

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.009

任亭, 刘玉凌, 刘德军, 等. 涪陵榨菜发酵过程中微生物群落与挥发性风味物质的相关性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版): 2026, 48(3): 91-104.

涪陵榨菜发酵过程中微生物群落与挥发性风味物质的相关性研究

任亭¹, 刘玉凌¹, 刘德军², 彭玉梅¹, 陶洪¹, 罗远莉¹

1. 重庆市渝东南农业科学院, 重庆 408000; 2. 重庆市涪陵榨菜集团股份有限公司, 重庆 408013

摘要: 采用高通量测序技术和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术研究了涪陵榨菜发酵过程中微生物群落结构、挥发性风味物质成分的变化以及两者间的相关性。实验结果表明: 主要优势菌属为乳杆菌属(*Lactobacillus*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、海洋杆菌属(*Marinobacter*)、盐厌氧菌属(*Halanaerobium*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、德巴利氏酵母属(*Debaryomyces*)、白冬孢酵母属(*Leucosporidium*)、未分类的银耳属(*unclassified_c__Tremellomycetes*)、拟威克酵母属(*Wickerhamiella*)、嗜盐梗孢酵母属(*Sterigmatomyces*)等; 在发酵过程中共检测到 120 种挥发性风味物质, 主要为有机硫化物类、酯类、醇类和酸类, 其中全异硫氰酸酯、2-甲基己酸甲酯、5-降冰片烯-2-醇、亚麻酸乙酯和草酸含量较高。相关性分析表明: 细菌对风味的影响大于真菌, 优势细菌属与大多数风味物质种类呈明显正相关。

关键词: 榨菜; 菌落结构; 挥发性风味物质; 相关性分析

中图分类号: TS255.5 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)03-0091-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Correlation Analysis between Microbial Community and Volatile Flavor Substances during the Fermentation of Fuling Zhacai

REN Ting¹, LIU Yuling¹, LIU Dejun²,
PENG Yumei¹, TAO Hong¹, LUO Yuanli¹

1. Southeast Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 408000, China;

2. Chongqing Fuling Zhacai Group Co., Ltd., Chongqing 408013, China

Abstract: The microbial community structure and volatile flavor components during the fermentation of

收稿日期: 2025-03-14

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX1084); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0084)。

作者简介: 任亭, 助理研究员, 主要从事农产品加工及储藏研究。

通信作者: 罗远莉, 研究员。

Fuling Zhacai were analyzed by high-throughput sequencing technology and headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry, and the relationship between them was analyzed. The results showed that the main dominant microbial in Zhacai were *Lactobacillus*, *Halomonas*, *Marinobacter*, *Halanaerobium*, *Leuconostoc*, *Debaryomyces*, *Leucosporidium*, *unclassified_c__Tremellomycetes*, *Wickerhamiella*, *Sterigmatomyces*, et al. A total of 120 volatile flavor compounds were identified during the fermentation of Zhacai, which were mainly organic sulfides, esters, alcohols, and acids. The higher-content flavor substances include: allyl isothiocyanate, methyl 2-methylhexanoate, 5-norbornene-2-ol, ethyl linolenate, and oxalic acid. The correlation analysis showed that bacteria had a greater impact on flavor compounds than fungi, and the dominant bacteria genera were positively correlated with most flavor substances.

Key words: Zhacai; microbial community structure; volatile flavor compounds; correlation analysis

榨菜以青菜头茎瘤芥为原料经腌制发酵而成^[1],以其独特的风味和口感深受消费者喜爱。涪陵榨菜作为世界三大名腌菜之一,其产业是重庆市农村经济的支柱产业,年产量巨大,消费市场广阔。

发酵蔬菜风味物质的形成与发酵过程中微生物代谢活动密切相关^[2-3],且涉及多种代谢途径,包括糖苷代谢、碳水化合物代谢、蛋白质水解代谢和脂肪酸代谢等^[4]。有研究表明,乳酸菌和魏斯氏菌参与的碳水化合物代谢会促进醛酮类物质生成,抑制烯烃类物质,从而影响泡菜风味的形成^[5]。榨菜发酵过程中,丰富的微生物群落将通过多种生化反应来塑造其独特的风味,这些风味物质将直接影响消费者的接受度^[6]。近年来,关于榨菜发酵的研究主要集中在微生物多样性和风味物质的检测。文献[7]利用高通量测序技术探究了榨菜中原核微生物群落的演替,结果表明,发酵过程中乳杆菌属是其绝对优势属,而明串珠菌属主要存在于发酵初期。文献[8]的研究表明,榨菜发酵的熟成由不同种类乳酸菌的交替变化共同促进。文献[9]利用 GC-MS 技术从榨菜原料、成品中共鉴定出 37 种挥发性风味物质,主要为异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸环丙酯和对丙烯基茴香醚。文献[10]的研究表明,随着榨菜发酵的进行,其醇类、酯类、醛类、酮类等化合物含量呈增加趋势,异硫氰酸酯类物质含量呈减少趋势。目前尚未有榨菜发酵过程中微生物与挥发性风味物质间的相关性研究。

分子生物学技术和代谢组学技术的快速发展为解析食品发酵过程中微生物与风味物质的相关性提供了有力工具。文献[11]采用 Pacbio SMRT 测序技术和 GC-IMS 技术研究了酸汤中微生物的多样性和挥发性风味物质间的关系。文献[12]利用高通量测序技术、气相色谱离子迁移技术,通过 Pearson 相关性分析揭示了香肠的微生物优势菌群与挥发性风味物质的相关性。因此,通过高通量测序技术结合代谢组学技术全面分析传统发酵食品中微生物与挥发性风味物质的关系完全可行。

本研究拟采用高通量测序技术、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析榨菜发酵过程中微生物菌群结构和挥发性风味物质的变化,探究主要优势微生物菌属与挥发性风味物质成分种类间的相关性,为阐明榨菜风味形成机制、优化传统生产工艺、提升产品品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

榨菜原料(青菜头)购自重庆市涪陵区某农户。

正十五烷-d32: 分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;正构烷烃混标(C10-C25): 标准品, LGC 集团公司; MagAtract PowerSoil Pro DNA Kit: 试剂盒,德国凯杰(qiagen)生物公司;快速 Pfu 聚合酶: 扩增速度 4 kb/min,北京全式金生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

气相色谱-质谱联用仪: 7697A-8890-7000D, 安捷伦科技有限公司; PCR 仪: T100 Thermal Cycler, 美国 BIO-RAD 公司; 电泳仪: JY600C, 北京君意东方电泳设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 榨菜样品的制备

新鲜青菜头去筋。一盐用盐量 4% (质量比), 在塑料大桶一层菜一层盐腌制 15 d 后, 捞起青菜头, 倒掉废盐水; 二盐再补加盐量 5% (质量比), 在塑料大桶一层菜一层盐腌制, 于 25 °C 密封发酵。补加二盐后第 0、4、8、12、16 个月取样, 每次取腌制桶上、中、下层样品混合, 依次记为 ZX4_0、ZX4_4、ZX4_8、ZX4_12、ZX4_16。

1.3.2 菌群结构高通量测序分析

参照文献[13]的测序方法稍作修改。根据微生物群落总基因组 DNA 试剂盒提取样品总 DNA, 采用引物 338F_806R 和 IT1F_IT2R, 扩增细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区、真菌的 ITS-V1 区。采用 Illumina MiSeq 平台和 MiSeq Reagent Kit v3 进行双端 2×250 bp 测序, 测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

1.3.3 挥发性风味物质分析

参照文献[14]的测序方法稍作修改。取 2 g 样品置于 20 mL 顶空瓶, 加入内标 2.0 μL (正十五烷-d32 100 μg/mL) 立即密封顶空瓶。温度 80 °C, 平衡 20 min, SPME 萃取头样品吸附时间 20 min, 样品解吸时间 2 min。

气相色谱条件: 毛细管柱为 25 m×0.25 mm×0.20 μm (Agilent CP9204), 压力为 100.00 kPa。进样口温度 240 °C, 载气为高纯氦气, 载气流速 1.50 mL/min, 隔垫吹扫流速 3 mL/min, 不分流进样。升温程序: 初始温度 40 °C, 平衡 0 min; 然后以 15 °C/min 的速度升至 150 °C; 再以 5 °C/min 的速度升至 230 °C, 并维持 5 min; 最后运行 230 °C, 维持 2 min。

质谱条件: 电子轰击离子源 (EI), 传输线温度为 280 °C, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 电子能量 70 eV。扫描方式为全扫描模式 (SCAN), 质量扫描范围为 50~500 m/z, 扫描频率为 3.2 Hz。

1.4 数据处理

每个试验样本设定 3 个重复, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 数据采用 SPSS 17.0 软件进行处理。用内标法对挥发性风味化合物进行定量, 利用 Origin 软件和美吉生物云平台绘图。微生物群落与挥发性风味物质种类采用皮尔逊 (Pearson) 相关分析方法, 利用 R 语言绘图。

2 结果与分析

2.1 榨菜发酵过程中微生物群落多样性

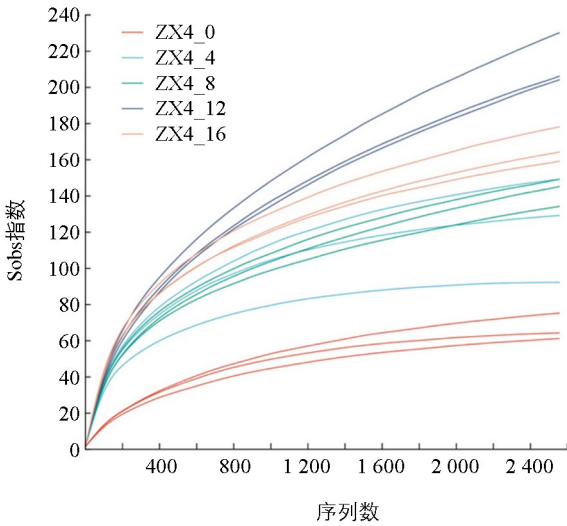
2.1.1 α 多样性分析

榨菜发酵过程中微生物群落的丰富度和多样性如表 1 所示, 随着发酵的进行, 细菌 Chao1 指数、Shannon 指数逐渐增大, Simpson 指数逐渐减小, 说明榨菜细菌的丰富度和多样性程度逐渐增加; 真菌 Chao1 指数和 Shannon 指数在 ZX4_12 组达到最大值, 说明榨菜发酵至 12 个月时真菌的丰富度和多样性程度最高, 随后真菌丰富度和多样性程度迅速降低, 可能是由于发酵后期酸度较高, 抑制了部分不耐酸的真菌的生长繁殖, 从而造成真菌丰富度和多样性程度降低^[15]。

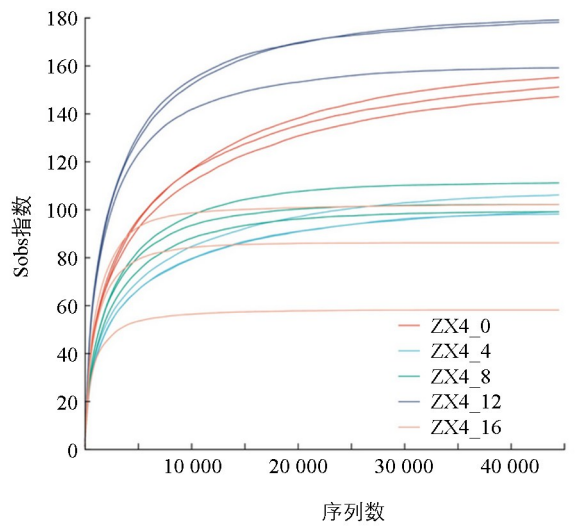
榨菜样品细菌和真菌稀释曲线 (Sobs 指数) 和 Shannon 曲线 (Shannon 指数) 如图 1 所示, 随着序列数的增加, 曲线趋于平缓, 表明样品测序量充分, 足以反映各组榨菜样品情况。

表 1 榨菜发酵过程中微生物群落的丰富度和多样性

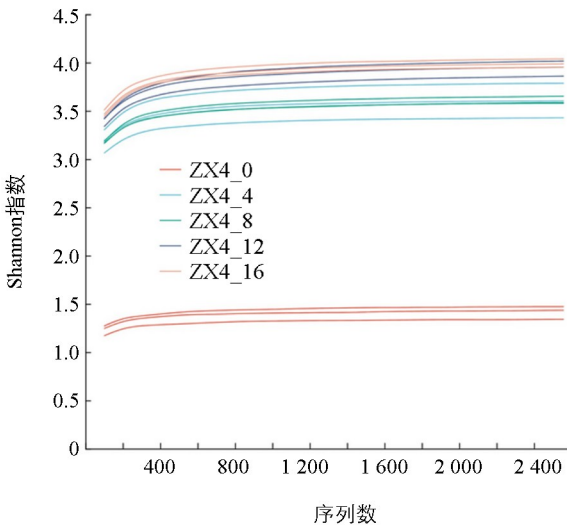
微生物	样品组	Sobs 指数	ACE 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
细菌	ZX4_0	89.33±4.43	97.64±5.03	92.37±4.28	0.94±0.09	0.51±0.03
	ZX4_4	147.00±10.97	154.22±14.91	150.88±14.57	1.05±0.14	0.49±0.04
	ZX4_8	250.00±26.15	255.61±31.74	252.79±29.00	2.33±0.07	0.26±0.01
	ZX4_12	338.33±30.31	357.75±32.60	347.50±33.78	2.62±0.31	0.25±0.06
	ZX4_16	352.00±14.80	367.33±20.99	361.42±19.08	3.80±0.19	0.05±0.02
真菌	ZX4_0	151.00±4.00	158.68±2.64	157.80±1.98	2.41±0.04	0.20±0.02
	ZX4_4	101.00±4.36	102.76±4.86	102.00±4.73	1.70±0.04	0.30±0.01
	ZX4_8	104.00±6.24	104.18±6.37	104.08±6.39	1.69±0.07	0.36±0.03
	ZX4_12	172.00±11.27	173.68±12.29	714.77±13.58	2.65±0.03	0.15±0.01
	ZX4_16	82.00±2.27	82.16±2.49	82.00±2.27	1.77±0.27	0.36±0.07



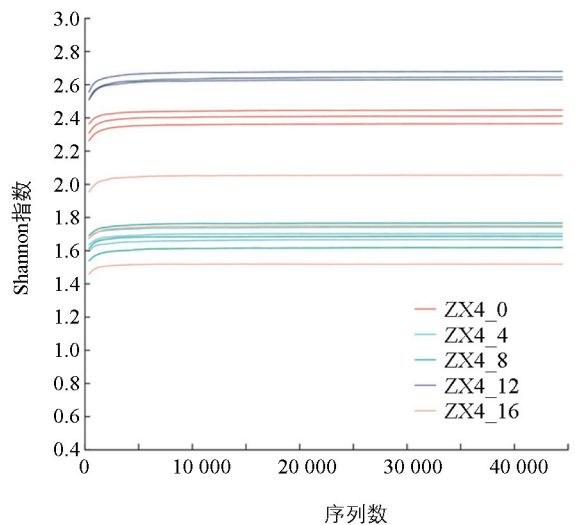
a. 细菌Sobs指数曲线



b. 真菌Sobs指数曲线



c. 细菌Shannon指数曲线



d. 真菌Shannon指数曲线

图 1 榨菜样品细菌和真菌的稀释曲线和 Shannon 曲线

2.1.2 β 多样性分析

对榨菜发酵过程中样品细菌和真菌的 ASV 数据进行主坐标分析, 研究榨菜样品在组间和组内群落的相似性或差异性, 结果如图 2 所示。细菌主坐标分析中 PC1 贡献率为 67.83%, PC2 贡献率为 20.26%; 真菌主坐标分析中 PC1 贡献率为 71.03%, PC2 贡献率为 16.58%, 证明图 2 具有较好的解释效果。ZX4_0、ZX4_4、ZX4_8 组细菌和真菌均处于不同象限, 细菌 ZX4_12、ZX4_16 组处于同一象限, 真菌 ZX4_12、ZX4_16 组处于相邻象限, 说明榨菜发酵前期(0 到 4 个月)微生物群落差异较大, 中后期(8 到 16 个月)差异较小。其中 PC1 是影响微生物群落结构的最主要因素的投影方向, PC2 是影响微生物群落结构的第二重要因素的投影方向。

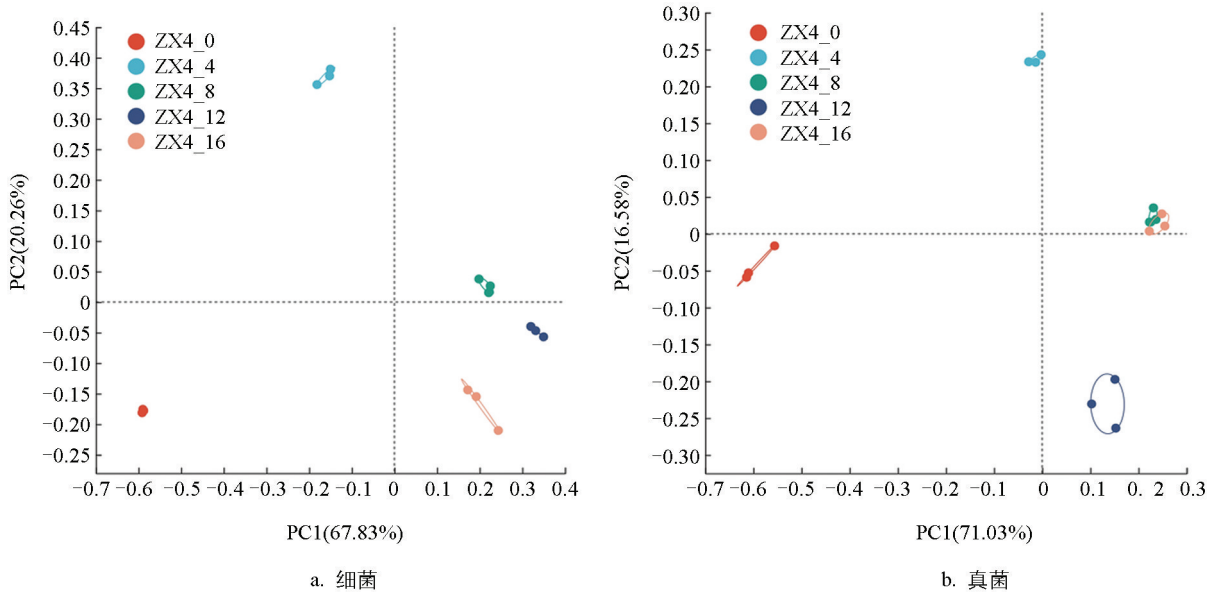


图 2 榨菜样品细菌和真菌 ASV 水平的主坐标分析

2.2 榨菜发酵过程中细菌和真菌的群落结构

2.2.1 细菌群落结构

榨菜样品在门水平共检测到 6 个优势细菌门(相对丰度大于 1%), 分别为厚壁菌门(Firmicutes)、变形杆菌门(Proteobacteria)、盐厌氧菌门(Halanaerobiaeota)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、弯曲菌门(Campilobacterota)、脱硫杆菌门(Desulfobacterota)。榨菜二盐初期(0 个月)厚壁菌门为绝对优势菌门, 占比 93.96%; 随着发酵的进行, 厚壁菌门和变形杆菌门成为主要优势菌门, 这两个菌门是绝大多数发酵蔬菜的优势细菌门(图 3a)。

榨菜样品在属水平共检测到 15 个优势细菌属(相对丰度大于 1%), 主要为乳杆菌属(*Lactobacillus*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、海洋杆菌属(*Marinobacter*)、盐厌氧菌属(*Halanaerobium*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、嗜盐菌属(*Salinivibrio*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、色盐杆菌属(*Chromohalobacter*)、四联球菌属(*Tetragenococcus*)等。发酵初期(0 个月)主要优势菌属为乳杆菌属、明串珠菌属和魏斯氏菌属, 与泡菜优势菌群一致^[13], 可能是由于榨菜一盐腌制用盐量(质量比 4%)与泡菜发酵用盐量较相似, 均为低盐发酵, 导致细菌属类似, 二盐再加 5% 盐后, 随着发酵的进行, 乳杆菌属占比由 76.24% 减少至 55.3%, 盐单胞菌属占比由 0.21% 增加至 24.13%, 明串珠菌属(9.24%)和魏斯氏菌属(7.96%)分别减少至 2.16%、0.22%。到发酵后期(16 个月)主要优势菌属变为乳杆菌属、盐单胞菌属、海洋杆菌属和盐厌氧菌属(图 3b)。有研究表明耐盐菌属为用盐量质量比 10% 的蔬菜的优势菌属^[16]。乳杆菌属作为整个发酵过程

的主要优势菌属,对发酵产品风味的形成有重要作用^[17-18]。盐单胞菌属于耐盐菌,能发酵葡萄糖产酸,分泌丰富的酶系,产生多种风味物质,使泡菜风味更饱满^[19]。

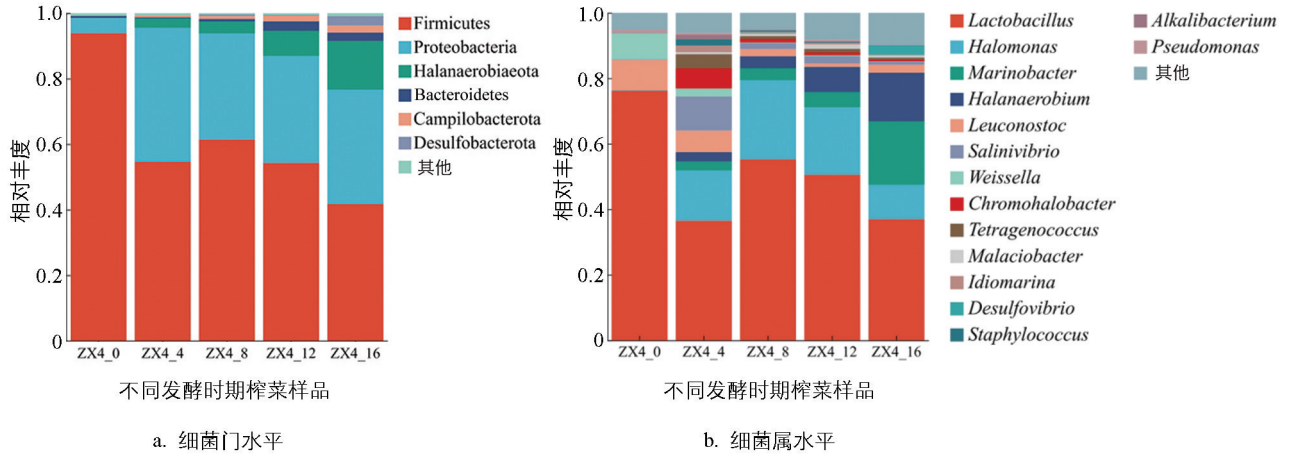


图 3 榨菜样品在细菌门和属水平上细菌的相对丰度

2.2.2 真菌群落结构

在门水平共检测出 4 个优势真菌门(相对丰度大于 1%),分别为子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、Fungi_phy_Incertae_sedis、unclassified_k_Fungi。榨菜发酵初期(0 个月)担子菌门为其主要优势菌门,中后期(8 到 16 个月)子囊菌门为主要优势菌门(图 4a)。

在属水平共检测出 16 个优势真菌属(相对丰度大于 1%),主要为德巴利氏酵母属(*Debaryomyces*)、白冬孢酵母属(*Leucosporidium*)、未分类的银耳属(*unclassified_c_Tremellomyces*)、拟威克酵母属(*Wickerhamiella*)、嗜盐梗孢酵母属(*Sterigmatomyces*)、枝孢属(*Cladosporium*)、*unclassified_k_Fungi*等。发酵初期(0 到 4 个月)主要真菌属为德巴利氏酵母属、白冬孢酵母属、未分类的银耳属,中后期(8 到 16 个月)主要真菌属为德巴利氏酵母属、拟威克酵母属(图 4b)。白冬孢酵母属主要存在蔬菜表面且嗜冷性极强,其在榨菜发酵早期大量存在,可能与榨菜主要在冬季收获、腌制有关;银耳属在大头菜发酵期也被大量检出^[20];德巴利氏酵母属和拟威克酵母属主要存在于发酵中后期,其具有一定的耐酸耐盐特性,能利用多种碳源,促进醇类、酯类和其他代谢产物的形成^[21-22],有利榨菜发酵后期风味的形成。

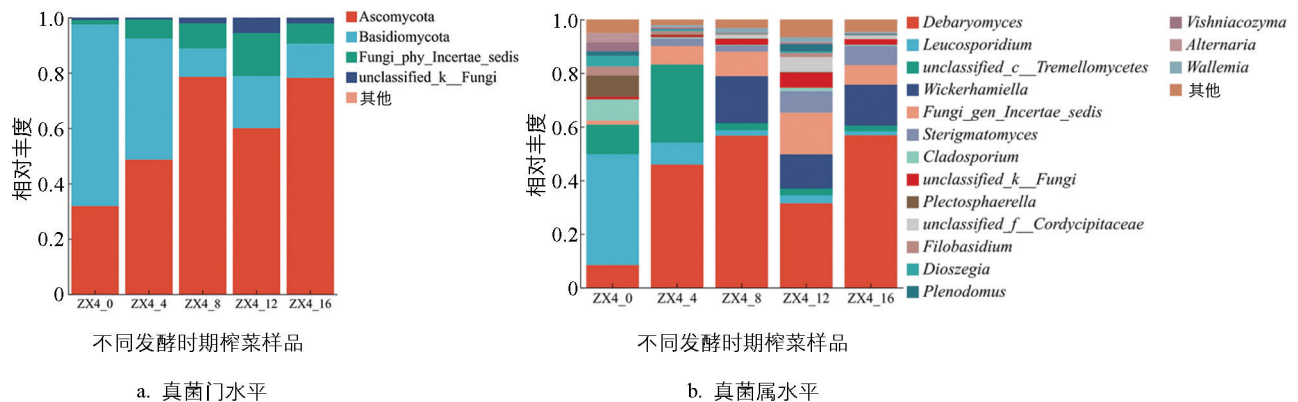


图 4 榨菜样品在真菌门和属水平上真菌的相对丰度

2.3 榨菜发酵过程中挥发性风味物质

榨菜发酵过程中挥发性风味物质成分顶固相微萃取-气相色谱-质谱联用检测结果见表 2,挥发性风味物质成分分类含量和种类数见表 3。

表2 榨菜样品挥发性风味物质成分和含量分析结果

编号	保留时间/min	挥发性风味物质成分	挥发性风味物质含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
			ZX4_0	ZX4_4	ZX4_8	ZX4_12	ZX4_16
Z1	1.93	乙酸乙酯	—	—	—	0.51±0.14	0.67±0.02
Z2	2.70	丁酸乙酯	—	—	—	0.34±0.08	0.92±0.19
Z3	5.19	乳酸丙酯	—	—	0.14±0.05	—	0.26±0.09
Z4	5.98	辛酸乙酯	5.10±1.03	2.26±0.45	0.66±0.07	2.05±0.40	1.54±0.29
Z5	6.52	硬脂酸苯酯	0.90±0.10	1.24±0.12	—	—	—
Z6	6.88	乙酸芳樟酯	—	1.39±0.21	0.38±0.09	0.68±0.11	0.19±0.05
Z7	6.89	丁酸沉香酯	1.18±0.41	0.97±0.17	0.54±0.08	0.40±0.04	0.38±0.06
Z8	7.66	癸酸乙酯	0.24±0.07	0.56±0.05	0.30±0.01	0.79±0.24	0.67±0.06
Z9	8.55	十一烷酸乙酯	0.87±0.14	0.43±0.03	0.31±0.01	0.64±0.04	0.63±0.07
Z10	9.57	月桂酸乙酯	0.22±0.08	0.69±0.27	0.45±0.03	0.89±0.11	0.76±0.10
Z11	10.07	3-苯丙酸乙酯	—	0.44±0.06	0.58±0.02	0.86±0.14	0.70±0.05
Z12	11.51	肉豆蔻酸甲酯	0.27±0.01	0.65±0.04	0.51±0.03	0.63±0.02	1.05±0.12
Z13	12.01	十四酸乙酯	1.36±0.46	3.26±0.19	2.37±0.59	3.36±0.58	4.25±0.95
Z14	12.08	9-氧代壬酸甲酯	1.17±0.04	0.22±0.06	—	—	—
Z15	12.59	9-氧代壬酸乙酯	7.71±1.14	1.63±0.07	1.61±0.01	1.41±0.02	1.30±0.06
Z16	12.88	13-十四烷酸甲酯	0.04±0.00	0.70±0.05	0.40±0.07	0.45±0.09	0.62±0.15
Z17	13.41	13-十四烷酸乙酯	1.07±0.14	2.22±0.17	1.68±0.06	3.06±0.24	3.33±0.19
Z18	13.42	十五酸乙酯	1.03±0.05	2.31±0.17	2.33±0.14	2.84±0.67	3.75±1.18
Z19	14.35	棕榈酸甲酯	11.42±1.58	36.68±1.85	27.22±2.82	19.96±6.41	28.48±7.07
Z20	14.91	2-甲基己酸甲酯	57.81±5.88	107.27±5.12	106.3±1.85	145.71±1.17	129.60±4.65
Z21	15.27	9-十六烯酸乙酯	—	—	—	—	1.42±0.16
Z22	15.60	E-11-十六烯酸乙酯	—	—	0.71±0.02	1.60±0.06	1.13±0.03
Z23	15.61	棕榈油酸甲酯	—	0.50±0.02	—	0.63±0.04	0.97±0.07
Z24	17.43	硬脂酸甲酯	—	0.49±0.18	0.37±0.06	0.45±0.09	0.53±0.04
Z25	17.82	5-十八烯酸乙酯	—	0.89±0.03	0.65±0.07	—	—
Z26	17.83	油酸甲酯	0.98±0.17	1.62±0.86	0.83±0.15	2.17±0.06	2.67±0.24
Z27	17.95	硬脂酸乙酯	0.77±0.03	2.34±1.09	0.79±0.05	2.15±0.65	2.02±0.69
Z28	18.23	油酸乙酯	1.88±0.15	1.85±0.61	1.27±0.24	4.14±0.52	13.27±1.91
Z29	18.35	反油酸乙酯	3.99±1.04	5.78±0.86	2.72±0.10	6.46±0.23	11.25±0.47
Z30	18.36	顺-9-十八烯酸丙酯	—	—	0.60±0.02	2.53±0.35	12.62±0.41
Z31	18.42	亚油酸甲酯	2.39±0.18	7.78±0.25	5.25±0.09	11.07±0.04	16.31±0.13
Z32	18.93	乙酸亚油酯	—	—	0.86±0.08	—	—
Z33	19.92	亚麻酸乙酯	12.67±1.26	46.10±2.57	51.45±1.47	85.18±1.19	107.26±5.89
C1	2.10	2-丙醇	36.50±1.78	0.49±0.04	16.92±2.47	26.66±1.56	25.88±3.12
C2	2.68	正丙醇	—	—	—	0.98±0.11	1.10±0.06
C3	3.60	1-戊烯-3-醇	1.98±0.32	—	0.68±0.24	—	—
C4	3.97	异戊醇	0.13±0.04	0.16±0.02	0.74±0.13	1.55±0.25	1.27±0.15

续表 2

编号	保留时间/min	挥发性风味物质成分	挥发性风味物质含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
			ZX4_0	ZX4_4	ZX4_8	ZX4_12	ZX4_16
C5	3.97	正戊醇	0.22±0.06	0.26±0.07	0.80±0.14	1.59±0.09	1.31±0.27
C6	4.97	环戊醇	1.35±0.34	0.15±0.01	—	—	—
C7	6.07	1-辛烯-3-醇	2.70±0.51	0.60±0.32	—	0.57±0.15	0.47±0.08
C8	6.52	5-降冰片烯-2-醇	—	80.15±6.15	41.88±2.04	3.52±0.24	3.92±0.56
C9	6.64	2-癸醇	—	—	0.16±0.09	0.71±0.05	0.82±0.16
C10	6.65	2-壬醇	—	—	0.20±0.03	0.71±0.15	0.56±0.13
C11	6.84	2,3-丁二醇	—	—	0.18±0.06	0.15±0.01	0.74±0.02
C12	6.89	芳樟醇	1.13±0.23	1.85±0.19	0.47±0.04	0.42±0.06	0.37±0.07
C13	7.40	4-松油醇	—	0.20±0.03	—	—	—
C14	7.45	环辛醇	1.06±0.05	0.24±0.02	—	0.26±0.07	0.36±0.08
C15	7.80	正壬醇	0.96±0.06	0.37±0.01	0.18±0.01	—	—
C16	10.36	苯乙醇	1.64±0.01	2.10±0.03	1.74±0.05	3.43±0.10	3.15±0.04
S1	2.09	草酸	36.46±5.47	23.02±3.58	26.90±1.45	26.68±3.08	31.51±1.17
S2	6.20	乙酸	—	18.18±3.01	11.48±0.64	12.68±0.78	21.18±2.33
S3	6.91	丙酸	—	—	—	0.15±0.03	0.42±0.40
S4	7.20	4-二羟杏仁酸	—	—	3.08±0.54	—	0.03±0.00
S5	7.62	正丁酸	—	0.75±0.07	0.78±0.15	0.96±0.23	2.95±0.15
S6	7.62	正戊酸	—	0.84±0.08	0.72±0.03	0.96±0.16	2.96±0.34
S7	9.65	3-苯丙酸	—	—	0.15±0.01	0.18±0.04	—
S8	12.22	正辛酸	1.81±0.23	1.07±0.41	0.47±0.03	0.53±0.07	0.49±0.02
S9	15.42	棕榈油酸	—	—	—	—	1.64±0.08
S10	16.79	亚麻酸	—	0.60±0.03	0.71±0.02	1.55±0.03	1.60±0.12
S11	21.51	十四烷酸	—	0.39±0.02	0.37±0.01	0.54±0.01	0.62±0.04
S12	27.02	2-丁酮酸	—	1.27±0.22	0.52±0.04	—	1.49±0.07
L1	5.02	异硫氰酸异丁酯	3.09±1.04	—	—	—	—
L2	5.39	全异硫氰酸酯	285.58±14.97	50.82±3.78	19.73±1.05	14.22±1.25	10.87±1.44
L3	5.58	异硫氰酸仲丁酯	6.33±0.98	1.05±0.01	—	—	—
L4	6.21	3-丁烯基异硫氰酸酯	41.01±1.56	2.34±0.38	0.46±0.03	1.82±0.11	1.22±0.04
L5	6.18	异硫氰酸环丙酯	16.79±2.45	1.98±0.08	0.32±0.01	0.75±0.02	—
L6	6.18	2-丙烯基硫氰酸酯	13.45±0.82	1.67±0.75	0.87±0.05	0.75±0.10	—
L7	6.91	异硫氰酸 4-戊烯-1-基酯	4.97±1.17	0.48±0.02	—	—	—
L8	12.75	硫氰酸苄酯	1.31±0.13	—	—	—	—
M1	7.69	二甲醚	2.12±0.03	1.71±0.01	2.31±0.14	3.82±0.31	3.68±0.05
M2	7.98	草蒿脑	—	0.95±0.06	0.18±0.04	0.75±0.01	1.40±0.03
M3	9.46	丙烯基茴香醚	3.98±1.02	12.60±1.36	12.12±0.20	9.19±0.31	15.57±2.42
M4	21.18	1,2-二苯氧基乙烷	0.52±0.04	0.30±0.01	0.01±0.00	1.11±0.26	—

续表2

编号	保留时间/min	挥发性风味物质成分	挥发性风味物质含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
			ZX4_0	ZX4_4	ZX4_8	ZX4_12	ZX4_16
M5	21.18	2-苯氧基苯甲酸	0.61±0.04	0.35±0.07	0.15±0.01	0.43±0.02	—
M6	27.07	乙二醇单异丁醚	7.85±1.06	—	0.89±0.11	1.22±0.54	3.89±0.08
T1	3.93	3-甲基戊烷	2.01±0.04	1.36±0.07	0.88±0.09	0.89±0.01	0.92±0.01
T2	4.34	1-戊烯	0.73±0.05	—	—	—	—
T3	5.60	1,4-二乙炔基苯	0.74±0.02	0.73±0.10	0.18±0.01	0.47±0.07	0.40±0.07
T4	7.34	正十六烷	—	—	—	—	0.19±0.02
T5	8.02	环辛二烯	1.33±0.03	0.55±0.09	0.25±0.02	0.28±0.02	0.44±0.01
T6	8.18	十七烷	0.50±0.08	—	—	—	—
T7	8.61	1-十七烯	—	—	—	—	0.24±0.06
T8	9.12	二十一烷	0.23±0.04	—	—	—	—
T9	9.77	1-甲基萘	—	—	—	0.06±0.01	0.46±0.10
Q1	3.01	己醛	3.89±1.36	0.10±0.05	—	—	—
Q2	3.82	2-己烯醛	0.93±0.13	—	—	—	—
Q3	5.65	正壬醛	0.38±0.02	—	—	0.29±0.05	—
Q4	5.97	E-2-辛烯醛	3.12±0.65	—	—	—	—
Q5	6.52	2,4-二烯醛	3.81±1.04	3.35±0.45	2.23±0.02	2.89±0.12	3.09±0.09
Q6	6.80	苯乙二醛	1.36±0.07	1.83±0.21	0.21±0.06	0.94±0.07	0.96±0.04
Q7	6.80	苯甲醛	1.39±0.15	1.77±0.19	0.38±0.02	0.89±0.24	1.00±0.01
Q8	7.74	2-癸烯醛	1.04±0.06	0.55±0.09	—	—	0.14±0.01
Q9	7.77	苯乙醛	0.97±0.03	1.58±0.14	0.59±0.08	1.06±0.03	1.28±0.07
Q10	8.24	2,4-壬二烯醛	0.97±0.23	0.04±0.00	—	—	—
Q11	8.34	3-乙基苯甲醛	4.05±0.54	0.33±0.03	—	—	0.14±0.01
Q12	8.69	2-十一烯醛	2.02±0.10	1.30±0.06	0.35±0.08	0.58±0.04	1.10±0.01
Q13	9.27	2,4-癸二烯醛	3.19±0.16	0.49±0.01	0.01±0.00	—	—
Q14	9.34	2,5-二甲基苯甲醛	3.18±0.41	3.60±0.64	1.85±0.02	4.38±0.47	3.94±0.16
T1	1.48	2-壬烯-4-酮	—	0.31±0.06	—	—	0.38±0.01
T2	5.16	甲基庚烯酮	0.21±0.01	0.33±0.01	0.02±0.01	0.04±0.00	0.17±0.02
T3	7.27	L(-)-葑酮/茴香酮	0.47±0.05	—	—	—	—
T4	9.70	香叶基丙酮	0.71±0.12	1.46±0.24	0.33±0.08	0.71±0.04	0.76±0.07
T5	11.06	2-羟基苯丙酮	0.14±0.02	—	—	—	—
T6	11.44	十氢萘-1,8-二酮	1.11±0.35	1.70±0.04	0.61±0.07	1.60±0.01	1.28±0.04
T7	11.44	3-亚甲基-1-氧杂螺[4.5]癸-2-酮	0.52±0.09	1.61±0.02	0.58±0.08	1.73±0.28	1.40±0.07
T8	21.18	4,4-二羟基二苯甲酮	—	0.19±0.01	0.01±0.00	0.87±0.03	0.70±0.04
F1	8.66	邻仲丁基苯酚	4.62±1.15	0.56±0.02	0.14±0.06	0.16±0.01	0.19±0.04
F2	11.50	苯酚	0.89±0.01	0.93±0.10	0.96±0.03	1.43±0.25	1.93±0.06
F3	11.57	4-仲丁基苯酚	1.14±0.16	0.17±0.05	—	—	—

续表 2

编号	保留时间/min	挥发性风味物质成分	挥发性风味物质含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)				
			ZX4_0	ZX4_4	ZX4_8	ZX4_12	ZX4_16
F4	13.82	4-乙基苯酚	—	—	0.14±0.01	0.14±0.01	0.09±0.00
F5	14.06	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	—	—	0.27±0.02	0.40±0.03	0.21±0.04
A1	5.38	2-(噻唑-4-基)乙胺	1.75±0.03	16.80±1.02	8.78±1.00	19.78±3.21	11.63±1.22
A2	7.77	N-苄氨基乙醇	0.78±0.08	1.58±0.14	0.55±0.06	1.09±0.07	1.34±0.01
A3	15.44	5-氯-2,4-二甲氧基苯胺	1.72±0.16	4.25±0.84	1.22±0.07	2.58±0.34	0.88±0.25
A4	26.99	1,3-丙二胺	7.50±1.37	1.27±0.19	0.54±0.04	1.99±0.08	3.19±0.58
QT1	2.23	2-乙基咪喃	1.52±0.04	—	—	—	—
QT2	6.20	1,2-二乙基胍	—	1.96±0.07	18.74±2.65	3.70±0.71	10.43±0.62
QT3	9.65	仲丁威	4.13±1.12	0.64±0.02	0.10±0.01	—	—
QT4	11.16	正己酸酐	—	1.07±0.05	1.94±0.14	0.81±0.16	1.41±0.05
QT5	11.96	苯丙腈	9.43±1.06	9.12±1.13	2.99±0.64	1.48±0.33	0.73±0.52

表 3 榨菜样品中挥发性风味物质成分分类含量及种类数比较

挥发性风味物质成分分类	挥发性风味物质成分分类含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)及化合物种类数				
	ZX4_0	ZX4_4	ZX4_8	ZX4_12	ZX4_16
酯类	113.06±12.25 (21)	233.86±5.93 (26)	214.46±6.20 (27)	300.12±9.83 (27)	348.22±11.45 (29)
醇类	47.68±4.38 (10)	85.83±5.22 (11)	63.03±11.58 (11)	42.05±3.09 (12)	40.27±2.19 (12)
酸类	38.20±1.96 (2)	46.25±1.04 (8)	45.56±0.73 (10)	44.82±4.94 (9)	64.66±6.05 (11)
有机硫化物类	372.08±20.65 (8)	57.51±11.16 (6)	22.37±3.73 (4)	17.58±2.20 (4)	12.63±2.74 (2)
醚类	14.26±2.91 (5)	15.86±3.47 (5)	15.95±3.21 (6)	16.37±1.21 (6)	24.38±5.00 (4)
醛类	30.36±5.74 (14)	14.55±1.93 (11)	5.57±2.35 (7)	10.90±3.42 (7)	11.36±2.00 (8)
烃类	5.54±0.87 (6)	2.64±0.50 (3)	1.31±0.16 (3)	1.64±0.13 (4)	2.19±0.25 (6)
酮类	3.62±1.23 (6)	5.17±0.40 (6)	1.58±0.28 (5)	4.07±0.52 (5)	4.57±0.51 (6)
酚类	6.60±0.55 (3)	1.64±0.22 (3)	1.60±0.33 (4)	2.19±0.21 (4)	2.44±0.16 (4)
胺类	11.75±1.45 (4)	23.53±1.79 (4)	11.79±0.26 (4)	25.11±1.45 (4)	17.04±1.05 (4)
其他类	15.39±0.99 (3)	12.76±0.85 (4)	23.39±1.54 (4)	5.86±0.71 (3)	12.43±1.86 (3)
总计	689.35±27.20 (82)	501.22±10.31 (87)	405.58±16.75 (85)	470.73±13.70 (85)	540.28±7.11 (89)

由表2、表3所示,共鉴定出120种挥发性风味物质成分,包括酯类33种、醇类16种、酸类12种、有机硫化物类8种、醚类6种、烃类9种、醛类14种、酮类8种、酚类5种、胺类4种、其他类5种。在榨菜整个发酵过程中,挥发性风味物质总含量呈先减少后增加趋势,由689.35 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 下降至405.58 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 再上升至540.28 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在发酵初期0个月,主要为有机硫化物类、酯类和醇类;发酵4到8个月,主要为酯类、醇类和酸类;发酵后期12到16个月,主要为酯类、酸类和醇类,其次为醚类、有机硫化物类以及烃类物质。这些物质共同赋予涪陵榨菜独特的风味。

酯类物质作为香气骨架成分,主要由酸类和醇类物质酯化反应产生^[23]。在榨菜整个发酵过程中,酯类物质由113.06 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (21种)增加至348.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (29种),是发酵后期的主要风味物质,约占总量的64.45%,其中亚麻酸乙酯、2-甲基己酸甲酯和棕榈酸甲酯含量较高,是榨菜的主要挥发性酯类物质,这与文献[24]的研究结果相似。到发酵末期16个月时,主要增加了乙酸乙酯(苹果香气)、丁酸乙酯(菠萝甜香)、乳酸丙酯(奶油风味)、9-十六烯酸乙酯(花香)、顺-9-十八烯酸丙酯等,能赋予榨菜更多水果香、花香和甜香^[25-26]。

醇类物质的合成途径主要为氨基酸代谢、乳糖代谢、亚麻酸和亚油酸降解,其对酯类、醛类和酮类物质的产生至关重要,是发酵食品风味形成不可或缺的成分^[27]。榨菜醇类物质主要存在于发酵4到8个月,其含量最高85.83 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其中2-丙醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇等随着发酵的进行含量逐渐减少,可能是由于其参与了发酵后期的酯化反应^[28]。醇类物质中,异戊醇和正戊醇呈果香、醇香,1-辛烯-3-醇呈蘑菇香,5-降冰片烯-2-醇呈松木香且略带清凉感,苯乙醇具有新鲜面包香、清甜的玫瑰香,其在榨菜发酵中常被检出^[29]。

酸类物质是发酵食品风味形成的重要物质,具有维持和协调香气的作用^[30]。发酵初期0个月,仅检测到草酸和正辛酸,总量38.20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (2种)。随着发酵的进行,酸类物质种类和含量逐渐增加,到发酵结束时(16个月),检测出酸类物质总量64.66 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (11种),而文献[24]的研究表明,榨菜发酵过程中酸类物质含量逐渐减少,与本研究结果相反,可能与加工工艺和用盐量不同有关。到榨菜发酵后期主要增加了乙酸、正戊酸、正丁酸、棕榈油酸等。

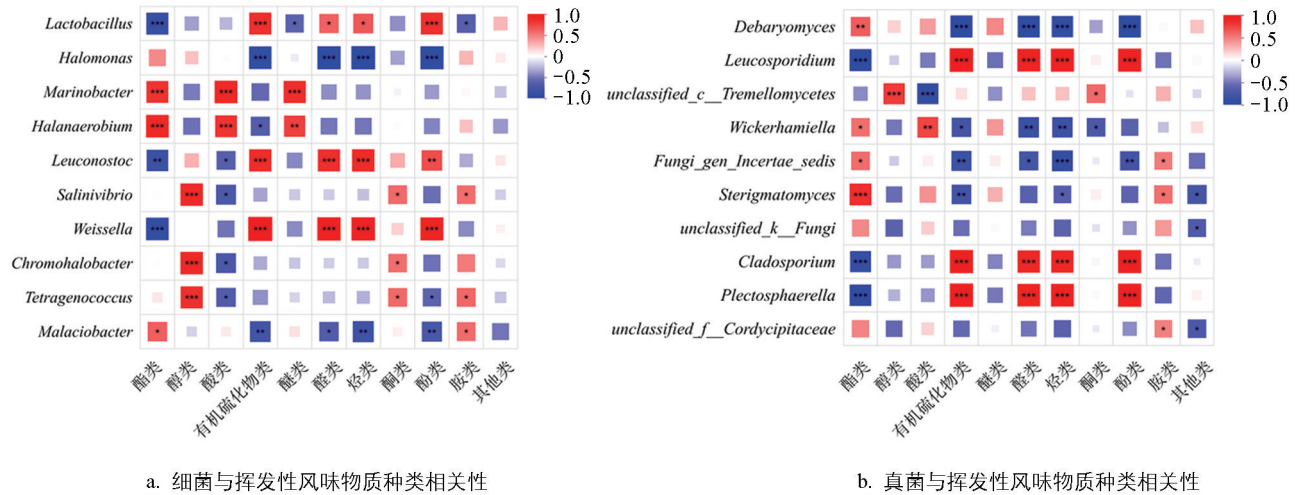
榨菜发酵过程中的有机硫化物类主要为异硫氰酸酯类,异硫氰酸酯类是榨菜原料青菜头辛辣味的主要来源,在榨菜腌制过程中其辛辣味逐渐消失^[31]。在发酵初期0个月,有机硫化物类含量为372.08 $\mu\text{g}/\text{kg}$,占该时期挥发性风味物质成分总量的53.98%,随着发酵的进行,其含量迅速减少,发酵4个月时,其含量仅57.51 $\mu\text{g}/\text{kg}$,到发酵16个月时,为12.63 $\mu\text{g}/\text{kg}$,占总量的2.34%。

随着发酵的进行,榨菜中醚类物质含量逐渐增加,到发酵末期为24.38 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其中,丙烯基茴香醚又称茴香脑,是其主要的醚类物质,呈鲜茴香、甜香、辛香的口感,对于榨菜形成特有的辛香味具有重要作用^[32];醛类物质含量和种类数均降低,可能与发酵系统酸度增加和微生物群落的变化有关。烃类、酮类和酚类物质在整个发酵过程中含量和种类数变化不大。

2.4 挥发性风味物质成分种类与微生物之间的相关性

榨菜挥发性风味受原料、微生物和工艺条件等诸多因素的影响,微生物对其挥发性风味物质的形成至关重要。为了研究不同微生物与榨菜挥发性风味物质成分之间的相关性,采用Pearson相关性分析探究了各挥发性风味物质种类和优势微生物菌属(相对丰度排名前10)之间的相关关系,结果如图5所示。大部分主要细菌属与挥发性风味物质种类呈正相关。乳杆菌属、明串珠菌属和魏斯氏菌属与挥发性风味

物质种类的相关性较一致, 均与榨菜有机硫化物类、醛类、烃类和酚类呈显著正相关($p < 0.05$), 其中, 与有机硫化物类高度显著正相关($p < 0.001$), 而与酯类呈极显著负相关($p < 0.01$)。乳杆菌属、魏斯氏菌属常在泡菜以及酒类发酵过程中被检出, 与风味的形成密切相关^[33-34]。盐单胞菌属与有机硫化物类、醛类、烃类、酚类呈高度显著负相关($p < 0.001$)。海洋杆菌属和盐厌氧菌属均与酯类、酸类以及醚类极显著正相关($p < 0.01$)。嗜盐菌属、色盐杆菌属和四联球菌属与醇类呈高度显著正相关($p < 0.001$), 与酮类呈显著正相关($p < 0.05$)。德巴利氏酵母属作为榨菜发酵中后期的主要优势真菌属, 与大部分挥发性风味物质种类呈高度显著负相关($p < 0.001$), 文献[35]的研究表明德巴利氏酵母属与豆瓣酱风味呈正相关, 这与本文研究结果相反, 可能与发酵原料、发酵工艺不一致有关。白冬孢酵母属、枝孢属和癣囊腔菌(*Plectosphaerella*)属, 均与酯类呈高度显著负相关($p < 0.001$), 与有机硫化物类、醛类、烃类以及酚类呈高度显著正相关($p < 0.001$); 拟威克酵母属与大部分挥发性风味物质种类呈明显负相关, 与酯类呈显著正相关($p < 0.05$), 与酸类呈极显著正相关($p < 0.01$); 嗜盐梗孢酵母与酯类呈高度显著正相关($p < 0.001$)。说明榨菜独特风味的形成是由多种微生物共同作用产生。根据实际生产, 可通过调节榨菜发酵过程中微生物种类来改善榨菜风味。



* 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($p < 0.001$)。

图 5 榨菜优势细菌属和真菌属与挥发性风味物质成分种类的相关性分析

3 结论

采用高通量测序技术和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术研究了涪陵榨菜发酵过程中微生物群落、挥发性风味物质成分的变化以及两者间的相关性。榨菜发酵初期, 主要优势菌属为乳杆菌属、明串株菌属、德巴利氏酵母属和白冬孢酵母属; 到发酵中后期, 演变为乳杆菌属、盐单胞菌属、海洋杆菌属、德巴利氏酵母属以及拟威克酵母属。发酵过程中共检测到 120 种挥发性风味物质, 主要挥发性风味物质为有机硫化物类、酯类、醇类和酸类, 含量较高的风味物质为全异硫氰酸酯、2-甲基己酸甲酯、5-降冰片烯-2-醇、亚麻酸乙酯和草酸。微生物与挥发性风味物质成分相关性表明, 优势细菌属与大部分挥发性风味物质种类呈正相关, 其中, 乳杆菌属、明串株菌属和魏斯氏菌属均与有机硫化物类、醛类、烃类和酚类显著正相关($p < 0.05$); 海洋杆菌属和盐厌氧菌属均与酯类、酸类以及醚类极显著正相关($p < 0.01$)。嗜盐菌属、色盐杆菌属和四联球菌属与醇类呈高度显著正相关($p <$

0.001)。优势真菌属对榨菜风味的形成也至关重要,德巴利氏酵母属与大部分挥发性风味物质种类呈高度显著负相关($p < 0.001$),而白冬孢酵母属、枝孢属、癣囊腔菌属,均与大部分挥发性风味物质种类呈高度显著正相关($p < 0.001$)。本研究有助于解析菌群结构对涪陵榨菜风味形成的关系,并为改进榨菜加工工艺及调控产品品质提供了一定理论基础。

参考文献:

- [1] 贺云川,周斌全,刘德君. 涪陵榨菜传统工艺概述 [J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(4): 57-60.
- [2] 刘鑫,王家旺,隋雨萌,等. 中国传统发酵蔬菜中微生物多样性及其对品质形成影响研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 45(10): 290-297.
- [3] LI J, HE Z F, YAN L X, et al. Analysis of the Microbial Community Structure and Flavor Components Succession during Salt-Reducing Pickling Process of Zhacai (Preserved Mustard Tuber) [J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(6): 3154-3170.
- [4] HU Y Y, ZHANG L, WEN R X, et al. Role of Lactic Acid Bacteria in Flavor Development in Traditional Chinese Fermented Foods; A Review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(10): 2741-2755.
- [5] SUN X H, QI X, HAN Y D, et al. Characteristics of Changes in Volatile Organic Compounds and Microbial Communities during the Storage of Pickles [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135285.
- [6] LIU D Q, ZHANG C C, ZHANG J M, et al. Dynamics of the Glucosinolate-Myrosinase System in Tuber Mustard (*Brassica juncea* Var. *tumida*) during Pickling and Its Relationship with Bacterial Communities and Fermentation Characteristics [J]. Food Research International, 2022, 161: 111879.
- [7] 吴晓红,高生平,蒋彩云,等. 榨菜发酵过程中原核微生物群落结构及其理化因子的动态演替 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 27-34.
- [8] 郝卓莉. 遂宁榨菜发酵过程中细菌群落多样性和基因功能预测分析 [J]. 中国酿造, 2021, 40(5): 59-64.
- [9] 李敏,贺云川. 方便榨菜挥发性成分分析 [J]. 食品科学, 2011, 32(8): 272-274.
- [10] ZHANG C C, ZHANG J M, LIU D Q. Biochemical Changes and Microbial Community Dynamics during Spontaneous Fermentation of Zhacai, a Traditional Pickled Mustard Tuber from China [J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 347: 109199.
- [11] 蒋景竹,王晓宇,李娟,等. 传统酸汤发酵过程中优势菌群与风味物质的相关性研究 [J]. 中国食物与营养, 2025, 31(10): 41-52.
- [12] 赖茂佳,牟燕,易宇文,等. 川味发酵香肠微生物多样性及风味物质相关性分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 303-314.
- [13] 胡此海,杨絮,郭全友,等. 四川泡菜母水的微生物群落与理化特性分析 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 281-291.
- [14] LIAN Y Y, SONG J J, MUMBY W, et al. The Correlation between Flavor Formation and Microbial Community Dynamics during the Fermentation of Zha Cai [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(10): 6233-6241.
- [15] 田叶新,母应春,苏伟,等. 剁椒姜丝后熟阶段微生物与挥发性风味物质的相关性 [J]. 食品科学, 2023, 44(4): 185-193.
- [16] 魏雯丽. 四川工业豇豆泡菜微生物群落结构分析及风味代谢的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [17] LIN L J, ZENG J, TIAN Q M, et al. Effect of the Bacterial Community on the Volatile Flavour Profile of a Chinese Fer-

- mented Condiment-Red Sour Soup during Fermentation [J]. *Food Research International*, 2022, 155: 111059.
- [18] NIE S, LI L H, WU Y Y, et al. Exploring the Roles of Microorganisms and Metabolites in the Fermentation of Sea Bass (*Lateolabrax japonicas*) Based on High-Throughput Sequencing and Untargeted Metabolomics [J]. *LWT*, 2022, 167: 113795.
- [19] 赵玲艳, 黄嘉欣, 杨剑, 等. 盐渍辣椒细菌多样性分析 [J]. *食品科学*, 2020, 41(20): 105-111.
- [20] 吴进菊, 曾瑞萍, 张俊毅, 等. 高通量测序分析大头菜发酵过程中真菌的多样性 [J]. *食品科学*, 2020, 41(10): 75-80.
- [21] ENCINAS J P, LÓPEZ-DÍAZ T M, GARCÍA-LÓPEZ M L, et al. Yeast Populations on Spanish Fermented Sausages [J]. *Meat Science*, 2000, 54(3): 203-208.
- [22] TANAKA Y, WATANABE J, MOGI Y. Monitoring of the Microbial Communities Involved in the Soy Sauce Manufacturing Process by PCR-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis [J]. *Food Microbiology*, 2012, 31(1): 100-106.
- [23] 王纪辉, 胡伯凯, 周雯. 基于 HS-SPME-GC-MS 解析核桃雄花挥发性成分 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(2): 51-60.
- [24] 袁美, 韩彦慧, 徐柯, 等. 机械脱水一次腌制榨菜在腌制过程中香气成分的变化 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(23): 234-240.
- [25] 肖冬光. 白酒酿造过程中酯类物质形成机理探讨 [J]. *酿酒科技*, 2022(9): 17-24.
- [26] 李薇. 传统发酵永川豆豉和速成豆豉增香发酵关键香气物质基础比较研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [27] CURIONI P M G, BOSSET JO. Key Odorants in Various Cheese Types as Determined by Gas Chromatography-Olfactometry [J]. *International Dairy Journal*, 2002, 12(12): 959-984.
- [28] 陈添艳, 苏伟, 母应春, 等. 剁椒山笋后熟过程中微生物与挥发性风味物质的相关性分析 [J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 180-189.
- [29] 贺云川, 李敏. 同时蒸馏萃取-气质联机分析坛装风脱水榨菜挥发性成分 [J]. *中国调味品*, 2010, 35(10): 116-119.
- [30] 张晓, 夏延斌. 泡菜风味及其影响因素研究进展 [J]. *中国调味品*, 2012, 37(3): 32-37.
- [31] 何松, 练银银, 杨菊香, 等. 榨菜“三腌三榨”过程中品质形成研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 219-225.
- [32] 刘明春. 榨菜加工过程中挥发性风味物质的形成及变化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [33] 唐垚. 不同发酵形态盐渍萝卜发酵过程中风味物质与微生物菌群的关联性分析 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [34] 郭建华, 赵晓旭, 蒋海娇, 等. 玉米黄酒发酵过程中微生物菌群结构与挥发性风味物质的相关性分析 [J]. *中国调味品*, 2023, 48(11): 84-89.
- [35] 张芑芑, 王世乐, 陈福生, 等. 蚕豆瓣酱发酵过程中微生物群落与挥发性风味物质的相关性 [J]. *中国酿造*, 2023, 42(5): 41-49.

责任编辑 廖坤

崔玉洁