@126.com。

*** 通信作者:** 钟比真（1993−）, 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 18070496212@163.com。

mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The key flavor substances were then subjected to orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) and relative odor activity value (ROAV) for in-depth exploration. The highest sensory evaluation score was observed in crayfish pre-cooked for 4 min. After frozen storage and reheating, the Y4-D30-F2 group (pre-cooked for 4 min, frozen for 30 days, reheated for 2 min) achieved the highest sensory score. Significantly higher response values were recorded by the E-nose on sensors W1W, W1S, and W2W compared to other sensors, indicating elevated levels of inorganic sulfides, alkanes, aromatic compounds, and organic sulfides in pre-cooked crayfish. GC-MS analysis identified 39 types of volatile flavor compounds in the pre-cooked crayfish, which increased to 75 after frozen storage and reheating. A total of 21 differential volatile compounds with variable importance in projection (VIP)≥1 were screened using the OPLS-DA model. Further ROAV analysis confirmed that compounds such as (E)-2-nonenal, dodecanal, and linalool were the key substances affecting the flavor quality of pre-cooked crayfish. It is concluded that the flavor characteristics of crayfish during storage could be enhanced by appropriately extending pre-cooking time. The composition of volatile flavor compounds was affected by both frozen storage duration and reheating time, prolonging both treatment times increased the variety of flavor substances. The results of this study can provide a scientific basis for flavor regulation of pre-cooked crayfish products during storage.

Key words: pre-cooked crayfish; volatile flavor components; frozen storage; reheating

小龙虾(*Procambarus clarkii*)因其独特的风味特征和营养价值，近年来已成为全球消费量增长最快的水产品之一，尤其在中国餐饮市场中占据重要地位[1]。2024 年我国小龙虾年加工量 138.37 万吨，小龙虾加工产品消费约占四成[2]。当前，工业上普遍采用预热处理后冷冻贮藏的方式加工小龙虾，以有效延长其货架期，消费者在购买后需经二次加热方可食用。随着预制食品产业的快速发展，小龙虾从传统餐饮场景逐步扩展至家庭餐桌，其加工形式也从“现烹现食”向“预加工-冻藏-复热”的工业化模式转变[3]。其中，蒸制工艺作为能够最大限度保持原料天然风味与质构特性的加工方式[4]，已逐渐成为预制小龙虾主流加工技术之一。

风味是决定小龙虾产品品质与消费者接受度的关键因素[5]。在预制小龙虾冷冻与复热过程中，风味物质会发生一系列复杂的物理与化学变化，导致其风味特征与新鲜状态产生显著差异。冻藏期间，低温会引发脂肪与蛋白质氧化，进而促使挥发性风味物质的降解和转化；而在复热阶段，高温处理则会加剧美拉德反应和脂质氧化等过程，在生成新风味化合物的同时，也可能造成原有特征风味的损失[6]。已有研究表明，蒸制工艺可通过热诱导蛋白变性及美拉德反应形成特征性风味物质，如吡嗪类、醛酮类化合物[7]，然而这些物质在长期冻藏过程中可能因氧化或挥发而损失[8]。目前，针对水产品加工冷冻过程中风味变化的研究多集中于生鲜原料的冻藏稳定性(如蛋白质变性、脂质氧化)或烹饪方式的影响[9−10]，而对小龙虾在“预熟化-冻藏-复热”这一完整加工链条中的风味动态变化机制尚缺乏系统性研究。

本研究以小龙虾为对象，将其进行预熟化处理，结合风味化学分析技术(GC-MS、电子鼻、感官评价)，系统探究不同冻藏复热时间对其挥发性风味物质及感官特性的影响。研究成果可为预制小龙虾的品质调控提供理论依据，同时为水产品加工贮藏技术的创新提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜淡水小龙虾　单体质量 20 g 左右，购于江西省南昌市南昌县百家惠超市；正构烷烃混合标准品　北京索莱宝科技有限公司；氯化钠　分析纯，西陇科学股份有限公司；二氯甲烷、正己烷　色谱纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；邻二氯苯　分析纯，上海麦克林生化科技有限公司。

PEN3 型便携式电子鼻　德国 Airsense 公司；7890A/5975 气相色谱-质谱联用仪　美国 Agilent 公司；HH-6 数显恒温水浴锅　国华电器有限公司；DVB/CAR/PDMS 固相微萃取萃取头　美国 Supelco 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　小龙虾低温快速运回实验室后，选取大小相对一致的鲜活小龙虾，用流动清水洗干净，15 只为一组。将蒸煮锅置于电磁炉上，按小龙虾∶清水为 1∶10(W/V)的比例加入清水，在 2200 W 恒定功率下加热至水沸腾，待产生的蒸汽稳定后，将小龙虾置于蒸架上，隔水蒸制。蒸制时间分别为 2、4、6 min。将熟化时间为 2 min 与 4 min 组置于−18 ℃分别保存 15、30 d 后流水解冻，复热 2、4 min，复热方式同预熟化处理，分析时剥壳去除虾线、虾黄，取虾尾肉进行。

1.2.2　感官评价　挑选 10 名经过培训的专业感官评价人员(5 男、5 女，年龄 20~25 岁)对小龙虾虾尾的金属味、青草味、甜香味、腥味及综合评价进行感官评价，感官评价人员无饮食偏见和过敏反应，能对各指标的意义做出准确判断，且各评定人员之间相互独立，不得交流。采取 10 点尺度(0~9)打分法，打分步长为 1，0 为无法感知，1 表示微弱，5 表示明显，9 表示极度强烈[11]。

1.2.3　电子鼻测定　参考 LI 等[12]的方法加以修改，使用匀浆机将虾尾均匀搅碎，准确称取 3.00 g 样

品于 15 mL 离心管中, 三层保鲜膜密封, 50 ℃ 水浴平衡 30 min, 插入电子鼻探头进行测定。测定条件: 清洗时间 120 s, 归零时间 10 s, 准备时间 5 s, 测定时间 120 s, 载气速度为 600 mL/min, 进样流量为 600 mL/min, 特征值提取时间设定为 137~139 s。电子鼻 10 个不同传感器对应物质种类见表 1。

表 1 电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 1 Corresponding aroma types of different sensors of electronic nose

阵列序号	传感器名称	响应物质类型
1	W1C	芳香成分
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨类、芳香成分
4	W6S	氢化物
5	W5C	短链烷烃、芳香成分
6	W1S	烷烃类
7	W1W	无机硫化物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	芳香成分、有机硫化物
10	W3S	长链烷烃类

1.2.4 HS-SPME-GC-MS 测定 样品制备[12]: 使用匀浆机将虾尾均匀搅碎, 称取虾肉样品 5.0 g 于 20 mL 顶空瓶中, 加入 5 mL 18% 的 NaCl 溶液, 50 ℃ 水浴加热平衡 30 min 后, 插入老化好的萃取头顶空吸附 30 min, 吸附结束后取出萃取头, 快速插入进样口, 于 250 ℃ 解吸 10 min。

GC 条件[12]: 色谱柱为 DB-Wax 毛细管柱 (30 m×0.25 μm×0.25 mm); 进样口温度 250 ℃, 载气 He, 流速 1.0 mL/min, 采用不分流模式; 升温程序: 起始温度 40 ℃, 保持 3 min, 以 5 ℃/min 的速度升至 240 ℃, 保持 15 min。

MS 条件[12]: EI 电离源; 电离电压 70 eV; 离子源温度 230 ℃; 四极杆温度 150 ℃。

1.2.5 挥发性风味物质鉴定与分析 通过 NIST 20 质谱库对未知化合物进行检索匹配, 并结合保留指数(retention index, RI)对正反匹配度大于 800(最大值为 1000)的化合物进行定性分析。虾肉中各挥发性风味成分相对含量计算方法如下:

$$C(\%) = \frac{A_i}{A_s} \times 100$$

式中, A_i 为单个挥发性成分的峰面积, A_s 为挥发性成分的总面积。

虾肉样品中关键性风味化合物采用刘登勇等[13]提出的 ROAV 法进行分析, 公式如下:

$$ROAV = \frac{C_A}{T_A} \times \frac{T_{stan}}{C_{stan}} \times 100$$

式中, T_A 为各组分气味阈值(mg/kg), T_{stan} 为贡献最大组分气味阈值(mg/kg); C_A 为各组分相对含量(%), C_{stan} 为贡献最大组分相对含量(%)。

1.3 数据处理

所有实验均作 3 次平行, 实验结果用“平均值±标准差”表示, 采用 Origin 2021 绘制电子鼻主成分分析(principal component analysis, PCA)图、雷达图; 采用 GraphPad Prism 10.1.2 绘制气泡热图; 使用 SIMACA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)与绘图; 使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析, 统计学显著性定义为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 预熟化时间对小龙虾感官风味特性的影响

2.1.1 不同预熟化时间对小龙虾感官评价的影响

不同熟化时间处理后的小龙虾感官评分结果如图 1 所示。由图可知, 熟化时间为 4 min 时小龙虾综合评价最高, 为 6.5 分。此时其金属味、腥味等不良气味得分最低, 甜香味得分最高, 表明该熟化时间下小龙虾的整体气味特性最佳。相比之下, 熟化 2 min 的小龙虾综合评价最低, 为 4.67 分, 推测其原因为加热时间不足: 一方面美拉德反应未能充分进行, 虾香味特征化合物生成量较少; 另一方面使得腥味物质未能有效降解, 进而降低整体感官评价。顾赛麒等[14]指出, 小龙虾加热不充分易残留较重虾腥味, 而加热时间过长则可能产生氧化味等异味。张权[7]在研究蒸煮时间对小龙虾品质的影响时也发现, 蒸煮 4 min 时样品的感官综合得分最高。当熟化时间延长至 6 min 时, 腥味、青草味和金属味得分均显著升高, 风味品质下降。综合上述感官评价结果, 后续冻藏复热实验选取熟化时间为 2 min 与 4 min 的小龙虾作为研究样品。

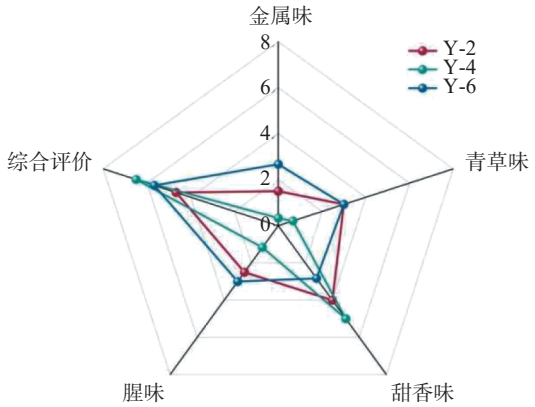


图 1 不同预熟化时间小龙虾感官评分雷达图

Fig.1 Radar chart of sensory evaluation scores of crayfish with different pre-cooking time

注: Y-2 表示预熟化时间为 2 min, Y-4 表示预熟化时间为 4 min, Y-6 表示预熟化时间为 6 min, 图 2~图 4 同。

2.1.2 不同预熟化时间处理的小龙虾电子鼻分析

电子鼻是一种模拟人类嗅觉系统的设备, 可通过检测食品挥发性化合物的特征来分析其风味[15]。对预熟化小龙虾的电子鼻响应值进行主成分分析, 结果见图 2A。横坐标和纵坐标分别代表第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2), 两个主成分的贡献率达到

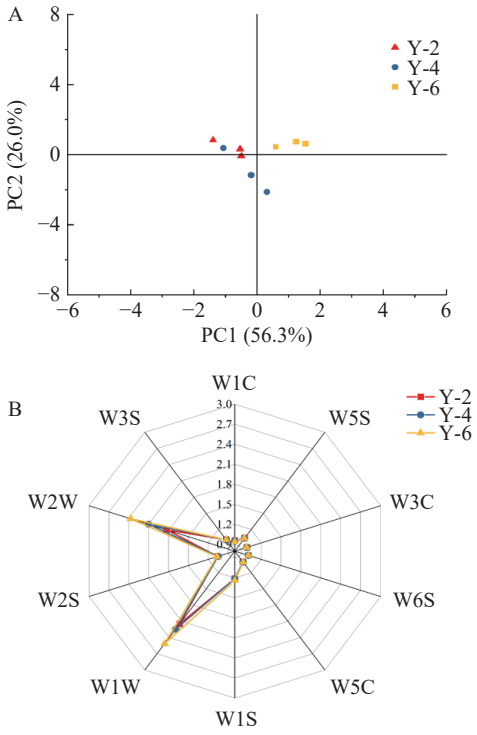


图 2　不同预熟化时间小龙虾电子鼻 PCA 图(A)及雷达图(B)

Fig.2　PCA (A) and radar response map (B) of the electronic nose of crayfish with different pre-cooking time

82.3%，可以有效解释挥发性成分组间差异。三组样品大致可分为三个相对独立的区域，说明三组样品的气味特征具有一定差异。其中 Y-2 与 Y-4 存在部分交叉，表明其风味具有一定相似性。图 2B 显示，三组样品在 W2W、W1W 与 W1S 传感器上的响应值明显高于其他传感器，表明小龙虾中无机硫化物、烷烃类、芳香成分和有机硫化物等物质含量较高。此外，电子鼻响应值随预熟化时间的延长呈上升趋势，其中蒸制 6 min 时样品的响应值达到峰值，揭示该熟化条件下小龙虾的风味可能最丰富。不同预熟化时间下的小龙虾在电子鼻响应值雷达图变化趋势一致，但响应强度存在差异(P<0.05)，说明预熟化时间是影响小龙虾风味特征的关键因素。

2.1.3　不同预熟化时间对小龙虾挥发性成分组成的影响　基于 SPME-GC-MS 对不同熟化时间小龙虾中的香气成分进行分析，计算相对含量并绘制气泡图，见图 3。共检测出 39 种挥发性化合物，包括 7 种烃类、5 种醇类、14 种醛类、3 种酮类、4 种芳香类、5 种酯类和 1 种其他类。计算各香气挥发性成分种类占比，并绘制挥发性成分物质类别图及占比图(图 4)。由图 4 可知，随着熟化时间的延长，烃类、醛类与芳香类化合物种类与占比均呈现上升趋势。在烹饪过程中，脂质氧化降解和美拉德反应是挥发性风味化合物的主要生成途径[6]，当加热时间延长，两者进一步反应使挥发性化合物种类逐渐丰富。

烃类物质通常感官阈值高，对风味贡献较小[16]，随着加热时间延长，其整体含量呈上升趋势。烯烃类化合物从蒸制 4 min 时开始出现且含量逐渐升高。烯烃通常由脂肪热降解而来，在一定条件下可形成醛酮类物质，有助于虾肉整体风味品质的提高[17]。

醛类物质主要来源于不饱和脂肪酸的氧化降解，具有较低的阈值[18]。在检测到的 7 类挥发性化合物中占比最多，是虾肉的主要风味物质，对改善虾肉整体风味起着重要作用。Y-2 组以短链醛居多，而当加热时间延长至 4~6 min，检测到的醛类物质则以长链醛为主。这可能是因为部分短链醛沸点较低，在长时间加热过程中会挥发或进一步发生聚合、氧化反应[19]，进而导致其在检测到的挥发性化合物中占比下降。

大多数酯类物质具有花香和果香[20]，预蒸 2 min 时含量最高且种类最多，随熟化时间的延长，酯类物质含量及种类呈下降趋势，含量较高的酯类物质有十一酸乙酯和十三酸乙酯。

结合前期研究及学术文献参考，预热时间为 4 min 时小龙虾品质最佳，加之还需复热，烹饪时间

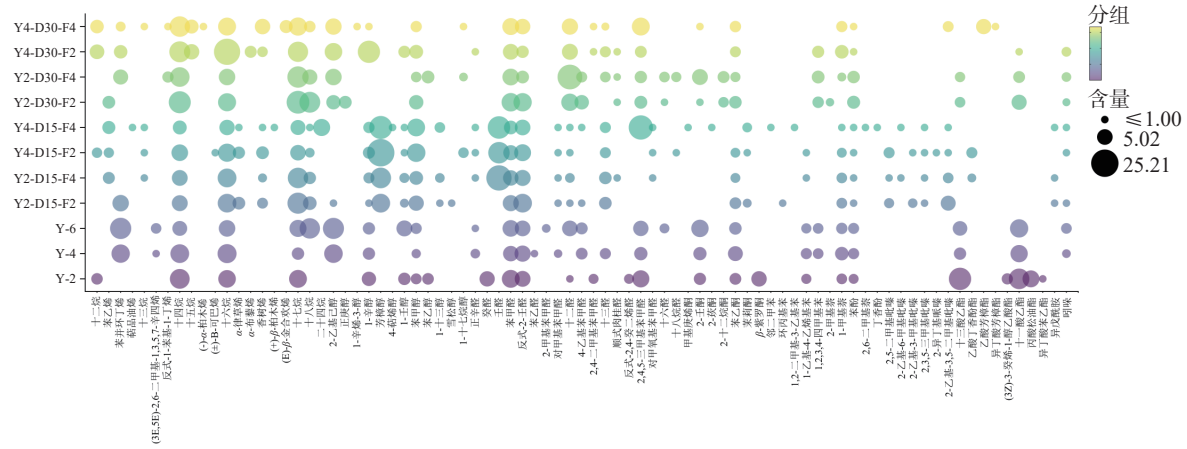


图 3　基于 GC-MS 的预熟化小龙虾挥发性香气成分分析

Fig.3　Analysis of volatile aroma compounds in pre-cooked crayfishi by GC-MS

注：Y2-D15-F2 表示预熟化 2 min 冻藏 15 d 复热 2 min，Y2-D15-F4 表示预熟化 2 min 冻藏 15 d 复热 4 min，Y4-D15-F2 表示预熟化 4 min 冻藏 15 d 复热 2 min，Y4-D15-F4 表示预熟化 4 min 冻藏 15 d 复热 4 min，其余命名类同，图 5~图 8 同。

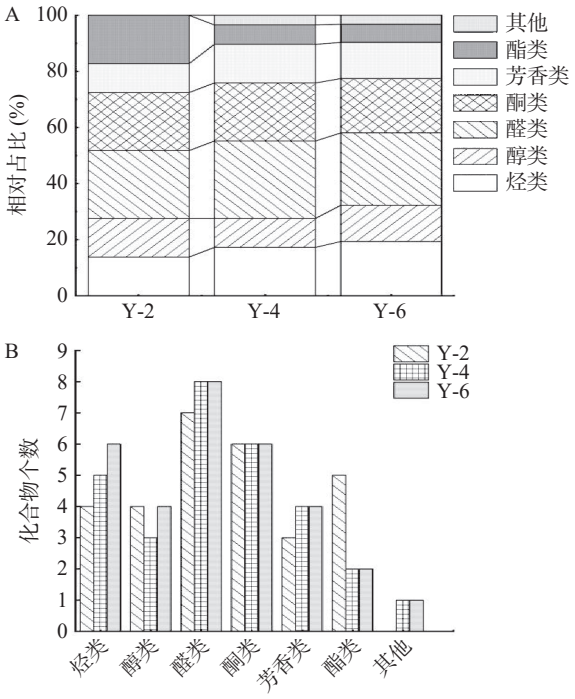


图 4　不同预熟化时间小龙虾风味物质分析

Fig.4　Analysis of volatile flavor compounds in crayfish with different pre-cooking time

注:(A)相对占比图;(B)类别图。

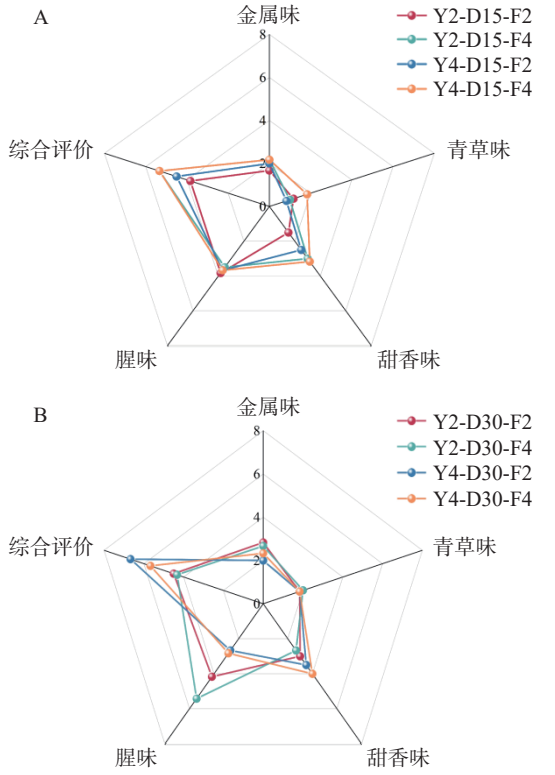


图 5　不同冻藏复热时间预熟化小龙虾感官评价

Fig.5　Sensory evaluation scores of pre-cooked crayfish with different freezing time and reheating time

注:(A)为冻藏 15 d 小龙虾复热感官评价图,(B)为冻藏 30 d 小龙虾复热感官评价图。

过长并不有利于水产品保留其独有的风味及品质,因此熟化 6 min 的样品未设置后续的实验研究。

2.2　冻藏复热时间对预熟化小龙虾感官风味特性的影响

2.2.1　不同冻藏复热时间对预熟化小龙虾感官评价的影响　由图 5A 可知,在冻藏 15 d 复热组中 Y4-D15-F4 与 Y2-D15-F4 两组样品的综合评价得分相同且最高(5.33 分)。这表明,在经历较短时间冻藏后,适当延长复热时间有助于小龙虾形成更为理想的气味特性。可能的原因在于短时间冻藏对小龙虾细胞结构和风味物质的破坏较小,呈味氨基酸及醛类、酯类等挥发性香气成分仍大部分保留在细胞内;适当延长复热时间能让小龙虾内外温度均匀升高,既促进香气成分充分释放,又抑制微量腥味物质滞留,而此阶段熟化时间产生的差异被冻藏期的低损耗掩盖,未对风味产生显著影响[21]。

在冻藏 30 d 复热组中,综合评价最高的为 Y4-D30-F2,其次是 Y4-D30-F4,分别为 6.67 与 5.67 分,得分均高于冻藏 15 d 复热组。这一结果说明经过长时间冻藏后预熟化时间长的小龙虾经过复热仍能够较好地保留风味。30 d 冻藏过程中,冰晶会缓慢生长并穿刺细胞膜,普通样品会因此出现细胞破损、风味物质随汁液流失的问题。但预熟化操作会让虾肉蛋白质充分变性固化,形成了更致密的肌肉网络结构,大幅减弱了冰晶的机械损伤,最大程度保留了内源风味物质。30 d 冻藏组的细胞已经形成一定通透性,风味物质更易迁移,此时适度复热时长,既能充分唤醒、释放留存的稳定香气,又不会因为复热过久导致风味成分过度挥发,也不会加剧脂肪氧化产物的不良气味,实现了“风味唤醒+损耗控制”的最优平衡,最终呈现出更高的感官评分。

2.2.2　不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾电子鼻分析　为评估不同冻藏复热阶段预熟化小龙虾的挥发性化合物的差异,采用 PCA 对电子鼻数据进行分析。PC1 和 PC2 的贡献率分别为 66.9% 与 14.8%,累计贡献率大于 80%,可以用其表征小龙虾的气味组成。由图 6A 可知,冻藏 15 d 复热组分布在 PC1 正半轴,冻藏 30 d 复热组分布在 PC1 负半轴,两组之间没有重叠部分且区分明显。说明两组样品的挥发性成分整体差异较大,冻藏时间对预熟化小龙虾的挥发性成分具有显著影响。如图 6B,8 种样品在 W1W、W1S、W2W 传感器上的响应值明显高于其他传感器,与预熟化小龙虾表现出同样的趋势变化,但冻藏复热组的响应强度显著高于预熟化组($P<0.05$)。这表明冻藏复热处理并未改变小龙虾的主体风味轮廓,但增强了其原有风味强度。可能的原因在于,水产品中硫胺素在热作用下降解生成多种杂环化合物及含硫挥发性物质,这类成分通常具有鱼香和类蟹肉香气,是构成小龙虾独特肉香的重要来源[22]。冻藏与复热过程的联合作用可能促进了此类风味前体物质的释放或转化,从而强化了整体风味感知。该结果与刘常园等[23] 在研究即食型香菇汤复热过程中

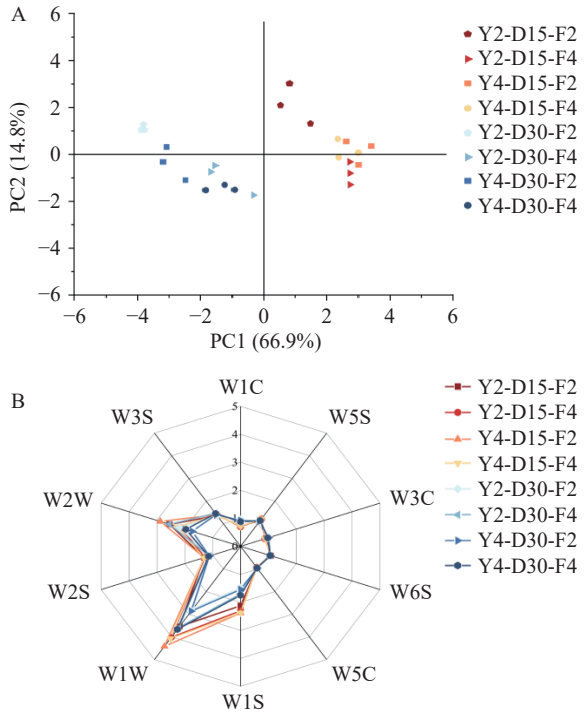


图 6　不同冻藏复热时间预熟化小龙虾电子鼻分析

Fig.6　E-nose analysis of pre-cooked crayfish with different freezing time and reheating time

注：(A)主成分分析图；(B)雷达图。

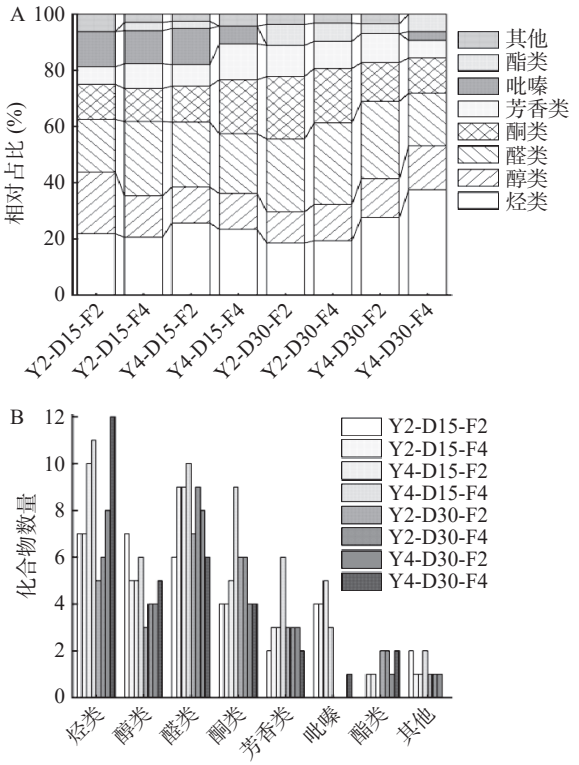


图 7　不同冻藏复热时间预熟化小龙虾挥发性风味物质分析

Fig.7　Analysis of volatile flavor compounds in pre-cooked crayfish with different freezing time and reheating time

注：(A)相对占比图；(B)类别图。

的风味变化时所得结论相符，其研究也发现复热处理会显著改变电子鼻传感器响应值，说明热处理是影响食品风味特征的重要因素之一。

2.2.3　不同冻藏复热时间对预熟化小龙虾挥发性成分组成的影响　采用 HS-SPME-GC-MS 对不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾的挥发性化合物进行定性定量分析，共检测出 75 种挥发性化合物，并绘制成气泡图如图 3 所示。其中冷冻 15 d 复热组分别检出 31、31、36、41 种；冷冻 30 d 复热组分别鉴定出 24、28、26、30 种。相较于预熟化组，冻藏 15 d 复热组和冻藏 30 d 复热组风味物质均有所增加，而冻藏 15 d 复热组风味物质种类最多。

不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾挥发性风味物质类别与占比如图 7 所示。由图可知，烃类物质随着冻藏时间和加热时间的延长，化合物数量总体呈上升趋势，占比也逐渐增加。冻藏 30 d 时，醇类物质化合物数量随复热时间延长而上升，但整体数量显著低于冻藏 15 d。而醛、酮类物质在冻藏 15 d 后随着复热时间延长化合物个数增加，在冻藏 30 d 后，随着复热时间延长化合物个数总体减少。在冻藏期间，由于氨基酸降解、脂肪氧化以及复热时发生美拉德反应、脂质氧化-美拉德反应共同作用，小龙虾挥发性风味化合物成分持续发生变化[24]。吡嗪类物质在冻藏 15 d 复热组中占比最多，芳香类、酯类物质占比最少，说明短时间冻藏对预熟化小龙虾风味影响较大。

有研究表明，熟制小龙虾在冻藏 14 d 时比冻藏 28 d 脂质氧化程度和蛋白氧化程度更严重[25]。由于冻藏导致的脂质氧化、蛋白质变性等因素会使熟制小龙虾产生更多的风味物质[26]，在预熟化小龙虾中未被检出的一些烃、醇、醛类物质，在冻藏后期种类均有所增加，这与刘慧雯等[8]研究结果一致。这是由于在冻藏过程中，小龙虾自身含有的不饱和脂肪酸随着时间延长不断氧化，以及氨基酸降解及微生物作用等多种因素共同导致小龙虾挥发性风味成分持续发生变化。

烃类物质随着冻藏复热时间延长含量升高，虽然在水产品中大量存在，但感官阈值较高，香气较弱或者无味，因此对小龙虾的整体风味贡献不大[26]。醛类化合物产生的主要原因是氨基酸的降解及不饱和脂肪酸的氧化降解。壬醛具有青草味，也是虾类的主要腥味成分[27]，仅在冻藏 15 d 复热组中出现且含量较高。相较于冻藏 15 d 复热组，苯甲醛与十二醛在冻藏 30 d 复热组中的含量明显升高。由此可见，冻藏过程会对预熟化小龙虾的挥发性风味产生影响，而醛类物质含量的变化，可作为反映其冻藏期间脂质氧化程度的有效指标。

醇类物质主要由多不饱和脂肪酸氧化产生，对小龙虾风味贡献较大的多为感官阈值较低的不饱和醇类[28]。氨基酸在微生物代谢过程中，通过脱羧作用或脱氢作用亦可生成醇类物质[29]。苯甲醇在所有组中均有检出，且在 Y4-D15-F2 组中含量最高，可能来自于亚油酸和花生四烯酸氧化形成[30]。Y2-D15-

F2 中芳樟醇含量最高，同时芳樟醇也仅出现在冻藏 15 d 复热组中。冻藏 30 d 复热组中含量最高的是辛醇，出现在 Y4-D30-F2 组中，以脂肪和蜡质为主，带有轻微的柑橘或青草味。

酮类物质主要是脂质氧化和氨基酸降解的产物，感官阈值较高，具有独特的清香、花香和果香，对小龙虾整体风味影响较小[31]。相较于其他酮类物质，苯乙酮在各组中含量均较高，赋予了小龙虾甜香与花香气息，冻藏后随着复热时间延长含量下降。

酯类物质主要来源于蛋白质水解产生的有机酸和醇类物质的酯化作用，呈现出清淡的水果香和花香，能够减弱脂肪酸带来的刺激味和苦味[32]。未经冻藏处理的预熟化组检出的酯类物质最丰富，随着冻藏复热时间的延长，酯类物质含量及种类呈下降趋势。冻藏 15 d 复热组中仅含有乙酸丁香酚酯这一种酯类物质且不存在于其他组中。

芳香类物质可能来源于烃类、类脂等化合物高温时裂解产生[33]，冻藏 15 d 复热组中含有的种类最多，其中苯酚在所有组中均被检出。吡嗪类物质是脂肪氧化产物参与美拉德反应的产物[34]，基本只在冻藏 15 d 复热组中发现。预熟化阶段未检测到吡嗪类物质可能是由于美拉德反应仅停留在初始阶段，冻藏 15 d 时前体物质积累到足够浓度，复热过程中促成吡嗪生成，而经过 30 d 冻藏后，前体物质因氧化或酶促降解而减少，导致复热时不再生成吡嗪类物质。

2.2.4 OPLS-DA 以 75 种挥发性化合物含量为因变量，不同冻藏复热时间处理为自变量进行 OPLS-DA，结果由图 8 所示。发现自变量 R^2X、因变量 R^2Y 与模型预测指数 Q^2 的值分别为 0.968、0.984 与 0.967，均接近于 1，表明模型拟合合理[35]。模型通过置换检验做进一步验证，经过 200 次置换检验，模型预测指数(Q^2)为−0.0745，$|Q^2|>0.5$，以上结果表明，该模型不存在过拟合现象[36]，因此，该方法可以用于不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾的风味物质差异性分析。在基于 OPLS-DA 构建的风味物质的多元统计分析模型中，通过变量投影重要性指标(VIP≥1.0)筛选出 21 种特征标志物，VIP 值越大表明该物质对风味的贡献度越大。这些化合物包括 9 种烃类、4 种醇类、4 种醛类、2 种酯类、1 种酮类和 1 种芳香类化合物，推测这类物质可能是预熟化小龙虾重要挥发性化合物。其中芳樟醇、壬醛、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、二十四烷是冻藏 15 d 组特有的，2-壬酮、乙酸芳樟酯、十一酸乙酯、十五烷是仅在冻藏 30 d 复热组中存在。

2.2.5 关键风味物质变化 在本研究中主要气味化合物的 ROAV 指数范围为 0~100。ROAV≥1 的挥发性化合物被认为是关键的气味化合物，而 0.1< ROAV<1 的挥发性化合物对小龙虾整体风味有重要的修饰作用。

由表 2 可知，不同冻藏复热时间的预熟化小龙虾共鉴定出 16 种关键风味物质。在所有检出风味物质中，对样品影响最大的是(E)-2-壬烯醛与十二醛，ROAV 为 100，带有脂香、肥皂香。具体来看，经 15 d 冻藏复热后的样品，关键风味物质主要为芳樟醇、壬醛、(E)-2-壬烯醛、十二醛和 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪；当样品冻藏时间延长至 30 d 再复热时，样品

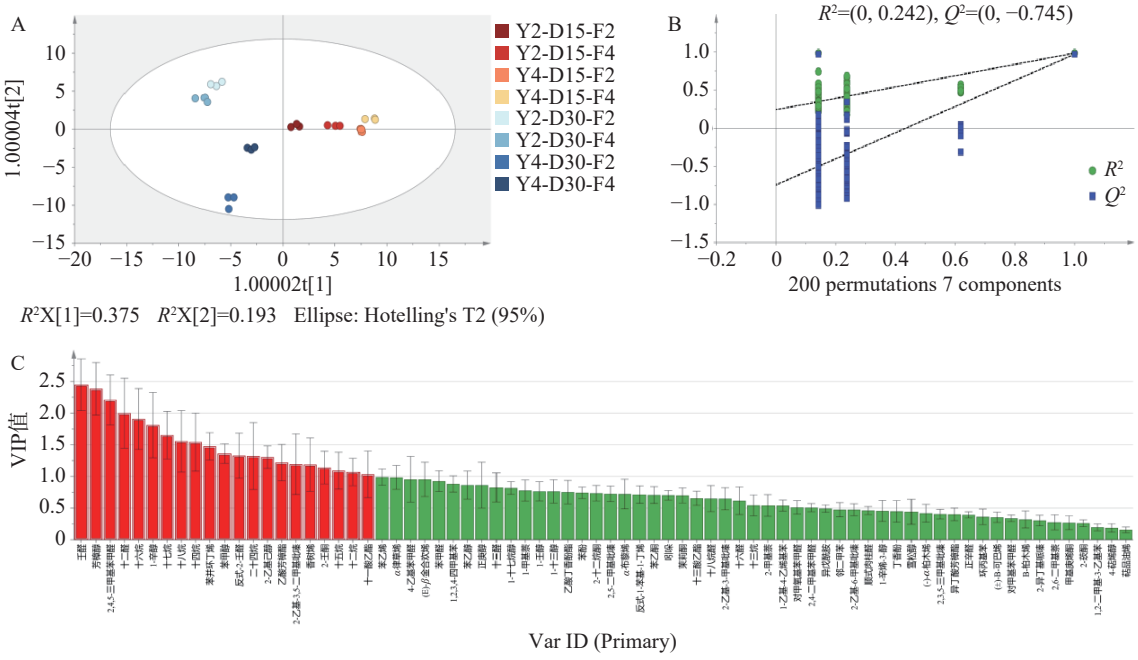


图 8 基于 GC-MS 的不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾分析

Fig.8 Analysis of pre-cooked crayfish with different freezing time and reheating time based on GC-MS

注：(A)OPLS-DA 评分图(R^2X=0.968、R^2Y=0.984、Q^2=0.967)；(B)置换检验图；(C)化合物的 VIP 图(红色部分表示 VIP≥1 的关键差异化合物)。

表 2　不同冻藏复热时间预熟化小龙虾的主体风味物质

Table 2　Main flavor substances of pre-ripening crayfish with different freezing time and reheating time

编号	名称	ROAV								气味属性
		Y2-D15-F2	Y2-D15-F4	Y4-D15-F2	Y4-D15-F4	Y2-D30-F2	Y2-D30-F4	Y4-D30-F2	Y4-D30-F4	
1	十五烷	–	–	–	–	–	–	3.86	1.58	青草味、花香
2	1-辛烯-3-醇	–	–	–	–	–	–	–	0.43	蘑菇味、土腥味、清香、脂香
3	芳樟醇	4.38	9.21	17.13	13.45	–	–	–	–	柑橘味、花香、木香、青草香
4	壬醇	0.42	0.83	0.37	0.4	–	–	2.75	–	蜡质、柑橘
5	辛醛	–	0.65	0.6	0.81	–	–	2.21	–	醛香、腊香、柑橘味
6	壬醛	–	4.21	2.25	3.27	–	–	–	–	清香、玫瑰花香
7	(E)-2-壬烯醛	100	100	100	100	100	27.86	89.63	100	脂香、青草香
8	十二醛	5.12	11.92	5.91	5.56	41.99	100	100	58.35	肥皂味、蜡味、柑橘味
9	十三醛	0.19	0.3	0.18	0.23	–	0.11	0.42	0.14	脂肪、腊味
10	2-壬酮	–	–	–	–	0.03	0.14	–	0.04	清香、甜味、草香、土腥味
11	苯乙酮	0.04	0.04	0.04	–	0.06	0.03	0.11	0.07	甜味、辛辣味、山楂味
12	2-甲基萘	–	–	–	–	0.28	–	–	–	–
13	1-甲基萘	0.16	0.25	0.18	0.14	–	0.1	1.06	0.33	–
14	丁香酚	–	–	–	1.37	–	–	–	–	木质、松子
15	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	82.72	0.48	9.2	11.26	–	–	–	57.33	甜味、坚果味
16	吲哚	0.05	–	0.08	0.05	0.07	0.08	0.29	–	动物气息、樟脑香

注：–表示未检出，化合物气味描述查询网站http://www.flavornet.org/index.html。

关键风味物质则转变为十五烷、壬醇、辛醛、(E)-2-壬烯醛、十二醛。(E)-2-壬烯醛是唯一所有实验组共同鉴定出的关键风味物质，芳樟醇、壬醛和 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪作为关键风味物质仅在冻藏 15 d 复热组中出现，赋予了小龙虾花香、甜味。在冻藏 30 d 复热组中，预熟化时间为 2 min 的样品仅有两种主体风味物质，而预熟化时间为 4 min 的样品有多种主体风味物质，因此两组风味差别较大。同时，风味化合物之间的相互作用也是影响预熟化小龙虾整体风味的主要原因[37]。研究说明预熟化时间不宜过短，适当延长熟化时间有利于风味物质产生，增强预制小龙虾产品的风味特性。

3　结论

本研究分析了不同熟化时间对小龙虾风味的影响，以及不同冻藏复热时间对预熟化小龙虾的感官风味特征变化的作用。研究结果表明，预熟化 4 min 时小龙虾感官综合评价最高，在最佳预熟化基础上，经 30 d 冻藏后复热 2 min 处理的小龙虾风味最佳。电子鼻可有效区分不同熟化时间与不同冻藏复热时间处理的小龙虾气味特征。GC-MS 检测出预熟化处理的小龙虾中含有 39 种挥发性化合物，经冻藏复热处理后的预熟化小龙虾含有 75 种挥发性风味物质。冻藏引发的脂质氧化、蛋白质变性等因素，会使复热后的预熟化小龙虾生成更多风味物质。不同冻藏复热时间处理的预熟化小龙虾样品结合 OPLS-DA 和 VIP 值筛选(VIP≥1)，共得到 21 种差异挥发性物质，进一步通过 ROAV 分析，筛选出壬醛、(E)-2-壬烯醛、十二醛、芳樟醇和 2-乙基-3,5-二甲基吡嗪为预熟化小龙虾在冻藏复热过程中的关键香气成分。

综上，适当延长预熟化时间有利于风味物质产生，可增强预熟化小龙虾产品在贮藏过程中的风味特性。冻藏时间与复热时间均会影响预熟化小龙虾的挥发性风味物质，随着冻藏时间和复热时间的延长，挥发性风味物质种类逐渐增多。本研究目前尚未解析预熟化小龙虾在冻藏与复热过程中风味变化机制，后续研究将会继续探索预熟化小龙虾风味形成与调控机理，为工业化生产提供理论依据和技术参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] TENG Zongna, HE Xiaoyue, WANG Liuqing, et al. Effect of liquid nitrogen freezing on maintaining the quality of crayfish during freeze-thaw cycles: Muscle structure and myofibrillar proteins properties[J]. Foods, 2025, 14(2): 279.

[2] 中国小龙虾产业发展报告(2025)[J]. 中国水产, 2025(7): 10−16. [China crayfish industry development report(2025)[J]. Chinese Aquatic Products, 2025(7): 10−16.]

[3] ZHANG Jiahui, CAO Jun, PEI Zhisheng, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS[J]. Food Research International, 2019, 123: 217−225.

[4] LI Jinlin, ZHANG Quan, PENG Bin, et al. Exploration on the quality changes and flavour characteristics of freshwater crayfish (*Procambarus clarkia*) during steaming and boiling[J]. LWT, 2023, 190: 115582.

[5] 张锦雯. 冷冻熟制小龙虾加工过程微生物消长规律及品质影响研究[D]. 无锡：江南大学, 2022. [ZHANG Jinwen. The

growth and decline of microorganisms and the influence on quality of frozen cooked crayfish during processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[6] 刘志杰. 预煮猪肉糜冷藏-复热过程中典型挥发性脂质氧化产物及晚期糖化终末产物的形成规律[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [LIU Zhijie. Formation of typical volatile lipid oxidation products and advanced glycation end products in precooked ground pork during cold storage-reheating[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
[7] 张权. 小龙虾蒸煮过程中品质特性变化及风味形成机理初探[D]. 南昌: 江西师范大学, 2023. [ZHANG Quan. Study on the quality characteristics and flavor formation mechanism of crayfish during the steaming and boiling[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.]
[8] 刘慧雯, 孙冲, 孙德军, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻分析熟制小龙虾冻藏过程中风味动态变化[J]. 肉类研究, 2024, 38(8): 33−41. [LIU Huiwen, SUN Chong, SUN Dejun, et al. Analysis of dynamic changes in the flavor of cooked crayfish during frozen storage by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Meat Research, 2024, 38(8): 33−41.]
[9] 卢曜昆, 李强, 朱雅情, 等. 冷冻方式对小龙虾蛋白性质和结构的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(3): 49−55. [LU Yaokun, LI Qiang, ZHU Yaqing, et al. Effects of freezing methods on the properties and structure of myofibrillar proteins from crayfish (*Procambarus clarkii*)[J]. Meat Research, 2024, 38(3): 49−55.]
[10] 潘扬, 李涵, 张莹, 等. 解冻、复热方式对冻藏预制调理黄鳝品质及挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(10): 222−230. [PAN Yang, LI Han, ZHANG Ying, et al. Effect of thawing and reheating methods on quality and volatile flavor of frozen prepared *Monopterus albus*[J]. Food Science, 2025, 46(10): 222−230.]
[11] WANG Hao, YU Chengwei, SUN Yanan, et al. Characterization of key off-odor compounds in grass carp cube formed during room temperature storage by molecular sensory science approach[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102011.
[12] LI Jinlin, ZHOU Hanhao, XU Linju, et al. Exploration of the changes in volatile flavor compounds of low salt dry-curing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) blocks during cold storage detected by E-nose, HS-SAFE-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. LWT, 2025, 218: 117470.
[13] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[14] 顾赛麒, 戴王力, 鲍嵘斌, 等. 煮制工艺对中国对虾品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 276−283. [GU Saiqi, DAI Wangli, BAO Rongbin, et al. Effect of cooking on the quality of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Food Science, 2020, 41(2): 276−283.]
[15] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. GC-MS 结合电子鼻分析复热对亚油酸-木糖-半胱氨酸体系挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 166−172. [ZHANG Zheqi, ZANG Mingwu, ZHANG Kaihua, et al. Effect of reheating on volatile constituents from linoleic acid-xylose-cysteine reaction system as analyzed by GC-MS and electronic nose[J]. Food Science, 2020, 41(12): 166−172.]
[16] LI Chujun, TU Zongcai, LIU Wenyu, et al. Flavor substances of low-valued red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) hydrolysates derived from double enzymatic systems[J]. Food Research International, 2023, 165: 112461.
[17] 段秀霞, 施文正, 汪之和, 等. 熟制与贮藏对凡纳滨对虾挥发性成分的影响[J]. 水产学报, 2017, 41(6): 971−983. [DUAN Xiuxia, SHI Wenzheng, WANG Zhihe, et al. Effects of cooking and storage on the volatile compounds of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(6): 971−983.]
[18] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG Jianan, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.
[19] PAN Qiong, SHAO Xuefei, XIAO Qing, et al. Revealing the flavor changes of spiced beef under different thermal treatment temperatures: A complementary approach with GC-IMS and GC-O-MS[J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143074.
[20] 潘晓倩, 张顺亮, 臧明伍, 等. 即食肉丸短期贮藏过程中脂质氧化产物与挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 244−251. [PAN Xiaoqian, ZHANG Shunliang, ZANG Mingwu, et al. Analysis of lipid oxidation products and volatile flavor compounds in instant meatballs during short-term storage[J]. Food Science, 2023, 44(12): 244−251.]
[21] 赵茜, 陈剑, 李欢, 等. 预制水产品风味劣变机制及其调控方式研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 162−168. [ZHAO Qian, CHEN Jian, LI Huan, et al. Research progress on the mechanism and regulation methods of flavor deterioration in prepared aquatic products[J]. Food Science, 2023, 44(17): 162−168.]
[22] 李丝丝, 曹少谦, 孟珂, 等. 鱼粉加工压榨液经酶解发酵后的风味变化[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 770−778. [LI Sisi, CAO Shaoqian, MENG Ke, et al. Flavor change of pressed liquor in the processing of fish meal after enzymatic hydrolysis and fermentation[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(4): 770−778.]
[23] 刘常园, 方东路, 汤静, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 分析复热对香菇汤 挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(4): 46−53. [LIU Changyuan, FANG Donglu, TANG Jing, et al. Based on electronic nose and GC-IMS to study effect of reheating on volatile flavor substances of *Lentinus edodes* soups[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(4): 46−53.]
[24] TAN Yunfei, GUAN Xinyu, BAI Xufeng. Revealing the protective role of the shell in maintaining muscle quality of crayfish (*Procambarus clarkii*) during frozen storage[J]. LWT, 2025, 233: 118513.
[25] 桑燕菲. 小龙虾冷冻贮藏期间虾肉品质变化及蛋白变性机理[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022. [SANG Yanfei. Quality changes and protein denaturation mechanism of crayfish meat during frozen storage[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
[26] 杜柳, 邱文兴, 刘栋银, 等. 不同热加工方式熟化对克氏原螯虾理化性质和风味的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(5): 49−56. [DU Liu, QIU Wenxing, LIU Dongyin, et al. Effects of different cooking methods on the physicochemical properties and flavor of crawfish (*Procambarus clarkia*)[J]. Meat Research, 2023, 37(5): 49−56.]
[27] 孙灵霞, 李苗云, 靳春杰, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析不同品牌道口烧鸡的香气差异性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 238−243. [SUN Lingxia, LI Miaoyun, JIN Chunjie, et al. Analysis of the aroma of different brands Daokou stewed chicken by electronic nose and GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 238−243.]
[28] 崔柯鑫, 孙永, 佟利惠, 等. 不同干制方式对蓝点马鲛脂肪氧化和挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 10−20. [CUI Kexin, SUN Yong, TONG Lihui, et al. Effects of dif-

ferent drying methods on lipid oxidation and volatile flavor components of Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 10−20.]

[29] HU Mengyue, WANG Shanyu, LIU Qi, et al. Flavor profile of dried shrimp at different processing stages[J]. LWT, 2021, 146: 111403.

[30] CAI Haotian, TAO Lei, LIU Yu, et al. Effect of different pretreatments on the hydrolysis efficiency and flavor of squid viscera (*Dosidicus gigas*)[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 36: 100919.

[31] 解万翠, 卢宽, 于靖, 等. 水产品香气研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 11−21. [XIE Wancui, LU Kuan, YU Jing, et al. Research progress on aroma of aquatic products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 11−21.]

[32] ZHU Yifan, CHEN Jing, CHEN Xingjie, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compounds: Application to fresh and dried eel (*Muraenesox cinereus*)[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 2257−2270.

[33] 赵洪雷, 尹一鸣, 陈义莹, 等. 不同产地虾酱风味特征及差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(10): 194−200. [ZHAO Honglei, YIN Yiming, CHEN Yiying, et al. Flavor characteristics of shrimp pastes from different regions and variance analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(10): 194−200.]

[34] FU Yu, LIU Jing, ZHANG Wei, et al. Exopeptidase treatment combined with Maillard reaction modification of protein hydrolysates derived from porcine muscle and plasma: Structure-taste relationship[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125613.

[35] 梁淇雅, 刘燕, 白杨, 等. 基于 OPLS-DA 模型分析不同冻结方式对青椒肉丝预制菜挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 342−352. [LIANG Yaqi, LIU Yan, BAI Yang, et al. Effects of different freezing methods on the volatile flavor compounds of shredded pork with green pepper preprepared dishes based on OPLS-DA model analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 342−352.]

[36] 岳凤丽, 黄忠民, 白杨, 等. 基于电子鼻和 GC-IMS 分析香茅提取物对黄河鲤鱼脱腥效果的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 310−320. [YUE Fengli, HUANG Zhongmin, BAI Yang, et al. Effects of lemongrass extract on the deodorization of Yellow River carp based on electronic nose and GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 310−320.]

[37] LI Jinlin, PENG Bin, HUANG Li, et al. Association between flavors and microbial communities of traditional *Aspergillus*-Douchi produced by a typical industrial-scale factory[J]. LWT, 2023, 176: 114532.