

虾壳粉添加量对小龙虾酱发酵过程中挥发性风味化合物及微生物群落动态变化的影响

于金玉, 谭玲薇, 胡传峰, 陈戈辉, 李弥友, 乔宇, 于巍

Effects of Addition of Shrimp Shell Powder on Volatile Flavor Compounds and Dynamic Changes of Microbial Community during Fermentation of Crayfish Shrimp Paste

YU Jinyu, SHEN Lingwei, HU Chuanfeng, CHEN Gehui, LI Miyou, QIAO Yu, and YU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050348>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小龙虾头营养成分及风味滋味特性分析与评价

Analysis and Evaluation of Nutrient Composition, Flavor and Taste Characteristics of Crayfish Head

食品工业科技. 2023, 44(14): 396–405 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100105>

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

Effects of Different Thermal Processing Methods on the Physicochemical Properties, Volatile Flavor Substances and Sensory Quality of Crayfish Hepatopancreas

食品工业科技. 2024, 45(15): 126–136 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100009>

不同发酵时间对乌虾酱风味的影响

Effect of Different Fermentation Time on the Flavor of Shrimp Paste

食品工业科技. 2020, 41(12): 75–81,87 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.012>

低盐紫苏虾酱制备工艺优化及其挥发性风味物质分析

Optimization of Low Salt Perilla Shrimp Paste and Analysis of Its Volatile Flavor Compounds

食品工业科技. 2024, 45(7): 227–234 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060052>

软包装即食小龙虾关键工艺对质地的影响

Effect of Key Technology on Texture of Ready-to-eat Crayfish in Soft Packaging

食品工业科技. 2022, 43(16): 41–49 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110129>

微波加热对小龙虾品质的影响

Effects of Microwave Heating on the Quality of Crayfish

食品工业科技. 2020, 41(18): 8–16 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

于金玉, 谌玲薇, 胡传峰, 等. 虾壳粉添加量对小龙虾酱发酵过程中挥发性风味化合物及微生物群落动态变化的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 165–175. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050348

YU Jinyu, SHEN Lingwei, HU Chuanfeng, et al. Effects of Addition of Shrimp Shell Powder on Volatile Flavor Compounds and Dynamic Changes of Microbial Community during Fermentation of Crayfish Shrimp Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 165–175. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050348

· 生物工程 ·

虾壳粉添加量对小龙虾酱发酵过程中挥发性风味化合物及微生物群落动态变化的影响

于金玉^{1,2}, 谌玲薇^{1,3}, 胡传峰^{1,3}, 陈戈辉^{1,3}, 李弥友⁴, 乔 宇¹, 于 巍^{1,*}

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430068;

2. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070;

3. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北武汉 430064;

4. 湖北绿亿园食品科技有限公司, 湖北潜江 433116)

摘要: 本研究以小龙虾虾酱为研究对象, 分别添加 0、20%、40% 的虾壳粉, 在小龙虾虾酱发酵第 0、6 和 12 d 的三个阶段, 通过电子鼻、气相色谱-质谱法 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) 以及 16S rRNA 测序对小龙虾虾酱的风味及微生物演变进行探究。结果表明, 添加虾壳粉后可以显著增加虾酱样品中挥发性风味化合物的种类与含量 (含硫化合物、胺类、酮类、酯类和杂环类), 其中添加 20% 虾壳粉能更好地促进挥发性风味化合物的产生与增长; 结合挥发性风味化合物香气活性值 (Odor activity value, OAV) 和变量重要性投影值 (Variable Importance for the Projection, VIP) 共筛选出 3 种物质 (2-癸酮、甲硫醇、二甲基三硫) 作为区分不同虾壳粉添加量和不同发酵时间差异的标志性风味化合物。虾壳粉的添加增加了微生物属的丰度与多样性 (海洋芽孢杆菌属 (*Oceanobacillus*)、枝芽孢杆菌属 (*Virgibacillus*)、樱桃样芽孢杆菌属 (*Cerasibacillus*)) , 结合 Spearman 相关系数分析发现, 添加虾壳粉样品组中独有的枝芽孢杆菌属 (*Virgibacillus*) 与多种关键风味化合物呈显著正相关, 对风味贡献最大。综上所述, 在小龙虾酱中添加虾壳粉, 尤其是添加量为 20% 时, 有利于促进风味相关微生物属的生长进而丰富虾酱的风味。

关键词: 小龙虾, 虾壳粉, 虾酱, 挥发性风味化合物, 微生物

中图分类号: TS254.9 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2025)09-0165-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050348

本文网刊:



Effects of Addition of Shrimp Shell Powder on Volatile Flavor Compounds and Dynamic Changes of Microbial Community during Fermentation of Crayfish Shrimp Paste

YU Jinyu^{1,2}, SHEN Lingwei^{1,3}, HU Chuanfeng^{1,3}, CHEN Gehui^{1,3}, LI Miyou⁴, QIAO Yu¹, YU Wei^{1,*}

(1. Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430068, China;

2. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. College of Bioengineering and Food Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China;

4. Hubei Lvyiyuan Food Technology Co., Ltd., Qianjiang 433116, China)

Abstract: This study focused on crayfish shrimp paste as the research subject, with the addition of 0, 20%, and 40% shrimp shell powder, respectively. Across three fermentation stages of 0, 6, and 12 days for the crayfish shrimp paste, an

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 湖北省科技创新人才计划-科技人才服务企业项目 (2023DJC100); 潜江市公益性行业科研计划项目 (2023GYX030)。

作者简介: 于金玉 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 1531909726@qq.com。

* 通信作者: 于巍 (1981-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 232891894@qq.com。

investigation into the flavor and microbial evolution was conducted utilizing electronic noses, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and 16S rRNA sequencing. The results showed that adding shrimp shell powder could significantly increase the types and contents of volatile flavor compounds (sulfur compounds, amines, ketones, esters and heterocycles) in shrimp paste samples, and adding 20% shrimp shell powder could better promote the production and growth of volatile flavor compounds. Combining odor activity value (OAV) and variable importance for the projection (VIP) screened out three substances (2-decanone, methylmercaptan, dimethyl trisulfide) as the signature flavor compounds to distinguish the difference of different addition amounts of shrimp shell powder and different fermentation time. The addition of shrimp shell powder increased the abundance and diversity of microbial genera (*Oceanobacillus*, *Virgibacillus*, *Cerasibacillus*). Combined with Spearman correlation coefficient analysis, it was found that the unique *Virgibacillus* in the shrimp shell powder sample group showed significant positive correlation with several key flavor compounds and contributed the most to flavor. In summary, adding shrimp shell powder to lobster paste, especially when the amount is 20%, is conducive to promoting the growth of flavor-related microorganisms and enriching the flavor of shrimp paste.

Key words: crayfish; shrimp shell powder; shrimp paste; Volatile flavor compounds; microbes

虾酱是一种酱类调味品,由虾及其副产品经捣碎,加盐腌制后发酵而成,因其风味独特,被作为沿海地区的传统调味品^[1]。目前,虾酱的研究与应用主要集中在蚱蜢子虾、南美白对虾、太平洋磷虾等^[2-4]。小龙虾主要分布在长江中下游地区,具有高蛋白、低脂肪的特性,氨基酸含量丰富,风味独特,肉质鲜美^[5]。然而,小龙虾中虾壳和虾头等副产物在整虾中占比高达 80%^[6],不仅有损经济效益而且对环境也构成了额外的压力和负担。我国天津地区的传统虾酱中,有一类是以虾肉和虾头为原料发酵而来,这类虾酱的微生物组成要显著高于单一虾肉发酵的虾酱,其产生的风味也更加丰富^[7]。程小飞等^[8]发现小龙虾虾壳粉中粗蛋白质含量约占 20%~30%,蛋白质的水解可以为发酵食品提供独特的风味^[9]。Zhang 等^[10]在研究对虾不同部分香气属性时也发现虾皮是虾的重要风味来源,因此虾壳不仅可以作为动物饲料优质蛋白源,还可以作为发酵虾酱的重要原料,增加营养的同时也可以促进风味的多样性。

虾酱在发酵过程中,微生物代谢分泌酶,这些酶又参与碳水化合物、蛋白质、脂肪水解,最终形成风味或风味前体物质^[9]。Phewpan 等^[11]在研究中发现含有氨基肽酶基因的 *Lentibacillus* 菌株对泰国虾酱独特风味品质起决定性作用, Jung 等^[12]发现厌氧菌可能与韩国虾酱中特征物质(甲胺、醋酸盐和丁酸盐)具有相关性。总的来说,有关虾酱中微生物和风味相关性的研究众多,不同品种、地区的虾酱产生的风味物质与微生物的复杂代谢过程有关。然而,虾壳粉添加量和发酵时间如何影响小龙虾酱的风味特性与微生物群落结构,目前尚缺乏明确的认识和清晰的阐释,了解发酵过程中风味物质和微生物群落结构的变化对虾酱配方合理优化具有积极意义。

基于此,本研究以小龙虾肉和虾壳(添加相对于虾肉 0、20% 和 40% 的虾壳粉含量)为原料,选用自然发酵法进行虾酱制作。采用电子鼻、气相色谱-质谱法(GC-MS)对不同组别虾酱的风味组成进行探究,同时筛选关键风味和差异风味物质,采用 16S rRNA 对不同组别微生物进行分析,找到不同虾壳粉

添加量和发酵时间虾酱的微生物群落演变规律。最后,基于风味物质和微生物进行相关性分析明确微生物与重要风味物质形成的相关性。本研究不仅可以提高小龙虾副产物的利用率,同时也为虾酱发酵剂的选择提供了参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小龙虾(18.00±2.00 g) 湖北省武汉市白沙洲海鲜市场;2-辛醇(色谱纯) 上海沪震实业有限公司; Ezup 柱式动物基因组 DNA 纯化试剂盒 SanPrep、柱式 PCR 产物纯化试剂盒 深圳子科生物科技有限公司; TransStart Fastpfu DNA 聚合酶(2.5 U/μL) 北京全式金生物技术有限公司。

DHG-9920A 电热鼓风干燥箱、MGC-350HP 型人工气候箱 上海一恒科学仪器有限公司; GL224-1SCN 分析天平(感量 0.1 mg) 广州市深华生物技术有限公司; PEN3 电子鼻 德国 AIRSENSE 公司; 7890A-5975C GC-MS 仪 美国 Agilent Technologies 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 虾酱的制备 预处理: 取鲜活小龙虾,洗干净后去头、分离尾部虾肉和虾壳,再次清洗、沥干,放入鼓风干燥箱,温度为 65 ℃,烘干至虾肉和虾壳水分含量分别降至 18%、8% 以下,取出后分别用研磨机研磨,其中虾肉研磨至成绒状,虾壳研磨成粉状,过 40 目筛子后,分别装入密封袋放置于干燥环境中,以备使用。

配制虾酱: 将预处理后的虾肉和虾壳粉按照一定比例配制成虾酱。其中,不含虾壳的虾酱配比为虾肉:水:食盐=10:20:1.5; 虾壳含量为 20% 的虾酱配比为虾肉:虾壳粉:水:食盐=10:2:20:1.5; 虾壳含量为 40% 的虾酱配比为虾肉:虾壳粉:水:食盐=10:4:20:1.5, 分别记为 Non 组、20% 组、40% 组。

将上述三组配制好的虾酱置于锥形瓶中,用两层纱布封口,放入 25 ℃ 人工气候箱中自然发酵,每 72 h 在净化工作台上用无菌的筷子捣酱一次,分别

于发酵 0、6、12 d 取样待用。

1.2.2 电子鼻测定 称取 3.00 g 样品于 20 mL (22.5 mm×75.5 mm) 顶空瓶中, 置于 45 ℃ 磁力搅拌水浴锅中平衡 50 min, 然后将电子鼻的补气针和进气针同时插入平衡完毕的顶空瓶中对样品挥发性物质进行测定。每个样品做 3 个平行。

测定条件: 清洗时间 100 s, 测定时间 180 s, 内流速 300 mL/min, 注射流速 300 mL/min, 特征提取时间 176~180 s, 在测定时间段内对挥发性风味化合物进行传感器分析和 PCA 处理。EN3 型电子鼻传感器对应的敏感物质见表 1。

表 1 PEN3 型电子鼻传感器对应的敏感物质

Table 1 Sensitive substances corresponding to PEN3 electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分、苯类
2	W5S	灵敏度大、对氮氧化合物灵敏
3	W3C	芳香成分、氨类
4	W6S	主要对氢化合物有选择性
5	W5C	短链烷烃芳香成分
6	W1S	对甲基灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇、醛、酮类灵敏
9	W2W	芳香成分, 对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.3 GC-MS 测定 参考 Zhang 等^[10] 的方法并加以修改。

1.2.3.1 样品处理 准确称取样品 1.00 g 放入 20 mL (22.5 mm×75.5 mm) 顶空瓶中, 加入 50 μL 内标(2-辛醇, 在甲醇中浓度为 1.68 ng/g) 和 2 mL 饱和氯化钠溶液, 于 45 ℃ 磁力搅拌水浴锅中旋转 10 min, 用活化好的萃取头顶空吸附 40 min。吸附完毕插 GC-MS 进样口解吸 5 min, 每个样品做 3 个平行。

1.2.3.2 GC-MS 条件 GC 条件: 进样口温度为 250 ℃, 升温程序: 烘箱温度初温在 40 ℃, 以 2 ℃/min 的速度升至 100 ℃, 然后以 5 ℃/min 的速度升至 180 ℃, 最后以 8 ℃/min 的速度升至 250 ℃, 保持 5 min, 涂层纤维在 250 ℃ 下在进样口解吸 5 min。载气为氮气, 流速恒定为 1.0 mL/min。

MS 条件: 接口温度 280 ℃, 四极杆温度 150 ℃, 离子源温度 230 ℃。

1.2.3.3 定性定量分析 定性分析: 采用 GC-MS 仪进行分析鉴定。根据 C7~C30 的正构烷烃混标计算各挥发性风味化合物的保留指数进行定性, 按公式(1)计算。选取匹配度>60% 的物质并结合计算机谱库(NIST08)进行初步检索, 最终确认挥发性物质的化学组成。

$$\text{保留指数} = 100n + 100 \times \frac{t_i - t_n}{t_{n+1} - t_n} \quad \text{式 (1)}$$

式中, n 为正构烷烃含碳原子数, t_i 为目标化合物 i 保留时间(min), t_n 为 C_n 保留时间(min), t_{n+1} 为 C_{n+1} 保留时间(min)。

定量分析: 通过计算待测挥发物与内标物峰面积的比值得到各挥发性化合物的含量。该方法为单点内标法, 将绝对校正因子假定为 1, 可估算各挥发物的实际含量, 气味浓度(三个平行的平均值)和气味活性值(OAV)由以下公式计算:

$$W_i(\text{ng/g}) = f' \times \frac{A_i \times W_s}{A_s} \quad \text{式 (2)}$$

$$OAV = \frac{W_i}{C_i} \quad \text{式 (3)}$$

式中, W_i 为气味浓度(ng/g), f' 为校准因子(均设为 1.0), A_i 为物质峰面积, W_s 为内标物浓度(ng/g), A_s 为内标物峰面积, C_i 为水中气味的感觉阈值(μg/kg)。

1.2.4 微生物多样性检测 按照虾壳粉添加量和发酵时间分别对虾酱样品 DNA 进行取样, 使用 Ezup 柱基因组 DNA 纯化试剂盒提取总基因组 DNA。使用 TransStart Fastpfu DNA 聚合酶扩增细菌 16S rRNA 基因的 V3~V4 区, PCR 扩增反应条件为: 94 ℃ 预变性 10 min; 94 ℃ 变性 0.5 min; 55 ℃ 退火 0.5 min; 72 ℃ 延伸 1 min; 30 个循环; 最后 72 ℃ 延伸 10 min, 降温到 25 ℃ 预保存 5 min。PCR 产物使用 Sanper-column PCR 产物纯化试剂盒进行纯化。使用 Illumina HiSeq 平台对 16S rRNA 基因进行测序。

1.3 数据处理

每组实验独立重复 3 次, 实验结果采用平均值±标准差表示, 使用 SPSS 22.0 和 Origin 2021 进行数据分析和绘图, 采用单因素方差分析, $P<0.05$ 具有显著性。

2 结果与分析

2.1 电子鼻结果分析

主成分分析图可以显示数据的差异性^[13]。由图 1(A)的电子鼻主成分分析图可知, 第一主成分和第二主成分的贡献率分别为 88.31% 和 10.45%, 总贡献率为 98.76%。说明该主成分能够很好地反映出不同样品挥发性气味的全部特征。从图中可以看出, 各样品产生的香气区域不同, 均无重叠, 即所有样品都可以完全被分离。

电子鼻可以实现混合气味的定性或定量^[14]。由图 1(B)雷达图可以看出, 虾酱样品在 W5S、W1W、W2S、W3S 传感器处响应值较高, 这与 Zhu 等^[9] 的研究结果类似。结合表 1 分析, 未发酵虾酱样品中随着虾壳粉添加量的增加其在 W5S、W1W 传感器处的响应值也提高, 说明虾壳粉的添加有利于提高未发酵虾酱中氮氧化合物和无机硫化物的含量; 发酵 6 d 的虾酱中添加 20% 虾壳粉的样品在传感器的响应值最高, 这与 Desmelati 等^[15] 的研究类似, 虾壳添加过量会导致香味指标降低; 发酵 12 d 的虾酱中, 添

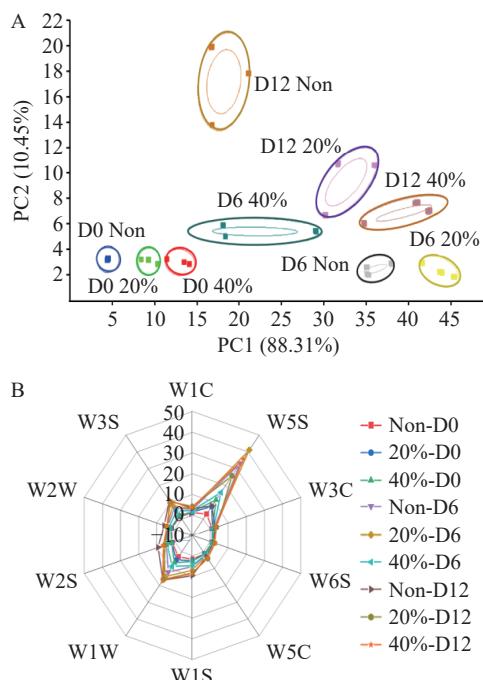


图1 各样品组电子鼻主成分分析图(A)和雷达图(B)

Fig.1 Electronic nose principal component analysis (A) and radar chart (B) of each sample group

加虾壳粉会降低 W2S、W2W 的响应值,而提高 W5S 处的响应值。

2.2 GC-MS 分析

2.2.1 各类挥发性物质含量分析 采用 GC-MS 对添加不同虾壳粉的不同发酵时间的虾酱风味进行分析,共鉴定出 62 种挥发性化合物。根据化学结构和一般性质将其分为 7 类,包括 6 种胺类、6 种醇类、13 种酮类、9 种酯类、16 种杂环类、5 种含硫化合物以及 7 种其他,如表 2 所示。

杂环类物质在发酵、烘烤后的食品和白酒中大量存在,被认为与美拉德反应和微生物发酵有关^[16]。由表 2 中可知,杂环类物质中以吡嗪类为主,几乎存在于各个组中,推测是由于经过烘烤等前处理,虾酱原料发生了美拉德反应,促进了反应产物吡嗪类的生成^[17]。发酵第 6 d,添加虾壳粉后杂环类物质含量由 24.21 ng/g 增加至 131.62 ng/g;发酵第 12 d,虾壳粉的添加使杂环类物质含量由 136.51 ng/g 增加至 203.35 ng/g(20% 组),表明虾壳粉的添加可以促进发酵后虾酱中杂环类物质的产生,可能是由于虾壳粉富含的蛋白质、氨基酸加速发酵过程中的美拉德反应,促进了杂环类物质的生成。

表2 各样品组中挥发性物质含量

Table 2 Volatile substance content in each sample group

类别	名称	含量(ng/g)								
		Non-D0	20%-D0	40%-D0	Non-D6	20%-D6	40%-D6	Non-D12	20%-D12	40%-D12
胺类	3,3'-亚氨基二丙胺	—	0.98±0.38	—	—	—	—	—	—	—
	三甲胺	—	8.12±2.55	22.55±11.45	8.34±2.04	30.11±12.40	45.47±0.05	23.84±5.63	75.80±1.36	31.61±12.27
	六亚甲基四胺	—	—	—	—	—	—	1.18±0.39	1.38±0.01	—
	乙酰乙酰甲胺	—	—	—	—	—	—	—	1.74±0.16	—
	N-异丁基乙酰胺	—	—	—	—	27.57±7.60	—	—	—	3.42±1.19
醇类	1-甲氧基-2-丙胺	1.43±0.60	—	—	—	—	—	—	—	—
	胺类(6)	1.43±0.60	9.10±2.93	22.55±11.45	8.34±2.04	71.62±0.72	45.47±0.05	25.02±5.27	78.32±0.80	35.03±13.38
	苯乙醇	—	—	—	0.72±0.23	0.66±0.10	0.01±0.00	3.42±0.23	9.9±2.30	4.89±1.30
	2-乙基己醇	—	0.34±0.06	0.70±0.29	0.58±0.13	2.26±0.50	0.01±0.00	1.46±0.08	2.51±0.56	3.04±1.38
	1-己醇	—	—	0.43±0.22	—	—	—	—	—	—
	异戊醇	—	—	—	6.08±1.31	—	—	2.17±0.15	—	—
	1-辛烯-3-醇	—	0.27±0.03	—	—	—	—	1.05±0.09	—	—
	反式-3-己烯-1-醇	—	—	—	—	2.25±0.69	—	—	—	—
	醇类(6)	—	0.61±0.09	1.13±0.51	7.38±1.66	4.20±1.57	0.02±0.01	8.10±0.32	12.41±2.86	8.82±2.03
	己醛	2.23±0.87	0.31±0.07	0.66±0.49	—	—	—	—	—	—
醛酮类	丙酮	—	—	—	0.57±0.15	—	—	—	—	—
	苯基丙酮	—	—	—	—	—	—	—	4.55±0.67	—
	2-辛酮	—	—	—	2.43±0.38	55.47±14.21	0.22±0.02	2.41±0.37	10.22±1.06	31.64±15.66
	3-辛酮	—	—	—	—	1.39±0.34	0.01±0.00	—	1.05±0.18	—
	2-十一酮	—	—	—	—	3.27±0.16	0.01±0.00	0.76±0.06	7.15±1.35	2.23±1.01
	2-十三烷酮	—	—	—	—	—	—	—	1.85±0.34	—
	2-癸酮	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	9.85±1.76	—
	2-壬酮	—	—	—	1.24±0.14	9.93±2.51	0.04±0.00	3.14±0.50	—	—
	2-庚酮	—	—	—	1.23±0.32	—	0.02±0.00	—	—	—
	β-甲基苯丙醛	—	—	—	—	—	—	—	—	0.92±0.20
	2-十四酮	—	—	—	—	—	—	—	2.37±0.52	—
	2-十二烷酮	—	—	—	—	—	—	—	1.17±0.86	—
	醛酮类(13)	2.23±0.87	0.31±0.07	0.66±0.49	5.28±1.10	68.97±18.45	0.30±0.02	6.06±1.23	45.29±8.51	46.40±8.37

续表 2

类别	名称	含量(ng/g)								
		Non-D0	20%-D0	40%-D0	Non-D6	20%-D6	40%-D6	Non-D12	20%-D12	40%-D12
酯类	对叔丁基苯乙酸甲酯	—	—	—	—	—	—	—	41.55±7.72	—
	异戊酸甲酯	—	—	—	4.75±0.80	14.03±3.42	0.08±0.01	6.80±0.89	18.23±14.75	28.44±17.03
	丁酸甲酯	4.69±0.24	1.36±0.57	2.20±1.70	—	—	—	—	—	—
	2-丁烯酸甲酯	—	—	—	1.10±0.62	—	—	0.82±0.15	—	—
	2-甲基丁酸甲酯	1.74±0.12	—	0.73±0.01	2.07±0.38	—	—	2.25±0.45	3.73±1.14	—
	3,3-二甲基丙烯酸甲酯	—	—	—	—	1.38±0.52	0.01±0.00	—	—	1.99±1.21
	嘧啶-4,6-二甲酸二甲酯	—	—	—	—	1.80±0.13	—	—	—	—
	2-甲基丁酸丙酯	—	—	—	—	—	—	—	0.99±0.30	—
	丁酸芳樟酯	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	—	—
	酯类(9)	5.85±1.07	1.36±0.57	2.93±1.68	8.79±1.27	19.50±2.14	0.10±0.01	10.24±0.99	71.42±11.40	30.43±18.23
杂环类	2,6-二甲基吡嗪	—	—	—	—	—	—	1.16±0.04	2.95±0.82	3.04±1.40
	甲基吡嗪	—	—	0.60±0.31	0.54±0.11	4.24±0.89	0.02±0.01	1.37±0.07	2.82±0.69	3.47±1.53
	2,5-二甲基吡嗪	—	—	1.55±0.57	3.93±0.92	22.08±4.92	0.11±0.01	12.14±0.55	24.54±5.43	29.15±13.24
	2,3,5,6-四甲基吡嗪	—	—	—	1.55±0.50	4.07±0.92	0.02±0.00	18.74±1.19	13.59±2.46	5.17±2.47
	3-氨基吡唑	—	—	—	—	—	—	—	3.14±0.77	—
	2-正戊基呋喃	—	—	—	—	9.99±0.35	0.02±0.00	3.63±0.91	—	—
	2,3-二甲基吡嗪	—	—	—	0.54±0.10	4.36±0.99	0.02±0.00	1.90±0.09	1.47±0.22	3.07±1.39
	2,6-二乙基吡嗪	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	—	—
	2-乙基-5-甲基吡嗪	—	—	—	—	2.08±0.46	0.008±0.00	0.75±0.03	2.15±0.63	1.91±0.85
	3-乙基-2,5-甲基吡嗪	—	0.30±0.04	0.72±0.30	—	2.31±0.46	0.02±0.00	1.80±0.02	5.30±1.06	3.52±1.65
含硫化合物	2-乙基-6-甲基吡嗪	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	—	1.13±0.56
	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	—	—	—	0.52±0.11	2.72±0.46	—	3.32±0.13	3.52±0.84	6.79±1.46
	三甲基吡嗪	—	0.33±0.05	0.80±0.38	4.53±0.97	20.03±4.42	0.09±0.004	28.08±0.82	42.55±8.4	28.53±13.44
	2,3,5-三甲基-6-乙基吡嗪	—	—	—	—	—	—	3.86±0.14	2.22±0.45	—
	甲氧基苯酚	14.02±13.28	—	7.82±3.44	7.16±2.66	60.51±8.26	134.31±0.00	53.25±4.93	77.43±13.93	90.75±46.52
	2-肼基-4,6-二甲基嘧啶	—	—	—	—	0.91±0.13	—	—	—	—
	杂环类(16)	14.02±13.28	0.64±0.09	11.48±4.00	24.21±4.92	131.62±18.46	133.70±0.97	136.51±8.46	203.35±17.46	221.93±36.62
	甲硫醇	—	—	—	—	—	—	—	54.27±5.67	—
	3-甲硫基-2-丁酮	—	—	—	—	—	—	—	1.24±0.44	0.61±0.24
	二甲基三硫	—	—	—	—	—	—	—	61.69±16.39	6.16±3.12
其他	S-甲基N,N二乙基二硫代氨基甲酸	—	—	—	—	—	—	—	—	1.93±0.95
	3-甲基硫代丁酸S-甲酯	—	—	—	—	—	—	—	—	2.13±0.89
	含硫化合物(5)	—	—	—	—	—	—	—	126.98±5.70	10.13±5.15
	乙酸	—	—	—	2.77±0.34	—	—	5.77±1.35	—	15.2±0.24
	2-环氧乙烷羧酸	—	0.58±0.00	—	—	1.30±0.29	—	—	—	—
其他	百里香酚	—	—	—	—	318.90±84.66	3.42±0.02	323.22±11.21	—	0.98±0.43
	香芹酚	—	—	—	—	—	—	—	1.47±0.12	—
	3-甲基-4-异丙基苯酚	91.14±37.59	94.59±15.68	133.35±20.25	50.21±0.08	—	—	—	—	—
	对二甲苯	—	—	—	—	1.30±0.30	—	1.12±0.41	2.3±0.68	—
	1,3-二甲基苯	—	—	—	—	—	—	1.06±0.07	1.18±0.18	—

注: “—”表示未检出。

醛酮类物质共检出 13 种。其中醛类仅有 2 种, 醛类物质主要来自于多不饱和脂肪酸氧化或通过不饱和脂肪酸在微生物和酶的作用下发生降解^[18], 而虾肉中脂肪含量比较少, 这可能是虾肉中醛类物质含量较少的原因, 这与徐斯婕等^[19]对 9 种国产虾酱风味

分析结果相似。醛类主要存在于未发酵虾酱组别, 添加虾壳粉后醛类物质含量下降, 可能是虾壳粉中的甲壳素抑制了己醛的合成^[20]。酮类物质与微生物发酵、氧化产生的多不饱和脂肪酸和氨基酸有关^[21], 在添加 20% 虾壳粉的虾酱组别中含量最高, 其中 2-辛

酮占比最高,2-十一酮的含量随着发酵时间的延长而升高,与 Zhu 等^[9]的结果相反,这可能是由于原料的差异引起的。

醇类物质是由碳水化合物分解、脂肪氧化、微生物代谢产生^[22],从表中可以看出,醇类在 20%-D12 组中含量最高(12.41 ng/g),可能是因为发酵后期的环境更适合微生物生长代谢,虾壳粉中富含的几丁质等多糖作为醇类的前体物质,在微生物作用下进一步分解增加醇类含量。酯类物质通常是由醇和有机酸的非酶酯化反应或微生物的酶催化反应形成的^[22],具有良好的风味,在发酵 12 d 时种类和含量最高,添加 20% 虾壳粉后酯质含量由 10.24 ng/g 升至 71.42 ng/g,这可能与作为酯类前体的醇类物质在添加虾壳粉后大量生成有关。胺类物质主要由微生物代谢产生的脱羧酶与相应的氨基酸发生催化反应,使游离氨基酸脱羧产生^[23]。虾酱样品中胺类主要为三甲胺,三甲胺在 20%-D12 组含量最高,为 75.80 ng/g,这是因为经过烘烤前处理,虾体内的氧化三甲胺在高温作用下发生非酶分解产生三甲胺^[17],Liang 等^[24]同样在热加工后的对虾中检测出三甲胺。含硫化合物仅在发酵第 12 d 检测到,其中添加 20% 虾壳粉组别中含量最高(126.98 ng/g),含硫化合物是虾酱原料在嗜盐微生物的作用下,蛋白质降解生成含硫氨基酸经进一步降解产生^[25],虾壳粉的加入可能为微生物发酵提供独特的蛋白质底物,可促进含硫化合物的生成。

以上结果表明,虾壳粉的添加可以促进含硫化合物、胺类、酮类、少部分酯类和大部分杂环类物质的产生,这可能是因为虾壳粉中含有大量蛋白质、碳水化合物,在发酵过程中经过微生物蛋白酶的水解,发生脂质氧化、美拉德等一系列反应,促进相关风味物质的生成。

2.2.2 基于 OAV 值分析关键风味化合物 一般来说,OAV 值与对样品风味贡献程度成正相关,OAV>1 说明物质对于总体风味有明显贡献,可被认定为关键风味化合物^[26]。根据阈值和含量计算,共确定了 8 种 OAV>1 的风味物质,如表 3 所示。不同样品中 OAV 值也存在一定差异,在不添加虾壳粉也不进行

发酵的样品组中并未鉴别出关键风味化合物,说明该组风味特征不显著;而添加 20% 虾壳粉发酵 12 d 样品中关键风味化合物种类最多,包括三甲胺、2-十一酮、2-癸酮、异戊酸甲酯、甲硫醇、二甲基三硫,说明虾壳粉的加入能够丰富虾酱的风味。

三甲胺在 8 组虾酱样品中都能被检测出来,相对含量较高,阈值也较低,具有鱼腥味,对风味贡献较大,可定义为发酵虾酱的关键性风味物质;二甲基三硫同样具有高含量和低阈值,但仅存在于添加虾壳粉发酵 12 d 的虾酱样品中,为其贡献独特的洋葱蔬菜气味;甲硫醇只在添加 20% 虾壳粉发酵 12 d 样品中检测出来,同样具有较低的阈值,普遍存在于发酵食品中,为样品组提供独特的大蒜气味;异戊酸甲酯具有浓郁的果香,存在于发酵 6 d 和 12 d 的虾酱样品组中,为虾酱风味改善起到了重要的作用;剩余物质都具有果香、花香等良好风味,但都具有较高的阈值导致 OAV 值很小,只在发酵后添加 20% 虾酱样品组中可被认定为关键风味化合物。

整体来看,添加虾壳粉后未发酵样品组三甲胺含量增多,被鉴定为关键风味物质,且含量随虾壳粉的添加而增多,是海产品的典型风味物质^[27];发酵后的虾酱关键风味物质种类增加,包括酮类、酯类、杂环类,其中添加 20% 虾壳粉的样品组中酮类酯类等具有果香等良好特征风味物质含量增加,虾酱风味可能有所改善。

2.2.3 基于正交偏最小二乘法分析虾酱中的差异标志性风味化合物 变量重要性投影(VIP)通常用于正交偏最小二乘法(Orthogonal Partial least squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)模型中变量重要程度的评价, VIP 值越大, 表明该香气物质在虾酱样品差异分析中越重要^[28]。本研究选取检测到的所有 62 种挥发性风味物质进行 OPLS-DA 分析, 得到的结果如图 2(A)所示,各个组别均无重合,能够较好地被区分。经过 200 次置换检验,如图 2B,因变量拟合指数(R^2y)为 0.999,模型预测指数 Q^2 为 0.997,说明模型不存在过拟合,模型验证有效^[29]。

VIP 值如图 2(C)所示,共鉴定出 24 种关键差异

表 3 各样品组中 OAV>1 物质

Table 3 Substances with OAV > 1 in each sample group

编号	名称	阈值(μg/kg)	气味描述	OAV值								
				Non-D0	20%-D0	40%-D0	Non-D6	20%-D6	40%-D6	Non-D12	20%-D12	40%-D12
1	三甲胺	0.20	闻起来像腐烂的鱼、腐烂的鸡蛋	-	40.60	112.75	41.70	150.55	227.35	119.20	379.00	158.05
2	2-辛酮	50.20	果香	-	-	-	0.05	1.10	-	0.05	0.20	0.63
3	2-十一酮	5.50	果味	-	-	-	-	0.59	-	0.14	1.30	0.41
4	2-癸酮	8.30	橙色花香	-	-	-	-	-	-	-	1.19	-
5	异戊酸甲酯	4.40	浓果香味	-	-	-	1.08	3.19	0.02	1.55	4.14	6.46
6	2-正戊基呋喃	6.00	果味	-	-	-	-	1.67	-	0.61	-	-
7	甲硫醇	0.20	大蒜气味	-	-	-	-	-	-	-	271.35	-
8	二甲基三硫	0.10	硫磺煮熟的洋葱咸味肉味	-	-	-	-	-	-	-	616.90	61.60

注:“-”表示未检出,气味阈值和描述^[9]主要来源的在线数据库 <http://www.odour.org.uk/>, <http://www.flavornet.org/>, <https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx>。

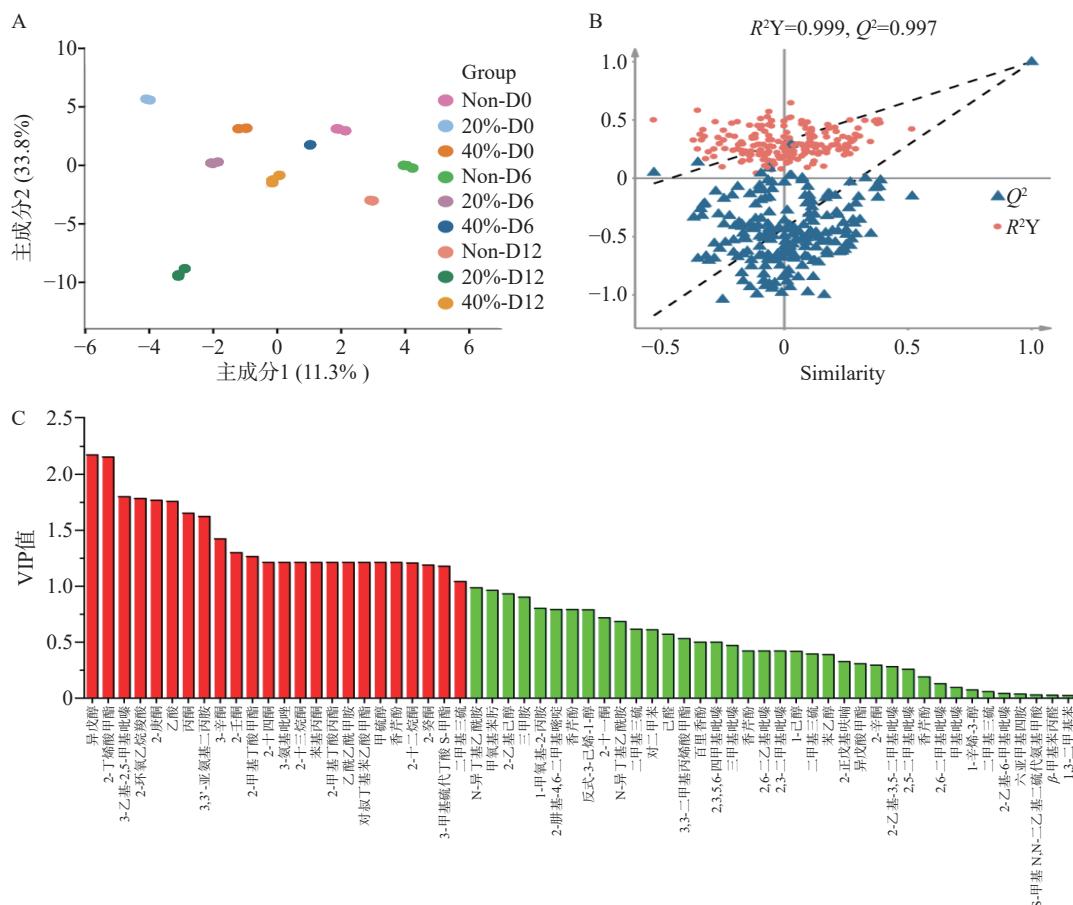


图 2 基于 GC-MS 对各样品组的 OPLS-DA 分析(A)、随机置换检验(B)、VIP 预测值(C)

Fig.2 Analysis of OPLS-DA (A), random permutation test (B), VIP predicted value (C) of each sample group based on GC-MS

风味化合物($VIP \geq 1, P < 0.05$), 结合 OAV 值进行分析, 最终筛选出 3 种物质(2-癸酮、甲硫醇、二甲基三硫), 可作为区分不同虾壳粉添加量和不同发酵时间差异的标志性风味化合物。Gao 等^[30]在研究“晒夜露”对虾酱发酵风味的影响时将 2-癸酮和二甲基三硫列为关键风味化合物, 表明其对风味贡献明显, 可以作为不同组别样品中的差异物质。Deng 等^[31]有关虾酱的研究中也将二甲基三硫列为风味标志物。结合表 2 可以看出, 2-癸酮和甲硫醇仅在添加 20% 虾壳粉发酵 12 d 虾酱中含量丰富, 可以作为该组样品区别于其他组别差异的标志性风味化合物; 二甲基三硫存在于添加虾壳粉发酵 12 d 的组别中, 但在 20% 虾壳粉添加量组别中的含量远远大于添加 40% 虾壳粉的组别, 可以作为区别添加虾壳粉虾酱的不同发酵时间、发酵 12 d 虾酱添加不同量虾壳粉差异的标志性风味化合物。

2.3 微生物结果分析

微生物在虾酱的发酵中起着重要的作用, 上述风味物质的积累也离不开微生物的作用。采用 16S rRNA 测序对 27 个样品的细菌多样性和动态演序进行了检测。图 3 的稀释曲线和 Shannon 曲线表明, 虾酱样品测序数据合理, 测序结果真实有效。

2.3.1 Alpha 多样性分析

Alpha 多样性主要是分析样品中微生物群落的多样性和丰度, 包括 Ace、

Chao 和 Shannon 等数据^[32], 通常指数越大, 说明样品中的物种越丰富^[33]。Coverage 反映测序深度是否能覆盖整个微生物群落, 是否能代表样本中所有微生物的真实情况。由表 4 中可以看到, 所有样品的覆盖率达到 0.99, 可证明测序的可靠性^[34]。如表 4 所示, 样品的 Ace、Chao 和 Shannon 指数结果表明发酵后微生物丰度显著升高, 添加虾壳粉后微生物丰度显著下降($P < 0.05$); 推测可能是因为发酵后的条件更适合微生物生长, 使微生物大量繁殖, 丰富度多样性迅速升高; 添加虾壳粉后, 带来甲壳素等具有抗氧化性的物质, 对某些微生物产生抑制^[35], 不利于微生物繁殖生存。

2.3.2 虾酱样品微生物菌群的群落组成 在门水平上, 未经发酵的虾酱均鉴定出五个主要细菌门, 其中不添加虾壳粉的样品中的第一优势菌门为厚壁菌门 (Firmicutes), 其次是拟杆菌门 (Bacteroidota)、变形菌门 (Proteobacteria)、奇异球菌门 (Deinococcota) 以及放线菌门 (Actinobacteriota), 先前有研究证明熟制小龙虾的核心菌群有变形菌门、拟杆菌门和厚壁菌门^[36]。随着虾壳粉的加入, 第一优势菌门转变为拟杆菌门, 变形菌门、奇异球菌门以及放线菌门的数量也逐渐增加, 这可能是因为虾壳粉富含某些特异营养物质, 能够被拟杆菌门和变形菌门中的一些细菌利用, 加速其生长繁殖, 导致原来的优势菌种失去竞争力。

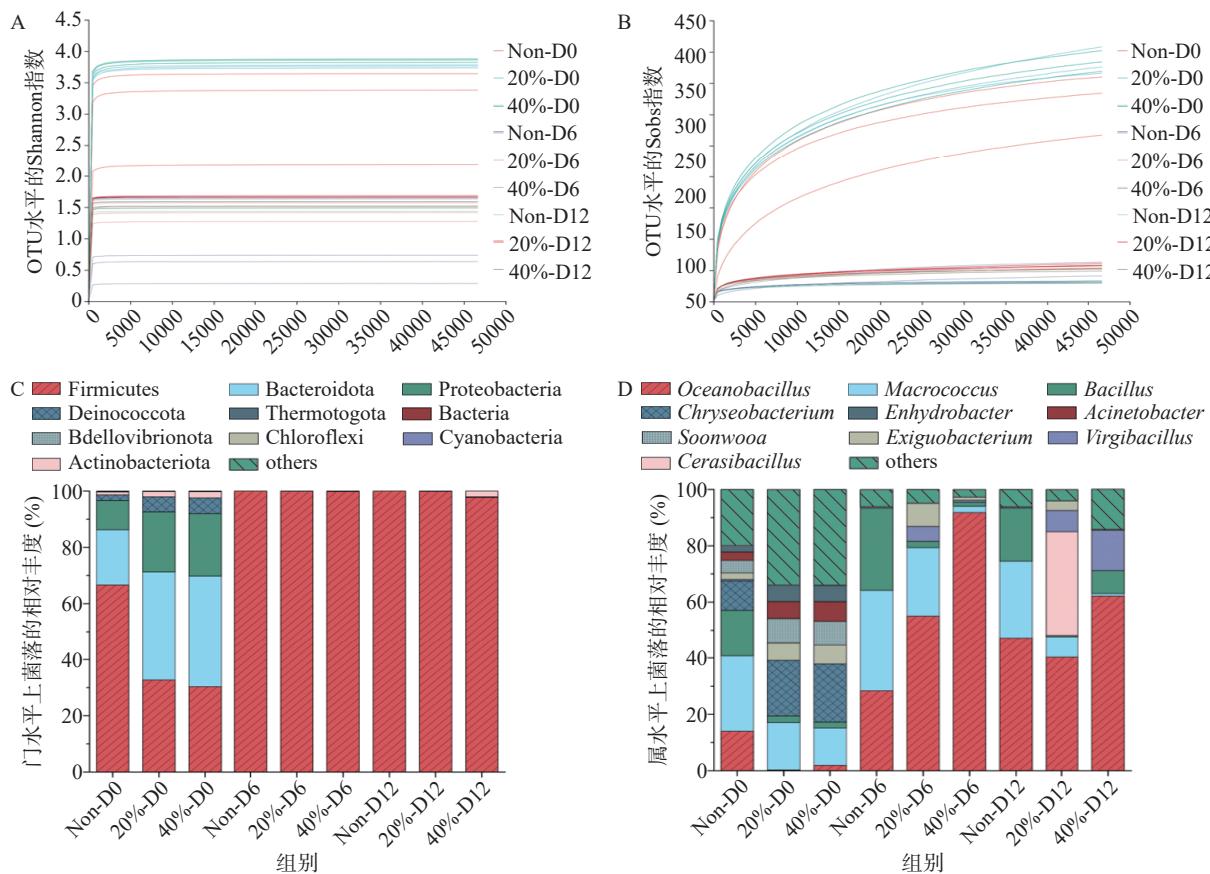


图 3 各样品组微生物的 Shannon 曲线(A)和稀释曲线(B)、在门(C)和属(D)水平上的相对丰度

Fig.3 Shannon curve (A) and dilution curve (B), relative abundance of microorganisms at phylum (C) and genus (D) levels in each sample group

表 4 Alpha 多样性指数

Table 4 Alpha diversity index

样品	Acc	Chao	Shannon	覆盖率
Non-D0	358.04±34.06 ^b	359.68±26.72 ^b	3.07±0.78 ^b	0.99
20%-D0	32.34±2.46 ^c	32.44±3.10 ^d	1.64±0.04 ^c	0.99
40%-D0	32.5±2.19 ^c	31.44±1.90 ^d	1.48±0.04 ^c	0.99
Non-D6	441.38±53.79 ^a	434.24±47.25 ^a	3.76±0.02 ^a	0.99
20%-D6	59.95±2.37 ^c	58.6±1.90 ^{cd}	1.42±0.15 ^c	0.99
40%-D6	69.85±8.18 ^c	74.39±19.06 ^c	1.67±0.01 ^c	0.99
Non-D12	437.63±15.73 ^a	433.15±13.71 ^a	3.85±0.03 ^a	0.99
20%-D12	68.09±6.21 ^c	64.39±15.66 ^{cd}	0.55±0.24 ^d	0.99
40%-D12	59.81±9.28 ^c	55.4±4.98 ^{cd}	1.55±0.08 ^c	0.99

注: 同列同一天数不同样品中不同字母表示样品组间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

在门水平上, 虾壳粉的添加对发酵后虾酱的菌门种类影响不大, 优势菌门趋于统一, 为厚壁菌门, 与 Li 等^[2]的研究结果类似, 可能是因为发酵过程中 pH 及温度发生变化, 而厚壁菌门具有较高环境适应性^[37], 同时小龙虾本身也含有丰富的厚壁菌门细菌^[38], 相较于其他微生物, 该类微生物能够更好地适应发酵环境与底物, 有利于后期演变为优势菌群。在虾酱的发酵过程中, 特别是在中后期(6~12 d), 微生物的群落多样性明显减少。发酵的微生物结构由多种微生物共同存在逐渐演变为以厚壁菌门为主导的单一发酵模式。

在属水平上, 未发酵不添加虾壳粉的虾酱中检

测出来 10 个主要细菌属, 相对丰度小于 1% 的属均为其他属。结果表明, 发酵后的虾酱以海洋芽孢杆菌属 (*Oceanobacillus*) 为主, 说明发酵后的环境适合该细菌生长, 研究表明虾酱发酵后会产生生物胺等碱类物质^[41], 使 pH 有所上升, 此时的发酵体系处于适合海洋芽孢杆菌属 (*Oceanobacillus*) 生长的弱碱性环境^[39]。同一发酵时间内添加虾壳粉后, 海洋芽孢杆菌属 (*Oceanobacillus*)、枝芽孢杆菌属 (*Virgibacillus*) 丰度总体趋势呈现上升态势, Udomsil 等^[40]发现枝芽孢杆菌属 (*Virgibacillus*) 能在高盐的环境中产生蛋白酶, 对鱼露的整体风味产生影响; 而巨球菌 (*Macrococcus*) 和芽孢杆菌 (*Bacillus*) 丰度呈现下降趋势, 可能是因为虾壳粉对这两种菌属有抑制作用。*Soonwooa* 仅在未发酵的组别中检出, 说明发酵后的环境可能不适合其生长; 樱桃样芽孢杆菌属 (*Cerasibacillus*) 仅在发酵 12 d, 添加 20% 虾壳粉的虾酱样品检出。

2.4 风味-微生物相关性分析

Spearman 相关性一般用来做微生物菌落与风味物质间相关性的初步分析^[41], 利用 Spearman 相关系数分析了 9 种处理组中的 29 种重要风味物质 ($OAV>1$, VIP 值 >1) 与 10 类微生物属间的互作关系, 发现大部分菌属和挥发性物质之间存在一定程度的相关性。共发现 30 对风味-微生物之间显著相关

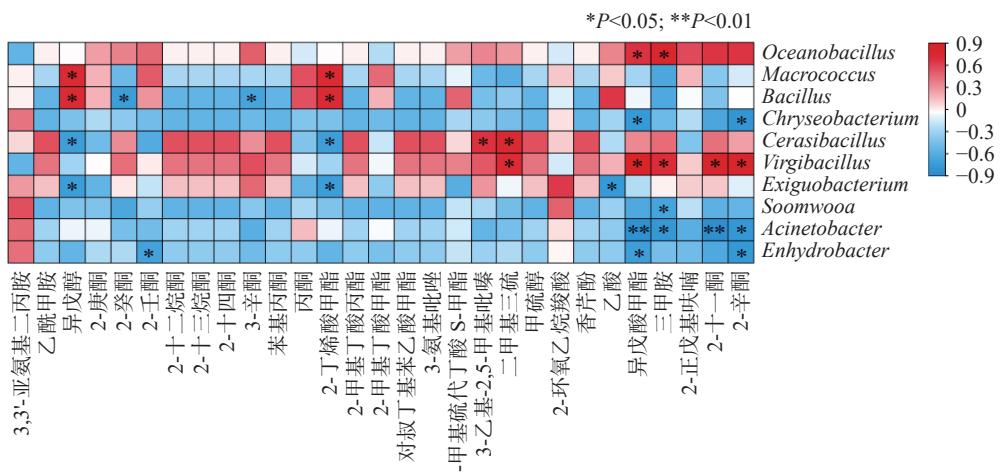


图 4 风味-微生物相关性热图

Fig.4 Flavor-microbial correlation heat map

($|Spearman| > 0.67$ 且 $P < 0.05$), 其中共有 13 对正相关, 17 对负相关。

枝芽孢杆菌属(*Virgibacillus*)仅存在于添加虾壳粉的样品中, 在样品中的相对丰度虽然很低(最高为 14%), 但其与多种风味物质呈显著正相关, 包括二甲基三硫、异戊酸甲酯、三甲胺、2-十一酮、2-辛酮, 说明该种细菌属可代谢产生许多重要风味物质, 对虾酱风味贡献很大, Yu 等^[42]也在虾酱中分离出枝芽孢杆菌属(*Virgibacillus*), 并将其作为发酵剂, 应用到虾酱发酵提高其感官和风味, 在马冰涛等^[43]的研究中也认定该种菌属对于发酵制品风味贡献较大, 以上研究表明虾壳粉可能作为发酵剂来丰富虾酱等发酵制品的风味; 樱桃样芽孢杆菌属(*Cerasibacillus*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、巨球菌属(*Macrocooccus*)、海洋芽孢杆菌属(*Oceanobacillus*)在样品中相对丰度较高, 同时也与多种风味物质呈显著正相关; 而微小杆菌属(*Exiguobacterium*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、栖水菌属(*Enhydrobacter*)都与多种风味物质呈现显著负相关, 但相对丰度有高有低。以上结果表明, 微生物在样品中的相对丰度高低并不能代表其对样品风味的贡献程度^[44]。

由图 4 可知, 异戊醇和 2-丁烯酸甲酯与巨球菌属、芽孢杆菌属呈显著正相关($P < 0.05$), 与樱桃样芽孢杆菌属、枝芽孢杆菌属呈显著负相关($P < 0.05$); 二甲基三硫与樱桃样芽孢杆菌属、枝芽孢杆菌属呈显著正相关($P < 0.05$), 二甲基三硫可能来源于含硫氨基酸、蛋白质代谢、酵母自溶^[45], 说明虾壳粉中可能含有含硫氨基酸, 在合适的发酵环境中被特定微生物代谢产生二甲基三硫, 枝芽孢杆菌属中的某些微生物可以在含硫环境中生存, 因此可推测其可能为产生二甲基三硫的特定微生物; 三甲胺与 *Soonwooa*、不动杆菌属呈显著负相关($P < 0.05$), Che 等^[46]有关发酵对虾酱的研究中发现三甲胺与盐微生物、四小球菌和乳杆菌呈负相关; 可能是由于底物的不同、发酵环境的不同导致微生物属种类不同; 甲硫醇与各微生物间均不存在显著相关性。

3 结论

本实验研究了添加不同量虾壳粉的小龙虾酱在发酵不同时间挥发性物质和微生物菌群的动态变化。共检测出 62 种风味化合物, 添加虾壳粉后的组别挥发性物质种类与含量明显增多, 在添加 20% 虾壳粉的样品中增加尤为明显, 主要为含硫化合物、胺类、酮类以及杂环类物质。共筛选出 8 种关键风味化合物及 24 种关键差异风味化合物, 将这两种风味化合物进行对比, 筛选出 3 种风味化合物(2-癸酮、甲硫醇、二甲基三硫)可作为不同虾壳粉添加量和不同发酵时间差异的标志性风味化合物。结合 16S rRNA 测序分析发现厚壁菌门为发酵后虾酱的优势菌门, 虾壳粉的添加可以提高发酵组别微生物属的多样性。将关键风味化合物和关键差异风味化合物共 29 种风味物质与相对丰度前 10 的微生物属进行相关性分析, 共发现 30 对风味-微生物之间显著相关($|Spearman| > 0.67$ 且 $P < 0.05$), 其中共有 13 对正相关, 17 对负相关。枝芽孢杆菌属(*Virgibacillus*)仅存在于添加虾壳粉的样品中, 与多种风味化合物呈显著正相关, 确定为对风味贡献最大的微生物属。本研究表明虾壳粉的加入有利于枝芽孢杆菌属(*Virgibacillus*)的生长, 进而增加挥发性物质种类与含量, 最终丰富虾酱的风味。研究结果可为今后虾酱发酵剂的选择以及小龙虾副产品的加工提供新思路及参考。未来的研究将聚焦于分离核心菌群, 进一步分析评估其安全性和发酵性能。

© The Author(s) 2025. 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

- WANG D H, YANG Y, WANG Z, et al. High levels of branched chain fatty acids in natto and other Asian fermented foods[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 428–433.
- LI W, MI S, LIU X, et al. Variations in the physicochemical properties and bacterial community composition during fermenta-

- tion of low-salt shrimp paste[J]. *Food Research International*, 2022, 154: 111034.
- [3] RAGAZZO-SÁNCHEZ J, GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ Q, RAMÍREZ-DE-LEÓN J, et al. Application of high hydrostatic pressure on Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) pâté: Microbiological, physicochemical and consumer acceptance[J]. *Food Science and Technology International*, 2018, 24(8): 713–723.
- [4] SANG X, LI K, ZHU Y, et al. The impact of microbial diversity on Biogenic amines formation in grasshopper sub shrimp paste during the fermentation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 782.
- [5] 陈晓明, 成兆友, 赵建民. 眼斑龙虾肌肉营养成分分析与评价[J]. 食品工业科技, 2010, 31(7): 345–349. [CHEN Xiaoming, CHENG Zhaoyou, ZHAO Jianmin. Analysis and evaluation of muscle nutrients of Xuyi lobster[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 31(7): 345–349.]
- [6] 王广军, 孙悦, 郁二蒙, 等. 澳洲淡水龙虾与克氏原螯虾肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 动物营养学报, 2019, 31(9): 4339–4348. [WANG Guangjun, SUN Yue, YU Ermeng, et al. Analysis and quality evaluation of muscle nutrients of Australian freshwater lobster and *Procambarus clarkii*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(9): 4339–4348.]
- [7] YAO Y, ZHOU X, HADIATULLAH H, et al. Determination of microbial diversities and aroma characteristics of Beitan shrimp paste[J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128695.
- [8] 程小飞, 宋锐, 洪波, 等. 虾壳粉氨基酸和脂肪酸营养成分分析[J]. 中国饲料, 2020(23): 66–70. [CHENG Xiaofei, SONG Rui, HONG Bo, et al. Analysis of amino acids and fatty acids in Shrimp shell powder[J]. *China Feed*, 2020(23): 66–70.]
- [9] ZHU W, LUAN H, BU Y, et al. Flavor characteristics of shrimp sauces with different fermentation and storage time[J]. *LWT*, 2019, 110: 142–151.
- [10] ZHANG D, JI H, LIU S, et al. Similarity of aroma attributes in hot-air-dried shrimp (*Penaeus vannamei*) and its different parts using sensory analysis and GC-MS[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109517.
- [11] PHEWPAN A, PHUAPRISIRISAN 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.
- [12] JUNG J Y, LEE S H, LEE H J, et al. Microbial succession and metabolite changes during fermentation of saeu-jeot: Traditional Korean salted seafood[J]. *Food Microbiology*, 2013, 34(2): 360–368.
- [13] JIMÉNEZ-CARVELO A M, GONZÁLEZ-CASADO A, BAGUR-GONZÁLEZ M G, et al. Alternative data mining/machine learning methods for the analytical evaluation of food quality and authenticity-A review[J]. *Food Res Int*, 2019, 122: 25–39.
- [14] LU L, HU Z, HU X, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112214.
- [15] DESMELATI, SUPARMI, LEKSONO T. Characteristics of fresh water lobster carapaces flour (*Cherax quadricarinatus*)[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1118(1): 012040.
- [16] 许九红, 王修俊, 聂黔丽, 等. 遵义泡辣椒二次发酵过程中挥发性风味物质的变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 415–427. [XU Juhong, WANG Xiujun, NIE Qianli, et al. Changes of volatile flavor substances in Zunyi pickled pepper during secondary fermentation[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2024, 24(5): 415–427.]
- [17] HU M, WANG S, LIU Q, et al. Flavor profile of dried shrimp at different processing stages[J]. *LWT*, 2021, 146: 111403.
- [18] 陈姿烨, 游云, 练欢慧, 等. 花椒精油对炸猪排脂质氧化和挥发性成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 213–221. [CHEN Ziye, YOU Yun, LIAN Huanhui, et al. Effects of *Zanthoxylum* oil on lipid oxidation and volatile components of fried pork chops[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(15): 213–221.]
- [19] 徐斯婕, 钟比真, 胡明, 等. 9种国产虾酱脂肪酸组成及挥发性风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 353–362. [XU Sijie, ZHONG Bichen, HU Mingming, et al. Analysis of fatty acid composition and volatile flavor components of 9 kinds of domestic shrimp paste[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(17): 353–362.]
- [20] 朱继国. 小龙虾壳的资源化及在休闲食品中的应用研发[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023. [ZHU Jiguo. Source utilization of crayfish shells and its application in snack food[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.]
- [21] CHUNG H Y, YEUNG C W, KIM J S, et al. Static headspace analysis-olfactometry (SHA-O) of odor impact components in salted-dried white herring (*Ilisha elongata*)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(2): 842–851.
- [22] 尤天棋, 何济坤, 李丹, 等. 川味五香香肠的常规理化和微生物特性及挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 224–233. [YOU Tianqi, HE Jikun, LI Dan, et al. Analysis of conventional physicochemical and microbial characteristics and volatile flavor substances of Sichuan spiced sausage[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2024, 45(14): 224–233.]
- [23] 吴泽龙, 陈梅香, 何建林, 等. 虾活性肽微胶囊复合可食膜的制备及其保鲜作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 273–281. [WU Zelong, CHEN Meixiang, HE Jianlin, et al. Preparation and preservation effect of shrimp active peptide microcapsule composite edible film[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(4): 273–281.]
- [24] LIANG R, LIN S, CHEN D, et al. Differentiation of *Penaeus vannamei* from different thermal processing methods in physicochemical, flavor and sensory characteristics[J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132092.
- [25] 平洪睿, 王亚萍, 陈佳妮, 等. 贵州苗族、水族红酸汤滋味与香气差异分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 273–283. [PING Hongrui, WANG Yaping, CHEN Jiani, et al. Analysis on difference of taste and aroma of red sour soup of Miao nationality and Shui nationality in Guizhou[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(8): 273–283.]
- [26] LIN M, YANG B, DAI M, et al. East meets west in alcoholic beverages: Flavor comparison, microbial metabolism and health effects[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103385.
- [27] 江津津, 欧爱芬, 潘光健, 等. 不同产地传统海虾酱的风味特征[J]. 水产学报, 2021, 45(12): 2072–2082. [JIANG Jinjin, OU Aifen, PAN Guangjian, et al. Flavor characteristics of traditional sea shrimp paste from different regions[J]. *Journal of Aquatic Sciences*, 2021, 45(12): 2072–2082.]
- [28] 魏松丽, 孙晓静, 张丽霞, 等. 模糊数学评价优化浓香花生油脂体的预处理参数及香气成分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 202–209. [WEI Songli, SUN Xiaojing, ZHANG Lixia, et al. Fuzzy mathematics evaluation and optimization of pretreatment parameters and aroma composition analysis of fragrant peanut oil[J]. *Food Science*, 2020, 41(16): 202–209.]

- [29] 徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等. 基于 GC-IMS 和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化 [J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 270–275. [XU Yongxia, BAI Xuting, FENG Yuan, et al. Analysis of flavor substances during steaming of sea bass meat based on GC-IMS and chemometrics [J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 270–275.]
- [30] GAO R, XUE J, SHI T, et al. Effects of 'bask in sunlight and dewed at night' on the formation of fermented flavor in shrimp paste after maturation [J]. *Food Chemistry*, 2024, 452: 139546.
- [31] DENG Y, WANG R, ZHANG Y, et al. Comparative analysis of flavor, taste, and volatile organic compounds in opossum shrimp paste during long-term natural fermentation using E-Nose, E-Tongue, and HS-SPME-GC-MS [J]. *Foods*, 2022, 11(13): 10.
- [32] 邢晓莹, 孟卫凯, 张慧妍, 等. 基于高通量测序分析山西老陈醋醋酸发酵过程中细菌群落的演替规律 [J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 147–154. [XING Xiaoying, MENG Weikai, ZHANG Huiyan, et al. Analysis of bacterial community succession during acetic acid fermentation of aged vinegar in Shanxi province based on high-throughput sequencing [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2024, 45(17): 147–154.]
- [33] AREGBE A Y, MU T, SUN H. Effect of different pretreatment on the microbial diversity of fermented potato revealed by high-throughput sequencing [J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 125–134.
- [34] AMATO K R, YEOMAN C J, KENT A, et al. Habitat degradation impacts black howler monkey (*Alouatta pigra*) gastrointestinal microbiomes [J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(7): 1344–1353.
- [35] 赵宝鼎, 杨约萍, 邹小雨, 等. 超声改性甲壳素吸附水产品加工副产物中脂溶性维生素的作用效果研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(4): 114–121. [ZHAO Baoding, YANG Yueping, ZOU Xiaoyu, et al. Effect of ultrasonic modified chitin on absorption of fat-soluble vitamins from aquatic processing by-products [J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2024, 15(4): 114–121.]
- [36] 邓祥宜, 李池茜, 张涵池, 等. 养殖塘和市售小龙虾肠道细菌多样性的比较 [J]. *微生物学杂志*, 2021, 41(3): 44–52. [DENG Xiangyi, LI Chiqian, ZHANG Hanchi, et al. Comparison of intestinal bacterial diversity between cultured ponds and commercial crayfish [J]. *Journal of Microbiology*, 2021, 41(3): 44–52.]
- [37] 杨宇恒, 郑宇航, 王文卓, 等. 真空包装鸡肉肠产气微生物分离鉴定及胀袋原因探析 [J]. *肉类研究*, 2024, 38(4): 36–42. [YANG Yuheng, ZHENG Yuhang, WANG Wenzhuo, et al. Isolation and identification of gas-producing microorganisms and causes of bagging in vacuum packaged chicken sausage [J]. *Meat Research*, 2024, 38(4): 36–42.]
- [38] CHEN X, FAN L, QIU L, et al. Metagenomics analysis reveals compositional and functional differences in the gut microbiota of red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*, grown on two different culture environments [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 735190.
- [39] 丁建莉, 魏丹, 金梁, 等. 基于宏转录组研究蔬菜秸秆发酵体系细菌群落 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11): 2653–60. [DING Jianli, WEI Dan, JIN Liang, et al. Study on bacterial communities in vegetable straw fermentation system based on macro-transcriptomes [J]. *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 2020, 39(11): 2653–60.]
- [40] UDOMSIL N, CHEN S, RODTONG S, et al. Quantification of viable bacterial starter cultures of *Virgibacillus* sp. and *Tetragenococcus halophilus* in fish sauce fermentation by real-time quantitative PCR [J]. *Food Microbiology*, 2016, 57: 54–62.
- [41] SHEN Y, WU Y, WANG Y, et al. Contribution of autochthonous microbiota succession to flavor formation during Chinese fermented mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129107.
- [42] YU J, LU K, DONG X, et al. *Virgibacillus* sp. SK37 and *Staphylococcus nepalensis* JS11 as potential starters to improve taste of shrimp paste [J]. *LWT*, 2022, 154: 112657.
- [43] 马冰涛, 范恩帝, 李泽霞, 等. 老白干香型白酒制曲过程中微生物多样性及其与风味成分的关系 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(16): 7–16. [MA Bingtao, FAN Endi, LI Zexia, et al. Microbial diversity and its relationship with flavor components in the brewing process of Laobaigan-flavored liquor [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(16): 7–16.]
- [44] LIU D, ZHOU M, TAN H, et al. Metabolomics, volatolomics, and bioinformatics analyses of the effects of ultra-high pressure pretreatment on taste and flavour parameters of cured *Culter alburnus* [J]. *Food Chemistry*, 2024, 453: 139649.
- [45] LYTRA G, TEMPERE S, MARCHAND S, et al. How do esters and dimethyl sulphide concentrations affect fruity aroma perception of red wine? Demonstration by dynamic sensory profile evaluation [J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 196–200.
- [46] CHE H, YU J, SUN J, et al. Bacterial composition changes and volatile compounds during the fermentation of shrimp paste: Dynamic changes of microbial communities and flavor composition [J]. *Food Bioscience*, 2021, 43: 101169.