

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.81042

基于 GC-MS 与 16S rRNA 探究糖质量分数对湘西萝卜泡菜风味物质的影响

刘诗美¹ 周映君² 郑志豪² 谢纯良² 苏小军¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中国农业科学院麻类研究所, 湖南 长沙 410205)

摘要: [目的] 为响应健康饮食“减糖”趋势, 探究糖质量分数对湘西萝卜泡菜风味形成的影响。[方法] 设置 10%, 30%, 50% 3 个质量分数糖处理组, 采用 GC-MS 结合 16S rRNA 高通量测序技术, 系统监测发酵过程中代谢物与菌群结构的动态变化。[结果] 促生乳杆菌属 (*Levilactobacillus*) 与乳植杆菌属 (*Lactiplantibacillus*) 为发酵优势菌属, 其中 10% 糖质量分数组中的两者丰度最高 ($P < 0.05$); 发酵后期, 30% 糖质量分数组积累了更丰富的醇类、糖类及有机酸类物质, 风味层次更为协调。PLS-DA 筛选出 16 种关键代谢物, 相关性分析显示两种优势菌属分别与 9 种和 12 种风味物质代谢显著相关。[结论] 适度降低糖质量分数有助于强化菌群功能并促进风味物质合成。

关键词: 发酵蔬菜; 湘西萝卜泡菜; GC-MS; 16S rRNA 测序; 微生物群落

Effect of sugar concentrations on flavor substances in Xiangxi radish pickles based on GC-MS and 16S rRNA

LIU Shimei¹ ZHOU Yingjun² ZHENG Zhihao² XIE Chunliang² SU Xiaojun¹(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2. Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410205, China)

Abstract: [Objective] To explore the effect of sugar concentration on the flavor formation of Xiangxi radish pickles, in response to the "sugar reduction" demand for healthy diets. [Methods] Three sugar treatment groups are set up at the concentrations of 10%, 30%, and 50%. Then, the dynamic changes of metabolites and microbial community structure are systematically monitored during the fermentation process using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with 16S rRNA high-throughput sequencing. [Results] *Levilactobacillus* and *Lactiplantibacillus* are the dominant genera, with the highest abundance observed in the 10% sugar concentration group ($P < 0.05$). In the later fermentation stage, the 30% sugar concentration group accumulates more alcohols, sugars, and organic acids, resulting in a more harmonious flavor profile. According to the partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), 16 key metabolites are identified. Additionally, correlation analysis reveals that the two dominant genera are significantly associated with the metabolism of 9 and 12 flavor substances, respectively. [Conclusion] Moderate reduction of sugar concentration contributes to microbial community function and flavor substance synthesis.

Keywords: fermented vegetable; Xiangxi radish pickle; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); 16S rRNA sequencing; microbial communities

泡菜作为中国饮食文化中的一种传统发酵蔬菜制品, 仍然受到许多消费者青睐。不同地区因其气候、地域和人文等因素差别衍生出不同的泡菜种类, 地处湖南省湘西地区的人们在过去出行不便时采用发酵的方式来保

基金项目: 湖南省青年科技人才项目 (编号: 2022RC1151); 长沙市优秀青年创新人才培养计划 (编号: KQ2106095)

通信作者: 苏小军 (1975—), 男, 湖南农业大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: suxiaojun5606@163.com

收稿日期: 2025-11-06 改回日期: 2026-02-07

引用格式: 刘诗美, 周映君, 郑志豪, 等. 基于 GC-MS 与 16S rRNA 探究糖质量分数对湘西萝卜泡菜风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 36-44.

Citation: LIU Shimei, ZHOU Yingjun, ZHENG Zhihao, et al. Effect of sugar concentrations on flavor substances in Xiangxi radish pickles based on GC-MS and 16S rRNA[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 36-44.

藏时令果蔬,具有消食化胀功效的酸萝卜更博得他们的喜爱。而今湘西萝卜泡菜逐渐成为湖南省代表性的发酵蔬菜制品,因其味道鲜美、营养丰富、风味独特、具有地方特色而闻名^[1]。湘西人通过淘米水泡制萝卜梗酿造酸水,经过多次循环沉淀变成老酸水,湘西萝卜泡菜则以萝卜为主要原料,食盐、糖、辣椒等为辅料,采用老酸水进行发酵,在短时间内得到成熟泡菜^[2]。与四川泡菜、东北酸菜等发酵蔬菜主要作为佐餐食品不同,湘西泡菜多作为休闲食品,且具有较好的市场前景。

目前湘西泡菜大多采用母水发酵工艺,底物浓度(食盐、蔗糖等)直接影响微生物菌群结构及演变从而引起产品风味与品质的差异^[3]。添加糖类底物有3个作用:①为微生物群落提供碳源,启动发酵进程,促进发酵^[4-5];②改善或增加泡菜产品的风味和口感^[6];③形成一定的渗透压抑制有害微生物的活动。外源蔗糖被微生物分解为葡萄糖和果糖,再经微生物作用或酶解转化为丙酮酸,丙酮酸则进一步代谢为有机酸和风味物质。湘西萝卜泡菜传统工艺中糖用量达到原料质量的50%,使泡菜成品可能潜藏着高糖饮食的风险。现代研究^[7]表明,长期摄入高糖食品是导致肥胖、2型糖尿病、心血管疾病以及龋齿等一系列健康问题的重要风险因素。目前有关糖质量分数对泡菜风味品质的研究较少,尤其对湘西萝卜泡菜研究较缺乏,加上人们对健康饮食模式中“减糖”目标的重要关注^[8],研究拟对不同糖质量分数发酵湘西萝卜泡菜的微生物菌群和风味物质进行解析,旨在为湘西萝卜泡菜品质改良和健康化升级提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白萝卜、辣椒、食盐、冰糖、花椒:市售;

氢氧化钠:分析纯,天津恒兴化学试剂制造有限公司;

苯酚、硫酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙酸:纯度99.5%,国药集团化学试剂有限公司;

乳酸:纯度≥98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

琥珀酸:纯度99.5%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

柠檬酸:纯度≥99.5%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

草酸:纯度≥99.6%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

双(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺(BSTFA):含体积分数1%的三甲基氯硅烷(TMCS),美国REGIS Technologies公司;

饱和脂肪酸甲酯(FAMES):德国Dr. Ehrenstorfer

GmbH公司。

1.2 仪器与设备

高速低温离心机:MIKRO 200R型,德国Andreas Hettich GmbH & Co. KG公司;

pH计:FE28型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

高效液相色谱仪:ACQUITY UPLC I-Class plus型,美国Waters Corporation公司;

酶标仪:Multiskan GO 1510型,美国Thermo Fisher Scientific公司;

气相色谱:7890B型,美国安捷伦公司;

质谱仪:5977B型,美国安捷伦公司;

色谱柱DB-5MS(20 m×250 μm×0.25 μm):美国安捷伦公司;

电泳仪:DYY-6C型,北京市六一仪器厂;

酶标仪:FLX800T型,美国Bio Tek公司;

凝胶成像设备:BG-gdsAUTO(130)型,北京百晶生物技术有限公司;

PCR扩增仪:2720型,美国ABI公司;

高通量测序仪:illumina NovaSeq 6000型,美国illumina公司。

1.3 试验方法

1.3.1 湘西萝卜泡菜样品制备 新鲜萝卜清洗干净,削去根须,晾干表面水分,切成6~8 mm厚的萝卜片。将500 g的萝卜放置于坛中,称取适量食盐均匀洒在萝卜表面,待萝卜腌出水后加入花椒、辣椒和质量分数分别为10%(L组)、30%(M组)和50%(H组)的冰糖,最后加入卤水(取自芷江谭氏食品厂),置于25~28 °C的环境下发酵。在发酵4, 12, 24, 48, 72 h时采集泡萝卜酸水。

1.3.2 理化指标测定

(1) pH:采用pH计。

(2) 总酸:按GB 12456—2021《食品安全国家标准食品中总酸的测定》执行。

(3) 总糖:采用苯酚—硫酸法测定。取10 mL EP管,加入1 mL样品,向各试管中添加1 mL质量浓度为5 g/100 mL的苯酚,移取5 mL浓硫酸于试管中,迅速振荡,使反应体系混合均匀。将试管于沸水中放置20 min,流水冷却5 min至常温,在490 nm处测定反应体系的OD值。以无水葡萄糖为标准品,配制0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 mg/mL的无水葡萄糖溶液,按上述步骤进行测定,绘制标准曲线($y=3.984 3x+0.136 6$)。

(4) 有机酸:根据卢宏皓^[9]的方法。

1.3.3 GC-MS测定风味物质

(1) 样品前处理:采用非靶向代谢组对样品中的风味物质进行测定。取样本100 μL于1.5 mL EP管中,加入400 μL预冷提取液(含1 mg/mL核糖醇的甲醇溶液),滴

旋 30 s, 冰水浴超声 10 min。4 °C、12 000 r/min 离心 15 min, 移取 50 μL 上清液于 1.5 mL EP 管中, 每个样本各取 50 μL 混合成质控(QC)样本, 置于真空浓缩器中干燥。向干燥后的代谢物中加入 40 μL 甲氧胺盐试剂, 轻轻混匀后, 放入烘箱中 80 °C 孵育 30 min, 向每个样品中加入 60 μL BSTFA(TMCS 体积分数 1%), 混合物于 70 °C 孵育 1.5 h, 冷却至室温, 向混合的样本中加入 5 μL FAMES(溶于氯仿), 随机顺序上机检测。

(2) GC-MS 检测: 采用 DB-5MS 毛细管色谱柱; 以分流模式(5:1)注射 1 μL 样品; 载气为氦气, 前入口吹扫流量 3 mL/min, 过柱气体流量 1 mL/min; 初始温度 50 °C 保持 1.0 min, 以 8 °C/min 的速度升至 310 °C 并保持 11.5 min; 前进样口温度、传输线和离子源温度分别为 280, 280, 230 °C; 电离电压 -70 eV; 溶剂延迟 7.0 min 后, 以每秒 12.5 个光谱的速率在 *m/z* 20~500 的全扫描模式下采集质谱数据。

(3) 数据处理: 使用 Chroma TOF 软件(V4.3x, LECO)对质谱数据进行峰提取、基线矫正、解卷积、峰积分、峰对齐等分析。对物质定性工作中, 使用了 LECO-Fiehn Rtx5 数据库, 包括质谱匹配及保留时间指数匹配。最后, 将 QC 样本中检出率在 50% 以下或 RSD>30% 的峰去除。

1.3.4 16S rRNA 高通量测序 从 -80 °C 冰箱中取出样本, 8 000 r/min 离心 10 min, 去掉上清液, 留菌体。采用 MagBeads FastDNA Kit for Soil (116564384) (MP Biomedicals, CA, USA) 试剂盒提取核酸, 对抽提完成的 DNA 采用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳进行分子大小判断, 利用 Nanodrop 对 DNA 进行定量。选用细菌 16S rRNA 基因的高度可变的 V3、V4 区用来测序。PCR 扩增选用细菌 16S rRNA V3-V4 区特异性引物, 338F (5'-barcode+ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'), 引物中的“barcode”是一个 7~10 个碱基的寡核苷酸序列, 用来区分同一文库中的不同样品, 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对 DNA 样品进行 PCR 扩增, 扩增结果进行 2% 琼脂糖凝胶电泳, 切取目的片段后用 Axygen 凝胶回收试剂盒回收目的片段。利用 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit

对 PCR 产物在 Microplate reader (BioTek, FLx800) 上进行定量, 然后按照每个样品所需的数据量进行混样。利用美国 Illumina 公司的 TruSeq Nano DNA LT Library Prep Kit 进行文库构建, 对文库进行验证、均一化并混合文库。在 Illumina Novaseq 机器上利用 NovaSeq 6000 SP Reagent Kit(500 cycles) 进行 2×250 bp 的双端测序。

使用 QIIME2 2024.5 版本, 并根据官方教程(<https://docs.qiime2.org/>)进行修改和完善的流程对微生物组生物学信息进行分析。原始序列数据使用 demux 插件进行解码处理, cutadapt 插件进行引物切除, 然后使用 DADA2 插件对序列进行质量过滤、去噪、拼接和嵌合体去除等数据处理。对上述获得的序列按 100% 的序列相似度进行归并, 生成特征性序列 ASVs 以及丰度数据表格。

1.3.5 数据处理及分析 使用 Graph Pad Prism 8.0 和 SPSS Statistics 26.0 软件进行绘图和统计分析, 以 $P<0.05$ 判定数据的差异显著性。代谢组多元统计分析和可视化使用派森诺云平台绘图执行。试验进行 3 次重复, 结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 理化指标

如图 1 所示, 随着发酵时间的延长, 3 个处理组 pH 均显著下降, 发酵 72 h 后 3 个处理组的 pH 差异不显著。与之相反, 发酵泡菜中的总酸质量浓度呈显著上升的变化趋势, 但 H 组的总酸含量显著低于其他组 ($P<0.05$)。可见, 糖质量分数过高会显著抑制乳酸菌的代谢生长。发酵 72 h 时, 所有试验组总糖质量浓度均呈显著降低, 总糖消耗量分别达到 47.38, 40.24, 41.48 mg/mL。同时, 发酵 48~72 h 时, 所有试验组总糖质量浓度变化不显著, 趋于稳定, 表明微生物生长代谢活动变缓, 泡菜已经成熟。

试验样品中共检测到 5 种主要有机酸(草酸、乳酸、乙酸、柠檬酸和琥珀酸)均维持在较高水平 (>5 mg/mL)(见图 2)。在整个监测过程中有机酸总质量浓度呈不断上升的变化趋势, 但不同处理组间的有机酸总量差异不显著。5 种有机酸中, 乳酸和乙酸是萝卜泡菜发酵过程中最主要

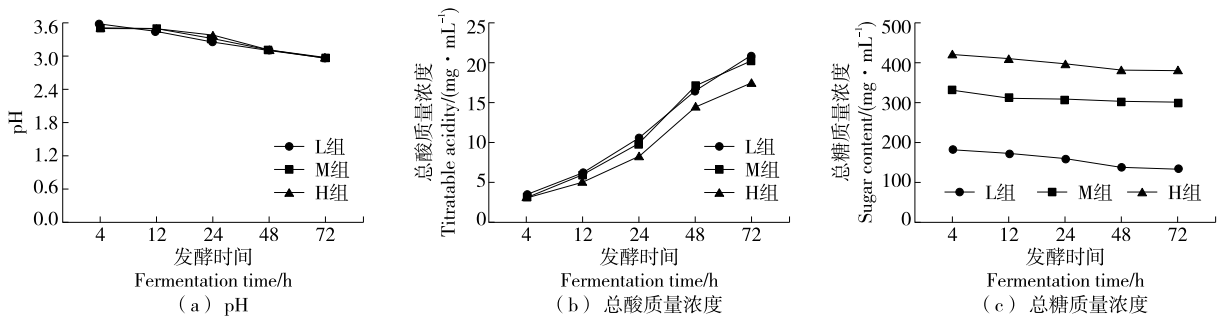


图 1 不同糖质量分数发酵过程中理化指标变化

Figure 1 Physicochemical indicator changes during fermentation processes at different sugar concentrations

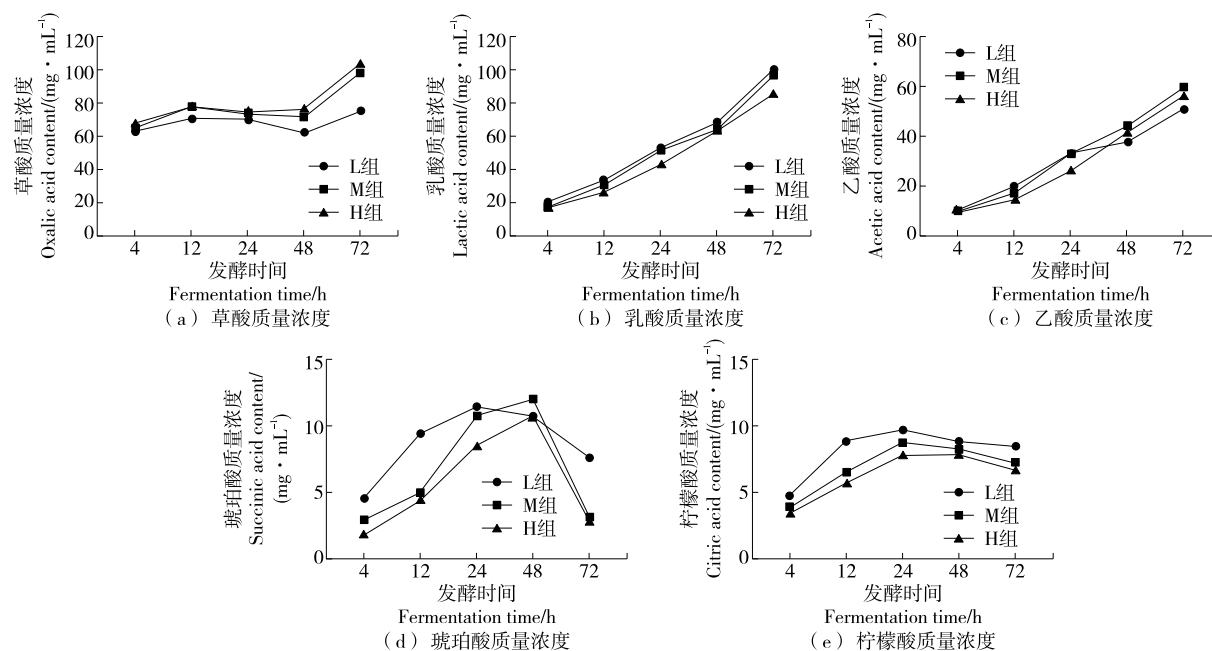


图2 不同糖质量分数发酵过程中有机酸质量浓度变化

Figure 2 Organic acid content changes during fermentation processes at different sugar concentrations

的有机酸,且与环境中的乳酸菌的生长代谢息息相关,在发酵前12 h即有大量乳酸和乙酸产生,说明此时乳酸菌已经开始了代谢反应,且在发酵第72 h时质量浓度最高,此时乳酸和乙酸质量浓度占主要有机酸总质量浓度的55.40%~61.47%。

草酸是新鲜萝卜中含量较高的有机酸^[10],在发酵过程中并未被消耗,且在发酵后期M和H组中草酸含量有较为显著的增加,这可能是有机酸的积累影响了萝卜组织细胞内外的物质交换所致^[11]。柠檬酸、琥珀酸在整个发酵过程中的含量虽然远低于其他3种有机酸,但是它们对酸萝卜风味的形成也有重要的作用。随着发酵的进行,琥珀酸和柠檬酸含量均呈先上升后下降的变化趋势,这可能归因于微生物的代谢作用,先合成了有机酸,随着反应进行有机酸又作为前体物质生成了酸萝卜中的其他风味物质。

2.2 风味物质分析

2.2.1 风味物质化合物的整体概况

采用非靶向GC-MS技术检测不同糖质量分数条件下萝卜泡菜在不同发酵时间点的风味化合物组成。所有样品中共鉴定出45种风味物质,包括醇类3种、酚类3种、糖及其衍生物21种、有机酸及其衍生物15种以及其他化合物3种。在糖类及其衍生物中,*D*-(−)-果糖、2-酮古洛糖酸、甘露醇、山梨醇和葡萄糖在3组处理中的质量浓度均高于15 μg/mL。其中,*D*-(−)-果糖和2-酮古洛糖酸在发酵过程中呈下降趋势,发酵结束时在M组的质量浓度显著高于其他组($P < 0.05$)。*D*-(−)-果糖除直接赋予愉悦的甜味外,还可作为

乳酸菌代谢的底物,参与有机酸及其他风味前体物质的合成;2-酮古洛糖酸可由去氢抗坏血酸分解而成,并进一步转化为苏氨酸和草酸等风味相关化合物^[12]。甘露醇、山梨醇和葡萄糖的质量浓度整体呈上升趋势,前两者甜度分别为蔗糖的70%和60%,共同赋予泡菜清爽甜味,有效平衡酸味与咸味,提升整体风味协调性。在有机酸及其衍生物中,乳酸质量浓度最高($> 25 \mu\text{g/mL}$),琥珀酸次之($> 1 \mu\text{g/mL}$),两者在发酵过程中均持续积累,分别贡献泡菜的主体酸味与醇厚鲜味,且H组中两者的质量浓度均显著低于L组和M组($P < 0.05$)。上述结果表明,适当降低糖质量分数对构成糖类和有机酸类骨架的风味物质积累有显著的正向作用。

对不同糖质量分数发酵湘西萝卜泡菜中的风味物质进行归类,由表1可知,糖类与有机酸类为种类和含量较为丰富的代谢物。这两类物质不仅共同构成泡菜酸甜滋味的主体,也作为关键营养物质和风味前体参与发酵过程。发酵48~72 h时,M组中糖类与有机酸类物质的含量均显著高于H组($P < 0.05$),且两组间醇类物质的含量差异不显著。说明在此关键发酵阶段,适度降低糖质量分数更有利于糖类与有机酸类风味物质的形成与积累,从而使泡菜在趋于成熟时具有更为协调和丰富的风味层次。

2.2.2 PCA分析

为揭示不同处理组湘西萝卜泡菜在不同发酵阶段的样本间差异,采用无监督主成分分析(PCA)进行多元变量统计分析。如图3所示,L组和M组发酵12 h与发酵24 h的样品明显分离,H组发酵12 h与

表 1 不同糖质量分数湘西萝卜泡菜风味物质归类[†]

Table 1 Flavor substances in Xiangxi radish pickles at different sugar concentrations

发酵时间/h	组别	质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)				
		醇类	酚类	糖类及其衍生物	有机酸及其衍生物	其他
12	L 组	7.92±0.22 ^a	0.44±0.01 ^c	334.46±2.39 ^b	42.43±0.94 ^a	19.67±0.76 ^a
	M 组	6.23±0.34 ^b	0.95±0.05 ^b	330.25±5.09 ^b	32.99±0.77 ^b	19.32±1.80 ^a
	H 组	6.79±0.36 ^b	1.62±0.03 ^a	346.70±2.10 ^a	32.99±0.34 ^b	23.27±2.62 ^a
24	L 组	12.56±0.31 ^a	0.53±0.07 ^c	294.13±6.46 ^c	56.00±2.74	22.03±2.52 ^b
	M 组	10.69±0.63 ^b	1.01±0.02 ^b	329.90±2.47 ^b	49.00±0.28	20.90±0.40 ^b
	H 组	12.63±0.16 ^a	1.56±0.03 ^a	386.92±5.28 ^a	49.52±0.51	28.79±2.84 ^a
48	L 组	19.24±2.72	0.49±0.07 ^c	230.21±30.78 ^c	73.36±7.93 ^a	24.92±2.74
	M 组	20.82±0.72	0.97±0.04 ^b	328.16±1.28 ^a	75.67±2.13 ^a	26.93±2.22
	H 组	20.29±0.58	1.15±0.09 ^a	277.65±3.03 ^b	55.30±0.93 ^b	24.05±1.95
72	L 组	29.81±0.96 ^a	0.42±0.01 ^b	223.80±1.73 ^c	77.35±4.32 ^a	23.93±0.30 ^a
	M 组	26.55±1.65 ^{ab}	0.78±0.03 ^a	285.38±5.66 ^a	80.06±3.13 ^a	23.50±1.25 ^a
	H 组	24.43±1.94 ^b	0.93±0.12 ^a	239.49±3.66 ^b	56.64±0.93 ^b	19.03±0.75 ^b

[†] 同一发酵时间字母不同代表存在显著性差异($P<0.05$)。

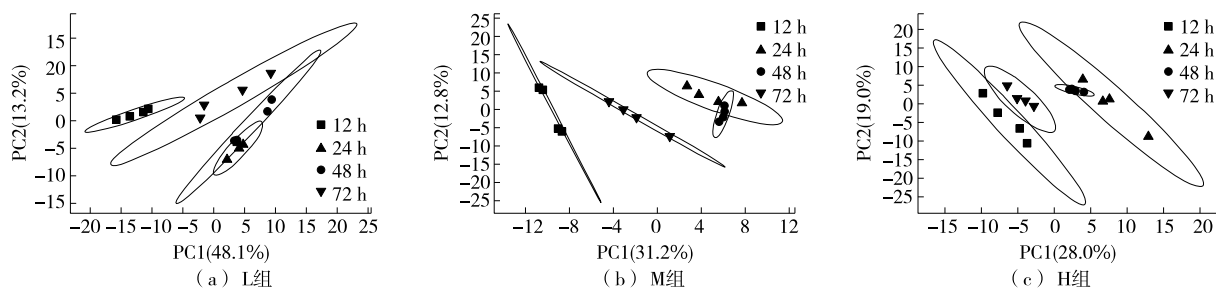


图 3 不同糖质量分数发酵湘西萝卜泡菜代谢物的 PCA 图

Figure 3 PCA plots of metabolites from fermented Xiangxi radish pickles at different sugar concentrations

酵 24 h 的样品有部分重叠,而 3 组处理发酵 48 h 与发酵 72 h 的样品均存在重叠区域。该现象可能源于发酵前期微生物种类丰富、代谢活跃,导致代谢物组成差异显著;随着发酵进程推进,能源物质逐渐消耗、环境酸度上升,抑制部分微生物的生长,群落结构趋于稳定,由优势菌群主导代谢过程,使得代谢物组成整体趋于稳态,泡菜整体风味特征基本形成,产品进入成熟阶段^[13]。

为明晰不同糖质量分数对湘西萝卜泡菜发酵过程中风味代谢物动态变化的影响,对 3 组处理在同一发酵时间点的样品进行 PCA 分析。如图 4 所示,发酵 12 h 时,L 组与 M 和 H 组明显分离;发酵 24 h 时,3 组样品出现部分区域重叠,但仍呈现一定区分趋势;发酵 48 h 后,M 和 H 组间重叠区域较 24 h 阶段减小,且二者均与 L 组进一步分离;发酵结束(72 h)时,各处理组样品在 PCA 图中被清晰区分,形成独立的分布区域。上述结果表明,糖质量分数作为关键环境因子,在发酵过程中推动微生物代谢途径发生分化,导致不同处理组在发酵后期代谢产物组成与

含量呈现显著差异,形成各自独特的代谢轮廓,从而赋予泡菜不同的风味特征。

2.2.3 PLS-DA 分析 基于 GC-MS 检测结果,对不同糖质量分数下湘西萝卜泡菜样品(组内不同发酵时间的总量)进行 PLS-DA 分析,以变量投影重要性(VIP) >1.2 为阈值,共筛选出 3 组处理中共有的 16 种主要代谢物,包括 1 种醇类、2 种酚类、7 种糖及其衍生物和 6 种有机酸及其衍生物,如图 5 所示。醇类物质主要由多不饱和和脂肪酸氧化生成,其中不饱和醇对整体风味的贡献较饱和醇的更为显著^[14]。丙酮醇作为关键醇类物质,呈现黄油、香草、麦芽和木兰等复合香气特征^[15],其含量随糖质量分数升高而下降,M 组的质量浓度显著高于 H 组($P<0.05$)。在酚类物质方面,所有处理组中柚皮苷含量均下降,而对羟基苯丙酸含量上升,推测是由于微生物分泌的水解酶促使柚皮苷去糖基化生成柚皮素,后者进一步转化为对羟基苯丙酸^[16]。柚皮苷属于苦味黄酮化合物^[17],但在该体系中含量较低,对整体风味影响有限;而对羟基苯丙酸可

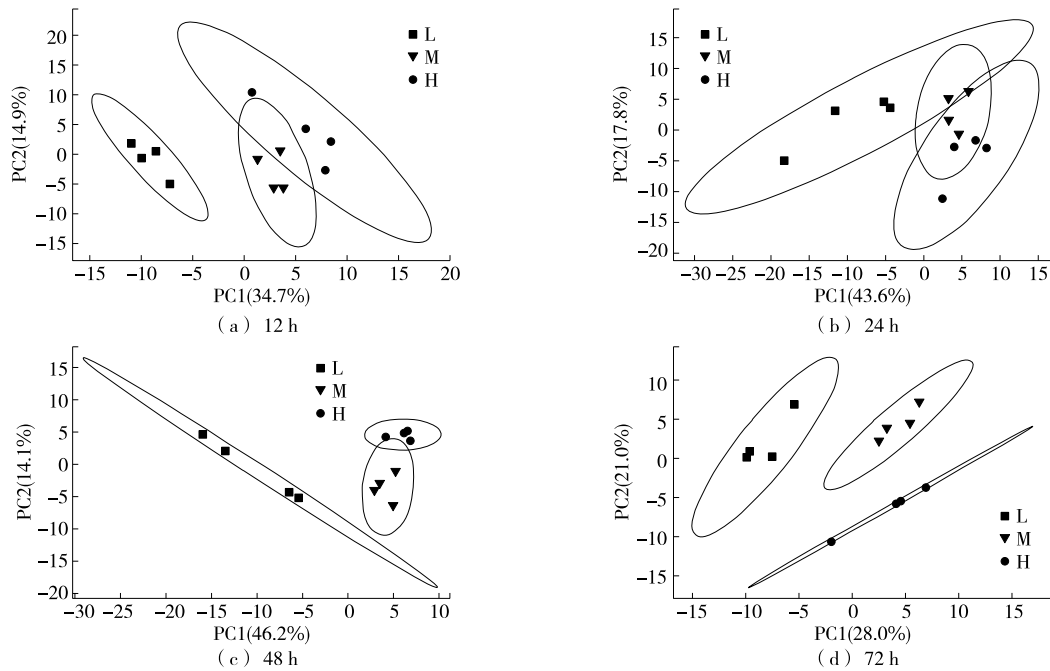


图4 不同发酵阶段的湘西萝卜泡菜代谢物的PCA图
Figure 4 PCA plots of metabolites in Xiangxi radish pickles at different fermentation stages

与乙醇反应生成酚酯类物质(如对羟基苯丙酸乙酯)^[18], 赋予泡菜甜润的花果香气。

糖类及其衍生物是萝卜泡菜中种类与含量最为丰富的风味组分,多数物质能够赋予泡菜甜味或有效掩盖不良气味。在3个处理组中,甘露醇与肌醇在发酵过程中均呈上升趋势,至48 h时,M组中两者的含量显著高于H组($P < 0.05$)。甘露醇甜度约为蔗糖的70%^[19],并可与少量乙酸协同改善发酵蔬菜的口感,对整体风味具有积极贡

献^[20]。肌醇(维生素B₈)作为细胞生长所必需的营养物质,亦呈现清爽甜味。蔗果三糖作为一种功能性低聚糖,具有良好的水溶性与膳食纤维特性,其甜味纯净、清爽,且无后味^[21],有助于提升风味层次。乳糖在发酵体系中是乳酸菌重要的能量来源,其代谢过程中产生的双乙酰等物质能够增强愉悦的发酵香气。发酵结束时,L组乳糖含量最低,该条件下乳糖被更充分地转化为乳酸、乙酸等有机酸,并进一步促进风味物质的生成。部分糖类代谢

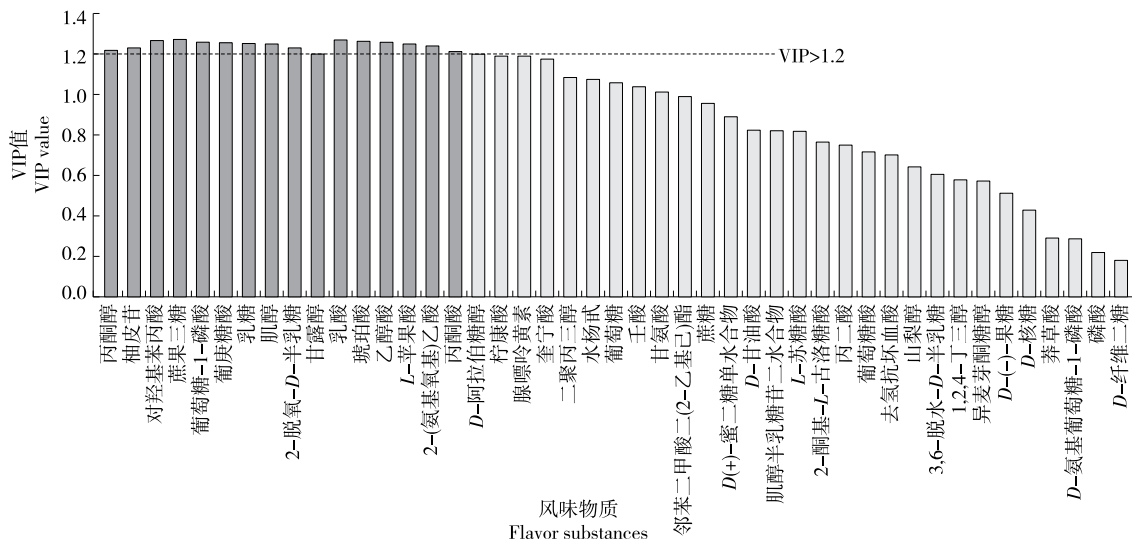


图5 不同糖质量分数发酵湘西萝卜泡菜风味物质的VIP值

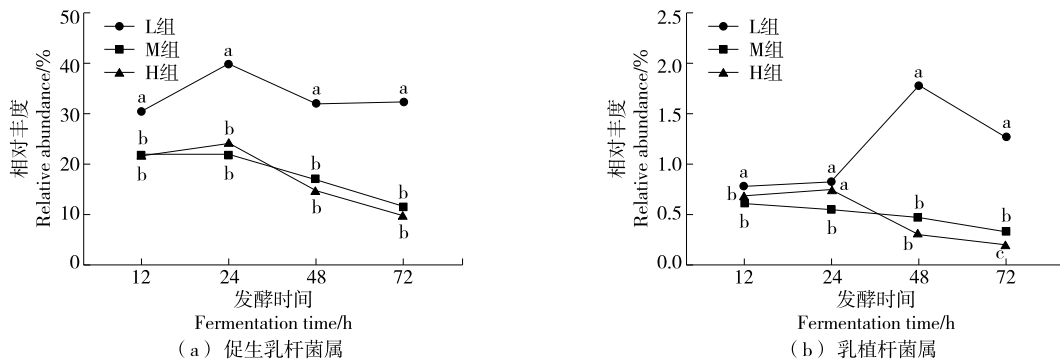
Figure 5 VIP values of flavor substances in fermented Xiangxi radish pickles at different sugar concentrations

中间产物在风味形成中也具有关键作用,例如葡萄糖-1-磷酸由半乳糖转化而来,可进入糖酵解途径最终生成丙酮酸^[22]。发酵中后期,M组中葡萄糖-1-磷酸含量较为稳定,反映出该条件下乳酸菌的半乳糖代谢活跃,为乳酸、双乙酰等风味物质的持续合成提供前体支持,从而促进泡菜风味的复杂化与成熟。

有机酸及其衍生物在泡菜发酵过程中具有重要作用,不仅有助于形成酸性环境以抑制杂菌生长,还能赋予泡菜丰富的酸味层次,并为多种风味物质提供前体。琥珀酸、乳酸、乙醇酸和L-苹果酸的质量浓度在发酵过程中总体呈上升趋势,且在48 h后,L组和M组中这些有机酸含量均显著高于M组($P < 0.05$)。不同有机酸具备不同的风味特征:乳酸酸感强烈但口感柔和;琥珀酸酸味较弱但具鲜味;L-苹果酸酸味爽口并带有苹果香气^[23]。在代谢途径中,外源蔗糖经微生物分解为葡萄糖和果糖,进而通过酶解或微生物作用转化为丙酮酸。丙酮酸作为关键代谢节点,可进一步转化为有机酸、醇类和酯类等挥发性风味物质^[24]。L组中丙酮酸含量最低,其在低糖条件下被更充分地代谢利用。此外,乙醇酸具有抑制甜味并增强酸味感知的作用,因此在发酵结束时,L组和M组泡菜的酸味感知较突出,整体风味更具层次感。

2.3 糖质量分数对湘西萝卜泡菜细菌群落结构的影响

扩增和测序高度保守细菌基因的可变区域,将这些序列与现有数据库进行比较,确定序列可能来自哪些生物体,从而鉴定细菌的种类或构成比例,其中16S rRNA是目前应用最广泛的基因^[25]。对不同糖质量分数萝卜泡菜发酵过程中的样品进行16S rRNA基因测序,3个处理组的微生物群落在发酵期间厚壁菌门(Firmicutes)在门水平上占绝对优势,相对丰度始终 $> 99%$ 。在属水平上,促生乳杆菌属(*Levilactobacillus*)和乳植杆菌属(*Lactiplantibacillus*)为优势菌属。图6展示了两种优势菌属发酵期间的变化趋势,促生乳杆菌属在L组、M组和H组中的相对丰度范围分别为30.49%~32.35%,11.62%~21.94%,9.86%~24.28%。乳植杆菌属的相对丰度明显低于促生乳杆菌属,其在3组处理中的相对丰度均 $< 2%$ 。发酵期间,促生乳杆菌属相对丰度在L组中先上升后下降,后趋于稳定,且始终显著高于M组和H组($P < 0.05$);而M组和H组之间该菌属的相对丰度无显著差异($P > 0.05$),且均表现为先升后降。尽管乳植杆菌属的相对丰度较低,但其在不同糖质量分数处理下表现出明显差异的动态变化,反映出糖质量分数对该菌属生长与代谢的调控作用。



同一发酵时间的字母不同代表存在显著性差异($P < 0.05$)
图6 不同糖质量分数样品中促生乳杆菌属和乳植杆菌属相对丰度变化

Figure 6 Relative abundance changes of *Levilactobacillus* and *Lactiplantibacillus* in samples at different sugar concentrations

综上所述,M组和H组在发酵过程中的优势菌群结构较为相似,而糖质量分数降低至10%可显著提高($P < 0.05$)促生乳杆菌属相对丰度并保持稳定,发酵后期3组处理中乳植杆菌属的相对丰度均呈现显著差异($P < 0.05$),表明适度减糖并未破坏泡菜微生物生态,反而强化了核心优势菌的定植与稳定。

2.4 湘西萝卜泡菜细菌属与差异代谢物质相关性模型分析

进一步基于Pearson相关性分析,研究了16种主要代谢物与前2位微生物属(以相对丰度计)之间的相关性。

如表2所示,促生乳杆菌属和乳植杆菌属分别显著关联9,12种代谢物。其中,促生乳杆菌属与丙酮醇、肌醇呈高度正相关,乳植杆菌属与对羟基苯丙酸、肌醇和乙醇酸呈高度正相关。结合不同糖质量分数下微生物在属水平上的群落结构动态变化可知,优势微生物的代谢活性显著影响部分主要代谢物的合成与积累。在相对较低的糖质量分数条件下,更有利于促进优势菌群的生长与代谢功能,从而增加丙酮醇、肌醇、对羟基苯丙酸、琥珀酸、乙醇酸等风味物质的积累,增强泡菜的甜香与风味层次感;而在高糖质量分数环境下,优势菌属的生长受到抑制,导致上述

表2 基于 Pearson 相关系数的主要代谢物与优势微生物属间的相关性分析[†]

Table 2 Correlation analysis between major metabolites and dominant microbial genera based on Pearson correlation coefficient

主要代谢物	促生乳杆菌属	乳植杆菌属
丙酮醇	0.602 2***	0.471 4**
对羟基丙酸	0.410 8*	0.697 6***
肌醇	0.686 8***	0.832 6***
琥珀酸	0.242 4	0.541 6***
2-(氨基氧基)乙酸	0.094 7	0.414 7*
乙醇酸	0.300 7	0.620 7***
甘露醇	-0.033 2	0.288 2
葡萄糖酸	-0.101 7	0.241 3
乳酸	-0.027 6	0.312 5
L-苹果酸	0.040 6	0.311 0
柚皮苷	-0.540 6***	-0.570 2***
葡萄糖-1-磷酸	-0.683 4***	-0.639 6***
2-脱氧-D-半乳糖	-0.685 5***	-0.650 1***
乳糖	-0.634 5***	-0.623 3***
蔗果三糖	-0.743 1***	-0.632 1***
丙酮酸	-0.690 3***	-0.639 7***

[†] *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$ 。

风味物质和风味前体的合成减少。

3 结论

通过设置不同糖质量分数自然发酵湘西萝卜泡菜,系统分析发酵过程中理化指标、有机酸组成、主要代谢物及细菌群落的动态变化,并探讨优势菌群与主要代谢物之间的相关性。结果表明,10%糖质量分数组中促生乳杆菌属和乳植杆菌属等优势微生物的相对丰度显著高于30%和50%糖质量分数组,而30%与50%糖质量分数组间的菌群结构演替规律较为相似。发酵结束时,糖质量分数为10%、30%、50%的萝卜泡菜中有机酸总量分别为 (247.76 ± 7.74) 、 (264.58 ± 8.70) 、 (255.74 ± 12.62) mg/mL,表明降低糖质量分数并未显著影响有机酸的整体积累。主成分分析显示,发酵48 h与发酵72 h时不同糖质量分数组的样品可有效分离,说明风味代谢物组成存在显著差异;与50%组相比,30%组在发酵48 h后积累了更高含量的醇类、糖及其衍生物以及有机酸类物质,有助于形成更为协调的酸甜口感与风味层次。基于PLS-DA模型进一步识别出16种主要代谢物,且促生乳杆菌属和乳植杆菌属与丙酮醇、对羟基苯丙酸、肌醇等物质呈正相关性。因此,兼顾减糖健康需求与产品风味协调性,建议将湘西萝卜泡菜发酵糖质量分数优化为30%。

参考文献

- [1] 罗鑫鑫. 湘西苗族地区酸食文化研究[D]. 吉首: 吉首大学, 2024: 13-14.
- [2] 蒋姝宁. 湘西酸食文化在美食类纪录片中的呈现研究: 兼谈毕业作品《坛子里的湘西》[D]. 吉首: 吉首大学, 2021: 11.
- [3] LIU Y, YIN C, WANG J, et al. Characterization of the microbial communities and their correlations with volatile flavor compounds and physicochemical factors in Bashang suancai, a traditional Chinese pickle[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1478207.
- [4] SHANG Z X, YE Z, LI M Q, et al. Dynamics of microbial communities, flavor, and physicochemical properties of pickled chayote during an industrial-scale natural fermentation: correlation between microorganisms and metabolites[J]. *Food Chemistry*, 2022, 377: 132004.
- [5] SWAIN M R, ANANDHARAJ M, RAY R C, et al. Fermented fruits and vegetables of Asia: a potential source of probiotics[J]. *Biotechnology Research International*, 2014, 2 014: 250424.
- [6] 刘刚强, 樊淑森, 李嘉瑜, 等. 响应面法优化黄精泡菜制备工艺[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(11): 147-152.
- [7] 魏瑶, 杨刚刚. 高糖饮食偏好形成的分子机制、危害及控糖建议概述[J]. *生物学教学*, 2025, 50(8): 5-8.
- [8] 李晓凡, 门延艳, 莫振憾, 等. 减盐、减油、减糖现状与工作对策[J]. *食品与药品*, 2022, 24(1): 70-73.
- [9] 卢宏皓. 异/同型发酵乳酸菌对酸笋接种发酵的影响[D]. 柳州: 广西科技大学, 2022: 21.
- [10] ZHAO D Y, TANG J, DING X L. Correlation between flavour

- compounds and sensory properties of potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss.) Pickle[J]. Food Science and Technology International, 2007, 13(6): 423-435.
- [11] 胡容. 低盐泡菜后酸化的品质影响及其生物调控[D]. 成都: 四川大学, 2023: 1.
- HU R. Quality effects and biological control of the post-acidification of low-salt Paocai[D]. Chengdu: Sichuan University, 2023: 1.
- [12] 姜丽, 苏伟, 母应春, 等. 基于 GC-TOF-MS 代谢组学研究高度黑糯米酒后发酵阶段代谢差异[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 88-94.
- JIANG L, SU W, MU Y C, et al. Metabolic differences in post-Fermentation stage of high black glutinous rice wine based on GC-TOF-MS metabolomics[J]. Food Science, 2020, 41(14): 88-94.
- [13] 李文亚, 班雨函, 于宏伟, 等. 基于 GC-MS 的低盐虾酱低温发酵过程中代谢组学分析[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 166-174.
- LI W Y, BAN Y H, YU H W, et al. Metabolomic analysis of low-salt shrimp paste during fermentation at low temperature based on gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(8): 166-174.
- [14] WANG L Y, CHEN J, CAI X M, et al. The effects of microencapsulation technology on the flavor quality of *Zanthoxylum* oil based on E-Nose, GC-IMS, and GC-MS[J]. Molecules, 2025, 30(16): 3 366.
- [15] 温锦丽. 软枣猕猴桃不同品种果实酿酒品质及营养评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024: 30.
- WEN J L. Evaluation of winemaking quality and nutrition of different varieties of *Actinidia arguta* fruits[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2024: 30.
- [16] CHEN T B, WU H, HE Y, et al. Simultaneously quantitative analysis of naringin and its major human gut microbial metabolites naringenin and 3-(4'-Hydroxyphenyl) propanoic acid via stable isotope deuterium-labeling coupled with RRLC-MS/MS method[J]. Molecules, 2019, 24(23): 4 287.
- [17] 赵小娜. 狮头柑果实滋味物质特征及苦味形成机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025: 4-5.
- ZHAO X N. The characteristic of taste compounds and the formation mechanism of bitterness in the fruit of Shitougan (*Citrus reticulata* Blanco cy. Manau Gan) [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2025: 4-5.
- [18] 刘静. 山西老陈醋发酵过程酚类化合物组成及其转化网络研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2024: 55.
- LIU J. Research on composition and formation network of phenols during fermentation process of Shanxi aged vinegar [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2024: 55.
- [19] 陈添艳. 自然发酵糟辣椒品质形成机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023: 65.
- CHEN T Y. Research on the quality formation mechanism of naturally fermented zao chili[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023: 65.
- [20] 许建洋. 内蒙古地区酸菜汤中亚硝酸盐、有机酸、挥发性风味物质及细菌多样性特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 6.
- XU J Y. Characteristics of nitrite, organic acid, volatile flavor compounds and bacterial diversity in sauerkraut soup from Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024: 6.
- [21] 林晓. 四种功能性低聚糖对玛德琳蛋糕品质的影响[D]. 济南: 济南大学, 2024: 8-9.
- LIN X. Effects of four functional oligosaccharides on the quality of madeline cake[D]. Jinan: Jinan University, 2024: 8-9.
- [22] 徐天羽, 李震, 颜伟玉, 等. 重构巴斯德毕赤酵母生产 3 种寡糖代谢酶及其对蜜蜂的影响[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(11): 2 286-2 296.
- XU T Y, LI Z, YAN W Y, et al. Production of three oligosaccharide-metabolizing enzymes by reconstituted *Pichia pastoris* and its effect on honey bees (in Chinese) [J]. Scientia Sinica (Vitae), 2025, 55(11): 2 286-2 296.
- [23] 韩奇琴. 贵州风味糟辣椒品质特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024: 26.
- HAN Q Q. Study on the quality characteristics of Guizhou-style fermented zao pepper[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024: 26.
- [24] 赖慧婷, 刘伟, 罗艺璇, 等. 发酵芥菜中微生物多样性及风味研究进展[J]. 食品工业, 2025, 46(3): 247-252.
- LAI H T, LIU W, LUO Y X, et al. Advances in research on microbial diversity and flavor substances in fermented mustard [J]. The Food Industry, 2025, 46(3): 247-252.
- [25] DI BELLA J M, BAO Y G, GLOOR G B, et al. High throughput sequencing methods and analysis for microbiome research[J]. Journal of Microbiological Methods, 2013, 95(3): 401-414.