不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒的颜色特征及花色苷组成的影响

朱嘉伟[1]，饶博涵[2]，刘春媛[1]，许娜[1]，蒲富娟[1]，王美琪[1]，马文瑞[1]，陶永胜[2]，武运[1*]

（1.新疆农业大学食品科学与药学学院，新疆乌鲁木齐 830052）

（2.西北农林科技大学葡萄酒学院，陕西杨凌 712100）

摘要：为探究混菌酒精发酵（Mixed-microorganism Alcoholic Fermentation, ZAF）、传统顺序酒精-苹乳发酵（Traditional Sequential Alcoholic-malolactic Fermentation, SM）、顺序混菌酒精－苹乳发酵（Sequential Mixed-strain Alcoholic-malolactic Fermentation, ZSM）与单一酒精发酵（Single Alcoholic Fermentation, AF）对赤霞珠干红葡萄酒花色苷及颜色的影响。以光谱法结合色谱法测定供试酒样的CIElab颜色参数、葡萄酒色素指标、酚类物质含量，单体花色苷组分及含量，并进行Pearson相关性分析、主成分分析及特征差异物质筛选。结果表明，与AF酒样相比，ZAF酒样的红绿色彩通道a^*值提升3.73、色度C^*_{ab}值提升3.07，游离花色苷FA值上升2.5；与AF和ZAF酒样相比，SM和ZSM酒样聚合色素占比（*PP*%）的分别提升约1.79%与10.02%；Pearson相关性分析表明，a^*与C^*_{ab}值、总花色苷呈显著正相关，而与色调角（h_{ab}）呈显著负相关。OPLS-DA分析表明总花色苷、锦葵素-3-O-葡萄糖苷、*PP*%、h_{ab}、红色色调（a^*）及色彩饱和度（C^*_{ab}）是区分不同发酵方式酒样色泽质量的特征差异物质。综上混菌酒精发酵在增强色度方面展现出潜力，苹乳发酵可改善葡萄酒色泽稳定性。优选菌株具有改善葡萄酒色泽品质的应用潜力。

关键词：赤霞珠；CIElab；色素指标；酚类物质；花色苷

文章编号：1673-9078(2026)10-190-198 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1121

Effects of Different Fermentation Methods on Color Characteristics and Anthocyanin Composition in Cabernet Sauvignon Dry Red Wine

ZHU Jiawei[1], RAO Bohan[2], LIU Chunyuan[1], XU Na[1], PU Fujuan[1], WANG Meiqi[1], MA Wenrui[1], TAO Yongsheng[2], WU Yun[1*]

(1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2.College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The effects of mixed-strain alcoholic fermentation (ZAF), traditional sequential alcoholic-malolactic fermentation (SM), sequential mixed-strain alcoholic-malolactic fermentation (ZSM), and single alcoholic fermentation (AF) on anthocyanins and color in Cabernet Sauvignon dry red wine were investigated. Spectrophotometric and chromatographic methods were used to determine CIElab color parameters, wine pigment indices, phenolic content, and monomeric anthocyanin components and contents in the wine samples. Pearson correlation analysis, principal component analysis, and screening of characteristic differential compounds were conducted. The results indicated that compared to AF samples, ZAF samples exhibited a 3.73 increase in the red-green color channel a^* value, a 3.17 increase in chroma (C^*_{ab}) value, and a 2.5 increase in free anthocyanin (FA) value. Compared to both AF and ZAF samples, SM and ZSM samples showed increases of approximately 1.79% and 10.02% in polymerized pigment percentage (*PP*%), respectively. Pearson correlation analysis revealed significant positive correlations of a^* with C^*_{ab} values and total anthocyanins, and significant negative correlations with hue angle (h_{ab}). Orthogonal partial least squares-discriminant analysis

收稿日期：2025-08-08；修回日期：2025-10-17；接受日期：2025-11-04

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2024B02021-1-2）；天池英才引进计划-青年博士（2224ZZQRCXM）

作者简介：朱嘉伟（2001-），男，硕士研究生，研究方向：食品科学与工程，E-mail：z18099422159@163.com

通讯作者：武运（1965-），女，硕士，教授，研究方向：食品科学与工程、食品生物技术，E-mail：wuyunster@sina.com

identified total anthocyanins, malvidin-3-*O*-glucoside, PP%, hab, red hue (a^*), and C^*_{ab} as characteristic differential compounds distinguishing the color quality of wine samples from different fermentation methods. In summary, ZAF has potential to enhance color intensity, while malolactic fermentation improves wine color stability. The selected strains show application potential for improving wine color quality.

Key words: Cabernet Sauvignon; CIElab; pigment index; phenolic compounds; anthocyanins

引文格式：

朱嘉伟,饶博涵,刘春媛,等.不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒的颜色特征及花色苷组成的影响[J].现代食品科技,2026,42(10): 190-198.

ZHU Jiawei, RAO Bohan, LIU Chunyuan, et al. Effects of different fermentation methods on color characteristics and anthocyanin composition in cabernet sauvignon dry red wine [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 190-198.

在葡萄酒酿造过程中，酿酒酵母作为酒精发酵的主导微生物，通过直接与间接双重作用影响葡萄多酚类物质（尤其是花色苷）的存在状态，进而决定葡萄酒的颜色强度和稳定性[1]。从直接作用来看，酿酒酵母细胞壁的多糖（如甘露聚糖）可通过氢键、疏水作用与花色苷形成复合物，这种结合不仅改变花色苷在酒液中的分布比例，还可减少游离花色苷的氧化消耗，为色泽保留提供基础；在间接作用层面，酿酒酵母的代谢活动构建了影响花色苷转化的微环境：其产生的乙醇能提升花色苷在酒液中的溶解度，而发酵过程中释放的二氧化碳则改变酒体溶氧环境，间接增强花色苷的氧化稳定性。更重要的是，酵母代谢产生的乙醛、丙酮酸等中间产物可作为亲核试剂，与花色苷的 C4 位发生加成反应，促使吡喃型花色苷生成[2]。这类衍生物的最大吸收波长红移的特性，且对 pH 变化、光泽及氧化的耐受性显著提升，是保障葡萄酒色泽长期稳定的核心物质。

单一酒精发酵作为基础酿造工艺，虽能最大程度保留葡萄品种原有果香和花香等挥发性化合物[3]，但依赖酿酒酵母单一作用，存在颜色强度提升有限，长期稳定性不足的缺陷。而非酿酒酵母的引入可构建多元微生物互作体系，弥补这一短板。Li 等[4]采用 *Pichia fermentans* 和酿酒酵母进行混菌酒精发酵时，不仅能调节风味物质构成（如 α-松油醇、橙花叔醇的含量增加，C6 化合物和庚酸乙酯的含量降低），还可有效增强葡萄酒颜色强度。其核心机制在于非酿酒酵母的代谢产物可改变发酵微环境的 pH 值、氧化还原电位等关键参数，进而影响花色苷的结构稳定性与呈色效果。此外，在混合发酵早期同步添加非酿酒酵母与酿酒酵母，能通过生态位竞争抑制有害微生物的生长，减少 SO_2 的使用需求[5]。

乳酸菌是苹果酸-乳酸发酵（Malolactic Fermentation, MLF）的核心功能菌，其通过 pH 调节和酶促反应调控花色苷转化，成为酒体色泽与风味系统优化的关键环节。具体而言，不同乳酸菌菌株展现出差异化的调控能力：特定乳酸菌菌株如 *Lactobacillus plantarum* 可提高吡喃花色苷浓度并增加聚合花色苷比例[6]，而短乳杆菌不仅能通过 β-葡萄糖苷酶活性释放芳香化合物[7]，还可通过苹果酸－乳酸转化降低酸度，进一步增强酒体协调性。从作用机制来看，乳酸菌代谢产生的酶类可能作用于花色苷的糖苷键，影响其降解和转化路径。同时，乳酸菌对葡萄酒 pH 值的调节会改变花色苷分子的质子化状态，直接影响颜色呈现效果。传统顺序酒精－苹乳发酵虽具备优化微生物活动效率，提升酒质与风味复杂性，降低发酵风险的优势[8]。

本研究采用高效液相色谱（High Performance Liquid Chromatography, HPLC）技术检测 4 款赤霞珠干红葡萄酒中的单体花色苷种类及含量，结合 CIElab 参数（L^*、a^*、b^*、C^*_{ab} 和 h_{ab}）和光谱法测定葡萄酒色素指标（总色素、聚合色素、聚合色素占比、游离花色苷），旨在探究四种发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒颜色特征、色素结构及花色苷组成的差异，为不同发酵技术在葡萄酒生产中的应用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 原料与菌株

葡萄原料：新疆吐鲁番楼兰酒庄葡萄园的‘赤霞珠’葡萄，采收于 2024 年 8 月 28 日，含糖量（以葡萄糖计）（221.76±14.22）$g·L^{-1}$，含酸量（以酒石酸计）（7.40±0.21）$g·L^{-1}$，卫生状况良好。酿酒微生物：发酵毕赤酵母 Z9Y-3（保藏号 M2019857）筛自酒窖、酿酒酵母 SC-19（M2023128）和短乳杆菌 LB-21（M2022231）菌株筛自葡萄酒，均为课题组优选菌株。

1.2 仪器与试剂

UV-1780 紫外可见分光光度计、AUX320 电子天平、LC-20A 高效液相色谱仪，日本岛津制作所；

LYAZ-5000 安东帕 FT-IR 全自动分析仪，奥地利安东帕公司；TGL-16M 台式高速冷冻离心机，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；FE28 型 pH 计，瑞士梅特勒－托利多公司。

化学试剂：氯化钾、乙酸钠等分析纯试剂（纯度≥96%），购自西安化学试剂厂；4-二甲基氨基肉桂醛（CAS：6203-18-5，纯度 99.82%）、儿茶素（CAS：18829-70-4，纯度≥98%），表儿茶素（CAS：490-46-0，纯度 98%）、咖啡酸（CAS：331-39-5，纯度 99.3%）、没食子酸（CAS：149-91-7，纯度 99.99%）等标品购于天津一方科技有限公司；甲基纤维素（CAS:9004-67-5，纯度≥98%）购自上海源叶生物科技有限公司；锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷（CAS：18470-06-9，纯度≥95%）购自于北京 Sigma 公司。

1.3 方法

1.3.1 菌株活化

酵母菌株在（Yeast Peptone Dextrose，YPD）培养基（20 g·L^{-1} 葡萄糖，20 g·L^{-1} 蛋白胨，10 g·L^{-1} 酵母提取物，pH 值 5.6）中于 28 ℃、160 r·min^{-1} 摇床培养 48 h 后收集。短乳杆菌在（Man Rogosa Sharpe，MRS）培养基［20 g·L^{-1} 葡萄糖，10 g·L^{-1} 蛋白胨，4 g·L^{-1} 酵母提取物，2 g·L^{-1} K_2HPO_4，2 g·L^{-1} $(NH_4)_2HC_6H_5O_7$，5 g·L^{-1} CH_3COONa，0.2 g·L^{-1} $MgSO_4$，0.04 g·L^{-1} $MnSO_4$，1.0 g·L^{-1} 吐温 80，pH 值 6.5］中静置培养 48 h 后收集。

1.3.2 葡萄酒酿造

酿造工艺：‘赤霞珠’葡萄，除梗破碎后分装至 5 L 广口玻璃瓶（均保持在 4.5 L 刻度线），发酵前添加 30 mg·L^{-1} SO_2，随后加入 SC-19（以 10^6 CFU·mL^{-1}），启动酒精发酵。温度控制在 23~25 ℃，待比重降至 1.050，皮渣分离，直至残糖小于 2 g·L^{-1} 时，分离澄清酒至干净罐中，加入 30 mg·L^{-1} SO_2，装瓶贮藏于酒窖，陈酿 6 个月后进行测定。每组重复 3 次，不同发酵方式处理的关键操作如下：

（1）单一酒精发酵（AF）：如上工艺。

（2）混菌酒精发酵（ZAF）：参考 Li 等[9]的接种方法，将 Z9Y-3（以 10^6 CFU/mL）和 SC-19（以 10^6 CFU/mL）同时加入启动酒精发酵，其余工艺同上。

（3）传统顺序酒精－苹乳发酵（SM）：AF 组酒精发酵后，接入 LB-21 以 10^7 CFU/mL 待苹果酸＜0.2 g·L^{-1} 分离澄清，其余工艺同上。

（4）顺序混菌酒精－苹乳发酵（ZSM）：ZAF 组酒精发酵后，接入 LB-21 以 10^7 CFU/mL 待苹果酸＜0.2 g·L^{-1} 分离澄清，其余工艺同上。

1.3.3 基本理化指标测定

总酸（以酒石酸计）、挥发酸（以乙酸计）、酒精度、总糖（以葡萄糖计）含量的测定参照 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》；pH 采用 pH 计进行测定。

1.3.4 CIElab参数测定

参照李运奎等[9]的方法采用国际通用色度系统并适当优化，测定酒样发酵内 2~22 d 及贮藏 6 个月后指标。酒样经 0.45 μm 水系滤膜过滤，置于 2 mm 石英比色皿中，以纯水为参比。根据酒样吸收光谱值 450、520、570、630 nm 计算出 X、Y、Z 值，建立 CIElab 坐标系参数计算得到 L^*、a^*、b^*、C^*_{ab}、h_{ab}。色差 ΔE_{ab} 计算公式如（1）所示。

$$\Delta E_{ab}=\sqrt[2]{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

式中：

ΔE_{ab}——色差；

ΔL^*——明度差；

Δa^*——红色色调差；

Δb^*——黄色色调差。

1.3.5 葡萄酒色素指标的测定

参考赵宇等[10]方法测定总色素（Total Pigments, *TP*），参考 Escott 等[11]方法测定聚合色素（Polymer Pigment, *PP*）、聚合色素占比（Percentage of Polymer Pigments, *PP*%），参考 Liu 等[12]方法测定游离花色苷（Free Anthocyanins, *FA*）。

1.3.5.1 总色素（Total Pigments, *TP*）

取 3 mL 酒样，加入 30 μL 体积分数为 10% 的乙醛溶液混匀，于避光处静置 45 min，使亚硫酸氢盐加合物释放花色苷。通过公式（2）计算 *TP*。

$$I_1=A_{acet}\times 10 \quad (2)$$

式中：

I_1——总色素；

A_{acet}——用 1 mm 比色皿，在 520 nm 测乙醛处理后酒样的吸光值；

10——针对吸光值进行标准化。

1.3.5.2 聚合色素（Polymer Pigment, *PP*）

取 45 μL 质量体积分数为 20% 的焦亚硫酸钠溶液，加入到 3 mL 酒样中，充分混匀后，将混合液置于避光环境下静置平衡 10 min。通过公式（3）计算 *PP*。

$$I_2=A_{SO_2}\times 10 \quad (3)$$

式中：

I_2——聚合色素；

A_{SO_2}——用 1 mm 比色皿，在 520 nm 测混合液的吸光值；

10——针对吸光值进行标准化。

1.3.5.3 聚合色素占比（Percentage of Polymer Pigments, *PP*%）

通过公式（4）计算 *PP*% 指标：

$$I_3=\frac{I_2}{I_1}\times 100\% \quad (4)$$

式中：

I_3——聚合色素占比。

1.3.5.4 游离花色苷（Free Anthocyanins, *FA*）

取两份 0.3 mL 酒样，将其中一份加入到 2.7 mL 0.025 mol·L^{-1}、pH 值为 1.0 的氯化钾缓冲液中，另一份加入到 2.7 mL 0.4 mol·L^{-1}、pH 值为 4.5 的乙酸钠缓冲液中，混合均匀。将两份混合液均置于避光环境中，静置平衡 30 min。通过公式（5）计算 *FA*。

$$I_4=[(A_{520}-A_{700})_{pH1.0}-(A_{520}-A_{700})_{pH4.5}]\times 10 \quad (5)$$

式中：

I_4——游离花色苷；

A_{520}——混合液在 520 nm 处的吸光度；

A_{700}——混合液在 700 nm 处的吸光度；

10——稀释倍数。

1.3.6 单体花色苷测定

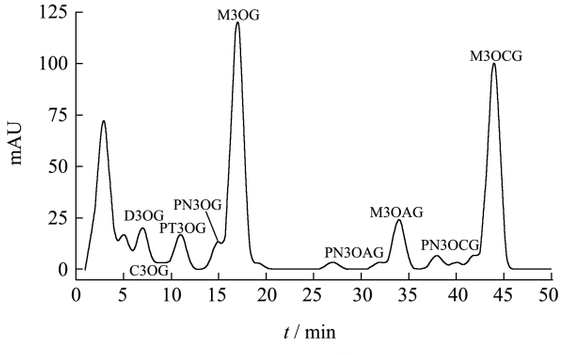


图 1 HPLC 分离花色苷色谱图

Fig.1 HPLC chromatogram of anthocyanin separation

参考 Wu 等[13]的方法，运用高效液相色谱法测定葡萄酒中的单体花色苷，测定前所有酒样均经 0.22 μm 水滤膜过滤，确保进样纯净度。色谱柱为 SynergiHydro-RP C18 柱 250×4.6 mm×4 μm。流动相 A 为 $V_{纯化水}$:$V_{乙腈}$:$V_{甲酸}$=32:4:1，流动相 B 为 $V_{纯化水}$:$V_{乙腈}$:$V_{甲酸}$=16:20:1。洗脱程序为：0%~35% B ≥ 45 min 35%~100% B≥1 min 100% B≥4 min 100%~0% B ≥ 1 min，进样量 20 μL；流速 1.0 mL·min^{-1}；柱温 35 ℃；样品运行 55 min；检测波长 520 nm。以保留时间和最大吸收波长区分酒样中花色苷的种类，采用外标法定量，各花色苷均以锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷标品的含量计算，标准曲线为：y=0.000 02x+0.176 8，R^2=0.998，x 为花色苷的峰面积，y 为花色苷的含量（mg·L^{-1}），HPLC 分离花色苷色谱图如图 1 所示。

1.3.7 酚类物质测定

葡萄酒中总酚通过 Folin-Ciocalteu 法定量测定[14]，以没食子酸计；总单宁采用甲基纤维素法测定[15]，以儿茶素计；黄酮醇根据赵宇等[10]方法测定，以槲皮素计；黄烷-3-醇使用 *p*-DMACA-盐酸法测定[16]，以儿茶素计。

1.4 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 26.0 统计软件对葡萄酒的理化指标进行单因素方差分析（ANOVA），并应用 Duncan 多重比较检验分析各组间差异的显著性（P＜0.05）；GraphPad prism 10.1.2 绘制葡萄酒的色度色调趋势图及酚类物质柱状图；origin 2024 绘制 Pearson 相关性图和主成分图；SMICA 14.1：正交偏最小二乘判别分析。

2 结果与讨论

2.1 不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒的基本理化指标的影响

不同发酵方式对葡萄酒基本理化指标的影响主要源于微生物种类及其相互作用。供试酒样的常规理化指标测定结果如表 1 所示，各项指标均符合 GB/T15037-2006《葡萄酒》的标准要求。与 AF 酒样相比，ZAF、SM 和 ZSM 酒样中的总酸含量显著降低，分别下降了 3.50%、3.23% 和 4.31%（P＜0.05），且不同组别的总酸降解机制存在明确差异，推测 ZAF 酒样总酸降低源于发酵毕赤酵母与酿酒酵母的协同代谢——激活三羧酸循环关键酶活性，加速降解有机酸[17]，而 SM 和 ZSM 组总酸降低的核心机制为 MLF 的定向调控。AF 酒样的固形物含量高于其他组约 0.53%~6.18%（P＜0.05）。pH 值差异不显著。4 款酒样中均未检测出总糖，表明 4 款酒样均为干型葡萄酒。

2.2 不同发酵方式的赤霞珠干红葡萄酒色度色调特征

不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒的色度色调影响显著。图 2b 和 2c 结果表明，C^*_{ab} 值在 2~4 d 内提升显著，后趋于平缓，而 h_{ab} 值在发酵过程中呈缓慢上升的趋势，从图 2a 中酒样发酵过程中的颜色变化表明，ZAF 酒样维持的颜色与 h_{ab} 值高度一致，维持葡萄酒的紫红色，而 AF、SM 和 ZSM 酒样的颜色趋于宝石红色。

表 1 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的理化指标

Table 1 Physicochemical indicators of cabernet sauvignon dry red wine produced by different fermentation methods

指标	AF	ZAF	SM	ZSM
总酸/(g·L^{-1})	3.71 ± 0.01^{a}	3.58 ± 0.01^{b}	3.59 ± 0.01^{b}	3.55 ± 0.01^{c}
挥发酸/(g·L^{-1})	0.68 ± 0.02^{a}	0.60 ± 0.01^{b}	0.67 ± 0.03^{a}	0.62 ± 0.01^{b}
酒度/% vol	12.75 ± 0.04^{b}	11.84 ± 0.04^{d}	12.86 ± 0.05^{a}	12.32 ± 0.02^{c}
pH 值	3.97 ± 0.06^{a}	3.94 ± 0.04^{a}	3.94 ± 0.11^{a}	3.93 ± 0.11^{a}
固形物/(g·L^{-1})	37.16 ± 0.15^{a}	34.86 ± 0.11^{c}	36.96 ± 0.05^{a}	35.83 ± 0.05^{b}

注：结果表示为“平均值 ± 标准差”同行不同小写字母表示差异性显著（P＜0.05）。下表同。

表 2 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的CIElab参数

Table 2 CIElab parameters for cabernet sauvignon dry red wine produced using different fermentation methods

指标	AF	ZAF	SM	ZSM
L^*	61.18 ± 0.08^{a}	58.13 ± 0.50^{d}	60.78 ± 0.12^{b}	59.82 ± 0.03^{c}
a^*	38.31 ± 0.31^{b}	42.04 ± 1.96^{a}	33.00 ± 0.56^{c}	32.75 ± 0.11^{c}
b^*	7.98 ± 0.19^{c}	3.66 ± 0.60^{d}	11.02 ± 0.23^{a}	10.42 ± 0.05^{b}
C^*_{ab}	39.13 ± 0.34^{b}	42.20 ± 2.01^{a}	34.79 ± 0.47^{c}	34.37 ± 0.10^{c}
h_{ab}	11.76 ± 0.19^{b}	4.96 ± 0.60^{c}	18.47 ± 0.63^{a}	17.64 ± 0.12^{a}
ΔE_{ab}	0.00 ± 0.00^{b}	6.19 ± 0.67^{a}	6.22 ± 0.78^{a}	6.64 ± 0.20^{a}

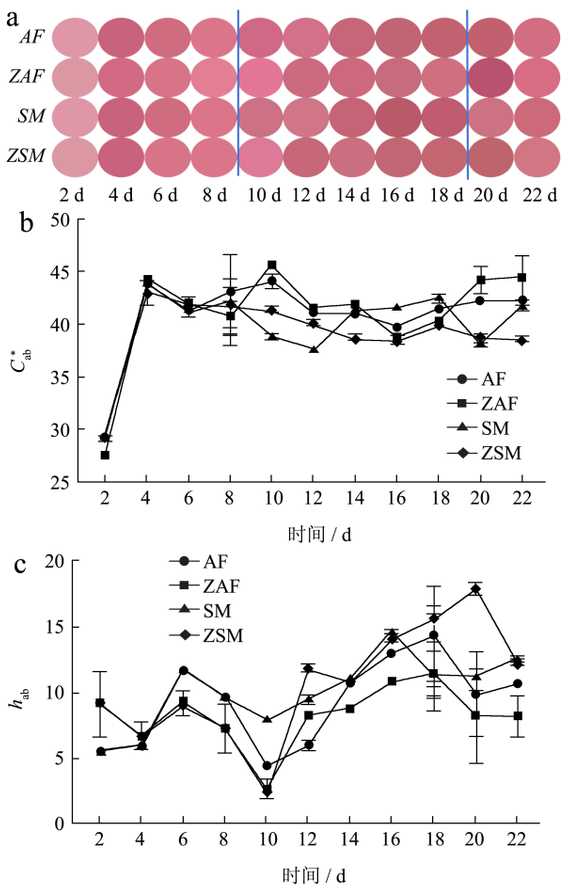


图 2 不同发酵方式赤霞珠干红葡萄酒的色度色调变化趋势图（2~22 d）

Fig.2 Color intensity and hue changes in cabernet sauvignon dry red wine under different fermentation methods (Days 2~22)

贮藏 6 个月后干红酒样的 CIElab 颜色参数如表 2 所示。明度 L^* 值代表酒样明暗程度，取值 0~100。供试酒样明度 L^* 范围为 58.13~61.18，4 款酒样明度整体处于中等偏上水平。其中 AF 酒样明度最高 L^*=61.18，较 ZAF 酒样提升 5.24%（P＜0.05）；ZAF 酒样明度最低 L^*=58.13。SM 和 ZSM 酒样明度差异值小于 2。

红 / 绿色彩通道 a^* 值代表酒样红绿色程度，取值 −100（绿色）~100（红色）。4 种处理的 a^* 值介于 32.75（ZSM 酒样）~42.04（ZAF 酒样）之间，ZAF 组红色色调最高 a^*=42.04，较 AF 酒样显著提升 9.73%（P＜0.05）；而 ZSM 组 a^* 值最低，为 32.75，较 SM 酒样其红色调差异不显著。黄 / 蓝色彩通道 b^* 值代表酒样黄蓝色程度，取值 −100（蓝色）~100（黄色）。4 种处理的 b^* 值则介于 3.66（ZAF 酒样）~11.02（SM 酒样）之间，表明酒体黄色成分较低。SM 酒样 b^* 值最高（11.02），较 AF 组提升 38.09%（P＜0.05），其黄色成分较高。

供试酒样 C^*_{ab} 值介于 34.37~42.20 间，表明色泽鲜艳。其中，ZAF 酒样 C^*_{ab} 显著高于其他组约（7.27%~18.55%），呈现高色度（C^*_{ab}＞40）。色调角 h_{ab} 反映颜色在色轮上的位置，其值越小越倾向紫红，其值越大越倾向瓦红或砖红色[9]。ZAF 酒样为紫红色，AF、SM 和 ZSM 酒样为宝石红色。

以 AF 酒样为参照，ΔE_{ab}=2.7 为临界，ΔE_{ab}＞2.7 被认为是肉眼可辨的颜色差异[18]。如表 2 所示 SM 酒样 ΔE_{ab} 值最高，颜色偏移最大，而 SM 和 ZSM 酒样间色差最小（ΔE_{ab}＜2.7），颜色特征接近。各酒样颜色特征从紫红色向宝石红色转变的排列顺序为 ZAF ＞

AF ＞ ZSM ＞ SM 酒样。

针对色彩空间中的每个葡萄酒样本点进行投影，得到 L^*=60 色调分布平面和明度分布平面，最后得到结合 L^*、a^* 和 b^* 值贡献的特征颜色。CIElab 参数中，L^*、a^* 和 b^* 值构建一个三维色彩空间，如图 3 所示。结果显示，酒样颜色投影集中分布于（a^*：25~45，b^*：0~20，3 600 像素 ×2 400 像素）坐标区间，其中明度 L^* 值主要分布于 58~62；色调角 h_{ab} 变化范围为 0°~90°，均处于红色主色调区间。

综上所述，相较于 AF 酒样，ZAF 酒样的 a^* 值增加 9.73%，而 L^* 值和 b^* 值分别降低约 4.98% 和 54.13%。这与 Li 等[4]在混菌发酵户太八号桃红葡萄酒中的研究不同——其测定的 CIElab 参数显示 L^* 值升高 1.95，a^* 值和 b^* 值分别降低 1.74 和 3.40。推测两者的差异与葡萄品种固有特性，混合酵母的酶活性及花色苷代谢途径相关[1]。SM 和 ZSM 酒样的 L^* 值和 a^* 值分别降低约 0.4~1.69 和 5.31~9.29，b^* 值升高 3.04~6.76。而 Zhang 等[19]在酒精发酵后接种植物乳杆菌或酒酒球菌的处理中，酒样的 L^* 值升高 2.17~3.16，a^* 值和 b^* 值分别降低 4.11~5.16 和 3.91~6.99。王美琪等[20]研究表明 CIElab 参数（L^*、b^*、h_{ab}）与酚类物质呈负相关，推测两者的差异与发酵工艺对酚类物质的转化特性直接相关。

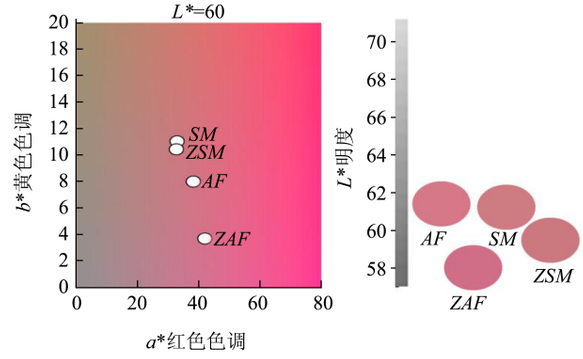


图 3 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的色度彩度空间图

Fig.3 Color space diagram of color intensity for cabernet sauvignon dry red wines produced by different fermentation methods

2.3 不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒色素指标的影响

基于多维表征的葡萄酒颜色差异，精确测定葡萄酒色素指标并剖析组间差异。结果如表 3 所示，SM 酒样 *TP* 值最低，而 ZAF 酒样的 *TP* 值最高，显著高于 AF 酒样约 51.50%。供试酒样中，ZAF 和 ZSM 酒样的 *PP* 值分别较 AF 和 SM 酒样增加约 30.59% 和 34.71%，表明这两种酿造工艺可以提高聚合色素的稳定性。Kong 等[21]将发酵毕赤酵母和酿酒酵母混菌应用在湘珍珠葡萄酒中，聚合花色苷比例增加约 2.62%~9.02%。与 AF 和 ZAF 酒样相比，SM 和 ZSM 工艺可使聚合色素占比分别提升约 1.79% 和 10.02%，进一步证实酒精发酵后进行 MLF 对花色苷调控转化的作用。*FA* 为葡萄酒中游离花色苷，采用 pH 示差法测定。该方法利用游离花色苷在 pH 值 1.0 时以红色烊盐离子形式存在，在 pH 值 4.5 转变为无色假碱或脱水碱的特性[12]。结果显示 SM 酒样的 *FA* 值较 ZSM 酒样降低约 3.17%，这与游离花色苷的降解和聚合有关。

表 3 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的葡萄酒色素指标

Table 3 Color index of cabernet sauvignon dry red wine produced by different fermentation methods

指标	AF	ZAF	SM	ZSM
TP	6.31 ± 0.00^c	9.56 ± 0.03^a	5.99 ± 0.00^d	7.65 ± 0.00^b
PP	2.68 ± 0.10^b	3.50 ± 0.03^a	2.65 ± 0.04^b	3.57 ± 0.05^a
PP%	42.44 ± 1.61^b	36.66 ± 0.27^c	44.23 ± 0.72^b	46.68 ± 0.77^a
FA	13.3 ± 0.50^b	15.8 ± 0.40^a	12.2 ± 0.20^c	12.6 ± 0.10^c

2.4 不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒单体花色苷指标的影响

单体花色苷是葡萄酒中主要的呈色物质。不同酿造工艺对赤霞珠干红葡萄酒的视觉质量和色泽稳定性产生不同影响，归因于酿造工艺对花色苷组分和含量的影响。针对陈酿六个月的红葡萄酒中单体花色苷和总花色苷的组成和含量分析。如表 4 所示，与 AF 酒样相比，MLF 处理组中锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷含量下降约 37.01%~38.59%。混菌酒精发酵的总花色苷含量增加约 10.14%。Kong 等[21]在混菌酒精发酵和单一酒精发酵中总花色苷含量相近约 1 028~1 040 mg·L^{-1} 之间。MLF 处理导致酒样的总花色苷含量减少 16.68%~22.43%。

2.5 不同发酵方式对赤霞珠干红葡萄酒酚类物质的影响

葡萄酒中的酚类物质是构成颜色特征的基础指标，主要包括花色苷、单宁、黄酮醇和黄烷 -3- 醇等。其中，花色苷是红葡萄酒中主要色素，直接赋予葡萄酒红色色调[22]。单宁通过与花色苷结合，通过聚合反应影响葡萄酒颜色的稳定性[16]。此外，黄酮类化合物通过辅色效应增强颜色的强度和稳定性[23]。本研究表明，4 种酿造工艺对干红葡萄酒中酚类物质的含量有显著影响（P ＜0.05），如图 4 所示：ZAF 酒样的总酚含量最高，为 898.47 mg·L^{-1}，较其他酒样高 1.64%~4.82%（P ＜0.05）；ZAF 酒样的单宁含量较 AF、SM、ZSM 依次高 47.00%、30.51% 和 19.87%（P ＜0.05）；ZAF 酒样的黄酮醇含量显著高于其他处

理组约 1.13%~5.68%（$P<0.05$），各处理组的黄酮醇含量维持在 460.74~488.52 mg·L^{-1} 的典型区间内，黄烷-3-醇含量表现为：ZAF＞SM＞AF＞ZSM 酒样，且 ZAF 酒样的黄烷-3-醇含量显著高于其他处理组 10.42%~13.57%（$P<0.05$）。Sun 等[24]将非酿酒酵母与酿酒酵母混合发酵猕猴桃酒可显著提高总酚、黄酮醇和黄烷-3-醇的含量。Qin 等[25]表明非酿酒酵母在发酵过程中展现出较高的 β-糖苷酶活性，会促进单宁的释放。

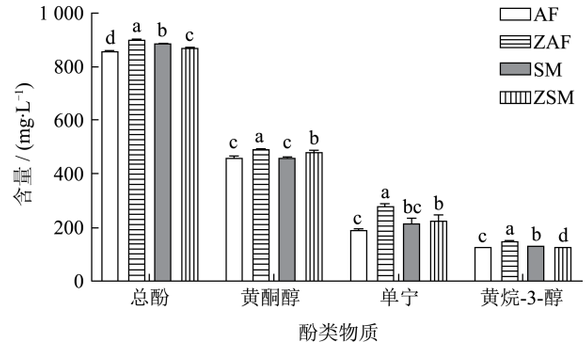


图 4 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的酚类物质含量

Fig.4 Phenolic compound content in cabernet sauvignon dry red wine produced by different fermentation methods

2.6 颜色参数与酚类物质相关性分析

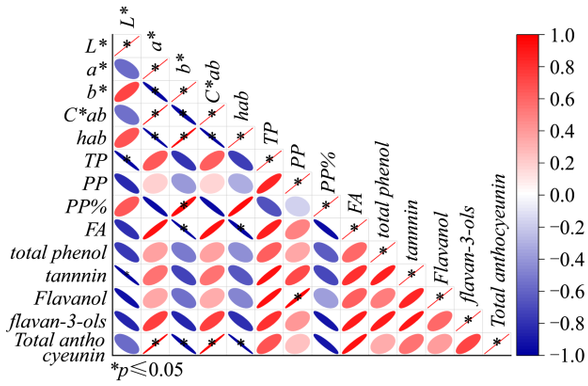


图 5 14 个色泽指标的相关性热图

Fig.5 The correlation heat map of 14 color indices

以供试酒样 CIElab 参数、葡萄酒色素指标和酚类物质指标数据的 Pearson 相关分析如图 5 所示。对于 CIElab 颜色参数而言，酒样 L^* 与 *TP*、单宁呈显著负相关；a^* 与 C^*_{ab}、总花色苷呈显著正相关，而与 b^*、h_{ab} 呈显著负相关；*b** 与 h_{ab}、*PP%* 呈显著正相关，而与 C^*_{ab}、*FA* 及总花色苷呈显著负相关；C^*_{ab} 与 h_{ab} 呈显著负相关，而与总花色苷呈显著正相关；h_{ab} 与 *FA*、总花色苷呈显著负相关；CIElab 参数（L^*、b^* 和 h_{ab} 值）与 *TP*、*PP*、*FA*、总酚、单宁、黄烷 -3- 醇、黄酮醇及总花色苷呈负相关，王美琪等[20]表明 CIElab 参数与酚类物质呈负相关研究结果相似。对于葡萄酒色素指标而言，*TP* 和 *PP*、*FA*、总酚、单宁、黄酮醇、黄烷-3-醇及总花色苷呈正相关，与 Laitila 等[26]研究相似总色素越高，表明酒样中游离花色苷和聚合花色苷的含量越高；*PP* 和黄酮醇呈显著正相关；*FA* 与总酚、单宁、黄酮醇、黄烷-3-醇及总花色苷呈正相关；对于酚类物质而言，总酚和单宁、黄酮醇、黄烷-3-醇、总花色苷呈正相关，且单宁和黄酮醇、黄烷-3-醇、总花色苷呈正相关；综上所述葡萄酒色素指标和酚类物质是影响 CIElab 参数的主要因素，无色多酚可能通过辅色效应影响葡萄酒的色泽质量。

为了从整体分析本研究设计的多元色泽指标对供试酒样色泽特征的区分能力，对 4 款供试酒样的 23 个色泽指标进行主成分分析（PCA）图 6 呈现前两个主成分上的色泽指标载荷及酒样分布情况。结果显示，PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 64.5% 和 22.9%，累计方差贡献率为 87.4%，表明该多元指标体系对酒样色泽特征的区分效果显著。结合图 6 的酒样分布特征可知，ZSM 酒样位于第二象限，其 *PP*、*PP*%、矮牵牛素-3-*O*-葡萄糖苷及锦葵素-3-*O*-乙酰-葡萄糖苷含量显著较高；AF 和 SM 酒样分布于第三象限，其 L^*、芍药素-3-*O*-葡萄糖苷、锦葵素-3-*O*-香豆酰-葡萄糖苷和芍药素-3-*O*-乙酰-葡萄糖苷含量表现出明显优势。ZAF 酒样则位于第一象限，其 a^*、C^*_{ab}、*FA*、*TP*、总花色苷、总酚等含量处于较高水平，且 ZAF 酒样的 C^*_{ab} 和 *PP* 值尤为突出。Li 等[4]指出，采用发酵毕赤酵母和酿酒酵母混合酿造桃红葡萄酒时，聚合花色苷的比例较单一酿酒酵母发酵提升 6.2%，进而显著提高酒样的色彩饱和度，这一现象推测与混菌酒精发酵对花色苷代谢途径的调控有关——混菌体系可促进多聚体花色苷积累，最终实现 C^*_{ab} 和 *PP* 值的优化。对于 SM 和 ZSM 酒样中 *FA* 降低而花色苷衍生物占比升高的现象，推测其原因为乳酸菌自身分泌 β-糖苷酶可能对花色苷产生分解作用，生成糖类物质供菌体生长，且 MLF 过程中花色苷的降解可能伴随新的花色苷衍生物的合成[27]，其吡喃花色苷及聚合花色苷的生成有利于维持葡萄酒颜色稳定性[28]。因此苹乳阶段易造成花色苷总量损失，同时推动 *PP*% 值上升。此外，García-estévez 等[29]和 Ignacio 等[30]的研究表明，多聚体花色苷的积累会降低葡萄酒的明度并提高黄色色调，这也解释了 SM 和 ZSM 酒样的明度降低、红色色调减弱，而黄色色调升高的特征。综上，本研究构建的多元色泽指标体系可有效区分不同供试酒样的色泽质量差异，为葡萄酒色泽特征的精准评价与调控提供可靠依据，具有良好的潜在应用价值。

表 4 不同发酵方式酿制赤霞珠干红葡萄酒的单体花色苷含量（mg·L^{-1}）

Table 4 Monomeric anthocyanin content in cabernet sauvignon dry red wine produced by different fermentation methods (mg·L^{-1})

指标	AF	ZAF	SM	ZSM
飞燕草素-3-*O*-葡萄糖苷 *D3OG*	0.49 ± 0.00^{b}	0.55 ± 0.00^{a}	0.44 ± 0.06^{b}	0.36 ± 0.00^{c}
矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷 *C3OG*	0.41 ± 0.04^{a}	0.30 ± 0.06^{b}	0.45 ± 0.07^{a}	0.42 ± 0.00^{a}
矮牵牛素-3-*O*-葡萄糖苷 *PT3OG*	0.24 ± 0.02^{a}	0.28 ± 0.05^{a}	0.29 ± 0.04^{a}	0.29 ± 0.04^{a}
芍药素-3-*O*-葡萄糖苷 *PN3OG*	0.32 ± 0.06^{b}	0.37 ± 0.00^{b}	0.69 ± 0.19^{a}	0.30 ± 0.10^{b}
锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷 *M3OG*	66.13 ± 0.72^{b}	78.95 ± 1.27^{a}	40.61 ± 9.44^{c}	41.65 ± 1.88^{c}
芍药素-3-*O*-乙酰-葡萄糖苷 *PN3OAG*	0.59 ± 0.01^{a}	0.61 ± 0.00^{a}	0.56 ± 0.24^{a}	0.25 ± 0.04^{a}
锦葵素-3-*O*-乙酰-葡萄糖苷 *M3OAG*	0.34 ± 0.01^{a}	0.32 ± 0.03^{a}	0.90 ± 0.78^{a}	1.19 ± 0.90^{a}
芍药素-3-*O*-香豆酰-葡萄糖苷 *PN3OCG*	0.26 ± 0.04^{b}	0.46 ± 0.10^{a}	0.32 ± 0.07^{b}	0.25 ± 0.03^{b}
锦葵素-3-*O*-香豆酰-葡萄糖苷 *M3OCG*	0.30 ± 0.07^{a}	0.27 ± 0.06^{a}	0.32 ± 0.01^{a}	0.28 ± 0.00^{a}
总花色苷	146.58 ± 1.02^{b}	161.45 ± 3.84^{a}	122.12 ± 17.71^{c}	125.23 ± 4.57^{c}

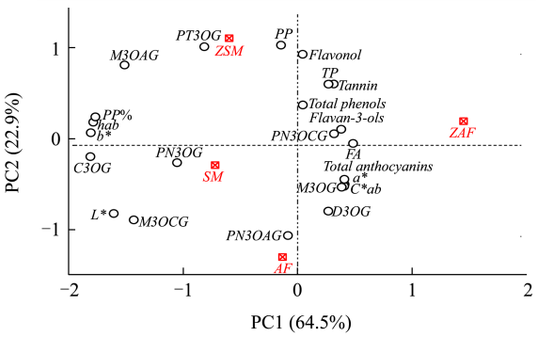


图 6 前两个主成分上的色泽指标的载荷及酒样分布

Fig.6 Loadings of color index on the first two PCs and samples'distribution

2.7 不同发酵方式的赤霞珠干红葡萄酒差异指标筛选

以 CIElab 参数、葡萄酒色素指标和单体花色苷等指标作为因变量，将供试酒样作为自变量，进行 OPLS-DA 判别因子分析，旨在探究供试酒样的差异呈色物质。分析结果显示，自变量拟合指数（R^2X）为 0.984，因变量拟合指数（R^2Y）为 0.968，模型预测指数（Q^2）为 0.893，表明该模型能够较好地反映样品间 CIElab 参数、葡萄酒色素指标和单体花色苷方面的整体差异。通过置换检验（n=200）验证模型的可靠性。如图 7a 所示，在 OPLS-DA 模型中，R^2 和 Q^2 回归线的纵轴截距分别为 0.354 和 −0.947，且置换检验结果显示，左侧随机排列组的验证参数均显著低于原始模型 R^2 和 Q^2 值。验证结果表明，该判别模型未出现过拟合现象，具有较高的稳定性和可靠性，能够有效区分供试酒样的特征指标。

变量重要性投影（VIP）筛选法通过量化各色泽特征变量对分类判别的贡献度（VIP 值），并结合单变量分析的显著性检验（如 P＜0.05），以双维协同策略高效锁定具有统计学意义的色泽特征差异物质。如图 7b 所示，本模型中 VIP＞1 的关键指标包括总花色苷、锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷、聚合色素占比（*PP*%）、色调角（h_{ab}），红色色调（a^*）和色彩饱和度（C^*_{ab}），以上指标可用于区分供试酒样间的色泽质量差异。

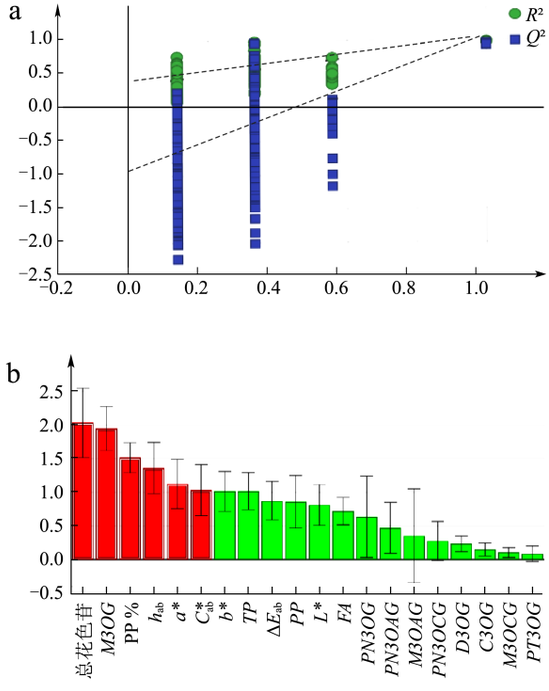


图 7 不同发酵方式赤霞珠干红葡萄酒色泽差异指标的 OPLS-DA 筛选

Fig. 7 OPLS-DA-based screening of color-discriminating variables in Cabernet Sauvignon dry red wines produced using different fermentation methods

注：a 为 OPLS-DA 模型置换检验结果（200 次）；b 为各色泽指标的变量投影重要性（VIP）值。

3 结论

基于单一酒精发酵、混菌酒精发酵、顺序酒精－苹乳发酵和顺序混菌酒精－苹乳发酵的干红葡萄酒，量化 4 种酒样的 CIElab 参数、结合 L^*=60 的色度彩度

和明度空间图表征颜色特征，并综合运用光谱学、色谱学和化学计量学，对比供试酒样的 CIElab 参数、葡萄酒色素指标、酚类物质和单体花色苷等指标。结果表明，相较于单一酒精发酵酒样，利用混菌酒精发酵酿制的干红葡萄酒 a^*、C^*_{ab}、*FA* 和锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷有提升作用。顺序酒精－苹乳发酵和顺序混菌酒精－苹乳发酵酒样间颜色特征相近。CIElab 参数（L^*、b^* 和 h_{ab}）与葡萄酒色素指标、酚类物质呈负相关，表明葡萄酒色素结构与酚类物质会综合影响葡萄酒的明度、黄色色调和色调角。本研究设计的四种典型发酵模式制备的干红葡萄酒色泽质量具有较强区分能力，其中单一酒精发酵和混菌酒精发酵酒样颜色特征偏向酿造新酒风格，而苹乳发酵能够推动酒样从新酒向陈酿红葡萄酒颜色发展。亟待研究四种典型发酵方式中酒样的感官质量、糖苷酶活性、浓度、微生物群落动态监测和色泽质量关系，为后续工艺优化提供数据支持。

参考文献

[1] MORATA A, GÓMEZ-CORDOVÉS, M C, et al. Adsorption of anthocyanins by yeast cell walls during the fermentation of red wines [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(14): 4084-4088.

[2] JI J, HENSCHEN C W, NGUYEN T H, et al. Yeasts induce acetaldehyde production in wine micro-oxygenation treatments [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(51): 15216-15227.

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

[4] LI N, WANG L, YIN J, et al. Adjustment of impact odorants in Hutai-8 rose wine by co-fermentation of *Pichia fermentans* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Food Research International, 2022, 153: 110959.

[5] WINDHOLTZ S, REDON P, LACAMPAGNE S, et al. Non-Saccharomyces yeasts as bioprotection in the composition of red wine and in the reduction of sulfur dioxide [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111781.

[6] WANG S Y, LI S Y, ZHAO H F, et al. Acetaldehyde released by *Lactobacillus plantarum* enhances accumulation of pyranoanthocyanins in wine during malolactic fermentation [J]. Food Research International, 2018, 108: 254-263.

[7] CHEN X X, HUANG X N, SUN S F, et al. Effect of fortified inoculation with indigenous *Lactobacillus brevis* on solid-state fermentation of light-flavor Baijiu [J]. Foods, 2023, 12 (23): 4198.

[8] RUSSO P, ENGLEZOS V, CAPOZZI V, et al. Effect of mixed fermentations with *Starmerella bacillaris* and *Saccharomyces cerevisiae* on management of malolactic fermentation [J]. Food Research International, 2020, 134: 109246.

[9] 李运奎,范舒悦,张煜,等.西北地区红葡萄酒颜色微观量化分类与宏观量化分级[J].农业机械学报,2023,54(5):379-386.

[10] 赵宇,沙青,孔彩琳,等.西北地区干红葡萄酒质量相关理化指标的判别功能解析[J].食品科学技术学报,2021,39(3):129-139.

[11] ESCOTT C, MORATA A, RICARDO-DA-SILVA J M, et al. Molecules effect of lachancea thermotolerans on the formation of polymeric pigments during sequential fermentation with schizosaccharosmyces pombe and saccharomyces cerevisiae [J]. Molecules, 2018, 23(9): 2353.

[12] LIU C Y, WEI X, ZHANG Z, et al. Color protection, aroma enhancement and sensory improvement of red wines: comparison of pre-fermentation additions of cyclodextrins and polysaccharides [J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143432.

[13] WU L L, ZHANG Y, PREJANO M, et al. Gallic acid improves color quality and stability of red wine via physico-chemical interaction and chemical transformation as revealed by thermodynamics, real wine dynamics and benchmark quantum mechanical calculations [J]. Food Research International, 2024, 188: 114510.

[14] 姜娇,史学容,柴梦淼,等.优选本土乳酸菌-酵母接种时序对模拟红葡萄汁混菌发酵特性的影响[J].中国食品学报,2023,23(11):114-124.

[15] 李佳慧,李悦琦,周晓芳,等.干红葡萄酒单宁质量的多维表征方法分析[J].中国农业科学,2025,58(10):2022-2034.

[16] 高琛瑜,董荣,石淼,等.赤霞珠葡萄酒颜色相关物质分析及可视化表征[J].食品与发酵工业,2024,50(12):127-135.

[17] SUN Q, AN P, LI P, et al. Unraveling time-resolved transcriptional and metabolic shifts in the mixed fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Hanseniaspora uvarum* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(20): 12418-12432.

[18] 贾世宽,陈佳威,郜成军,等.顺序和同时接种乳酸菌对马瑟兰葡萄酒品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(23):48-55.

[19] ZHANG B Y, LIU D D, LIU H, et al. Impact of indigenous *Oenococcus oeni* and *Lactiplantibacillus plantarum* species co-culture on Cabernet Sauvignon wine malolactic fermentation: kinetic parameters, color and aroma [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101369.

[20] 王美琪,高梅,武运,等.渗透汽化膜分离技术制备脱醇葡萄酒的颜色特征及花色苷组成研究[J].食品工业科技,2025,46(23):144-153.

[21] KONG C L, LI A H, SU J, et al. Flavor modification of dry red wine from Chinese spine grape by mixed fermentation with *Pichia fermentans* and *S. cerevisiae* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 83-92.

[22] 王驰,兰义宾,段长青,等.宁夏贺兰山东麓不同子产区‘马瑟兰’干红葡萄酒颜色和酚类物质组成比较[J].现代食品科技,2024,40(1):194-204.

[23] 郝笑云,王宏,张军翔.酚类物质对红葡萄酒颜色影响的研究进展[J].现代食品科技,2013,29(5):1192-1197.

[24] SUN W, CHEN X, BI P, et al. Screening and characterization of indigenous non-*Saccharomyces cerevisiae* with high enzyme activity for kiwifruit wine production [J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138309.

[25] QIN T, LIAO J, ZHENG Y, et al. Oenological characteristics of four non-Saccharomyces yeast strains with β-glycosidase activity [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 626920.

[26] LAITILA J E, SALMINEN J P. Relevance of the concentrations and sizes of oligomeric red wine pigments to the color intensity of commercial red wines [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(11): 3576-3584.

[27] DEVI A, AIYAPPAA A K, WATERHOUSE A L. Adsorption and biotransformation of anthocyanin glucosides and quercetin glycosides by *Oenococcus oeni* and *Lactobacillus plantarum* in model wine solution [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2110-2120.

[28] YAO X C, ZHANG H L, MA X R, et al. Leaching and evolution of anthocyanins and aroma compounds during Cabernet Sauvignon wine fermentation with whole-process skin-seed contact [J]. Food Chemistry, 2024(Mar.15): 436.

[29] GARCÍA-ESTÉVEZ I, CRISTINA A E, PUENTE V, et al. Enological tannin effect on red wine color and pigment composition and relevance of the yeast fermentation products [J]. Molecules, 2017, 22(12): 2046.

[30] IGNACIO G E, CRISTINA A E, VICTOR P, et al. Terroir effect on the phenolic composition and chromatic characteristics of mencía/jaen monovarietal wines: bierzo do (Spain) and dão do (Portugal) [J]. Molecules, 2020, 25(24): 6008.