

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80368

蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质的影响

涂剑秋^{1,2} 付文军^{1,2} 杨晓聪^{1,2} 井理想^{1,2} 朱 静^{1,2} 李建芳^{1,2}

(1. 信阳农林学院食品科学与工程学院, 河南 信阳 464000;

2. 信阳市健康食品开发与营养调控重点实验室, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的] 探究蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质及色泽的影响。[方法] 采用气相色谱—离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)结合色差分析, 研究 0, 4.4%, 8.8%, 13.2%, 17.6%, 22.0% 蒜蓉添加量下小龙虾尾的挥发性成分特征及色泽参数(L^* 、 a^* 、 b^* 值), 通过主成分分析(principal component analysis, PCA)解析风味差异。[结果] 色差分析显示, 添加蒜蓉可显著降低 L^* 值(45.69→34.50)和 b^* 值(39.24→29.94) ($P<0.05$), 当添加量>13.2%时 a^* 值差异显著($P<0.05$)。GC-IMS共鉴定53种挥发性物质, 总含量随蒜蓉量增加呈梯度递增(22%组最高, 达峰值18 749; 空白组最低, 10 758)。其中苧烯、2-乙基丁酸、2-甲基丁基乙酸酯、异硫氰酸烯丙酯、庚醛为虾肉本底特征物质, 主要风味贡献成分为苧烯、1-庚醇、3-戊烯腈、2, 3-戊二酮、丁二酮和异丙醇。PCA表明, 13.2%~17.6%组风味特征显著区别于其他组(PC1贡献率76%)。[结论] 蒜蓉添加量8.8%~13.2%时小龙虾尾呈现最佳风味与色泽平衡, 过量添加(>17.6%)会导致醛类过度积累及褐变加剧。

关键词: 小龙虾尾; 气相色谱—离子迁移谱; 挥发性风味物质; 主成分分析; 褐变机制

Effect of garlic paste addition on volatile flavor substances in crayfish tails

TU Jianqiu^{1,2} FU Wenjun^{1,2} YANG Xiaocong^{1,2} JING Lixiang^{1,2} ZHU Jing^{1,2} LI Jianfang^{1,2}

(1. School of Food Science and Technology, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China;

2. Xinyang Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of garlic paste addition on volatile flavor substances and color attributes of crayfish tails, and provide a theoretical basis for flavor standardization in industrial production. [Methods] This paper adopts gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combined with colorimetric analysis to study the characteristics of volatile components and color parameters (L^* , a^* , b^* values) of crayfish tails under garlic paste additions of 0%, 4.4%, 8.8%, 13.2%, 17.6%, and 22.0%. Principal component analysis (PCA) is applied to analyze flavor differences. [Results] Colorimetric analysis reveals that garlic paste addition significantly decreases L^* from 45.69 to 34.50 and b^* from 39.24 to 29.94 ($P<0.05$), while a^* values show a significant difference under the garlic paste addition of more than 13.2% ($P<0.05$). A total of 53 volatile substances are identified by GC-IMS, and their total content increases gradually with the rising garlic paste addition (highest value in the 22% group at 18 749 and lowest value in the control group at 10 758). Camphene, 2-ethylbutanoic acid, 2-methylbutyl acetate, allyl isothiocyanate, and heptanal are identified as intrinsic flavor markers of crayfish meat. Key contributors to flavor include camphene, 1-heptanol, 3-pentenitrile, 2,3-pentanedione, diacetyl, and isopropanol. PCA shows that the 13.2%~17.6% group exhibits significantly different flavor characteristics from other groups (PC1 contribution rate of 76%). [Conclusion] Under the garlic paste addition of 8.8%~13.2%, the optimal balance between flavor and color attributes is achieved, while excessive addition of more than 17.6% results in aldehyde overaccumulation and accelerated browning.

Keywords: crayfish tail; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); volatile flavor substance; principal component analysis (PCA); browning mechanism

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(编号: 25B550012); 大别山实验室重点课题研发专项(编号: DMLP003)

通信作者: 李建芳(1979—), 女, 信阳农林学院教授, 硕士。E-mail: 354261477@qq.com

收稿日期: 2025-04-18 改回日期: 2026-01-20

引用格式: 涂剑秋, 付文军, 杨晓聪, 等. 蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 196-205.

Citation: TU Jianqiu, FU Wenjun, YANG Xiaocong, et al. Effect of garlic paste addition on volatile flavor substances in crayfish tails[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 196-205.

小龙虾作为中国重要的淡水经济物种,其制品的风味品质直接影响消费者接受度与产业价值^[1]。蒜蓉作为一种常用调味料,其含有的硫化物可与小龙虾肉质中的蛋白质和脂肪发生化学反应,形成独特的风味^[2]。然而,工业化生产中蒜蓉添加量的经验性操作易导致产品风味波动,同时高温烹饪下过量蒜蓉可能通过美拉德反应及脂质氧化引发非酶褐变,导致制品色泽劣变^[3]。因此,系统解析蒜蓉添加量对小龙虾风味—色泽的协同调控机制的研究具有重要意义。

近年来,针对小龙虾风味的研究虽有涉及,但多聚焦于不同加工工艺或保鲜技术对风味的影响^[4-5],对于调味料(特别是蒜蓉)“剂量—效应”的系统性研究尚有不足。现有文献多侧重于单一加工参数,或采用传统感官评价及单一化学指标分析,难以全面揭示挥发性风味物质谱的动态变化与产品色泽参数(L^* 、 a^* 、 b^* 值)之间的复杂内在关联和协同调控机制^[6]。尽管气相色谱—离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术凭借其高灵敏度、高通量及无需复杂前处理的优势,已在水产品风味分析中展现出巨大潜力,但将其应用于系统构建“调味料剂量—风味响应模型”,并结合色差分析以综合评价调味效果的研究,尤其是在蒜香小龙虾产品上尚未见深入报道。

研究拟整合 GC-IMS 技术与色差同步分析方法,系统构建蒜蓉添加梯度(0, 4.4%, 8.8%, 13.2%, 17.6%, 22.0%)与蒜香小龙虾尾挥发性风味物质谱及色泽参数之间的定量响应关系模型,通过主成分分析(principal component analysis, PCA)深入解析关键挥发性物质(特别是与风味和褐变密切相关的醛类、酮类等化合物)的形成、积累规律及其与色泽变化的剂量依赖性,以期揭示蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质与色泽协同影响的分子机制。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻小龙虾尾、食用油、盐、甘蔗白糖、料酒、香醋和生姜:市售。

1.2 主要仪器与设备

色差仪:LS173型,上海电子光学仪器厂;
流变仪:MCR102e型,上海安东帕商贸有限公司;
气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS):FlavourSpec型,德国 GAS 公司;

电子分析天平:CP214型,上海良平仪器仪表有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 小龙虾尾的处理与烹饪 参照沙小梅等^[7]的方法并优化,具体步骤:

(1) 原料预处理:取市售冷冻小龙虾尾(已去头、开背、去肠线),室温下解冻(约 25℃, 30 min),用冰水(0~

4℃)漂洗 3 次,沥干备用。将蒜瓣去皮后用多功能研磨机打成均匀糊状(粒径 ≤ 0.5 mm),过 80 目筛备用。将 1 200 g 小龙虾尾分为 6 组,蒜蓉添加量分别为小龙虾尾质量的 0(空白组),4.4%, 8.8%, 13.2%, 17.6%, 22.0%。

(2) 样品制备:小龙虾尾先用(180 $\pm$ 5)℃的热油炸制 1 min 使其表面微金黄,捞出沥油(30 s)。起锅,加入食用油(50 g)烧热,依次加入生姜片(10 g)、葱白(15 g)爆香,按比例加入蒜蓉,中火爆炒 30 s 至蒜香溢出。放入炸制虾尾,加入料酒(20 mL)、生抽(15 mL)、白砂糖(10 g)、盐(5 g)及适量清水(没过虾尾 1/2),大火煮沸后转小火焖煮 8 min,最后大火收汁至汤汁浓稠(约剩余 50 mL),自然冷却至室温(约 25℃)。冷却后真空包装(厚度 0.08 mm 聚乙烯袋,真空度 ≤ -0.08 MPa),于 4℃冷藏 24 h 待测。

1.3.2 色差分析 采用色差仪测定虾尾的第二腹节,以 L^* (亮度)、 a^* (红绿值, + a 为红色, - a 为绿色)、 b^* (黄蓝值, + b 为黄色, - b 为蓝色)值作为指标^[8]。每个样品测定 5 次,取平均值。测定前用标准白板($L^*=95.0$, $a^*=0.0$, $b^*=0.0$)校准仪器,室温(约 25℃)下操作,避免强光直射。

1.3.3 挥发性风味成分测定 采用 GC-IMS 技术,参照葛文娜等^[9-11]的方法并优化。样品前处理:准确称取 2.000 g 小龙虾尾肉于 20 mL 顶空瓶中,密封。孵化条件:60℃恒温振荡(转速 500 r/min, 振幅 5 mm)10 min,进样针预热至 85℃,抽取 500 μ L 顶空气体,平行进样 3 次,间隔时间 30 s。色谱条件:选用 FS-SE-54-CB-1 毛细管柱(15 m $\times$ 0.53 mm,膜厚 1.0 μ m);柱温 40℃(恒温);载气为氮气(纯度 $\geq 99.999\%$),流量梯度:0~2 min 保持 2 mL/min, 2~10 min 线性升至 10 mL/min, 10~20 min 阶梯式升至 100 mL/min, 20~30 min 稳定于 150 mL/min。离子迁移谱条件:漂移管温度 45℃;检测模式为正离子模式;数据采集时间 30 min,分辨率 ≥ 1 000(FWHM)。

1.4 数据处理

使用 Origin 2022 作图, SPSS 26 进行数据分析;利用 GC-IMS 软件-VOCaI 和 CAS 库官方网站(www.cas.org)对挥发性风味与物质进行定性与定量分析。

2 结果与分析

2.1 蒜蓉添加量对小龙虾尾色差的影响

如表 1 所示,随着蒜蓉添加量从 0 增至 22.0%, L^* 值从 45.69 降至 34.50, a^* 值从 43.37 降至 36.86(17.6% 组最低为 35.58), b^* 值从 39.24 降至 29.94, 表明蒜蓉的添加显著降低了小龙虾尾的亮度、红度和黄度($P<0.05$)。在烹饪过程中,高温烹饪促使虾青素氧化,同时脂质氧化产生醛类等产物,引发非酶褐变反应^[12]。脂质氧化产生醛类等产物引发的非酶褐变反应主要是因为脂质氧化生成的氢过氧化物中间体降解产物与蛋白质结合,形成褐色色素^[13],导致 L^* 、 a^* 、 b^* 值下降^[1,14], L^* 、 a^* 、 b^* 值下降与挥发性风味物质

检测中的醛类、酮类等物质变化相互印证。

具体来看,蒜蓉添加量 8.8% 组与 13.2% 组、13.2% 组与 17.6% 组的 L^* 值无显著差异 ($P>0.05$), 但均显著低于空白组 ($P<0.05$), 这与欧阳灿等^[15]发现的趋势相似。烹饪时大火收汁会使虾尾蛋白变性, 疏水基团暴露, 导致保水率下降^[16-18], 而失水又会促使 L^* 值降低。 a^* 值方面, 4.4% 组、8.8% 组与空白组无显著差异 ($P>0.05$), 而 $\geq 13.2\%$ 组显著降低 ($P<0.05$), 表明较高蒜蓉添加量对红度影响更显著。 b^* 值在 4.4% 组、8.8% 组、13.2% 组差异不显著, 17.6% 组与 22.0% 组亦无显著差异, 但空白组与 22.0% 组差异显著 ($P<0.05$), 进一步说明蒜蓉添加量对 L^* 、 b^* 值影响显著。 综上, 添加蒜蓉通过促进非酶褐变及蛋白质结构改变, 显著影响小龙虾尾色泽, 且对 L^* 、 b^* 值的影响更为持续和显著。

表 1 蒜蓉添加量对小龙虾尾色差的影响[†]
Table 1 Effect of garlic paste addition on color difference of crayfish tails

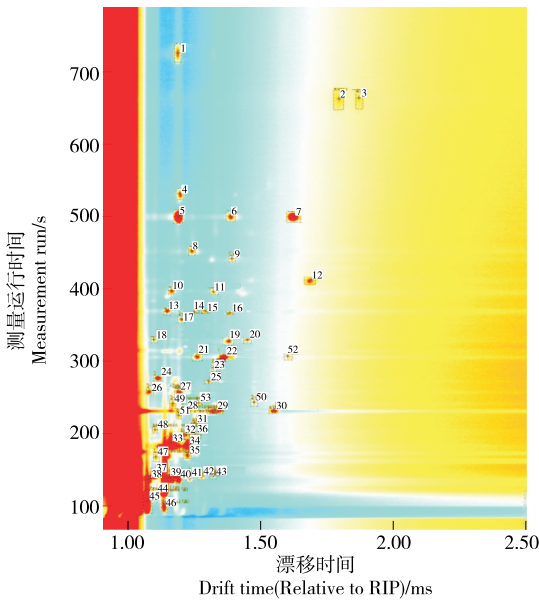
蒜蓉添加量/%	L^*	a^*	b^*
0	45.69±0.84 ^a	43.37±1.89 ^a	39.24±0.69 ^a
4.4	43.57±1.19 ^b	41.50±1.37 ^{ab}	37.42±0.99 ^b
8.8	40.73±0.41 ^c	40.96±0.88 ^{ab}	35.78±0.86 ^b
13.2	38.93±0.75 ^{cd}	39.09±0.68 ^{bc}	34.85±1.48 ^b
17.6	37.49±1.39 ^d	35.58±2.09 ^d	32.01±1.03 ^c
22.0	34.50±1.54 ^e	36.86±0.49 ^{cd}	29.94±2.02 ^c

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 蒜蓉小龙虾尾挥发性物质成分分析

2.2.1 蒜蓉小龙虾尾气相离子迁移图 基于 GC-IMS 技术平台, 采用 LAV 数据分析系统并结合 GC-IMS Library 数据库进行定性检索。由图谱特征峰与数据库比对结果可知, 蒜蓉小龙虾尾中共鉴定出 53 种挥发性化合物, 其序号与图 1 中峰位标注一一对应, 详细信息见表 2。根据官能团结构特征, 将蒜蓉小龙虾尾的 53 种挥发性物质划分为酯类、醇类、酮类、醛类、酸类和其他类 6 类, 其以酯类、醛类为主要类别, 同时与醇类、酮类及其他类化合物协同作用, 共同形成蒜蓉小龙虾尾的典型挥发性风味特征。需要说明的是, GC-IMS 中部分化合物会以单体(M)或双聚体(D)形式同时出现, 在表 2 中作为独立条目进行统计。

蒜蓉小龙虾尾挥发性物质中酯类共 11 种, 分别是乙基反式-2-己烯酸酯-M、2-羟基-4-甲基戊酸乙酯-M、丙烯酸丁酯-M、2-甲基丁基乙酸酯-M、异戊酸甲酯-M、异丁酸乙酯-M、甲酸丁酯-M、乙酸乙酯-D、乙酸乙酯-M、乙酸甲酯-M 和异丁酸乙酯-D。酯类是成熟肉制品的典型气味, 是重要的挥发性化合物, 由于其检测阈值低, 对风味的影响较大^[19]。主要由加热过程中脂质化产生的醇或调料中



1~53 分别对应表 2 中的挥发性成分
图 1 蒜蓉小龙虾尾气相离子迁移图
Figure 1 GC-IMS of garlic crayfish tails

带来的醇与游离脂肪酸的相互作用产生^[20], 熟制使得果香气味减弱而油脂气味有所增强^[21]。

醇类化合物有 8 种, 分别是 1-庚醇-M、2, 3-丁二醇-M、2-丁醇-M、1-丙醇-M、异丙醇-M、乙醇-M、3-甲基-1-戊醇-M 和 1-戊醇-M。醇类化合物大部分为直链醇, 是由不饱和脂肪酸氧化形成的, 部分支链醇则可能是由于氨基酸 Strecker 降解反应生成^[22]。也有可能是制备过程中添加的香料, 直链饱和醇的气味阈值高, 对风味的影响小, 而不饱和醇物质阈值较低^[23]。大多数不饱和醇类物质具有很好的花果香和草木香气。

酮类化合物有 8 种, 分别是四氢噻吩-3-酮-M、2-环己烯-1-酮-M、异丙叉丙酮-M、3-羟基-2-丁酮-M、2, 3-戊二酮-M、丁二酮-M、3-甲基-2-戊酮-D 和 3-甲基-2-戊酮-M。酮类化合物一般由不饱和脂肪酸氧化、脱羧基作用产生, 部分酮类物质来源于香辛料, 对肉类整体风味有重要作用^[24]。主要贡献于甜香和果香, 且碳链越长, 花香味越浓郁^[25]。

醛类化合物有 8 种, 分别是 4-甲基苯甲醛-M、庚醛-M、己醛-M、糖醛-M、3-甲基-2-丁烯醛-M、2-甲基戊醛-M、甲基丙烯醛-M 和丁醛-M。醛类化合物通常是由脂质热降解或氨基酸 Strecker 降解产生的, 也可由多不饱和脂肪酸氧化生成氢过氧化物, 也可由多不饱和脂肪酸氧化生成的氢过氧化物裂解生成, 它们具有很低的阈值和特征性气味, 因此对虾肉的整体香气非常重要^[26]。

酸类化合物有 3 种, 分别是 2-乙基丁酸-M、2-甲基丁酸-M 和丙酸-M。酸类物质会呈现一些不愉快的气味, 酸

表2 蒜蓉小龙虾尾挥发性成分定性分析[†]
Table 2 Qualitative analysis of volatile components of garlic crayfish tails

序号	中文名称	CAS	保留指数	保留时间/s	序号	中文名称	CAS	保留指数	保留时间/s
1	4-甲基苯甲醛-M	C104870	1 076.2	725.767	28	2-甲基戊醛-M	C123159	751.7	231.620
2	乙基反式-2-己烯酸酯-M	C27829727	1 043.3	662.400	29	3-羟基-2-丁酮-M	C513860	751.6	231.571
3	2-羟基-4-甲基戊酸乙酯-M	C10348477	1 044.1	663.893	30	异丁酸乙酯-M	C97621	751.6	231.507
4	四氢噻吩-3-酮-M	C1003049	973.3	531.470	31	吡啶-M	C110861	730.8	213.763
5	苡烯-M	C79925	957.6	499.946	32	甲酸丁酯-M	C592847	711.2	198.318
6	1-庚醇-M	C111706	957.8	500.208	33	3-戊烯腈-M	C16529661	695.5	186.707
7	苡烯-D	C79925	958.1	500.811	34	2,3-戊二酮-M	C600146	691.9	184.166
8	2-乙基丁酸-M	C88095	932.0	452.553	35	三乙胺-M	C121448	662.6	169.240
9	2-环己烯-1-酮-M	C930687	925.8	441.701	36	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环-M	C3390123	711.0	198.140
10	二乙基亚硝胺-M	C55185	898.5	397.141	37	乙酸乙酯-D	C141786	601.1	142.775
11	庚醛-M	C111717	897.5	395.637	38	乙酸乙酯-M	C141786	585.0	136.529
12	丙烯酸丁酯-M	C141322	908.1	412.226	39	丁二酮-M	C431038	587.5	137.481
13	2-甲基-3-呋喃硫醇-M	C28588741	877.9	368.003	40	乙酸甲酯-M	C79209	583.1	135.816
14	己腈-M	C628739	877.4	367.383	41	甲基丙烯醛-M	C78853	587.6	137.529
15	2-甲基丁基乙酸酯-M	C624419	878.3	368.461	42	丁醛-M	C123728	594.0	139.976
16	异硫氰酸烯丙酯-M	C57067	876.6	366.211	43	2-丁醇-M	C78922	595.9	140.710
17	2-甲基丁酸-M	C116530	870.2	357.953	44	1-丙醇-M	C71238	528.7	116.853
18	甲基吡嗪-M	C109080	847.3	329.519	45	异丙醇-M	C67630	493.4	105.965
19	2-甲基吡嗪-D	C109080	846.4	328.465	46	乙醇-M	C64175	461.1	96.911
20	乙苯-M	C100414	847.1	329.205	47	1,2-二甲氧基乙烷-M	C110714	658.4	167.259
21	己醛-M	C66251	827.4	306.631	48	丙酸-M	C79094	719.7	204.904
22	2,3-丁二醇-M	C513859	827.9	307.197	49	3-甲基-2-戊酮-M	C565617	761.8	240.793
23	糖醛-M	C98011	812.7	290.809	50	3-甲基-2-戊酮-D	C565617	763.8	242.650
24	异丙叉丙酮-M	C141797	799.8	277.599	51	异丁酸乙酯-D	C97621	743.8	224.754
25	四氢噻吩-M	C110010	794.6	272.388	52	3-甲基-1-戊醇-M	C589355	827.1	306.299
26	3-甲基-2-丁烯醛-M	C107868	780.2	258.367	53	1-戊醇-M	C71410	762.4	241.324
27	异戊酸甲酯-M	C556241	780.3	258.461					

[†] M代表该物质单聚体形态;D代表该物质是双聚体形态。

类物质含量呈下降趋势,说明虾肉的气味有一定程度的改善。酸类化合物不仅提供酸味,同时提供香气,是独特风味形成过程中不可或缺的物质;其中短链酸形成的脂类物质主要表现为水果香味,长链酸形成的脂类物质主要表现为淡淡的油脂味道^[27]。

其他有机化合物有15种,分别是苡烯-M、苡烯-D、二乙基亚硝胺-M、2-甲基-3-呋喃硫醇-M、己腈-M、异硫氰酸烯丙酯-M、甲基吡嗪-M、2-甲基吡嗪-M、乙苯-M、四氢噻吩-M、吡啶-M、3-戊烯腈-M、三乙胺-M、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环-M和1,2-二甲氧基乙烷-M。该类物质结构类型较为复杂,涵盖萜烯类、含硫化合物及含氮杂环化合物等,整体含量相对较低,但能够通过赋予清香、焙烤香或轻微刺激性气味等特征,与酯类、醛类等主要挥发性成分协同作用,从而丰富蒜蓉小龙虾尾挥发性风味的层次感与复杂度。

2.2.2 蒜蓉小龙虾风味物质主成分分析 对蒜蓉不同添加量的小龙虾尾进行PCA分析,其PC1(76%)与PC2(15%)累计贡献率达91%,超过85%的阈值,表明PC1和PC2能有效捕捉调味小龙虾挥发性物质的主要信息特征^[28]。由图2可知,空白对照组与4.4%组位于左下方,表明二者挥发性风味物质变化较小,具有相似性。这可能是由于低蒜蓉添加量时,蒜蓉与虾肉反应不剧烈,挥发性物质组成变化有限。8.8%组位于左上方,与前两组明显分离,说明此时蒜蓉添加已显著改变风味物质组成。随着添加量增至13.2%和17.6%,样品组移至右上方,与其他组差异更显著,反映出增加蒜蓉添加量促进了更多挥发性物质生成或转化,如醛类、酮类等特征风味物质的积累。22.0%组独自位于右下方,与所有组差异明显,可能是过高的蒜蓉添加量引发了复杂的化学反应,如过度的

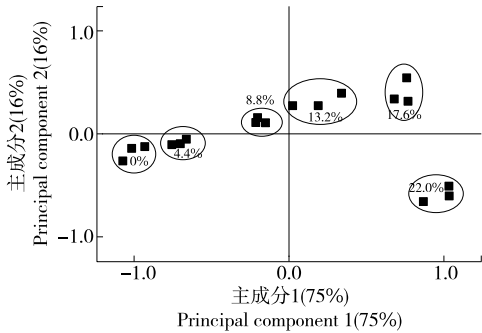


图2 蒜蓉不同添加量小龙虾尾PCA滋味分析图
Figure 2 PCA flavor analysis of crayfish tails with different garlic paste additions

美拉德反应和脂质氧化,生成大量新的挥发性物质,同时抑制了部分原有物质,导致风味特征大幅改变。

结合图3的PCA三维图,同一添加量的3次平行试验分布集中,表明试验重复性好,组内差异小;不同添加量组分分布于不同区域,进一步证实蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质的显著影响。这种差异本质上是蒜蓉中的硫化物、酶类等与虾肉蛋白质、脂肪在加热过程中发生复杂反应的结果,包括美拉德反应、脂质氧化、酯化反应等,这些反应随蒜蓉量增加而加剧,最终导致风味物质组成的剂量依赖性变化。

2.2.3 蒜蓉小龙虾尾挥发性风味物质指纹图谱差异分析 小龙虾尾挥发性风味物质指纹图谱如图4所示,其中颜色深浅代表化合物含量高低(红色为高,蓝色为低)。空白组中1-戊醇、异丁酸乙酯、3-甲基-2-戊酮、2-丁醇、异

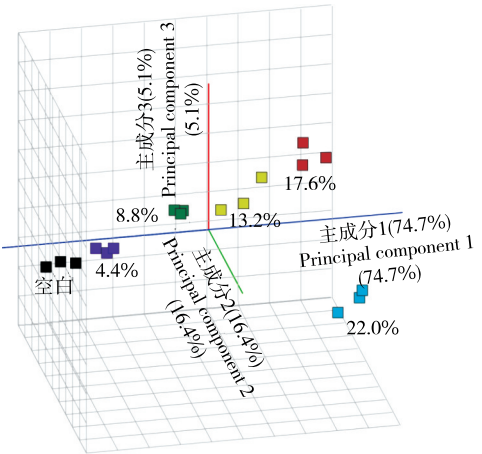


图3 蒜蓉不同添加量小龙虾尾PCA滋味分析的3D平面图
Figure 3 3D plane view of PCA flavor analysis of crayfish tails with different garlic paste additions

硫氰酸烯丙酯等物质被明显检测出来。随着蒜蓉添加量增加,4.4%组和8.8%组中的挥发性风味物质呈减少趋势,可能是加热过程中脂质化产生的醇或调料中带来的醇与游离脂肪酸的相互作用产生,熟制过程使得果香气味减弱而油脂气味增强^[29]。与此同时,2-甲基丁基乙酸酯、异硫氰酸烯丙酯等挥发性物质呈增长趋势,表明添加蒜蓉可能促进了特定酯类与含硫化物的生成^[29]。

当蒜蓉添加量增至13.2%时,2-甲基丁酸、甲基吡嗪、2-甲基戊醛等醛类物质明显显现。醛类物质通常由脂质热降解或多不饱和脂肪酸氧化裂解生成,其浓度增加可能与添加蒜蓉促进脂质氧化反应有关^[30]。而17.6%组和

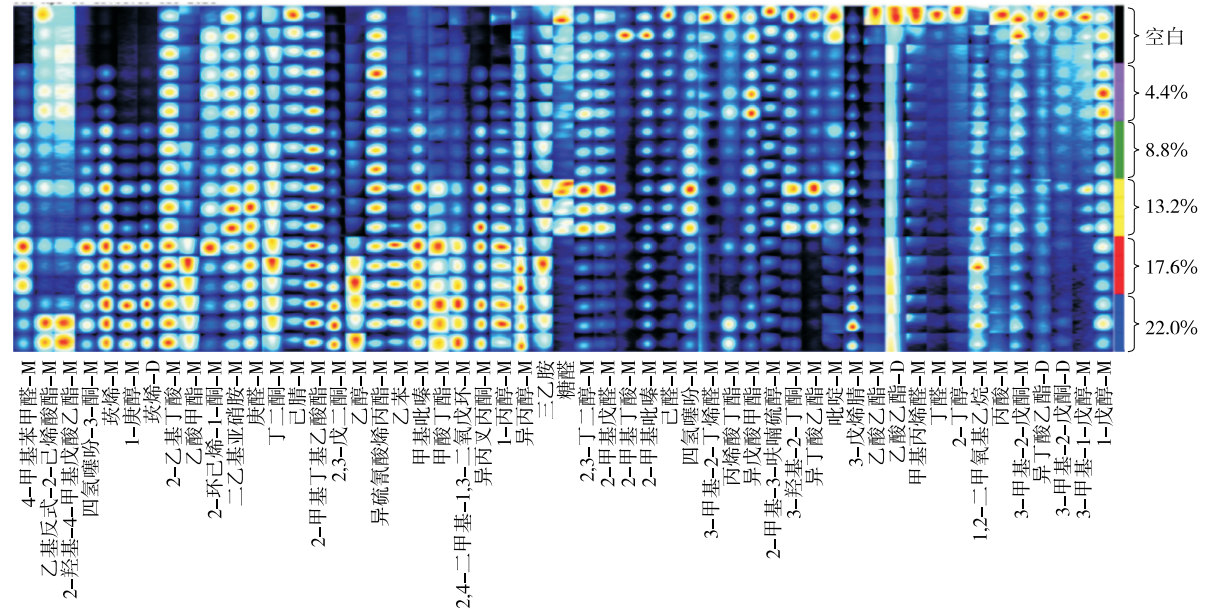


图4 蒜蓉不同添加量小龙虾尾挥发性风味物质的指纹图谱
Figure 4 Fingerprints of volatile flavor substances in crayfish tails with different garlic paste additions

22.0%组中,4-甲基苯甲醛、乙基反式-2-己烯酸酯等酯类、酮类物质大量出现,同时而2-环己烯-1-酮、己醛等醛类及醇类物质减少。这一现象可能是由于高蒜蓉添加量下,多不饱和脂肪酸氧化生成氢过氧化物并进一步裂解,释放出特征性风味物质,掩盖了部分醇类与酸类的气味。

根据上述发现,2-甲基丁基乙酸酯、2-乙基丁酸等物质从空白组至22.0%组始终存在,表明这些物质为虾肉本身固有成分。而醛类等物质浓度随蒜蓉量增加而增大,证实添加蒜蓉可促进此类物质渗入虾肉并富集。此外,糖醛、2,3-丁二醇等物质在蒜蓉添加量增多时先增后减(13.2%后减少),暗示虾肉本身部分挥发性物质会因蒜蓉添加量过高而受抑制。结合肖岚等^[31]的研究,高温烹饪(如爆炒、油炸)会导致蒜氨酸酶失活,阻碍大蒜素等含硫化化合物合成,但促进蒜氨酸等裂解生成乙醛等小分子,进而相互反应生成噻吩等化合物,这与图谱中含硫化化合物的变化趋势相符。

综上所述,蒜蓉添加量通过影响脂质氧化、美拉德反应及物质间相互作用,显著改变小龙虾尾挥发性风味物质组成。不同添加量下,风味物质呈现阶段性变化:低添加量时酯类与含硫化化合物增加,中高添加量时醛类、酮类成为主导,过高添加量则导致部分原有风味物质被掩盖或抑制,最终影响整体风味特征。

2.2.4 蒜蓉小龙虾尾挥发性物质分析 采用GC-IMS技术对蒜蓉不同添加量小龙虾尾样品的挥发性物质进行检测分析。如图5~图6所示,各组间的挥发性物质分布特征存在显著差异。在二维图谱中,横坐标1.0处的红色竖线为归一化处理后的反应离子峰(RIP峰),其两侧的离散信号点代表不同挥发性化合物(单体、二聚体或多聚体形式),信号强度通过色阶梯度(白色表示低浓度,红色表示高浓度)直观反映组分浓度差异。三维图谱中,各组样本点的空间分布距离与其挥发性组分差异程度呈正相关,例如空白组与高添加量组(17.6%,22.0%)的空间分离度较大,表明其挥发性物质构成显著不同。

图6显示,随着蒜蓉添加量的增加,体系中挥发性物质的种类与含量逐渐丰富。这种剂量效应关系的形成与蒜蓉中含硫化化合物的热诱导转化存在一定的剂量效应关系。沙小梅等^[7]研究表明,大蒜素及其降解产物在高温下可通过3种途径影响风味物质生成:①直接裂解产生小分子风味物质;②活化脂质氧化途径,加速不饱和脂肪酸氧化;③参与美拉德反应,产生吡嗪、呋喃等杂环化合物。

结合二维差异图谱,分析出苧烯、1-庚醇、3-戊烯醇、2,3-戊二酮、丁二酮、异丙醇为蒜蓉小龙虾尾代表性风味挥发物质,其他物质在不同添加量下都有不同程度的增减。苧烯作为双环单萜烯类化合物,具有淡淡的樟脑气味,为风味增添独特的萜烯类香气底蕴,增强了层次

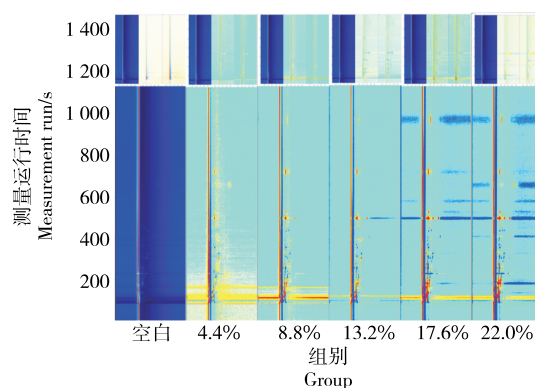


图5 蒜蓉不同添加量小龙虾尾挥发性物质气相色谱离子迁移谱差异图

Figure 5 GC-IMS difference of of volatile substances in crayfish tails with different garlic paste additions

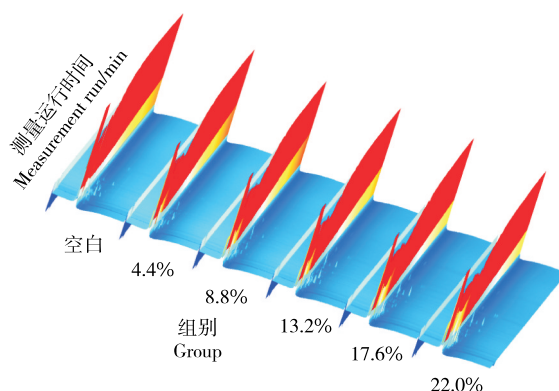


图6 蒜蓉不同添加量小龙虾尾挥发性物质的GC-IMS三维图谱

Figure 6 Three-dimensional GC-IMS of volatile substances in crayfish tails with different garlic paste additions

感^[32];1-庚醇由庚醛分解生成,可为小龙虾尾提供特征性醇类香气;3-戊烯醇具有强烈刺激性味道,通过温度与丙烯酸酯反应生成,其存在可能对整体风味产生刺激性补充;2,3-戊二酮具有奶油、焦糖香气并带坚果底香,可能由蒜香小龙虾中多不饱和脂肪酸酶促分解产生,为风味贡献甜香与坚果基调;丁二酮同样具有奶油香气,可强化奶香特征;异丙醇具有溶剂或酒精气味,由丙烯催化而来,其存在为风味增添了特殊的醇类气息。

这几种物质在蒜蓉不同添加量下有着显著增加的趋势,这也与指纹图谱分析互相印证,6种添加量下样品中的挥发性成分含量存在明显差异,随着蒜蓉添加量从0%增至22.0%,6种关键挥发性物质含量均显著升高。这些物质的积累与脂质氧化和美拉德反应强度同步增强,并在指纹图谱的主成分分析中得到印证,最终赋予小龙虾尾更浓郁的蒜蓉特征风味。Veronika等^[33]采用香气重构

与组分消减试验证实,部分致香组分的生物可及性受虾肉基质中蛋白质-脂质复合体系的竞争性抑制作用。综合来看,蒜蓉小龙虾添加量在 8.8%~13.2% 时呈现出最佳平衡。此范围内,苧烯、2,3-戊二酮等正面风味物质含量适中,对产品风味有积极贡献,而醛类物质尚未过度积累到产生不良气味的程度。超过 17.6% 后,醛类和某些含硫化合物过度积累可能导致风味失衡^[34],这与色差分析中高添加量组的显著褐变相互印证,表明过量蒜蓉不仅影响色泽,也可能对风味产生负面影响。

2.3 蒜蓉小龙虾尾挥发性物质气味特征

由表 3 可知,醛类化合物在蒜蓉小龙虾尾挥发性组分中占比最高,是特征风味的主导贡献因子。6 组样品的醛类相对含量依次为 22.0% 组>17.6% 组>13.2% 组>8.8% 组>4.4% 组>空白组(0%),表明醛类生成量与蒜蓉添加量呈正相关。随着蒜蓉添加量的提高,醛类物质含量相应增加,醛类香气对整体风味的贡献也愈发显著。蒜蓉主要通过 3 种机制影响小龙虾尾挥发性风味物质的组成及气味特征:① 蒜蓉中的大蒜素及其降解产物直接参与风味生成。随着蒜蓉添加量增加,大蒜素热降解产生的

小分子醛类、硫醚等物质直接贡献了特征气味^[35]。同时,大蒜素热分解过程中释放的含硫自由基等活性中间体还可能与虾肉中的氨基酸发生反应,形成噻唑、呋喃硫醇等特征风味化合物^[7],这解释了为何 13.2%~17.6% 组中 2-甲基-3-呋喃硫酚等特征风味物质显著增加。② 蒜蓉添加量影响脂质氧化程度,从而改变醛类物质的含量和种类。黄晓岚等^[11]研究证实,大蒜素热降解释放的含硫自由基可加速不饱和脂肪酸的氧化。随着蒜蓉添加量增加,这一过程被显著强化,导致醛类物质(如己醛、庚醛等)含量持续增加。这些醛类物质在低浓度时为产品提供香气,但在高蒜蓉添加量(>17.6%)时可能过度积累,产生不良气味。③ 蒜蓉添加量通过调节美拉德反应影响产品色泽。雷佳佳等^[36]和黄晓岚等^[11]研究表明,大蒜素热降解产物可促进还原糖与氨基酸的美拉德反应,加速褐变物质生成。这解释了随着蒜蓉添加量增加,小龙虾尾 L^* 值持续下降的现象。特别是,当蒜蓉添加量超过 13.2% 时,美拉德反应明显加剧,导致 a^* 值显著降低,这与沙小梅等^[7]发现的高含量含硫化合物加速虾青素与美拉德反应产物结合导致红色度下降的结果一致。

表 3 蒜蓉小龙虾尾挥发性物质气味特征与定量分析

Table 3 Odor characteristics and quantitative analysis of volatile substances in garlic crayfish tails

序号	中文名称	峰值						贡献气味
		0	4.4%	8.8%	13.2%	17.6%	22.0%	
1	4-甲基苯甲醛-M					11 899		花香和杏仁香气
2	乙基反式-2-己烯酸酯-M						17 963	类似于油漆或溶剂的气味
3	2-羟基-4-甲基戊酸乙酯-M						18 749	水果或花朵的香气
4	四氢噻吩-3-酮-M					11 981		木质的或皮革的气味
5	苧烯-M			3 560	7 583	10 085	11 919	柠檬香味
6	1-庚醇-M					10 256	13 894	类似于酒精或清洁剂的气味
7	苧烯-D					9 568	16 273	柠檬香味
8	2-乙基丁酸-M					12 431	10 697	类似于己酸臭味
9	2-环己烯-1-酮-M					13 951		樟脑/薄荷香味
10	二乙基亚硝胺-M				11 661			类似于烟火或炸药的气味
11	庚醛-M				13 279	8 869		草本的气味
12	丙烯酸丁酯-M	16 883						溶剂或塑料的气味
13	2-甲基-3-呋喃硫醇-M	11 511						呈烤肉、咖啡似香气
14	己腈-M	12 514						苦味和酸味的气味
15	2-甲基丁基乙酸酯-M		25 988	4 896	7 213	11 023	12 948	溶剂或酯类化合物的气味
16	异硫氰酸烯丙酯-M		6 598	10 257	13 868	3 215		刺激性味道
17	2-甲基丁酸-M	12 038						弱醋酸类似的气味
18	甲基吡嗪-M				7 256	11 004	10 062	具有鱼腥味或苦味
19	2-甲基吡嗪-D	13 806						具有鱼腥味或苦味
20	乙苯-M					14 535	3 056	类似于苯的芳香气味
21	己醛-M	12 617						有机溶剂类似的气味

续表3

序号	中文名称	峰值						贡献气味
		0	4.4%	8.8%	13.2%	17.6%	22.0%	
22	2,3-丁二醇-M				13 625			果香或花香气味
23	糖醛-M				13 269			类似于焦糖或烤甜点的香气
24	异丙叉丙酮-M				11 139	8 532	9 617	强烈的化学气味,类似于溶剂或油漆
25	四氢噻吩-M				13 053			具有硫磺的气味
26	3-甲基-2-丁烯醛-M	10 834						具有强烈的、辛辣的气味
27	异戊酸甲酯-M		6 192	5 056				具有水果般的香气
28	2-甲基戊醛-M				12 203			辛辣、刺激性的气味
29	3-羟基-2-丁酮-M				13 311			水果或香料的气味
30	异丁酸乙酯-M	15 503						水果香味
31	吡啶-M	12 539						鱼腥味
32	甲酸丁酯-M					8 789	12 118	具有果子香味
33	3-戊烯腈-M						11 651	类似于苦味或橡胶的气味
34	2,3-戊二酮-M						12 261	朗姆酒或奶酪的香味
35	三乙胺-M				7 482	12 256		鱼腥味或氨味
36	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环-M					6 259	11 255	类似于一些天然的植物香气
37	乙酸乙酯-D	1 189						具有一种水果般的气味
38	乙酸乙酯-M					10 781	3 619	具有一种水果般的气味
39	丁二酮-M					11 648	8 861	具有奶油香气
40	乙酸甲酯-M					11 948	4 127	香蕉或苹果的气味
41	甲基丙烯醛-M	12 355						辛辣、酸味或烧焦的气味
42	丁醛-M	12 796						醛类的刺激性气味
43	2-丁醇-M	13 245						醇类特有的气味,有时也被形容为类似于酒精或溶剂的气味
44	1-丙醇-M					7 155	11 054	类似于一些水果或香料的气味
45	异丙醇-M					10 758	8 668	类似于溶剂或酒精的气味
46	乙醇-M					9 223	11 384	类似于葡萄酒或白酒的气味
47	1,2-二甲氧基乙烷-M				3 219	11 074	3 548	类似于水果或花香
48	丙酸-M	11 035						类似于醋的气味
49	3-甲基-2-戊酮-M	11 709						有机溶剂的气味,类似于油漆或溶剂
50	3-甲基-2-戊酮-D	14 785						有机溶剂的气味,类似于油漆或溶剂
51	异丁酸乙酯-D	11 938						水果或甜味的气味
52	3-甲基-1-戊醇-M	16 075			5 793			类似于酒精或溶剂的气味
53	1-戊醇-M	1 598	12 677					类似于酒精或溶剂的气味

3 结论

该研究通过气相色谱—离子迁移谱技术和色差分析系统探究了蒜蓉添加量对小龙虾尾挥发性风味物质的影响。结果表明,蒜蓉添加量为8.8%~13.2%时能够实现风味与感官品质的最佳平衡,既显著增强风味物质的丰度,又能保持产品色泽的稳定性。随蒜蓉添加量增加, L^* 值与 b^* 值呈显著降低趋势,而 a^* 值在添加量超过13.2%后才表现出明显变化,这一发现阐明了不同添加量区间对产品

色泽的差异性影响机制。通过气相色谱—离子迁移谱技术共鉴定出53种挥发性成分,其中醛类物质(尤其是乙醛、丙醛和丁醛)作为关键风味贡献者,随蒜蓉添加量增加而显著提升,成为形成特征风味的核心成分。此外,该研究证实了蒜蓉与小龙虾尾中的蛋白质、脂质之间发生的科学反应机制,阐明了这些反应对产品色泽和风味特性的综合影响。后续研究可进一步探讨不同烹饪工艺、虾肉基质与蒜蓉风味释放的相互作用机制,并开展感官评价以验证气相色谱—离子迁移谱技术分析结果与实际

风味的关联性。

参考文献

- [1] WANG J Q, YE J W, ZHANG Z X, et al. Comparison of the nutrient value, nonspecific immunity, and intestinal microflora of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in different culture modes[J]. Aquaculture Reports, 2023, 31: 101683.
- [2] ZHOU M Z, LIU D Y, QIU W X, et al. Lipidomics and GC-MS analyses of key lipids for volatile compound formation in crayfish meat under different thermal processing treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 189: 115522.
- [3] TAN H Y, HUANG Q, YU J Y, et al. Analysis of factors affecting the browning of crayfish hepatopancreas after high-temperature sterilization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117792.
- [4] XU W S, YANG Q F, LI D Y, et al. Elevating sensory quality through a dual-acid preservation strategy in ready-to-eat crayfish (*Procambarus clarkii*)[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142587.
- [5] XU W S, YANG Q F, LI D Y, et al. Elucidating the effects of precooked treatments on the quality attributes of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*): insights from water boiling vs. microwaving[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101692.
- [6] 杜文博. 气相离子迁移谱法在羊奶粉和驴肉鉴别分析中的应用[D]. 保定: 河北农业大学, 2019: 11-18.
DU W B. Application of gas phase ion mobility spectrometry in the identification of goat milk powder and donkey meat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019: 11-18.
- [7] 沙小梅, 蒋文丽, 李鑫, 等. 不同烹饪方式小龙虾的风味特征分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(13): 288-296.
SHA X M, JIANG W L, LI X, et al. Analysis of flavor characteristics of *Procambarus clarkia* in different cooking methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(13): 288-296.
- [8] 鲁淑彦, 迟海, 李学英, 等. 含水量对软烤虾制品品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 86-90.
LU S Y, CHI H, LI X Y, et al. Effect of water content on the quality change of roast shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 86-90.
- [9] 葛文娜. 气相色谱—离子迁移谱在食品风味物质检测中的应用研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(19): 2 431-2 433.
GE W N. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in the detection of food flavor substances[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2022, 32(19): 2 431-2 433.
- [10] 张蓝月, 孙万成, 罗毅皓. 基于气相色谱—离子迁移谱分析不同地区羊肉的挥发性风味化合物[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 265-272.
ZHANG L Y, SUN W C, LUO Y H. Analysis of volatile flavor compounds in mutton from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 265-272.
- [11] 黄晓岚, 雷佳佳, 黄万一, 等. 不同热加工方式对小龙虾虾黄理化特性、挥发性风味物质和感官品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 126-136.
HUANG X L, LEI J J, HUANG W Y, et al. Effects of different thermal processing methods on physicochemical properties, volatile flavor substances and sensory quality of crayfish hepatopancreas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 126-136.
- [12] 赵阳美瑾, 林徐, 李雨羲, 等. 水产品脂质与蛋白质氧化的相互作用及其品质影响的研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(2): 360-368.
ZHAO Y M J, LIN X, LI Y X, et al. Research progress on the interaction between lipid and protein oxidation in aquatic products and its impact on their quality: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024, 39(2): 360-368.
- [13] 王兆明, 贺稚非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 295-301.
WANG Z M, HE Z F, LI H J. A review of the effect of lipid and protein oxidation on meat quality and their interrelationship[J]. Food Science, 2018, 39(11): 295-301.
- [14] FAN Y C, YU M M, LI D Y, et al. Effects of non-enzymatic browning and lipid oxidation on color of ready-to-eat abalone during accelerated storage and its control[J]. Foods, 2023, 12(7): 1 514.
- [15] 欧阳灿, 白辰雨, 顾泽鹏, 等. 大蒜粉对鸭肉午餐肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 56-63.
OUYANG C, BAI C Y, GU Z P, et al. Effect of garlic powder on duck luncheon meat quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 56-63.
- [16] 李桢桢. 冷链流通中温度波动对南美白对虾色泽和质构的影响及其品质调控[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023: 15-16.
LI Z Z. Quality control and effect of temperature fluctuation on color and texture of *Litopenaeus vannamei* during cold chain circulation[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023: 15-16.
- [17] 郑尧, 邱泽慧, 王锡昌. 冻藏肉及其制品中蛋白氧化的研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 331-341.
ZHENG Y, QIU Z H, WANG X C. Progress on protein oxidation in meat and meat products during frozen storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 331-341.
- [18] LI Z H, HE Q Y, LAI J X, et al. Effect of stepwise cooking on the water-retention capacity and protein denaturation degree of chicken breast[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 38: 101012.
- [19] 邓琬麒, 黄楠岚, 周衡刚, 等. 不同包装方式对即食香肠的保鲜效果比较[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 10-17.
DENG W Q, HUANG N L, ZHOU H G, et al. Comparison of fresh-keeping effects of different packaging methods on ready-to-eat sausage[J]. Food Research and Development, 2022, 43

- (6): 10-17.
- [20] 杨祺福, 徐文思, 胡思思, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 的小龙虾加工水煮液中挥发性风味成分萃取条件优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 57-63.
- YANG Q F, XU W S, HU S S, et al. Optimization of extraction conditions for volatile flavor compounds in crayfish boiled liquid based on HS-SPME-GC-MS[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 57-63.
- [21] 负三月, 邱伟强, 蒋晨毓, 等. 凡纳滨对虾虾肉和虾头中风味物质的比较[J]. 水产学报, 2017, 41(6): 907-918.
- YUN S Y, QIU W Q, JIANG C Y, et al. Comparison of flavor compounds in meat and head of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(6): 907-918.
- [22] 全爽, 顾泽茂, 王陈, 等. 不同包装方式对香酥虾球品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 296-307.
- QUAN S, GU Z M, WANG C, et al. Effect of different packaging methods on the quality of crispy shrimp balls[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 296-307.
- [23] 胡科娜, 谷贵章, 高兴杰, 等. 果糖和葡萄糖对真空油炸鹰爪虾风味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 216-227.
- HU K N, GU G Z, GAO X J, et al. The effect of fructose and glucose on the flavor of vacuum-fried hawk-claw shrimp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 216-227.
- [24] 李素, 周慧敏, 赵冰, 等. 卤汤牛肉贮藏过程中挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 203-209.
- LI S, ZHOU H M, ZHAO B, et al. Analysis of volatile flavor compounds in stewed beef with broth during storage[J]. Food Science, 2020, 41(18): 203-209.
- [25] GIRI A, OSAKO K, OHSHIMA T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish miso, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing[J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 621-631.
- [26] 吴浩然, 林琳, 葛孟甜, 等. 四种不同生境模式养殖的雄性中华绒螯蟹性腺挥发性风味成分比较[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 92-101, 47.
- WU H R, LIN L, GE M T, et al. Comparison of volatile flavor components in gonad of male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) cultured with four different eco-environment modes [J]. Modern Food Science & Technology, 2019, 35(6): 92-101, 47.
- [27] 李佳, 刘忠义, 付满, 等. 发酵香肠风味物质气质分析及与发酵时间的关系[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 61-66.
- LI J, LIU Z Y, FU M, et al. The flavor compounds in fermented sausages analyzed by GC-MS and its relationship with fermentation time[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 61-66.
- [28] LI Y, YUAN L, LIU H J, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds in a traditional Chinese shrimp paste during fermentation based on electronic nose, SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 173-182.
- [29] 张权, 李金林, 胡明明, 等. 基于电子鼻和溶剂辅助风味蒸发—气相色谱—质谱联用技术分析调味小龙虾挥发性风味特征差异[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(8): 242-252.
- ZHANG Q, LI J L, HU M M, et al. Analysis of volatile flavor characteristics of seasoned crayfish based on electronic nose and solvent-assisted flavor evaporation-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(8): 242-252.
- [30] ŚMIECIŃSKA K, GUGOLEK A, KOWALSKA D. Effects of garlic (*Allium sativum* L.) and ramsons (*Allium ursinum* L.) on lipid oxidation and the microbiological quality, physicochemical properties and sensory attributes of rabbit meat burgers[J]. Animals, 2022, 12(15): 1 905.
- [31] 肖岚, 欧阳灿, 李娟, 等. 气相色谱—离子迁移质谱技术分析不同烹饪方式对大蒜挥发性风味物质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(12): 99-107.
- XIAO L, OUYANG C, LI J, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds of garlic by gas chromatography-ion migration mass[J]. China Food Additives, 2020, 31(12): 99-107.
- [32] 仪淑敏, 倪雪, 李强, 等. 洋葱、生姜和大蒜对鲢鱼鱼丸挥发性风味成分的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 193-201.
- YI S M, NI X, LI Q, et al. Effect of onion, ginger and garlic on volatile flavor components of silver carp fish-ball[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2020, 41(3): 193-201.
- [33] VERONIKA M, PETER S. Evaluation of key aroma compounds in processed prawns (*Whiteleg shrimp*) by quantitation and aroma recombination experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(13): 2 776-2 783.
- [34] 陈小爱, 蔡惠钿, 刘静宜, 等. 基于电子鼻、GC-MS 和 GC-IMS 技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 70-80.
- CHEN X A, CAI H D, LIU J Y, et al. Analysis of volatile components in Laoxianghuang during fermentation by electronic nose, GC-MS and GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 70-80.
- [35] ZHANG B, ZHENG Z J, LIU N, et al. Effect of different combined mechanical and thermal treatments on the quality characteristics of garlic paste[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(3): 1 061-1 071.
- [36] 雷佳佳, 黄晓岚, 黄万一, 等. 蒸制和水煮对小龙虾色泽、虾青素含量及抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 58-66.
- LEI J J, HUANG X L, HUANG W Y, et al. Effects of steaming and boiling on the color, astaxanthin content and antioxidant activity of crayfish[J]. Food Science, 2024, 45(13): 58-66.