

啤酒和乳酸钙对二次发酵芥菜品质及挥发性风味成分的影响

蒋 龙¹ 王 锋¹ 谢佩宏¹ 欧四明² 秦 丹¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南洞庭明珠食品有限公司, 湖南 岳阳 414200)

摘要: [目的] 探究发酵液中添加啤酒和乳酸钙溶液对二次发酵芥菜品质及挥发性风味物质的影响。[方法] 在脱盐芥菜坯接种乳酸菌的基础上分别添加原浆啤酒、熟啤, 同时添加不同浓度的乳酸钙溶液, 对二次发酵芥菜进行感官评价并测定发酵过程中的 pH、总酸、亚硝酸盐、还原糖含量和发酵过程中的质构特性, 采用固相微萃取气相色谱质谱联用法 (SPME-GC-MS) 对芥菜的挥发性风味成分进行比较分析。[结果] 添加啤酒可以改善二次发酵芥菜风味; 二次发酵芥菜共检测出 144 种挥发性风味成分, 主要为醇类、酯类和酸类物质, 其中呈花香、果香和脂肪等柔和香气的醇类物质和酯类物质含量更高; 添加乳酸钙溶液能显著提高二次发酵芥菜脆度和硬度。[结论] 二次发酵芥菜中添加啤酒和乳酸钙溶液不仅能增强发酵芥菜的挥发性风味物质, 还能有效提高其脆度和硬度。

关键词: 华容芥菜; 二次发酵; 啤酒; 乳酸钙; 挥发性风味成分

Effects of beer and calcium lactate on the quality and volatile flavor components of secondary fermented mustard greens

JIANG Long¹ WANG Feng¹ XIE Peihong¹ OU Siming² QIN Dan¹

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2. Hunan Dongting Mingzhu Food Co., Ltd., Yueyang, Hunan 414200, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of adding beer and calcium lactate solution to the fermentation broth on the quality and volatile flavor substances of secondary fermented mustard greens. [Methods] Based on the inoculation of lactic acid bacteria into desalted mustard greens, cellar beer and pasteurized beer are added, respectively with calcium lactate solutions of different concentrations. Then, sensory evaluation is conducted on the secondary fermented mustard greens. Additionally, the pH, total acid, nitrite, reducing sugar content, and texture characteristics are determined during the fermentation process. The volatile flavor components of mustard greens are comparatively analyzed by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS). [Results] The addition of beer can improve the flavor of secondary fermented mustard greens. A total of 144 volatile flavor components are detected, mainly alcohols, esters, and acids. Among them, the alcohols and esters of higher content are those with mild aromas, such as floral, fruity, and fatty. The addition of calcium lactate solution can significantly increase the crispness and hardness of secondary fermented mustard greens. [Conclusion] Adding beer and calcium lactate solution to secondary fermented mustard greens can not only enhance the volatile flavor substances of fermented mustard greens, but also effectively improve their crispness and hardness.

Keywords: Huarong mustard; secondary fermentation; beer; calcium lactate; volatile flavor component

华容芥菜是以大叶芥为原料, 经盐渍加工而成的一 味酸香可口, 深受消费者喜爱^[1]。华容芥菜产量大, 收获
类蔬菜加工制品, 荣获国家农产品地理标志产品认证, 其 期短, 通常采用高盐腌制成咸芥菜坯 (含盐量 15% 以上)

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (编号: 2023NK2039)

通信作者: 王锋 (1978—), 男, 湖南农业大学教授, 博士。E-mail: wangfeng@hunau.edu.cn

收稿日期: 2025-03-21 改回日期: 2025-07-18

引用格式: 蒋龙, 王锋, 谢佩宏, 等. 啤酒和乳酸钙对二次发酵芥菜品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 10-22.

Citation: JIANG Long, WANG Feng, XIE Peihong, et al. Effects of beer and calcium lactate on the quality and volatile flavor components of secondary fermented mustard greens[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 10-22.

作为原料半成品保存,加工成品芥菜时需要经过漂洗脱盐至合适含盐量才能使用。咸芥菜坯漂洗脱盐的同时,会有大量风味物质流失,从而影响腌制芥菜品质。对脱盐芥菜坯进行二次发酵可以改善产品风味^[2-4],国内一些方便面企业在制作老坛酸菜调料包时就采用了二次发酵技术。泡菜液的组成(如糖^[5]、盐^[6]和香辛料^[7]等)和其中的微生物^[8]对发酵蔬菜的风味、品质具有重要影响。乳酸发酵是蔬菜腌制过程中最主要的发酵作用,在乳酸菌作用下,糖类被代谢产生有机酸,不仅赋予蔬菜腌制品酸味,还能抑制有害微生物的生长^[9]。已有的研究主要集中于乳酸菌对泡菜品质的影响,而关于酵母菌对泡菜的品质影响研究还相对较少。在蔬菜腌制过程中也存在轻度的乙醇发酵,酵母菌催化糖类转化产生醇类物质,同时醇类物质和有机酸相结合产生酯类芳香物质^[10-11]。添加适量的酵母菌与乳酸菌联合发酵不仅能提升泡菜的风味和品质,对维持其保藏性也有一定作用^[12-13]。

啤酒含有多种氨基酸、酶类和维生素等成分,常被用于一些菜肴的调味,具有很好的增香、增味效果^[14]。在泡菜加工实践中,也有采用啤酒泡制蔬菜的例子,如啤酒泡辣椒和啤酒泡豆角等。原浆啤酒是指未经任何防腐剂和添加剂处理的生啤酒,且不过滤、不经灭活工序,保留鲜活酵母的啤酒原液。前期预试验发现,发酵液中添加啤酒能增加二次发酵芥菜的风味,但其质地明显变软,口感变差。在新鲜蔬菜腌制过程中 Ca^{2+} 可以激活果胶甲酯酶,提高酶的活性,促使果胶转化为甲氧基果胶,并与 Ca^{2+} 生成不溶性的果胶酸钙,从而使得制品脆度升高^[15-16]。然而, Ca^{2+} 对以脱盐芥菜坯进行二次发酵的华容芥菜的保脆效果和作用规律尚不清楚。

为提高二次发酵芥菜的风味,减少二次发酵芥菜脆度的下降,研究拟在发酵液中分别添加原浆啤酒和熟啤,探究啤酒对二次发酵芥菜品质、挥发性风味成分及其含量的影响,并研究发酵液中添加乳酸钙对芥菜脆度的改善作用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

咸芥菜坯(其理化指标见表1):湖南洞庭明珠食品有限公司;

植物乳杆菌(*Lactobacillus plantanum*) LPM2017105:湖南农业大学果蔬加工实验室分离,保藏于中国典型培养物保藏中心(保藏编号 CCTCC·M2017105);

原浆啤酒、熟啤:湖南农业大学食品科学技术学院啤酒酿造中试车间;

MRS 培养基:国药集团化学试剂有限公司;

表1 咸芥菜坯理化指标

Table 1 Physiochemical indicators of salted mustard greens

成分名称	单位	含量	成分名称	单位	含量
pH		4.67±0.00	总酸	g/kg	7.16±0.36
盐浓度	%	10.14±0.00	亚硝酸盐	mg/kg	6.02±0.04
氨基酸态氮	%	0.34±0.00	还原糖	%	1.18±0.00

亚铁氰化钾、乙酸锌、冰乙酸、硼酸钠、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、3,5-二硝基水杨酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

甲醛:分析纯,湖南汇虹试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

pH计:PHS-3C型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

紫外分光光度计:UV1901PCS型,上海佑科仪器仪表有限公司;

食品物性测试仪:TA-XT plus型,英国 Stable Micro Systems公司;

SPME装置:57329-U型,美国 Supelco公司;

GC-MS联用仪:7890B-5975C型,美国 Agilent公司。

1.2 方法

1.2.1 芥菜预处理及泡菜液制备 咸芥菜坯从腌制池取出,用清水进行漂洗脱盐处理,直至盐分降至约4%,脱盐后的芥菜切成8 cm×4 cm×1 cm的长方体备用。发酵液的制备:将洗净晾干的小米椒、萝卜、生姜和包菜等原料按小米椒30 g、萝卜100 g、生姜30 g、包菜300 g、食盐30 g、白砂糖15 g和老泡菜水500 mL的比例放入预先进行沸水浸泡灭菌3次的2.5 L的土陶罐中,随后加入1 500 mL冷却后的沸水摇匀,盖上坛盖加水进行密封,置于恒温发酵箱中30℃下发酵48 h得到发酵液。发酵液中添加45 mL乳酸菌液和不同含量的原浆啤酒、熟啤与乳酸钙溶液制成泡菜液。将200 g脱盐芥菜放入350 mL容器中,将含不同成分的泡菜液分为7组,如表2所示,发酵

表2 泡菜液成分组成表

Table 2 Pickle liquid composition					mL
组别	发酵液	原浆啤酒	熟啤	0.5%乳酸钙溶液	1%乳酸钙溶液
A	200	0	0	0	0
B	150	50	0	0	0
C	150	0	50	0	0
D	150	30	0	20	0
E	150	30	0	0	20
F	150	0	30	20	0
G	150	0	30	0	20

8 d。发酵 8 d 时芥菜已成熟,如继续发酵会导致芥菜组织显著软化,严重影响口感。

1.2.2 理化指标测定

- (1) pH: 根据文献[17]。
- (2) 总酸含量: 根据 GB 12456—2021。
- (3) 亚硝酸盐含量: 根据 GB 5009.33—2016。
- (4) 还原糖含量: 根据文献[18]。

1.2.3 质构特性测定 根据文献[19],修改如下:取芥菜叶柄切分为约 2 cm×2 cm×1 cm 的长方体放置于质构仪底座上,使用 SMS P/2 N 探头进行穿刺试验,测前速度 1.00 mm/s,测试速度 2.00 mm/s,测后速度 10.0 mm/s,测试距离 6 mm,触发力为 0.05 N,测量 8 次取平均值。

1.2.4 发酵芥菜挥发性风味组分分析 根据文献[20],修改如下:

- (1) SPME: 取芥菜样品用搅碎机打成匀浆,取 2.00 g

芥菜匀浆置于进样瓶内密封,在 60 ℃条件下平衡 5 min 后,将萃取头插入进样瓶中萃取 40 min,取出,进样,于 250 ℃下解吸 5 min,启动仪器采集数据,每个样品平行测定 3 次。

(2) GC 条件: 初始温度 40 ℃,保持 1 min,以 3 ℃/min 上升至 190 ℃,再以 10 ℃/min 上升至 240 ℃,保持 5 min。

(3) MS 条件: 离子源温度 230 ℃;扫描范围 m/z 30~550;四极杆温度 150 ℃。

1.2.5 发酵芥菜感官评价 根据文献[19],修改如下:取发酵 8 d 芥菜样品切分为约 2 cm×2 cm×1 cm 的长方体放入品尝杯中,由 20 名经专业培训的评审员(10 男 10 女)组成的感官评价小组分别对发酵芥菜的香气、色泽、味道、口感和综合喜爱度进行评分,采取盲评模式,各指标最高 20 分,总分为 100 分(如表 3 所示),去除最高分和最低分后,取平均分为发酵芥菜最后的得分。

表 3 感官评价标准

Table 3 Sensory evaluation criteria

指标	评价标准	分值
香气	具有典型的酸香味和独特的发酵风味,啤酒味与芥菜本身气味和谐融合,增强整体发酵香味,香气清新且有层次感	16~20
	酸香味和发酵风味适中,无刺鼻气味,啤酒掩盖芥菜原本风味,让人感觉到不自然或者过度调味	9~15
	无发酵香味,有腐败、酸败、霉变或其他不良气味	0~8
色泽	颜色鲜亮有光泽,通常为淡黄色,形态完整且饱满没有明显的褐变或不均匀的颜色,发酵液清澈透明,带有自然的淡黄色	16~20
	颜色略暗且较均匀,略有褐变和不均匀的颜色,形态上无过度萎缩或塌陷,发酵液较为清澈,不浑浊	9~15
	出现褐色、灰色或发黑的斑点,菜过于萎缩、干枯或变形严重,发酵液浑浊或发黑	0~8
味道	口感上带有清新的酸味,不过度强烈,酸度适中;咸味适中,不过于突出且与酸味相平衡	16~20
	口感较为清新,酸度略强烈;咸味略重或略淡,较为突出,与酸味平衡的较为一般	9~15
	口感差,酸味过于强烈;咸味过于重,导致口感不适	0~8
口感	口感上有一定的爽脆感且保持适度的纤维化,保持轻微的韧性与弹性	16~20
	口感上略有松软,韧性和弹性上较为不足	9~15
	口感上过于软塌,失去原有的脆感或过硬,咀嚼困难,影响口感	0~8
综合喜爱度	按照整体喜爱度进行打分	0~20

1.3 数据处理

挥发性风味物质数据处理由 GC-MS 工作站完成,各组分与 NIST 谱库进行对照分析,匹配度不低于 80 的计入结果,用匹配度和保留指数进行定性,采用峰面积百分比法计算各组分相对含量;pH、亚硝酸盐、总酸、还原糖和质构数据采用 SPSS24 软件进行统计学分析,所有试验均重复 3 次,所得结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用单因素 ANOVA 分析。

2 结果与分析

2.1 二次发酵芥菜感官评价

如图 1 所示,各样品间色泽差异不显著;添加啤酒后,

芥菜的香气和味道显著提升,这与挥发性风味化合物的测定结果一致,但口感评分显著下降,主要是二次发酵过程中芥菜组织软化,导致脆度和硬度下降。添加原浆啤酒与 0.5% 乳酸钙溶液组的评分最高(为 85),在香气、口感、味道和综合喜爱度方面均优于其他组,而添加发酵液组的感官评分最低(为 71)。发酵液中添加啤酒能够显著提升二次发酵芥菜的风味,但会导致脆度和硬度的下降。向发酵液中添加乳酸钙能够增加硬度,有效改善芥菜质地。发酵液组成对二次发酵芥菜的感官品质具有显著影响,进而影响其质地与风味。合适的泡菜液的组成在提升二次发酵芥菜品质方面发挥着至关重要的作用。

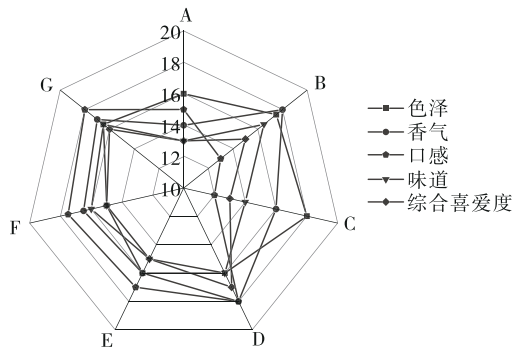


图1 二次发酵芥菜感官评价雷达图

Figure 1 Sensory evaluation radar chart of secondary fermented mustard greens

2.2 二次发酵时间对芥菜 pH、总酸、亚硝酸盐和还原糖含量的影响

芥菜二次发酵过程中 pH 和总酸的变化如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 发酵初期(0~2 d) pH 值变化并不显著, 这是由于乳酸菌在发酵前期还不是发酵体系中的主要微生物, 发酵启动速度较慢^[21]。2 d 后, 乳酸菌迅速生长, 不断产酸, 导致 pH 迅速下降, 酸度增加。随着泡菜液中的糖逐渐消耗, 乳酸菌生长缓慢使 pH 趋于稳定。当发酵芥菜的 pH 低于 4.0 且总酸含量超过 3 g/kg 时, 通常被认为已达

到成熟状态^[22]。咸芥菜坯在漂洗过程中总酸降低且芥菜在高盐保存过程中糖类物质已消耗殆尽, 而乳酸菌和酵母菌生长所需的碳源大部分来自泡菜液中的营养物质, 导致二次发酵芥菜的总酸含量较低(仅 5.38 g/kg), 显著低于用新鲜芥菜发酵时的总酸含量 9.80 g/kg^[23]。发酵液中添加啤酒使芥菜总酸含量显著升高, 这可能与啤酒中存在的糖类物质被发酵产酸有关^[24]。

亚硝酸盐是蔬菜发酵过程中产生的有害化合物^[25]。由图 2(c) 可知, 在未添加乳酸钙溶液组中, 亚硝酸盐含量呈先上升后下降趋势, 在发酵 2~4 d 时出现“亚硝峰”, 最高为 (8.23 ± 0.07) mg/kg, 发酵 6~8 d 时亚硝酸盐含量趋于稳定。乳酸钙溶液的添加减少了亚硝酸盐的产生, 与 Yang 等^[26]的研究结果相似。二次发酵过程中亚硝酸盐的含量均很低, 主要是因为二次发酵前对芥菜坯进行了漂洗脱盐处理, 洗去了一部分杂菌同时乳酸菌发酵快速酸化, 抑制了有害菌的生长和亚硝酸盐的产生^[27]。

由图 2(d) 可知, 二次发酵芥菜的还原糖含量呈逐渐降低趋势, 并在 6~8 d 时趋于稳定。咸芥菜坯初始还原糖含量为 1.18%, 显著低于用新鲜芥菜发酵时的^[28]。而微生物生长代谢需要碳源, 将还原糖作为营养物质分解成乳酸、乙醇和二氧化碳, 并产生多种成分^[29]; 发酵液中添加的原浆啤酒和熟啤成为微生物生长的主要来源, 随着发

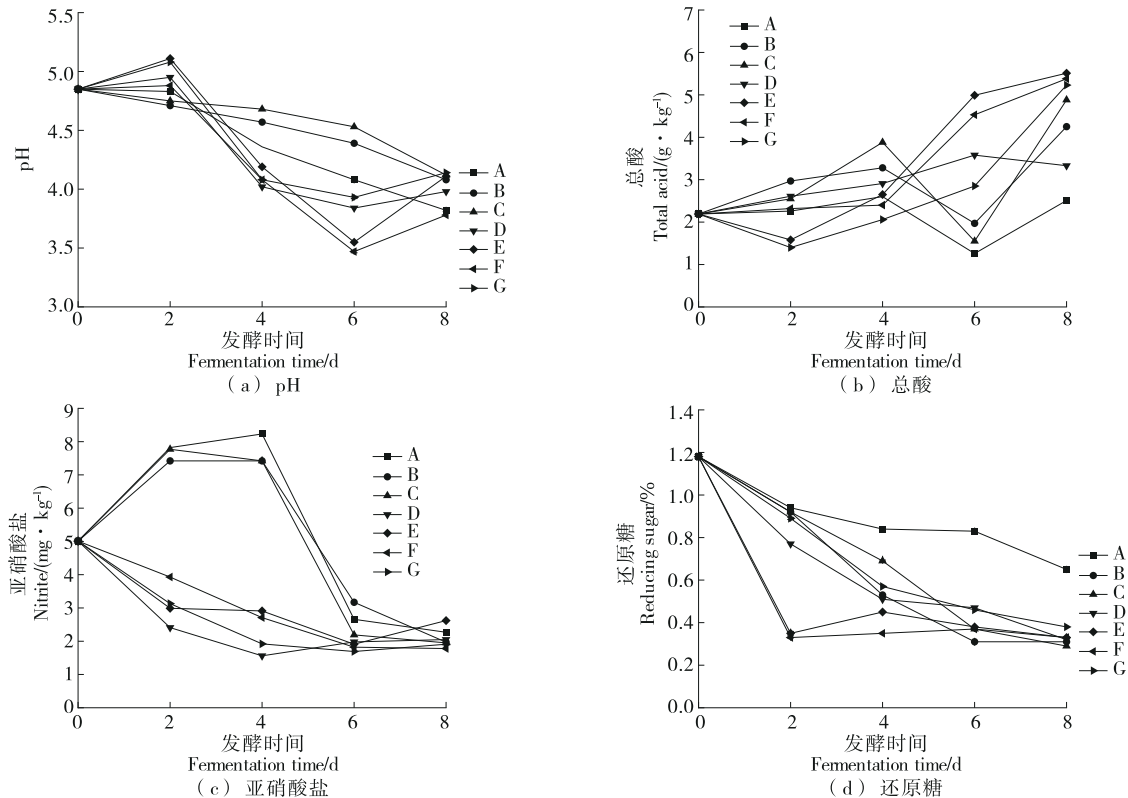


图2 二次发酵芥菜理化指标的变化

Figure 2 Physiochemical indicator changes of secondary fermented mustard greens

酵过程的进行,大量微生物生长繁殖消耗碳源,可能是乳酸菌和酵母菌在代谢上相互作用,有利于发酵的进行^[13]。

2.3 二次发酵时间对芥菜质构的影响

如图 3 所示,二次发酵后芥菜的脆度和硬度均呈下降趋势。芥菜在二次发酵过程中伴随着组织软化和脆度降低,可能是由于微生物分泌果胶酶,使得原果胶在果胶酶的作用下生成可溶性果胶,可溶性果胶在酸性环境下进一步分解成果胶酸使得果蔬组织软烂^[30-32]。而果胶酸可以与 Ca^{2+} 结合形成粘度较大的不溶性果胶酸钙,减少酶与果胶的结合,从而使脆度上升^[33]。发酵液中添加适

量的乳酸钙溶液可以有效改善芥菜的脆度和硬度,加入 0.5% 和 1% 乳酸钙溶液后,脆度和硬度显著上升。这与叶阳等^[34]采用 Ca^{2+} 对芥菜保脆的研究结果类似。

2.4 泡菜液组成对二次发酵芥菜挥发性风味物质的影响

2.4.1 挥发性风味物质分析 采用 SPME-GC-MS 对 7 组二次发酵芥菜的挥发性风味物质进行分析,共检测出 144 种挥发性化合物,即 36 种酯类、20 种酮类、18 种烯类、16 种醇类、15 种醛类、12 种酸类、6 种酚类、6 种硫醚类、6 种烃类、4 种萜烯类、2 种腈类、2 种吡嗪类、1 种胺类,见表 4。

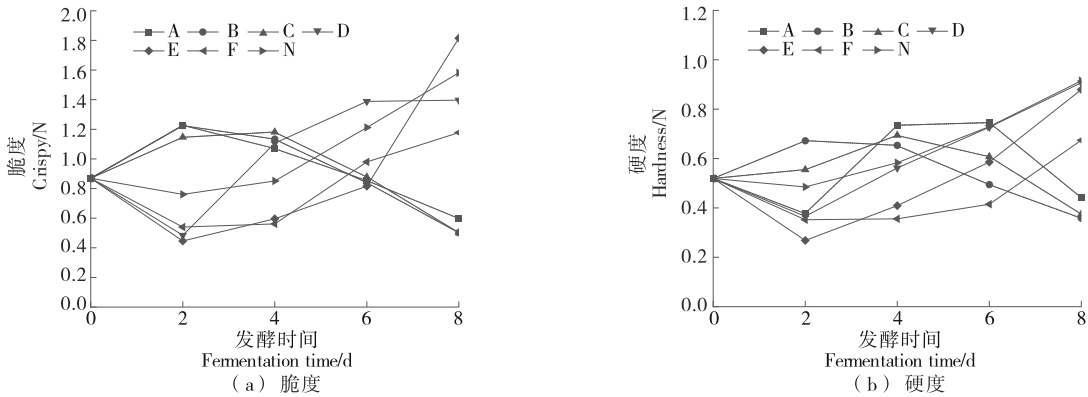


图 3 二次发酵过程中芥菜脆度与硬度的变化

Figure 3 Changes of brittleness and hardness of mustard greens during secondary fermentation

表 4 二次发酵芥菜挥发性风味化合物汇总表[†]

Table 4 Volatile flavor compounds in secondary fermented mustard greens

化合物 种类	化合物名称	CAS 号	相对含量/%							VIP >1
			1	2	3	4	5	6	7	
酯类	乙酸乙酯	141-78-6	1.72	11.99	12.04	3.82	1.40	1.76	6.32	Y
	丁酸乙酯	105-54-4	0.05	0.02	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	
	乙酸异戊酯	123-92-2	0.64	0.25	0.28	0.55	0.56	0.09	0.97	Y
	正己酸乙酯	123-66-0	1.01	0.20	0.19	0.78	0.75	0.16	0.13	
	异丁酸异戊酯	2445-69-4	0.10	0.20	0.19	0.10	0.14	0.22	0.42	
	辛酸甲酯	111-11-5	0.17	0.08	0.08	0.10	0.16	0.15	0.13	
	顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯	53398-85-9	0.24	0.19	0.18	0.16	0.23	0.17	0.49	
	异戊酸己酯	10032-15-2	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	
	苯乙酸乙酯	101-97-3	0.45	0.48	0.45	0.24	0.64	1.61	0.96	
	乙酸苯乙酯	103-45-7	0.94	0.44	0.37	0.47	0.85	0.14	0.46	
	壬酸乙酯	123-29-5	0.09	0.04	0.04	0.05	0.07	0.04	0.05	
	癸酸甲酯	110-42-9	0.09	0.04	0.04	0.03	0.06	0.04	0.05	
	(E,E)-3-己烯基 2-甲基-2-丁烯酸酯	84060-80-0	0.05	0.06	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	
	3-苯丙酸乙酯	2021-28-5	0.48	0.32	0.29	0.16	0.56	0.90	0.58	
	丙位壬内酯	104-61-0	0.22	0.36	0.38	0.23	0.24	0.47	0.07	
	辛酸异戊酯	2035-99-6	0.20	0.10	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	
	邻苯二甲酸二甲酯	131-11-3	0.03	0.06	0.08	0.04	0.04	0.13	0.09	
	异戊酸苯乙酯	140-26-1	0.07	0.04	0.06	0.07	0.04	0.08	0.19	

续表 4

化合物 种类	化合物名称	CAS 号	相对含量/%							VIP >1
			1	2	3	4	5	6	7	
酯类	十一酸乙酯	627-90-7	0.06	0.05	0.04	0.06	0.08	0.06	0.07	
	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	0.09	0.17	0.21	0.11	0.08	0.27	0.38	
	辛酸乙酯	106-32-1	8.12	0.89	0.69	4.15	5.76	0.50	0.40	Y
	异戊酸己酯	10032-15-2	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	
	癸酸乙酯	110-38-3	5.75	2.06	1.36	2.31	3.02	1.06	1.01	Y
	乙基-9-癸烯酸酯	67233-91-4	0.23	0.06	0.03	0.09	0.14	0.02	0.02	
	月桂酸甲酯	111-82-0	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	
	月桂酸乙酯	106-33-2	2.07	1.33	0.80	0.75	0.64	0.54	0.54	Y
	癸酸异戊酯	2306-91-4	0.21	0.14	0.10	0.05	0.03	0.06	0.07	
	十四酸乙酯	124-06-1	0.13	0.16	0.13	0.14	0.14	0.20	0.19	
	十五酸乙酯	41114-00-5	0.03	0.07	0.05	0.06	0.04	0.07	0.08	
	棕榈酸甲酯	112-39-0	0.28	0.66	0.62	0.58	0.55	1.00	1.30	
	棕榈酸乙酯	628-97-7	0.65	1.39	1.29	1.46	1.36	2.08	2.13	Y
	棕榈酸异丙酯	142-91-6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	
	顺-9-十六碳烯酸乙酯	56219-10-4	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	
	顺式-3-己烯醇 2-甲基丁酸酯	53398-85-9	0.24	0.19	0.18	0.16	0.23	0.17	0.49	
	(Z)-十六烯酸甲酯	1120-25-8	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	
	3,7,11-三甲基-2,6,10-十二烷三烯-1-醇乙酸酯	29548-30-9	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	
酮类	2,3-丁二酮	431-03-8	0.60	0.31	0.27	0.61	0.43	0.67	1.03	
	3-戊酮	96-22-0	0.17	0.38	0.51	0.17	0.21	0.71	1.68	
	2-庚酮	110-43-0	0.07	0.32	0.22	0.13	0.08	0.24	0.65	
	3-辛酮	106-68-3	0.19	0.22	0.23	0.14	0.24	0.49	0.69	
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	0.72	1.07	0.85	0.47	0.52	1.21	2.26	Y
	3,3-二甲基环己酮	2979-19-3	0.05	0.10	0.12	0.05	0.04	0.15	0.25	
	2,2,6-三甲基环己酮	2408-37-9	0.10	0.14	0.20	0.06	0.06	0.21	0.32	
	2-壬酮	821-55-6	0.17	0.20	0.18	0.13	0.10	0.14	0.46	
	2-茨酮	464-49-3	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.12	0.13	
	2-甲基-5-异丙基-2-环己烯-1-酮	33375-08-5	0.06	0.05	0.05	0.02	0.07	0.17	0.10	
	甲基壬基甲酮	112-12-9	0.20	0.16	0.17	0.11	0.08	0.10	0.37	
	脱氢二氢母紫罗兰酮	20483-36-7	0.08	0.07	0.05	0.02	0.04	0.07	0.18	
	α -紫罗兰酮	127-41-3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	
	β -二氢紫罗兰酮	17283-81-7	0.07	0.05	0.04	0.02	0.02	0.05	0.23	
	6-甲基-6-(5-甲基呋喃-2-基)庚酮	50464-95-4	0.08	0.06	0.06	0.04	0.05	0.11	0.09	
	香叶基丙酮	3796-70-1	0.63	0.93	0.51	0.40	0.28	0.65	1.13	
	4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	1203-08-3	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.12	0.12	
	β -紫罗兰酮	79-77-6	1.19	1.54	2.07	1.38	0.86	1.81	3.17	Y
	2-十三烷酮	593-08-8	0.07	0.08	0.07	0.05	0.03	0.07	0.21	
	植酮	502-69-2	0.04	0.13	0.09	0.06	0.05	0.23	1.03	
烯类	苯乙烯	100-42-5	2.96	0.91	0.34	1.40	3.07	0.74	0.15	
	邻二甲苯	95-47-6	0.04	0.04	0.06	0.03	0.02	0.06	0.09	
	1,2,3,4-四甲基苯	488-23-3	0.18	0.10	0.08	0.05	0.13	0.11	0.24	
	萘	91-20-3	0.10	0.08	0.09	0.06	0.06	0.12	0.15	
	2-甲基-5-(1-甲基乙基)-双环[3.1.0]-2-己烯	2867-05-2	0.20	0.41	0.12	0.01	0.02	0.11	0.41	Y
	(E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	23726-93-4	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	

续表 4

化合物 种类	化合物名称	CAS 号	相对含量/%							VIP >1
			1	2	3	4	5	6	7	
烯类	六氢假紫罗酮	1604-34-8	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.04	0.08	
	1,3,4,6,7,8-六氢-4,6,6,7,8,8-六甲基环五- γ -2-苯并吡喃	1222-05-5	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	
	3-甲基环新烯 3-溴环辛烯	13152-05-1	0.25	0.35	0.68	0.19	0.22	0.13	0.82	
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	0.23	0.34	0.39	0.19	0.36	0.64	0.61	
	(<i>E,E</i>)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	0.19	0.52	0.40	0.24	0.17	0.66	0.76	
	(<i>R</i>)-1-甲基-5-(1-甲基乙烯基)环己烯	1461-27-4	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.03	0.05	
	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	30364-38-6	0.37	0.29	0.23	0.18	0.19	0.31	0.61	
	1-丁基-4-烯丙基苯	25163-88-6	0.07	0.06	0.07	0.05	0.04	0.07	0.12	
	十五烯	13360-61-7	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	
	α -法呢烯	502-61-4	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	
	正十五烷	629-62-9	0.06	0.07	0.10	0.06	0.04	0.13	0.18	
	1-十六烯	629-73-2	0.05	0.08	0.09	0.06	0.04	0.16	0.23	
	2-甲基-1-丙醇	78-83-1	1.08	3.04	1.55	2.41	1.19	0.88	1.64	Y
	异戊醇	123-51-3	9.69	6.01	9.87	15.15	12.73	7.31	3.57	
	2-甲基-1-丁醇	137-32-6	4.88	3.92	4.08	6.14	4.55	2.13	1.39	Y
醇类	正戊醇	71-41-0	1.01	1.44	1.49	1.23	1.27	2.25	3.76	
	正己醇	111-27-3	0.26	0.65	0.67	0.22	0.32	0.75	1.57	
	(<i>E</i>)-3-己烯-1-醇	928-97-2	0.29	0.66	0.63	0.17	0.34	1.72	2.17	
	正庚醇	111-70-6	0.44	0.37	0.63	0.19	0.39	0.57	1.56	
	2-乙基己醇	104-76-7	0.08	0.12	0.18	0.07	0.04	0.08	0.50	
	芳樟醇	78-70-6	0.12	0.10	0.12	0.08	0.09	0.17	0.13	
	1-辛醇	111-87-5	0.51	0.73	0.87	0.42	0.32	0.22	1.75	
	顺-A,A-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	5989-33-3	0.03	0.05	0.04	0.01	0.02	0.08	0.07	
	苯乙醇	60-12-8	12.81	17.32	16.03	15.73	14.28	19.88	6.60	
	α -松油醇	98-55-5	0.14	0.15	0.15	0.09	0.12	0.17	0.16	
	香叶醇	106-24-1	0.03	0.13	0.20	0.04	0.01	0.04	0.06	
	2,4,7,9-四甲基-5-癸炔-4,7-二醇	126-86-3	0.06	0.15	0.08	0.04	0.07	0.02	0.01	
	反式-2-壬烯-1-醇	31502-14-4	0.07	0.07	0.07	0.04	0.03	0.09	0.09	
	异戊醛	590-86-3	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.05	0.04	
	反式-2-戊烯醛	1576-87-0	0.03	0.05	0.07	0.03	0.02	0.08	0.22	
醛类	正己醛	66-25-1	0.05	0.08	0.12	0.04	0.02	0.11	0.23	
	正庚醛	111-71-7	0.15	0.22	0.28	0.10	0.10	0.28	0.33	
	苯甲醛	100-52-7	0.31	0.53	0.60	0.34	0.34	0.72	1.12	
	苯乙醛	122-78-1	0.69	1.60	1.46	0.67	0.79	2.17	2.58	Y
	壬醛	124-19-6	1.09	1.38	1.65	0.86	0.46	1.09	1.86	Y
	反式-2,6-壬二醛	17587-33-6	0.08	0.14	0.16	0.07	0.06	0.21	0.29	
	藏红花醛	116-26-7	0.14	0.14	0.14	0.10	0.15	0.30	0.30	
	癸醛	112-31-2	0.67	0.64	0.68	0.55	0.51	0.88	1.10	
	β -环柠檬醛	432-25-7	0.28	0.27	0.34	0.18	0.17	0.40	0.65	
	2,6,6-三甲基-1-环己烯基乙醛	472-66-2	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.05	0.06	
	2-十一烯醛	2463-77-6	0.04	0.07	0.05	0.02	0.03	0.07	0.11	
	十二醛	112-54-9	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.07	0.09	

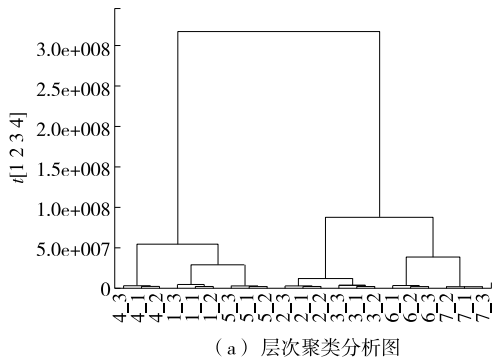
续表 4

化合物 种类	化合物名称	CAS 号	相对含量/%							VIP >1
			1	2	3	4	5	6	7	
醛类	十三醛	10486-19-8	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	0.08	
酸类	异戊酸	503-74-2	0.32	0.66	0.67	0.30	0.29	1.16	0.55	
	2-甲基丁酸	116-53-0	0.29	0.51	0.56	0.26	0.19	0.74	0.48	Y
	正己酸	142-62-1	2.41	1.97	2.24	2.82	2.62	1.79	0.73	
	庚酸	111-14-8	0.12	0.29	0.21	0.13	0.14	0.25	0.08	
	2-乙基己酸	149-57-5	0.04	0.10	0.08	0.05	0.05	0.06	0.08	
	辛酸	124-07-2	10.90	4.85	5.79	12.94	11.92	2.88	1.06	Y
	正壬酸	112-05-0	2.26	4.80	4.35	3.34	2.60	1.39	0.19	
	8-甲基壬酸	5963-14-4	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	
	正癸酸	334-48-5	2.01	1.38	1.70	2.51	2.48	0.70	0.40	Y
	月桂酸	143-07-7	0.29	0.78	0.97	0.60	0.31	0.05	0.11	
	十五烷酸甲醚	7132-64-1	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	
	(6Z)-14-甲基-6-十五烯酸	682751-34-4	0.01	0.03	0.04	0.02	0.01	0.04	0.04	
酚类	4-乙基苯酚	123-07-9	3.22	3.33	2.71	1.72	4.04	7.89	6.85	
	4-乙基-2-甲氧基苯酚	2785-89-9	0.93	0.88	0.83	0.20	0.87	1.70	1.36	Y
	4-乙烯基愈创木酚	7786-61-0	0.72	0.51	0.25	0.38	1.00	0.85	0.16	Y
	3,5-双(1-甲基乙基)苯酚	26886-05-5	0.36	0.54	0.41	0.17	0.47	1.40	0.83	
	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	128-37-0	0.11	0.12	0.11	0.06	0.06	0.18	0.39	
	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	0.04	0.06	0.06	0.05	0.03	0.08	0.11	
硫醚类	异硫氰酸烯丙酯	57-06-7	4.91	4.64	5.30	4.76	6.94	8.54	9.45	
	烯丙基甲基二硫醚	2179-58-0	0.07	0.06	0.06	0.03	0.06	0.09	0.16	
	二甲基三硫	3658-80-8	0.34	0.56	0.49	0.30	0.34	0.53	1.39	
	甲基烯丙基三硫醚	34135-85-8	0.05	0.06	0.05	0.03	0.05	0.10	0.12	
	烯丙基硫醇	870-23-5	0.06	0.07	0.04	0.02	0.05	0.11	0.08	
	二甲基二硫	624-92-0	0.13	0.18	0.21	0.09	0.13	0.21	0.59	
萜烯类	茶香螺烷	36431-72-8	0.23	0.13	0.14	0.03	0.04	0.07	0.14	
	α -姜黄烯	644-30-4	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	
	β -红没药烯	495-61-4	0.04	0.06	0.04	0.03	0.01	0.04	0.07	
	柏木脑	77-53-2	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.06	
烃类	3-甲基戊烷	96-14-0	0.05	0.07	0.05	0.02	0.01	0.06	0.09	
	2,6,10-三甲基十三烷	3891-99-4	0.04	0.05	0.04	0.02	0.02	0.06	0.09	
	姥鲛烷	1921-70-6	0.04	0.06	0.07	0.04	0.03	0.10	0.14	
	正十七烷	629-78-7	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.06	
	植烷	638-36-8	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.05	0.06	
	甲苯	108-88-3	0.06	0.09	0.24	0.08	0.07	0.17	0.67	
腈类	环丙基腈	5500-21-0	0.40	0.84	0.50	0.23	0.47	1.30	1.78	Y
	苯代丙腈	645-59-0	0.23	0.22	0.16	0.04	0.32	0.86	0.49	
吡嗪类	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	25773-40-4	0.06	0.05	0.05	0.02	0.06	0.14	0.10	
	2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪	24168-70-5	0.10	0.06	0.06	0.03	0.09	0.16	0.12	
胺类	N,N-二丁基甲酰胺	761-65-9	0.10	0.22	0.05	0.03	0.09	0.19	0.37	

† 1~7 分别代表添加原浆啤酒+0.5%乳酸钙组、添加熟啤+0.5%乳酸钙组、添加原浆啤酒+1%乳酸钙组、添加熟啤+1%乳酸钙组、添加原浆啤酒组、添加熟啤组和添加发酵液组;VIP 表示变量重要性投影,Y 表示 VIP>1。

由表 4 和图 4 可知,二次发酵芥菜中主要的挥发性物质为醇类、酯类和酸类,醇类物质是发酵芥菜中常见的挥发性风味物质,通常具有令人愉悦的香气;酯类物质通常呈现果香和花香^[35],与 Mei 等^[36]的研究结果一致。添加原浆啤酒组和添加发酵液组相比,醇类物质含量增加了 10.74%,主要是苯乙醇和异戊醇的含量增加,苯乙醇具有蜂蜜香和玫瑰香,是酵母菌的代谢产物,来源于乙醇发酵过程中苯丙氨酸的降解^[37]。而异戊醇带有果香和乙醇味,略有甜味,多为酿酒酵母在乙醇发酵过程中产生^[38],发酵液中添加原浆啤酒提升了芥菜的风味,改善了二次发酵芥菜的感官品质。酯类物质总含量变化不大,但辛酸乙酯(花香)和葵酸乙酯(果香)的含量分别增加了 5.36% 和 2.01%,赋予产品果香和甜香^[39],使发酵芥菜呈现更丰富的感官特性。酸类物质含量增加了 16.89%,尤其以辛酸和葵酸最为显著,分别增加了 10.86% 和 2.08%,辛酸具有果香味、糖果味、奶酪味等多种风味,而葵酸具有花果香和甜香^[40]。酮类物质和醛类总含量减少,但 β -紫罗兰酮和壬醛含量上升显著, β -紫罗兰酮和壬醛带有花香^[41],使得发酵产物变得更加易被人接受。

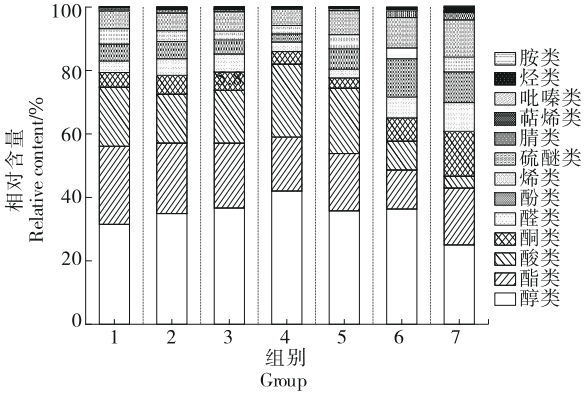
为明确芥菜二次发酵过程中挥发性化合物的整体变化规律,对 7 组芥菜样品进行主成分分析(PCA),由图 5 可知,聚类分析将芥菜二次发酵后的芥菜根据不同发酵液组成分为 4 类。第 1 类为添加熟啤+1%乳酸钙组;第 2 类为添加原浆啤酒+0.5%乳酸钙组和添加原浆啤酒组;第 3 类为添加熟啤+0.5%乳酸钙组和添加原浆啤酒+1%乳酸钙组;第 4 类为添加熟啤组和添加发酵液组。PC1 和 PC2 的累积贡献率为 75.10%,添加原浆啤酒组和添加发酵液组分别位于坐标轴的两侧,说明两组之间挥发性风味物质有差异,添加原浆啤酒对二次发酵芥菜风味有显著影响。



1~7 分别代表添加原浆啤酒+0.5%乳酸钙组、添加熟啤+0.5%乳酸钙组、添加原浆啤酒+1%乳酸钙组、添加熟啤+1%乳酸钙组、添加原浆啤酒组、添加熟啤组和添加发酵液组

图 5 二次发酵芥菜层次聚类分析图和主成分分析图

Figure 5 Hierarchical cluster analysis and principal component analysis of secondary fermented mustard greens



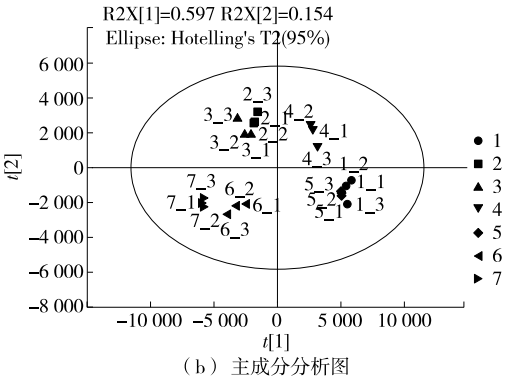
1~7 分别代表添加原浆啤酒+0.5%乳酸钙组、添加熟啤+0.5%乳酸钙组、添加原浆啤酒+1%乳酸钙组、添加熟啤+1%乳酸钙组、添加原浆啤酒组、添加熟啤组和添加发酵液组

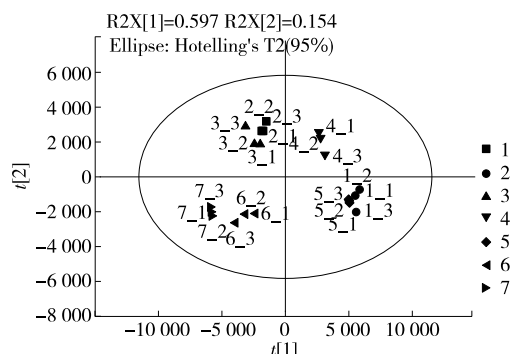
图 4 二次发酵芥菜各类挥发性物质占比

Figure 4 Various volatile substance proportion in secondary fermented mustard greens

2.4.2 挥发性成分特征香气分析 为进一步分析各组之间的挥发性风味物质,明确泡菜液组成对二次发酵芥菜的影响,对各组二次发酵芥菜挥发性风味物质建立 PLS-DA 模型,如图 6 所示,与 PCA 鉴定结果一致,各组挥发性风味物质存在显著差异。共鉴定出 $VIP > 1$ 的差异物质 19 种,包括 6 种酯类、3 种酸类、2 种醇类、2 种醛类、2 种酮类、2 种酚类、1 种烯类和 1 种腈类,详见表 4 中标注 $VIP > 1$ 的组分。

将 19 种挥发性风味物质相对含量进行聚类热图分析,结果如图 7 所示。辛酸乙酯、乙酸苯乙酯、葵酸乙酯和月桂酸乙酯是添加原浆啤酒与 0.5%乳酸钙组中的特征挥发性风味成分,这些物质大多数带有花香和果香,使发酵芥菜呈现更丰富的气味^[1]。乙酸乙酯、2-甲基-1-丙醇和 2-





1~7 分别代表添加原浆啤酒+0.5% 乳酸钙组、添加熟啤+0.5% 乳酸钙组、添加原浆啤酒+1% 乳酸钙组、添加熟啤+1% 乳酸钙组、添加原浆啤酒组、添加熟啤组和添加发酵液组

图6 各组挥发性风味物质 PLS-DA 分析

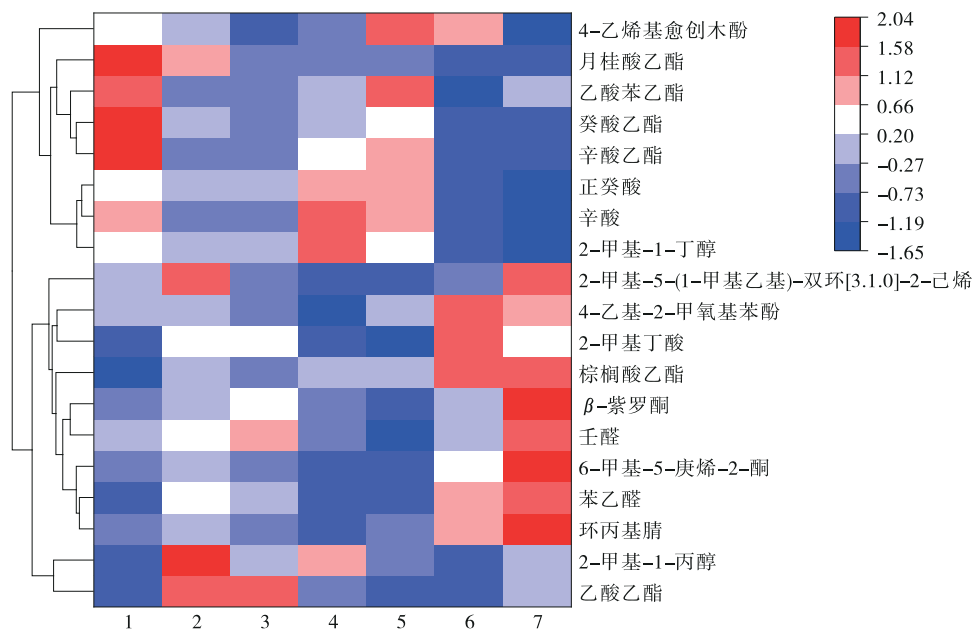
Figure 6 PLS-DA analysis of volatile flavor components in each group

甲基-5-(1-甲基乙基)-双环[3.1.0]-2-己烯为添加熟啤与 0.5% 乳酸钙组中的特征挥发性风味成分,分别呈现果香、乙醇香和木质植物香气^[42]。添加原浆啤酒与 1% 乳酸钙组中的特征挥发性风味成分为乙酸乙酯和壬醛,壬醛带有酯香和花果香^[43]。添加熟啤与 1% 乳酸钙组中的特征挥发性风味成分为 2-甲基-1-丁醇和辛酸,前者具有一种甜美、略带果香的气味,后者气味比较强烈,带有浓烈的脂肪酸气味。乙酸苯乙酯和 2-甲氧基-4-乙基酚是添加

原浆啤酒组中的特征挥发性风味成分,乙酸苯乙酯带有花香,2-甲氧基-4-乙基酚呈香辛料和丁香的香气^[44]。2-甲基丁酸、4-乙基-2-甲氧基苯酚和棕榈酸乙酯是添加熟啤组中的特征挥发性风味成分,2-甲基丁酸具有发酵和酸味,4-乙基-2-甲氧基苯酚呈现温和、甜美的香气,棕榈酸乙酯则有油脂感和奶油香。环丙基腈、6-甲基-5-庚烯-2-酮和 β -紫罗酮是添加发酵液组中的特征挥发性风味成分,环丙基腈气味较为刺鼻且具有化学感的辛辣香气,6-甲基-5-庚烯-2-酮带有清新的热带果香,而 β -紫罗酮则呈现甜美的花香气息^[45]。综上所述,加入原浆啤酒二次发酵能赋予芥菜更丰富的挥发性风味物质,使其具有更浓厚的花香和果香,减少了刺激性辛辣气味。

3 结论

二次发酵有利于提升芥菜的品质和风味,能弥补咸芥菜坯漂洗脱盐后风味不足,在二次发酵过程中乳酸菌和酵母菌进一步利用泡菜液中的营养成分,使得发酵产物更加丰富,添加原浆啤酒和 0.5% 乳酸钙组感官评分最高,挥发性风味物质中醇类、酯类和酸类物质增加 20% 以上,其中带花香和果香的辛酸乙酯和乙酸苯乙酯等增多,辛辣气味减少。原浆啤酒中存在的啤酒酵母参与了芥菜的二次发酵,产生了乙酸苯乙酯和 2-甲氧基-4-乙基酚等特征挥发性风味成分,赋予芥菜一定的花香和果香味,并减少了刺激性辛辣气味。发酵液中添加原浆啤酒会导



1~7 分别代表添加原浆啤酒+0.5% 乳酸钙组、添加熟啤+0.5% 乳酸钙组、添加原浆啤酒+1% 乳酸钙组、添加熟啤+1% 乳酸钙组、添加原浆啤酒组、添加熟啤组和添加发酵液组

图7 主要挥发性化合物聚类热图

Figure 7 Cluster heat map of main volatile compounds

致脆度和硬度下降,同时添加 0.5% 乳酸钙溶液可以改善芥菜二次发酵过程中组织软化的问题,使脆度和硬度分别提升 61% 和 75%。二次发酵技术为提升芥菜风味和品质提供了新思路,未来可通过优化菌群调控和工艺创新,开发更健康、风味丰富的发酵蔬菜产品。

参考文献

- [1] 李子怡,王锋,赵玲艳,等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和多元统计学分析华容芥菜的特征挥发性风味成分[J]. 中国酿造, 2024, 43(3): 234-242.
- LI Z Y, WANG F, ZHAO L Y, et al. Analysis of characteristic volatile flavor components of Huarong mustard based on HS-SPME-GC-MS and multivariate statistics[J]. China Brewing, 2024, 43(3): 234-242.
- [2] 巢雨舟,邓放明. 腌渍芥菜二次发酵工艺优化及其挥发性成分分析[J]. 中国酿造, 2015, 34(4): 35-41.
- CHAO Y Z, DENG F M. Optimization of second fermentation condition for pickled mustard and analysis of volatile compounds[J]. China Brewing, 2015, 34(4): 35-41.
- [3] 唐蓉,陈骏飞,杨海泉,等. 乳酸菌与酵母菌联合发酵对芥菜理化性质及保藏期品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 141-148.
- TANG R, CHEN J F, YANG H Q, et al. Effects of lactic acid bacteria and yeast co-fermentation on the physicochemical properties and storage period quality of mustard[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 141-148.
- [4] 陈骏飞,唐蓉,王晖,等. 低酸泡菜发酵乳酸菌与酵母菌筛选及其共发酵研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(2): 134-139.
- CHEN J F, TANG R, WANG H, et al. Screening and co-fermentation of lactic acid bacteria and yeasts for low-acid Paocai[J]. China Brewing, 2024, 43(2): 134-139.
- [5] 黄玉立,赵楠,黄庆,等. 发酵蔬菜风味物质形成机制及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 279-285.
- HUANG Y L, ZHAO N, HUANG Q, et al. Research progress in formation mechanism and influencing factors of flavor compounds in fermented vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 279-285.
- [6] ZHAO N, LAI H, WANG Y, et al. Assessment of biogenic amine and nitrite production in low-salt Paocai during fermentation as affected by reused brine and fresh brine[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100958.
- [7] 黄丽慧,张雁,魏振承,等. 响应面法优化香辛料调控发酵芥菜亚硝酸盐含量的工艺[J]. 中国食品学报, 2013, 13(11): 61-70.
- HUANG L H, ZHANG Y, WEI Z C, et al. Optimization of controlling effect of spices on nitrites in fermented mustard using response surface analysis[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(11): 61-70.
- [8] 阿丽亚·阿达力,梅时勇,张冀芳,等. 优势乳酸发酵菌株筛选、鉴定及对发酵萝卜风味品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 53-61.
- ADALI A L Y, MEI S Y, ZHANG J F, et al. Screening of dominant lactic acid fermentation strains, identification and effect on flavor quality of fermented radish[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 53-61.
- [9] 刘振恒,阴耕云,肖冬,等. 泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及发酵工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(9): 125-132, 172.
- LIU Z H, YIN G Y, XIAO D, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria from pickles and optimization of fermentation process[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(9): 125-132, 172.
- [10] 刘永衡,陈彬,王学英. 啤酒酵母酿造葡萄酒及香气成分 GC-MS 分析研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 171-175.
- LIU Y H, CHEN B, WANG X Y. Wine brewed with beer yeast and analysis of aroma components by GC-MS[J]. China Brewing, 2020, 39(12): 171-175.
- [11] 张锦峰. 乳酸菌和酵母菌直投式发酵剂的研制及其协同发酵辣椒酱的工艺研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 4.
- ZHANG J F. The development of directed vat set starter for lactic acid bacteria and yeast and study on the synergistic fermentation chili sauce[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 4.
- [12] ZHANG X, HAN J, ZHENG X, et al. Use of Lactiplantibacillus plantarum ZJ316 as a starter culture for nitrite degradation, foodborne pathogens inhibition and microbial community modulation in pickled mustard fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100344.
- [13] 陈偲,张明,付竹贤,等. 乳酸菌与酵母菌的复配筛选及在传统泡菜中应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 155-163.
- CHEN C, ZHANG M, FU Z X, et al. Screening a combination of lactic acid bacteria and yeast and application in traditional pickle[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 155-163.
- [14] 王哲铭,王成财,朱立宏,等. 模糊数学结合响应面法优化啤酒鱼的煮制工艺[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 161-168.
- WANG Z M, WANG C C, ZHU L H, et al. Optimization of boiling process of beer fish by fuzzy mathematics combined with response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 161-168.
- [15] 周莺茹,袁先铃,杜冬梅,等. 烫漂结合氯化钙对大头菜预处理工艺研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(10): 81-88.
- ZHOU Y R, YUAN X L, DU D M, et al. Study on pretreatment process of kohlrabi by blanching combined with calcium chloride[J]. China Condiment, 2024, 49(10): 81-88.
- [16] 边名鸿,邹玉峰,袁乐梅,等. 植物乳杆菌 LBS8 强化发酵腌制白萝卜的条件优化研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(7): 114-119, 130.

- BIAN M H, ZOU Y F, YUAN L M, et al. Optimization of conditions for pickled white radish by enhanced fermentation of *Lactobacillus plantarum* LBS8[J]. China Condiment, 2022, 47(7): 114-119, 130.
- [17] 周艺萍, 熊智, 李选文, 等. 不同盐浓度对新平酸腌菜发酵过程的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(5): 13-17.
- ZHOU Y P, XIONG Z, LI X W, et al. Effects of different salt concentration on the fermentation of Xinping pickled mustard [J]. China Condiment, 2021, 46(5): 13-17.
- [18] 吴昕怡, 田浩, 朱志妍, 等. 精油对腌制芥菜发酵过程中品质指标的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 102-107.
- WU X Y, TIAN H, ZHU Z Y, et al. Effect of essential oil on quality indexes of pickled mustard in fermentation process[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 102-107.
- [19] 梅源, 赵楠, 夏枫, 等. 不同品种和变种芥菜发酵制备酸菜的品质及风味特征差异分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 178-185.
- MEI Y, ZHAO N, XIA F, et al. Differential analysis of quality and flavor characteristics of Suancai prepared with different varieties and variation leaf mustard[J]. China Brewing, 2024, 43(10): 178-185.
- [20] 张杰, 徐飞, 赖兴悦, 等. 三次发酵技术提升工业化四川泡菜风味研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 53-58.
- ZHANG J, XU F, LAN X Y, et al. Study on improving flavor of industrialized Sichuan pickled green vegetables by triple fermentation technology[J]. China Condiment, 2024, 49(1): 53-58.
- [21] 张义奎, 曹梦茜, 李俊丽, 等. 酸白菜腌制过程中优势乳酸菌及菌群演替规律研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 363-373.
- ZHANG Y K, CAO M X, LI J L, et al. Studies on the dominant lactic acid bacteria and microbial community succession law in pickled cabbage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 363-373.
- [22] ZHANG Q, CHEN G, SHEN W, et al. Microbial safety and sensory quality of instant low-salt Chinese Paocai[J]. Food Control, 2016, 59: 575-580.
- [23] YU Y Y, XU Y J, LI L, et al. Dynamic evolution of flavor substances and bacterial communities during fermentation of leaf mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*) and their correlation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 167: 113796.
- [24] BOSSAERTS L, OPSTAELE F V, WOUTERS A G B, et al. Study of the influence of beer composition on the amount of bubbles in beer: CO₂, alcohol, protein and iso-alpha-acid contents as primary predictors[J]. Food Chemistry, 2025, 469: 142523.
- [25] YU Y Y, YU Y S, XU Z L. Evaluation of nitrite, ethyl carbamate, and biogenic amines in four types of fermented vegetables[J]. Foods, 2021, 10(12): 3 150.
- [26] YANG X, SEBRANEK J G, LUO X, et al. Effects of calcium salts on the physicochemical quality of cured beef sausages during manufacturing and storage: a potential calcium application for sausages with alginate casings[J]. Foods, 2021, 10(11): 2 783.
- [27] LEE M, SONG J H, JUNG M Y, et al. Large-scale targeted metagenomics analysis of bacterial ecological changes in 88 kimchi samples during fermentation[J]. Food Microbiology, 2017, 66: 173-183.
- [28] LEE J H, CHOI E J, CHANG J Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) and supercooling storage in leaf mustard (*Brassica juncea* L.) kimchi: modelling of microbial activity and preservation of physicochemical properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111325.
- [29] 侯小艺, 王建辉, 邓娜, 等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 232-240.
- HOU X Y, WANG J H, DENG N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables[J]. Food & Machinery 2023, 39(4): 232-240.
- [30] 吴婉琴, 张志旭, 曾璐, 等. 自然发酵辣椒的理化指标与脆度的相关性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 69-73.
- WU W Q, ZHANG Z X, ZENG L, et al. Correlation analysis between physicochemical indexes and crispness of naturally fermented chopped peppers[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 69-73.
- [31] MARTINS L C, MONTEIRO C C, SEMEDO P M, et al. Valorisation of pectin-rich agro-industrial residues by yeasts: potential and challenges[J]. Applied Microbiol Biotechnol, 2020, 104(15): 6 527-6 547.
- [32] GE L, LAI H, HUANG Y, et al. Comparative evaluation of package types in alleviating textural softening and package-swelling of Paocai during storage: insight into microbial invasion, cell wall pectinolysis and alteration in sugar and organic acid profiles[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130489.
- [33] 梁莉, 杜阿如娜, 马涛, 等. 低盐豇豆泡菜预处理工艺优化及贮藏特性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 246-251.
- LIANG L, DU A R N, MA T, et al. Optimized pre-treatment and storage properties of low-salt pickled cowpea[J]. Food Science, 2018, 39(6): 246-251.
- [34] 叶阳, 肖川泉, 袁茜, 等. 预制菜肴中芥菜护色及保脆工艺优化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 72-80.
- YE Y, XIAO C Q, YUAN X, et al. Process optimization for preserving the color and crispness of mustard in prefabricated food[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 72-80.
- [35] 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. Effect of yeast on quality of fermented radish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(24): 68-75.
- [36] MEI Y, GE L H, LAI H M, et al. Decoding the evolution of aromatic volatile compounds and key odorants in Suancai (a Chinese traditional fermented vegetable) during fermentation using stir bar sorptive extraction-gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 178: 114611.
- [37] 邝格灵, 李树, 宁甜甜, 等. 基于 GC-MS 指纹图谱和多元统计学区分四川保宁醋和山西老陈醋的挥发性差异代谢产物[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 227-232.
- KUANG G L, LI S, NING T T, et al. Differential volatile metabolites between Sichuan Baoning vinegar and Shanxi aged vinegar determined by GC-MS fingerprint and multivariate statistics[J]. Food Science, 2020, 41(16): 227-232.
- [38] 董书甲, 刘露, 于正阳, 等. 水蜜桃发酵酒及其蒸馏酒香气成分差异比较[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 169-176.
- DONG S J, LIU L, YU Z Y, et al. Comparison of aroma components differences between fermented peach wine and its distilled spirits[J]. China Brewing, 2025, 44(1): 169-176.
- [39] WILLIAMS A G, NOBLE J, BANKS J M. Catabolism of amino acids by lactic acid bacteria isolated from Cheddar cheese[J]. International Dairy Journal, 2001, 11(4): 203-215.
- [40] YU M, WANG B, WANG Y, et al. Odor profile characterization and variety identification of brown lactobacillus beverage based on untargeted metabolomics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 120: 105293.
- [41] 梁轶琳, 张灵枝, 戴浩民, 等. HS-SPME-GC-MS 分析武夷岩茶呈香挥发性物质[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 110-121.
- LIANG Y L, ZHANG L Z, DAI H M, et al. Analysis of aroma volatile compounds in Wuyi rock tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(5): 110-121.
- [42] 肖作兵, 王红玲, 牛云蔚, 等. 基于 OAV 和 AEDA 对工夫红茶的 PLSR 分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 242-249.
- XIAO Z B, WANG H L, NIU Y W, et al. Analysis of aroma components in four Chinese Congou black teas by odor active values and aroma extract dilution analysis coupled with partial least squares regression[J]. Food Science, 2018, 39(10): 242-249.
- [43] 邓见田焯, 晏美红, 尚铂昊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术分析不同种类黑茶香气成分[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 378-386.
- DENG J T Y, YAN M H, SHANG B H, et al. Study on aroma components in different types of dark tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 378-386.
- [44] 陈淑钧, 刘亚楠, 翁佩芳, 等. 乳酸菌接种发酵对腌制雪菜挥发性风味的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 310-324.
- CHEN S J, LIU Y N, WENG P F, et al. Effects of lactic acid bacteria inoculation and fermentation on volatile flavor of pickled potherb mustard[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(11): 310-324.
- [45] 田艳, 赵玲艳, 陈秋佳, 等. 芥菜自然发酵过程中主要化学成分的变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 117-124.
- TIAN Y, ZHAO L Y, CHEN Q J, et al. Variation of main chemical components in leaf mustard during natural fermentation[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(1): 117-124.