安楠, 陆治颖, 刘功良, 等. 接种时序对混菌发酵脐橙果酒特征成分及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 189−198. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060271

AN Nan, LU Zhiying, LIU Gongliang, et al. Effect of Inoculation Chronology on the Characteristic Components and Antioxidant Activity of Navel Orange Wine through Mixed-culture Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 189−198. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060271

·生物工程·

接种时序对混菌发酵脐橙果酒特征成分及抗氧化活性的影响

安　楠[1], 陆治颖[1], 刘功良[1], 白卫东[1], 陈　铎[2], 王　宏[1,*]

（1.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225;
2.梅州市飞龙果业有限公司, 广东梅州 514600）

摘　要: 本研究旨在探究混菌发酵中接种时序对脐橙果酒品质的调控作用。采用酿酒酵母与非酿酒酵母构建四种发酵模式：酿酒酵母和非酿酒酵母同时接种（SC）、非酿酒酵母提前接种（PC）、非酿酒酵母延后接种（DC）及酿酒酵母单菌发酵（MC）。通过气相色谱-质谱联用技术和紫外分光光度法系统评估各组脐橙果酒特征成分和抗氧化活性的影响。结果表明，接种时序显著调控脐橙果酒品质。香气层面，混菌发酵较单菌发酵新增挥发性成分 24 种，PC 组醇类总量达 1500.09 mg/L，酯类总量达 198.43 mg/L，均处最高水平；总酚含量在 PC 组达到 753.93 mg GAE/L，总黄酮含量在 SC 组达到 138.30 mg RE/L；抗氧化性能方面，PC 组 DPPH 自由基、羟基自由基清除率 IC_{50} 分别为 0.0483 和 0.071 mg/mL，铁氰化钾还原力 IC_{50} 为 0.152 mg/mL，均显著优于其余各组；感官评价中，DC 组综合得分 82.13 分，SC 组 80.13 分，优于其他处理。综上所述，接种时序对混菌发酵脐橙果酒的风味品质、功能成分及抗氧化活性具有显著调控作用。通过系统比较四种发酵模式下关键指标差异，阐明非酿酒酵母与酿酒酵母互作机制与品质形成规律，可为脐橙果酒混菌发酵工艺优化提供理论依据与数据支撑，有助于提升柑橘果酒产品附加值，推动脐橙精深加工产业的高质量发展。

关键词: 脐橙果酒, 酿酒酵母, 非酿酒酵母, 接种时序, 挥发性成分, 抗氧化活性

中图分类号: TS261.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0189−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060271

本文网刊:

Effect of Inoculation Chronology on the Characteristic Components and Antioxidant Activity of Navel Orange Wine through Mixed-culture Fermentation

AN Nan[1], LU Zhiying[1], LIU Gongliang[1], BAI Weidong[1], CHEN Duo[2], WANG Hong[1,*]

（1.College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;
2.Meizhou City Dragon Fruit Industry Co., Ltd., Meizhou 514600, China）

Abstract: This study investigated the regulatory effects of inoculation timing on the quality of navel orange wine in mixed-culture fermentation. Fermentation protocols were established using *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces cerevisiae* under four modalities: Simultaneous co-inoculation, non-*Saccharomyces cerevisiae* pre-inoculation, non-*Saccharomyces cerevisiae* delayed inoculation, and *Saccharomyces cerevisiae* mono-culture fermentation. Characteristic components and antioxidant activity were systematically analyzed via gas chromatography-mass spectrometry and ultraviolet spectrophotometry. Results demonstrated significant quality modulation by inoculation timing. Mixed-culture fermentation

收稿日期: 2025−06−23

基金项目: 广东省研究生教育创新计划项目（2023SFKC_057）; 脐橙精深加工关键技术及产业化研究（D122207L1）。

作者简介: 安楠（2002−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 2065948422@qq.com。

*** 通信作者:** 王宏（1988−）, 女, 博士, 特聘副教授, 研究方向: 食品活性成分与功能评价, E-mail: whongaq@163.com。

generated 24 additional volatile compounds versus mono-culture. The pre-inoculation group exhibited peak levels of total alcohols at 1500.09 mg/L and total esters at 198.43 mg/L. Total phenolic content reached 753.93 mg GAE/L in the pre-inoculation group, while total flavonoids peaked at 138.30 mg RE/L under simultaneous inoculation. Antioxidant capacity was significantly enhanced in the pre-inoculation group, demonstrating IC_{50} values of 0.0483 mg/mL for DPPH radical scavenging, 0.071 mg/mL for hydroxyl radical scavenging, and 0.152 mg/mL for ferricyanide reducing power. Sensory evaluation favored the delayed inoculation (DC) and simultaneous inoculation groups (SC), with respective composite scores of 82.13 and 80.13. In conclusion, inoculation timing critically governs flavor quality, functional components, and antioxidant attributes in mixed-culture fermented navel orange wine. Systematic comparison across fermentation modes elucidated yeast interaction mechanisms and quality formation patterns, providing theoretical and empirical foundations for process optimization. This research facilitates value enhancement in citrus wine products and fosters sustainable development in navel orange processing industries.

Key words: navel orange wine; *Saccharomyces cerevisiae*; Non-*Saccharomyces cerevisiae*; inoculation chronology; characteristic components; antioxidant activity

脐橙(*Citrus sinensis*)虽然原产于巴西,但在中国脐橙已成为重要的经济作物。据最新统计,2023 年中国脐橙产量达到 16004 万吨。其中,赣南地区产量达 180 万吨,奉节县产量达 13.73 万吨,产业规模持续扩大[1]。然而,消费者对鲜食脐橙的偏好使得大量果实面临滞销和浪费的问题,根据数据显示,2022 年在我国脐橙市场中,鲜食领域占比约为 94.85%;而深加工市场仅为 5.15%[2]。因此为提升产业附加值,开发深加工产品势在必行,而果酒酿造因其符合健康消费趋势与产品多元化需求,成为极具潜力的转化途径。

脐橙果酒不仅保留了果实的营养成分,更通过发酵提升生物利用度。其富含的多酚与黄酮类化合物(如橙皮苷、芦丁)具有显著抗氧化活性,可清除自由基、延缓衰老并降低心血管疾病风险[3]。然而,当前商业化生产多依赖单一酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)发酵,导致产品同质化严重、香气层次单一[4]。研究发现,非酿酒酵母能作用于原料前体物质,促进风味物质转化与释放,丰富果酒风味,但因其乙醇耐受性低而难以单独应用[5]。混菌发酵结合了酿酒酵母的高酒精耐受性和非酿酒酵母的风味优势,可弥补单一菌株发酵的不足[6],因此这种方式能通过协同效应兼顾发酵效率和风味开发:酿酒酵母则保障酒精转化率,非酿酒酵母代谢前体物质释放萜烯类香气成分[7−8]。Tofalo 等[9] 的研究表明共发酵能提高气泡酒的香气化合物的种类及含量,从而改善酒的口感与风味。传统的单酿酒酵母发酵可能无法充分释放脐橙中的抗氧化物质,限制了果酒的营养和健康潜力[10]。Xiong 等[11] 的研究表明共发酵在饮料工业中具有潜在应用价值,且利用共发酵生产了富含 GlcA 且抗氧化能力增强的苹果酒。近期研究表明,接种时序对菌群互作具有关键调控作用,但针对脐橙果酒的时序调控研究仍较缺乏,尤其对风味及多酚、黄酮等抗氧化成分的影响尚未明晰。

基于此,本研究以江西脐橙为原料,系统比较酿酒酵母与非酿酒酵母的四种发酵方式,即酿酒酵母和非酿酒酵母同时接种(SC)、非酿酒酵母提前接种(PC)、非酿酒酵母延后接种(DC)及酿酒酵母单菌发酵(MC),分析接种时序对果酒基础理化指标、感官、挥发性成分、总酚、总黄酮及抗氧化活性(DPPH 自由基和羟基自由基清除率、铁氰化钾还原力)的调控规律,旨在为优化混菌发酵工艺、提升脐橙果酒风味与营养品质提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

脐橙 江西省赣州市信丰县;葡萄酒高活性干酵母(*Saccharomyces cerevisiae* RV171)、生香活性干酵母(*Hanseniaspora*) 安琪酵母股份有限公司;白砂糖 食品级,云南百川食品有限公司;果胶酶(600 U/g)、焦亚硫酸钾 食品级,淄博长城化工厂;氢氧化钠标准滴定溶液 分析纯,广州和为医药科技有限公司;酚酞、没食子酸、氯化钠 分析纯,天津基准化学试剂有限公司;福林酚 分析纯,上海蓝季科技发展有限公司;无水碳酸钠、L-抗坏血酸、仲辛醇 分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;芦丁 分析纯,上海源叶生物科技有限公司;亚硝酸钠、硝酸铝、无水乙醇、硫酸亚铁、铁氰化钾、三氯乙酸 分析纯,天津市永大化学试剂有限公司;氢氧化钠 分析纯,天津市百世化工有限公司;DPPH 分析纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;过氧化氢 分析纯,广东省化学试剂工程技术研究开发中心。

YP5002 电子天平 上海越平科学仪器有限公司;JYL-C93T 榨汁搅拌机 九阳股份有限公司;SY-120 超声波清洗机 上海微弥科技有限公司;UPT-l-10T 优普系列超纯水机 成都超纯科技有限公司;TDZ5-WA 台式低速自动平衡离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;C21-IH01K 电磁炉 浙江苏泊尔股份有限公司;RHB80 手持糖度仪 石家庄泰斯特仪器设备有限公司;ST3100 pH 值测试仪 奥豪斯仪器(上海)有限公司;UV-15000 紫外/可见分光光度计 上海美析仪器有限公司;Synergy H1 全功能酶标仪 美国伯腾仪器有限公司;5977B 气相色谱-质谱联用仪 安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　脐橙果酒发酵工艺流程　新鲜脐橙→预处理→破碎榨汁→酶解→成分调整→巴氏杀菌→接种发酵→酒渣分离→脐橙果酒。

1.2.2　工艺操作要点　预处理：选取新鲜成熟脐橙，洗净去皮，剥除白色皮层和茎络，切块去籽后用榨汁机破碎榨汁，立即加入 60 mg/L 焦亚硫酸钾。酶解：加入 0.3 g/L 果胶酶，搅拌均匀后置于 45 ℃ 恒温水浴锅中酶解 1 h。成分调整：调整发酵液 pH 至 4.0，加入白砂糖使糖度达 22°Bx[12]。巴氏杀菌：在 90 ℃ 恒温水浴锅内巴氏杀菌 15 min。接种发酵：共设置 MC、SC、PC、DC 四组，分别按不同时序接种 10^6 CFU/mL 的葡萄酒高活性干酵母（酿酒酵母）和生香活性干酵母（非酿酒酵母）。MC 组为单纯葡萄酒高活性酵母一次性接入；SC 组在 0 h 同时将葡萄酒高活性干酵母与生香活性干酵母一并接入；PC 组先于 0 h 接入生香活性干酵母，24 h 后再补入葡萄酒高活性干酵母；DC 组则先接入葡萄酒高活性干酵母，24 h 后再补入生香活性干酵母，保证各组总接种量均为 10^6 CFU/mL。采用密闭式发酵，27 ℃ 恒温发酵 7 d，每天摇动 2~3 次，直至残糖含量低于 4 g/L 或可溶性固形物含量稳定不变视为发酵结束。酒渣分离：酒样过滤静置澄清分离后 4℃ 低温保存待测。

1.2.3　脐橙果酒理化指标测定

1.2.3.1　酒精度的测定　采用 GB 5009.225-2016《食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定》中的酒精计法测定样品乙醇浓度。

1.2.3.2　可溶性固形物含量的测定　采用手持糖度仪直接测定，结果以°Brix 表示。

1.2.3.3　pH 的测定　使用 pH 计直接测定。

1.2.3.4　总酸含量的测定　按照 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的酸碱指示剂滴定法进行。

1.2.4　脐橙果酒感官评价　感官评价标准参考 NY/T 1508-2017《农业行业标准 绿色食品 果酒》的要求进行修改，组建 10 名食品专业人员构成的感官评定小组对样品进行感官评价，感官评价满分为 100 分，评价标准如表 1 所示。

表 1　脐橙果酒感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for navel orange wine

项目	分值(分)	评价标准
色泽	9~10	色彩饱满，有光泽
	6~8	有脐橙酒应有的金黄色或明亮的橙黄色色泽
	<5	与脐橙酒橙黄色的色泽略有不符，颜色暗沉
澄清度	9~10	澄清，透明
	6~8	较为澄清，无明显的悬浮物
	<5	有明显的悬浮物
香气	26~30	果香、酒香浓郁优雅，香气协调
	21~25	果香、酒香良好，较为和谐
	16~20	果香、酒香不足
	<15	无异香，但不悦人
滋味	31~40	酒体丰满醇厚，无明显苦味
	21~30	酒体柔顺，甜酸适度，有微苦味但能接受
	11~20	酒体不协调，酸味明显，口感寡
	1~10	有明显的苦味、酸味或其他缺陷
典型性	9~10	典型优良，酒体突出
	7~8	典型明确，风格较佳
	5~6	典型性不明显
	<4	失去本品典型性

1.2.5　脐橙果酒挥发性特征成分测定

1.2.5.1　脐橙果酒处理方法　参照胡小琴等[13]的方法并稍作修改，取 10 mL 脐橙果酒置于 20 mL 顶空钳口瓶中，加入 NaCl 至过饱和，加入 20 μL 400 mg/L 的内标仲辛醇溶液，聚四氟乙烯隔垫密封，40 ℃ 水浴平衡 40 min 后，插入已老化的萃取头顶空萃取 40 min，随后于 250 ℃ GC 进样口解吸 5 min 进行挥发性香气成分分析。

1.2.5.2　色谱条件　参照郑淑丹等[14]的方法并稍作调整：色谱柱 DB-5MS（30 m×0.25 mm，0.25 μm）；程序升温：40 ℃ 保持 3 min，以 3 ℃/min 升至 160 ℃ 并保持 2 min，再以 8 ℃/min 升至 230 ℃ 并保持 3 min；载气为 He，流速 1.0 mL/min；进样口温度 250 ℃，无分流进样。

质谱条件：电子轰击（EI）电离源，离子源温度 230 ℃，接口温度 250 ℃，电子能量 70 eV，灯丝电流 0.25 mA；扫描质量范围 m/z 33~450。

1.2.5.3　定性、定量方法　挥发性组分经 GC-MS 采集后，先以 NIST 谱库比对（匹配度≥70%）进行初步筛选，再结合脐橙果酒相关文献 [15] 进一步确认；定量采用内标法，按下式计算各组分质量浓度：

$$\text{挥发性物质质量浓度(mg/L)} = \frac{\text{各组分峰面积}\times\text{内标物质量浓度(mg/L)}}{\text{内标物峰面积}}$$

1.2.5.4　脐橙果酒总酚和总黄酮含量的测定　总酚含量的测定：参照蒋文鸿等[16]的方法，样品与福林酚试剂反应后，加入碳酸钠溶液，于 760 nm 处测定吸光度，以没食子酸标准曲线计算含量；总黄酮含量的测定：参照谢欣雨[17]的方法，样品依次加入亚硝酸钠、硝酸铝和氢氧化钠溶液显色，于 510 nm 处测定吸光度，以芦丁标准曲线计算含量。

1.2.6　脐橙果酒抗氧化活性测定

1.2.6.1　DPPH 自由基清除率的测定　参照吴均等[18]的方法，取 1 mL 经稀释的脐橙果酒与 1 mL 0.2 mmol/L DPPH-乙醇溶液混合，确保无光照条件反应 30 min，在 517 nm 的波长下测定吸光值，质量浓度为 1 mg/mL 的抗坏血酸溶液作为阳性对照。DPPH 自由基清除率计算公式如下：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中：A_0为蒸馏水代替果酒测定的吸光值；A_1为果酒测定的吸光值。

1.2.6.2 羟基自由基清除率的测定 参照孙鹏尧[19]的方法，取稀释的脐橙果酒 1 mL 置于试管，加入浓度相同的硫酸亚铁溶液、水杨酸乙醇溶液和过氧化氢溶液，混匀，置于 37 ℃ 水浴中反应 30 min，在 510 nm 波长下测定吸光值，质量浓度为 1 mg/mL 抗坏血酸溶液作为阳性对照。羟基自由基清除率计算公式同 1.2.6.1。

1.2.6.3 铁氰化钾还原力的测定 参照于抗非等[20]的方法稍作修改：分别向 5 支 10 mL 具塞比色管中加入 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 脐橙果酒样品溶液，用蒸馏水补足至 1.0 mL；随后依次加入 2.5 mL pH6.6、0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液和 2.5 mL 30.0 mmol/L 铁氰化钾溶液，摇匀后置于 50 ℃ 水浴中反应 20 min。反应结束后迅速冷却，再加入 2.5 mL 0.6 mol/L 三氯乙酸溶液终止反应，3000 r/min 离心 10 min。取 2.5 mL 上清液，加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 6 mmol/L $FeCl_3$ 溶液，充分混匀后于 700 nm 处测定吸光度。以同浓度 V_C 溶液作阳性对照，铁氰化钾还原力计算公式如下：

$$\text{还原力} = A_1 - A_0$$

式中：A_0 为蒸馏水代替果酒测定的吸光值；A_1 为果酒测定的吸光值。

1.3 数据处理

所有实验均设置 3 组独立生物学重复，数据用“平均值±标准差”的格式表示；利用 Origin 2018 进行可视化处理；利用 SPSS Statistic 19.0 软件进一步进行统计分析，采用单因素方差分析，结合 Duncan 多重比较检验判定组间差异。

2 结果与分析

2.1 脐橙果酒理化指标分析

以 MC 组为对照组，SC、PC、DC 组为实验组，测定四组脐橙果酒的理化指标，结果如表 2 所示，不同接种时序发酵的脐橙果酒基本理化指标均符合 NY/T 1508-2017《绿色食品果酒》的规定要求。

表 2 接种时序对脐橙果酒理化指标的影响

Table 2 Effect of inoculation chronology on physicochemical indicators of navel orange wine

组别	酒精度(%vol)	pH	可溶性固形物(°Bx)	总酸(g/L)
MC组	12.37±0.21^{a}	3.43±0.07^{b}	4	6.36±0.06^{c}
SC组	11.70±0.10^{bc}	3.36±0.03^{b}	4	6.78±0.08^{a}
PC组	11.93±0.15^{b}	3.56±0.03^{a}	4	6.83±0.06^{a}
DC组	11.57±0.12^{c}	3.41±0.04^{b}	4	6.54±0.08^{b}

注：同列不同字母表示差异性显著(P<0.05)。

由表 2 可知，脐橙果酒的酒精度、pH、总酸均存在显著性差异(P<0.05)。与其他组相比，脐橙果酒酒精度最高的为 MC 组。混菌发酵的三组脐橙果酒酒精度低的原因是非酿酒酵母加入混菌发酵，降低了酿酒酵母最大生物量，进而使产生的乙醇体积分数降低[21]。实验测得的 pH 在 3.36~3.56 的范围内，脐橙果酒的可溶性固形物含量均为 4°Bx，说明脐橙果酒均到达发酵终点。脐橙果酒中总酸含量在 6.36~6.83 g/L 之间，与 MC 组相比，SC 组的总酸含量显著(P<0.05）提升了约 6.3%，PC 组的总酸含量显著(P<0.05)提升了约 7.4%。这是由于微生物间的协同作用及发酵条件优化。混菌发酵时，不同微生物协同代谢，产生更多有机酸，同时非酿酒酵母提前接种可提前布局发酵环境，后续酿酒酵母能更高效产生酸性物质[21−22]。

2.2 脐橙果酒感官评价

如图 1 所示，混菌发酵时序调控对脐橙果酒感官品质的提升作用显著，其中 DC 组优势明显。原因是酿酒酵母在发酵初期接入，能有效抑制杂菌生长、降低酒精胁迫，为后续发酵创造稳定环境。随后接入非酿酒酵母，其在低酒精度条件下可长期存活并持续代谢，产生丰富的酯类、萜烯和甘油等呈香呈味物质，同时避免了果酒因酸度过高而产生不愉快的酸味，从而全方位提升果酒的色泽、香气、滋味和典型性[23]。具体而言，DC 组在香气、滋味维度分别以 26.25 分与 32 分领先，较 MC 组提升 11.1% 和 4.9%，澄清度评分也提高了 9.5%。相比之下，PC 组典型性较低，且滋味涩感导致评分降低 2.3%；SC 组香气复杂度高，澄清稳定性不足。这表明延后发酵时序通过平衡酵母代谢活力与产物累积速率，实现香气丰富性、口感协调性及酒体透明度的协同增效，为脐橙果酒工艺优化提供了核心方向。

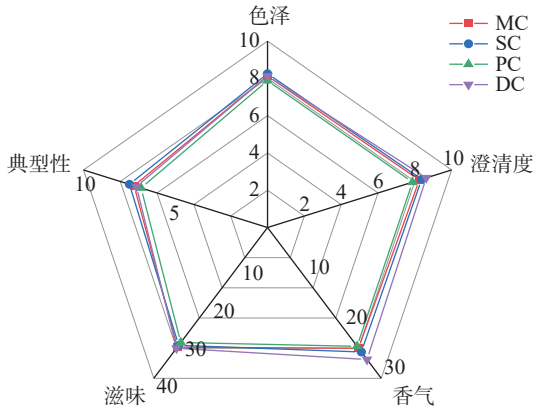


图 1 接种时序对脐橙果酒感官评价影响雷达图

Fig.1 Radar chart of the effect of inoculation chronology on sensory evaluation of navel orange wine

2.3 脐橙果酒挥发性特征成分分析

2.3.1 脐橙果酒挥发性成分分析 本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法探究了不同接种时序对脐橙果酒挥发性成分的影响(表 3)。结果表明，脐橙果酒含 49 种挥发性物质，涵盖醇、酯、酸、醛酮、

表 3　不同接种时序下的脐橙果酒的挥发性成分和含量

Table 3　Volatile components and contents of navel orange wine with different inoculation methods

序号	挥发性物质	MC组（mg/L）	SC组（mg/L）	PC组（mg/L）	DC组（mg/L）	香气特征	气味阈值（mg/L）	MC组OAV值	SC组OAV值	PC组OAV值	DC组OAV值
1	苯甲醇	–	–	1.27±0.36	–	茉莉花香	0.1	–	–	12.700	–
2	苯乙醇	135.78±5.06^{d}	307.09±3.00^{b}	389.69±6.72^{a}	290.32±6.37^{c}	玫瑰花香	0.2762	491.60	1111.84	1410.90	1051.12
3	异丁醇	22.60±2.82^{d}	202.49±3.78^{c}	288.82±9.78^{a}	236.02±6.37^{b}	醇香味	27.22	0.83	7.44	10.61	8.67
4	异辛醇	–	2.81±0.08^{b}	2.88±0.40^{b}	3.27±6.37^{a}	花香	0.01	–	281.00	288.00	327.00
5	辛醇	–	–	2.97±0.40	–	清香、黄瓜味	0.03			99.00	
6	异戊醇	546.81±6.48^{c}	671.53±8.18^{b}	743.12±4.83^{a}	546.81±6.48^{c}	香蕉香	0.005	109362.00	134306.00	148624.00	109362.00
7	2,3-丁二醇	20.50±4.65^{c}	18.83±6.06^{c}	67.58±3.92^{a}	49.01±6.37^{b}	水果味，奶油味	100	0.20	0.19	0.68	0.49
8	2-庚醇	–	–	3.73±1.10^{a}	–	柠檬味、花果味	1	–	–	3.73	–
9	薄荷醇	6.41±4.07	–	–	–	薄荷香气	0.005	1282.00	–	–	–
10	正庚醇	–	4.54±0.09	–	–	柑橘香	0.3	–	15.13	–	–
	醇类小计	732.11±10.66^{c}	1207.31±11.27^{b}	1500.09±13.46^{a}	1125.46±14.29^{b}						
11	邻苯二甲酸二丁酯	1.17±0.81^{a}	0.69±0.21^{b}	0.502±0.16^{b}	0.55±0.12^{b}	花香	0.05	23.40	13.80	10.04	11.00
12	乙酸苯乙酯	52.02±5.63^{a}	35.99±3.27^{b}	–	49.12±1.97^{a}	花香、甜枣味	0.005	10404.00	7198.00	–	9824.00
13	辛酸乙酯	20.47±5.62^{a}	16.94±2.40^{a}	18.72±3.63^{a}	16.27±3.21^{a}	白兰地酒香	0.003	6823.33	5646.67	6240.00	5423.33
14	癸酸乙酯	2.55±0.47^{b}	2.71±0.45^{b}	3.83±0.43^{a}	3.49±0.74^{a}	椰子香、酒香	0.001	2550.00	2710.00	3830.00	3490.00
15	甲酸辛酯	3.07±0.68^{a}	2.21±0.46^{b}	–	–	水果香	0.008	383.75	276.25	–	–
16	水杨酸甲酯	–	2.10±0.12	–	–	冬青叶香味	0.01	–	210.00	–	–
17	丁二酸二乙酯	–	9.32±2.57	–	–	苹果香	0.05	–	186.40	–	–
18	乙酸异戊酯	17.81±1.97^{d}	53.46±4.50^{c}	77.35±8.80^{a}	59.69±1.89^{b}	香蕉香	0.5	35.62	106.92	154.70	119.38
19	棕榈酸乙酯	3.00±1.55^{a}	2.57±0.51^{a}	3.73±1.19^{a}	3.61±1.21^{a}	脂肪味、奶油香气	0.0005	6000.00	5140.00	7460.00	7220.00
20	3-羟基己酸乙酯	8.91±5.27^{b}	7.81±1.22^{b}	16.52±1.56^{a}	11.10±4.73^{b}	果香	0.003	2970.00	2603.33	5506.67	3700.00
21	苯乙酸乙酯	–	–	1.58±0.51	–	蜂蜜香气	0.0008	–	–	1975.00	–
22	3-羟基丁酸乙酯	–	3.01±1.46^{ab}	3.45±0.97^{a}	2.99±0.41^{b}	葡萄香、白酒香	0.005	–	602.00	690.00	598.00
23	丁酸乙酯	12.74±1.44^{b}	–	16.53±2.07^{a}	–	果香、菠萝香	0.01	1274.00	–	1653.00	–
24	十四酸乙酯	–	–	0.75±0.37	–	椰子香	0.0003	–	–	2500.00	–
25	乙酸乙酯	–	–	55.42±3.74^{a}	15.97±1.93^{b}	苹果、梨、香蕉皮香	0.84	–	–	65.98	19.01
26	十八酸乙酯	–	–	–	0.16±0.02^{a}	蜡质味	<0.0001	–	–	–	>1600.00
	酯类小计	121.77±9.93^{d}	136.85±6.90^{c}	198.43±10.69^{a}	162.95±6.79^{b}						
27	乙酸	–	–	28.72±1.94^{b}	29.01±0.13^{a}	刺激性气味	0.01	–	–	2872.00	2901.00
28	辛酸	1.38±2.98^{b}	13.88±0.77^{a}	14.26±1.06^{a}	12.64±0.24^{a}	奶酪香、涩味	0.0005	2760.00	27760.00	28520.00	25280.00
29	己酸	–	–	7.69±0.84^{a}	4.38±0.79^{b}	汗臭味	0.001	–	–	7690.00	4380.00
30	正癸酸	–	–	0.53±0.16^{a}	0.57±0.14^{a}	难闻的气味	0.0003	–	–	1766.67	1900.00
31	庚酸	–	16.77±0.78	–	–	微有腐败的脂肪气味	0.0008	–	20962.50	–	–
	酸类小计	1.38±2.98^{d}	38.93±1.10^{c}	51.21±2.37^{a}	46.61±0.85^{b}						
32	苯乙酮	1.54±0.48^{b}	1.99±0.37^{b}	2.04±0.70^{b}	6.04±1.60^{a}	坚果、水果味	0.15	10.27	13.27	13.60	40.27
33	2-辛酮	10.62±5.55^{a}	7.09±0.47^{b}	–	10.10±2.34^{a}	泥土味、草本气息香	0.01	1062.00	709.00	–	1010.00
34	乙酰丙酮	–	10.64±1.75^{a}	–	0.78±0.13^{b}	不愉快臭味	0.3	–	35.47	–	2.60
35	香叶基丙酮	–	–	0.66±0.17^{b}	1.11±0.28^{a}	果香	0.0005	–	–	1320.00	2220.00
36	圆柚酮	2.56±0.14^{b}	1.65±0.75^{c}	0.99±0.04^{d}	3.11±1.06^{a}	柑橘香、柚子香、葡萄柚皮香	0.0001	25600.00	16500.00	9900.00	31100.00
37	甲基环戊烯醇酮	–	–	3.18±0.07	–	焦糖枫糖浆气味	0.003	–	–	1060.00	–
38	癸醛	2.08±0.95^{b}	1.73±0.53^{b}	2.87±1.53^{a}	2.14±1.15^{b}	橙子、柠檬等水果香	0.001	2080.00	1730.00	2870.00	2140.00
39	苯乙醛	3.37±1.03^{a}	3.42±1.10^{a}	1.67±0.08^{b}	1.82±0.17^{b}	风信子香气	0.0005	6740.00	6840.00	3340.00	3640.00
40	壬醛	3.28±1.99^{b}	1.27±0.23^{c}	1.44±0.17^{c}	6.04±1.60^{a}	油脂味和甜橙香	0.0008	4100.00	1587.50	1800.00	7550.00

续表 3

序号	挥发性物质	MC组（mg/L）	SC组（mg/L）	PC组（mg/L）	DC组（mg/L）	香气特征	气味阈值（mg/L）	MC组 OAV值	SC组 OAV值	PC组 OAV值	DC组 OAV值
41	2,4-二甲基-苯甲醛	42.37±4.76^{a}	24.21±5.11^{b}	19.24±4.06^{c}	10.10±2.3^{d}	樱桃、杏仁香料味	0.003	14123.33	8070.00	6413.33	3366.67
42	乙醛	–	1.70±0.77^{a}	–	0.78±0.13^{b}	刺激性果味	0.018	–	94.44	–	43.33
	醛酮类小计	65.85±7.72^{a}	53.74±5.67^{b}	32.12±1.70^{d}	42.06±3.76^{c}						
43	香茅醇	16.86±1.75^{a}	15.12±1.61^{b}	15.47±6.37^{b}	16.06±2.15^{a}	玫瑰香	0.001	16860.00	15120.00	15470.00	16860.00
44	芳樟醇	10.92±8.63^{b}	10.85±4.91^{b}	10.90±2.28^{b}	11.37±6.37^{a}	柑橘花香、玫瑰香	0.0005	21840.00	21700.00	21800.00	22740.00
45	菠萝醇	–	3.71±1.86^{b}	6.17±0.15^{a}	6.04±6.37^{a}	酱油味	0.003	–	1236.67	2056.67	2013.33
46	二氢香芹醇	–	–	2.98±0.15	–	留兰香、胡椒香	0.0008	–	–	3725.00	–
47	4-萜烯醇	23.44±3.67^{a}	14.91±2.78^{c}	18.78±3.81^{b}	16.61±6.37^{b}	胡椒香、泥土香、木香	0.005	4688.00	2982.00	3756.00	3322.00
	萜烯类小计	51.22±4.68^{a}	44.59±3.72^{b}	54.30±5.52^{a}	50.08±5.12^{a}						
48	双酚A	6.24±0.94^{a}	1.30±0.28^{b}	0.48±0.05^{b}	0.67±4.35^{b}	酚类气味					
49	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	22.19±1.44^{a}	11.56±3.08^{b}	12.78±0.48^{b}	12.98±3.35^{b}	香辛料、丁香味	0.0003	73966.67	38533.33	42600.00	43266.67
	其他类小计	28.43±2.38^{a}	12.86±3.36^{b}	13.26±0.53^{b}	13.65±7.70^{b}						

注：同行不同字母表明有显著性差异（P<0.05）；“–”表示无数据。

萜烯及其他六类，其中酯类最多达 16 种。MC 组仅检测出 27 种挥发性物质，而混菌发酵组（SC、PC、DC 组）分别检测出 34、38、35 种挥发性物质，表明酿酒酵母与非酿酒酵母的混合发酵显著提升了脐橙果酒的香气成分多样性。这一发现与尹雪林等[24] 的研究结果相似，他们发现戴尔有孢圆酵母与酿酒酵母混合发酵后，猕猴桃酒的香气成分种类和含量均有所增加，尤其酯类等关键香气物质含量提升，改善了酒的香气品质。不同接种方式下，挥发性物质质量浓度存在差异。在醇类、酯类和酸类化合物的积累上，PC 组均占据绝对优势。从具体排序来看，醇类物质含量依次为 PC 组>SC 组>DC 组>MC 组；而酯类与酸类由于在混菌发酵中的代谢积累规律相似，均呈现出 PC 组>DC 组>SC 组>MC 组的变化趋势。总体来看，单菌发酵组的醇类、酯类、酸类挥发性成分含量低于混合发酵组，但其醛酮类挥发性物质含量最高。醇类化合物是酵母发酵的关键代谢产物，对酒的风味特性起决定性作用。酒中高级醇含量不足会使风味单调乏味，缺乏层次；而含量过高则会使酒体过于刺激、辛辣甚至苦涩，影响饮用体验[25]。Shekhawat 等[26] 的研究显示，非酿酒酵母可提升特定氨基酸代谢基因表达水平，增强苯丙氨酸向苯乙醇转化基因活性，提高酵母产苯乙醇能力，影响酒体风格。单菌发酵果酒中独有的薄荷醇，提前发酵组特有的苯甲醇等具有独特香味，同时发酵组的正庚醇有柑橘香，这些醇类赋予果酒风味、丰富层次，且能衬托酯类香气，优化脐橙果酒整体风味。

酯类是脐橙果酒骨架香气的核心，表 3 显示 PC 组总酯 198.43 mg/L，显著高于 MC 组 121.77 mg/L（P<0.05），其中辛酸乙酯 18.72 mg/L、乙酸异戊酯 77.35 mg/L、癸酸乙酯 3.83 mg/L，三者 OAV 均>100，直接贡献白兰地酒香、香蕉甜香及椰子奶油香[27−29]，共同奠定了混菌发酵脐橙果酒复杂且浓郁的酯香骨架；酸类虽在 PC 组总量达 51.21 mg/L，主要组分辛酸（14.26 mg/L，OAV≈21080）和己酸（7.69 mg/L，OAV≈6035）均具有较高香气活性值，在低浓度时可增添奶酪、脂肪等复杂香韵，但需注意其含量过高可能带来不良风味[21,30]；醛酮类中壬醛、癸醛在 MC 组含量为 2.08~3.28 mg/L，OAV 均>1000，赋予橙皮油脂香，2,4-二甲基苯甲醛在 MC 组达 42.37 mg/L、OAV≈7993，提供樱桃-杏仁香，与典型性感官项显著正相关（r=0.79）；萜烯类是脐橙果酒典型柑橘香的重要来源，其中芳樟醇与香茅醇各组含量达到 10.92~16.86 mg/L 之间，OAV 分别达 22020 与 16080，强化柑橘典型花香[31]；因此，PC 组中辛酸乙酯、乙酸异戊酯、癸酸乙酯等高 OAV 酯类，以及芳樟醇、香茅醇等特征香气成分，共同构建了浓郁的果香与花香，为脐橙果酒风味优化提供了分子依据。

如图 2 所示，醇类与酯类是脐橙果酒的主要特征成分，含量较高，而酸类、醛酮类和萜烯类物质含量较少，共同构建了其独特风味体系。异戊醇与乙酸异戊酯分别是醇类、酯类中含量最高的物质，PC 组

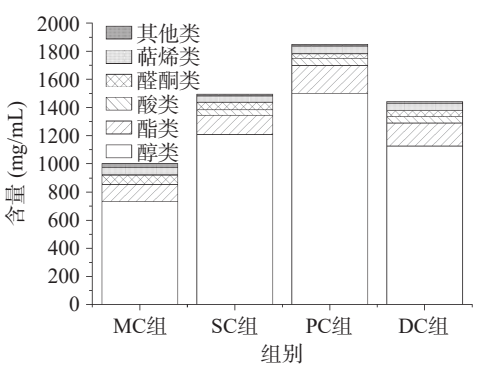


图 2 接种时序对脐橙果酒各类挥发性物质含量的影响

Fig.2 Effect of inoculation chronology on volatile substance content of navel orange wine

脐橙果酒在这两大主要特征成分上含量更高，因此香味更浓郁，具有醇香、花香、果香，酒香更饱满、柔和，本实验结果与康明丽等[32]的研究结果类似，进一步验证了发酵工艺对脐橙果酒风味物质形成及含量的重要影响，也为后续深入研究脐橙果酒的酿造工艺优化及风味调控提供了坚实的基础。

2.3.2　共有香气成分与感官得分相关性分析　为明确关键香气物质对不同接种时序脐橙果酒感官品质的贡献，基于表 3 挥发性成分数据与感官评分进行了相关性热图分析(图 3)。结果显示，脐橙果酒的整体感官品质与多种特征香气成分存在显著关联(P<0.01)，且混菌发酵通过改变特定代谢物的含量实现了风味的优化。从数据可知，提前接种组(PC)虽然醇类和酸类总量最高，但其在感官评价中却出现了“滋味涩感”及“典型性评分较低”的缺陷。热图分析证实，这正是由于PC 组中异戊醇(743.12 mg/L)和苯乙醇(389.69 mg/L)的过度富集所致，这些高级醇与“滋味”得分呈显著负相关(P<0.05)，导致酒体产生刺激性与苦涩感。在香气方面，芳樟醇、香茅醇等萜烯类物质与感官得分呈现出显著的正相关，构成了果酒愉悦花果香气的基础；而部分特定酯类(如辛酸乙酯)则在热图中呈现出一定的负相关，这表明此类成分的过度积累可能会打破风味平衡，反而对整体感官体验产生不利影响。相关性热图分析(图 3)显示，不同香气成分与感官各维度之间的关联模式存在明显差异。圆柚酮、苯乙醛等醛酮类化合物与“典型性”得分呈正相关，提示其与柑橘特征风味的形成密切相关。相比之下，某些高级醇(如异戊醇、苯乙醇)及中短链脂肪酸(如辛酸)与“滋味”得分呈较强负相关，说明这些物质的过度积累可能导致涩感或异味，降低口感品质。上述相关性模式为理解混菌发酵时序如何影响果酒风味提供了分子层面的依据：促进正相关风味物质的生成、抑制负相关异味物质的积累，是实现酒体风味平衡的关键。

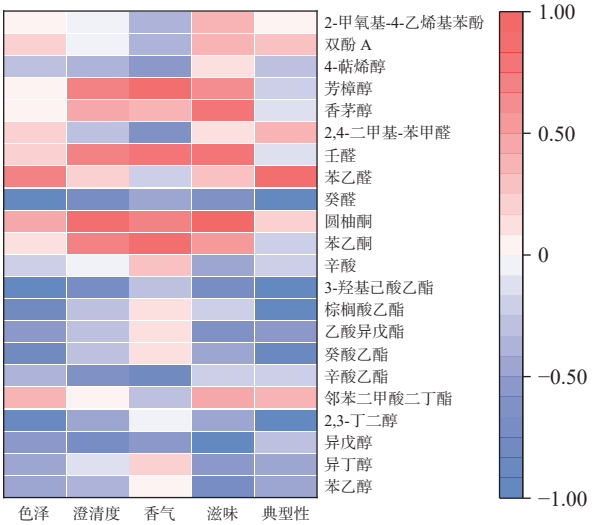


图 3　脐橙果酒的共有香气成分与感官得分的相关性热图

Fig.3　Correlation heat map of aroma components and sensory scores of navel orange wine

2.3.3　脐橙果酒非挥发性成分分析　总酚是果酒中一种重要的功能性成分。如图 4 所示，不同接种时序和发酵模式对脐橙果酒总酚含量产生了显著影响(P<0.05)。实验结果显示，总酚含量在不同接种方式下呈现出明显的排序：PC 组(753.93mg GAE/L)>SC 组(726.39 mg GAE/L)>DC 组(705.48 mg GAE/L)>MC 组(593.28mg GAE/L)，其中 MC 组与其他组之间存在显著差异(P<0.05)。这一结果表明，相较于单菌发酵，混菌发酵能够有效提升脐橙果酒的总酚含量。提前发酵组的总酚含量最高，这一现象具有重要的研究意义。非酿酒酵母在其中发挥了关键作用，已有研究表明，非酿酒酵母含有糖苷酶[21,33]，该酶能够特异性地水解糖苷键，从而释放酚苷元，进而促进总酚的积累。在 PC 组中，非酿酒酵母的提前加入，使得其在发酵初期就能够充分发挥糖苷酶的作用，为总酚的积累创造了有利条件。此外，从发酵过程中总酚含量的变化趋势来看，非酿酒酵母加入后总酚含量呈上升趋势，这进一步证实了非酿酒酵母对总酚累积具有显著的促进作用。

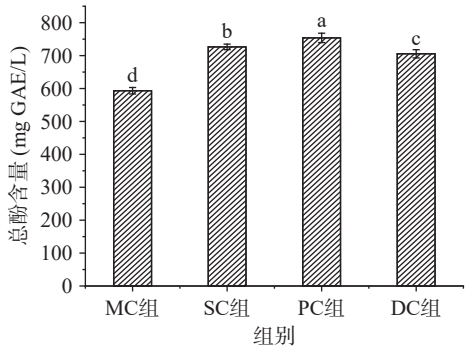


图 4　接种时序对脐橙果酒总酚含量的影响

Fig.4　Effect of inoculation chronology on total phenol content of navel orange wine

注：不同字母表示差异性显著(P<0.05)，图 5 同。

总黄酮作为果酒的重要活性成分之一，其含量和种类直接影响果酒的抗氧化能力。如图 5 所示，脐橙果酒黄酮含量从高到低依次为 SC 组(138.30 mg RE/L)、PC 组(132.12 mg RE/L)、DC 组(128.25 mg RE/L)、MC 组(124.65 mg RE/L)。非酿酒酵母中的糖苷酶能将底物中原有的、无活性的黄酮苷水解，转化为具有更高生物活性和检测响应值的黄酮苷元[33]，使得 SC 组和 PC 组的黄酮含量较 MC 组显著提高。在 PC 组中，非酿酒酵母较早地参与到发酵过程中，迅速繁殖从而大量合成和分泌糖苷酶，并作用于底物中的黄酮苷，催化其水解反应，断裂糖苷键，从而释放出游离的黄酮苷元和糖分子，因此黄酮含量显著较高。而在 SC 组中，酿酒酵母与非酿酒酵母的同步代谢恰好契合了黄酮苷水解的最佳窗口期。非酿酒酵母在发酵初期即分泌糖苷酶，此时酒精浓度低、酶活保留充分；同时酿酒酵母早期代谢产物促进了底物

中结合态黄酮的溶出，使酶与底物接触更充分。因此 SC 组黄酮含量（138.30 mg RE/L）略高于 PC 组（132.12 mg RE/L），但两者之间并无显著差异（P>0.05）。而 DC 组在接种非酿酒酵母时已处于高酒精、低营养的胁迫环境，其生长受抑，糖苷酶活力较弱，水解反应无法有效进行，故黄酮含量略低于另外两组[34]。此外，发酵过程中的诸多环境因素，如 pH、温度、营养物质的浓度等，也可能与微生物之间的相互作用协同影响黄酮的代谢。不同的接种时序可能导致发酵体系中这些环境因素的动态变化有所不同，进而间接影响黄酮的含量。

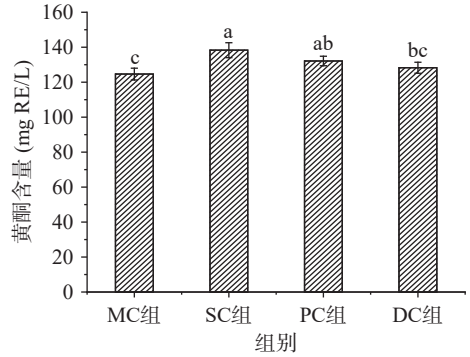


图 5 接种时序对脐橙果酒黄酮含量的影响

Fig.5 Effect of inoculation chronology on flavonoid content of navel orange wine

2.4 脐橙果酒抗氧化活性分析

2.4.1 DPPH 自由基清除率的分析 抗氧化能力是评价富含酚类物质果蔬和果酒营养和功能的重要指标。如图 6 所示，在 0.04~0.20 mg/mL 范围内，MC 组 DPPH 自由基清除能力从 16% 增至 51%，SC 组、PC 组、DC 组在 0.20 mg/mL 时分别达 62%、69%、60%，相比于 MC 组均有显著性提高（P<0.05）。IC_{50} 计算结果显示，DPPH 自由基清除能力排序为：PC 组（0.0483 mg/mL）>SC 组（0.086 mg/mL）>DC 组（0.1066 mg/mL）>MC 组（0.24 mg/mL），与多酚趋势一致。王东伟等[35] 的研究中系统地分析了脐橙果酒在不同酿造阶段的抗氧化能力变化，并与总酚含量的动态变化进行了关联分析。结果显示，在果酒酿造过程中，随着总酚含量的增加，其抗氧化能力也相应增强，二者呈现出显著的正相关关系表明脐橙果酒抗氧化能力与总酚含量高度相关，总酚含量对果酒抗氧化活性起关键作用。

2.4.2 羟基自由基清除率的分析 如图 7 所示，脐橙果酒与同等浓度 V_C 溶液中羟基自由基清除率随质量浓度上升而增加，0.14 mg/mL 时各发酵组清除率不同。经计算 IC_{50}，羟基自由基清除能力排序为 PC 组（0.071 mg/mL）>SC 组>DC 组>MC 组（0.147 mg/mL），混菌发酵显著强于单菌发酵。在发酵初期，非酿酒酵母所分泌的多种代谢物起到了关键作用。这些代谢物包括蛋白、醇、醛酮类等物质，它们能够与酿酒酵母发生复杂的相互作用，进而影响酿酒酵母的发酵进程。已有研究表明，非酿酒酵母分泌的某些蛋白可能参与调节酿酒酵母的代谢途径，促进抗氧化相关酶的合成或激活，在醇类和醛酮类代谢物方面，它们可能直接参与自由基清除反应，或者通过改变发酵环境的化学性质，如调节发酵液的氧化还原电位，间接促进自由基的清除。此外，这些代谢物还可能影响果酒中其他抗氧化成分的生成和转化[36]。

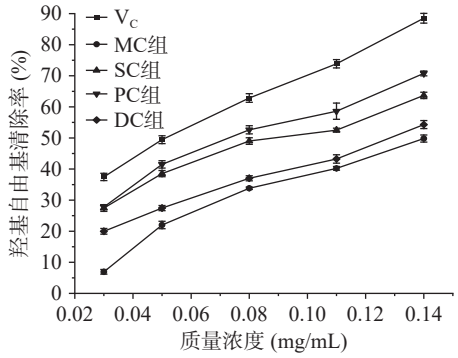


图 7 接种时序对脐橙果酒羟基自由基清除率的影响

Fig.7 Effect of inoculation chronology on hydroxyl radical scavenging activity of navel orange wine

2.4.3 铁氰化钾还原力的分析 如图 8 所示，脐橙果酒铁氰化钾还原力随质量浓度增加而增强，混菌发酵组显著（P<0.05）高于单菌发酵组且都呈浓度依赖趋势。实验浓度内，MC 组还原力从 0.186 至 0.564，SC、

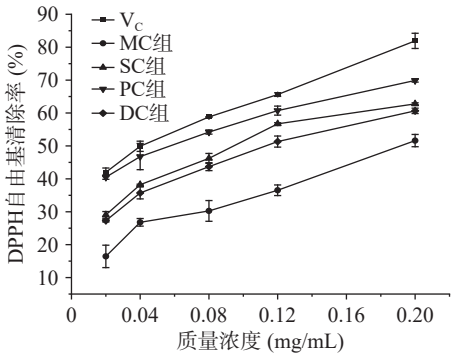


图 6 接种时序对脐橙果酒 DPPH 自由基清除率的影响

Fig.6 Effect of inoculation chronology on DPPH radical scavenging activity of navel orange wine

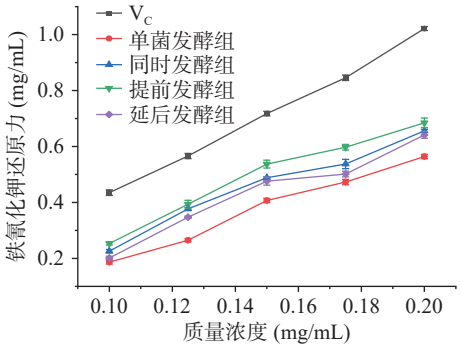


图 8 接种时序对脐橙果酒铁氰化钾还原力的影响

Fig.8 Effect of inoculation chronology on reducing power of potassium ferricyanide of navel orange wine

PC、DC 组及 V_C 对照组也各有变化。计算 IC_{50} 后，铁氰化钾还原力顺序为 PC 组（0.152 mg/mL）>SC 组>DC 组>MC 组（0.181 mg/mL），此结果与谢佳艺[37]的研究类似，铁氰化钾还原力反映样品提供电子以还原 Fe^{3+}为 Fe^{2+}的能力，还原力越强，IC_{50} 值越小。本研究中，PC 组的 IC_{50} 最小，表明其还原能力最强。该排序与总酚含量（PC 组>SC 组>DC 组>MC 组）完全一致，提示酚类物质是脐橙果酒还原能力的主要贡献者。酚类化合物富含酚羟基，可通过单电子转移机制直接还原铁氰化钾，从而表现出较强的还原力。黄酮类化合物虽也具有一定还原能力，但其含量变化趋势（SC 组最高）与还原力排序不完全一致，说明总酚比总黄酮对还原力的贡献更为显著。

3　结论

本研究证实混菌发酵时序调控可协同提升脐橙果酒品质。混菌发酵较单菌发酵新增挥发性成分 22 种，显著丰富了醇类（苯甲醇、异辛醇）、酯类（乙酸乙酯、水杨酸甲酯）等特征香气物质，其中 PC 组醇类总量达 1500.09 mg/L、酯类总量达 198.43 mg/L，均处最高水平。功能成分方面，PC 组总酚含量达 753.93 mg GAE/L，SC 组总黄酮含量达 138.30 mg RE/L，均显著优于单菌发酵。抗氧化活性与总酚趋势一致，PC 组在 0.20 mg/mL 浓度下 DPPH 自由基清除率达 69%，羟基自由基及铁氰化钾还原力也均为最优。感官评价中，DC 组综合得分 82.13 分，SC 组 80.13 分，表明延后接种（DC）和同时接种（SC）更有利于获得良好的感官品质。结果表明，PC 策略利于功能成分积累与抗氧化性能提升，DC 模式更优感官表现，该结论可为脐橙果酒混菌发酵工艺的精准调控提供理论依据，未来可进一步优化非酿酒酵母接种窗口期以实现风味与功能的协同增效。

© The Author(s) 2026. 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］ 中研普华产业研究院. 2024-2030 年中国脐橙产业竞争分析及发展规模预测报告［R］. 北京：中研普华产业研究院：2024. ［China Research and Intelligence. Competitive analysis and development scale forecast report of China navel orange industry from 2024 to 2030［R］. Beijing: China Research and Intelligence, 2024.］

［2］ 观研报告网. 中国脐橙行业发展现状分析与投资前景研究报告（2024-2031 年）［R］. 北京：观研报告网，2024. ［China Research and Intelligence. Analysis of development status and investment prospects research report on China's navel orange industry (2024–2031)［R］. Beijing: China Research and Intelligence, 2024.］

［3］ 钟轲，肖建，汤晓宏，等. 非酿酒酵母对脐橙果酒品质的影响［J］. 中国酿造，2025，44（1）：148−155. ［ZHONG Ke, XIAO Jian, TANG Xiaohong, et al. Effect of non-*Saccharomyces cerevisiae* on the quality of navel orange fruit wine［J］. China Brewing, 2025, 44（1）: 148−155.］

［4］ 王彪，刘佳烙，钱跃飞，等. 不同酵母对脐橙果酒品质的影响［J］. 食品安全导刊，2023（35）：147−152. ［WANG B, LIU J L, QIAN Y F, et al. The effects of different yeasts on the quality of navel orange fruit wine［J］. China Food Safety Magazine, 2023（35）: 147−152.］

［5］ ZHANG Yu, LIU Weipeng, WEI Zehua, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus* plantarum［J］. LWT, 2021, 139: 110590.

［6］ MAICAS S, MATEO J J. The life of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeasts in drinking wine［J］. Microorganisms, 2023, 11（5）: 1178.

［7］ 徐青柳. 非酿酒酵母菌株筛选及其与酿酒酵母混合发酵对蓝莓酒品质的影响［D］. 雅安：四川农业大学，2021. ［XU Qingliu. Screening of non-*Saccharomyces cerevisiae* strains and the effect of mixed fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* on blueberry wine quality［D］. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2021.］

［8］ SUN Wangsheng, FENG Sinuo, BI Pengfei, et al. Simultaneous inoculation of non-*Saccharomyces* yeast and lactic acid bacteria for aromatic kiwifruit wine production［J］. Food Microbiology, 2024, 123: 104589.

［9］ TOFALO R, PERPETUINI G, ROSSETTI A P, et al. Impact of *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces* yeasts to improve traditional sparkling wines production［J］. Food Microbiology, 2022, 108: 104097.

［10］ ZHANG Y, YE H, ZOU Y, et al. Flavor characteristics of navel orange wine fermented by *Saccharomyces cerevisiae* SC-125 and Angel yeast SY［J］. Fermentation, 2023, 9（10）: 872.

［11］ XIONG Hua, ZHANG Yingyue, WANG Wanting, et al. Enhancing the quality of low-alcohol navel orange wine through simultaneous co-fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* SC-125, angel yeast SY, and *Lactiplantibacillus plantarum* BC114［J］. Molecules, 2024, 29（8）: 1781.

［12］ 苏伟，邓山鸿，陈钢. 脐橙果酒低温发酵工艺优化及挥发性风味物质分析［J］. 中国酿造，2021，40（1）：133−137. ［SU Wei, DENG Shanhong, CHEN Gang. Optimization of low temperature fermentation process and analysis of flavor compounds in navel orange wine［J］. China Brewing, 2021, 40（1）: 133−137.］

［13］ 胡小琴，刘伟，许弯，等. 不同酵母对脐橙果酒品质的影响［J］. 食品工业科技，2021，42（5）：1−10,25. ［HU Xiaoqin, LIU Wei, XU Wan, et al. Effect of different yeasts on the quality of navel orange wine［J］. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42（5）: 1−10,25.］

［14］ 郑淑丹，陈钢，阙发秀，等. 脐橙全果酒发酵工艺优化及其与脐橙果汁酒风味物质的对比分析［J］. 食品科学，2019，40（10）：171−177. ［ZHENG Shudan, CHEN Gang, QUE Faxiu, et al. Optimization of fermentation process for whole navel orange wine and comparative analysis of flavor components with navel orange juice wine［J］. Food Science, 2019, 40（10）: 171−177.］

［15］ 胡丽香，王丽金，宋焕禄，等. GC-O-MS 法对比脐橙果酒和脐橙蒸馏白酒的香气活性成分［J］. 酿酒科技，2019（3）：115−121. ［HU Lixiang, WANG Lijin, SONG Huanlu, et al. Comparison of active aroma components in navel orange wine and in navel orange liquor by GC-O-MS［J］. Liquor-Making Science & Technology, 2019（3）: 115−121.］

［16］ 蒋文鸿，王润峥，王勇，等. 预处理对山楂酒香气成分和抗氧化性的影响分析［J］. 酿酒科技，2023（12）：37−44,51. ［JIANG Wenhong, WANG Runzheng, WANG Yong, et al. Effect of pretreatment on aroma components and antioxidant activity of hawthorn wine［J］. Liquor-Making Science & Technology, 2023（12）: 37−44,

51. ］
［17］ 谢欣雨. 草莓果酒菌种筛选及顺序混菌发酵技术研究[D]. 阜阳: 阜阳师范大学, 2022. ［XIE Xinyu. Research on strawberry fruit wine strain screening and sequential mixed bacteria fermentation technology[D]. Fuyang: Fuyang Normal University, 2022. ］
［18］ 吴均, 黄传书, 赵珮, 等. 响应面试验优化桑葚果酒发酵工艺及其品质分析[J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 98−104. ［WU Jun, HUANG Chuanshu, ZHAO Pei, et al. Optimization of fermentation technology of mulberry wine by response surface methodology and quality analysis[J]. China Brewing, 2021, 40(1): 98−104. ］
［19］ 孙鹏尧. 姜黄素类化合物的提纯及性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016. ［SUN Pengyao. The research on purification and properties of curcuminoids[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2016. ］
［20］ 于抗非, 毛青钟, 裘哲灵, 等. 小米黄酒酿造工艺及体外抗氧化活性研究[J]. 酿酒, 2024, 51(1): 87−94. ［YU Kangfei, MAO Qingzhong, QIU Zheling, et al. Study on brewing technology and antioxidant activity *in vitro* of millet Huangjiu[J]. Liquor Making, 2024, 51(1): 87−94. ］
［21］ 李甜, 雷雨, 李东, 等. 不同非酿酒酵母与酿酒酵母顺序发酵对茵红李果酒风味的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 179−187. ［LI Tian, LEI Yu, LI Dong, et al. Impact of sequential fermentation with different non-*Saccharomyces* yeasts and *Saccharomyces cerevisiae* on the aroma of Yinhong plum wine[J]. Food Science, 2023, 44(24): 179−187. ］
［22］ 王燕荣, 胡海霞, 史晓霞, 等. 混菌发酵对‘123’苹果酒香气成分的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(9): 96−102. ［WANG Yanrong, HU Haixia, SHI Xiaoxia, et al. Effects of mixed-strains fermentation on the aroma compounds of'123'cider[J]. China Brewing, 2023, 42(9): 96−102. ］
［23］ DOMIZIO P, ROMANI C, LENCIONI L, et al. Outlining a future for non-*Saccharomyces* yeasts: Selection of putative spoilage wine strains to be used in association with *Saccharomyces cerevisiae* for grape juice fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2011, 147(3): 170−180.
［24］ 尹雪林, 龚丽娟, 钟武, 等. 戴尔有孢圆酵母与酿酒酵母混合发酵对猕猴桃酒香气的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 216−223. ［YIN Xuelin, GONG Lijuan, ZHONG Wu, et al. Effect of mixed fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii* on the aroma of kiwifruit wine[J]. Food Science, 2021, 42(22): 216−223. ］
［25］ 王静尧, 王文华, 王丽玲, 等. 酿酒酵母与 2 株非酿酒酵母混酿培养中的增香特性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(11): 60−66. ［WANG Jingyao, WANG Wenhua, WANG Liling, et al. Aroma Enhancement Characteristics of *Saccharomyces cerevisiae* and two strains of Non-*Saccharomyces cerevisiae* in Mixed Culture[J]. Food Research and Development, 2023, 44(11): 60−66. ］
［26］ SHEKHAWAT K, PATTERTON H, BAUER F F, et al. RNA-seq based transcriptional analysis of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lachancea thermotolerans* in mixed-culture fermentations under anaerobic conditions[J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 145.
［27］ AYESTARÁN B, MARTÍNEZ-LAPUENTE L, GUADALUPE Z, et al. Effect of the winemaking process on the volatile composition and aromatic profile of Tempranillo Blanco wines[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 187−194.
［28］ FERRÃO L F V, JOHNSON T S, BENEVENUTO J, et al. Genome-wide association of volatiles reveals candidate loci for blueberry flavor[J]. New Phytologist, 2020, 226(6): 1725−1737.
［29］ SHI Wenke, WANG Jia, CHEN Fusheng, et al. Effect of *Issatchenkia terricola* and *Pichia kudriavzevii* on wine flavor and quality through simultaneous and sequential co-fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. LWT, 2019, 116: 108477.
［30］ 谢林君, 成果, 韦璐, 等. 添加罗汉果甜苷对火龙果酒香气特征的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(10): 136−141. ［XIE Linjun, CHENG Guo, WEI Lu, et al. Effect of mogrosides addition on aroma characteristics of pitaya wine[J]. China Brewing, 2023, 42(10): 136−141. ］
［31］ CEN Kaiyue, YU Xi, GAO Chengcheng, et al. Effects of quinoa protein Pickering emulsion on the properties, structure and intermolecular interactions of myofibrillar protein gel[J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133456.
［32］ 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. ［KANG Mingli, PAN Siyi, FAN Gang, et al. Changes in volatile compounds in *Satsuma* mandarin wine with different fermentation periods[J]. Food Science, 2015, 36(18): 155−161. ］
［33］ 肖咏梅, 李明, 毛璞, 等. 黄酮类化合物生物改性及活性的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 123−131,139. ［XIAO Yongmei, LI Ming, MAO Pu, et al. Research progress on biological modification and activity of flavonoids[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 123−131,139. ］
［34］ 任学梅, 姚红红, 严幻汝, 等. 高产糖苷酶非酿酒酵母菌株筛选、鉴定及其发酵过程中酶活性变化[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 198−206. ［REN Xuemei, YAO Honghong, YAN Huanru, et al. Screening and identification of non-*Saccharomyces* yeast strains with high glycosidase production and changes in enzyme activities during their fermentation[J]. Food Science, 2022, 43(20): 198−206. ］
［35］ 王东伟, 黄燕芬, 肖默艳, 等. 猕猴桃果酒发酵条件优化及其抗氧化特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(6): 1619−1625. ［WANG Dongwei, HUANG Yanfen, XIAO Moyan, et al. Optimization of fermentation conditions and research on the antioxidant properties of kiwi fruit wine[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(6): 1619−1625. ］
［36］ 王俊钢, 李宇辉, 史学伟, 等. 混菌发酵红枣果酒工艺条件优化及抗氧化性研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(8): 210−215. ［WANG Jungang, LI Yuhui, SHI Xuewei, et al. Fermentation condition optimization and antioxidant activity of jujube fruit wine by mixed yeasts[J]. China Brewing, 2023, 42(8): 210−215. ］
［37］ 谢佳艺. 陕北风味香菇小米酒的酿造工艺及抗氧化功能初探[D]. 延安: 延安大学, 2020. ［XIE Jiayi. Brewing technology and antioxidant function of Shanbei flavor *Lentinus edodes* millet wine[D]. Yan'an: Yan'an University, 2020. ］