

添加红曲米对发酵萝卜品质及挥发性风味的影响

陆华瑜, 罗蓂欣, 李圣胜, 毛瑞丰

Effect of Adding Red Yeast Rice on the Quality and Volatile Flavor of Fermented Radish

LU Huayu, LUO Liuxin, LI Shengsheng, and MAO Ruifeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100225>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

罗伊氏乳杆菌对发酵鱼糜挥发性风味物质的影响

Effect of *Lactobacillus reuteri* on Volatile Flavor Compounds of Fermented Surimi

食品工业科技. 2021, 42(12): 240-245 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070234>

酵母发酵对米糠挥发性风味物质及营养特性的影响

Effect of Yeast Fermentation on Volatile Flavor Substances and Nutritional Properties of Rice Bran

食品工业科技. 2023, 44(22): 266-274 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010169>

植物乳杆菌与酿酒酵母混合发酵对红枣酒挥发性风味物质的影响

Effects of Mixed Fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* on Volatile Flavor Compounds of Jujube Wine

食品工业科技. 2023, 44(8): 170-179 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070043>

剁椒萝卜后熟期微生物多样性与风味品质分析

Analysis of Microbial Diversity and Flavor Quality of Chopped Pepper Radish in Post-ripening

食品工业科技. 2023, 44(19): 128-139 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120232>

不同乳酸菌发酵对浓缩梨汁营养物质及挥发性风味物质的影响

Influence of Different Lactic Acid Bacteria Fermentations on the Nutritional Substance and Volatile Flavor Compounds of Concentrated Pear Juice

食品工业科技. 2024, 45(23): 84-93 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120013>

食用菌粉对猪肉肠冷藏过程中品质及挥发性风味物质的影响

Effects of Edible Fungi on Pork Intestine Quality and Volatile Flavor Compounds during Cold Storage

食品工业科技. 2023, 44(13): 356-366 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080094>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陆华瑜, 罗臻欣, 李圣胜, 等. 添加红曲米对发酵萝卜品质及挥发性风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 14–24. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100225

LU Huayu, LUO Liuxin, LI Shengsheng, et al. Effect of Adding Red Yeast Rice on the Quality and Volatile Flavor of Fermented Radish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 14–24. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100225

· 特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康 (客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡) ·

添加红曲米对发酵萝卜品质及挥发性风味的影响

陆华瑜, 罗臻欣, 李圣胜, 毛瑞丰*
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 为探究红曲米对发酵萝卜品质的影响, 以未添加红曲米的发酵萝卜作为对照, 对发酵过程中微生物数量、pH、总酸、色差、亚硝酸盐、还原糖、有机酸和挥发性风味物质的动态变化规律及差异进行分析。结果表明, 添加红曲米的发酵萝卜的 pH 较对照组下降快, 总酸含量高。在有机酸含量上, 添加红曲米后发酵过程的总有机酸含量均高于对照组, 乙酸及乳酸含量处于上升趋势且含量明显高于对照组。总色差值与对照组存在差异性 ($P<0.05$), 红曲米添加后使得发酵萝卜的颜色变红。在挥发性风味物质上, 两组样品共检测出 132 种挥发性风味物质, 醇类化合物 19 种, 酯类化合物 51 种, 酚类化合物 3 种, 酮类化合物 6 种, 醛类化合物 21 种, 醚类 4 种及其他化合物 28 种。通过 OPLS-DA 分析得到 12 种差异化合物 (VIP 值 >1 , $P<0.05$), 包括 3 种醇类, 8 种酯类和 1 种硫化物, 其中贡献花果香风味的酯类差异化合物在添加红曲米发酵组相对含量较高。研究结果揭示了红曲米对发酵萝卜品质及挥发性风味具有重要作用, 值得进行更深入的研究以促进红糟酸产业的开发与推广。

关键词: 红曲米, 发酵萝卜, 挥发性风味物质, 品质变化

中图分类号: TS255.54

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)17-0014-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100225

本文网刊:



Effect of Adding Red Yeast Rice on the Quality and Volatile Flavor of Fermented Radish

LU Huayu, LUO Liuxin, LI Shengsheng, MAO Ruifeng*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The dynamic change patterns and differences of the microbe counts, pH, total acid, color difference, nitrite, reducing sugar, organic acid, and volatile flavor substances during fermentation were analyzed using fermented radish without the addition of red yeast rice (RYS) as a control in order to examine the impact of RYS on the quality of fermented radish. The findings demonstrated that the total acid content was significantly higher, and the pH of fermented radish with RYS decreased more rapidly compared to the control group. After adding RYS, the fermentation group exhibited a higher total organic acid content than the control group, with significantly greater amounts of acetic and lactic acid. Additionally, the total color difference value differed from that of the control group ($P<0.05$), and the addition of RYS turned the fermented radish red. In the two groups, 132 volatile flavor substances were detected, comprising 19 alcohols, 51 esters, 3 phenols, 6 ketones, 21 aldehydes, 4 ethers, and 28 other compounds. Twelve differential compounds (VIP value >1 , $P<0.05$) were obtained by OPLS-DA analysis, including 3 alcohols, 8 esters, and 1 sulfide, among which the ester differential compounds contributing to the floral and fruity aroma flavor were relatively higher in the red yeast rice-added fermentation group. The results reveal that red yeast rice plays an important role in the quality and volatile flavor of

收稿日期: 2024-10-21

作者简介: 陆华瑜 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: 1097300974@qq.com。

* 通信作者: 毛瑞丰 (1964-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物学、生物化学, E-mail: 798275038@qq.com。

fermented radish, and it is worthwhile to carry out more in-depth studies to facilitate the development and promotion of red vinasse acid.

Key words: red yeast rice; fermented radish; volatile flavor compounds; quality changes

发酵蔬菜是我国传统的发酵食品,可分为自然发酵和人工接种发酵两种发酵方式。因原材料及制作工艺的差异,形成了各具特色的发酵蔬菜制品,主要包括东北酸菜、四川泡菜、涪陵榨菜、江西腌菜等^[1]。其中,红糟酸是通过接种红曲米发酵蔬菜的特色食品,作为广西武宣县著名的传统美食,有着悠久的历史。红糟酸添加的红曲米是以米饭(大米经清洗后蒸煮)、红糟种(红曲霉)为原料,经混合搅拌、三次发酵和三次清洗制成的饭粒松软、色泽紫红的大米发酵制品^[2],当地人也称之为红糟。将红曲米与不同的蔬菜如生姜、豆角、芥头、空心菜梗、辣椒等蔬菜进行发酵即可做成各种样式的红糟酸制品,具体做法为在泡菜坛中先放入一层红曲米后往上面放入一层蔬菜,如此循环直至将泡菜坛填满,期间加入食盐以及米酒等辅料进行调配,两周后即可发酵成熟,颜色鲜艳,味道酸咸可口,具有红糟酸特有的香味以及口感,能够解腻开胃,深得当地居民的喜爱。萝卜是发酵蔬菜制品常见的原料之一,但在红糟酸制品中较为少见,因此本实验以萝卜为原料可以丰富红糟酸产品类别,并以此为基础分析研究红糟酸制品进而提升产品品质。

微生物对发酵蔬菜制品的品质至关重要,是直接影响泡菜的风味和口感的关键因素,其代谢产物是泡菜独特风味的重要来源,传统发酵蔬菜主要依赖细菌、酵母和霉菌等多种微生物协同发酵,它们通过产生酶以及其他物质改变发酵蔬菜的色泽和质地,同时它们参与碳水化合物、氨基酸、脂质和硫代葡萄糖苷代谢形成了发酵蔬菜的特征风味^[3]。红曲米中的红曲霉及其次生代谢产物作为一种天然的外源食品添加剂,被广泛应用于茶、酒、肉类、调味品等行业中,生产出了特色的普洱茶、酱油、黄酒、腊肉等一系列功能食品^[4]。其中,红曲霉发酵的红腐乳色泽枣红、滋味鲜美、质地细腻^[5],红曲色素作为天然着色剂具有防腐抗氧化的作用,在改善肉类色泽的同时,可减少亚硝酸盐的含量^[6],红曲霉在酒类发酵中可以发挥较好的糖化与酯化作用,产生一系列酯类化合物,在酒类产生丰富的香味物质的同时,促进酒体醇厚、细腻口感的形成^[7]。近几年红曲霉产生的功能性代谢产物洛伐他汀、 γ -氨基丁酸已成为研究的热点,在茶、调味品等行业得到广泛应用^[8-10],然而目前利用红曲霉发酵蔬菜制品的研究较少,对于红曲米发酵蔬菜的品质影响还未明晰。

因此本次实验通过对比添加红曲米发酵萝卜中的微生物指标、理化品质及挥发性风味物质的情况,分析红曲米对发酵萝卜品质的影响以及应用红曲米改善发酵蔬菜品质的可能性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

萝卜、食盐 西乡塘大康汇超市;红曲米 广西武宣县东门塘市场;米酒 酒精度 22%vol,京岛米酒企业店;草酸、D-苹果酸、L-乳酸、乙酸、柠檬酸 上海源叶生物科技有限公司;MRS 培养基、PDA 培养基、亚铁氰化钾、乙酸锌、硼砂、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、亚硝酸钠、磷酸、磷酸二氢钾、DNS 试剂、氯化钠、氢氧化钠标准溶液、3,5-二硝基水杨酸等 广西南宁壹棵松生物科技有限公司。

Infinite M200PRO 光栅型多功能微孔板检测仪 奥地利 TECAN 公司;E2695 高效液相色谱仪 美国 WATERS 新加坡公司;BPMJ-250F 霉菌培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;SENTRYSH-750 生化培养箱 上海精宏实验设备有限公司;LX-B50L 型立式自动电热压力蒸汽灭菌锅 合肥华泰医疗设备有限公司;PHS-3S 型精密 pH 计 上海雷磁仪器精密科学仪器有限公司;SW-CJ-1D 单人单面垂直净化工作台 苏州净化设备有限公司;CM-3600A 型分光测色计 日本 Konica Minolta 公司;7890B/5977A(+ODP3)气质联用仪(含有套嗅觉识别器) 安捷伦科技(上海)有限公司;57328-U 型固相微萃取纤维头 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 发酵萝卜泡菜制作 参考于兰^[11]的研究及前期预试验,将新鲜萝卜洗净后切分成 2.5 cm \times 2.5 cm 块状,放置热风干燥箱于 60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 150 min,按配方(萝卜 225 g、红曲米 100 g、食盐 10 g、辣椒 10 g、米酒 200 g)混匀后装入泡菜坛中,于 35 $^{\circ}\text{C}$ 下密封发酵 11 d。HZ 组为接种红曲米发酵萝卜泡菜,以未接种红曲米发酵萝卜泡菜为对照组(KB 组),发酵工艺与 HZ 组相同。取发酵 0、1、3、5、7、9、11 d 时的萝卜样品进行测定。

1.2.2 微生物计数 乳酸菌数的测定:参考 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》。

红曲霉的测定:参考 GB 4789.15-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》。

1.2.3 理化指标测定 pH 测定:采用数字 pH 计,用 pH4.00 和 pH6.86 标准缓冲溶液校准;取 5 mL 泡菜液于 10 mL 离心管中,pH 计测定样品发酵过程的 pH。

总酸测定:参考 GB/T 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的酸碱滴定法。

还原糖含量的测定:参照 SHAO 等^[12]的研究并

作修改,精确称取 10.00 g 泡菜,经过研磨后加入 50 mL 蒸馏水混匀,置于 80 °C 水浴锅中加热 30 min,待冷却后定容 100 mL。过滤后取 2.0 mL 滤液至 25 mL 刻度试管中,再加入 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸于沸水浴中加热 5 min,立即冷却至室温后定容摇匀,在 540 nm 处测定吸光度,同时用葡萄糖标准溶液制备标准曲线($y=3.275x-0.0086$, $R^2=0.9987$),计算样品还原糖含量。

亚硝酸盐的测定:参照 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》中分光光度法测定。

色差测定:将发酵结束后的萝卜利用校准后的色差仪进行色度测定,记录亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*),并按照公式(1)计算总色差 ΔE^* 。 ΔE^* 值表示发酵萝卜与新鲜萝卜之间的色差值。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_x^* - L_0^*)^2 + (a_x^* - a_0^*)^2 + (b_x^* - b_0^*)^2} \quad \text{式 (1)}$$

式中:0 和 X 分别代表新鲜样品和发酵样品。

1.2.4 有机酸测定 有机酸的提取:参考王芮东等^[13]的方法并作修改,称取 5 g 已切碎混匀的萝卜泡菜,用超纯水定容至 50 mL,超声 20 min,过滤后取滤液在 10000 r/min 条件下离心处理 10 min,上清液经 0.22 μm 滤膜过滤后直接进样。

色谱条件:色谱柱 ZORBAXSB-C18(5 μm , 4.6 \times 250 mm);紫外检测器 210 nm;柱温 30 °C;流速 0.8 mL/min,进样体积 10 μL 。流动相配比(0.01 mol/L 磷酸二氢钾溶液:甲醇=98:2, V/V),磷酸调 pH 至 2.5。5 种有机酸(草酸、D-苹果酸、L-乳酸、乙酸、柠檬酸)标准品作为外标,以保留时间定性,峰面积定量,测定有机酸的含量。

1.2.5 挥发性风味物质测定 取发酵过程 0、1、3、5、7、9、11 d 的萝卜泡菜进行挥发性成分的测定。样品处理:参考李俊建等^[14]的方法并作修改,将不同发酵时间的样品粉碎后,分别称取 2.5 g 放置于 20 mL 顶空进样瓶中,密封,于 60 °C 水浴锅中平衡 20 min,将老化后的萃取头插入顶空瓶中顶空吸附 30 min,插入 GC-MS 进样口,250 °C 解吸 5 min。

GC 条件:色谱柱:VF-WAX ms60 m;载气 He;升温程序:50 °C 保持 0 min,以 10 °C/min 升至 160 °C 保持 1 min,以 5 °C/min 升至 250 °C,保持 5 min;进样口温度为 250 °C;进样方式为不分流进样,流速为 1.0 mL/min。MS 条件:电子电离源(EI);电子能量 70 eV;离子源温度 230 °C;接口温度 250 °C;质量扫描范围 m/z 33~550。

定性定量方法:由 GC-MS 得到的谱图,在美国国家标准与技术研究院 NIST2004 标准谱库的检索及标准品比对,保留匹配度大于 75% 的鉴定结果。采用保留指数并结合文献报道进行物质的定性分析,使用面积归一化法进行物质的相对定量。

$$RI = 100n + 100 \times \frac{t_{R_x} - t_{R_n}}{t_{R_{n+1}} - t_{R_n}} \quad \text{式 (2)}$$

式中:RI 为保留指数;n 为正构烷烃的碳原子数; t_{R_n} 和 $t_{R_{n+1}}$ 分别代表碳数为 n、n+1 的正构烷烃的保留时间(min); t_{R_x} 为被测组分的保留时间(min)。

1.3 数据处理

两组样品每种处理设 3 组平行,采用 Excel 2019 对实验数据进行运算和分析,采用 Origin2024 软件进行绘图,并用 SPSS20.0 软件分析数据之间的差异显著性,主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘分析(OPLS-DA)采用 SIMCA14.1 进行作图。

2 结果与分析

2.1 发酵过程中乳酸菌及红曲霉数量变化

为确定红曲米中的红曲霉对萝卜泡菜微生物数量的影响,对两组发酵萝卜发酵过程中的乳酸菌和红曲霉进行测定,结果见图 1。由图 1A 所示,HZ 组在发酵过程中乳酸菌数量均显著性高于 KB 组($P < 0.05$),其中,KB 组乳酸菌在发酵过程中缓慢生长,在第 9~11 d 时生长较快,这可能是由于使用米酒腌制萝卜,发酵初期对环境的微生物生长有一定的抑制作用,后期由于乳酸菌经过长时间的乙醇胁迫,菌种进入适应机制,提高菌的耐受性从而影响乳酸菌生长速率,乳酸菌不断生长繁殖,因此数量上升^[15]。发酵 11 d 时,KB 组乳酸菌数量约为 6.40 ± 0.16 lg CFU/mL,而 HZ 组则约为 10.59 ± 0.27 lg CFU/mL,总体均呈现先

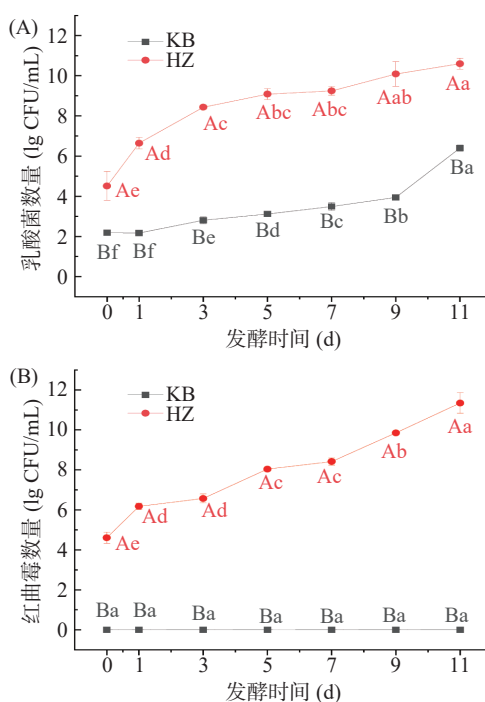


图 1 KB 与 HZ 组在发酵过程中乳酸菌(A)和红曲霉(B)数量变化

Fig.1 Quantitative changes of lactic acid bacteria (A) and *Monascus purpureus* (B) during the fermentation process in KB and HZ

注:不同大写字母表示组间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同发酵时间下组内差异显著($P < 0.05$),图 2、图 3 同。

上升后趋于稳定的趋势,这是因为发酵前期萝卜和红曲米为乳酸菌生长提供了丰富的营养物质,使得乳酸菌大量生长繁殖,而后期由于营养物质的消耗以及乳酸的大量积累使其生长受到抑制,因此含量趋于稳定。

如图 1B 所示, HZ 组红曲霉数量均显著高于 KB 组($P<0.05$), HZ 组红曲霉发酵前期缓慢上升,发酵中后期稳步上升,到发酵 11 d 时约 11.34 ± 0.52 lg CFU/mL, 而 KB 组在整个发酵过程中均没有出现红曲霉。对 HZ 组来说,接种了约 18% 的红曲米发酵萝卜,故初始红曲霉数量丰富。在发酵前期,由于酒精度限制红曲霉的生长,后期随着乳酸菌等微生物生长产酸,发酵体系酒精浓度降低及微生物代谢产生的各种丰富的营养物质创造了良好的发酵环境使得红曲霉稳步生长^[16]。

结合图 1A 和图 1B 可知,添加红曲米有利于乳酸菌的生长,乳酸菌及红曲霉是红糟酸的重要微生物,在发酵过程中发挥着重要作用。李洋等^[17]在研究武宣红糟酸发酵过程的微生物群落变化过程中也表明了红曲霉是真菌中主要优势菌属,且随着发酵时间的延长逐渐上升;乳酸杆菌属则为细菌中的优势菌,在发酵前中期含量迅速上升至峰值后缓慢下降,是发酵后期的主导菌属。

2.2 发酵过程中 pH 及总酸变化

pH 和总酸影响微生物群落的生长和代谢,是泡菜发酵过程中必不可少的指标^[18]。添加红曲米发酵萝卜过程中 pH 和总酸的变化情况如图 2 所示。由图可知,随着发酵的进行, HZ 组的 pH 均呈先快速下降后缓慢下降的趋势。KB 组的 pH 在第 0~9 d 缓慢下降后,在 11 d 快速下降至 3.57 ± 0.04 , KB 组的 pH 从发酵第 1~11 d 始终显著高于 HZ 组($P<0.05$),发酵 11 d 时 pH 为 3.31 ± 0.01 ;两组的总酸含量随着发酵的进行均逐渐升高,第 11 d 时,KB 组及 HZ 组的总酸含量分别为 2.31 ± 0.17 、 4.68 ± 0.13 g/kg。其中,KB 组的总酸含量在发酵过程中一直低于 HZ 组,发酵结束后 KB 组显著低于 HZ 组($P<0.05$)。这可能是由于发酵前期 KB 组乳酸菌数较少,产酸能力弱;且发酵过程中 HZ 组乳酸菌含量均高于 KB 组,产酸能力较强。苑建伟等^[19]研究红曲霉的发酵特性

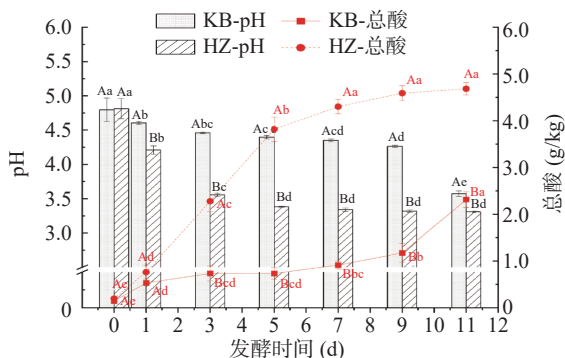


图 2 发酵过程中 pH 和总酸的变化

Fig.2 Changes in pH and total acid during the fermentation

表明红曲霉菌在温度 30 °C、pH6.0、酒精度 7%、糖度 10% 的条件下产酸能力强,本实验的发酵条件较为符合红曲霉产酸要求,因此 HZ 组总酸含量高。结果表明,添加红曲米能提高萝卜发酵过程的产酸能力,使萝卜泡菜发酵成熟时间缩短。

2.3 发酵过程中还原糖变化

还原糖的变化能够反映蔬菜发酵过程中微生物的生长代谢情况,由图 3A 所示,KB 组的还原糖含量在发酵过程中缓慢下降,这可能是由于发酵前期微生物数量少,且样品采用米酒进行腌制,对微生物生长存在抑制作用,因此还原糖的消耗较少。随着发酵的进行,微生物利用还原糖不断生长繁殖,从而导致还原糖含量逐渐降低。而 HZ 组的还原糖含量均显著高于 KB 组($P<0.05$),且没有较明显的变化趋势,这可能是由于一方面 HZ 组添加的红曲米是以大米为基质,淀粉含量高,红曲霉菌产生的淀粉酶、糖化酶等水解淀粉从而使得还原糖含量增高^[20];另一方面,微生物在发酵过程中需要以还原糖作为碳源,还原糖含量下降。所以 HZ 组的还原糖含量一直处于动态变化中。

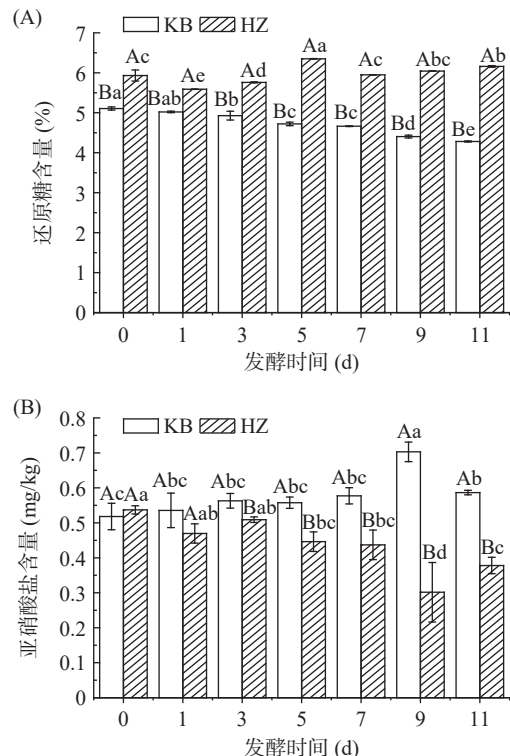


图 3 发酵过程中还原糖(A)及亚硝酸盐(B)含量变化
Fig.3 Changes of reducing sugar (A) and nitrite contents (B) during fermentation process

2.4 发酵过程中亚硝酸盐变化

蔬菜发酵过程中会产生亚硝酸盐积累的问题,是影响消费者的身体健康的安全问题。亚硝酸盐产生的原因主要是在蔬菜发酵初期,乳酸菌处于繁殖阶段,酸性环境尚未形成,来自蔬菜和腌制器具的有害菌会迅速繁殖,例如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等杂菌具有很强的硝酸还原能力,引起亚硝酸盐含量上

升^[21]。由图 3B 可知,两组样品在整个发酵过程中亚硝酸盐含量处于较低水平,不超过 1 mg/mL,且没有明显的“亚硝峰”出现。这可能是由于发酵采用了 22%vol 的米酒进行腌制,对杂菌起到了抑制生长的作用,有研究指出^[22],白酒的加入在发酵初期能够有效抑制肠杆菌、真菌、细菌这些有害菌的生长从而使有害菌的代谢减少,同时也有利于后期乳酸菌的发酵降低亚硝酸盐的生成,但白酒浓度太高会抑制乳酸菌的生长。HZ 组在发酵第 3~11 d 亚硝酸盐含量显著低于 KB 组($P<0.05$),这可能是由于红曲霉对降解亚硝酸盐有一定的作用^[23],此外,红曲米的添加带来了丰富的糖类物质,有研究^[24]表明含糖量与亚硝酸盐含量也存在一定的联系,由于蔬菜的发酵作用与含糖量成正比,含糖量高,发酵产酸较多,发酵过程中亚硝酸盐含量低,这也与试验中 HZ 组的亚硝酸盐含量低于 KB 组的情况一致。由此可知添加红曲米发酵蔬菜对降低亚硝酸盐的含量有一定的作用,能够有效提高红糟酸的安全性。

2.5 发酵过程中的色差变化

色差值可以评判样品外观颜色变化程度,诱人的色泽能够提高泡菜的感官品质,起到吸引消费者的视觉效果,对其品质的提升有积极影响。表 1 为发酵第 11 d 的色泽变化,KB 组与 HZ 组的亮度值 L^* 没有显著差异($P>0.05$),表明两组之间的亮度相近;KB 组的红绿值 a^* 显著低于 HZ 组($P<0.05$),HZ 组的 a^* 值为正值,KB 组为负值,表明 HZ 组的萝卜较红,而 KB 组则偏绿。KB 组的黄蓝值 b^* 显著低于 HZ 组($P<0.05$),KB 组和 HZ 组的 b^* 值均为正值,表明两组样品均偏于黄色,但 HZ 组的黄色要比 KB 组程度深。两组的色差变化值 ΔE^* 也存在显著差异,且 KB 组显著低于 HZ 组($P<0.05$)。由于 HZ 组添加红曲米进行发酵,红曲米中的红曲色素是红曲霉发酵产生的一种聚酮化合物色素,主要含黄色素、红色素与橙色素,从而改变了发酵萝卜泡菜的颜色^[25]。红曲色素作为一种天然色素被广泛应用于各类食品中,但在泡菜中的应用还较少,因此,利用红曲米进行发酵进而提升泡菜色泽也值得继续研究。

表 1 发酵萝卜色度测定
Table 1 Color parameters of fermented radish

指标	KB	HZ
L^*	54.44±1.98 ^a	55.29±2.42 ^a
a^*	-0.25±0.05 ^b	11.53±0.16 ^a
b^*	5.65±0.60 ^b	11.41±0.21 ^a
ΔE^*	6.65±1.92 ^b	14.42±1.36 ^a

注:同行不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.6 发酵过程中有机酸含量变化

有机酸是构成酸味的主要物质,可改善食物的风味和感官特性,并可通过抑制有害细菌的生长提高食品的安全性,是评价泡菜品质的重要指标之一^[26]。图 4 显示了两组样品五种有机酸含量的变化。由

图 4 可知,发酵过程中两组样品的乳酸及乙酸均呈上升趋势。发酵过程中乳酸菌数量的增加导致 pH 降低和总酸含量增加,同时乳酸菌自身的生长随着产酸量的增加而受到抑制,到发酵结束时 KB 组乳酸含量为 0.82 mg/mL,而 HZ 组为 4.38 mg/mL,较 KB 组增加 434%,乙酸可赋予泡菜独特的酸味和气味,也是泡菜风味成分乙酸乙酯的前体物质^[27],在微生物作用下乙酸含量迅速增加,到发酵结束时 KB 组乙酸含量为 0.45 mg/mL,而 HZ 组为 2.18 mg/mL,较 KB 组增加 384%。由于发酵蔬菜过程乳酸菌等微生物会利用原料中的营养物质进行代谢产生乳酸、乙酸等有机酸,本文上述试验表明添加红曲米发酵萝卜后能提高乳酸菌活菌数,提高产品酸度,因此 HZ 组的乳酸及乙酸含量高于 KB 组。柠檬酸含量在两组发酵样品中均呈先下降后上升趋势,这可能是由于在发酵初期柠檬酸盐和葡萄糖果糖、乳糖或木糖在多种乳酸菌的作用下通过醋酸盐激酶途径代谢,导致柠檬酸含量逐渐降低^[28],而发酵后期乳酸菌能够利用三羧酸循环来产生柠檬酸,使得其含量升高^[29]。

无水草酸含量及 D-苹果酸含量在两组发酵样品中均没有明显变化趋势,且无水草酸含量占总有机酸含量较高。在发酵结束时 KB 和 HZ 组无水草酸含量分别为 27.26、22.39 mg/mL,这可能是由于白萝卜本身含有较高含量的草酸,草酸与醇类物质反应生成酯类物质,同时草酸对其他风味物质的保留和呈味有协同作用^[30]。故草酸含量处于动态变化中,且发酵过程中 HZ 组的草酸大多低于 KB 组,这可能是由于红曲霉能与草酸反应发生降解。有研究^[31]指出将紫红曲霉作为发酵菌株,以生姜为底物进行发酵后,有机酸组成发生了变化,草酸含量显著降低,乙酸、柠檬酸含量增加,这与本实验结果相似。苹果酸是生物体代谢三羧酸循环的中间体中间代谢产物和底物,在合成的同时也被作为底物而被消耗,保持低水平的动态变化没有积累,为生成其他有机酸做物质基础^[32]。发酵结束后 HZ 组的 D-苹果酸含量为 4.89 mg/mL,而 KB 组为 1.62 mg/mL,这应该是红曲霉强化发酵的结果。邱雪等^[33]也表明红曲强化显著提高了有机酸中的柠檬酸、琥珀酸和乳酸的含量,酒石酸、L-苹果酸、乙酸和 L-焦谷氨酸的含量略有增高,这与本实验结果较为相似。

在相同条件发酵萝卜泡菜中,接种红曲米发酵的萝卜泡菜的总有机酸含量高于自然发酵萝卜泡菜。一方面自然发酵萝卜的总有机酸含量低是因为萝卜自身的微生物进行发酵,乳酸菌含量低,且带有大量杂菌,发酵过程所用的米酒对发酵过程的微生物生长也有一定的抑制作用,因此发酵初期产酸较慢。另一方面,接种的红曲米发酵丰富了发酵体系的微生物种类及营养物质,红曲霉含有丰富的淀粉酶,糖化酶及酯化酶能够利用糖类等物质与其他微生物发挥协同发酵产生有机酸等多种代谢化合物^[34],车逸心等^[35]也表明添加红曲霉共发酵的酒样能显著提高有

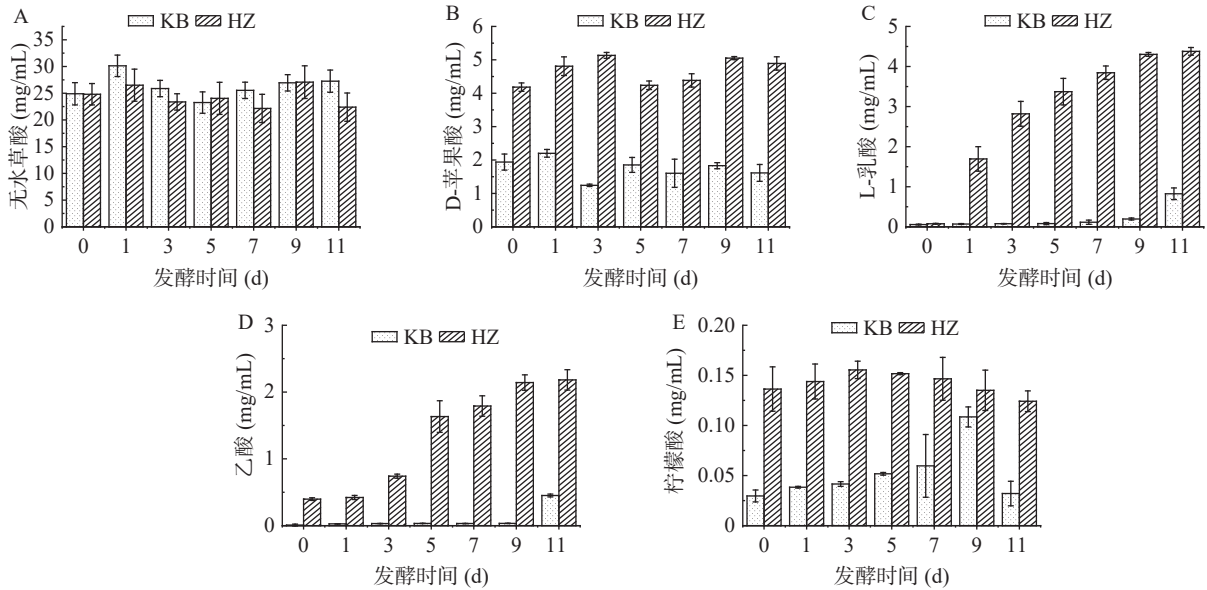


图 4 KB 与 HZ 两组在发酵过程中有机酸含量的变化

Fig.4 Changes of organic acid contents in KB and HZ groups during fermentation

注: A: 无水草酸; B: D-苹果酸; C: L-乳酸; D: 乙酸; E: 柠檬酸。

机酸的整体含量。因此接种红曲米发酵的萝卜泡菜总有机酸含量高于自然发酵组。综上,接种红曲米发酵有利于发酵萝卜中有机酸的生成,多种有机酸协同作用使得红糟酸的口感更为协调丰富。

2.7 红曲米对发酵萝卜过程中挥发性风味物质的影响

2.7.1 挥发性风味物质统计分析 采用 HS-SPME-GC-MS 对两组样品发酵第 0、1、3、5、7、9、11 d 的挥发性风味成分进行分析,通过数据库比对,两组萝卜发酵结束共检出 132 种挥发性风味物质,包括醇类化合物 19 种、酯类化合物 51 种、酚类化合物 3 种、酮类化合物 6 种、醛类化合物 21 种、醚类 4 种、其他化合物 28 种。其中 KB 组检测出 36 种酯类、15 种醇类、14 种醛类、5 种酮类、4 种醚类、2 种酚类以及其他 21 种物质,HZ 组检测出了 47 种酯类、11 种醇类、15 种醛类、4 种酮类、4 种醚类、3 种酚类以及其他 22 种物质,图 5 是两组发酵萝卜主要挥发性风味物质相对含量分布图,从图 5 中可以看出酯类物质是两组发酵萝卜最主要的挥发性风味物质,其中 KB 组占比为 52.76%~62.72%,HZ 组占比为 57.06%~80.92%,其次为醇类物质,KB 组占比为 23.19%~37.16%,HZ 组占比为 15.55%~28.27%。两组间各类风味物质相对含量存在一定差异,HZ 组含有更多的酯类化合物,而 KB 组则含有更多的醇类化合物。醇类和酯类化合物是赋予泡菜风味的主要化合物,多具有令人愉悦的香气和芬芳的水果香味。这与林凤^[36]研究红糟酸的整个发酵过程的最主要的挥发性物质为酯类、醇类及醛类,具有酒香及玫瑰香的研究结果相似。

原料中的一些游离氨基酸和蛋白质水解产生的氨基酸在一系列酶的作用下,会转化为酸类、醇类、含硫化合物、苯甲醛和挥发性酚等挥发性风味成

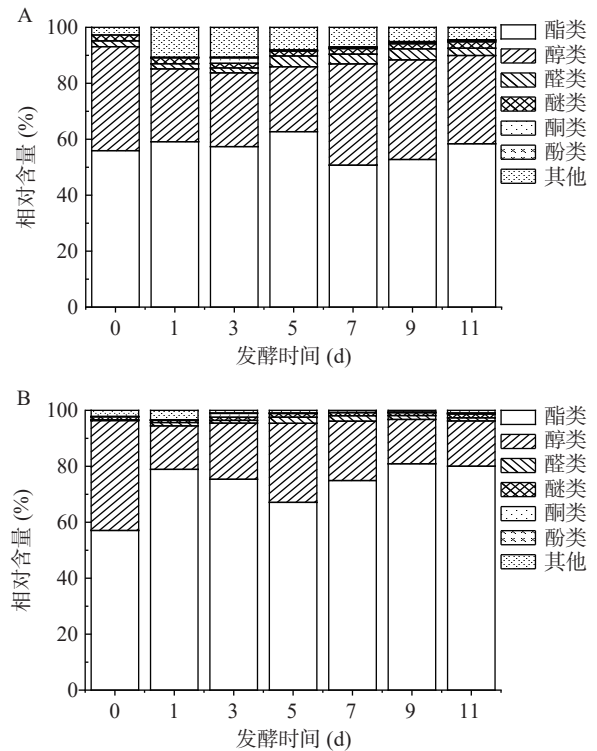


图 5 KB(A)和 HZ(B)组发酵过程各类挥发性风味物质相对含量

Fig.5 Relative content of various volatile flavor substances in KB (A) and HZ (B) samples during fermentation

分^[27]。由图 6 可知,从整体上看,随着发酵时间的增长,两组样品的挥发性物质相对含量也不断增加。但 3-(甲硫基)丙基异硫氰酸酯、三芥子酸甘油酯、二甲基二硫、二甲基三硫等物质只在发酵初期含量较高,来源十字花科蔬菜,其香气浓郁,使泡菜呈现辛辣风味^[37]。发酵后期由于微生物的作用,蔬菜原料自带的气味成分会随着发酵时间的延长部分发生降解甚至消失^[38]。

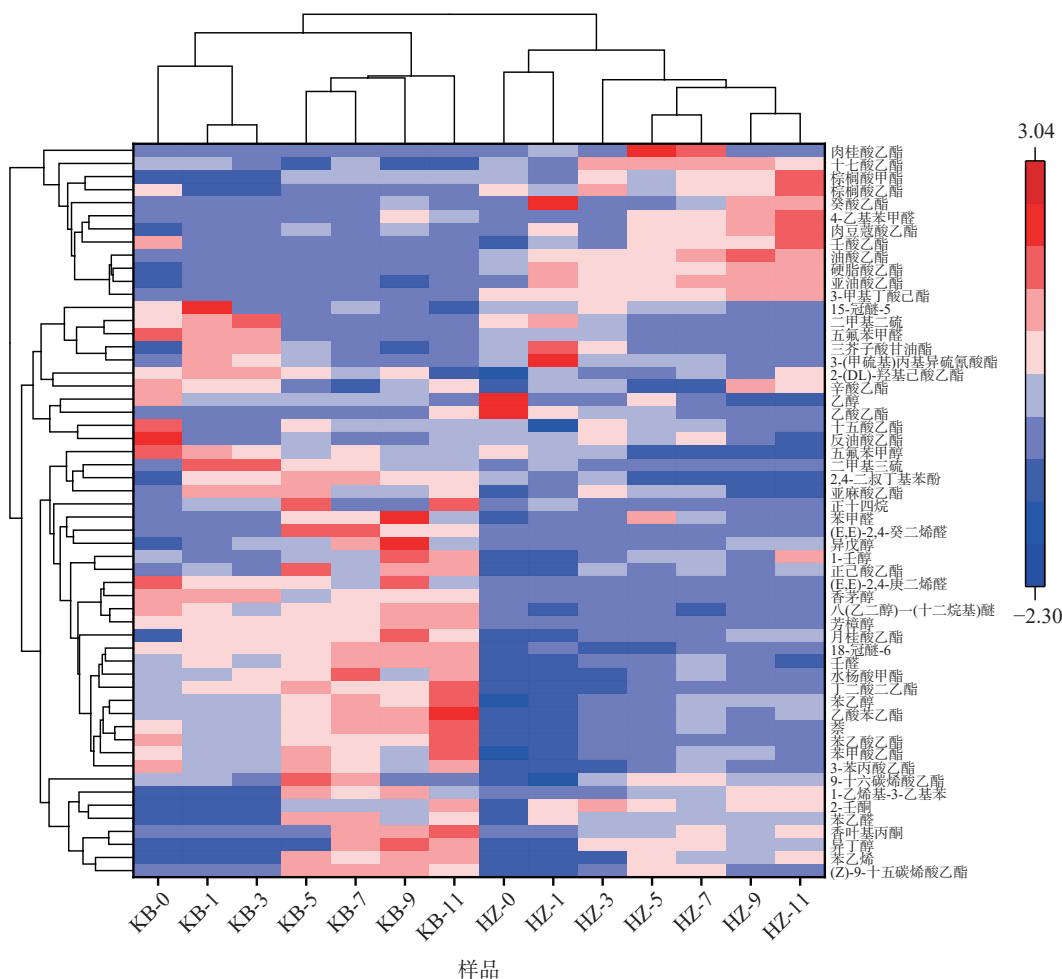


图6 KB和HZ组发酵过程主要挥发性物质的热图及层次聚类图

Fig.6 Heatmap obtained from HCA analysis of volatile components in KB and HZ samples during fermentation

在发酵过程中,KB组大多挥发性物质在第5d后含量开始上升,这是因为蔬菜发酵过程中,随着微生物的生长积累将原料中碳水化合物、蛋白质和脂质等大分子物质分解成糖类、有机酸、氨基酸和不饱和脂肪酸等小分子物质,并进一步生成醛类、酮类、醇类、酯类等多种挥发性成分^[39]。HZ组的大多数挥发性物质从第1d开始缓慢增加,其中肉桂酸乙酯、十七酸乙酯、棕榈酸乙酯、棕榈酸甲酯、癸酸乙酯,肉豆蔻酸乙酯、壬酸乙酯、油酸乙酯、硬脂酸乙酯等长链脂肪酸含量远高于KB组,会带来醚或蜡的脂香^[40],且3-甲基丁酸乙酯只在HZ组检出,有研究指出^[41]红曲霉、短乳杆菌和食物乳杆菌与果味和花香相关的芳香酯浓度呈正相关。

KB组醇类及醛类物质的数量及含量均比HZ组高,其中,HZ组的乙醇含量随着发酵时间增长而不断减少,芳樟醇、香茅醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛只在KB组检出,其中原料自带的酵母菌代谢产生丰富的醇类物质,醛类化合物来源于发酵过程中的脂质氧化,是萝卜泡菜的重要风味物质^[42],而红曲米能丰富发酵体系中微生物和酶系种类^[43],其中红曲霉中的酯化酶能将酸与醇催化合成酯类使得HZ组的醇类化合物减少。

2.7.2 发酵结束萝卜泡菜挥发性风味物质 PCA 为

明确两组间挥发性风味物质是否存在显著差异以确定红曲米对发酵萝卜的影响,对两组发酵第11d的萝卜样品进行分析。PCA是一种无监督的降维分析方法,一定程度反映了数据的原始状态。PCA图可以直观地显示不同样品之间的差异,由图7可知,挥发性风味物质的PC1贡献率为58.2%,PC2贡献率为16.4%,总贡献率为74.6%,说明结果可以接受。HZ组发酵萝卜之间距离较近,说明其重复性较好。两组发酵萝卜泡菜之间距离较远,表明添加红曲米发酵萝卜与自然发酵萝卜挥发性风味化合物存在明显差异。

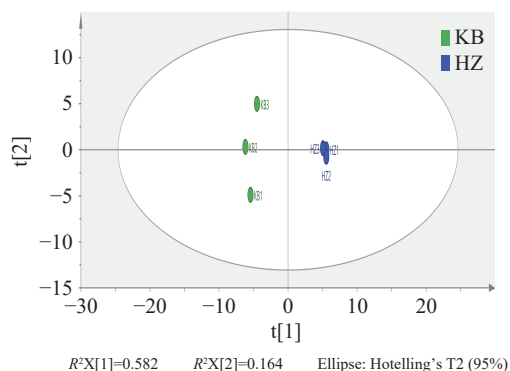


图7 KB组和HZ组风味物质PCA

Fig.7 PCA of flavor substances among KB and HZ groups

2.7.3 主要差异性挥发性风味物质分析 为进一步分析两组处理间差异性挥发性风味物质,明确红曲米对发酵萝卜挥发性风味物质的影响,对两组发酵萝卜泡菜挥发性风味物质建立 OPLS-DA 模型, OPLS-DA 评价模型中, R^2X 为 X 矩阵的解释率, R^2Y 为 Y 矩阵的解释率, Q^2 表示模型的预测能力。此次实验模型中 $R^2X=0.897$ 、 $R^2Y=0.999$ 、 $Q^2=0.997$, 表明 OPLS-DA 模型的预测能力较好。由图 8 可知, 两组发酵萝卜的样品在 OPLS-DA 得分散点图中可以被很好地区分, 证明 OPLS-DA 模型能够较好地获取组间差异信息, 可以将不同组别发酵萝卜的挥发性风味物质进行区分。如图 8 所示, 为防止过拟合发生, 进行 200 次交叉验证, 置换检验结果显示 $R^2=0.528$, $Q^2=-0.159$, Q^2 的回归线与纵轴相交点小于 0, 说明此模型无过拟合现象, 验证模型较为可靠。因此认为此结果可以用于两组发酵萝卜泡菜挥发性风味物质的区分。

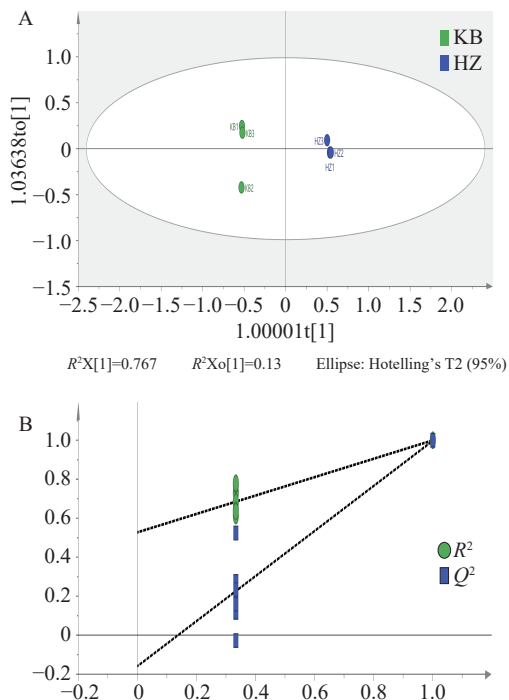


图 8 KB 组和 HZ 组挥发性成分 OPLS-DA 得分图(A)和模型置换检验图(B)

Fig.8 OPLS-DA score (A) and permutation test plots (B) for volatile components among KB and HZ groups

2.7.4 发酵萝卜特征性挥发性风味物质分析 为进一步体现两组发酵萝卜挥发性风味物质差异,对 OPLS-DA 模型的变量投影重要性(variable importance in projection, VIP)值进行计算(图 9),挥发性风味物质的 VIP 值越大,说明在不同处理下此挥发性风味物质的差异越显著。试验共鉴定出 VIP>1 的差异物质 12 种,包括 3 种醇类化合物、8 种酯类化合物、1 种含硫化合物,各物质具体含量见表 2。

醇类物质是泡菜中常见的挥发性风味物质,通常具有令人愉悦的香气。其中,乙醇等醇类物质不仅

表 2 KB 组及 HZ 组 VIP>1 的差异挥发性风味化合物
Table 2 Differential volatile flavor compounds (VIP>1) among KB and HZ groups

编号	化合物名称	VIP 值	CAS	相对含量(%)	
				KB 组	HZ 组
1	乙醇	3.32055	64-17-5	16.44±1.95	5.04±1.18
2	油酸乙酯	2.81884	111-62-6	1.57±0.22	9.61±0.17
3	棕榈酸乙酯	2.71906	628-97-7	23.13±2.07	31.06±1.58
4	亚油酸乙酯	2.70291	544-35-4	2.59±0.79	10.09±0.49
5	苯乙醇	2.07973	60-12-8	15.12±1.76	10.21±1.06
6	癸酸乙酯	1.79275	110-38-3	3.00±0.79	6.43±0.66
7	肉豆蔻酸乙酯	1.59741	124-06-1	2.17±0.33	4.77±0.13
8	二甲基三硫	1.58149	3658-80-8	3.15±1.53	0.18±0.013
9	亚麻酸乙酯	1.46628	1191-41-9	7.15±2.22	4.24±0.31
10	(Z)-9-十五碳烯酸乙酯	1.18292	56219-09-1	3.34±1.43	0.49±0.080
11	硬脂酸乙酯	1.16376	111-61-5	0.44±0.088	1.81±0.093
12	异戊醇	1.05715	123-51-3	2.25±0.60	0.72±0.062

能够赋予泡菜柔和香味,而且还能与乳酸菌代谢产物协同或反应,呈现更为愉悦的风味或生成更加复杂的呈味物质^[44]。苯乙醇是由酵母利用糖或苯丙氨酸代谢产生的高级醇,赋予泡菜花香^[45];异戊醇具有酒味和麦芽香味^[46]。KB 组醇类物质的相对含量(33.81%)是 HZ 组(15.97%)的两倍以上,且 3 种醇类物质在 KB 组中的相对含量均高于 HZ 组,这可能是由于红曲米添加后,红曲霉与醇类物质发生反应转化成酯类物质,因此 HZ 组的醇类物质含量比 KB 组低。

酯类物质在泡菜中呈现怡人的甜味和果香、花香等香气。癸酸乙酯具有椰子香,棕榈酸乙酯具有奶油香气,肉豆蔻酸乙酯具有鸢尾花香,油酸乙酯具有花香和果香香气,亚油酸乙酯具有花果香,(Z)-9-十五碳烯酸乙酯能够赋予泡菜柔和的清香和花果香,硬脂酸乙酯无明显香味^[47]。其中,棕榈酸乙酯是两组样品中相对含量占比最高的物质,分别为 23.13%(KB)、31.06%(HZ),除了亚麻酸乙酯和(Z)-9-十五碳烯酸乙酯外, HZ 组的酯类的含量均高于 KB 组,表明红曲米的添加给发酵萝卜带来了更为丰富的酯香味。这可能是由于乳酸菌及红曲霉混合发酵后能丰富酯类化合物的种类及含量,对挥发性风味物质起到了重要作用^[48]。

二甲基三硫具有肉样和洋葱蔬菜辛辣味香气,是发酵萝卜的特征性气味^[30],KB 组的含量(3.15%)高于 HZ 组(0.18%),由于含硫化合物是萝卜本身自带的挥发性物质,添加红曲米后在微生物作用下二甲基三硫发生降解导致含量变低^[49]。

风味物质的形成多源于发酵体系复杂的微生物代谢。在自然条件下,借助环境和蔬菜表面的微生物及内源酶,利用蔬菜中的糖类等物质,通过一系列生物化学变化(如碳水化合物代谢、蛋白质水解和氨基酸分解代谢、脂肪分解和脂肪酸代谢等),产生醛类、醇类、酮类、酯类等特征性风味物质^[50]。红曲米作为

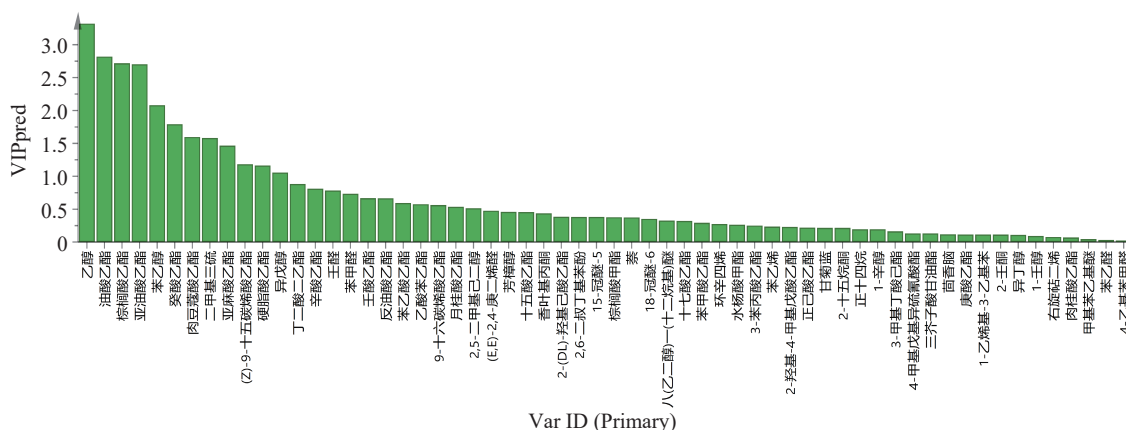


图9 KB组和HZ组的差异挥发性成分VIP值

Fig.9 VIP score of differential volatile flavor compounds among KB and HZ groups

重要的糖化发酵剂,通过乳酸菌及红曲霉为主的微生物混合发酵后,萝卜泡菜的挥发性风味物质种类更为丰富,酯类物质数量增多且含量丰富,赋予了红糟酸独特的风味。

3 结论

本试验对比添加和未添加红曲米的两组萝卜泡菜发酵过程中的微生物数量、pH、总酸、还原糖、色差和有机酸的含量差异,结果表明,发酵结束时 HZ 组乳酸菌数量比 KB 组高且 HZ 组的红曲霉数量丰富,添加红曲米有利于发酵萝卜中乳酸菌的生长。KB 组的 pH 显著高于 HZ 组 ($P < 0.05$),总酸含量显著低于 HZ 组 ($P < 0.05$),表明红曲米能提高萝卜发酵过程的产酸能力。而 HZ 组的还原糖含量均显著高于 KB 组 ($P < 0.05$),添加红曲米为萝卜泡菜提供了丰富的糖类物质。两组样品在发酵萝卜过程中亚硝酸含量处于较低水平,均不超过 1 mg/mL,且红曲米对降低亚硝酸盐的含量有一定的作用,提高了红糟酸的安全性。KB 组的色差变化值 ΔE^* 、红绿值 a^* 、黄蓝值 b^* 值与 HZ 组存在显著性差异 ($P < 0.05$),红曲米能让发酵萝卜泡菜颜色变红,红曲色素在发酵蔬菜的应用值得进一步研究。发酵过程中两组样品的乳酸及乙酸均呈上升趋势,且占比含量较高,HZ 组的总有机酸含量高于 KB 组,表明接种红曲米发酵萝卜泡菜有利于有机酸的生成。在挥发性化合物上,酯类物质及醇类物质是两组样品的主要挥发性风味物质,两组间各类风味物质相对含量存在一定差异,利用 OPLS-DA 分析鉴定出 VIP>1 的差异物质 12 种,包括 3 种醇类化合物(乙醇、苯乙醇、异戊醇),8 种酯类化合物(油酸乙酯、棕榈酸乙酯、亚油酸乙酯、癸酸乙酯、肉豆蔻酸乙酯、亚麻酸乙酯、(Z)-9-十五碳烯酸乙酯、硬脂酸乙酯)及 1 种含硫化合物(二甲基三硫)。接种红曲米发酵萝卜后酯类物质种类增多且含量丰富,赋予了红糟酸丰富的酯香味,对挥发性风味物质起到重要作用。综上所述,接种红曲米能有效提升发酵蔬菜品质与风味,为广西地区特色产品红糟酸的发展提供理论基础。

© 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

- [1] 汪铃,王亮.传统发酵蔬菜制作工艺、品质特征及影响因素研究概况[J].中国酿造,2022,41(7):21-25. [WANG L, WANG L. Overview of research on traditional fermented vegetable production technology, quality characteristics, and influencing factors[J]. Chinese Brewing, 2022, 41(7): 21-25.]
- [2] 广西壮族自治区卫生健康委员会. DBS 45/061-2019 食品安全地方标准红糟酸[S]. 2020. Guangxi Zhuang Autonomous Region Health Commission. DBS 45/061-2019 Food safety local standard red vinasse acid [S]. 2020.
- [3] 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. [LIU X, WANG J W, SUI Y M, et al. Research progress on microbial diversity and its impact on quality formation in traditional fermented vegetables in China[J]. Food Science, 2024, 45(10): 290-297.]
- [4] 李沅达,邓秀娟,吴婷,等.红曲霉发酵食品研究现状与分析[J].食品安全质量检测学报,2022,13(3):688-696. [LI Y D, DENG X J, WU T, et al. Research status and analysis of *Monascus* fermented foods[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2022, 13(3): 688-696.]
- [5] LUO A, CHENG Z, ZHAO J, et al. The relationship between microbial community succession and flavor formation during the natural fermentation of Hongqu sufu[J]. Foods, 2023, 12(14): 2800.
- [6] ADIN S N, GUPTA I, PANDA B P, et al. Monascin and ankaflavin—Biosynthesis from *Monascus purpureus*, production methods, pharmacological properties: A review[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2023, 70(1): 137-147.
- [7] CHEN G, YUAN Y, TANG S, et al. Comparative analysis of microbial communities and volatile flavor components in the brewing of Hongqu rice wines fermented with different starters[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100628.
- [8] DAHIYA D, MANUEL J V, NIGAM P S. An overview of bioprocesses employing specifically selected microbial catalysts for γ -aminobutyric acid production[J]. Microorganisms, 2021, 9(12): 2457.
- [9] BUZZELLI L, SEGRETÌ A, DI GIOIA D, et al. Alternative lipid lowering strategies: State-of-the-art review of red yeast rice[J].

- Fitoterapia, 2024, 172: 105719.
- [10] YANG H, MENG H, XIE L, et al. Contribution of quercetin to the composition and antioxidant properties of *Monascus* exopolysaccharides[J]. *Foods*, 2023, 12(5): 1004.
- [11] 于兰. 红糟酸的制作工艺[J]. *中国调味品*, 1997(3): 21-22. [YU L. Production process of red vinasse acid[J]. *China Seasoning*, 1997(3): 21-22.]
- [12] SHAO Y J, LIN A H. Improvement in the quantification of reducing sugars by miniaturizing the Somogyi-Nelson assay using a microtiter plate[J]. *Food Chem*, 2018, 240: 898-903.
- [13] 王芮东, 李楠, 卫博慧, 等. 不同发酵方式萝卜泡菜中有机酸的变化分析[J]. *中国调味品*, 2021, 46(5): 139-143. [WANG R D, LI N, WEI B H, et al. Analysis of changes in organic acids in radish kimchi with different fermentation methods[J]. *China Seasoning*, 2021, 46(5): 139-143.]
- [14] 李俊健, 高杰贤, 林锦铭, 等. 不同发酵方式对柚皮泡菜理化特性和风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 212-218. [LI J J, GAO J X, LIN J M, et al. Effects of different fermentation methods on the physicochemical properties and flavor of pomelo peel pickles[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(20): 212-218.]
- [15] 陈曼曼, 吴兴壮. 传统发酵蔬菜中耐乙醇型乳酸菌的研究进展[J]. *中国酿造*, 2023, 42(1): 9-14. [CHEN M M, WU X Z. Research progress of ethanol-tolerant lactic acid bacteria in traditional fermented vegetable[J]. *China Brewing*, 2023, 42(1): 9-14.]
- [16] 蔡琪琪, 周康熙, 刘志彬, 等. 红曲黄酒酿造过程中红曲霉生长抑制因素初探[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(10): 143-149. [CAI Q Q, ZHOU K X, LIU Z B, et al. Studies on growth inhibitory factors of *Monascus* in the brewing process of Hongqu rice wine[J]. *Chinese Journal of Food*, 2019, 19(10): 143-149.]
- [17] 李洋, 罗佳沂, 林凤, 等. 广西武宣地区红糟酸微生物多样性分析[J]. *中国调味品*, 2022, 47(1): 14-20. [LI Y, LUO J Y, LIN F, et al. Analysis of microbial diversity of red vinasse acid in Wuxuan area of Guangxi[J]. *China Seasoning*, 2022, 47(1): 14-20.]
- [18] XIAN S, LI Y, LIU X, et al. Impact of microorganisms on key processes of organic acid metabolism during the occurrence and disappearance of paocai pellicle[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(8): 5047-5064.
- [19] 苑建伟, 齐翔翔, 侯小歌, 等. 一株红曲霉的分离及发酵特性研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(1): 77-80. [YUAN J W, QI P X, HOU X G, et al. The separation and fermentation characteristics of a *Monascus* strain[J]. *China Seasoning*, 2022, 47(1): 77-80.]
- [20] 严敏嘉, 李小芳, 赵甜甜, 等. 红曲固态发酵过程中糖类物质的动态变化分析[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(3): 79-83. [YAN M J, LI X F, ZHAO T T, et al. Dynamic changes analysis of carbohydrates during solid state fermentation of *Monascus*[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(3): 79-83.]
- [21] 黄丽慧, 张雁, 陈于陇, 等. 发酵蔬菜中亚硝酸盐消长规律及调控技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 303-307. [HUANG L H, ZHANG Y, CHEN Y L, et al. Research advances in dynamic change and control technology of nitrite in fermented vegetables[J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 303-307.]
- [22] 王静, 燕平梅, 张志虹, 等. 不同白酒浓度对发酵白菜中亚硝酸盐浓度的影响[J]. *中国调味品*, 2008, 33(12): 49-52. [WANG J, YAN P M, ZHANG Z H, et al. Effect of different Baijiu concentrations on nitrite concentration in fermented cabbage[J]. *China Seasoning*, 2008, 33(12): 49-52.]
- [23] 卓经纬, 彭诗泳, 覃丽, 等. 添加红曲对乳酸发酵剂发酵性能的影响研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(5): 65-70. [ZHUO J W, PENG S Y, QIN L, et al. Effect of addition of red yeast rice on the properties of lactic acid fermentation agent [J]. *Chinese Seasoning*, 2023, 48(5): 65-70.]
- [24] 葛焱, 郭双霜, 陈安均. 泡菜中亚硝酸盐消长规律及调控技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(4): 382-385, 390. [GE Y, GUO S S, CHEN A J. Research progress of dynamic change and control technology of nitrite in pickle [J]. *Food Industry Technology*, 2015, 36(4): 382-385, 390.]
- [25] ALI I, AL-DALALI S, HAO J, et al. The stabilization of *Monascus* pigment by formation of *Monascus* pigment-sodium caseinate complex[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132480.
- [26] 罗文珊, 杜晓仪, 徐玉娟, 等. 不同乳酸菌发酵对迟菜心副产物品质及风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(24): 170-177. [LUO Wenshan, DU Xiaoyi, XU Yujuan, et al. Effect of different lactic acid bacteria fermentation on the quality and volatile flavor of by-products of Chicaixin (late flowering cabbage)[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(24): 170-177.]
- [27] ZHOU K, WU L, CHEN G, et al. Development of a novel restrictive medium for *Monascus* enrichment from Hongqu based on the synergistic stress of lactic acid and ethanol[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 702951.
- [28] 经骥源, 李婷, 曾凡坤, 等. 发酵剂对泡萝卜品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 171-177. [JING Q Y, LI T, ZENG F K, et al. Effect of starters on the quality of pickled radish[J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 171-177.]
- [29] 张哲川, 梁晓琳, 张玉双, 等. 浆水发酵过程中有机酸的变化及其抑菌性能和体外抗氧化能力[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(4): 159-169. [ZHANG Z C, LIANG X L, ZHANG Y S, et al. The changes of organic acids and its bacteriostatic properties and antioxidant capacity *in vitro* during Jiangshui fermentation[J]. *Chinese Journal of Food*, 2024, 24(4): 159-169.]
- [30] 吕欣然, 王德晟, 刘水琳, 等. 产 γ -氨基丁酸植物乳杆菌对发酵萝卜风味和品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(12): 224-232. [LÜ X R, WANG D S, LIU S L, et al. Effect of *Lactiplantibacillus plantarum* producing γ -aminobutyric acid on the flavor and quality of fermented radish[J]. *Chinese Journal of Food*, 2024, 24(12): 224-232.]
- [31] TAN Y, GAO M, LI L, et al. Functional components and antioxidant activity were improved in ginger fermented by *Bifidobacterium adolescentis* and *Monascus purpureus*[J]. *LWT*, 2024, 197: 115931.
- [32] 张林祥, 周利南, 邢利民, 等. 多菌种混合制曲生产玫瑰醋的工艺及品质研究[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(9): 344-353. [ZHANG L X, ZHOU L N, XING L M, et al. Research on the process and quality of rosy vinegar production by multi-strain mixed cranking[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2024, 24(9): 344-353.]
- [33] 邱雪, 黄灼, 张立强, 等. 红曲强化对四川麸醋代谢组分的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(4): 50-55. [QIU X, HUANG J, ZHANG L Q, et al. Effects of red wine fortification on metabolic components of Sichuan bran vinegar[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(4): 50-55.]
- [34] 邹昆, 程强, 鲁兰, 等. 红曲醋的研究现状和发展趋势[J]. *中国调味品*, 2022, 47(2): 211-215, 220. [ZOU K, CHENG Q, LU L, et al. Research status and development trend of *Monascus* vinegar[J]. *China Seasoning*, 2022, 47(2): 211-215, 220.]
- [35] 车逸心, 刘雯娟, 徐瑞欣, 等. 紫红曲霉与酿酒酵母共发酵对红曲甜米酒风味的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(4): 118-124. [CHE Y X, LI W X, XU R X, et al. Influence of *Monascus pur-*

- pureus* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentation on the flavor of sweet red yeast rice wine[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2020, 20(4): 118-124.]
- [36] 林凤. 广西大瑶山地区部分红曲及红曲制品研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020. [LIN F. Research of paper of Hongqu and its products in Dayaoshan area of Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.]
- [37] 史梅莓, 杨恺, 吕鹏军, 等. 单菌与多菌接种发酵对多轮发酵四川泡菜风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(14): 154-160. [SHI M M, YANG K, LÜ P J, et al. Effects of single-bacteria and multi-bacteria inoculation on the flavor of Sichuan pickles of multi-round fermentation[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(14): 154-160.]
- [38] 高苏敏, 吴丹璇, 高子武, 等. 超声波协同低盐处理对萝卜泡菜水菌群分布和特征风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(15): 154-163. [GAO S M, WU D X, GAO Z W, et al. Effects of ultrasonic synergistic low-salt treatment on the distribution of water flora and characteristic flavor of radish kimchi[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(15): 154-163.]
- [39] 胡蝶, 杨胜平, 郑好, 等. 发酵蔬菜微生物及其应用进展[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(14): 187-192. [HU D, YANG S P, ZHENG H, et al. Microorganisms of fermented vegetables and their application progress[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(14): 187-192.]
- [40] YANG Y J, AI L Z, MU Z Y, et al. Flavor compounds with high odor activity values (OAV>1) dominate the aroma of aged Chinese rice wine (Huangjiu) by molecular association[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132370.]
- [41] HUANG Z R, GUO W L, ZHOU W B, et al. Microbial communities and volatile metabolites in different traditional fermentation starters used for Hong Qu glutinous rice wine[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 593-603.]
- [42] 杨洋, 杨宇航, 王洪伟, 等. 不同发酵剂对泡萝卜挥发性风味成分及感官品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(4): 175-184. [YANG Y, YANG Y H, WANG H W, et al. Effects of different starter on volatile flavor components and sensory properties of pickled radish[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(4): 175-184.]
- [43] 徐晓飞, 何瑞琪, 宗敏华, 等. 红曲霉代谢产物的调控及在酿酒中的应用研究进展[J]. *中国酿造*, 2023, 42(4): 8-13. [XU X F, HE R Q, ZONG M H, et al. Research progress on metabolites regulation and application of *Monascus* in alcoholic drink production[J]. *China Brewing*, 2023, 42(4): 8-13.]
- [44] WANG D, WANG M, CAO L, et al. Changes and correlation of microorganism and flavor substances during persimmon vinegar fermentation[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101565.]
- [45] HUANG Z R, HONG J L, XU J X, et al. Exploring core functional microbiota responsible for the production of volatile flavor during the traditional brewing of Wuyi Hong Qu glutinous rice wine[J]. *Food Microbiology*, 2018, 76: 487-496.]
- [46] 王雅利, 赵楠, 葛黎红, 等. 酵母菌对发酵萝卜品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(24): 68-75. [WANG Y L, ZHAO N, GE L H, et al. The effect of yeast on the quality of fermented radish[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(24): 68-75.]
- [47] 郑训培, 覃业优, 巢瑾, 等. 常温低温发酵对二次发酵辣椒酱品质的影响比较[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(22): 210-219. [ZHENG X P, QIN Y Y, CHAO J, et al. Comparison of the effects of room and low fermentation temperatures on the quality of secondary fermented chili sauce[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2023, 14(22): 210-219.]
- [48] 张诗瑶, 孙钰薇, 刘志佳, 等. 中华传统发酵蔬菜风味轮廓及风味形成研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 373-388. [ZHANG S Y, SUN Y W, LIU Z J, et al. Research progress on the flavor profile and flavor formation of fermented vegetables in China[J]. *Chinese Journal of Food*, 2022, 22(12): 373-388.]
- [49] GONG Z, WU Z, YANG Q, et al. Influences of lactic acid bacteria strains on the flavor profiles, metabolites and quality characteristics of red yeast rice produced by solid-state fermentation[J]. *Food Research International*, 2024, 197: 115172.]
- [50] 王芮东, 赵燕飞, 邢颖, 等. 萝卜泡菜自然发酵过程中挥发性香气成分变化分析[J]. *中国酿造*, 2019, 38(9): 124-129. [WANG R D, ZHAO Y F, XING Y, et al. Analysis of volatile aroma components changes during natural fermentation of radish kimchi[J]. *Chinese Brewing*, 2019, 38(9): 124-129.]