寇子楠, 孙梦姚, 陈智慧, 等. 辣椒对虾酱中挥发性化合物和细菌群落的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 236−248. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070172

KOU Zinan, SUN Mengyao, CHEN Zhihui, et al. Effects of Chili on Volatile Compounds and Bacterial Community in Shrimp Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 236−248. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070172

· 生物工程 ·

辣椒对虾酱中挥发性化合物和细菌群落的影响

寇子楠[1], 孙梦姚[1], 陈智慧[2], 王晓宁[3], 刘杨柳[1], 孙纪录[1,*]

（1.河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071001;
2.云南省曲靖农业学校生物技术学部, 云南曲靖 655000;
3.邯郸市水产技术推广站, 河北邯郸 056000）

摘　要: 为探究辣椒对虾酱中挥发性化合物和细菌群落组成结构的影响，本研究将辣椒应用到虾酱发酵中并与未添加辣椒发酵的虾酱进行比较，采用气相色谱-离子迁移谱技术测定挥发性化合物，利用高通量测序技术解析细菌群落的门、属水平组成及多样性变化，并通过 Spearson 相关性分析确立优势菌属与关键挥发性风味化合物的相关性。结果表明，辣椒的加入使虾酱发酵过程中丙二醛含量升高，发酵结束后两组虾酱风味差异较小且均具良好可接受性。辣椒的加入在虾酱中引入了 2-乙基呋喃、*β*-蒎烯 M、甲基叔丁基醚 D、2,3-二乙基吡嗪 M 和丙醛等挥发性风味化合物。随着发酵进行，辣椒虾酱中 2,3-戊二酮、2-甲基丁醛等风味化合物积累，甲基叔丁基醚、*β*-蒎烯等具有一定刺激性气味物质减少，风味更趋柔和。在门水平上，辣椒的加入在虾酱中提升了蓝细菌门（Cyanobacteriota）与芽孢杆菌门（Bacillota）的相对丰度，降低了拟杆菌门（Bacteroidota）的相对丰度。在属水平上，辣椒的加入在虾酱中引入了大洋芽孢杆菌属（*Oceanobacillus*），增加了 norank_o_*Chloroplast* 的相对丰度，降低了沃雷氏菌属（*Olleya*）与黄杆菌属（*Flavobacterium*）的相对丰度。*Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae* 作为两组虾酱共有的核心优势菌属，与 2-乙基呋喃等辣椒中特征挥发性化合物含量呈极显著负相关（$P<0.01$），同时与丙烯酸丁酯 M 等虾酱发酵中生成的主要挥发性风味化合物呈正相关，是驱动风味形成的关键微生物。本研究结果为新型风味复合辣椒虾酱的开发提供了理论支撑。

关键词: 虾酱, 辣椒, 挥发性化合物, 细菌多样性, 气相色谱-离子迁移谱

中图分类号: TS254.55　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0236−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070172　　本文网刊:

Effects of Chili on Volatile Compounds and Bacterial Community in Shrimp Paste

KOU Zinan[1], SUN Mengyao[1], CHEN Zhihui[2], WANG Xiaoning[3], LIU Yangliu[1], SUN Jilu[1,*]

（1.College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;
2.Department of Biotechnology, Qujing Agricultural School of Yunnan, Qujing 655000, China;
3.Handan Aquatic Technology Promotion Station, Handan 056000, China）

Abstract: In order to investigate the effects of chili peppers on volatile compounds and bacterial community composition in shrimp paste, this study applied chili peppers to the fermentation of shrimp paste and compared it with the fermented shrimp paste without chili peppers, determined volatile compounds by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), and analyzed the phylum- and genus-level compositions of the bacterial community and the changes in diversity by high-

收稿日期: 2025−07−14

基金项目: 河北省省属高校基本科研业务费（KY2024046）; 河北省现代农业产业技术体系淡水养殖创新团队建设项目（HBCT2024300207）; 河北省重点研发计划项目（20327118D）。

作者简介: 寇子楠（2002−）（ORCID: 0009−0009−5030−4225）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1487372689@qq.com。

*** 通信作者:** 孙纪录（1972−）（ORCID: 0000−0001−5930−3389）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工, E-mail: fm1311sun@163.com。

throughput sequencing (HTS). Besides, this study established the correlation between dominant genera and key volatile flavor compounds by Spearson correlation analysis (SCA). The results showed that the addition of chili peppers increased the malondialdehyde content of shrimp paste during the fermentation process, and the flavor differences between the two groups of shrimp paste at the end of fermentation were small and acceptable. The addition of chili peppers introduced volatile flavor compounds such as 2-ethylfuran, *β*-pinene M, methyl tert-butyl ether D, 2,3-diethylpyrazine M, and propionaldehyde into the shrimp paste. As fermentation proceeded, flavor compounds such as 2,3-pentanedione and 2-methylbutyraldehyde accumulated in the chili shrimp paste, and methyl tert-butyl ether, *β*-pinene, and other substances with some irritating odors decreased, resulting in a softer flavor. At the phylum level, the addition of chilli peppers increased the relative abundance of Cyanobacteriota and Bacillota and decreased the relative abundance of Bacteroidota in shrimp paste. At the genus level, the addition of chilli peppers introduced *Oceanobacillus* to the shrimp paste, increased the relative abundance of norank_o_*Chloroplast*, and decreased the relative abundance of *Olleya* and *Flavobacterium*. *Candidatus_Bacilloplasma*, unclassified_f_*Paracoccaceae*, as the core dominant genera shared by the two groups of shrimp paste, were significantly negatively correlated with the content of characteristic volatile compounds in chili peppers, such as 2-ethylfuran, and were also positively correlated with the major volatile flavor compounds generated in shrimp paste fermentation, such as butyl acrylate M, which were a key microorganism driving the formation of flavor. The results of this study provide theoretical support for the development of novel flavor composite chili peppers shrimp paste.

Key words: shrimp paste; papper; volatile compounds; bacterial diversity; gas chromatography-ion mobility spectrometry

虾酱是一种传统的水产发酵调味品，通常以毛虾、糠虾、磷虾等小型虾类或虾头为主要原料，经加盐发酵等工序制成，主产于中国沿海地区及东南亚[1]，富含蛋白质、脂肪酸、虾青素等营养和功能性物质，具有独特的鲜香风味[2]。我国虾酱年产量约 40000 吨，是全球最大的虾酱生产国[3]。虾酱通常在高盐条件下经自然发酵而成，其风味物质主要来源于蛋白质与脂类在微生物及酶系共同作用下的水解与氧化。虾肉中的脂肪水解产生的游离脂肪酸，进一步通过 *β*-氧化、脱羧、脱氢等反应，生成醛、酮、醇、酯等挥发性化合物。同时，脂肪氧化过程中产生的过氧化物及其分解产物，还能与蛋白质降解产物发生反应，进一步促进风味物质的形成，提升虾酱风味的复杂性和饱满度[4]。

辣椒作为一种重要调味品，富含 V_C、V_E、类胡萝卜素（如辣椒红素、叶黄素）、黄酮类化合物以及辣椒素类物质，这些成分具有抗氧化、抗炎、抑菌等多种生理活性[5]。早在公元前 7000 年，辣椒就在世界范围内被用作调味品和药物[6]。辣椒素是辣椒中的主要辛辣成分，它具有多重功效，包括杀菌[7−8]、降血压[9]、减肥[10]、抗糖尿病[11]、抗癌[12−13] 等。此外，辣椒也含有丰富的挥发性风味物质，通常包括酯类、醇类、酮类等[14]。辣椒广泛参与许多天然发酵食品的生产。在发酵过程中，辣椒中的这些物质可以在微生物和酶的作用下发生复杂的转化，生成新的风味物质。发酵辣椒气味中贡献较大的是酯类和烃类化合物，其次是醛类、酮类、酸类和醇类等物质[15]。

目前，辣椒已广泛应用于泡椒、剁椒、鲊辣椒、辣椒酱、豆瓣酱等发酵产品[16]。传统虾酱以咸鲜风味为主，风味层次相对单一，越来越难以满足消费者对饮食风味多样化的追求。目前，市场上已经出现了一些辣味虾酱产品。但是，这些辣味虾酱产品通常是以传统虾酱为主要原料，添加辣椒或辣味添加剂等辅料或添加剂，经过搅拌、炒制或灭菌等工序，制成的复合调味品，属于再制虾酱。而以虾为主要原料、辣椒为辅料，直接进行发酵而生产的自然发酵辣味虾酱还未见报道。如前所述，传统虾酱是以毛虾等小型虾为主要原料加盐发酵而成。但是，这些作为虾酱原料的小型虾完全依赖于捕捞，没有人工养殖，因而产量非常有限，而且捕捞季节固定，对虾酱的工业化生产造成极大的制约。南美白对虾（*Litopenaeus vannamei*）早已在中国实现规模化养殖，目前已占到我国对虾总产量的 80% 以上，年产量已达 160 万吨以上。南美白对虾壳薄体肥，味道鲜美，营养丰富。但是，南美白对虾由于产量增长迅速，叠加国际市场冲击，已出现价格下跌、增产不增收的态势，亟需扩大加工业，从而推动南美白对虾产业的可持续发展。近年来，南美白对虾作为原料，已逐渐用于新型高档虾酱的商品化生产。

因此，本研究拟以南美白对虾为主要原料，在虾酱发酵中加入辣椒，探索辣椒的加入对虾酱发酵的影响，使用 GC-IMS 与高通量测序技术，并结合主成分分析、正交偏最小二乘判别分析、Spearson 相关性分析等化学计量学方法，重点揭示辣椒对虾酱中挥发性化合物与细菌多样性的影响，以期为研发新型风味自然发酵虾酱产品提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜南美白对虾（*Litopenaeus vannamei*）　河北农大科技市场；精制盐（未加碘）　山东肥城精制盐厂有限公司；辣椒粉（朝天椒）　山东美亿天食品有限公司；硼酸　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；乙酰丙酮　分析纯，成都艾科达化学试剂有限公司；溴甲酚绿指示剂　天津光复精细化工研究所；三氯乙酸（分析纯）、甲醛（分析纯）、甲基红指示剂　福晨（天津）化学试剂有限公司；AxyPrep DNA 凝胶回收试剂

盒　美国 Axygen Biosciences 公司; E.Z.N.A.®Soil DNA Kit 试剂盒　美国 OMEGA 公司。

S2-A808 绞肉机　九阳股份有限公司; 1000 mL 玻璃发酵罐　淄博博山盛杰玻璃制品有限公司; SPM-50 智能生化培养箱　宁波江南仪器厂; H-4 数显恒温水浴锅　金坛区良友仪器有限公司; 7820A GC 仪　安捷伦科技(中国)有限公司; Flavour-Spec®风味分析仪　德国 G.A.S 公司; Multiskan Spectrum 全波长酶标仪　赛默飞世尔科技(上海)有限公司; TGL-16MC 低温冷冻离心机　长沙湘锐离心机有限公司; QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统

美国 Promega 公司; ABI GeneAmp® 9700 型聚合酶链式反应(polymerasechain reaction, PCR)仪　美国 Bio-Rad 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　虾酱的制作和取样　选取新鲜的南美白对虾, 去掉头(前端三分之一)和尾, 用水洗净, 加入 18% NaCl(w∶w)和 4% 辣椒粉[17−19](辣椒粉添加量是参照相关文献, 并通过预实验而定), 用绞肉机搅碎后, 放入发酵罐(每罐 800 g), 在 37 ℃ 下进行发酵。对照组不加辣椒粉, 命名为 CK 组, 实验组命名为 CL 组。发酵期间, 每周取一次样, 进行理化指标氨基酸态氮(amino acid nitrogen, AAN)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)和总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)的跟踪测定。在中华人民共和国水产行业标准《虾酱》(SC/T 3602-2016)中, 氨基酸态氮是衡量虾酱中蛋白质水解程度的唯一指标, 因而也可以判断产品的发酵终点。根据 AAN 测定结果所显示的变化趋势, 发酵第 3 周之后, CK 与 CL 两组虾酱中 AAN 含量基本趋于平稳(P>0.05), 因此, 基本可以确定第 3 周为发酵终点。取发酵第 0、1、3 周的 CK 组虾酱样品(分别命名为 CK-0、CK-1、CK-3)与 CL 组虾酱样品(分别命名为 CL-0、CL-1、CL-3), 进行细菌多样性分析。取发酵第 0、3 周的 CK 组虾酱(CK-0、CK-3)与 CL 组虾酱(CL-0、CL-3)进行挥发性化合物分析; 对第 4 周发酵结束的辣椒虾酱与对照虾酱进行感官评定。

1.2.2　理化指标的测定

1.2.2.1　氨基酸态氮含量测定　根据 GB 5009.235-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》中的比色法进行测定[20]。

1.2.2.2　丙二醛含量测定　根据 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》[21] 中的分光光度法进行测定。

1.2.2.3　总挥发性盐基氮值测定　根据 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》[22] 中的半微量定氮法进行测定。

1.2.3　感官评定　参照王炳华等[23] 方法并稍作修改, 由 20 名经标准化统一培训的感官评价人员, 对发酵结束的虾酱进行感官评定, 评定标准见表 1。

1.2.4　挥发性化合物的测定　参考杨兵兵等[24] 的方法, 利用 GC-IMS 技术进行挥发性化合物检测: 取虾酱样品 1 g, 加入 20 mL 顶空瓶中备用。

进样条件: 样品孵化温度 40 ℃, 孵化时间 20 min, 孵化转速 500 r/min, 采用自动顶空进样单元的方式, 进样体积 200 μL, 进样针温度 85 ℃。

GC 条件: MXT-5 色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm); 柱温为 60 ℃; 运行时间为 30 min; 载气为 N_2(≥99.99%); 不分流模式进样。

IMS 条件: 温度为 45 ℃; 漂移气为 N_2(≥99.99%); 漂移气流速 150 mL/min。

根据不同虾酱样品中挥发性化合物的保留时间和离子迁移时间, 采用 GC-IMS 配套的 VOCal 软件内置 NIST 数据库和 IMS 数据库对挥发性化合物进行定性分析; 每组样品重复测定三次, 采用平均值±标准差表示各化合物的峰体积, 对挥发性化合物进行定量分析。

1.2.5　细菌多样性分析　按照 E.Z.N.A.®Soil DNA Kit 试剂盒说明书进行 DNA 提取, 使用 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')在 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增。扩增程序与反应体系参考 Yang 等[25] 的方法。扩增程序设定为: 95 ℃ 预变性 3 min; 随后进行 30 个循环, 每个循环包括 95 ℃ 变性 30 s、55 ℃ 退火 30 s、72 ℃ 延伸 45 s; 最后于 72 ℃ 延伸 10 min, 采用 AxyPrep DNA 凝胶回收试剂盒纯化 PCR 产物, 采用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统对产物进行定量, 扩增样品送至上海美吉生物医药科技有限公司进行 Illumina MiSeq 测序, 在其生信平台上进行测序数据分析。

1.3　数据处理

所有理化指标测定、挥发性化合物测定和细菌

表 1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

颜色	气味	滋味	组织形态	评分(分)
色泽均匀, 具有该品类典型色泽(如红棕色/橙红色)	具有浓郁发酵鲜香, 无异味, 辣椒与虾酱发酵香气协调	滋味鲜美, 辣椒辣味与虾酱鲜味协调	黏稠度适中, 勺取时呈块状且不易滴落	8~12
色泽较均匀, 轻微暗沉或偏浅, 无明显杂质	发酵香气明显, 略带淡淡腥味或明显辣味, 无刺鼻异味	虾酱鲜味明显, 或辣椒辣味明显, 味道不协调	黏稠度较低或较高, 勺取时流动性强或难舀取	4~7
色泽不均, 有霉斑或异物	有酸败味、腐臭味或其他不良气味	有苦涩、酸败等异味	呈水样或干硬结块, 无法保持酱体形态	0~3

多样性分析实验均重复 3 次，结果数据用平均值±标准差（$\overline{X}$±S）表示。使用 SPSS Statistics 2024 软件对虾酱中挥发性化合物与细菌多样性进行差异显著性分析。使用 Origin 2024 软件处理理化指标数据并绘制折线图、感官评定雷达图与挥发性化合物堆积柱状图。采用 Gallery Plot 插件绘制挥发性化合物的指纹图谱；采用 SIMCA14.1 对挥发性化合物进行主成分分析（PCA）与正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA），并应用 Origin 2024 软件绘制柱状图与聚类热图。利用 R 语言对细菌测序结果进行 α 多样性分析和 β 多样性分析，并绘制相关性热图和优势门、属的堆叠柱状图。使用美吉生物云平台对优势菌属与关键挥发性风味化合物进行 Spearson 相关性分析，并绘制相关性热图。

2　结果与分析

2.1　虾酱发酵过程中的理化指标变化和感官评价

虾酱发酵是一个复杂的过程，分析虾酱发酵过程中主要理化指标的变化，可以用来判断其品质以及发酵程度。AAN 常用作衡量蛋白质水解程度，AAN 含量越高，标志着蛋白质分解生成的氨基酸越多，虾酱滋味越鲜美[26]，同时 AAN 值也能判断虾酱的发酵终点[23]。MDA 常作为判断发酵产品脂质氧化程度的指标。TVB-N 值常作为评价发酵食品腐败的理化指标[27]。在持续 4 周的发酵期间，每周取样 1 次，跟踪测定 AAN、MDA 和 TVB-N。感官评价可以对虾酱品质直接表征，对发酵第 4 周的 CK 与 CL 两组虾酱样品从颜色、气味、滋味、组织形态和综合评分 5 个方面进行感官评价。虾酱理化指标的动态变化和感官评价结果如图 1 所示。

由图 1A 可见，两组虾酱中 AAN 含量在发酵第 0~2 周均呈显著上升趋势（P<0.05），对照虾酱中 AAN 含量在第 3~4 周呈缓慢上升趋势，但是差异不显著（P>0.05）；而辣椒虾酱中 ANN 含量在发酵 2 周后趋于稳定。因此，基本可以确定，在该发酵条件下，第 3 周结束，即可作为虾酱的发酵终点。由图 1B 可见，在整个发酵过程中，辣椒虾酱和对照虾酱的 MDA 含量呈显著上升趋势（P<0.05），0~3 周辣椒虾酱的 MDA 含量均高于对照虾酱，并在第三周达到较高值（2.97 mg/kg）。这可能与辣椒粉中含有一定量的不饱和脂质有关，在发酵过程中发生氧化反应，从而导致 MDA 含量升高[27]。由图 1C 可见，在发酵过程中，两组虾酱 TVB-N 值均呈显著上升趋势（P<0.05），但在发酵第 4 周两组虾酱的 TVB-N 差异较小，且整个发酵过程中两组产品 TVB-N 值均远低于安全限量标准（450 mg/100 g）[28]。如图 1D 所示，辣椒虾酱整体可接受性均高于对照虾酱，其中，在组织形态方面二者差距最大，对照虾酱黏稠度较低，而辣椒虾酱黏稠度适中，且二者在风味方面差异较小，表明发酵结束时，二者整体风味相似且具有良好可接受性。

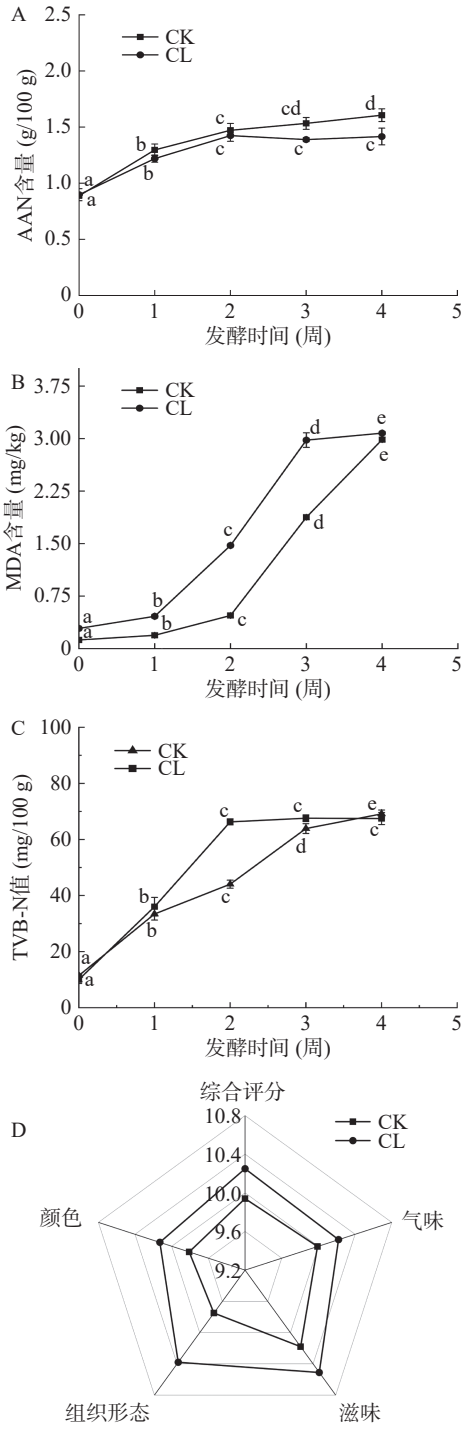


图 1　虾酱发酵过程中理化指标的动态变化和感官评价

Fig.1　Dynamic changes of physical and chemical indexes and sensory evaluation of shrimp paste during fermentation

注：A 为 AAN 含量；B 为 MDA 含量；C 为 TVB-N 值；D 为感官评价；不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2　辣椒添加对虾酱中挥发性化合物的影响

2.2.1　虾酱中挥发性化合物组成和相对含量变化分析　根据理化指标的变化趋势（图 1）及更直观地展示辣椒的加入对虾酱中挥发性化合物的影响，选取 GC-IMS 测定 CK-0、CL-0、CK-3 和 CL-3 虾酱样品的数据进行分析。虾酱中挥发性化合物的指纹图谱如图 2 所示。

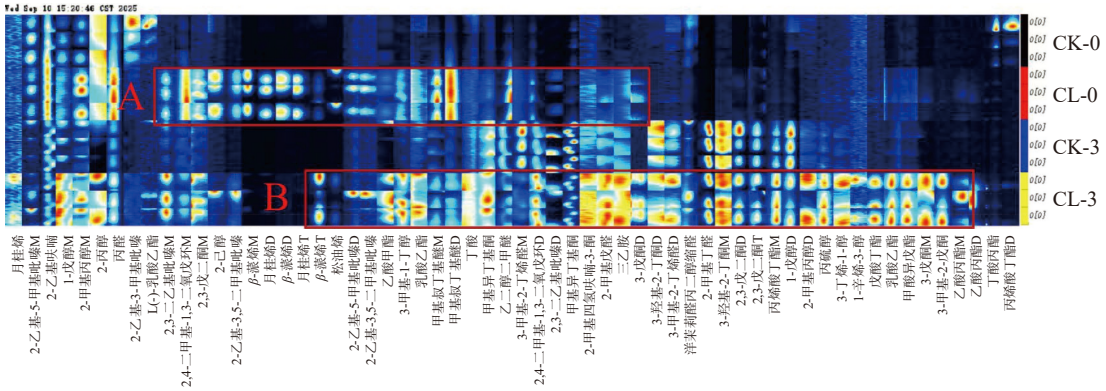


图 2　虾酱中挥发性化合物的指纹图谱

Fig.2　Fingerprint of volatile compounds in shrimp paste

A 区域是辣椒虾酱发酵起始时挥发性化合物处于较高水平区域，表明辣椒的加入在虾酱中引入了更多萜烯类、吡嗪类和醚类物质。萜烯类和吡嗪类属于辣椒自身的特征挥发性化合物[14]。B 区域是辣椒虾酱发酵后挥发性化合物相对水平显著上升的区域。在发酵第 3 周，相较于对照虾酱，辣椒虾酱中酯类含量显著上升，2-甲基戊醛、2-甲基四氢呋喃-3-酮等物质水平也显著升高。该变化不仅反映了发酵过程中普遍发生的蛋白质降解、脂质氧化及酯化反应，还可能与辣椒中所含的不饱和脂肪酸、氨基酸及其衍生物在微生物酶系作用下转化密切相关[29]。各类挥发性化合物的含量如图 3 所示。

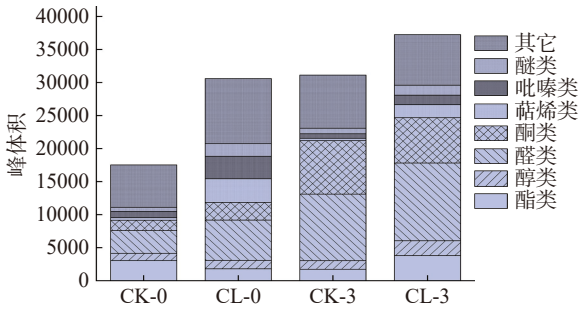


图 3　虾酱中各类挥发性化合物的含量

Fig.3　Content of various volatile compounds in shrimp paste

醛类是辣椒虾酱与对照虾酱中挥发性化合物的主要成分，其次为酮类和酯类。在发酵第 0 周，与对照组（CK-0）相比，辣椒组（CL-0）即显示出较高的挥发性物质总量，且醚类、吡嗪类、萜烯类及醛类等物质峰体积显著增加，表明辣椒的加入丰富了虾酱的风味组成。相较于第 0 周，发酵第 3 周的辣椒组与对照组虾酱中酮类和醛类物质含量均呈上升趋势，其中辣椒组在 3 周时挥发性化合物总量及醛类、酯类等化合物含量仍高于对照组，说明辣椒在提高虾酱风味丰富度方面发挥了持续作用。

利用 GC-IMS，在辣椒虾酱与对照虾酱中共鉴定出 60 种挥发性物质，其中包括 11 种酯类、11 种酮类、10 种醇类、7 种萜烯类化合物、6 种醛类、7 种吡嗪类、3 种醚类、5 种其它挥发性有机物；采用平均值±标准差计算各化合物的峰体积，用峰体积结果表示各化合物的含量，采用 SPSS 开展统计学检验，仅对同一行数据进行差异分析，未开展同列数据的组间比较；同一行数据标注不同上标字母代表差异显著，统计标注结果如表 2 所示。

由表 2 可知，在未发酵的对照虾酱（CK-0）中，丁酸丙酯和丙烯酸丁酯 D 含量显著高于其他组（$P<0.05$），表明这些物质是虾肉本身的特征性风味成分。相较于 0 周的对照虾酱（CK-0），0 周辣椒虾酱

表 2　虾酱中挥发性化合物的鉴定结果

Table 2　Identification results of volatile compounds in shrimp paste

分类	挥发性化合物名称	CAS号	保留指数	保留时间（s）	离子迁移时间（ms）	峰体积			
						CK-0	CL-0	CK-3	CL-3
酯类	丙烯酸丁酯D	141-32-2	941.6	472.399	1.69482	217.21±116.88^{a}	73.25±20.04^{b}	68.94±8.00^{b}	92.05±12.52^{b}
	丁酸丙酯	105-66-8	943.8	476.286	1.26597	2199.72±1012.04^{a}	684.37±97.68^{b}	598.24±90.14^{b}	1047.48±33.71^{b}
	L(-)-乳酸乙酯	687-47-8	793.6	282.376	1.52783	206.90±88.49^{a}	137.85±20.51^{a}	122.24±25.95^{a}	162.13±33.14^{a}
	乙酸甲酯	79-20-9	582	150.542	1.1895	56.05±6.57^{b}	106.38±2.00^{b}	84.88±61.39^{b}	363.04±51.74^{a}
	乙酸丙酯M	108-21-4	758.2	248.694	1.48489	21.76±1.87^{b}	35.75±8.78^{b}	23.34±7.69^{b}	155.81±87.79^{a}
	丙烯酸丁酯M	141-32-2	941.6	472.399	1.68482	128.10±3.25^{c}	130.46±23.09^{c}	476.88±20.73^{b}	856.37±44.40^{a}
	乳酸乙酯	97-64-3	768.5	258.304	1.15033	71.85±2.91^{c}	146.38±10.28^{b}	160.83±4.20^{b}	461.3±64.61^{a}
	戊酸丁酯	591-68-4	1051.4	670.43	1.40181	48.18±1.97^{b}	63.59±12.92^{b}	58.74±10.17^{b}	180.88±38.15^{a}
	甲酸异戊酯	110-45-2	768.9	258.682	1.28005	69.97±8.47^{b}	86.93±9.49^{b}	85.28±20.36^{b}	327.25±62.29^{a}
	乙酸乙酯	141-78-6	808.1	296.581	1.10098	19.82±3.71^{c}	35.82±2.36^{b}	31.25±1.22^{b}	47.46±4.89^{a}
	乙酸丙酯D	108-21-4	758.2	248.694	1.48489	18.00±1.50^{b}	27.52±8.32^{b}	21.59±4.66^{b}	110.61±62.28^{a}

续表 2

分类	挥发性化合物名称	CAS号	保留指数	保留时间(s)	离子迁移时间(ms)	峰体积			
						CK-0	CL-0	CK-3	CL-3
醇类	2-甲基丙醇D	78-92-2	612	161.366	1.17164	381.38±32.69^{bc}	687.92±15.38^{a}	349.02±51.64^{c}	458.54±65.82^{b}
	1-戊醇M	71-41-0	809.3	297.799	1.25458	178.96±43.84^{b}	177.19±11.62^{b}	154.54±11.13^{b}	248.02±23.56^{a}
	2-己醇	626-93-7	999.8	583.194	1.28134	39.47±9.52^{b}	135.81±42.24^{a}	28.06±2.03^{b}	52.66±31.96^{b}
	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	752.9	243.843	1.24568	59.70±4.24^{c}	212.99±24.21^{b}	81.41±27.26^{c}	351.35±41.06^{a}
	3-丁烯-1-醇	627-27-0	764.9	254.882	1.42908	20.72±3.62^{b}	20.78±2.95^{b}	23.53±2.63^{b}	73.36±24.42^{a}
	丙硫醇	107-03-9	641.6	172.782	1.35915	78.11±3.22^{b}	73.71±2.64^{b}	103.52±5.05^{b}	263.47±31.41^{a}
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1010.7	600.649	1.71767	77.18±3.82^{b}	65.89±2.20^{b}	59.18±8.24^{b}	120.54±39.95^{a}
	1-戊醇D	71-41-0	775.2	264.705	1.2516	145.18±37.21^{c}	72.25±3.36^{d}	433.52±25.87^{a}	336.02±46.46^{b}
	2-甲基丙醇M	78-92-2	606.7	159.406	1.36629	8.75±0.02^{b}	8.38±0.81^{b}	13.12±3.02^{b}	37.58±22.48^{a}
	2-丙醇	67-63-0	530.7	133.732	1.08379	68.18±11.90^{ab}	48.40±27.18^{ab}	35.09±33.83^{b}	129.80±69.76^{a}
醛类	洋茉莉醛丙二醇缩醛	61683-99-6	797.6	286.287	1.2582	288.55±97.18^{a}	117.41±5.80^{b}	207.82±33.45^{ab}	290.83±68.49^{a}
	3-甲基-2-丁烯醛M	107-86-8	760.9	251.11	1.09665	72.09±9.07^{c}	129.74±8.89^{c}	508.96±60.95^{a}	236.48±77.64^{b}
	3-甲基-2-丁烯醛D	107-86-8	809.5	298.02	1.3569	36.74±15.44^{bc}	20.12±0.59^{c}	63.57±1.81^{ab}	82.40±29.01^{a}
	2-甲基丁醛	96-17-3	694.7	196.975	1.3943	209.51±14.97^{c}	240.18±21.09^{c}	6869.65±54.18^{b}	7264.23±290.21^{a}
	2-甲基戊醛	123-15-9	720.8	216.746	1.22651	84.07±8.27^{c}	108.68±12.62^{c}	166.92±18.44^{b}	262.75±27.64^{a}
	丙醛	123-38-6	730.6	224.657	1.046	2682.95±273.22^{c}	5497.55±110.26^{a}	2094.93±32.84^{d}	3240.63±85.97^{b}
酮类	3-羟基-2-丁酮D	513-86-0	690.4	193.873	1.32977	28.35±13.2^{b}	13.57±1.34^{b}	74.58±8.03^{a}	57.23±15.87^{a}
	2,3-戊二酮D	600-14-6	622.8	165.41	1.29163	46.70±2.43^{c}	328.81±32.40^{b}	559.77±81.35^{a}	455.27±68.38^{a}
	2,3-戊二酮M	600-14-6	745.5	237.326	1.30441	117.54±3.69^{c}	633.46±23.03^{b}	910.95±85.98^{a}	771.16±241.19^{ab}
	2,3-戊二酮T	600-14-6	631.2	168.678	1.20795	59.04±10.13^{b}	201.81±7.25^{a}	72.74±4.63^{b}	198.63±20.47^{a}
	甲基异丁基酮D	108-10-1	747.9	239.438	1.17673	62.89±5.69^{c}	85.01±4.27^{c}	159.37±12.24^{b}	197.94±38.44^{a}
	3-羟基-2-丁酮M	513-86-0	720	216.114	1.33358	63.11±8.71^{b}	60.79±14.22^{b}	667.48±114.63^{a}	528.55±133.57^{a}
	甲基异丁基酮M	108-10-1	689.8	193.443	1.18255	1034.46±41.67^{c}	1099.56±18.34^{c}	5507.76±93.34^{a}	3642.98±71.30^{b}
	3-甲基-2-戊酮	565-61-7	764.4	254.393	1.4689	35.42±3.62^{b}	39.38±8.91^{b}	31.58±4.78^{b}	284.39±80.25^{a}
	3-戊酮M	96-22-0	670	184.483	1.3581	77.89±3.12^{c}	174.81±61.75^{b}	76.62±5.23^{c}	354.58±25.62^{a}
	2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	746.8	238.445	1.41585	5.64±1.24^{a}	5.70±0.20^{a}	8.24±1.47^{a}	11.7±5.80^{a}
	3-戊酮D	96-22-0	1050.4	668.544	1.34618	16.26±2.11^{b}	22.59±7.59^{b}	17.81±6.27^{b}	225.84±46.68^{a}
萜烯类	月桂烯T	123-35-3	946.4	480.845	1.22171	128.74±51.49^{a}	59.77±16.54^{b}	117.47±10.70^{a}	139.63±21.90^{a}
	β-蒎烯M	127-91-3	1044.1	657.351	1.29659	68.65±14.07^{b}	1392.04±108.38^{a}	59.96±8.27^{b}	381.96±442.71^{b}
	月桂烯M	123-35-3	987.8	559.787	1.6387	52.40±4.39^{b}	1021.77±27.10^{a}	46.66±4.04^{b}	455.53±519.75^{b}
	β-蒎烯D	127-91-3	938.1	466.37	1.22227	14.26±1.37^{b}	303.28±15.44^{a}	13.54±3.01^{b}	82.19±116.58^{b}
	β-蒎烯T	127-91-3	930.9	454.205	1.21552	60.92±23.22^{b}	215.86±33.31^{b}	36.42±2.37^{b}	660.55±197.11^{a}
	月桂烯D	123-35-3	999.7	583.034	1.22177	34.98±4.97^{b}	34.51±3.77^{b}	33.25±1.88^{b}	193.2±120.96^{a}
	松油烯	99-86-5	1038.3	647.17	1.21876	39.76±6.36^{b}	376.92±168.09^{a}	36.02±5.77^{b}	189.77±87.47^{b}
吡嗪类	2-乙基-5-甲基吡嗪M	13360-64-0	1017.6	611.919	1.66878	313.79±24.11^{a}	266.22±16.07^{ab}	176.45±37.47^{c}	228.38±41.14^{bc}
	2-乙基-3-甲基吡嗪	13360-64-0	972.5	529.14	1.16701	226.63±49.19^{a}	84.45±16.58^{b}	67.13±3.7^{b}	63.69±4.48^{b}
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪D	13360-64-0	1069.9	704.81	1.2175	21.73±1.41^{b}	142.31±19.73^{a}	26.62±4.14^{b}	113.66±70.91^{a}
	2,3-二乙基吡嗪M	15707-24-1	1111.2	787.957	1.22605	70.86±6.64^{c}	1561.29±44.31^{a}	59.84±6.85^{c}	590.77±460.24^{b}
	2,3-二乙基吡嗪D	15707-24-1	1042.7	654.776	1.22391	81.75±2.92^{d}	176.33±2.62^{b}	124.95±19.91^{c}	265.30±3.07^{a}
	2-乙基-5-甲基吡嗪D	13360-64-0	1043.9	656.983	1.66639	134.93±21.02^{c}	268.25±24.52^{a}	138.55±15.82^{c}	214.12±78.44^{ab}
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪M	13360-64-0	1043.5	656.247	1.73693	107.21±20.68^{c}	218.21±21.52^{a}	106.05±16.36^{c}	195.95±104.23^{ab}
醚类	甲基叔丁基醚M	1634-04-4	735.4	228.724	1.12782	389.49±83.48^{d}	1705.43±94.61^{a}	619.92±2.63^{c}	1144.08±42.81^{b}
	甲基叔丁基醚D	1634-04-4	666.1	182.813	1.13094	223.04±75.28^{c}	1111.71±66.21^{a}	211.70±27.63^{c}	336.97±32.93^{b}
	乙二醇二甲醚	110-71-4	605.5	158.938	1.10931	400.55±120.10^{b}	1339.98±253.79^{a}	1340.97±27.75^{a}	1107.30±38.25^{a}
其它	丁酸	107-92-6	782.9	272.271	1.17335	50.04±22.56^{b}	39.96±1.97^{b}	50.72±4.36^{b}	85.44±19.01^{a}
	三乙胺	121-44-8	706.5	205.661	1.21678	11.16±0.45^{d}	25.40±1.20^{c}	37.41±5.35^{b}	48.87±3.78^{a}
	2-乙基呋喃	3208-16-0	656.2	178.695	1.04932	5472.87±524.83^{b}	6603.41±69.62^{a}	5043.53±129.30^{b}	4225.85±140.54^{c}
	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环M	3390-12-3	689.1	192.931	1.25456	241.38±28.16^{d}	533.49±32.89^{c}	1273.23±46.68^{b}	1788.34±82.34^{a}
	2,4-二甲基-1,3-二氧戊环D	3390-12-3	703.4	203.336	1.12118	242.76±31.97^{b}	865.87±77.36^{a}	307.85±21.31^{b}	306.28±31.24^{b}

注: 同行不同字母表示差异显著(P<0.05)。

(CL-0)中含量显著升高的挥发性化合物有 β-蒎烯 M、月桂烯 M 和 2,3-二乙基吡嗪 M(P<0.05)，表明这些物质为辣椒中的主要挥发性化合物[14]。

对照虾酱发酵 3 周后(CK-3)，相较于 CK-0，2,3-戊二酮(M、D)、2-甲基丁醛和甲基异丁基酮 M 含量显著增加(P<0.05)，表明它们是虾酱发酵过程中产生的主要挥发性化合物[30]；而丁酸丙酯和丙烯酸丁酯 D 显著降低(P<0.05)，这可能是由于在未发酵时虾酱中的酯类物质含量通常较高，随着发酵进行，虾酱中微生物将酯类物质分解，导致其含量降低。

辣椒虾酱发酵 3 周后(CL-3)，相较于 CL-0，丙烯酸丁酯 M、乳酸乙酯、3-戊酮和 2-甲基丁醛含量显著增加(P<0.05)，表明这些物质的增加可能来源于辣椒的发酵；而 β-蒎烯 M、月桂烯 M 和 2,3-二乙基吡嗪 M 含量显著降低(P<0.05)。这可能是由于发酵过程中微生物活动可能消耗萜烯类化合物作为碳源[31] 或改变其结构，进而影响其含量。吡嗪类含量下降可能是由于发酵过程中，某些优势微生物可以优先利用体系中的氨基酸与糖类作为碳源和氮源，导致美拉德反应底物浓度下降，进而影响吡嗪类化合物的含量[30]。

2.2.2　虾酱中挥发性化合物的主成分分析　利用主成分分析(PCA)对虾酱中的挥发性化合物进行分析，结果如图 4 所示。

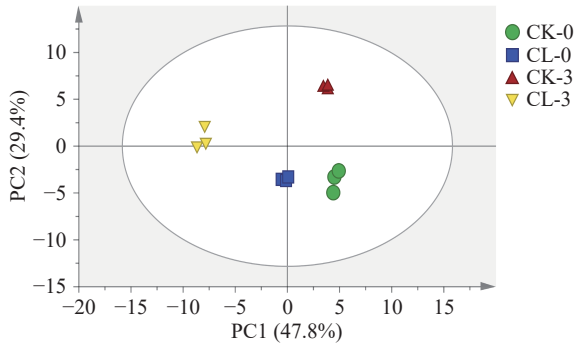


图 4　虾酱中挥发性化合物的 PCA 图

Fig.4　PCA diagram of volatile compounds in shrimp paste

PC1(47.8%)和 PC2(29.4%)总方差贡献率为 77.2%，可有效反映不同虾酱中挥发性化合物的差异。发酵 0 周的对照虾酱(CK-0)与其他样品距离较远，表明其与其他三组虾酱样品之间的挥发性化合物组成差异较大。CL-0、CK-3 与 CL-3 三组样品之间各自聚类且相互分离，说明辣椒的加入与发酵均可改变虾酱中挥发性化合物特征。同时 CL-0 与 CL-3 样品之间距离较远，表明随发酵进行，辣椒发酵对虾酱中挥发性化合物有较大影响。

2.2.3　虾酱中挥发性化合物的正交偏最小二乘判别分析　对虾酱中的挥发性化合物峰体积进行 OPLS-DA 分析，结果如图 5 所示。

对挥发性化合物峰体积进行 OPLS-DA 分析，其中 R^2X=0.939，R^2Y=0.929，Q^2=0.774，R^2 和 Q^2 值均

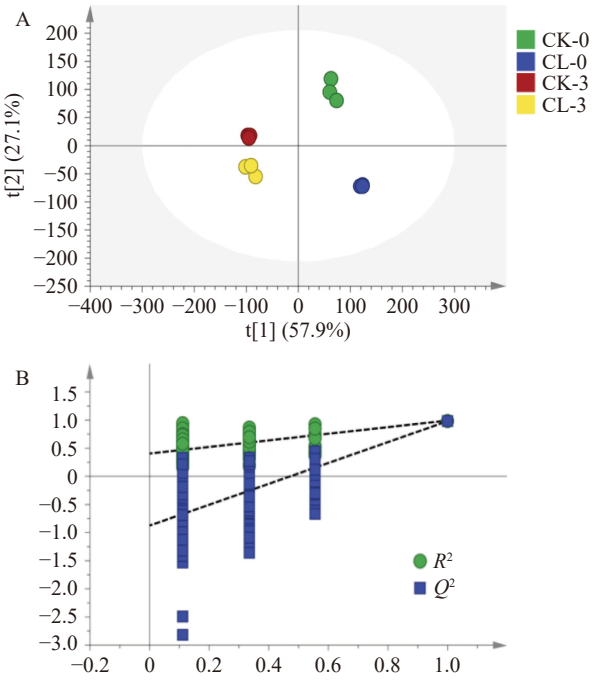


图 5　虾酱中挥发性化合物的 OPLS-DA 图(A)和置换检验图(B)

Fig.5　OPLS-DA diagram (A) and displacement test diagram (B) of volatile compounds in shrimp paste

接近于 1，说明所构建的模型准确性较高。从图 5A 可以看出，CK 与 CL 两组虾酱中挥发性化合物存在显著差异，该结果与 PCA 结果一致。对 OPLS-DA 模型进行 200 次置换模拟，结果如图 5B 所示，其中 Q^2 回归线与 x 轴交叉，表明模型预测能力可靠，可清晰区分样品间差异[32]。

根据 OPLS-DA 模型中的变量投影重要性值(VIP)，筛选虾酱中对整体风味贡献度较高的挥发性化合物；为了更直观看出各组虾酱中挥发性风味化合物的区别，根据峰体积绘制聚类热图对其进行分析。结果分别如图 6A、图 6B 所示。

由图 6A 可见，共筛选出 15 种主要的挥发性风味化合物(VIP>1，P<0.05)，包括萜烯类 3 种(β-蒎烯 M、β-蒎烯 D、月桂烯 M)，醚类 3 种(甲基叔丁基醚 M、甲基叔丁基醚 D、乙二醇二甲醚)，醛类 2 种(丙醛、2-甲基丁醛)，酮类 2 种(甲基异丁基酮 M、2,3-戊二酮 M)，酯类 2 种(丁酸丙酯，丙烯酸丁酯 M)，吡嗪类 1 种(2,3-二乙基吡嗪 M)，其它类 2 种(2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M、2-乙基呋喃)。

由图 6B 可见，发酵起始时，对照虾酱 CK-0 中丁酸丙酯含量显著高于其他组。酯类物质通常在虾肉中含量较高，在发酵后含量降低[30]。辣椒虾酱 CL-0 中 2-乙基呋喃、月桂烯 M、甲基叔丁基醚 M、β-蒎烯 M、甲基叔丁基醚 D、2,3-二乙基吡嗪 M 和丙醛含量显著高于对照虾酱 CK-0，表明这些化合物可能主要是由添加的辣椒引入。

发酵第 3 周，对照虾酱 CK-3 中 2,3-戊二酮 M、乙二醇二甲醚、丙烯酸丁酯 M、2,4-二甲基-1,3-二氧

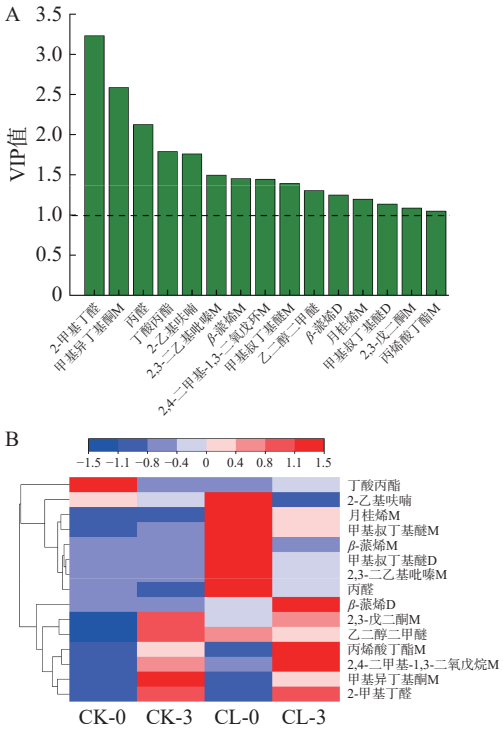


图 6　虾酱中挥发性化合物的 VIP 得分图(A)和聚类热图(B)

Fig.6　VIP score plot (A) and cluster heat plot (B) of volatile compounds in shrimp paste

戊环 M、甲基异丁基酮 M 和 2-甲基丁醛的含量比 CK-0 显著提高，表明这些化合物可能主要是在发酵中生成的。2,3-戊二酮是发酵虾酱中常见的挥发性风味化合物[24]。乙二醇二甲醚被鉴定为凤尾虾的特征挥发性化合物[33]。辣椒虾酱 CL-3 中 β-蒎烯 D、2,3-戊二酮 M、丙烯酸丁酯 M、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M 和 2-甲基丁醛的含量比 CL-0 显著提高，表明这些化合物可能主要是在发酵中生成的。2-甲基丁醛具有苦杏仁香味，是虾酱中常见的挥发性风味物质。2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M 属于烷烃类化合物，烷烃类化合物在发酵水产品中较为常见，但其阈值通常较高，对风味整体影响不大[30]。另一方面，辣椒虾酱 CL-3 中，2-乙基呋喃、月桂烯 M、甲基叔丁基醚 M、β-蒎烯 M、甲基叔丁基醚 D、2,3-二乙基吡嗪 M 和丙醛的含量，相较于 CL-0，均有不同程度的下降，其中，2-乙基呋喃、β-蒎烯 M、月桂烯 M、甲基叔丁基醚 D、2,3-二乙基吡嗪 M 和丙醛含量下降显著，表明添加辣椒引入的这些挥发性风味化合物，在发酵中含量会逐渐下降。其中，呋喃类化合物气味阈值极低，对整体风味贡献较大[34]，甲基叔丁基醚具有类似于汽油的味道，而 β-蒎烯 M 具有类似松油味和香辛料的味道[35]，在浓度较高时具有一定刺激性气味。因此，随着发酵进行，辣椒虾酱的整体风味逐渐柔和。

2.3　辣椒添加对虾酱中细菌群落的影响

2.3.1　虾酱中细菌的 α 多样性分析　Sobs 指数是指样本中实际观测到的物种数，数值越高，说明该样本中检测到的物种种类越多。ACE 指数的数值越大，表示该样本中物种越丰富，各物种分配越均匀。Chao1 指数越大代表样本中物种越多[36]。Simpson 指数和 Shannon 指数用于表征物种多样性，Shannon 指数越大，表示微生物群落多样性越高，Simpson 指数与之相反[19]。分析结果如表 3 所示。

由表 3 可见，发酵第 0、1、3 周的辣椒虾酱中，Sobs、ACE、Chao1 指数均高于对应的对照虾酱，表明辣椒的加入明显提升了虾酱中的物种丰富度。组内分析显示，对照虾酱的这三项指数在发酵过程中变化不大。辣椒组在发酵初期(CL-0)物种丰富度较高，随着发酵进行(CL-1、CL-3)，虽较对照组仍处于较高水平，但整体呈下降趋势。这表明辣椒的加入在发酵初期促进了新菌群的引入，但随着优势菌群逐渐建立，物种丰富度有所降低。从 Simpson 指数和 Shannon 指数可以看出，发酵各周的辣椒虾酱的物种多样性显著高于对照虾酱(P<0.05)。组内分析发现，随发酵进行，对照虾酱组的这两项指数变化无显著差异(P>0.05)，而辣椒虾酱组的 Shannon 指数在第三周显著下降(P<0.05)，Simpson 指数则显著上升(P<0.05)，这可能是由于随发酵进行，辣椒虾酱中优势菌群形成，物种数量减少，导致多样性下降。各样品中，覆盖率均大于 0.99，表明测序结果足以反映所有样品组物种丰富度与多样性。

2.3.2　虾酱中细菌的 β 多样性分析　β 多样性可以反映不同样品中微生物群落分布的差异程度，分析结果如图 7 所示。

三组辣椒虾酱和三组对照虾酱距离较远，表明在发酵过程中辣椒虾酱和对照虾酱的细菌群落组成存在一定差异。同一组内，发酵初始对照虾酱与辣椒虾酱(CK-0 和 CL-0)与中后期(CK-1、CK-3、CL-1、

表 3　虾酱中细菌群落的 α 多样性分析

Table 3　Analysis of α diversity of bacterial community in shrimp paste during fermentation

样品	Sobs	ACE	Chao1	Shannon	Simpson	覆盖率(%)
CK-0	218±19.92^{b}	219.11±20.88^{b}	218.62±20.46^{b}	2.85±0.05^{c}	0.17±0.02^{a}	>99
CK-1	213.67±20.03^{b}	215.47±21.48^{b}	214.55±20.95^{b}	2.94±0.05^{c}	0.14±0.01^{a}	>99
CK-3	226±11.53^{b}	227.91±11.57^{ab}	227.85±11.99^{b}	2.93±0.06^{c}	0.17±0.01^{a}	>99
CL-0	318.33±18.5^{a}	322.36±18.4^{a}	320.93±17.81^{a}	3.57±0.06^{a}	0.08±0^{b}	>99
CL-1	261.33±62.32^{b}	262.4±63.91^{a}	261.96±63.31^{b}	3.66±0.07^{a}	0.07±0.02^{b}	>99
CL-3	263±15.52^{b}	263.46±15.59^{ab}	263.18±15.54^{b}	3.23±0.21^{b}	0.16±0.04^{a}	>99

注：同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

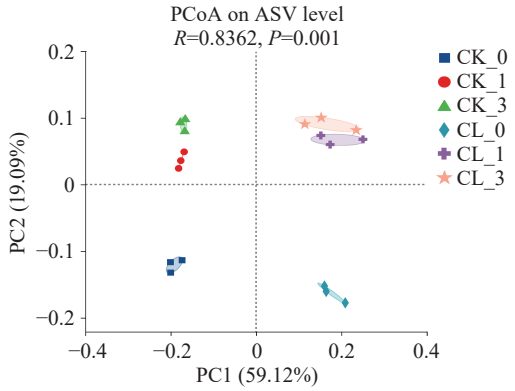


图 7 虾酱中细菌群落的 PCoA 图

Fig.7 PCoA diagram of bacterial community in shrimp paste

CL-3)距离较远，而中后期样品间距离较近，表明随着发酵进行，辣椒虾酱与对照虾酱中的细菌群落差异均逐渐缩小。

2.3.3 虾酱中细菌群落组成分析 对虾酱样品在门水平上的细菌群落组成进行分析，结果如图 8 所示。

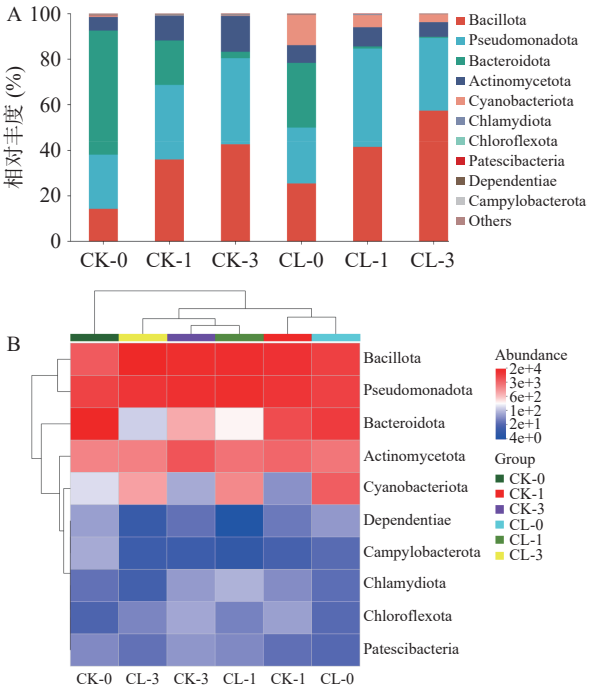


图 8 虾酱中细菌在门水平上的相对丰度(A)和聚类热图(B)

Fig.8 Relative abundance (A) and cluster heat map (B) of bacteria in shrimp paste at the phylum level

由图 8A 可见，芽孢杆菌门(Bacillota)、假单胞菌门(Pseudomonadota)、拟杆菌门(Bacteroidota)与放线菌门(Actinomycetota)是辣椒虾酱与对照虾酱中的共同优势菌门。其中，拟杆菌门、假单胞菌门和放线菌门也是南美白对虾中的主要优势菌门[37]，表明虾酱发酵过程中的优势菌群主要来源于原料虾自身的微生物。在发酵起始，相较于对照虾酱(CK-0)，辣椒虾酱(CL-0)蓝细菌门(Cyanobacteriota)与芽孢杆菌门相对丰度显著较高，而拟杆菌门相对丰度显著较低。这可能是由于辣椒的加入引入了更多细菌种类，导致拟杆菌门相对丰度呈现下降趋势。在发酵 1 周和 3 周，芽孢杆菌门、假单胞菌门和放线菌门依然是辣椒虾酱和对照虾酱中的优势菌门，而拟杆菌门相对丰度在对照虾酱中显著降低，在辣椒虾酱中已不是优势菌群。其原因一可能是拟杆菌门不适应于虾酱的发酵环境，二是可能辣椒素对拟杆菌门的细菌有抑制作用[38]。综上，辣椒的加入对虾酱中的细菌群落结构具有显著影响。

由图 8B 可见，辣椒虾酱与对照虾酱在门水平上细菌群落组成较为相似。相较于对照虾酱，辣椒虾酱中蓝细菌门的相对丰度显著提高。这表明蓝细菌门可能主要源于辣椒，该结果与其他研究结果一致[39]。

对虾酱样品在属水平上的细菌群落组成进行分析，结果如图 9 所示。

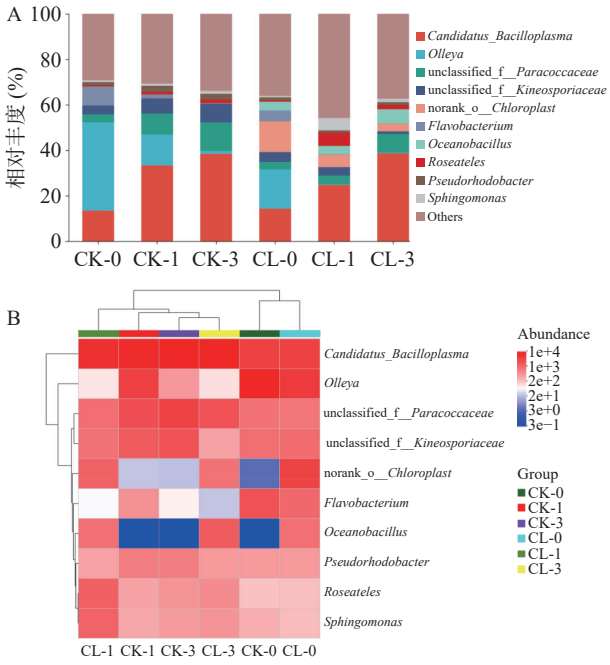


图 9 虾酱中细菌在属水平上的相对丰度(A)和聚类热图(B)

Fig.9 Relative abundance (A) and cluster heat map (B) of bacteria in shrimp paste at the genus level

由图 9A 可见，在对照虾酱中，相对丰度较高的细菌属依次是 *Candidatus_Bacilloplasma*、沃雷氏菌属(*Olleya*)、unclassified_f_*Paracoccaceae*、unclassified_f_*Kineosporiaceace* 和黄杆菌属(*Flavobacterium*)。在辣椒虾酱中，相对丰度较高的细菌属依次是 *Candidatus_Bacilloplasma*、沃雷氏菌属、norank_o_*Chloroplast*、unclassified_f_*Paracoccaceae* 和大洋芽孢杆菌属(*Oceanobacillus*)。

由图 9B 可见，在发酵起始时，与对照虾酱 CK-0 相比，辣椒虾酱 CL-0 中新增了大洋芽孢杆菌属，norank_o_*Chloroplast* 相对丰度升高，而沃雷氏菌属相对丰度降低。norank_o_*Chloroplast* 属于未分类的叶绿体目，被认为是一些食品如沙棘[40]、酸菜[41] 发酵初期的优势菌属。该属在辣椒虾酱中的出现可能是由于辣椒的加入而引入。大洋芽孢杆菌属在传统发酵产品中较为常见[42]。沃雷氏菌属主要分布于海洋

环境中，其相对丰度降低可能是由于辣椒加入引入了更多种类微生物。

在发酵第 3 周，在对照虾酱 CK-3 中，*Candidatus_Bacilloplasma*、 unclassified_f_*Paracoccaceae*、unclassified_f_*Kineosporiaceace* 相对丰度高于 CK-0（图 9A），而黄杆菌属与沃雷氏菌属相对丰度极低几乎消失。*Candidatus_Bacilloplasma* 已在中华绒螯蟹、红螯螯虾、龙虾和斑节对虾等多种甲壳动物肠道中发现[43]；黄杆菌属主要分布在淡水湖泊和土壤环境中，主要依靠分解有机物存活[44]。在辣椒虾酱中，与 CL-0 相比，CL-3 中 *Candidatus_Bacilloplasma*、大洋芽孢杆菌属、unclassified_f_*Paracoccaceae* 相对丰度升高，norank_o_*Chloroplast*、沃雷氏菌属与黄杆菌属相对丰度下降，其中，沃雷氏菌属在 1 周内即大幅减少至近乎消失，而对照虾酱中沃雷氏菌属直至 3 周才逐渐消失。这可能是由于辣椒中的辣椒素具有破坏细菌细胞膜的能力，而沃雷氏菌属与黄杆菌属作为革兰氏阴性菌，其细胞膜结构可能更易被辣椒素破坏。

2.4　虾酱中优势菌群和主要挥发性化合物的相关性分析

利用 VIP 值分别筛选对照虾酱与辣椒虾酱中对整体风味贡献度较高的挥发性化合物（VIP 值>1），对照虾酱与辣椒虾酱中分别筛选出 11 种和 13 种。两种虾酱中，优势菌属与主要挥发性风味化合物的相关性聚类热图如图 10A、图 10B 所示。

在对照虾酱中，2,3-戊二酮 M、乙二醇二甲醚、丙烯酸丁酯 M、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M、甲基异丁基酮 M 和 2-甲基丁醛是在发酵过程中产生的主要风味物质（图 6B）。由图 10A 可知，在对照虾酱中，unclassified_f_*Paracoccaceae* 与 2,3-戊二酮 M 含量呈显著正相关（P<0.05）。分枝杆菌属（*Mycobacterium*）与乙二醇二甲醚含量呈显著正相关（P<0.05）。*Candidatus_Bacilloplasma*、假红杆菌属（*Pseudorhodobacter*）与丙烯酸丁酯 M 含量呈显著正相关（P<0.05）。unclassified_f_*Paracoccaceae* 与 2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M 含量呈显著正相关（P<0.05）。假红杆菌属、norank_f_*Mycoplasmataceae* 与 2-甲基丁醛含量分别呈高度显著正相关（P<0.001）与极显著正相关（P<0.01）。unclassified_f_*Paracoccaceae* 属于假单胞菌门[45]，多数假单胞菌门微生物已被证实携带酯酶、醛脱氢酶等关键代谢酶基因，能够分解虾肉中的脂肪和蛋白质，释放出短链脂肪酸和氨基酸，并通过 β-氧化及 Strecker 降解等反应途径，促进芳香酯、醛、酮等典型发酵风味物质的形成。假红杆菌属属于红杆菌科，而红杆菌科在水生生物肠道中较为常见，可参与复杂的碳水化合物降解、好氧反硝化等生化反应[46]。假红杆菌属可能通过参与碳水化合物降解或氮代谢过程，间接调控醛类、酮类、酯类等风味物质的生成。*Candidatus_Bacilloplasma* 可以促进醛类、酮类、酯类等风味物质生成。综上，对照虾酱中，与主要挥发性化合物生成有关的细菌主要是 unclassified_f_*Paracoccaceae*、 *Candidatus_Bacilloplasma*、分枝杆菌属、norank_f_*Mycoplasmataceae* 和假红杆菌属。

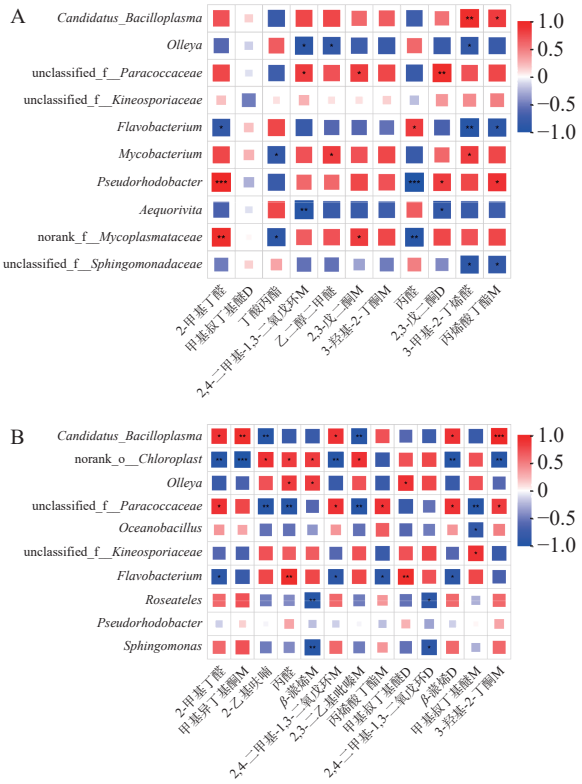


图 10　虾酱中优势菌属与主要挥发性化合物的相关性聚类热图

Fig.10　Correlation cluster heat map of dominant bacteria and main volatile compounds in shrimp paste

注：（A）对照虾酱；（B）辣椒虾酱；*表示显著相关，P<0.05；**表示极显著相关，P<0.01；***表示高度显著相关，P<0.001。

在辣椒虾酱中，2-乙基呋喃、2,3-二乙基吡嗪 M、丙醛、β-蒎烯 M、月桂烯 M 与甲基叔丁基醚 M 这些由于辣椒添加而引入的挥发性化合物在发酵过程中含量显著下降（图 6B）。由图 10B 可知，*Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae* 与 2-乙基呋喃、2,3-二乙基吡嗪 M 含量呈极显著负相关（P<0.01）。unclassified_f_*Paracoccaceae* 与丙醛含量呈极显著负相关（P<0.01）。*Oceanobacillus* 与甲基叔丁基醚 M 含量呈显著负相关（P<0.05），鞘氨醇单胞菌属（*Sphingomonas*）、*Roseateles* 与 β-蒎烯 M 呈极显著负相关（P<0.01）。Li 等[46] 研究发现鞘氨醇单胞菌属在葡萄酒发酵过程中与多种微生物存在协同作用，降解有机物产生小分子物质从而影响葡萄酒风味。综上，降解辣椒中主要挥发性化合物的细菌主要是 *Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae*、*Oceanobacillus*、鞘氨醇单胞菌属和 *Roseateles*。

另一方面，β-蒎烯 D、丙烯酸丁酯 M、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M、2-甲基丁醛和甲基异丁基酮

M 是辣椒虾酱在发酵过程中产生的主要挥发性化合物(图 6B)。由图 10B 可知, *Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae* 与 2-甲基丁醛、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M、*β*-蒎烯 D 含量呈显著正相关($P<0.05$)。*Candidatus_Bacilloplasma* 与甲基异丁基酮 M 含量呈极显著正相关($P<0.01$)。unclassified_f_*Paracoccaceae* 与丙烯酸丁酯 M 含量呈显著正相关($P<0.05$)。综上, 辣椒虾酱中, 与主要挥发性化合物生成有关的细菌主要是 *Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae*。

3 结论

辣椒的添加对虾酱中挥发性化合物的组成及细菌群落结构产生了显著影响。辣椒虾酱的整体可接受性高于对照虾酱, 二者在风味方面差异较小, 组织形态差距较大(对照虾酱黏稠度较低, 辣椒虾酱黏稠度适中)。发酵过程中, 辣椒虾酱的 MDA 含量在 0~3 周均高于对照虾酱, 且呈上升趋势。辣椒的加入引入了 2-乙基呋喃、*β*-蒎烯 M、甲基叔丁基醚 D、2,3-二乙基吡嗪 M 和丙醛等辣椒中主要的挥发性化合物, 在一定程度上丰富了虾酱的风味层次, 且随发酵进行, 辣椒虾酱中 2,3-戊二酮等虾酱特征化合物积累, 甲基叔丁基醚等具有刺激性气味物质减少, 虾酱风味趋于柔和协调。辣椒虾酱和对照虾酱在门水平上细菌组成相似, 辣椒的加入提升了蓝细菌门相对丰度, 而拟杆菌门相对丰度显著下降。在属水平上, *Candidatus_Bacilloplasma* 为两组虾酱的共同优势菌群, 辣椒的加入引入了大洋芽孢杆菌属, 同时 norank_o_*Chloroplast* 相对丰度上升, 增加了细菌多样性。*Candidatus_Bacilloplasma*、unclassified_f_*Paracoccaceae* 等与对照虾酱中主要挥发性化合物 2,3-戊二酮、2-甲基丁醛、丙烯酸丁酯 M 等化合物呈正相关, 与辣椒虾酱中 2-乙基呋喃、2,3-二乙基吡嗪 M 等辣椒中挥发性化合物呈极显著负相关, 与辣椒虾酱中 2-甲基丁醛、2,4-二甲基-1,3-二氧戊环 M、*β*-蒎烯 D 等主要挥发性化合物呈正相关。综上所述, 辣椒的添加不仅丰富了虾酱的风味层次, 也显著影响了其细菌群落结构。本研究为新型风味自然发酵虾酱的开发提供了理论依据。

© 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] YU Jing, LU Kuan, ZI Jiwei, et al. Halophilic bacteria as starter cultures: A new strategy to accelerate fermentation and enhance flavor of shrimp paste[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133393.

[2] PHEWPAN A, PHUWAPRISIRISAN P, TAKAHASHI H, et al. Microbial diversity during processing of Thai traditional fermented shrimp paste, determined by next generation sequencing[J]. LWT, 2020, 122: 108989.

[3] LU Kuan, LIU Lin, ZI Jiwei, et al. New insights from flavoromics on different heating methods of traditional fermented shrimp paste: The volatile components and metabolic pathways[J]. LWT, 2022, 168: 113880.

[4] 汪淼, 于海, 吴满刚, 等. 发酵肉制品风味形成研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(9): 221−226. [WANG Miao, YU Hai, WU Mangang, et al. Advances in research on flavor formation of fermented meat products[J]. Food Industry, 2014, 35(9): 221−226.]

[5] OLATUNJI T L, AFOLAYAN A J. The suitability of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) for alleviating human micronutrient dietary deficiencies: A review[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(8): 2239−2251.

[6] ZHANG Luyun, LU Wei, LU Cheng, et al. Beneficial effect of capsaicin via TRPV4/EDH signals on mesenteric arterioles of normal and colitis mice[J]. Journal of Advanced Research, 2022, 39: 291−303.

[7] SINGH H G, FAIRS A, SYARHABIL M, et al. Anti-fungal activity of capsicum frutescence and *Zingiber officinale* against key post-harvestpathogens in *Citrus*[J]. International Conference on Biomedical Engineering and Technology, 2019, 11(5): 1−6.

[8] GOCI E, HALOCI E, DI STEFANO A, et al. Evaluation of *in vitro* capsaicin release and antimicrobial properties of topical pharmaceutical formulation[J]. Biomolecules, 2021, 11(3): 432.

[9] SZALLASI A. The vanilloid (capsaicin) receptor TRPV1 in blood pressure regulation: A novel therapeutic target in hypertension[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(10): 8769−8799.

[10] WANG Y W, TANG C, TANG Y, et al. Capsaicin has an anti-obesity effect through alterations in gut microbiota populations and short-chain fatty acid concentrations[J]. Food & Nutrition Research, 2020, 64(4): 3525−3526.

[11] ZHANG Shiqi, TANG Lanlan, XU Fanshu, et al. TRPV1 receptor-mediated hypoglycemic mechanism of capsaicin in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 750355.

[12] BROWN K C, MODI K J, LIGHT R S, et al. Anticancer activity of region B capsaicin analogs[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2023, 66(7): 4294−4323.

[13] MERRITT J C, RICHBART S D, MOLES E G, et al. Anticancer activity of sustained release capsaicin formulations[J]. Pharmacology & Therapeutics, 2022, 238: 108177.

[14] 杜勃峰, 李达, 肖仕芸, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 及主成分分析综合评价贵州典型辣椒品种香气品质[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(7): 149−155. [DU Bofeng, LI Da, XIAO Shiyun, et al. Comprehensive evaluation of aroma quality of different pepper based on HS-SPME-GC-MS and principal component analysis[J]. Food Research and Development, 2019, 40(7): 149−155.]

[15] 陆宽, 王雪雅, 孙小静, 等. 电子鼻结合顶空 SPME-GC-MS 联用技术分析贵州不同品种辣椒发酵后挥发性成分[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 199−205. [LU Kuan, WANG Xueya, SUN Xiaojing, et al. Analysis of the volatile components of fermented hot pepper from different varieties grown in Guizhou by electronic nose combined with SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2018, 39(4): 199−205.]

[16] 颜宇鸽, 段桂媛, 唐鑫静, 等. 不同品种辣椒制作的辣椒酱品质对比分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 225−232. [YAN Yuge, DUAN Guiyuan, TANG Xinjing, et al. Comparative analysis

of the quality of chili sauce made from different varieties of peppers[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 225−232.]

[17] 段泽瑞, 田梅兰, 刘杨柳, 等. 食盐添加量对虾酱理化性质和细菌多样性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 85−93. [DUAN Zerui, TIAN Meilan, LIU Yangliu, et al. Effect of salt concentration on physicochemical properties and bacterial diversity of shrimp paste[J]. Food Science, 2024, 45(15): 85−93.]

[18] 陈金峰, 周悦, 黄薪银, 等. 新型橙皮辣椒豆酱的发酵工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(5): 63−67. [CHEN Jinfeng, ZHOU Yue, HUANG Xinyin, et al. Study on a novel fermentation protocol of chili bean sauce with orange skin[J]. Storage and Process, 2022, 22(5): 63−67.]

[19] 班雨函, 米思, 韩军, 等. 香辛料对低盐虾酱中生物胺和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 153−166. [BAN Yuhan, MI Si, HAN Jun, et al. Effect of spices on biogenic amine and flavor in low-salt shrimp paste[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 153−166.]

[20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定: GB 5009.235-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of amino acid nitrogen in food: GB 5009.235-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中丙二醛的测定: GB 5009.181-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3−5. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of malondialdehyde in foods: GB 5009.181-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 3−5.]

[22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of volatile base nitrogen in food: GB 5009.228-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

[23] 王炳华, 严利强, 胡建国. 不同方法制备鳀鱼鱼露风味物质比较[J]. 中国调味品, 2019, 44(12): 85−89,98. [WANG Binghua, YAN Liqiang, HU Jianguo. Comparison of flavor substances of anchovy fish sauce prepared by different methods[J]. China Condiment, 2019, 44(12): 85−89,98.]

[24] 杨兵兵, 王利文, 陈智慧, 等. 发酵温度对低盐虾酱中主要风味物质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(20): 300−308. [YANG Bingbing, WANG Liwen, CHEN Zhihui, et al. Effect of fermentation temperature on the main flavor substances in low-salt shrimp paste[J]. Food Science, 2023, 44(20): 300−308.]

[25] YANG Bingbing, LIU Yangliu, SANG Yaxin, et al. Bacterial diversity and physicochemical properties of low-salt shrimp paste fermented at different temperatures[J]. LWT, 2023, 187: 115277.

[26] KLOMKLAO S, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Effects of the addition of spleen of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) on the liquefaction and characteristics of fish sauce made from sardine (*Sardinella gibbosa*)[J]. Food Chemistry, 2006, 98(3): 440−452.

[27] 郑容, 何旭峰, 熊双, 等. 不同品种辣椒自然发酵过程中品质变化研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(3): 243−249. [ZHENG Rong, HE Xufeng, XIONG Shuang, et al. Quality changes of different varieties of pepper during natural fermentation process[J]. China Brewing, 2024, 43(3): 243−249.]

[28] 贺子玉, 何心, 胡楠, 等. 发酵辣椒中的微生物及其风味物质研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 334−342. [HE Ziyu, HE Xin, HU Nan, et al. Research progress on the microorganisms and flavor substances in fermented pepper[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 334−342.]

[29] 莫星忱. 添加物对快速发酵虾酱中组胺含量及其相关品质的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016: 30−33. [MO Xingyou. Effect of additives on histamine content and its related quality in fast-fermented shrimp paste[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016: 30−33.]

[30] 许志颖. 虾酱风味指纹图谱的构建及关键香气表征[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020. [XU Zhiying. Construction of fingerprint spectrum of shrimp paste and analysis of key fragrance components[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2020.]

[31] ZHANG Jinping, YING Yue. Study on terpenoid degradation of *Pinus massoniana* sawdust for mycelium germination and cultivation of edible fungi[J]. BioResources, 2019, 14(4): 8058−8071.

[32] 丁习林, 王桂瑛, 邹颖玲, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析 KCl 部分替代 NaCl 对宣威火腿挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 190−198. [DING Xilin, WANG Guiying, ZOU Yingling, et al. Influence of partial replacement of NaCl with KCl on the volatile compounds of Xuanwei ham investigated by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2020, 41(24): 190−198.]

[33] 廖添洪, 张辰晏, 吉宏武, 等. 真空低温蒸煮技术对凤尾虾品质与风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 310−320. [LIAO Tianhong, ZHANG Chenyan, JI Hongwu, et al. Effect of sous vide technology on quality and volatile compounds in peeled deveined tail-on shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 310−320.]

[34] 关君兰, 姚雨萱, 伍菱, 等. 轻度盐腌大黄鱼的气味特征及形成途径[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 235−244. [GUAN Junlan, YAO Yuxuan, WU Ling, et al. Odor characteristics and formation pathways of low-salted large yellow croaker[J]. Food Science, 2023, 44(24): 235−244.]

[35] 何莲, Sook Wah Chan, 张鑫, 等. 不同产地的大红袍花椒对麻婆豆腐香气形成的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(4): 198−208. [HE Lian, CHAN Sook Wah, ZHANG Xin, et al. Effect of Dahongpao *Zanthoxylum bungeanum* from different places of origin on formation of aroma of mapo tofu[J]. China Condiment, 2025, 50(4): 198−208.]

[36] ZHAO Chi, SU Wei, MU Yingchun, et al. Correlations between microbiota with physicochemical properties and volatile flavor components in black glutinous rice wine fermentation[J]. Food Research International, 2020, 138: 109800.

[37] 李婷婷, 夏枫峰, 油九菊, 等. 肠道微生物群落结构对凡纳滨对虾生长的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 499−507. [LI Tingting, XIA Fengfeng, YOU Jiuju, et al. Effects of the intestinal microbial community structure on the growth of litopenaeus vannamei[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2022, 41(6): 499−507.]

[38] 张琪, 朱丹, 牛广财, 等. 高通量测序分析沙棘酵素自然发酵

过程中细菌多样性[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 158−165. [ZHANG Qi, ZHU Dan, NIU Guangcai, et al. Bacterial diversity analysis during natural fermentation of sea buckthorn jiaosu by high-throughput sequencing[J]. Food Science, 2022, 43(8): 158−165.]
[39] 李宏洋, 张通化, 罗丽蓉, 等. 泡椒汁中耐受辣椒素乳酸菌的筛选及其耐受性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 110−117. [LI Hongyang, ZHANG Tonghua, LUO Lirong, et al. Screening and tolerance of capsaicin-tolerant lactic acid bacteria in pickled pepper juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 110−117.]
[40] 王琪琪, 田界先, 潘宗东, 等. 基于 Illumina MiSeq 分析贵州凯里酸汤独特风味的优势菌群[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 40−47. [WANG Qiqi, TIAN Jiexian, PAN Zongdong, et al. Analysis of dominant microflora associated with the unique flavor of Guizhou Kaili sour soup using Illumina MiSeq sequencing[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 40−47.]
[41] 翟威涛, 吴双全, 柴丽娟, 等. 酱酒酒醅中碱土大洋芽孢杆菌的分离鉴定及其产香代谢特征[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(7): 1056−1066. [ZHAI Weitao, WU Shuangquan, CHAI Lijuan, et al. Isolation, identification, and aroma-producing metabolic characteristics of *Oceanobacillus alkalisoli* in the fermented grains of sauce-flavor Baijiu[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(7): 1056−1066.]
[42] 陈一铭, 顾泽茂, 李莉娟, 等. 白斑综合征病毒感染对克氏原螯虾肠道菌群的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 40−46. [CHEN Yiming, GU Zemao, LI Lijuan, et al. Effects of white spot syndrome virus (WSSV) infection on intestinal flora composition of *Procambarus clarkii*[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 40−46.]
[43] 高远. 发现于茅台地区的黄杆菌 *Flavobacterium maotaiensis* sp. nov. 和 *Flavobacterium renhuaiensis* sp. nov. 的分类学研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014. [GAO Yuan. *Flavobacterium maotaiensis* sp. nov. and *Flavobacterium renhuaiensis* sp. nov., isolated from Maotai town[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.]
[44] EDWARDS R A, DAINTY R H, HIBBARD C M. Volatile compounds produced by meat pseudomonads and related reference strains during growth on beef stored in air at chill temperatures[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1987, 62(5): 403−412.
[45] RAJEEV M, CHO J C. Rhodobacteraceae are prevalent and ecologically crucial bacterial members in marine biofloc aquaculture[J]. Journal of Microbiology, 2024, 62(11): 985−997.
[46] LI Siqi, RAO Chuanyan, ZANG Xiaomin, et al. Characterization of aroma active compounds and microbial communities in spontaneously fermented *Vitis quinquangularis* wines[J]. Food Research International, 2025, 214: 116676.