DOI:10.12441/spyswjs.20241118004 [文章编号] 1673-1689(2025)11-0119-13

香辛料对涪陵榨菜微生物菌落结构及挥发性风味成分的影响

任 亭[1] 刘玉凌[1] 赵志平[2] 陈孝勇[3] 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. 成都大学食品与生物工程学院,四川 成都 610106; 3. 西南大学食品科学学院,重庆 408000)

摘要:【目的】研究香辛料对涪陵榨菜微生物菌落结构及挥发性风味物质的影响,并探究主要优势微生物菌属与挥发性风味成分种类间的相关性。【方法】采用高通量测序和顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术研究香辛料对腌制涪陵榨菜微生物菌落结构和挥发性风味成分的影响,基于Pearson相关系数揭示主要优势微生物菌属与挥发性成分种类间的相关性,并检测了榨菜总酸、亚硝酸盐和还原糖等理化特性。【结果】对照组主要优势菌属为乳杆菌属(*Lactobacillus*,35.61%)、盐单胞菌属(*Halomonas*,15.13%)、明串珠菌属(*Leuconostoc*,10.40%)、德巴利氏酵母属(*Debaryomyces*,77.51%)等;添加香辛料组主要优势菌属为乳杆菌属(*Lactobacillus*,80.49%)、德巴利氏酵母属(*Debaryomyces*,43.17%)、未指明酵母菌(unclassified_k_Fungi,28.33%)等。对照组检测出挥发性风味成分60种(总质量分数为1 286.94 μg/kg),主要为酯类、有机硫化物类和酸类;添加香辛料组检测出挥发性风味成分84种(总质量分数为14 304.21 μg/kg),主要为醇类、醚类和酸类。添加香辛料组的总酸质量分数(10.95 g/kg)高于对照组(7.14 g/kg),亚硝酸盐质量分数(5.57 mg/kg)也高于对照组(3.13 mg/kg)。乳杆菌属与醇类、醚类、烯烃类、酸类、酮类和酚类呈高度显著正相关(P<0.001),与有机硫化物呈高度显著负相关(P<0.001);德巴利氏酵母属、盐单胞菌属、明串珠菌属与大部分挥发性风味成分种类呈显著负相关(P<0.05)。【结论】添加香辛料能增加榨菜酸度,提高乳酸菌属相对丰度以及真菌优势菌群数;调控榨菜发酵过程的乳杆菌属、节杆菌属和链格孢属的丰度,有助于改善榨菜的风味。

关键词:香辛料;涪陵榨菜;菌落结构;挥发性风味

Effects of Spices on Microbial Community Structure and Volatile Flavor Components of Fuling Pickled Mustard Tuber

REN Ting[1] *LIU Yuling*[1] *ZHAO Zhiping*[2] *CHEN Xiaoyong*[3]
PENG Yumei[1] *TAO Hong*[1] *LUO Yuanli*[1*]

(1. Chongqing Yudongnan Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 408000, China; 2. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 3. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 408000, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of spices on the microbial community structure and volatile flavor compounds of Fuling pickled mustard tuber and explore the correlations between dominant microbial genera and volatile components. [**Method**] The effects of spices on microbial community structure and

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);四川省科技计划项目(2024YFHZ0113)。

通信作者:罗远莉(1979—),女,博士,副研究员,主要从事食品发酵研究。E-mail:823979902@qq.com

收稿日期:2024-11-18 **修回日期:**2025-02-14

volatile flavor components of Fuling pickled mustard tuber were investigated by high-throughput sequencing and headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Pearson correlation coefficients were calculated to reveal the correlations between dominant microbial genera and volatile components. The mass fractions of total acids, nitrite, and reducing sugar were determined. [**Result**] The dominant microbial genera in the pickled mustard tuber without spices addition (control) were *Lactobacillus* (35.61%), *Halomonas* (15.13%), *Leuconostoc* (10.40%), *Debaryomyces* (77.51%), etc. In the pickled mustard tuber with spices addition, *Lactobacillus* (80.49%), *Debaryomyces* (43.17%), and unclassified_k_Fungi (28.33%) were dominant. A total of 60 volatile flavor compounds were detected in the control group, with the total mass fraction of 1 286.94 μg/kg, mainly including esters, organic sulfides, and acids. 84 volatile flavor compounds were detected in the spices addition group, with the total mass fraction of 14 304.21 μg/kg, mainly including alcohols, ethers, and acids. The pickled mustard tuber with spices addition had higher total acid mass fraction (10.95 g/kg vs. 7.14 g/kg) and higher nitrite mass fraction (5.57 mg/kg vs. 3.13 mg/kg) than the control group. *Lactobacillus* showed positive correlations with alcohols, ethers, alkenes, acids, ketones, and phenols ($P<0.001$) and negative correlations with organic sulfides ($P<0.001$). *Debaryomyces*, *Halomonas*, and *Leuconostoc* showed negative correlations with most volatile flavor components ($P<0.05$). [**Conclusion**] Spices can increase the acidity of pickled mustard tuber, the relative abundance of *Lactobacillus*, and the number of dominant fungi. By regulating the abundance of *Lactobacillus*, *Wallemia*, and *Alternaria* during the fermentation process, spices help improve the flavor of pickled mustard tuber.

Keywords: spice; Fuling pickled mustard tuber; microbial community structure; volatile flavor

涪陵榨菜是以青菜头为原料经高盐工艺腌制发酵而成[1]，其质地脆嫩，风味鲜美，营养丰富，具有特殊酸味和咸鲜味[2-3]，深受消费者喜欢。榨菜发酵是一个复杂的混菌发酵过程，极易受原料和环境中微生物的影响，而且易受食源性致病菌污染[4]，导致发酵榨菜品质不稳定。高盐工艺虽能抑制有害菌但会导致发酵系统中乳酸菌活性降低，同时影响榨菜风味和营养品质[5-6]。香辛料含有许多功能性成分，如防腐、抑菌、抗氧化等[7-8]，还可增香调味，被广泛应用于食品加工业。杨淑花等[9]研究发现，将香辛料添加到莲藕泡菜中能改善泡菜风味，降低亚硝酸盐质量分数；徐乙银等[10]也发现，香辛料能有效抑制泡菜中某些病原菌的生长，改善产品品质。据调研，在涪陵榨菜加工生产中，大部分企业也会通过添加香辛料的方式来改善榨菜品质。然而，关于香辛料对涪陵榨菜微生物菌落结构、挥发性风味组分及品质影响的研究还未见报道。

随着现代分子生物学方法的不断发展，高通量测序技术、顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS）等已被广泛用于食品发酵领域[11-12]。作者拟利用高通量测序技术和HS-SPME-GC-MS研究添加香辛料对涪陵榨菜发酵结束时微生物的群落结构及挥发性风味组分的影响，同时检测榨菜总酸、亚硝酸盐和还原糖质量分数等指标，并探究主要优势微生物菌属与挥发性成分种类间的相关性，旨在为后期改进榨菜工艺及品质调控提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

榨菜原料（青菜头）、辣椒、花椒、十三香（小茴香、干姜、橘皮、八角、茴香、肉桂、花椒、黑胡椒、肉豆蔻、白芷、砂仁、丁香、甘草、高良姜、山楂）：市售。

正十五烷-d_{32}：分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；正构烷烃混合标准品（C_{10}~C_{25}）：英国 LGC 集团（Laboratory of the Government Chemist）；MagAtrract PowerSoil Pro DNA Kit试剂盒：德国 Qiagen 公司；FastPfu Polymerase：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型，安捷伦科技有限公司；PCR 仪：T100 Thermal Cycler型，美国 Bio-Rad 公司；电泳仪：JY600C 型，北京君意东方电泳设备有限公司。

1.3　方法

1.3.1　榨菜样品制备

新鲜青菜头，去筋，按质量分数4%加盐腌制15 d，翻坛，去除腌制出来的废水；加盐（质量分数5%）和香辛混合料（花椒质量分数0.8%、辣椒质量分数0.8%、十三香质量分数0.2%）密封，置于25 ℃下发酵6个月，无菌条件下取固液混合样，−80 ℃冰箱贮存，供后续检测微生物多样性和挥发性风味物质。对照组（X4）未添加香辛料，其他工艺与X3组相同。

1.3.2　总酸质量分数测定

按GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》进行测定。

1.3.3　还原糖质量分数测定

按GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》进行测定。

1.3.4　亚硝酸盐质量分数测定

按GB 5009.33—2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》进行测定。

1.3.5　DNA提取和PCR扩增

根据微生物群落总基因组DNA试剂盒提取样品总DNA，使用1 g/dL的琼脂糖凝胶电泳检测抽提的基因组DNA的质量；使用携带Barcode序列引物338F_806R和IT1F_IT2R，扩增细菌16S rRNA基因V3—V4可变区、真菌的ITS1区。PCR扩增程序：95 ℃预变性3 min，27个循环（95 ℃变性30 s，55 ℃退火30 s，72 ℃延伸30 s），然后72 ℃稳定延伸10 min。

1.3.6　Illumina Miseq测序与分析

使用2 g/dL琼脂糖凝胶回收PCR产物，利用DNA凝胶回收纯化试剂盒进行回收产物纯化，并用Qubit4.0对回收产物进行检测定量。使用NEXTFLEX®Rapid DNA-Seq Kit对纯化后的PCR产物进行建库。使用FASTP软件对双端原始测序序列进行质控，使用FLASH软件进行拼接。

基于默认参数，使用Qiime2流程[13]中的DADA2[14]插件对质控拼接之后的优化序列进行降噪处理。DADA2降噪处理之后的序列通常被称为ASVs（即扩增子序列变体）。去除所有样品中注释到的叶绿体和线粒体序列。为了尽量减少测序深度对后续α多样性和β多样性数据分析的影响，对所有样本序列数进行抽平处理，抽平后每个样本的平均序列覆盖度（Good's coverage）仍可达99.99%。细菌基于Sliva 16S rRNA基因数据库（v138），真菌基于Unite ITS基因数据库。使用Qiime2中的Naive bayes分类器对ASVs进行物种分类学分析。

1.3.7　挥发性风味成分分析

取2 g样品置于20 mL顶空瓶，加入内标2.0 μL（正十五烷-d_{32} 100 μg/mL）立即密封顶空瓶。样品瓶置于加热箱温度80 ℃，平衡20 min，进行全自动HS-SPME。

HS-SPME条件：纤维萃取头在240 ℃老化5 min后，将其安装在全自动萃取仪上进行HS-SPME（样品吸附时间20 min，样品解吸时间2 min）。

GC条件：采用不分流模式将样品注入GC-MS系统进行分析，进样量1 μL。样品经VF-WAXms毛细管柱（25 m×0.25 mm×0.2 μm，Agilent CP9204）分离后供质谱检测。进样口温度240 ℃，载气为高纯氦气，载气流量1.5 mL/min，隔垫吹扫流量3 mL/min。升温程序为初始温度40 ℃，以15 ℃/min的速度升至150 ℃，再以5 ℃/min的速度升至230 ℃，并维持5 min，后运行230 ℃维持2 min。

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

1.3.8　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；使用R语言绘图。采用内标法对挥发性风味化合物进行定量。

2　结果与讨论

2.1　香辛料对涪陵榨菜理化指标的影响

由表1可知，X3组样品的亚硝酸盐质量分数和总酸质量分数高于X4组，还原糖质量分数明显低于X4组。虽然X3组样品的亚硝酸盐质量分数高于X4组，但其亚硝酸盐质量分数仅为5.57 mg/kg，远低于国家安全标准（20 mg/kg）。

表 1　榨菜样品理化指标

Table 1　Physicochemical indexes of pickled mustard tuber samples

组别	亚硝酸盐质量分数/（mg/kg）	总酸质量分数/（g/kg）	还原糖质量分数/（g/100g）
X3 组	5.57±0.12	10.95±0.15	0.09±0.01
X4 组	3.14±0.15	7.14±0.03	0.27±0.01

2.2　香辛料对涪陵榨菜微生物多样性的影响

2.2.1　α 多样性

如表 2 所示，组内比较，X4 组细菌的 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数均高于真菌，Simpson 指数低于真菌，说明对照组榨菜细菌群落多样性和丰富度均高于真菌；X3 组细菌的 ACE 指数、Chao1 指数、Simpson 指数均高于真菌，Shannon 指数低于真菌，说明加入香辛料后，真菌群落多样性高于细菌，而细菌丰富度则高于真菌。组间比较，X3 组细菌、真菌的 Chao1 指数、Shannon 指数均高于 X4 组，说明香辛料能提高榨菜的微生物多样性和丰富度。

表 2　榨菜样品 α 多样性分析结果

Table 2　Alpha diversity indexes of pickled mustard tuber samples

微生物	组别	sobs 指数	ACE 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
细菌	X3 组	205.00±10.58	205.56±11.24	205.05±10.67	1.84±0.05	0.31±0.03
	X4 组	172.67±10.97	174.83±9.39	173.28±10.36	1.19±0.11	0.53±0.03
真菌	X3 组	149.00±11.00	149.19±11.00	149.3±11.02	2.36±0.07	0.23±0.02
	X4 组	92.33±2.08	92.33±2.08	92.33±2.08	1.12±0.27	0.61±0.11

X3 组和 X4 组平均回收了 59 172 个有效细菌序列和 79 734 个有效真菌序列，且覆盖率为 100%，测序深度已达到要求。细菌和真菌的 sobs 指数曲线和 Shannon 指数曲线如图 1 所示，随着测

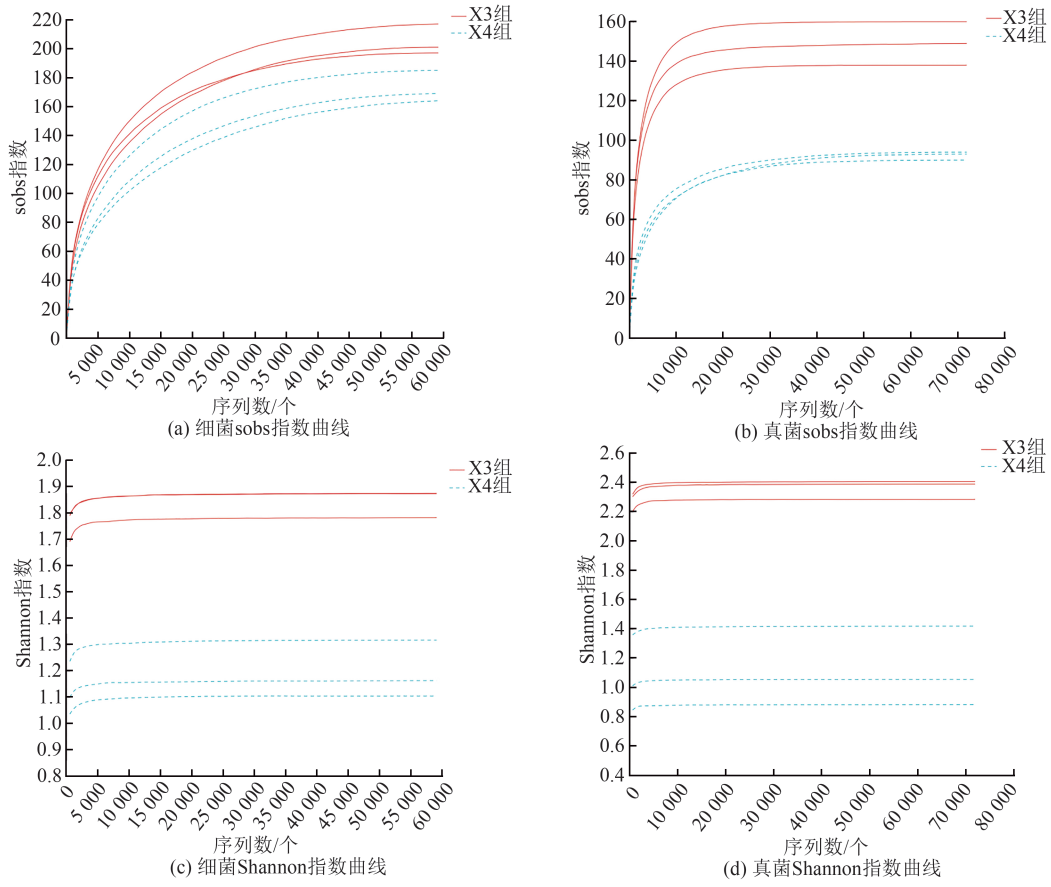


图 1　榨菜样品细菌和真菌的 sobs 指数曲线和 Shannon 指数曲线

Fig. 1　Sobs curves and Shannon curves of bacteria and fungi in pickled mustard tuber samples

序量的增加，曲线趋于平缓，表明测序量充分，足以反映榨菜样品。

2.2.2　β多样性

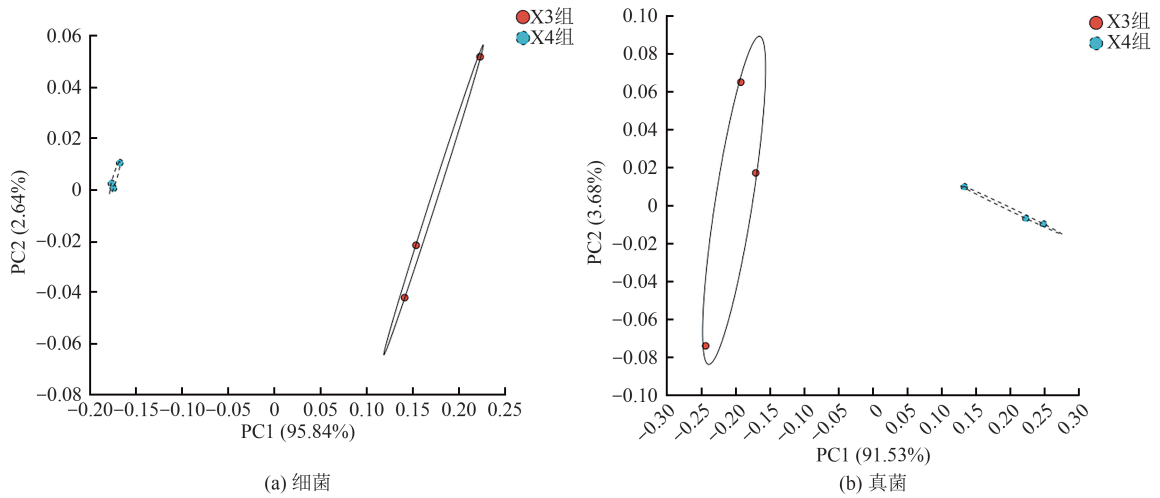
对X3组和X4组样品细菌和真菌的ASV数据进行主坐标分析（principal co-ordinates analysis，PCoA），研究榨菜样品组间和组内群落组成的相似性或差异性。如图2所示，X3组和X4组样品能够很好地区分开，说明香辛料组和对照组群落（细菌和真菌）组成存在差异。

2.3　香辛料对涪陵榨菜微生物群落结构的影响

2.3.1　细菌群落结构

如图3所示，在门水平上，X3组和X4组榨菜样品均检测出4个优势细菌门（相对丰度>1%），分别为厚壁菌门（Firmicutes，82.17%、55.22%）、变形杆菌门（Proteobacteria，11.28%、36.30%）、盐厌氧菌门（Halanaerobiaeota，1.18%、5.63%）、弯曲菌门（Campilobacterota，4.17%、1.43%）。2组的主要优势细菌门均为厚壁菌门和变形杆菌门，与腌制根芥菜、酸菜和泡菜等发酵产品主要优势细菌门一致[15-17]。添加香辛料后，厚壁菌门相对丰度占比增加至82.17%，厚壁菌门能产生更多活性酶分解碳水化合物，因此X3组的还原糖质量分数更低，而且碳水化合物分解有利于风味的形成[18]。

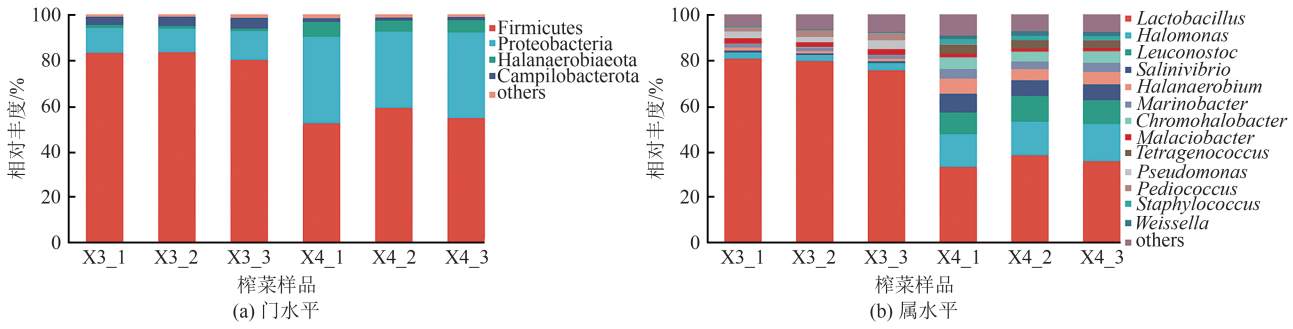
在属水平上，X3组和X4组榨菜样品中分别检测出4、8个优势细菌属（相对丰度>2%），共有的为乳杆菌属（*Lactobacillus*，80.49%、35.61%）和盐单胞菌属（*Halomonas*，2.62%、15.13%）。香辛料的添加，使得乳杆菌属成为榨菜绝对优势菌属，其对发酵产品风味的形成有重要作用，还能抑制有害微生物生长繁殖[19-20]；同时，降低了盐单胞菌属相对丰度。X3组特有优势菌属为假单胞菌属（*Pseudomonas*，3.21%）、片球菌属（*Pediococcus*，2.57%）。假单胞菌属于变形菌门，有研究表明，变



(a) 细菌　　(b) 真菌

图2　榨菜样品细菌和真菌ASV水平的PCoA

Fig. 2　PCoA of bacterial and fungal ASVs in pickled mustard tuber samples



(a) 门水平　　(b) 属水平

图3　榨菜样品在门和属水平上细菌的相对丰度

Fig. 3　Relative abundance of bacteria in pickled mustard tuber samples at phylum and genus levels

形菌门的存在会使发酵食品中亚硝酸盐含量升高[21]，这与表 1 中亚硝酸盐检测结果一致。X4 组的特有优势菌属为明串珠菌属（*Leuconostoc*，10.40%）和耐盐菌属（29.46%），与 X3 组差异较大。魏雯丽[22]研究发现，耐盐菌属为高盐（质量分数 10%~12%）工业泡菜的优势菌群，与本研究中耐盐菌属为未添加香辛料组优势菌属相似。

2.3.2 真菌群落结构

如图 4 所示，在门水平上，X3 组和 X4 组榨菜样品均检测出 3 个优势真菌门（相对丰度>1%），分别为子囊菌门（Ascomycota，57.15%、81.10%）、未指明的真菌门（unclassified_k_Fungi，28.33%、8.85%）和担子菌门（Basidiomycota，14.20%、10.04%）。添加香辛料后，榨菜子囊菌门相对丰度占比降低，未指明的真菌门和担子菌门相对丰度占比增加。

在属水平上，X3 组和 X4 组榨菜样品分别检测出 5、4 个优势真菌属（相对丰度>2%），共有的为德巴利氏酵母属（*Debaryomyces*，43.17%、77.51%）和未指明酵母菌（unclassified_k_Fungi，28.33%、8.85%）。德巴利氏酵母属为榨菜的主要优势菌群，是榨菜发酵中后期常见真菌。添加香辛料后，德巴利氏酵母属相对丰度降低，可能是由于香辛料的添加使乳杆菌属成为绝对优势菌群，产酸增加，抑制了德巴利氏酵母属生长繁殖。X3 组榨菜样品特有的为节担菌属（*Wallemia*，6.84%）、链格孢属（*Alternaria*，5.51%）和枝孢属（*Cladosporium*，2.24%）。X4 组榨菜样品特有的为 *Holtermanniella*（4.10%）和未指明球菌属（unclassified_c_Microbotryomycetes，2.05%）。

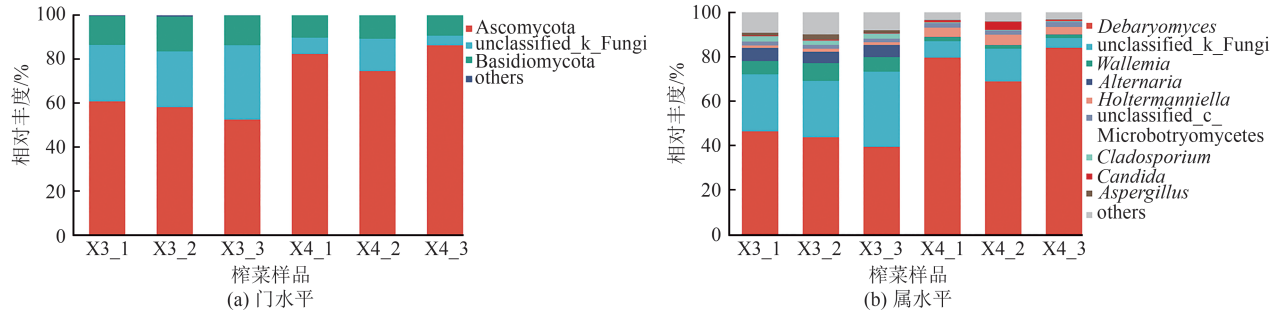


图 4 榨菜样品在门和属水平上真菌的相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of fungi in pickled mustard tuber samples at phylum and genus levels

2.4 香辛料对涪陵榨菜挥发性风味成分的影响

由表 3~4 可知，X3 组和 X4 组榨菜样品共鉴定出 101 种挥发性成分，X3 组的挥发性物质总质量分数和种类数（14 304.21 μg/kg、84 种）明显高于 X4 组（1 286.94 μg/kg、60 种）。X4 组榨菜样品的挥发性成分主要为酯类、有机硫化物类和酸类；X3 组榨菜样品的挥发性成分主要为醇类、醚类和酸类。有研究表明，小茴香、八角主体香味物质种类为烃类和醚类，花椒、辣椒主体香味物质种类为烃类和醇类[23]。本研究中榨菜添加的香辛料为花椒、辣椒和十三香，香料种类较多，其挥发物种类和质量分数的变化，可能是由于香辛料对发酵体系产生了影响，也有可能是来源于香辛料本身，有待进一步研究验证。

醇类物质的香气阈值较高，但其对酯类、醛类等风味成分的产生有重要作用，是发酵产品不可或缺的成分[24]。X3 组榨菜样品检测出醇类物质 14 种，总质量分数达到 5 806.90 μg/kg，远高于 X4 组，其能赋予榨菜更多的花香、果香等风味。X3 组榨菜样品中的醇类物质主要为芳樟醇、α-松油醇和 4-萜烯醇，分别呈现出类似香兰气息的甜嫩花香、紫丁香气味和胡椒香气[25-26]。

X4 组榨菜样品仅检出 1，4-二甲氧基丁烷和对丙烯基茴香醚 2 种醚类物质。对丙烯基茴香醚又称茴香脑，呈鲜茴香、甜香、辛香的口感，其对榨菜形成特有的辛香味有重要作用。X3 组榨菜样品中醚类质量分数大幅度增加，总质量分数达到了 4 667.93 μg/kg，其中主要为对丙烯基茴香醚和 4-烯丙基苯甲醚，二者常在茴香、八角等香辛料中检出[27]，因此推测其来源于香辛料中的十三香。

酸类物质是发酵食品形成风味的重要物质，具有维持酯类香气、协调香气的作用，但其在香辛料中质量分数较低[28]。本研究发现，香辛料的添加减少了酸类物质种类，但其总质量分数由

228.46 μg/kg（X4组）增加至1 960.36 μg/kg（X3组），可能是由于香辛料的添加改变了乳酸菌菌群结构，使乳杆菌属成为绝对优势菌株，产酸增加，这与细菌微生物相对丰度研究结果一致。

酯类作为香气骨架成分，主要来源于酸类和醇类的酯化反应[29]，能赋予水果香、花香和甜香[30]。X4组榨菜样品中亚麻酸乙酯和棕榈酸甲酯质量分数较高，占物质总量的70.59%，是其主要酯类物质，与袁美等[31]的研究结果相似。X3组榨菜样品中酯类物质主要为亚麻酸乙酯，还检出了*L*-乳酸乙酯、肉桂酸乙酯、康酯、*α*-乙酸松油酯等10种酯类物质，但未检出棕榈酸甲酯、异丁酸芳樟酯、5,7-辛二烯-1-基酯等8种酯类物质。

烯烃类阈值较低，主要呈现柠檬香和花果香气，对挥发性风味有较大贡献[32]。X4组榨菜样品中检测出2种烯烃类物质，总质量分数仅为11.92 μg/kg，而X3组榨菜样品中增加了*γ*-松油烯、*D*-柠檬烯和反式石竹烯等8种烃类物质，总质量分数高达435.79 μg/kg，可能是因为在乳酸菌和香辛料的共同作用下，榨菜中的烷烃类转化为烯烃类。

在微生物的作用下，酮类可由醇类或酯类降解产生[33]，大多具有清香味和果香味[34]，因其阈值较低赋予香气的能力较强。相较于X4组榨菜样品，X3组榨菜样品的酮类总质量分数增加，且增加了胡椒酮、(−)-宁酮等物质。

X4组榨菜样品的主要酚类物质是苯酚和4-乙基苯酚，与贺云川等[35]研究的坛装风脱水榨菜酚类挥发性成分有差异，可能是榨菜加工方式不同导致的。而X3组榨菜样品增加了丁子香酚、百里酚和甲基丁香酚。

X3组和X4组榨菜样品中的有机硫化物类、醛类和其他类的种类和质量分数相差不大，说明香辛料的添加，对榨菜有机硫化物、醛类和其他类的种类和质量分数影响不大。

表3　榨菜样品中挥发性风味成分的质量分数

Table 3　Mass fractions of volatile flavor compounds in pickled mustard tuber samples

种类	CAS号	保留时间/min	挥发性风味成分	质量分数/(μg/kg)	
				X3组	X4组
酯类	141-78-6	1.891	乙酸乙酯	6.58±0.29	1.93±0.68
	2445-78-5	3.993	2-甲基丁基甲酸酯	—	3.56±0.94
	123-66-0	4.125	正己酸乙酯	6.24±0.80	—
	687-47-8	5.183	*L*-乳酸乙酯	26.31±0.93	—
	97-64-3	5.185	乳酸乙酯	33.38±7.32	5.02±0.73
	106-32-1	5.902	辛酸乙酯	7.79±0.43	6.13±0.59
	3856-05-1	6.847	异丁酸芳樟酯	—	5.28±1.31
	80-26-2	7.703	*α*-乙酸松油酯	9.15±2.24	—
	125-12-2	7.196	乙酸异冰片酯	7.45±1.81	—
	5655-61-8	7.198	左旋乙酸冰片酯	6.74±1.28	—
	110-38-3	7.611	癸酸乙酯	5.50±0.49	7.57±0.57
	150-84-5	7.813	乙酸香茅酯	7.45±1.20	—
	158-16-8	7.967	5,7-辛二烯-1-基酯	—	2.91±0.55
	627-90-7	8.504	十一酸乙酯	—	2.19±0.67
	83-17-9	8.632	丁-3-炔-1-基十三烷基碳酸酯	—	6.14±0.12
	105-87-3	8.652	乙酸香叶酯	20.97±1.86	—
	119-36-8	8.916	水杨酸甲酯	6.61±1.11	3.81±0.78
	103-36-6	9.984	肉桂酸乙酯	16.20±1.08	—
	124-10-7	11.450	十四烷酸甲酯	—	3.61±0.44
	124-06-1	11.955	十四酸乙酯	34.25±1.51	11.69±1.28
	7132-64-1	12.825	十五烷酸甲酯	—	1.71±0.41
	41114-00-5	13.371	十五酸乙酯	12.23±1.19	6.28±1.05
	112-06-1	13.564	庚酯	12.14±1.56	—

续表

种类	CAS 号	保留时间/min	挥发性风味成分	质量分数/(μg/kg)	
				X3 组	X4 组
酯类	112-39-0	14.288	棕榈酸甲酯	—	154.43±1.14
	546-22-4	15.220	9-十六碳烯酸乙酯	9.21±0.48	4.93±0.09
	55682-88-7	16.731	顺式-11,14,17-二十碳三烯酸甲酯	5.36±0.21	—
	111-61-5	17.913	十八酸乙酯	5.67±1.56	3.85±0.58
	58-52-1	18.351	9顺,11反-共轭亚油酸甲酯	19.60±0.99	28.13±1.93
	301-00-8	19.352	亚麻酸甲酯	20.33±1.32	39.79±2.20
	1191-41-9	19.857	亚麻酸乙酯	164.99±3.53	182.63±7.27
醇类	67-63-0	2.627	异丙醇	44.57±3.85	—
	470-82-6	3.927	桉叶油醇	114.04±14.40	—
	3391-86-4	4.942	1-辛烯-3-醇	—	3.85±0.37
	78-70-6	6.849	芳樟醇	4 081.61±65.90	6.16±1.16
	562-74-3	7.341	4-萜烯醇	553.34±21.59	7.80±1.20
	696-71-9	7.390	环辛醇	—	2.55±0.35
	108-93-0	7.663	4-(1-甲基乙基)环己醇	10.76±0.28	—
	98-55-5	8.118	*α*-松油醇	564.93±29.83	4.45±0.30
	106-22-9	8.694	香茅醇	46.48±4.91	—
	106-25-2	9.048	橙花醇	34.39±1.62	—
	1960-12-8	10.251	苯乙醇	29.60±3.16	11.64±0.48
	7212-44-4	11.804	橙花叔醇	150.06±6.16	—
	122-97-4	11.970	3-苯丙醇	25.29±0.56	—
	489-86-1	12.911	桉油烯醇	14.67±1.49	—
	481-34-5	14.425	*A*-毕橙茄醇	12.87±0.50	—
	513-85-9	20.456	2,3-丁二醇	124.29±12.38	—
烯烃类	99-83-2	3.485	水芹烯	10.48±0.60	—
	123-35-3	3.570	月桂烯	8.72±0.38	—
	5989-27-5	3.806	*D*-柠檬烯	155.11±4.10	—
	109-67-1	3.931	1-戊烯	—	8.84±0.69
	80-56-8	4.113	*α*-蒎烯	15.38±1.19	—
	99-85-4	4.235	*γ*-松油烯	90.98±9.51	—
	6753-98-6	7.961	*α*-蛇麻烯	12.81±3.53	—
	99-83-2	8.319	双环倍半水芹烯	8.41±2.59	—
	99-86-5	8.414	*α*-松油烯	121.40±6.58	—
	87-44-5	11.165	反式石竹烯	19.86±1.07	—
	1139-30-6	11.178	氧化石竹烯	10.46±0.60	—
	54324-03-7	16.732	(*Z*,*Z*,*Z*)-十七-1,8,11,14-四烯	3.40±1.13	3.10±0.05
酮类	409-02-9	5.108	甲基庚烯酮	—	1.52±0.21
	471-15-8	5.887	(−)-宁酮	22.20±0.37	—
	546-80-5	6.041	侧柏酮	36.92±2.31	—
	89-81-6	8.446	胡椒酮	53.79±6.49	—
	3796-70-1	9.638	香叶基丙酮	4.47±0.34	10.86±0.62
	14901-07-6	10.592	*β*-紫罗兰酮	—	3.33±0.96
	52978-85-5	11.365	3-亚甲基-1-氧杂螺[4.5]癸-2-酮	9.29±0.41	7.25±0.58
	89-84-9	11.741	2,4-二羟基苯乙酮	10.55±1.64	18.34±2.03
	699-83-2	11.752	2,6-二羟基苯乙酮	10.61±1.63	9.99±1.30

续表

种类	CAS号	保留时间/min	挥发性风味成分	质量分数/(μg/kg)	
				X3组	X4组
酮类	1450-72-2	13.935	2-羟基-5-甲基苯乙酮	—	1.17±0.24
	10422-88-0	17.013	1-(2,5-二羟基-4-甲氧基苯基)乙酮	—	2.85±0.41
	684-16-2	18.294	六氟丙酮	34.32±1.39	—
	19012-02-3	18.437	1-(1-甲基-1H-吲哚-3-基)-1-乙酮	1.81±0.18	7.45±0.49
	1911-78-0	18.652	10ALPHA-羟基日本刺参萜-4-酮	4.87±0.64	—
酸类	144-62-7	4.129	草酸	650.03±31.39	34.64±1.54
	64-19-7	6.135	乙酸	664.91±31.03	65.97±5.57
	63169-61-9	11.607	2-甲基戊酸酸酐	—	13.94±3.67
	560-27-0	20.441	2,2-二羟基丙二酸	70.74±3.78	44.05±2.36
	141-82-2	20.602	丙二酸	574.68±20.73	69.86±2.41
醛类	100-52-7	6.735	苯甲醛	3.26±1.00	4.80±0.36
	122-78-1	7.724	苯乙醛	15.46±2.55	10.21±0.57
	5779-94-2	9.269	2,5-二甲基苯甲醛	7.87±1.98	7.64±1.84
有机硫化物	75-18-3	1.552	二甲基硫醚	2.61±0.34	4.20±0.41
	57-06-7	5.676	异硫氰酸烯丙酯	13.77±0.80	125.92±9.61
	764-49-8	6.113	烯丙基硫氰酸酯	7.60±0.73	12.92±0.12
	3386-97-8	6.161	3-丁烯基异硫氰酸酯	7.63±0.77	12.69±2.35
	2257-09-2	14.358	异硫氰酸-2-苯乙酯	224.22±4.11	188.27±6.81
酚类	108-95-2	11.414	苯酚	—	4.43±0.85
	93-15-2	11.473	甲基丁香酚	27.80±2.51	—
	97-53-0	13.521	丁子香酚	147.96±5.39	—
	123-07-9	13.685	4-乙基苯酚	16.17±2.30	2.99±0.84
	89-83-8	14.227	百里酚	12.84±2.84	—
醚类	13179-96-9	2.019	1,4-二甲氧基丁烷	—	5.92±0.99
	140-67-0	7.921	4-烯丙基苯甲醚	389.88±84.96	—
	104-46-1	9.393	对丙烯基茴香醚	4226.58±159.20	9.55±0.91
	93-16-3	13.740	异丁香酚甲醚	7.25±0.68	—
	487-11-6	14.382	揽香素	16.99±0.87	—
	607-91-0	14.904	肉桂蔻醚	27.22±1.24	—
其他类	126-98-7	3.749	甲基丙烯腈	9.39±0.95	8.51±0.99
	54-11-5	9.798	3-[(2S)-1-甲基吡咯烷-2-基]吡啶	—	3.30±1.40
	94-59-7	9.906	黄樟素	7.19±0.33	—
	140-29-4	10.674	3-甲氧基苯乙腈	2.23±1.01	10.42±4.14
	4229-91-8	11.435	2-丙基呋喃	5.14±0.36	7.14±0.42
	645-59-0	11.833	苯丙腈	5.41±0.36	7.14±0.42
	126-98-7	18.430	1-甲基-3-乙酰吲哚	1.81±0.18	7.42±0.46

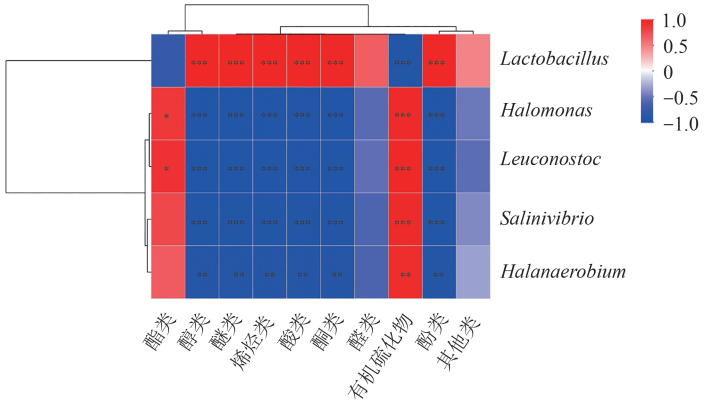
2.5　挥发性风味成分与微生物之间的相关性分析

榨菜挥发性风味成分受原料、微生物和工艺条件等诸多因素的影响，其中微生物对其挥发性风味成分的形成至关重要。为了研究不同微生物与榨菜挥发性风味成分之间的相关性，基于Pearson相关系数分析了各种类挥发性风味化合物与优势微生物菌属(相对丰度排名前5)之间的相关关系，结果如图5所示。乳杆菌属与醇类、醚类、烯烃类、酸类、酮类和酚类呈高度显著正相关(P<0.001)，与有机硫化物呈高度显著负相关(P<0.001)，乳杆菌属对榨菜风味的形成密切相关，这与乌有娜[36]和Tang等[37]的研究结果相符。盐单胞菌属、明串珠菌属和嗜盐菌属与挥发性风味成分相关性一致，均与醇类、醚类、烯烃类、酸

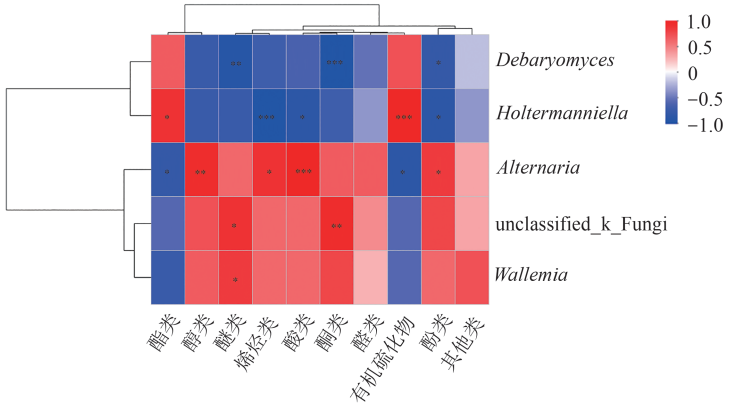
表 4　榨菜样品中各类挥发性风味成分的数量及质量分数

Table 4　Quantity and mass fractions of various volatile flavor components in pickled mustard tuber samples

种类	X3 组		X4 组	
	数量	质量分数/(μg/kg)	数量	质量分数/(μg/kg)
醇类	14	5 806.90±166.64	6	36.45±3.86
醚类	5	4 667.93±264.97	2	9.55±0.91
酸类	4	1 960.36±86.94	5	228.46±15.54
酯类	22	444.16±33.20	20	476.68±22.95
烯烃类	11	457.55±33.55	2	8.84±0.69
酮类	10	188.80±15.39	9	62.76±6.83
醛类	3	26.60±5.53	3	22.65±2.76
有机硫化物	5	255.83±6.75	5	344.00±19.29
酚类	4	204.78±13.08	2	7.42±1.70
其他类	6	87.08±8.01	6	82.70±11.07
总量	84	14 304.21±245.01	60	1 286.94±24.68



(a) 细菌与挥发性风味成分的相关性



(b) 真菌与挥发性风味成分的相关性

*—显著相关(P<0.05);**—极显著相关(P<0.01);***—高度显著相关(P<0.001)。

图 5　榨菜样品优势细菌和真菌与挥发性风味成分的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis between dominant bacterial and fungal taxa and volatile flavor components of pickled mustard tuber samples

类、酮类和酚类呈高度显著负相关（$P<0.001$），与有机硫化物呈高度显著正相关（$P<0.001$）。德巴利氏酵母属作为榨菜的主要优势真菌属，与大部分挥发性风味化合物种类呈负相关，其中与酮类呈高度显著负相关（$P<0.001$），而张芃芃等[25]的研究表明，德巴利氏酵母属与豆瓣酱风味呈正相关，与本研究结果相反，可能与发酵原料、发酵工艺不同有关。节担菌属与醚类呈显著正相关（$P<0.05$）；链格孢属与酸类呈高度显著正相关（$P<0.001$），与醇类极显著正相关（$P<0.01$），与酯类和有机硫化物呈显著负相关（$P<0.05$）。

3　结论

作者基于高通量测序和顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（HS-SPME-GC-MS）技术探明了添加香辛料（辣椒、花椒、十三香）对涪陵榨菜微生物多样性、挥发性风味成分的影响，检测了榨菜总酸、亚硝酸盐和还原糖质量分数等理化特性，并探究了主要优势微生物菌属与挥发性成分种类间的相关性。在微生物多样性方面，对照组细菌优势菌群为乳杆菌属、盐单胞菌属、明串珠菌属等，而香辛料的添加使乳杆菌属成为绝对优势菌群；对照组真菌属水平有4个优势菌群，德巴利氏酵母属为绝对优势菌群，添加香辛料增加了真菌属水平优势菌群数，德巴利氏酵母属占比降低。在挥发性风味方面，相较于对照组，香辛料的添加明显增加了挥发性风味成分总质量分数和种类。理化指标方面，相较于对照组，添加香辛料后，增加了榨菜的酸度和亚硝酸盐质量分数，降低了还原糖质量分数。在相关性分析方面，乳杆菌属、节担菌属和链格孢属与挥发性风味成分相关性较一致，与大部分挥发性风味成分呈正相关，其中，乳杆菌属与醇类、醚类、烯烃类、酸类、酮类和酚类呈高度显著正相关（$P<0.001$）；德巴利氏酵母属、盐单胞菌属、明串珠菌属和嗜盐菌属与挥发性风味成分相关性较一致，与大部分挥发性风味成分呈负相关，其中，部分细菌优势菌属与之呈高度显著负相关（$P<0.001$）。研究结果表明，在榨菜腌制时添加香辛料（辣椒、花椒、十三香）能增加酸度、提高乳酸菌属的相对丰度、增加真菌优势菌群；调控榨菜发酵过程的乳杆菌属、节担菌属和链格孢属的丰度，有助于改善榨菜的风味。

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．
HE Y C，ZHOU B Q，LIU D J．The overview of traditional Fuling Zhacai's processes[J]．Food and Fermentation & Technology，2013，49（4）：57-60．（in Chinese）

[2] 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．
HE S，LIAN Y Y，YANG J X，et al．Research on quality formation of pickled mustard during the process of “three-time pickling and three-time pressing”[J]．Journal of Southwest University（Natural Science Edition），2023，45（4）：219-225．（in Chinese）

[3] 范智义，简称锡，邓维琴，等．川渝地区榨菜中主要营养物质的解析[J]．食品与发酵科技，2021，57（5）：79-86．
FAN Z Y，JIAN C X，DENG W Q，et al．Analysis of main nutrients in pickled mustard in Sichuan and Chongqing[J]．Food and Fermentation Sciences & Technology，2021，57（5）：79-86．（in Chinese）

[4] CHEN A J，LUO W，PENG Y T，et al．Quality and microbial flora changes of radish Paocai during multiple fermentation rounds[J]．Food Control，2019，106：106733．

[5] HONG Y，YANG H S，LI J M，et al．Identification of lactic acid bacteria in salted Chinese cabbage by SDS-PAGE and PCR-DGGE[J]．Journal of the Science of Food and Agriculture，2014，94（2）：296-300．

[6] LIANG H P，ZHANG A，WU Z Y，et al．Microbial community characteristics in industrial matured Chinese Paocai，a fermented vegetable food，from different factories[J]．Food Science and Technology Research，2016，22（5）：595-604．

[7] 李磊．功能性香辛料的最新研究进展[J]．中国调味品，2012，37（4）：5-9，13．
LI L．The new research about functional spices[J]．China Condiment，2012，37（4）：5-9，13．（in Chinese）

[8] 颜伟华，龚鸿萍，叶筱玫，等．5种香辛料的质量风险分析[J]．现代食品，2022，28（23）：224-228．
YAN W H，GONG H P，YE X M，et al．Risk analysis on potential quality problems of five spices[J]．Modern Food，2022，28（23）：224-228．（in Chinese）

[9] 杨淑花，李瑜，吴文江．丁香、八角、生姜对莲藕泡菜感评得分和总酸的影响[J]．包装与食品机械，2018，36（1）：11-15．
YANG S H，LI Y，WU W J．Effects of clove star anise and ginger on the sensory scoring and total acid of lotus root

pickle[J]. Packaging and Food Machinery,2018,36(1):11-15.(in Chinese)

[10] 徐乙银,刘丽婷,谭杰,等. 几种香辛料对四川泡菜品质的影响[J]. 食品与发酵科技,2014,50(1):42-47.
XU Y Y,LIU L T,TAN J,et al. The effects of several kinds of common spices on the qualities of Sichuan pickle [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology,2014,50(1):42-47.(in Chinese)

[11] 孟繁宇,韩兆盛,姚欢,等. 贮藏期间不同杀菌乳风味和理化性质的变化[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(3):38-47.
MENG F Y,HAN Z S,YAO H,et al. Changes of flavour and physio-chemical properties of different sterilized milk [J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(3):38-47.(in Chinese)

[12] 蒋立文,张浩东,覃业优,等. 渥堆期间水分对浏阳豆豉微生物及品质风味的影响[J]. 食品与机械,2024,40(5):11-20,136.
JANG L W,ZHANG H D,QING Y Y,et al. The effects of moisture on microorganisms, quality, and flavor of Liuyang Douchi during the pile fermentation period[J]. Food & Machinery,2024,40(5):11-20,136.(in Chinese)

[13] BOLYEN E, RIDEOUT J R, DILLON M R, et al. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2[J]. Nature Biotechnology,2019,37(8):852-857.

[14] CALLAHAN B J,MCMURDIE P J,ROSEN M J,et al. DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data [J]. Nature Methods, 2016, 13 (7): 581-583.

[15] 吴进菊,李宇昂,王梓杭,等. 襄阳大头菜发酵过程中细菌的多样性[J]. 食品科学,2020,41(4):112-117.
WU J J,LI Y Y,WAMG X H,et al. Bacterial diversity of Xiangyang pickled kohlrabi during fermentation [J]. Food Science,2020,41(4):112-117.(in Chinese)

[16] HE Z,CHEN H Y,WANG X Y,et al. Effects of different temperatures on bacterial diversity and volatile flavor compounds during the fermentation of Suancai, a traditional fermented vegetable food from northeastern China[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118:108773.

[17] XIAO Y S, HUANG T, HUANG C L, et al. The microbial communities and flavour compounds of Jiangxi Yancai, Sichuan Paocai and Dongbei Suancai: three major types of traditional Chinese fermented vegetables[J]. LWT-Food Science and Technology,2020,121:108865.

[18] LIN L J, ZENG J, TIAN Q M, et al. Effect of the bacterial community on the volatile flavour profile of a Chinese fermented condiment red sour soup during fermentation [J]. Food Research International, 2022, 155:111059.

[19] 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-Food Science and Technology,2022,167:113795.

[20] 董玺梅,阮志强,蒋雪薇. 酱香风味传统发酵食品中微生物与风味形成的相关性[J]. 中国食品学报,2022,22(7):397-406.
DONG X M, RUAN Z Q, JIANG X W. Correlation between microbes and flavor development in traditional fermented foods with Jiang-flavor[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 397-406.(in Chinese)

[21] YANG X Z, HU W Z, XIU Z L, et al. Microbial community dynamics and metabolome changes during spontaneous fermentation of northeast sauerkraut from different households [J]. Frontiers in Microbiology, 2020,11:1878.

[22] 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.

[23] 刘江,朱大军,李洪亮,等. SPME/GC-MS分析火锅中常见6种香辛料挥发性成分物质[J]. 中国调味品,2022,47(5):178-182.
LIU J,ZHU D J,LI H L,et al. SPME/GC-MS analysis on volatile components of six common spices in hot pot[J]. China Condiment,2022,47(5):178-182.(in Chinese)

[24] 侯爱香,王一淇,黄晴,等. 自然发酵与人工接种发酵湖南芥菜的挥发性风味组分和品质分析[J]. 食品科学,2018,39(6):237-245.
HOU A X,WANG Y Q,HUANG Q,et al. Comparison of volatile flavor compounds and qualities between naturally fermented and inoculated Chinese leaf mustard (*Brassica juncea* Coss.) grown in Hunan Province,China [J]. Food Science,2018,39(6):237-245.(in Chinese)

[25] 张芃芃,王世乐,陈福生. 蚕豆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.
ZHANG F F,WANG S L,CHEN F S. Correlation of microbial community and volatile flavor components of broad bean paste during fermentation process[J]. China Brewing,2023,42(5):41-49.(in Chinese)

[26] 江雪梅,王锋,周书栋,等. 不同辣椒品种对发酵剁辣椒品质及风味的影响[J]. 中国调味品,2023,48(4):1-6,19.
JIANG X M, WANG F, ZHOU L D, et al. Effects of

different chili varieties on the quality and flavor of fermented minced chili[J]. China Condiment, 2023, 48(4):1-6,19.(in Chinese)

[27] XIAO Z B,CHEN J Y,NIU Y W,et al. Characterization of the key odorants of fennel essential oils of different regions using GC-MS and GC-O combined with partial least squares regression[J]. Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences,2017,1063:226-234.

[28] 曹博雅,蒲丹丹,郑瑞仪,等. 溶剂辅助风味蒸发结合气相色谱-质谱/嗅闻法分析20种辛香型香辛料香气活性成分[J]. 食品科学,2024,45(14):121-132.
CAO B Y,PU D D,ZHENG R Y,et al. Characterization of the aroma-active compounds in 20 pungent spices by solvent-assisted flavor evaporation combined with gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry [J]. Food Science,2024,45(14):121-132.(in Chinese)

[29] 金文刚,赵萍,姜鹏飞,等. 基于GC-IMS技术结合多元统计模型分析不同色泽小米粥挥发性有机物差异[J]. 食品科学,2023,44(6):277-284.
JIN W G, ZHAO P, JIANG P F, et al. Analysis of differential volatile organic compounds in different colored millet porridges by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. Food Science, 2023, 44(6): 277-284.(in Chinese)

[30] 郑文迪,关倩倩,刘长根,等. 基于GC-MS法对比广西地区酸菜和酸笋风味的差异[J]. 食品与发酵工业,2020,46(4):253-257.
ZHENG W D,GUAN Q Q,LIU C G,et al. Comparison of flavors of Suancai and Suansun in Guangxi based on GC-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(4):253-257.(in Chinese)

[31] 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.
YUAN M,HAN Y H,HE K,et al. The changes of aroma components in Zhacai during one-time pickling after mechanical dehydration[J]. Science and Technology of Food Industry,2018,39(23):234-240.(in Chinese)

[32] 刘营营,范莹莹,石佳宁,等. 香辛料对莲藕泡菜挥发性风味成分和理化性质的影响[J]. 轻工学报,2021,36(5):34-41.
LIU Y Y,FAN Y Y,SHI J N,et al. Effects of spices on the volatile flavor components and physical and chemical properties of lotus root kimchi[J]. Journal of Light Industry,2021,36(5):34-41.(in Chinese)

[33] GIRI A,OSAKO K,OKAMOTO A,et al. Olfactometric characterization of aroma active compounds in fermented fish paste in comparison with fish sauce, fermented soy paste and sauce products [J]. Food Research International,2010,43(4):1027-1040.

[34] 谢靓,李梓铭,蒋立文. 接种耐盐植物乳杆菌对不同盐渍程度发酵辣椒挥发性成分的影响[J]. 食品科学,2015,36(16):163-169.
XIE L, LI X M, JIANG L W. Effect of salt-tolerant lactobacillus incubation on volatile components in pickled pepper with different salinities[J]. Food Science, 2015, 36(16):163-169.(in Chinese)

[35] 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.
HE Y C, LI M. Analysing the potted Zhacai's volatile flavor compounds by SDE and GC/MS [J]. China Condiment,2010,35(10):116-119.(in Chinese)

[36] 乌有娜. 酸粥发酵过程中微生物群落及其与风味物质的相关性分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.

[37] TANG Q X, HE G Q, HUANG J, et al. Characterizing relationship of microbial diversity and metabolite in Sichuan Xiaoqu[J]. Frontiers in Microbiology,2019,10:696.