

引用格式:朱娟娟,马海军,李敏,等.不同酿酒酵母共发酵对干红葡萄酒理化特性和香气组分的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(2):194-202. ZHU Juanjuan, MA Haijun, LI Min, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* mixed fermentation on physicochemical property and aroma components in dry red wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(2):194-202.

不同酿酒酵母共发酵对干红葡萄酒理化特性和香气组分的影响

朱娟娟^{1,2}, 马海军^{1,2*}, 李敏^{1,2}, 刘雅琴^{1,2}, 倪志婧^{1,2}, 王薇^{1,2}, 陈凤英¹, 李亚罡¹

1(北方民族大学 生物科学与工程学院, 宁夏 银川, 750021) 2(宁夏葡萄与葡萄酒技术创新中心, 宁夏 银川, 750021)

摘要 该文以酿酒酵母 F33 和 F9 单独发酵为对照, 分别添加不同比例的 F33 和 F9 (1:1、1:2 和 2:1) 混合发酵酿制赤霞珠干红葡萄酒, 测定总糖、可滴定酸、pH 值、还原糖、挥发酸、酒精度、颜色和抗氧化特性及进行灰色关联度分析, 并运用气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用技术分析不同酵母菌发酵对酒风味物质的影响, 选出最适的混合比例。结果表明, 混菌发酵的干红葡萄酒理化指标均符合国家标准。酒精发酵过程中, 混菌启动发酵的速率比单菌种快, 显著降低总糖含量。与单一发酵相比, 混菌发酵能够增加酒体的可滴定酸含量、CIE LAB 参数 b^* 值和 H^* 值及聚合花色苷含量, 降低还原糖含量, 且混菌发酵的葡萄酒抗氧化特性显著高于 F9 单独发酵处理。不同处理间酒体理化指标加权关联度排名依次为 F33 单一发酵 (0.462) > F33:F9 = 1:2 混合发酵 (0.404) > F33:F9 = 1:1 混合发酵 (0.379) > F9 单一发酵 (0.368) > F33:F9 = 2:1 混合发酵 (0.337)。此外, 混菌发酵可以提高酒体中酯类、醇类和酸类等物质的相对含量, 且独有的香气物质可达 6 种。综合考虑葡萄酒理化指标和香气组分, 当菌株 F33 与 F9 的混合比例为 1:2 时, 葡萄酒中还原糖和挥发酸均有所降低, 酒精度有所提高, 香气物质种类最多, 缩短陈酿时间。

关键词 酿酒酵母; 混合发酵; 葡萄酒; 理化特性; 香气成分

Effect of *Saccharomyces cerevisiae* mixed fermentation on physicochemical property and aroma components in dry red wine

ZHU Juanjuan^{1,2}, MA Haijun^{1,2*}, LI Min^{1,2}, LIU Yaqin^{1,2}, NI Zhijing^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, CHEN Fengying¹, LI Yagang¹

1(College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

2(Ningxia Grape & Wine Innovation Center, Yinchuan 750021, China)

ABSTRACT Using commercial yeast strains F33 and F9 sole fermentation as the two control groups, the Cabernet Sauvignon dry red wines were produced by mixed fermentation of F33 and F9 with different proportions (1:1, 1:2 and 2:1). The total sugar, titrable acid, pH values, reducing sugar, volatile acid, alcohol content, hue, and antioxidant properties were determined and made analysis of Grey Related Degree in order to optimize the proportion. The flavor substances of wine were also measured by using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the dry red wine produced by mixed fermentation met the national standard. The alcohol fermentation was started earlier in mixed fermentation than in sole fermentation. Compared with single species fermentation, mixed fermentation could increase titrable acid content, CIE LAB parameter b^* and H^* value, polymeric anthocyanin content and reduce reducing sugar content. Moreover, the antioxidant property of mixed fermentation is significantly higher than that of F9 fermentation. The rank of the weighted correlation degree of physicochemical indicators among different treatments was F33 fermentation (0.462) > F33:F9 = 1:2 mixed fermentation (0.404) > F33:F9 = 1:1 mixed fermentation (0.379) > F9 fermentation (0.368) > F33:F9 = 2:1 mixed fermentation (0.337). Additionally, mixed fermentation could increase the relative content of esters, alcohols, acids and other substances in wine and its unique aroma substances could be up to 6 kinds. Generally, the optimal ratio of yeast F33 and F9 was 1:2, which could decrease reducing sugars and volatile acids, increased alcohol content and aroma substances and shortened the aging time.

Key words *Saccharomyces cerevisiae*; mixed fermentation; wine; physicochemical property; aroma components

第一作者:博士,讲师(马海军副教授为通讯作者, E-mail: mahaijun2007@126.com)

基金项目:宁夏高等学校科学研究项目 (NGY2016158);宁夏自然科学基金项目 (2018AAC03104);北方民族大学中央高校基本科研业务费专项 (2016SKKY01);北方民族大学人才引进启动基金项目

收稿日期:2019-08-26, 改回日期:2019-10-25

酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 是酿造葡萄酒的主体菌种,除将原料中糖转化为酒精外,还能将原料中的氨基酸等前提物质转换为酯、酸、高级醇等风味物质,并合成多种酶,且花青素与酵母细胞和酵母代谢物的相互作用可以直接影响花青素的含量和组成以及葡萄酒颜色,从而对葡萄酒色泽、风味复杂性和口感有重要影响^[1-2]。

随着我国葡萄酒产业的迅速发展,单一菌种的普遍应用引起葡萄酒风味特征同质化,降低商业竞争力,但考虑到不同菌株的次级代谢产物存在差异,混菌发酵逐渐受到酿酒师们的关注。目前,混菌发酵有两种类型,一种是酿酒酵母与非酿酒酵母 (*non-Saccharomyces*) 混合发酵;另一种是不同酿酒酵母混合发酵。虽然非酿酒酵母与酿酒酵母混合发酵能够改善葡萄酒的组成和香气,但也存在一些食品安全等隐患^[3],故利用不同酿酒酵母混合发酵改善葡萄酒品质也成为当前研究的热点。混菌发酵能够降低乙酸的产量,改变发酵产物的风味特征,增加酒体的复杂度,使葡萄酒风味更佳丰富、浓郁^[4-6]。HOWELL 等^[7]发现 EC1118 和 F15 混合发酵的葡萄酒香气成分中的酯类、醇类和酸类等物质的含量均有所增加,从而增强酒体的果香和花香。SABERI 等^[8]表明酿酒酵母混合发酵的霞多丽葡萄酒具有浓郁的甜果、草莓、青苹果、梨和香蕉香气,比其单独发酵的品酒香气更为独特和复杂。于亚敏等^[9]发现酿酒酵母混合发酵的成品酒香气轮廓与其单独发酵后混合调配的葡萄酒香气轮廓有所不同。然而,前人对酿酒酵母混合发酵的研究主要集中于对酒体香气物质的影响,但对其发酵特性、酒体颜色、抗氧化特性等方面报道甚少。

F33 和 F9 是目前市场上常用的两款商用酿酒酵母,具有各自的生长代谢特征,且其香气特征也有所不同,本研究以酿酒酵母 F33 和 F9 单独发酵为对照,通过添加不同比例的 F33 和 F9 混合发酵酿制赤霞珠干红葡萄酒,揭示酿酒酵母 F33 与 F9 共发酵对干红葡萄酒发酵特性、理化指标、颜色、抗氧化特性和香气组分的影响,旨在为酿酒酵母混合发酵的研发和利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

葡萄原料:宁夏优良红色酿酒葡萄品种赤霞珠,2017 年 10 月采自宁夏银川青铜峡产区,原料糖度为 225 g/kg(以葡萄糖计),酸度为 4.69 g/kg(以酒石酸

计)。

商业酿酒酵母 F33,法国 LAFFORT 公司;FC9,上海杰兔工贸有限公司。

无水葡萄糖、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ 、酒石酸钾钠、NaOH、次甲基兰、酚酞指示剂、浓 HAOH、福林-酚、没食子酸、 Na_2CO_3 、无水乙醇、DPPH、ABTS、过硫酸钾、Trolox 和白砂糖为分析纯,亚硫酸溶液(含 6% SO_2)为食品级,天津市大茂化学试剂厂;果胶酶(酶活 4 400 U/g),法国 LAFFORT 公司;NaCl、乙醛、乙醇(色谱纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

UV-2600 紫外可见分光光度计,日本岛津公司;CSS810 分光测色计,上海精密仪器仪表有限公司;Agilent GC-6890-5975 气相色谱仪,美国 Agilent 公司产品;Agilent 5975 质谱仪,美国 Agilent 公司产品;自动顶空固相微萃取装置,德国 Gerstel 公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国 Supelco 公司产品;DF-II 集热式恒温磁力搅拌器,金坛市恒丰仪器制造有限公司。

1.3 试验设计

本试验共设计 5 个处理,分别为 F33 单一发酵(T1)、F9 单一发酵(T2)、F33:F9 = 1:1(T3)混合发酵、F33:F9 = 1:2(T4)混合发酵、F33:F9 = 2:1(T5)混合发酵,每处理重复 3 次。

干红葡萄酒酿造:酿酒葡萄原料经除梗破碎后加入 50 mg/L SO_2 和 20 mg/L 果胶酶,室温浸渍 24 h,随后根据试验设计分别接入相对应活化后的酿酒酵母 200 mg/L 进行酒精发酵,发酵控温 20 ~ 25℃,发酵 13 ~ 14 d,酒精发酵结束后皮渣浸渍 12 h,随后分离得到发酵原酒,苹果酸-乳酸发酵采用控温启动自然发酵的方式;苹果酸-乳酸发酵结束后调 SO_2 含量 50 mg/L,满罐贮存。发酵设备为实验室 20 L 不锈钢发酵罐,每个处理发酵 3 罐。

取样时间:葡萄浆接入酵母菌后,每天取适量的发酵液用于测定酒醪总糖、可滴定酸和 pH 值,直至酒精发酵结束;随后取适量的原酒测定酒体可滴定酸、pH 值、还原糖、酒精度、挥发酸、总酚、DPPH 自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力及其香气物质。2018 年 9 月进行葡萄酒 CIELAB 参数、色度、色调和花色苷测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 葡萄酒基本理化指标

总糖和还原糖(以葡萄糖计)采用直接滴定法;

可滴定酸(以酒石酸计)和挥发酸(以醋酸计)采用指示剂法;pH值采用酸度计法测定;酒精度采用密度瓶法。以上检测方法均参照国标 GB/T 1503—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》^[10]中的方法进行。

1.4.2 葡萄酒抗氧化特性

总酚(以没食子酸计)采用福林-肖卡法,参考 ARNOUS^[11]方法,其回归方程为 $y = 0.0011x + 0.0059$, $R^2 = 0.9997$; DPPH 自由基清除能力(以 Trolox 当量抗氧化能力表示)采用 DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯)法,参照 BRAND-WILLIAMS 等^[12]方法; ABTS 自由基清除能力(以 Trolox 当量抗氧化能力表示)采用 ABTS(2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐)方法,参照李勇方法,其回归方程为 $y = -0.0006x + 0.6382$, $R^2 = 0.9984$ 。

1.4.3 葡萄酒酒体颜色的测定

参照张方方等^[13]方法,取不同处理中酒样各 50 mL,在温度 4 ℃,转速 80 000 r/min 下离心 15 min,离心结束后取酒样上清液 5 mL,采用 CR-400 色差计(D65,观测角度 10°)直接测定葡萄酒样品溶液的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 以及 H^* 值;同时,选 1 cm 的比色皿,用蒸馏水作为空白对照,分别测定葡萄酒在波长为 420、520 和 620 nm 下的吸光度 A_{420} 、 A_{520} 和 A_{620} ,色度 $= 5 \times (A_{420} + A_{520} + A_{620})$,色调 $= A_{420}/A_{520}$ 。

取离心后不同处理酒样上清液各 2 mL,添加 20 μ L 20% 乙醛水溶液,混匀静置 45 min,在波长 520 nm 下测得的吸光值为总花色苷(A_{ace});取 2 mL 酒样,添加 160 μ L 50 g/L SO_2 ,在波长 520 nm 下测得吸光值为聚合花色苷(A_{SO_2});酒样在波长为 520 nm 条件下的吸光值为 A_{wine} 。单体花色苷 $= A_{wine} - A_{SO_2}$ 。

1.4.4 葡萄酒香气成分

香气成分的萃取:取 8 mL 待测酒样置于 20 mL 顶空瓶中,加入 2.4 g NaCl,经振荡使 NaCl 充分溶解。将固相萃取头插入样品瓶顶空部分,于 45 ℃ 下萃取 30 min。吸附饱和后的萃取头取出,随后插入气相色谱进样口,于 250 ℃ 解析 3 min,进行 GC/MS 检测分析。

气相色谱条件:色谱柱为 CP-Wax(60 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m, Agilent),载气为高纯度氦气(He),流速 1.0 mL/min,不分流进样。采用程序升温:初始温度 40 ℃ 保持 2 min,以 3 ℃/min 升至 85 ℃,保持 2 min,以 3 ℃/min 升至 120 ℃,保持 3 min,以 3 ℃/min 升至 200 ℃,最后以 5 ℃/min 升至 230 ℃,保持 10 min。

质谱条件:采用电子电离(electron ionization, EI)

源,电子能量为 70 eV,检测器温度 250 ℃,离子源温度为 230 ℃,扫描范围为 30 ~ 400 m/z 。

定性分析:根据 GC-MS 质谱结果,与标准的质谱库 NIST14 进行检索分析,同时结合保留指数及气相色谱峰面积,对香气成分进行定性分析,利用面积归一化法计算各物质组分相对百分含量。

1.5 统计分析

运用 SPSS 13.0 对数据进行方差分析(analysis of variance, ANOVA),采用 LSD 法进行多重比较,并利用 Excel 2013 作图。采用灰色系统关联度理论,选取不同处理间具有差异显著性的理化指标进行灰色关联度分析,综合评价酿酒酵母混合发酵对赤霞珠干红葡萄酒理化特性的影响。

2 结果与分析

2.1 酿酒酵母混合发酵对葡萄酒发酵特性的影响

2.1.1 酿酒酵母混合发酵对发酵过程中葡萄酒总糖的影响

葡萄酒酿造过程中,糖为酿酒酵母生长提供其所需的能量及发酵生成酒精,则酒醪中总糖的变化趋势反映酿酒酵母发酵能力的强弱^[14]。由图 1 可知,随着发酵时间的推进,不同处理发酵液总糖含量呈下降趋势,但前 7 d 下降速率较快,而随后下降速度缓慢并趋于平稳。发酵第 1 天, T4 和 T5 处理总糖含量显著低于 T1、T2 和 T3 处理,则表明 T4 和 T5 处理中酒精发酵启动速度较快;但发酵第 2 天, T1 和 T2 处理总糖含量明显低于其他处理,则表明单一发酵虽然启动酒精发酵的速度较慢,但其酒精发酵速率明显高于混合发酵。发酵结束后,混合发酵处理中总糖含量均低于单一发酵处理,则表明 F33 和 F9 混合发酵糖类物质较单一发酵更彻底。

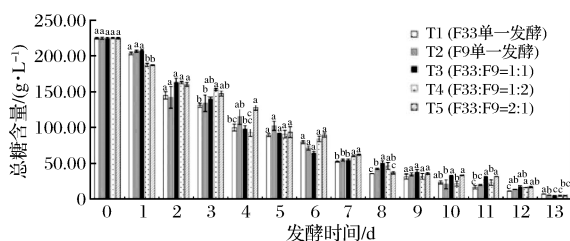


图 1 酿酒酵母混合发酵对发酵过程中葡萄酒总糖的影响

Fig. 1 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on total sugar content of wine during the entire fermentation process

注:图中不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 酿酒酵母混合发酵对发酵过程中葡萄酒可滴定酸的影响

葡萄酒中有机酸可以形成稳定的芳香物质,是衡量葡萄酒品质的一个重要指标^[15]。由图2可知,随着发酵时间的推进,不同处理中酒醪可滴定酸含量呈先增后降趋势,其中第10天达到最高值11.53 g/L,随后逐渐下降至6.10~7.08 g/L。不同处理可滴定酸在整个发酵过程中均呈上下浮动趋势,无明显规律。发酵结束后,混合发酵处理可滴定酸含量均高于单一发酵处理,则表明F33和F9混合发酵较单一发酵有利于有机酸的形成。

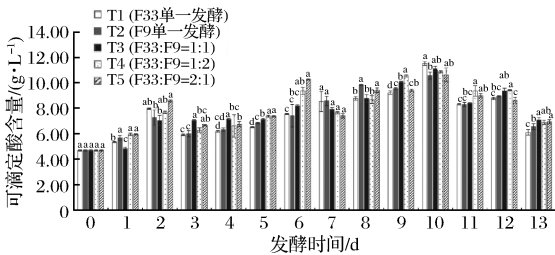


图2 酿酒酵母混合发酵对发酵过程中葡萄酒可滴定酸的影响

Fig.2 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on titratable acid content of grape must during fermentation process

2.1.3 酿酒酵母混合发酵对发酵过程中葡萄酒 pH 值的影响

pH 是影响酶活性的一个重要因素,当外环境 pH 改变与胞内不一致时,被分泌到细胞外的胞外酶活性就会受到影响^[16],从而影响酵母的新陈代谢;同时,合适的 pH 值对葡萄酒的稳定性和感官质量都起着非常重要的作用,是葡萄酒生产过程中生化反应的主体,且 pH 越低,越有利于一些氨基酸的吸收^[19]。由图3可知,随着发酵时间的推进,不同处理中 pH 值呈先降后增趋势。T5 处理的 pH 值在整个发酵过程中明显高于其他处理。整个发酵过程中,T1 和 T2 处

理中 pH 值在发酵前和发酵后分别降低 2.09% 和 1.34%;T3、T4 和 T5 处理中 pH 值在发酵前和发酵后分别降低 0.53%、-0.81% 和 0.52%,则表明混合发酵过程中酒醪 pH 值变化较单一发酵过程中 pH 值变化幅度小。

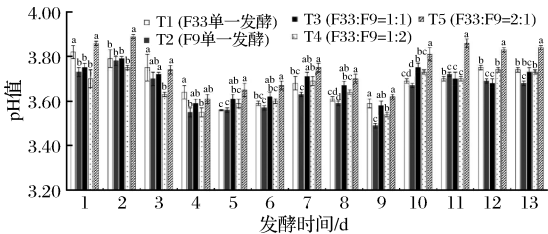


图3 酿酒酵母混合发酵对葡萄酒发酵过程中 pH 值的影响
Fig.3 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on pH values of wine during the entire fermentation process

2.2 酿酒酵母混合发酵对干红葡萄酒理化特性的影响

2.2.1 酿酒酵母混合发酵对酒体常规理化指标的影响

葡萄酒可滴定酸、pH 值、还原糖、酒精度和挥发酸含量的高低是判断其质量是否达到标的基础指标。由表1可知,酿酒酵母混合发酵对干红葡萄酒可滴定酸、pH 值、还原糖和酒精度含量有显著性影响,而对挥发酸含量无显著性影响。混合发酵处理中可滴定酸含量显著高于单一发酵,最高的为 T3 处理;pH 值最低为 T2 处理,最高为 T5 处理,T1、T3 和 T4 间无显著性差异,均在 3.70 左右。不同处理中还原糖含量均符合我国最新的葡萄酒标准 GB/T 15037—2006^[10]规定,并且混合发酵处理中还原糖含量均低于单一发酵,且 T4 处理中还原糖含量显著低于 T1 处理。5 个处理中酒精度从高到低依次为:T3 > T4 > T1 > T2 > T5,其中 T3 处理的酒精度含量最高,表明 F33 和 F9 酵母按照 1:1 的混合发酵对葡萄中糖的利用率最高;而 T5 处理的酒精度含量显著低于其他处理。

表1 酿酒酵母混合发酵对干红葡萄酒理化性质的影响

Table 1 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on physical and chemical properties of Cabernet Sauvignon dry red wines

处理	可滴定酸/(g·L ⁻¹)	pH 值	还原糖/(g·L ⁻¹)	挥发酸/(g·L ⁻¹)	酒精度/% vol
T1	6.10 ± 0.221 ^c	3.74 ± 0.01 ^b	3.18 ± 0.179 ^a	0.475 ± 0.036 ^a	13.2 ± 0.280 ^a
T2	6.56 ± 0.232 ^b	3.68 ± 0.01 ^c	2.76 ± 0.092 ^{ab}	0.465 ± 0.144 ^a	13.0 ± 0.231 ^a
T3	7.08 ± 0.194 ^a	3.73 ± 0.02 ^{bc}	2.56 ± 0.421 ^{ab}	0.455 ± 0.228 ^a	13.5 ± 0.170 ^a
T4	6.89 ± 0.165 ^{ab}	3.73 ± 0.01 ^{bc}	2.14 ± 0.214 ^b	0.423 ± 0.015 ^a	13.3 ± 0.111 ^a
T5	6.94 ± 0.168 ^{ab}	3.84 ± 0.01 ^a	2.52 ± 0.399 ^{ab}	0.508 ± 0.038 ^a	12.2 ± 0.150 ^b

注:不同的小写字母表示显著差异(P<0.05)。下同。

2.2.2 酿酒酵母混合发酵对酒体颜色的影响

采用 CIELAB 色空间能够描述葡萄酒颜色^[17-19],其中 a^* 值与红绿相关; b^* 值与黄蓝相关; L^* 值表示明暗程度,与葡萄酒的颜色深浅呈反比; C^* 值表示葡萄酒的饱和度,与葡萄酒颜色纯正呈正比; H^* 值表示葡萄酒的色调角^[19],在红葡萄酒中的取值为 $0^\circ \sim 90^\circ$,其值越小代表酒体越倾向于新红葡萄酒的颜色特征,其值越大代表酒体越倾向于陈酿红葡萄酒的颜色特征^[17]。

由表 2 可知,酿酒酵母混合发酵对葡萄酒 a^* 值、 C^* 值、色度和色调无显著性影响,但对 b^* 、 L^* 和 H^* 有显著性影响。混合发酵处理中葡萄酒 b^* 值和 H^* 值均高于单一发酵处理,则表明酿酒酵母混合发酵的葡萄酒更易成熟。T5 处理中 b^* 和 H^* 值显著高于其他处理;T1 处理中 b^* 值和 H^* 值显著低于 T2、T3 和 T4 处理,其中 b^* 值分别低 35.6%、53.9% 和 64.7%, H^* 值分别低 24.5%、54.4%、55.4% 和 120.1%;T2 和 T3 处理中 b^* 值和 H^* 值均无显著差异性,但 T4 与 T2 和 T3 处理中 H^* 值存在显著性差异,其值从大到小依次为 T2 > T3 > T4,而 b^* 值无显著性差异。同时,葡萄酒 CIELAB 参数 L^* 值均在 30 左右,其值从高到低依次为 T4 > T3 > T2 = T1 > T5,但 T1、T2 和 T3 间无显著性差异性。此外,酿酒酵母混合发酵对葡萄酒总花色苷和单体花色苷无显著性影响,但对聚合花色苷有显著性影响(表 2)。不同处理间相比较,T1 处理的聚合花色苷含量显著低于其他处理,分别比 T2、T3、T4 和 T5 低 12.31%、16.15%、8.46% 和 9.23%;T2、T3、T4 和 T5 处理间聚合花色苷含量均无显著性差异。

2.2.3 酿酒酵母混合发酵对葡萄酒抗氧化特性的影响

葡萄酒中酚类物质具有抗氧化活性,可以清除自

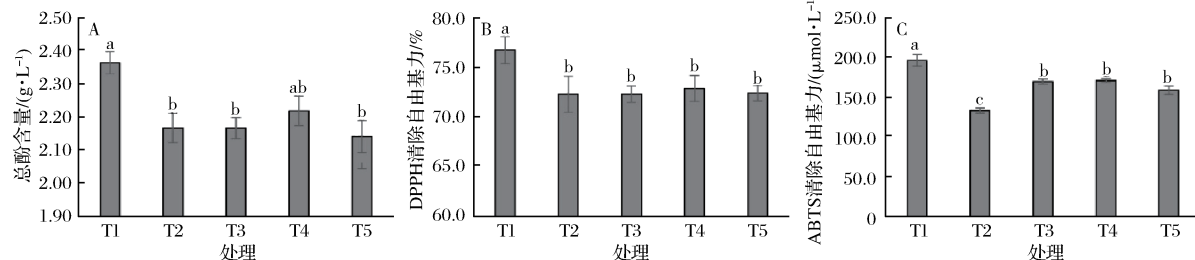
由基^[20],但其抗氧化性受诸多因素影响,其中酵母菌在酒精发酵过程中对果实中酚类物质的浸提有一定的影响,且其能够促进花色苷的降解并参与某些与颜色损失相关的反应^[21],从而影响葡萄酒总酚含量及其抗氧化特性。由图 4 可知,葡萄酒总酚含量、DPPH 和 ABTS 自由基清除能力分别为 2.10 ~ 2.40 g/L、72% ~ 77% 和 140 ~ 200 $\mu\text{mol/L}$ 。不同处理间相比较,T1 处理中葡萄酒总酚含量显著高于 T2、T3 和 T5 处理,而略高于 T4 处理,分别比 T2、T3、T4 和 T5 处理高 9.13%、9.13%、6.56% 和 10.40%。同时,T1 处理中葡萄酒 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力均显著高于其它处理,分别比 T2 处理高 6.15% 和 47.21%;比 T3 处理高 6.15% 和 15.73%;比 T4 处理高 5.32% 和 14.88%;比 T5 处理高 6.01% 和 23.63%。T2 处理中葡萄酒 ABTS 自由基清除能力显著低于其他处理。

表 2 酿酒酵母混合发酵对葡萄酒 CIELAB 参数、色度色调和花色苷的影响

Table 2 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on CIELAB parameters, chromaticity, color tone, and anthocyanins of Cabernet Sauvignon dry red wines

	T1	T2	T3	T4	T5
a^*	0.940 ± 0.038 ^a	1.049 ± 0.082 ^a	0.957 ± 0.077 ^a	0.985 ± 0.098 ^a	0.883 ± 0.105 ^a
b^*	0.323 ± 0.053 ^c	0.438 ± 0.065 ^b	0.497 ± 0.016 ^b	0.532 ± 0.055 ^{ab}	0.842 ± 0.051 ^a
L^*	30.5 ± 0.086 ^{bc}	30.5 ± 0.107 ^{bc}	30.7 ± 0.015 ^{ab}	30.8 ± 0.009 ^a	30.4 ± 0.047 ^c
C^*	1.00 ± 0.051 ^a	1.14 ± 0.053 ^a	1.11 ± 0.053 ^a	1.12 ± 0.052 ^a	1.26 ± 0.052 ^a
H^*	18.4 ± 0.222 ^d	22.9 ± 0.117 ^c	28.4 ± 0.876 ^c	28.6 ± 0.233 ^b	40.5 ± 0.383 ^a
色度	10.2 ± 0.096 ^a	10.3 ± 0.104 ^a	10.5 ± 0.051 ^a	10.0 ± 0.048 ^a	9.6 ± 0.628 ^a
色调	9.7 ± 0.378 ^a	11.3 ± 0.634 ^a	10.7 ± 0.064 ^a	10.2 ± 0.247 ^a	10.3 ± 0.764 ^a
总花色苷	0.182 ± 0.009 ^a	0.159 ± 0.009 ^a	0.169 ± 0.002 ^a	0.168 ± 0.004 ^a	0.162 ± 0.004 ^a
聚合花色苷	0.130 ± 0.003 ^b	0.146 ± 0.004 ^a	0.151 ± 0.003 ^a	0.141 ± 0.003 ^a	0.142 ± 0.005 ^a
单体花色苷	1.50 ± 0.066 ^a	1.33 ± 0.082 ^a	1.40 ± 0.015 ^a	1.39 ± 0.039 ^a	1.32 ± 0.022 ^a

注: L^* ,亮度值; a^* ,红绿色度值; b^* ,黄蓝色度值; C^* ,色译饱和度; H^* ,色调角。图中不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$),下同。



A - 总酚; B - DPPH 自由基清除能力; C - ABTS 自由基清除能力

图 4 酿酒酵母混合发酵对赤霞珠干红葡萄酒总酚含量、DPPH 清除自由基能力和 ABTS 清除自由基能力的影响

Fig. 4 Influence of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on total phenols content, DPPH scavenging free radical capability, and ABTS scavenging free radical capability in Cabernet Sauvignon dry red wines

2.2.4 葡萄酒酒体理化特性指标间相关性分析

表3反映不同处理干红葡萄酒理化特性指标间的相关性,结果显示干红葡萄酒理化特性指标间具有显著的相关性,其中总花色苷与单体花色苷和 DPPH 呈显著正相关,与色调和 C^* 呈显著负相关;单体花色苷与 DPPH 呈显著正相关,与色调、 b^* 和 C^* 呈显著负相关;色度与 pH 值、 b^* 和 H^* 呈显著正相关;色调与 a^* 和 C^* 呈显著正相关,与 DPPH 呈显著负相关;

还原糖与总酚和 DPPH 呈显著正相关,与可滴定酸、 a^* 、 b^* 、 C^* 呈显著负相关;酒精度仅与 b^* 呈显著负相关;可滴定酸与总酚和 DPPH 呈显著负相关;pH 值与 b^* 和 H^* 呈显著正相关;总酚与 DPPH 呈显著正相关,与 b^* 和 H^* 呈显著负相关;DPPH 与 b^* 和 C^* 呈显著负相关; a^* 与 C^* 呈显著正相关; b^* 与 C^* 和 H^* 呈显著正相关。

表 3 葡萄酒酒体理化特性指标间皮尔逊相关性分析

Table 3 Person correlation analysis among indicators of physical and chemical characteristics in dry red wine																			
指标	总花色苷	聚合花色苷	单体花色苷	色度	色调	还原糖	挥发酸	酒精度	总糖	可滴定酸	pH 值	总酚	ABTS	DPPH	L^*	a^*	b^*	C^*	H^*
总花色苷	1																		
聚合花色苷	0.238	1																	
单体花色苷	0.990 **	0.258	1																
色度	0.547	0.512	0.576	1															
色调	-0.896 **	-0.100	-0.901 **	-0.184	1														
还原糖	0.560	-0.094	0.604	0.191	-0.621	1													
挥发酸	-0.034	0.610	0.029	0.009	-0.112	0.218	1												
酒精度	0.178	-0.025	0.282	0.544	-0.103	0.269	-0.074	1											
总糖	-0.003	-0.358	-0.110	-0.036	0.128	-0.142	-0.571	-0.285	1										
可滴定酸	-0.477	0.382	-0.461	0.173	0.572	-0.734 *	0.011	0.243	0.014	1									
pH 值	-0.018	-0.077	-0.071	-0.655 *	-0.302	0.084	0.305	-0.585	0.198	-0.221	1								
总酚	0.582	-0.229	0.599	0.236	-0.559	0.719 *	0.058	0.108	-0.090	-0.749 *	0.019	1							
ABTS	0.352	-0.114	0.292	0.394	-0.089	0.427	-0.166	-0.125	0.451	-0.472	-0.123	0.560	1						
DPPH	0.734 *	-0.026	0.743 *	0.245	-0.713 *	0.810 **	0.031	0.114	-0.242	-0.788 **	0.035	0.678 *	0.480	1					
L^*	0.001	0.189	-0.028	0.259	0.218	-0.504	-0.492	0.015	-0.007	0.445	-0.394	-0.218	-0.151	-0.204	1				
a^*	-0.450	0.116	-0.485	0.080	0.632 *	-0.688 *	-0.014	-0.197	0.054	0.505	-0.176	-0.202	0.141	-0.509	0.390	1			
b^*	-0.594	0.032	-0.659 *	-0.660 *	0.406	-0.634 *	0.134	-0.643 *	0.300	0.411	0.641 *	-0.644 *	-0.390	-0.698 *	-0.049	0.304	1		
C^*	-0.646 *	0.081	-0.706 *	-0.355	0.647 *	-0.741 *	0.112	-0.532	0.186	0.504	0.299	-0.423	-0.068	-0.681 *	0.205	0.836 **	0.757 *	1	
H^*	-0.492	0.057	-0.527	-0.664 *	0.225	-0.421	0.182	-0.460	0.212	0.362	0.658 *	-0.691 *	-0.568	-0.590	-0.174	-0.088	0.905 **	0.434	1

注: L^* ,亮度值; a^* ,红绿色度值; b^* ,黄绿色度值; C^* ,色译饱和度; H^* ,色调角;“*”和“**”分别代表在 0.05 水平和 0.01 水平上显著。

2.2.5 酿酒酵母混合发酵对干红葡萄酒理化特性影响的综合评价

采用灰色系统关联度理论,选取不同处理间具有显著差异的理化指标进行灰色关联度分析,其包括聚合花色苷、还原糖、总糖、可滴定酸、pH 值、总酚、ABTS、DPPH、 L^* 、 b^* 、 H^* 11 项指标。由表 4 可知,F33 单一发酵(T1)的干红葡萄酒酒体理化特性的加权关联度高于其混合发酵的干红葡萄酒酒体理化特性的加权关联度,但 F9 单一发酵(T2)的干红葡萄酒酒体理化特性的加权关联度低于 F33:F9=1:1(T3)和 F33:F9=1:2(T4)混合发酵。不同处理间酒体理化指标加权关联度排名依次为 F33 单一发酵(T1)>F33:F9=1:2 混合发酵(T4)>F33:F9=1:1 混合发酵(T3)>F9 单一发酵(T2)>F33:F9=2:1 混合发酵(T5)。

2.3 酿酒酵母混合发酵对葡萄酒香气组分的影响

葡萄酒香气是产品感官质量的重要方面,能够体

现葡萄酒产品质量和风格特色,酿酒酵母可以代谢产生多种香气活性物质,并且细胞壁的甘露糖蛋白也可以修饰葡萄酒香气^[22]。因此分析葡萄酒中的香气成分对于葡萄酒产品的质量评价和真伪鉴别意义重大^[23]。通过气相色谱-质谱联用分析可知(表 5),T1、T2、T3、T4 和 T5 处理中分别检测出 37、30、30、40 和 27 种香气物质,其中酯类物质分别有 17、14、13、17 和 12 种;醇类物质分别有 7、5、6、9 和 6 种;酸类物质分别有 7、6、4、7 和 5 种;酮醛类物质分别有 1、0、2、1 和 1 种;烷烃类物质分别有 3、3、3、4 和 2 种;苯酚类物质分别有 2、2、2、2 和 1 种。

不同处理的酯类物质中,丁二酸二乙酯的相对含量最高,达到 14.8%~19.0%,但均无显著性差异;而 4 种物质相对含量存在差异显著性,分别是乙酸乙酯、己酸乙酯、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯和丁二酸单乙酯,其中 T2 处理中乙酸乙酯相对含量最高;T5 处理中己酸乙酯相对含量最高;T1 处理中

2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯和丁二酸单乙酯相对含量均最高;T3 混合发酵处理中乙酸乙酯、己酸乙酯和丁二酸单乙酯相对含量均最低;T5 混合发酵处理中 2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯相对含量均最低。醇类物质中,正戊醇和苯乙醇的相对含量最高,分别达到 19.5% ~ 25.0% 和 17.8% ~ 25.6%,但处理间无显著性差异;而不同处理间正己醇相对含量存在差异显著性,T1、T2 和 T5 处理显著高于 T3 和 T4 处理。酸类物质中,辛酸相对含量最高,达到 3.82% ~ 7.30%,且不同处理间存在显著性差异,T5 处理显著高于 T3 处理;同时,2,4-二羟基苯甲酸相对含量也存在显著性差异,T1 处理显著高于 T2 和 T4 处理。烷烃类物质中,六甲基环三硅氧烷相对含量最高,但处理间均无显著性差异,而十四甲基环七硅氧烷相对含量存在显著性差异,其中 T1 处理

显著高于 T4 处理。然而,不同处理间干红葡萄酒中酮醛类和苯酚类物质均无显著性差异。同时,不同酿酒酵母发酵所酿的干红葡萄酒均有其独特的香气物质(表 5),其中 F33 单一发酵(T1)所酿的干红葡萄酒中独有的香气物质为丁酸丁酯、十五酸乙酯、 γ -丁内酯和 2,4-二甲基戊三酯琥珀酸;F9 单一发酵(T2)所酿的干红葡萄酒中独有的香气物质为环十四烷;F33:F9 = 1:1(T3)混合发酵所酿的干红葡萄酒中独有的香气物质为十二醛二甲缩醛;F33:F9 = 1:2(T4)混合发酵所酿的干红葡萄酒中独有的香气物质为二甲氧基乙酸甲酯、丁二酸环丁基 3 乙酯、乙基异戊基琥珀酸酯、松油醇、3-甲硫基丙醇和戊基环丙烷;F33:F9 = 2:1(T5)混合发酵所酿的干红葡萄酒中独有的香气物质为 3-羟基-十三烷酸甲酯。

表 4 不同酿酒酵母发酵下干红葡萄酒酒体理化特性的关联度及排名

Table 4 The rank and relational grade of physicochemical property in Cabernet Sauvignon dry red wines produced by mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae*

处理	关联系数											得分	排名
	聚合花色苷	还原糖	总糖	可滴定酸	pH 值	总酚	ABTS	DPPH	<i>L</i> *	<i>b</i> *	<i>H</i> *		
T1	0.335	1.000	0.333	1.000	0.335	0.333	0.572	1.000	1.000	1.000	0.669	0.462	1
T2	0.663	0.341	0.557	0.334	0.728	0.488	1.000	0.360	0.333	0.333	0.621	0.368	4
T3	1.000	0.476	0.459	0.408	0.366	1.000	0.622	0.360	0.541	0.333	0.429	0.379	3
T4	0.516	0.469	1.000	0.579	1.000	0.725	0.608	0.433	0.553	0.364	0.333	0.404	2
T5	0.525	0.334	0.581	0.348	0.333	0.447	0.333	0.333	0.456	0.338	1.000	0.337	5
关联度	0.608	0.524	0.586	0.534	0.553	0.599	0.627	0.497	0.577	0.474	0.611		
权重	0.056 5	0.048 7	0.054 4	0.049 6	0.051 4	0.055 6	0.058 3	0.046 2	0.053 6	0.044 0	0.056 7		

表 5 酿酒酵母混合发酵对赤霞珠干红葡萄酒香气组分的影响

单位:%

Table 5 Effects of mixed fermentation of two kinds of *Saccharomyces cerevisiae* on aroma composition of Cabernet Sauvignon dry red wine

葡萄酒中香气成分	处理				
	T1	T2	T3	T4	T5
酯类(esters)					
甲酸甲酯(methyl formate)	3.11 ± 0.335 ^a	3.78 ± 0.040 ^a	5.29 ± 2.790 ^a	3.23 ± 0.015 ^a	3.24 ± 0.390 ^a
乙酸乙酯(ethyl acetate)	6.32 ± 1.365 ^{ab}	8.78 ± 1.090 ^a	3.10 ± 0.305 ^b	7.04 ± 1.340 ^a	6.21 ± 0.375 ^{ab}
乙酸异戊酯(isopentyl acetate)	0.37 ± 0.035 ^a	0.52 ± 0.075 ^a	1.14 ± 0.925 ^a	0.45 ± 0.060 ^a	0.36 ± 0.015 ^a
己酸乙酯(hexanoic acid, ethyl ester)	0.99 ± 0.155 ^{ab}	0.99 ± 0.180 ^{ab}	0.78 ± 0.255 ^b	0.84 ± 0.015 ^b	1.44 ± 0.015 ^a
辛酸乙酯(ethyl caprylate)	2.34 ± 0.310 ^a	2.38 ± 0.545 ^a	1.84 ± 0.860 ^a	1.82 ± 0.045 ^a	3.52 ± 0.315 ^a
癸酸乙酯(ethyl caprate)	1.00 ± 0.015 ^a	0.66 ± 0.030 ^a	0.84 ± 0.420 ^a	0.74 ± 0.110 ^a	1.38 ± 0.420 ^a
丁二酸二乙酯(butanedioic acid, diethyl ester)	17.12 ± 0.670 ^a	16.89 ± 0.830 ^a	14.82 ± 3.685 ^a	17.28 ± 0.465 ^a	18.96 ± 0.065 ^a
2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 (2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol disobutyrate)	0.84 ± 0.23 ^a	0.68 ± 0.090 ^a	0.57 ± 0.030 ^{ab}	0.41 ± 0.105 ^{ab}	0.17 ± 0.005 ^b
棕榈酸乙酯(hexadecanoic acid, ethyl ester)	2.18 ± 0.555 ^a	0.70 ± 0.115 ^a	1.23 ± 0.835 ^a	1.17 ± 0.320 ^a	0.77 ± 0.350 ^a
丁二酸单乙酯(ethyl hydrogen succinate)	2.32 ± 0.311 ^a	2.13 ± 0.382 ^{ab}	1.08 ± 0.325 ^b	1.46 ± 0.283 ^b	1.45 ± 0.106 ^b
月桂酸乙酯(dodecanoic acid, ethyl ester)	0.26 ± 0.010 ^a	0.11 ± 0.019 ^a	0.14 ± 0.053 ^a	0.19 ± 0.041 ^a	—
肉豆蔻酸乙酯(tetradecanoic acid, ethyl ester)	0.81 ± 0.087 ^a	0.44 ± 0.056 ^a	0.54 ± 0.306 ^a	0.47 ± 0.102 ^a	—
9-癸酸乙酯(9-ethyl caprate)	—	0.60 ± 0.322 ^a	0.76 ± 0.033 ^a	1.04 ± 0.0371 ^a	—
乙酸苯乙酯(acetic acid 2-phenylethyl este)	0.29 ± 0.068 ^a	0.40 ± 0.073 ^a	—	0.47 ± 0.013 ^a	—

续表 5

葡萄酒中香气成分	处理				
	T1	T2	T3	T4	T5
2-丁基琥珀酸二乙酯(2-buteryl-succinic acid diethyl ester)	0.24 ± 0.015 ^a	—	—	—	0.24 ± 0.001 ^a
二甲氧基乙酸甲酯(methyl 2,2-dimethoxyacetate)	—	—	—	0.21 ± 0.007	—
丁二酸环丁基 3 乙酯(cyclobutyl butyrate)	—	—	—	0.11 ± 0.002	—
乙基异戊基琥珀酸酯(ethyl isopentyl succinate)	—	—	—	0.20 ± 0.004	—
丁酸丁酯(butyl butyrate)	0.16 ± 0.010	—	—	—	—
十五酸乙酯(1-pentadecanol acetate)	0.18 ± 0.005	—	—	—	—
3-羟基-十三烷酸甲酯(ethyl 3-hydroxyhexadecanoate)	—	—	—	—	010 ± 0.005
γ-丁内酯(gamma-Butyrolactone)	0.18 ± 0.005	—	—	—	—
醇类 Alcohols					
正戊醇(1-pentanol)	22.51 ± 1.685 ^a	23.09 ± 0.720 ^a	19.51 ± 3.860 ^a	22.5 ± 0.320 ^a	24.96 ± 1.480 ^a
正己醇(1-hexanol)	1.36 ± 0.230 ^a	1.30 ± 0.235 ^a	0.09 ± 0.020 ^b	0.13 ± 0.005 ^b	1.72 ± 0.090 ^a
苄醇(benzyl alcohol)	0.24 ± 0.025 ^a	0.23 ± 0.010 ^a	0.16 ± 0.005 ^a	0.18 ± 0.030 ^a	0.22 ± 0.030 ^a
苯乙醇(phenylethyl alcohol)	20.12 ± 1.280 ^a	21.58 ± 4.195 ^a	21.77 ± 4.145 ^a	25.62 ± 1.510 ^a	17.77 ± 0.405 ^a
橙花叔醇(1,6,10-dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-)	0.17 ± 0.005 ^a	0.13 ± 0.003 ^a	0.11 ± 0.015 ^a	0.13 ± 0.030 ^a	0.15 ± 0.060 ^a
月桂醛缩二甲醇(lauraldehyde dimethyl alcohol)	0.29 ± 0.030 ^a	—	—	—	0.31 ± 0.005 ^a
3-甲基-1-戊醇(3-methyl-1-Pentanol)	—	—	1.13 ± 0.265 ^a	1.29 ± 0.035 ^a	—
1-癸醇(1-decanol)	0.14 ± 0.015 ^a	—	—	0.11 ± 0.010 ^a	—
松油醇(terpineol)	—	—	—	0.10 ± 0.010	—
3-甲硫基丙醇(3-(methylthio)-1-propanol)	—	—	—	0.18 ± 0.015	—
酸类(acids)					
己酸(hexanoic acid)	0.90 ± 0.140 ^a	0.76 ± 0.110 ^a	0.85 ± 0.145 ^a	1.03 ± 0.003 ^a	1.26 ± 0.245 ^a
乙基 3-甲基丁基酯丁二酸(ethyl 3-methylbutyl ester-butanedioic acid)	2.28 ± 0.015 ^a	2.33 ± 0.130 ^a	1.92 ± 0.450 ^a	2.19 ± 0.005 ^a	2.04 ± 0.621 ^a
辛酸(octanoic acid)	5.02 ± 0.025 ^{ab}	5.34 ± 0.930 ^{ab}	3.82 ± 0.770 ^b	4.89 ± 0.255 ^{ab}	7.30 ± 0.32 ^a
2-甲基丁酸(2-methyl butyric acid)	—	0.47 ± 0.062 ^a	0.38 ± 0.047 ^a	0.79 ± 0.439 ^a	0.51 ± 0.056 ^a
癸酸(n-decanoic acid)	1.43 ± 0.091 ^a	1.14 ± 0.266 ^a	—	0.97 ± 0.162 ^a	1.30 ± 0.190 ^a
2,4-二羟基苯甲酸(2,4-dihydroxybenzoic acid)	0.71 ± 0.438 ^a	0.19 ± 0.006 ^b	—	0.19 ± 0.127 ^b	—
9-癸烯酸(9-decenoic acid)	0.18 ± 0.007 ^a	—	—	0.19 ± 0.021 ^a	—
2,4-二甲基戊三酯琥珀酸	0.14 ± 0.005	—	—	—	—
酮醛类(carbonyls)					
十二醛二甲缩醛(1,1-dimethoxydodecane)	—	—	0.145 ± 0.045	—	—
大马酮(2-buten-1-one, 1-(2,6,6-trimethyl-1,3-cyclohexadien-1-yl)-, (E)-)	0.15 ± 0.030 ^a	—	—	—	0.150 ± 0.036 ^a
1-苯基-3-己酮(1-phenyl-3-Hexanone)	—	—	0.120 ± 0.033 ^a	0.145 ± 0.035 ^a	—
烷烃类(alkane)					
六甲基环三硅氧烷(cyclotrisiloxane, hexamethyl-)	0.69 ± 0.0652 ^a	0.67 ± 0.143 ^a	0.54 ± 0.047 ^a	0.59 ± 0.024 ^a	0.72 ± 0.014 ^a
十四甲基环七硅氧烷(cycloheptasiloxane, tetradecamethyl-)	0.31 ± 0.129 ^a	0.15 ± 0.035 ^{ab}	0.09 ± 0.008 ^{ab}	0.04 ± 0.004 ^b	0.11 ± 0.012 ^{ab}
戊基环丙烷(pentylcyclopropane)	—	—	—	0.10 ± 0.005	—
环癸烷(cyc3lodecane)	0.27 ± 0.025 ^a	—	0.17 ± 0.013 ^a	0.17 ± 0.022 ^a	—
环十四烷(cyclotetradecane)	—	0.15 ± 0.028	—	—	—
苯酚类(phenols)					
2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚(butylated hydroxytoluene)	0.19 ± 0.015 ^a	0.18 ± 0.025 ^a	0.12 ± 0.002 ^a	0.12 ± 0.010 ^a	—
2,4-二叔丁基苯酚(2,4-di-tert-butylphenol)	0.85 ± 0.120 ^a	0.50 ± 0.085 ^a	0.63 ± 0.007 ^a	0.48 ± 0.226 ^a	0.47 ± 0.148 ^a

3 结论

本研究以酿酒酵母 F33 和 F9 单独发酵为对照,添加不同比例的酿酒酵母 F33 和 F9 混合发酵得到赤霞珠干红葡萄酒的还原糖、可滴定酸、挥发酸以及酒精度含量均符合国家标准 GB/T 15037—2006。酒精发酵过程中,混菌启动发酵的速率比单一菌种快,且还原糖含量低,可滴定酸含量高,发酵更彻底。综合

考虑葡萄酒理化指标和香气组分,当菌株 F33 与 F9 的混合比例为 1:2 时,葡萄酒中还原糖和挥发酸均有所降低,酒精度有所提高,且葡萄酒抗氧化特性较 F9 单独发酵显著提高,更为重要的是其酒体中酯类、醇类和酸类等香气物质的相对含量均有所增加,且独有的香气物质达到 6 种;然而,经过一段时间陈酿后,酿酒酵母混合发酵的葡萄酒 CLELAB 参数 H^* 均高于单独发酵的葡萄酒,表明酿酒酵母混合发酵的葡萄酒

更易成熟。

参 考 文 献

- [1] FLEET G H. Yeast interactions and wine flavor [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 86(1-2): 11-22.
- [2] 韩东, 李红, 景建洲. 不同酵母对苹果啤酒发酵及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(15): 179-183.
- [3] 许维娜, 耿常乐, 任同同, 等. 混菌发酵对葡萄酒感官品质和风味物质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2018, 22(6): 12-17.
- [4] SADOUDI M, TOURDOT-MARECHAL R, ROUSSEAU S, et al. Yeast-yeast interactions revealed by aromatic profile analysis of Sauvignon Blanc wine fermented by single or co-culture of non-*Saccharomyces* and *Saccharomyces* yeasts [J]. Food Microbiol, 2012, 32: 243-253.
- [5] 曾智娟, 邓杰, 任志强, 等. 不同酵母菌发酵对生姜梨酒品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11 [2019-12-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021682>.
- [6] 宋茹茹, 段卫朋, 祝霞, 等. 戴尔有孢圆酵母与酿酒酵母顺序接种发酵对干红葡萄酒香气的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-12 [2019-12-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021740>.
- [7] HOWELL K S, COZZOLINO D, BARTOWSKY E J, et al. Metabolic profiling as a tool for revealing *Saccharomyces* interactions during wine fermentation [J]. FEMS Yeast Res, 2006, 6(1): 91-101.
- [8] SABERI S, CLIFF M, VUUREN VAN H J J. Impact of mixed *S. cerevisiae* strains on the production of volatiles and estimated sensory profiles of Chardonnay wines [J]. Food Res Int, 2012, 48(2): 725-735.
- [9] 于亚敏, 李霞, 唐国冬, 等. 两种酿酒酵母混合发酵对赤霞珠干红葡萄酒香气成分的影响[J]. 中国酿造, 2018, 37(4): 121-126.
- [10] GB/T 15038—2006 葡萄酒、果酒通用分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [11] ARNOUS A, MAKRIS D P, KEFALAS P. Correlation of pigment and flavanol content with antioxidant properties in selected aged regional wines from Greece [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2002, 15(6): 655-665.
- [12] BRAND-WILLIAMS W, CUVELIER M E, BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT - Food Science and Technology, 1995, 28(1): 25-30.
- [13] 张方方, 邓娟娟, 王茜, 等. 甘露糖蛋白对‘赤霞珠’干红葡萄酒颜色的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2018(2): 17-21.
- [14] 朱娟娟, 郑少阳, 李炎杰, 等. 不同酿酒酵母对脐橙果酒发酵特性的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(5): 870-875.
- [15] 王福荣. 酿酒分析与检验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005, 118-120.
- [16] 匡钰, 黄和, 王玲. 菠萝果酒酵母筛选及发酵性能测试[J]. 食品科技, 2012, 37(3): 6-10; 15.
- [17] 李运奎, 韩富, 张予林, 等. 基于 CIELAB 色空间的红葡萄酒颜色直观表征[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 296-301.
- [18] 王宏, 陈晓艺, 张军翔. 贺兰山东麓年轻红葡萄酒的 CIELab 颜色空间特征[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 20-23.
- [19] 梁娜娜, 韩深, 何非, 等. 几种葡萄酒过程中花色苷组成与 CIELab 参数的相关分析[J]. 中国酿造, 2014, 33(1): 48-55.
- [20] 陈健敏, 黄子尧, 黄玮玥, 等. 2 种品牌不同价格葡萄酒中酚类物质及其抗氧化特性[J]. 南昌大学学报(工科版), 2019, 41(2): 113-119.
- [21] NAGEL C W, WULF L W. Changes in the anthocyanins flavonoids and hydroxycinnamic acid esters during fermentation and aging of Merlot and Cabernet Sauvignon [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1979, 30(2): 111-116.
- [22] 郝瑞颖, 王肇悦, 张博润, 等. 葡萄酒中酿酒酵母产生的重要香气化合物及其代谢调控[J]. 中国食品学报, 2012, 12(11): 121-127.
- [23] 刘丽媛, 刘延琳, 李华. 葡萄酒香气化学研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 310-316.