



基于常规理化分析和电子传感技术的低度海红果酒发酵过程中品质动态变化研究

郑艺,宋芳,张一帆,云哲,苏裕家,申秀清

内蒙古财经大学 商务学院,内蒙古 呼和浩特 010070

摘要:为了探索本土酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)菌株在海红果酒发酵中的实际应用,采用实验室分离筛选的酿酒酵母 CDJQ6-3 菌株发酵制备了低度海红果酒(酒精度为 5 %vol),并通过常规理化分析和电子传感技术研究低度海红果酒发酵过程中品质的动态变化。结果表明:随着发酵的进行,低度海红果酒的可溶性固形物、总糖和还原糖含量及 pH 值均呈下降趋势,而酒精度和总酸含量均呈上升趋势。在色泽方面,低度海红果酒整体呈现明亮的红黄色调;在风味物质组成上,氮氧化物、硫化物、萜类物质、甲烷、乙醇、烷烃、有机硫化物等风味物质逐渐累积,芳香类物质含量逐渐降低,同时酸味和涩味逐渐增强。相较于发酵后期(6~14 d),发酵前期(1~6 d)的低度海红果酒具有更好的品质特性,表现为较高的红绿度(a^*)和芳香类物质含量,同时咸味、涩味的回味和鲜味的回味更突出($P<0.05$),而氮氧化物、氢气、甲烷、(有机)硫化物、萜类物质、乙醇和烷烃含量较低,酸味(绝对值)、苦味和涩味更弱($P<0.05$)。因此,采用酿酒酵母 CDJQ6-3 发酵制备的低度海红果酒在发酵前期表现出更优异的品质特性。

关键词:低度海红果酒;酿酒酵母;发酵过程;理化指标;电子传感技术

中图分类号:TS261.1 **文献标识码:**A

0 引言

酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)作为果酒发酵过程中最常用的酵母菌种,一直是果酒产业竞争与发展的核心因素。在酿酒过程中,酿酒酵母可通过乙醇代谢反应将果汁原液中的糖类物质转化为乙醇及其代谢产物,不仅具有发酵效率高、乙醇发酵力强等特性,还可有效保留果汁原液中的营养物

质和活性成分^[1-2]。L. Liu 等^[3]比较了不同来源酿酒酵母发酵的苹果酒,发现相较于商业酿酒酵母,野生酿酒酵母可明显提升苹果酒的酒精度,并产生更多的能量和香气前体物质。D. H. Wu 等^[4]利用从柠檬自然发酵液中筛选出的酿酒酵母 NM-8 发酵柠檬酒,发现相较于商业酿酒酵母,酿酒酵母 NM-8 表现出更好的发酵能力和更高的香气物质产量,所酿柠檬酒的适口性好、甜度适宜,风味品质更

收稿日期:2024-11-23;修回日期:2025-02-13

基金项目:中央引导地方科技发展基金项目(2023ZY0013)

作者简介:郑艺(1985—),女,内蒙古自治区赤峰市人,内蒙古财经大学讲师,博士,主要研究方向为食品生物技术。E-mail:zhengyi202406@126.com

通信作者:申秀清(1975—),女,内蒙古自治区卓资县人,内蒙古财经大学教授,博士,主要研究方向为食品生物技术。E-mail:shenxiuqing2024@126.com

佳,且总黄酮含量和 DPPH 自由基清除率均更高。

色差仪、电子鼻、电子舌等电子传感技术具有灵敏度高、重复性好、客观性强等多重优势,已发展成为传统感官评价的有力补充和替代手段,并广泛应用于食品工业生产、研发和质量控制。例如,马丽娜等^[5]利用色差仪定量分析了 4 种酿酒酵母发酵前后菠萝果酒的色泽变化,阐明了酵母菌种对果酒色泽的影响;刘学伟等^[6]通过电子鼻系统检测了 123 份酿酒葡萄果实风味物质,构建了果实风味物质的特征图谱;王文航等^[7]采用电子舌技术分析了不同发酵期红枣酒滋味品质变化,发现发酵后期的红枣酒具有更优良的滋味品质。在果酒生产过程中,不同酿酒酵母菌株在各类果酒中的适应性、发酵能力及其对酒体色泽、滋味和气味的影响存在差异,甚至直接影响成果酒的风味品质和市场接受度,而电子传感技术能够客观、高效地量化果酒的色泽、气味和滋味特征,为果酒的品质评估提供可靠的技术支撑。

海红果,又名海红子、红海棠、小果海棠等,属蔷薇科苹果属滇池海棠系的西府海棠种,在我国仅分布于陕西、山西和内蒙古三省相邻的黄土丘陵沟壑地区^[8]。研究^[9-10]表明,海红果不仅富含维生素、矿物质、氨基酸等营养物质,还含有多种具有抗衰老、抗氧化、保护心脑血管等功能的生物活性成分,药用价值潜力大,是一种极具发展前景的药食同源水果。但海红果存在品质不稳定、常温下不易贮藏、深加工发展滞后等产业问题,这严重制约了其经济发展前景。目前,海红果主要被加工成果干、果脯、果酱、罐头、复合果汁饮料、果酒等产品,深受广大消费者的喜爱。现有关于海红果酒的研究主要集中于酿造工艺条件优化^[11]、化学成分分析^[12]、发酵菌种筛选^[13]等方面,对海红果酒发酵过程中品质变化的研究较为缺乏。

本研究团队前期从米酒曲中筛选出了 1 株酿酒酵母 CDJQ6-3 菌株,该菌株在 pH 值为 4.0、22 mg/L 葡萄糖、60 mg/L 偏重亚硫酸钾和体积分数为 12% 乙醇溶液的条件下展现出较好的耐受性,表明其具备良好的果酒发酵潜力。基于此,本研究拟使用该菌株直接发酵生产酒精度为 5 %vol 的低度海红果

酒,并基于常规理化分析和电子传感技术,从理化指标、色泽、风味物质和滋味 4 个维度研究发酵过程中低度海红果酒的品质变化,以期为低度海红果酒发酵菌株资源的开发及最佳发酵阶段的确定提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

新鲜海红果,采购自内蒙古自治区清水河县;酿酒酵母 CDJQ6-3,分离筛选自四川省成都市米酒曲样品;蔗糖,湖北糖柜股份有限公司;果胶酶(50 000 U/g),和氏璧生物科技有限公司;HCl,国药集团化学试剂有限公司;偏重亚硫酸钾,河南中盛化工产品有限公司;酒石酸、葡萄糖、95%乙醇、NaOH,西陇化工股份有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

9231 型破壁榨汁机,奥克斯集团有限公司;LHR-150 型生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;CR21N 型高速离心机,日本 Hitachi 公司;Hei-VAP Value 型旋转蒸发仪,德国 Heidolph 公司;HH-3 型数显恒温水浴锅,常州亿通分析仪器制造有限公司;PHS-3E 型酸度计,上海仪电科学仪器有限公司;Abbemat350 型全自动折光仪,奥地利安东帕公司;Ultra Scan PRO 型色差仪,美国 Hunter Lab 公司;SA-402B 型电子舌,日本 INSENT 公司;PEN3 型电子鼻,德国 AIRSENSE 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 海红果酒制备 参照金晓帆等^[14]的方法,并稍作修改。挑选新鲜海红果,经清洗、晾晒后,将海红果和去离子水按照 $m(\text{海红果/g}):V(\text{去离子水/mL})=1:5$ 混合并捣碎,添加 60 mg/L 偏重亚硫酸钾,静置 30 min;添加质量分数为 0.3% 的果胶酶,在 45 ℃生化培养箱中静置培养 3 h 进行酶解;通过外源添加蔗糖和酒石酸溶液将海红果汁的可溶性固形物含量和 pH 值分别调整至 22 °Bx 和 4.0 后,按照接种量 5%(体积分数)接种活化后的酿酒酵母 CDJQ6-3 菌株,并将发酵罐置于 22 ℃生化培养箱中静置培养,当发酵液的总糖减少量为 85 g/L 且酒



精度为 5 %vol 左右时,终止发酵进程^[15]。发酵期间每隔 24 h 取样 1 次,将发酵液在 4 ℃、8000 r/min 条件下离心 10 min,上清液即为低度海红果酒样品,备用。

1.3.2 理化指标测定 总糖、还原糖含量和酒精度依据《葡萄酒、果酒通用分析方法》(GB/T 15038—2006)^[16]进行测定。可溶性固形物含量使用全自动折光仪进行测定。pH 值依据《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》(GB 5009.237—2016)^[17]进行测定。总酸含量(以苹果酸计)依据《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》(GB 12456—2021)^[18]中酸碱指示剂法进行测定。每个样品平行测定 3 次,结果取平均值。

1.3.3 色度测定 参照 H. Wimalka 等^[19]的方法,使用色差仪在“透射”模式下对发酵过程中低度海红果酒样品的色度进行检测。采用 CIE1976 LAB 色度空间测试系统对样品的 L^* (明亮度,0→100)、 a^* (红绿度,绿→红+)和 b^* (黄蓝度,蓝→黄+)进行计算,每个样品平行测定 3 次,结果取平均值。

1.3.4 电子鼻测定 参照 F. X. Tang 等^[20]的方法,取 15 mL 低度海红果酒样品于 50 mL 顶空进样瓶中,使用电子鼻对风味物质进行检测。电子鼻内置 10 个金属氧化传感器,分别为 W1C(对芳香类物质灵敏)、W1S(对甲烷灵敏)、W1W(对硫化物、萜类物质灵敏)、W2S(对乙醇灵敏)、W2W(对有机硫化物灵敏)、W3C(对氨气、芳香类物质灵敏)、W3S(对烷烃灵敏)、W5C(对烷烃、芳香类物质灵敏)、W5S(对氮氧化物灵敏)和 W6S(对氢气有选择性),可将待测样品中风味物质的信息转化为电信号(响应值)输出,响应值越高代表该类物质的含量越高。每个样品平行测定 3 次,结果取平均值。

1.3.5 电子舌测定 参照 Y. X. Yu 等^[21]的方法,取 100 mL 低度海红果酒样品分装到 2 个样品杯中,使用电子舌检测 5 种基本味(酸味、苦味、涩味、咸味和鲜味)和 3 种基本回味(苦味的回味、涩味的回味和鲜味的回味),每个样品平行测定 4 次,结果取后 3 次测试的平均值。

1.4 数据处理及可视化

利用 Excel 2016 对实验数据进行统计分析,采

用 Origin Lab 2021 软件绘制折线图、棒状图和雷达图,通过 Past3 软件绘制聚类树状图,并采用 Mann-Whitney 检验法对不同聚类组数据之间的显著性进行评估,其中 $P>0.05$ 代表差异不显著,* ($P<0.05$)代表差异显著,** ($P<0.01$)代表差异非常显著,*** ($P<0.001$)代表差异极显著。

2 结果与分析

2.1 低度海红果酒理化指标分析

果酒发酵过程中,总糖和酒精度的变化趋势不仅反映了酵母菌对糖类物质的利用能力和酒精的产生情况,也是判断果酒发酵进程的重要依据^[22]。低度海红果酒发酵过程中常规理化指标的变化如图 1 所示。由图 1a)可知,随着发酵时间的延长,低度海红果酒样品的总糖含量呈下降趋势,发酵至 14 d 时,总糖含量由 192.7 g/L 下降至 98.9 g/L,减少量为 93.8 g/L(大于 85 g/L);而酒精度呈上升趋势,发酵至 12 d 时,酒精度从 0 %vol 上升至 5 %vol,发酵 12~14 d 时,酒精度趋于稳定,平均酒精度为 5 %vol,表明低度海红果酒的发酵进程基本结束。

由图 1b)可知,随着发酵时间的延长,低度海红果酒样品的可溶性固形物含量和还原糖含量均呈下降趋势,这可能是由酿酒酵母消耗糖类物质生成酒精及其代谢产物所致。在发酵结束时(第 14 d),低度海红果酒样品的可溶性固形物含量为 0.16 g/g,还原糖含量为 98.90 g/L,相较于其他果酒样品^[23]仍处于较高水平,这可能与海红果汁的还原糖含量^[24]及酿酒酵母的发酵性能^[13]有关。另外,随着发酵时间的延长,低度海红果酒样品的 pH 值呈下降趋势,总酸含量呈上升趋势,即低度海红果酒的酸度升高,这可能与酿酒酵母的产酸机制及有机酸的溶出有关^[25]。在发酵结束时,低度海红果酒样品的 pH 值为 3.76,总酸含量为 5.20 g/L,而较高的酸度有利于抑制酒体中微生物的生长繁殖,有效延长果酒的货架期。然而,果酒的酸度过高也可能影响酒体的风味品质。根据标准^[26]可知,苹果酒的总酸含量一般要求≤6.0 g/L,据此判断本研究中低度海红果酒的酸度范围较为合理。

2.2 低度海红果酒色泽分析

低度海红果酒发酵过程中色泽的变化如图 2 所示。

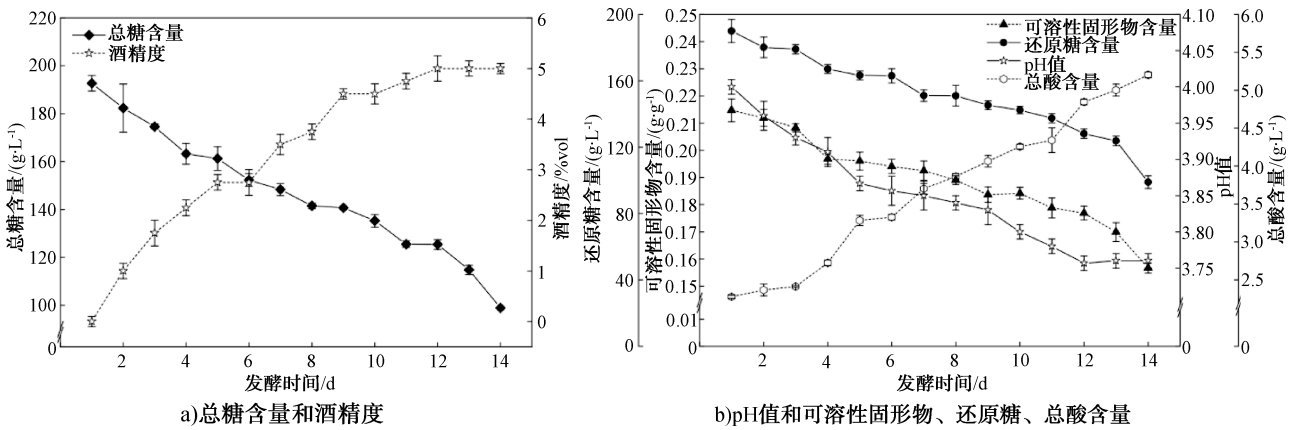


图 1 低度海红果酒发酵过程中常规理化指标的变化

Fig. 1 Changes of conventional physicochemical index of low-alcohol Haihong fruit wine during fermentation

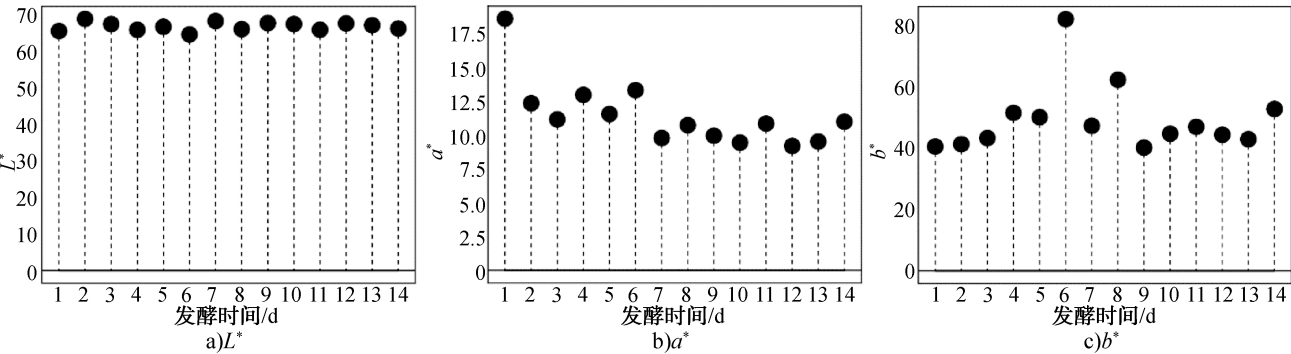


图 2 低度海红果酒发酵过程中色泽的变化

Fig. 2 Color changes of low-alcohol Haihong fruit wine during fermentation

由图 2 可知,发酵过程中低度海红果酒样品的色泽没有明显的变化规律。由图 2a) 可知,低度海红果酒样品的 L^* 普遍较高,表明酒体整体较为明亮,其中发酵至第 6 d 的低度海红果酒样品明亮度最低。由图 2b) 可知,所有低度海红果酒样品的 a^* 均大于 0,说明酒体表现为红色色调,其中发酵至第 1 d 的低度海红果酒样品红色特征最明显,其次是发酵至第 6 d 的样品。由图 2c) 可知,所有低度海红果酒样品的 b^* 均大于 0,说明酒体表现为黄色色调,其中发酵至第 6 d 的低度海红果酒样品黄色特征最明显,其次是发酵至第 8 d 的样品。综上,发酵过程中低度海红果酒样品整体保持明亮的红黄色调,且发酵至第 1 d、第 6 d 和第 8 d 的低度海红果酒样品红色或黄色特征更加明显,展现出更为丰富的色泽层次感。

2.3 低度海红果酒风味物质分析

果酒风味的形成与酒体中的挥发性物质有关,这些挥发性物质包括水果本身具有的香气成分及发酵过程中酿酒酵母代谢生成的芳香物质和特别

的风味成分^[27]。低度海红果酒发酵过程中风味物质的变化如图 3 所示。由图 3 可知,传感器 W5S、W1W、W1S 和 W2S 对低度海红果酒样品的响应值较高,其次是传感器 W3S、W2W 和 W6S,且随着发酵时间的延长,这些传感器的响应值呈上升趋势;传感器 W1C、W3C 和 W5C 对低度海红果酒样品的响应值较低,且随着发酵时间的延长,这些传感器的响应值呈下降趋势。这表明低度海红果酒样品中氮氧化物、硫化物、萜类物质、甲烷、乙醇、烷烃、有机硫化物等风味物质的含量较高,且随着发酵的进行逐渐累积,而样品中芳香类物质的含量明显较低,且随着发酵的进行逐渐降低,说明发酵过程有利于酒体中(有机)硫化物、萜类物质、乙醇等风味物质的产生,但对酒体中香气成分的形成具有抑制作用。这可能一方面与空气中氮气和氧气的体积分数较高及不同风味物质的香气阈值差异较大有关;另一方面与果酒发酵过程中酿酒酵母的代谢产物有关^[3]。

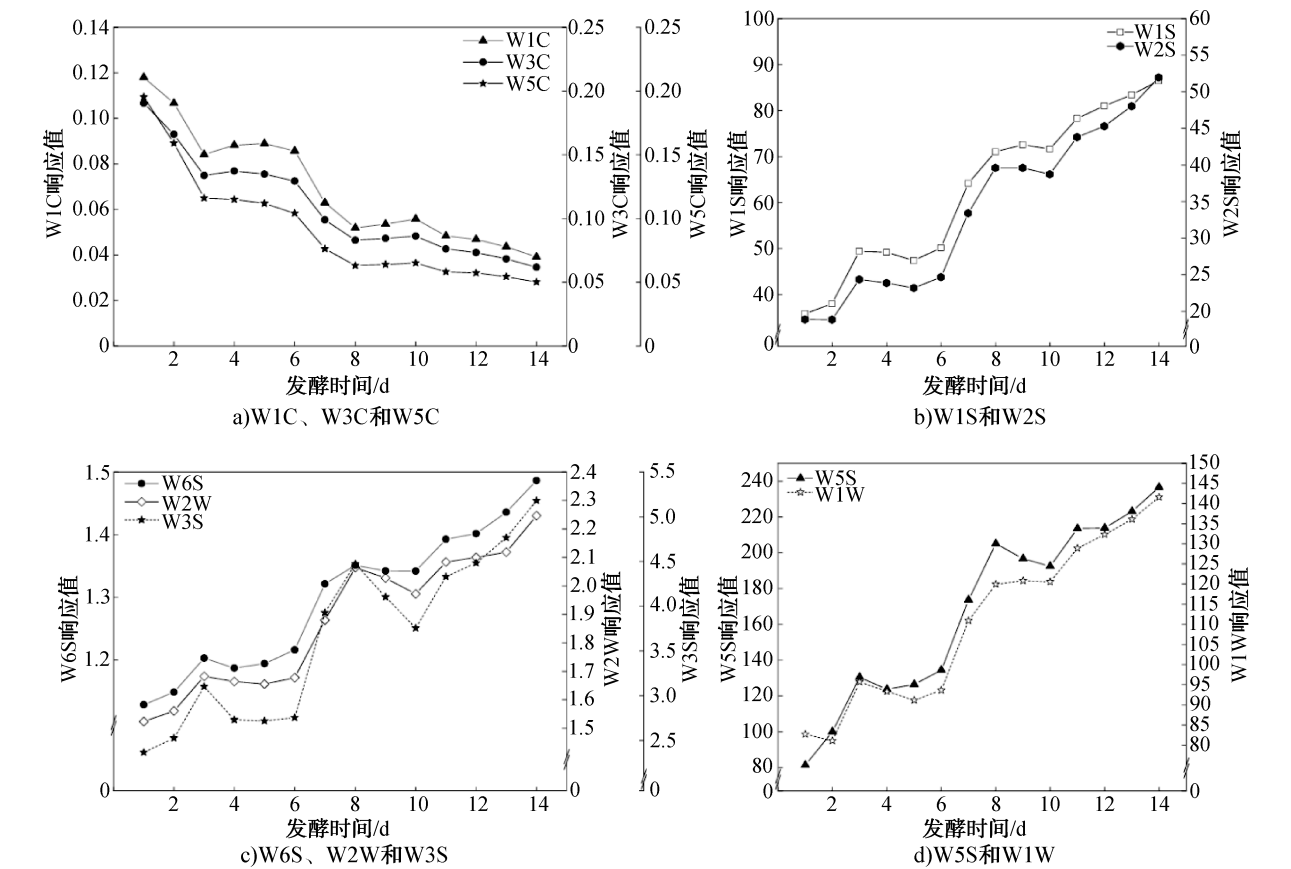


图 3 低度海红果酒发酵过程中风味物质的变化

Fig. 3 Changes of flavor substance of low-alcohol Haihong fruit wine during fermentation

2.4 低度海红果酒滋味分析

滋味是决定果酒品质的重要指标之一。低度海红果酒发酵过程中滋味的变化如图 4 所示。由图 4 可知,电子舌传感器阵列对低度海红果酒样品发酵过程中的酸味、咸味、鲜味及鲜味的回味的响应信号较强,且随着发酵时间的延长,酒体中酸味、咸味和涩味的响应值波动较大,说明低度海红果酒样品的酸味、咸味和鲜味特征较为明显,且发酵过程对酒体的酸味、咸味和涩味影响较大。另外,随着发酵时间的延长,酸味(绝对值)和涩味的响应值呈上升趋势,说明低度海红果酒样品的酸味和涩味特征随着发酵的进行逐渐增强,这可能与发酵过程中来源于原料的有机酸及其他多酚类物质成分的变化有关^[28]。

2.5 低度海红果酒多元统计学分析

低度海红果酒发酵过程中色泽、风味物质和滋味的多元统计学分析结果如图 5 所示。由图 5a)可知,基于 UPGMA 聚类分析显示,当距离为 100 时,14 个不同发酵时间低度海红果酒样品存在明显的

聚类趋势,整个发酵过程可被划分为两个阶段:1~6 d 样品为第一阶段,称为发酵前期,酿酒酵母生长繁殖和代谢活动旺盛,低度海红果酒的整体品质发生了较大改变;7~14 d 样品为第二阶段,称为发酵后期,酿酒酵母在高浓度乙醇、低 pH 值和营养胁迫作用下生长缓慢,代谢活动受到抑制并逐渐终止。进一步使用主坐标分析(Principal Co-ordinates Analysis, PCoA)对 UPGMA 聚类分析结果进行了验证(见图 5b)),PCoA1 和 PCoA2 的方差贡献率分别为 95.90%和 3.68%,且发酵前期低度海红果酒样品主要分布于 Y 轴右侧,发酵后期低度海红果酒样品则集中分布于 Y 轴左侧,两个发酵阶段的低度海红果酒样品在空间排布上存在明显的分离趋势,这与 UPGMA 聚类分析结果一致。在提取 PCoA 前 95%因子的基础上,经过 MANOVA 分析发现,发酵前期和发酵后期低度海红果酒样品之间存在显著差异($P < 0.05$),这可归因于不同发酵时期低度海红果酒样品在色泽、风味物质和滋味上的差异性。

低度海红果酒样品发酵过程中的感官品质

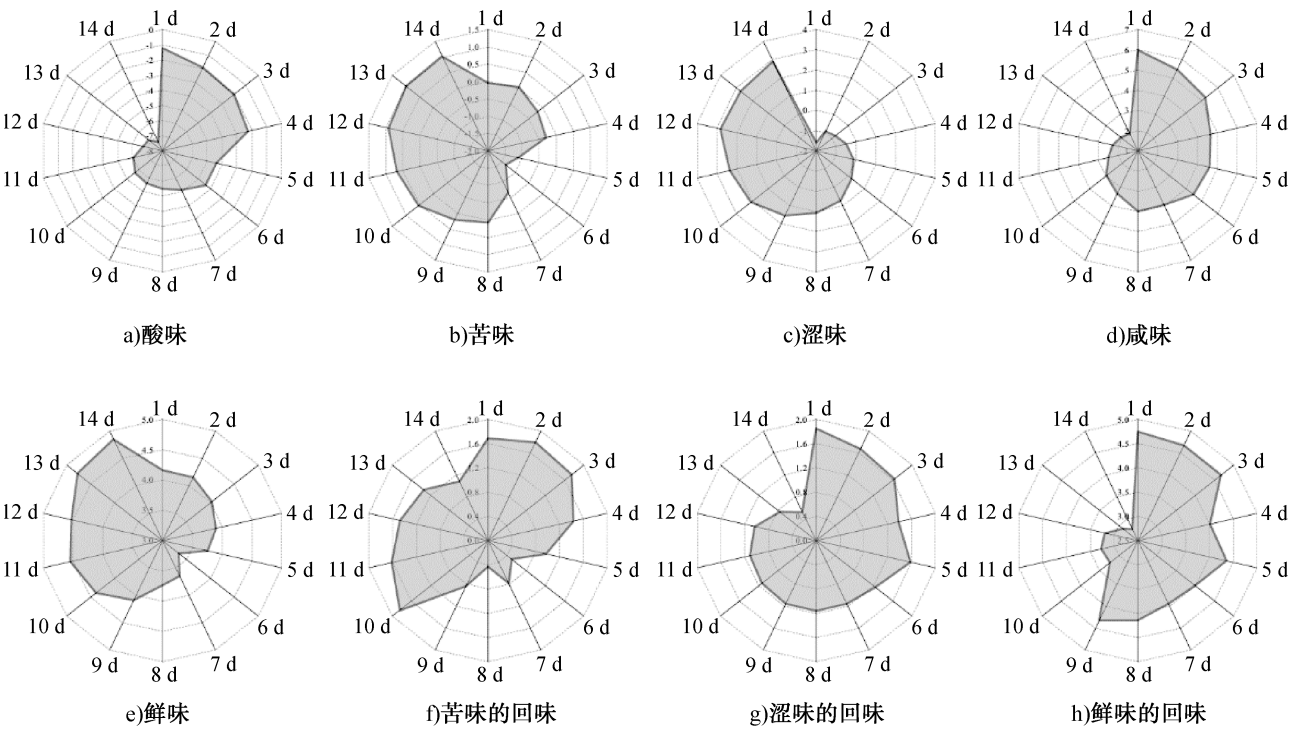


图4 低度海红果酒发酵过程中滋味的变化

Fig. 4 Changes of taste quality of low-alcohol Haihong fruit wine during fermentation

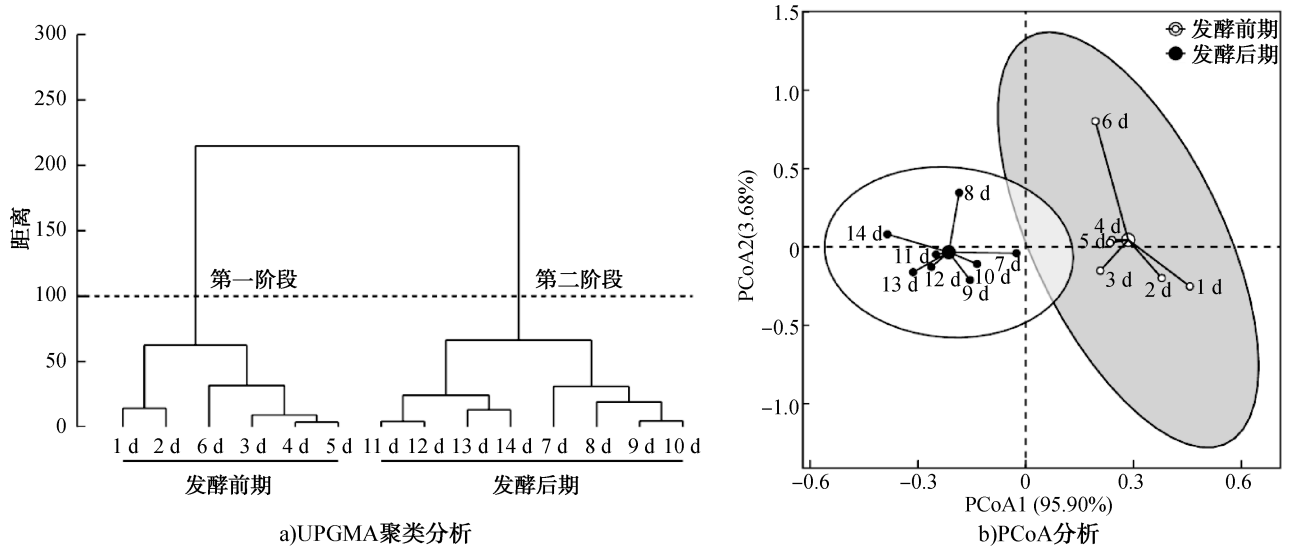


图5 低度海红果酒发酵过程中色泽、风味物质和滋味的多元统计学分析结果

Fig. 5 Result of multivariate statistical analysis of color, flavor substance and taste quality of low-alcohol Haihong fruit wine during fermentation

分析结果见表1。由表1可知,相较于发酵后期,发酵前期低度海红果酒样品的 a^* 极显著偏高($P<0.001$),说明发酵过程导致低度海红果酒样品的红色特征减弱,这可能与低度海红果果皮的颜色及酿造过程中花色苷及其衍生物的稳定性有关^[29]。海红果成熟后,果皮中的叶绿素发生降解,花色苷素(花色苷)成为海红果果皮的主要色素因子,使果实

呈紫红色或褐红色。随着酿酒酵母的生长繁殖和代谢活动,低度海红果酒中的花色苷被酿酒酵母细胞壁吸附或被酿酒酵母释放的代谢产物降解,进而导致发酵后期酒体的红色减弱。此外,发酵过程中低度海红果酒样品之间的 L^* 和 b^* 差异均不显著($P>0.05$),说明发酵过程对低度海红果酒样品的明亮度和黄蓝度的影响均不显著。因此,相较于发酵

表 1 低度海红果酒发酵过程中的感官品质分析结果

Table 1 Result of sensory quality analysis of Haihong fruit wine samples during fermentation

属性	测试指标	发酵前期	发酵后期	<i>P</i> 值
色泽	<i>L</i> [*]	66.39(66.18,64.48-68.75)	66.93(67.18,65.78-68.16)	>0.05
	<i>a</i> [*]	13.37(12.70,11.19-18.66)	10.09(9.90,9.22-11.02)	<0.001
	<i>b</i> [*]	51.81(47.01,40.79-82.64)	48.00(46.13,40.44-62.73)	>0.05
风味物质	W1C	0.10(0.09,0.08-0.12)	0.05(0.05,0.04-0.06)	<0.001
	W5S	116.00(125.05,81.25-134.34)	206.87(209.28,173.64-236.62)	<0.001
	W3C	0.15(0.14,0.13-0.19)	0.08(0.08,0.06-0.10)	<0.001
	W6S	1.18(1.19,1.13-1.22)	1.38(1.37,1.32-1.49)	<0.001
	W5C	0.13(0.12,0.1-0.20)	0.06(0.06,0.05-0.08)	<0.001
	W1S	45.00(48.3,35.86-50.16)	76.08(75.44,64.18-86.47)	<0.001
	W1W	89.59(92.23,81.05-95.67)	126.38(124.85,110.88-141.59)	<0.001
	W2S	22.30(23.53,18.86-24.67)	42.55(41.71,33.40-51.94)	<0.001
	W2W	1.63(1.66,1.52-1.68)	2.06(2.07,1.88-2.25)	<0.001
	W3S	2.70(2.73,2.37-3.10)	4.38(4.40,3.76-5.18)	<0.001
滋味	酸味	-2.70(-2.16,-4.38-(-1.23))	-6.11(-5.87,-7.34-(-5.14))	<0.001
	苦味	-0.49(-0.24,-1.36-0.04)	0.48(0.62,-0.67-1.04)	<0.01
	涩味	-0.62(-0.64,-1.60-0.23)	2.04(2.22,0.75-2.91)	<0.001
	咸味	5.07(4.94,4.47-5.98)	2.88(2.74,1.94-4.01)	<0.001
	鲜味	3.89(3.96,3.34-4.16)	4.32(4.46,3.65-4.85)	>0.05
	苦味的回味	1.36(1.56,0.49-1.79)	1.18(1.22,0.43-1.85)	>0.05
	涩味的回味	1.56(1.61,1.24-1.85)	1.01(1.12,0.52-1.16)	<0.001
	鲜味的回味	4.41(4.51,3.99-4.75)	3.47(3.25,2.76-4.32)	<0.01

注:数据 66.39(66.18,64.48-68.75)代表平均值(中位数,最小值-最大值)。

后期,发酵前期低度海红果酒样品具有更显著的红色色泽特征。

相较于发酵后期,发酵前期低度海红果酒样品中芳香类物质含量显著更高($P<0.05$),这类物质能够赋予酒体独特的香气特征,而氮氧化物、氢气、甲烷、(有机)硫化物、萜类物质、乙醇和烷烃含量显著更低($P<0.05$),这可能一方面是由于发酵前期酿酒酵母的生长繁殖和代谢活动较为旺盛,随着发酵的进行,发酵后期酒体中糖类物质减少而各种代谢产物逐渐累积;另一方面,酿酒酵母受到高浓度乙醇的胁迫且酒体中风味物质被破坏,进而导致酒体中酿酒酵母的代谢活动减弱且芳香类物质含量下降。因此,发酵前期低度海红果酒样品的风味品质更佳。相较于发酵后期,发酵前期低度海红果酒样品的咸味、涩味的回味和鲜味的回味均更突出,而酸味(绝对值)、苦味和涩味均显著更弱($P<0.05$),表明发酵前期低度海红果酒样品鲜味的回味特征更明显,且酒体酸味、苦味和涩味较弱。这可能与发酵过程中多酚类物质、高级醇、氨基酸、多肽、醛类

等呈味物质的累积有关^[30-31]。海红果中富含羟基苯甲酸类、黄酮醇类、黄烷-3-醇类等多种酚类物质^[32-33],在果酒酿造过程中,蔗糖的添加及酒精的产生会促使酒体中酚类物质含量逐渐增加并保留至发酵结束;另外,在亚硫酸和氧气的作用下,乙醇可能转化为使酒体略带苦味的乙醛,且黄酮醇类、黄烷-3-醇类及其衍生物对酒体中苦涩味的贡献显著。因此,相较于发酵后期,发酵前期海红果酒样品的滋味品质更佳。

3 结论

本研究综合运用常规理化分析和电子传感技术,研究了低度海红果酒发酵过程中品质的动态变化,得到如下结论:采用酿酒酵母 CDJQ6-3 发酵制备的低度海红果酒整体发酵周期为 14 d,依据色泽、风味物质和滋味品质的变化可将其发酵过程划分为发酵前期(1~6 d)和发酵后期(7~14 d)两个阶段。相较于发酵后期,发酵前期低度海红果酒样品的品质更好,不仅色泽更明亮红润,且芳香类物质

含量更丰富。本研究结果可为低度海红果酒发酵菌株的开发及最佳发酵阶段的确定提供参考。在后续研究中,将进一步结合风味组学和代谢组学技术探究低度海红果酒不同发酵时期的品质变化,为低度海红果酒发酵工艺优化及产业化生产提供参考。

参考文献:

[1] 郭晨晨,王鑫涛,劳凤仙,等. 不同酿酒酵母对携李果酒发酵及挥发性香气成分的影响[J]. 中国酿造, 2023,42(10):114-121.

[2] LI M X, DENG M F, CHEN Y R, et al. Exploring the stress mechanism of tannic acid on *Saccharomyces cerevisiae* based on transcriptomics [J]. Food Bioscience, 2023, 56:103365.

[3] LIU L, GONG T, HU C Y, et al. ZNF1 up-regulation improves aroma profile by activating carbohydrate metabolism-associated pathways in *Saccharomyces cerevisiae* WFC-SC-071[J]. Food Bioscience, 2023,56:103337.

[4] WU D H, WU Y, GU Z X, et al. Multi-step screening of suitable *Saccharomyces cerevisiae* strain for lemon wine brewing[J]. Food Bioscience, 2023,56:103092.

[5] 马丽娜,袁源,林丽静,等. 不同酿酒酵母在菠萝果酒中的发酵特性[J]. 食品工业科技, 2018,39(3):12-16,21.

[6] 刘学伟,刘崇怀,樊秀彩,等. 基于电子鼻的酿酒葡萄果实香气鉴定评价[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2025,1:45-53.

[7] 王文航,崔梦君,蔡文超,等. 基于电子鼻和电子舌技术的红枣酒发酵过程中品质变化分析[J]. 中国酿造, 2024,43(11):125-130.

[8] 佟晨,何浩芳,李佳瑶,等. 海红果发酵乳饮料稳定效果的研究[J]. 安徽农学通报, 2019,25(13):39-41,75.

[9] 陈花,王建军,王建武,等. 拮抗酵母结合水溶性壳聚糖对海红果采后贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020,46(23):147-155.

[10] YANG H, SU W, WANG L H, et al. Molecular structures of nonvolatile components in the Haihong fruit wine and their free radical scavenging effect [J]. Food Chemistry, 2021,353:129298.

[11] 忻胜兵,陈忠军. 海红果酒加工工艺研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016,37(24):216-220.

[12] 花俊丽. 海红果化学成分及多糖功能性研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2019.

[13] 郑娇,俞月丽,彭强,等. 不同酵母菌种对发酵海红果酒品质的影响研究[J]. 现代食品科技, 2017,33(1):228-236.

[14] 金晓帆,商玉荟,朱萍,等. 无机氮源对无核荔枝酒

(非))挥发性成分的影响[J]. 轻工学报, 2018, 33(5):20-29.

[15] 党翠红. 低度海红果酒酿造工艺研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2015.

[16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 葡萄酒、果酒通用分析方法:GB/T 15038—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

[17] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定:GB 5009. 237—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.

[18] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定:GB 12456—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.

[19] HAPUARACHCHI W, MUNASINGHE D, SANDUPAMA P, et al. Determinant factors for berry derived anthocyanin persistency in stirred yoghurts [J]. Food Chemistry Advances, 2024,4:100541.

[20] TANG F X, CAI W C, SHAN C H, et al. Dynamic changes in quality of jujube wine during fermentation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020,44(9):e14704.

[21] YU Y X, LI L X, XUE R W, et al. Impact of different oak chips' aging on the volatile compounds and sensory characteristics of *Vitis amurensis* wines [J]. Foods, 2022, 11(8):1126.

[22] 康明丽,潘思轶,范刚,等. 柑橘果酒酿造过程中挥发性风味化合物的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(18):155-161.

[23] GAO J, LIU J, PANG X L. Characterization of the color, physicochemical properties, organic acids, and aroma profiles of kiwifruit wines by different fermentation patterns and fining stages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024,199:116097.

[24] 王玮. 海红果醋加工技术的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.

[25] 郭眯雪,程晓雯,于有伟,等. 不同发酵剂对红枣果酒发酵品质的影响[J]. 中国酿造, 2019,38(9):58-64.

[26] 山东园艺学会. 山东园艺协会团体标准 苹果酒:T/SDYY 148—2023[S].

[27] WANG X L, LIU X T, LONG J Q, et al. Isolation, screening, and application of aroma-producing yeast for red dragon fruit wine[J]. Food Bioscience, 2024,59:103878.

[28] 陈秋竹,谢菡怡,何娇娇,等. 基于有机酸和多酚组成的贵州五种特色水果酿酒特性评价[J]. 食品科学, 2024,45(10):158-166.

[29] 蒋文鸿,张纯,刘素稳,等. 酚酸及有机酸辅色对山楂酒贮藏期品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5):292-300.

[30] 刘宗昭,卢丕超,王晓军,等. 葡萄酒产生苦味的影响因素[J]. 酿酒科技, 2020(12):54-59,70.

[31] WEI Y, ZOU W, SHEN C H, et al. Basic flavor types and component characteristics of Chinese traditional liquors:A

review[J]. Journal of Food Science,2020,85(12):4096–4107.

[32] YANG H,SU W,HUA J L,et al. Investigation of non-volatile substances in the Haihong fruit wine and their lipid-lowering effect[J]. Food Bioscience,2021,39:100836.

[33] 王猛,王敏,李环宇,等. 海红果酚类物质种类及其抗氧化能力的研究[J]. 现代食品科技,2013,29(11):2633–2637,2787.

Dynamic study on quality of low-alcohol haihong fruit wine during fermentation based on conventional physicochemical analysis and electronic sensor technology

ZHENG Yi,SONG Fang,ZHANG Yifan,YUN Zhe,SU Yujia,SHEN Xiuqing

School of International Business,Inner Mongolia University of Finance and Economics,Hohhot 010070,China

Abstract: In order to explore the practical application of native *Saccharomyces cerevisiae* in the fermentation of Haihong fruit wine. This study used laboratory isolation and selection of the *S. cerevisiae* CDJQ6-3 to prepare fermented low-alcohol Haihong fruit wine. The dynamic quality changes of low-alcohol (with an alcohol content of 5%vol) Haihong fruit wine during fermentation were studied based on conventional physicochemistry and electronic sensing technology. The results analysis showed that the contents of soluble solid, total sugar and reducing sugar and pH value of low-alcohol Haihong fruit wine showed a decreasing trend during fermentation, while the alcohol content and total acid content showed an increasing trend. In terms of color, low-alcohol Haihong fruit wine as a whole presents a bright red-yellow tone. In terms of the composition of flavor substances, the contents of volatile substances such as nitrogen oxides, sulfides, terpenoids, methane, ethanol, alkanes and organic sulfides gradually accumulated during fermentation, while the contents of aromatic substances gradually decreased. In terms of taste characteristics, the sourness and astringency of low-alcohol Haihong fruit wine increased gradually during fermentation. Compared to the later stages of fermentation (6~14), the low-alcohol Haihong fruit wine in the early stage of fermentation (1~6 d) has better quality characteristics, manifested as a higher red-greenness(a^*) and aromatic substance content. At the same time, saltiness, astringency and umami aftertaste were significantly higher ($P<0.05$), while the contents of nitrogen oxides, hydrogen, methane, (organic) sulfides, terpenoids, ethanol and alkanes, as well as the acidity (absolute value), bitterness and astringency were significantly lower ($P<0.05$). It can be concluded that the quality of low-alcohol Haihong fruit wine prepared by *S. cerevisiae* CDJQ6-3 fermentation showed more excellent quality characteristics in the early stage of fermentation.

Key words:low-alcohol Haihong fruit wine;*Saccharomyces cerevisiae*;fermentation process;physicochemical index;electronic sensor technology

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]