

李金洋, 马晓燕, 杨彭程, 等. 不同酵母菌种对霞多丽葡萄酒中氨基酸和挥发性化合物含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(10): 2068-2080.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.020

不同酵母菌种对霞多丽葡萄酒中氨基酸和挥发性化合物含量的影响

李金洋¹, 马晓燕¹, 杨彭程², 李文超³, 马丹阳³, 王振平¹, 李栋梅¹

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240; 3. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区管理委员会, 宁夏 银川 750004)

摘要: 酵母菌种是影响葡萄酒质量的重要因素, 本研究以 CH9、CHD 和 VL2 3 种酵母酿造的霞多丽葡萄酒为材料, 利用高效液相色谱法 (HPLC) 测定葡萄酒中氨基酸含量, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (HS-SPME-GC-MS) 测定挥发性化合物含量, 并采用偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 筛选差异代谢物。结果表明, 霞多丽葡萄酒经酵母发酵后, 葡萄酒中氨基酸总含量均呈下降趋势, 其中 VL2 酵母酿造的葡萄酒中氨基酸总含量显著低于 CH9 酵母和 CHD 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。苏氨酸、精氨酸、甘氨酸和丙氨酸可作为区分 CHD 酵母、CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的关键氨基酸。在挥发性化合物方面, CHD 酵母酿造的葡萄酒中挥发性化合物种类最多, 但 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒中挥发性化合物总含量均显著高于 CHD 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。辛酸、芳樟醇、癸酸、十一酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯和癸酸乙酯是区分 CHD 酵母、CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的关键挥发性化合物。CHD 酵母酿造的葡萄酒中己酸乙酯和紫罗兰酮使其呈现出更突出的花香和果香特征。本研究结果为葡萄酒酿造过程中酵母菌种的选用提供了理论依据。

关键词: 葡萄酒; 酿酒酵母; 氨基酸; 挥发性化合物

中图分类号: TS261.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)10-2068-13

Effects of different yeast strains on the content of amino acids and volatile compounds in Chardonnay wine

LI Jinyang¹, MA Xiaoyan¹, YANG Pengcheng², LI Wenchao³, MA Danyang³, WANG Zhenping¹, LI Dongmei¹

(1. School of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Administrative Committee of Wine Industry Zone of Ningxia Helan Mountain's East Foothill, Yinchuan 750004, China)

Abstract: Yeast strain is an important factor affecting the quality of wine. This study utilized Chardonnay wines brewed with three types of yeast strains (CH9, CHD and VL2) as experimental materials. High-performance liquid chromatography

(HPLC) was used to determine the amino acid content in the wine, and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was employed to measure the content of volatile compounds. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was used to screen for differential metabolites. The results showed that after fermentation of Chardonnay grape juice by yeast, the total content of amino acids in the wine decreased. Among them,

收稿日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U20A2042); 财政部和农业农村部国家葡萄产业技术体系水分生理与节水栽培岗位科学家项目 (CARS-29-zp-3)

作者简介: 李金洋 (2000-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为葡萄逆境生理与分子生物学。 (E-mail) 3218886890@qq.com

通讯作者: 王振平, (E-mail) dr.wangzhp@163.com; 李栋梅, (E-mail) ldm2022068@nxu.edu.cn

the total content of amino acids in the wine brewed with VL2 yeast was significantly lower than that in wines brewed with CH9 yeast and CHD yeast ($P < 0.05$). Threonine, arginine, glycine and alanine can be used as key amino acids to distinguish wines brewed with CHD yeast, CH9 yeast and VL2 yeast. In terms of volatile compounds, the wine brewed with CHD yeast had the most types of volatile compounds, but the total content of volatile compounds in the wines brewed with CH9 yeast and VL2 yeast was significantly higher than that in the wine brewed with CHD yeast ($P < 0.05$). Caprylic acid, linalool, pelargonic acid, undecanoic acid ethyl ester, caprylic acid ethyl ester, phenethyl acetate, and pelargonic acid ethyl ester were key volatile compounds for distinguishing wines brewed with CHD yeast, CH9 yeast and VL2 yeast. The presence of ethyl hexanoate and ionone in the wine brewed with CHD yeast imparted more prominent floral and fruity characteristics. The results of this study provide a theoretical basis for the selection of yeast strains in the winemaking process.

Key words: wine; *Saccharomyces cerevisiae*; amino acids; volatile compounds

葡萄酒作为广受欢迎的酒精饮料,其品质特征主要取决于糖、酸、多酚、矿物质和挥发性香气化合物等多种成分的含量及组成^[1]。霞多丽(Chardonnay)是中国白葡萄酒酿造的主要葡萄品种,其香气特征受产地和酿造工艺的双重影响^[2-5]。研究结果表明,酵母菌种^[6]、发酵温度^[2]以及发酵和陈酿容器^[7-8]等工艺因素均会显著影响葡萄酒的香气。

酵母菌在葡萄酒酿造过程中发挥着重要作用,已有研究结果证实超过400种挥发性成分的产生与酵母菌种密切相关^[9]。不同酵母菌株的产醇、产酯、产酸及产香能力存在显著差异^[10-11],这主要是因为其对葡萄汁中氨基酸等氮源物质的代谢差异。酵母通过代谢支链氨基酸生成高级醇,进而转化为酯类和酸类物质,这些代谢产物为葡萄酒带来独特的香气^[12]。刘沛通等^[13]研究发现,提高赤霞珠葡萄汁中支链氨基酸初始浓度可促进酵母生长,加快发酵速率,显著改善葡萄酒香气品质。此外,发酵结束后,酵母自溶释放的氨基酸和多糖等成分还能进一步提升葡萄酒香气的复杂性和浓郁度^[14-15]。

目前,关于酵母对葡萄汁氨基酸利用及其对葡萄酒风味影响的研究较少。本研究拟选用CH9酵母、CHD酵母和VL2酵母酿造霞多丽葡萄酒,分析葡萄酒中的氨基酸含量和挥发性化合物含量,并评价其风味,以期对葡萄酒酿造过程中的酵母菌种选用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 葡萄品种

试验所用酿酒葡萄霞多丽(*Vitis vinifera* L. cv. Chardonnay)果实于2022年8月25日采自宁夏贺兰山东麓葡萄酒产区美贺庄园葡萄种植基地。选取新鲜、无病虫害、无霉烂且成熟度一致的果实进行发

酵。对葡萄汁基本理化指标进行测定,还原糖含量为237.04 g/L(以葡萄糖计),可滴定酸含量为6.90 g/L(以酒石酸计),pH值3.69。

1.2 仪器与试剂

液相色谱仪(型号UltiMate 3000,美国赛默飞公司产品),配备C18色谱柱(250.0 mm×4.6 mm, 5 μm);三重四极杆气相色谱质谱联用仪(型号GC-MS-TQ8040,日本岛津公司产品);固相微萃取头(型号50/30 μm DVB/CAR/PDMS,美国Supelco公司产品);电子天平(型号EX223ZH,美国奥豪斯公司产品);pH计(型号ST5000,美国奥豪斯公司产品)。

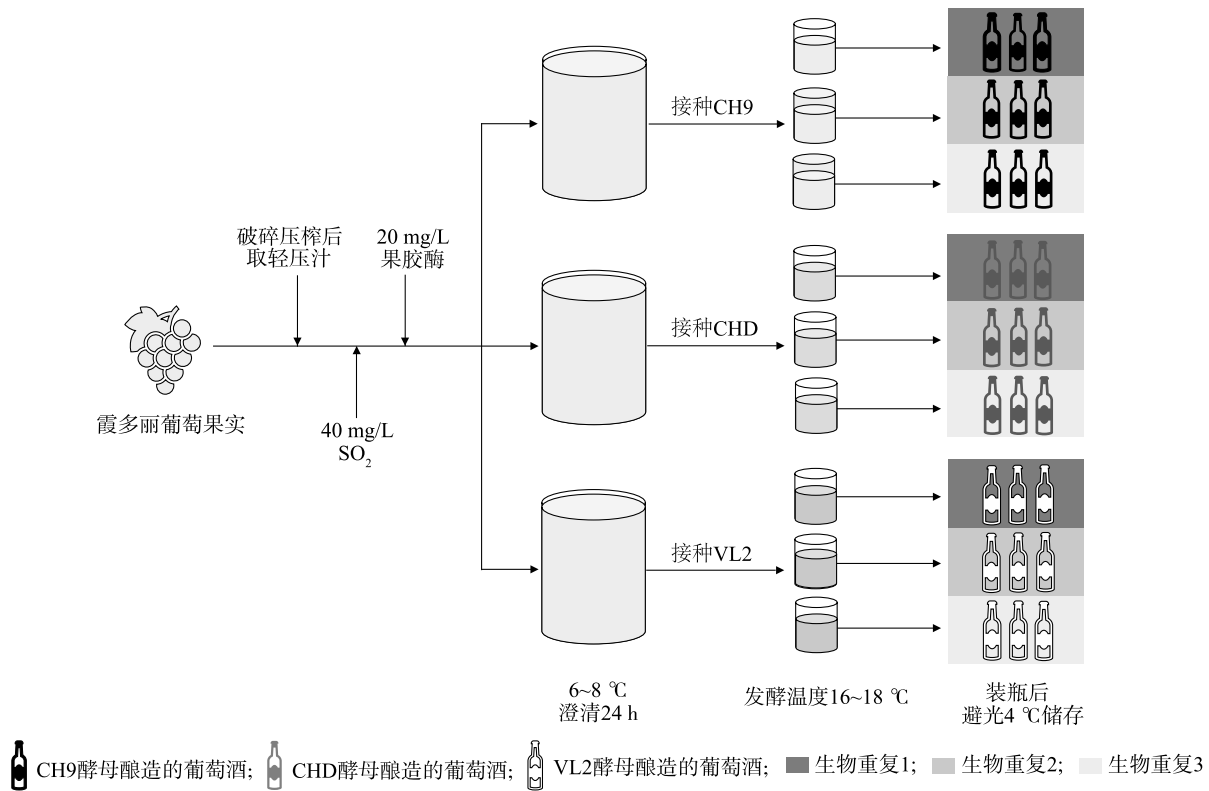
酿酒酵母CH9、VL2和果胶酶Lafazym CL(法国LAFFORT公司产品);酿酒酵母CHD(法国Lamothe-Abiet公司产品);氨基酸混合标准溶液由国家标准物质研究中心提供;2-辛醇(色谱纯)购于上海麦克林生化科技股份有限公司;氢氧化钠、浓硫酸、碘化钾、氯化钠(分析纯)购于国药集团化学试剂有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 霞多丽葡萄酒的酿造工艺 如图1所示,葡萄果实经筛选、除梗破碎后压榨取汁,加入40 mg/L SO₂和20 mg/L果胶酶,于6~8℃静置24 h。澄清葡萄汁转入不锈钢发酵罐中,分别接种CH9酵母、CHD酵母和VL2酵母干粉活化液,接种量均为200 mg/L,在16~18℃条件下进行发酵。当残留糖分含量<2 g/L时终止发酵,酒液转入不锈钢储存罐澄清6个月,装瓶并于4℃避光储存。每个处理设置3次重复。

1.3.2 测定指标及方法

1.3.2.1 基本理化指标测定 酒精度、残留糖分含量、总酸含量和挥发酸含量等指标均参照《葡萄酒、果酒通用分析方法》(GB/T 15038-2006)进行测定。



CH9、CHD、VL2:3种酿酒酵母。

图1 酿酒流程图

Fig.1 Schematic diagram of winemaking and experiment

1.3.2.2 氨基酸含量测定 参照王亚钦^[16]的方法,利用高效液相色谱法(HPLC)测定葡萄汁及葡萄酒中氨基酸含量。葡萄果实经液氮冷冻后,除梗去皮去籽,研磨成粉末,4 °C浸提4 h后,8 000 r/min离心10 min,收集上清液。取400 μL葡萄汁或葡萄酒,加入430 μL硼酸-硼砂缓冲液(1 mol/L,pH值9.0)和300 μL衍生试剂(含16.98 μL乙氧基亚甲基丙二酸二乙酯和283.02 μL甲醇),冰水浴超声衍生30 min,随后75 °C水浴1.5 h,使用C18色谱柱进行分析,流动相A为10 mmol/L Na₂HPO₄+Na₂B₄O₇混合溶液(pH值8.2),流动相B为45%甲醇+45%乙腈+10%水混合溶液,检测波长280 nm,流速1.5 mL/min,柱温45 °C,进样量5 μL。

1.3.2.3 挥发性化合物含量测定 参照问亚琴^[17]的方法,利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)测定葡萄酒中的挥发性化合物含量。取5 mL葡萄酒,加入1.0 g NaCl和5 μL 2-辛醇(4.11 g/L),60 °C、400 r/min条件下吸附30 min,经HP-INNOWax毛细管柱(30.00 m×

0.25 mm×0.25 μm)分离,氦气(纯度≥99.99%)载气流速1.0 mL/min,进样口温度250 °C,解析时间5 min,升温程序为:50 °C保持1 min,以3 °C/min升至220 °C保持5 min。质谱检测条件为EI离子源(70 eV),离子源温度230 °C,接口温度280 °C,扫描的质荷比(*m/z*)设为30~450。

1.3.2.4 气味活性值(OAV)计算 挥发性化合物通过NIST谱库检索定性,结合保留指数确认。挥发性化合物相对含量(*X*)和相对气味活性值(OAV)计算公式如下:

$$X = \frac{A_i \times M}{A \times V} \times f$$

$$OAV = \frac{X}{\text{阈值}}$$

式中,*A_i*为各个挥发性化合物的峰面积;*A*为内标物2-辛醇的峰面积;*M*为内标物质量(μg);*V*为葡萄酒体积(mL);*f*为内标物校正因子,*f*=1。

1.3.3 感官评价 参照韩雨岐等^[1]的方法,由10名专业品评员对葡萄酒进行感官评价,采用10分

制。评分项目包括外观、香气、口感和整体表现。

1.4 数据处理

利用 Excel 2021 进行数据计算,利用 SPSS 26 进行单因素方差分析和最小显著性差异分析(LSD) ($P<0.05$),利用 SIMCA 14.1 进行偏最小二乘判别分析(PLS-DA)和变量投影重要性值(VIP),利用 Origin 2024 绘制图片。

2 结果与分析

2.1 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒基本理化指标的影响

如表 1 所示,CHD 酵母酿造的葡萄酒的酒精度显著高于 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄

表 1 霞多丽葡萄酒基本理化指标

Table 1 Basic physicochemical parameters of Chardonnay wine

酵母	酒精度 (%,体积百分比)	残留糖分 (g/L)	总酸 (g/L)	挥发酸 (g/L)	游离二氧化硫 (mg/L)	pH
CH9	14.13±0.06b	1.70±0.10b	5.44±0.05a	0.36±0.06a	27.00±1.00a	3.79±0.03b
CHD	14.57±0.15a	2.00±0.20a	5.30±0.22a	0.26±0.02b	30.00±2.00a	3.87±0.02a
VL2	13.40±0.10c	1.83±0.06ab	4.08±0.03b	0.34±0.04ab	27.00±2.00a	3.90±0.02a

同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 酿酒酵母对葡萄酒中氨基酸含量的影响

发酵过程中,葡萄汁中的氨基酸主要被酵母同化代谢,生成酯类、高级醇等挥发性香气物质^[18-19]。发酵结束后,酵母通过自溶作用会释放少量氨基酸。如表 2 所示,CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒中氨基酸总含量显著低于葡萄汁($P<0.05$)。其中,VL2 酵母酿造的葡萄酒中氨基酸总含量显著低于 CH9 酵母、CHD 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。

精氨酸为葡萄汁中含量最高的氨基酸。VL2 酵母酿造的葡萄酒中精氨酸含量显著低于 CH9 酵母、CHD 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。这可能是因为在葡萄汁发酵过程中酵母优先利用精氨酸^[20]。而在葡萄汁发酵过程中,脯氨酸通常不被酵母同化利用,且酵母菌代谢会生成脯氨酸并释放到酒中。CH9 酵母和 CHD 酵母酿造的葡萄酒中脯氨酸含量显著高于葡萄汁($P<0.05$),VL2 酵母酿造的葡萄酒中脯氨酸含量与葡萄汁相比无显著差异($P>0.05$)。

CH9 酿造的葡萄酒中精氨酸和苏氨酸含量均显著高于 CHD、VL2 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$),而甘氨酸含量显著低于 CHD、VL2 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。CHD 酵母酿造的葡萄酒中苯丙氨酸、异亮氨酸和半胱氨酸含量均显著低于 CH9、VL2

酒的残留糖分含量均低于 4.00 g/L,属于干型葡萄酒,其中 CHD 酵母酿造的葡萄酒的残留糖分含量最高,CH9 酵母酿造的葡萄酒的残留糖分含量最低。VL2 酵母酿造的葡萄酒的总酸含量显著低于 CH9 酵母和 CHD 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$),CHD 酵母酿造的葡萄酒的挥发酸含量显著低于 CH9 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$),这对于白葡萄酒品质具有积极影响。CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒的游离二氧化硫含量无显著差异($P>0.05$)。CH9 酵母酿造的葡萄酒的 pH 值显著低于 CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。综上所述,CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒均符合《葡萄酒》(GB/T 15037-2006)的标准。

酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$),而组氨酸、谷氨酸、丝氨酸和丙氨酸含量均显著高于 CH9、VL2 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。VL2 酵母酿造的葡萄酒中精氨酸、组氨酸、苏氨酸和脯氨酸含量均显著低于 CH9、CHD 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$),而天冬氨酸、赖氨酸和半胱氨酸含量均显著高于 CH9、CHD 酵母酿造的葡萄酒($P<0.05$)。3 种酵母酿造的葡萄酒中亮氨酸含量无显著差异($P>0.05$)。综上,不同酵母菌种对葡萄酒中氨基酸含量的影响显著,而氨基酸含量的差异又赋予了葡萄酒独特的风味^[21-22]。

2.3 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中挥发性化合物含量的影响

利用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对霞多丽葡萄酒的香气物质含量进行分析。如表 3 所示,共鉴定出 53 种挥发性化合物,可分为 5 大类:酯类(21 种)、醇类(14 种)、酸类(7 种)、醛酮及萜烯类(9 种)、其他类(2 种)。如图 2 所示,从 CH9 酵母、CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒中分别检测出 43、48 和 44 种挥发性化合物。如图 3 所示,CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒挥发性化合物总含量显著高于 CHD 酵母酿造的葡萄酒。

表2 霞多丽葡萄汁和葡萄酒中氨基酸含量

Table 2 The amino acid content in Chardonnay grape juice and wine

氨基酸	葡萄汁	CH9	CHD	VL2
精氨酸*(mg/L)	740.23±3.15a	365.44±6.70b	297.10±12.75c	223.84±1.37d
组氨酸(mg/L)	154.65±9.46a	88.14±4.54c	116.73±3.87b	62.51±0.66d
谷氨酸(mg/L)	108.69±0.30b	90.60±3.14c	121.37±5.55a	87.23±1.35c
苏氨酸*(mg/L)	95.10±2.89a	80.68±3.68b	62.60±2.84c	48.05±2.23d
丝氨酸(mg/L)	85.24±1.86a	50.69±4.38c	57.71±2.20b	49.52±0.25c
丙氨酸*(mg/L)	81.43±9.84d	151.92±3.75b	225.54±24.43a	168.66±2.02b
苯丙氨酸(mg/L)	36.22±0.44c	75.76±2.37a	55.59±4.34b	76.58±0.25a
亮氨酸(mg/L)	26.28±7.40a	25.05±1.32a	23.61±0.72a	26.29±0.15a
天冬氨酸(mg/L)	22.88±0.08c	26.02±2.85b	26.23±1.26b	39.49±0.87a
脯氨酸(mg/L)	19.20±0.43b	30.48±3.91a	28.84±0.91a	16.48±0.67b
甘氨酸*(mg/L)	10.62±0.14c	44.27±2.99b	53.09±1.77a	50.67±0.26a
异亮氨酸(mg/L)	2.56±0.03c	26.70±1.67a	19.92±1.54b	27.64±0.05a
赖氨酸(mg/L)	2.31±0.14c	16.42±2.31b	11.73±2.22b	47.26±4.48a
半胱氨酸(mg/L)	0.71±0.01d	3.97±0.42b	2.15±0.26c	9.79±0.93a
氨基酸总含量(mg/L)	1 386.11±22.82a	1 076.15±35.81b	1 102.22±56.69b	934.01±5.54c

CH9;CH9 酵母酿造的葡萄酒;CHD;CHD 酵母酿造的葡萄酒;VL2;VL2 酵母酿造的葡萄酒。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);*: 该化合物变量投影重要性值(VIP) >1 。

表3 霞多丽葡萄酒中挥发性化合物含量

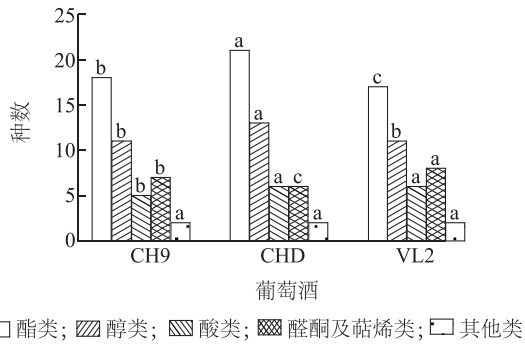
Table 3 The content of volatile compounds in Chardonnay wine

编号	化合物	CAS号	阈值 ^[23-28] ($\mu\text{g/L}$)	香气描述	CH9 ($\mu\text{g/L}$)	CHD ($\mu\text{g/L}$)	VL2 ($\mu\text{g/L}$)
酯类	A1 乙酸乙酯	141-78-6	7 500.00	果香、甜香	440.18±24.03b	161.58±12.42c	936.64±73.74a
	A2 乙酸异戊酯	123-92-2	30.00	果香、香蕉味	224.99±14.95b	553.00±48.01a	223.95±13.89b
	A3 乙酸己酯	142-92-7	1 500.00	苹果味、梨味	19.53±1.82b	71.58±2.86a	-
	A4 乙酸苯乙酯*	103-45-7	250.00	花香、果香、木香	324.26±18.07a	243.67±18.86b	262.89±7.76b
	A5 丁酸乙酯	105-54-4	20.00	酸果香、草莓味、果香	15.63±2.11b	13.52±1.82b	31.63±1.77a
	A6 3-羟基丁酸乙酯	5405-41-4	100.00	花香	14.42±1.39b	9.79±1.85c	29.38±2.13a
	A7 异戊酸乙酯	108-64-5	3.00	香蕉味、甜果味	-	4.15±2.25	-
	A8 己酸乙酯	123-66-0	5.00	草莓味、青苹果味	301.53±13.63b	674.53±28.63a	151.21±13.58c
	A9 庚酸乙酯*	106-30-9	200.00	菠萝味、新鲜果香味	38.04±4.50b	5.56±1.34c	22.83±3.73a
	A10 辛酸乙酯*	106-32-1	580.00	热带水果味	3 254.65±101.96a	2 325.01±147.82b	1 110.13±28.31c
	A11 辛酸异戊酯	2035-99-6	125.00	清淡的果香、奶油味	84.59±11.71a	94.11±5.70a	51.58±3.90b
	A12 壬酸乙酯*	123-29-5	1 300.00	热带水果味	24.41±3.69a	7.85±1.95b	-
	A13 癸酸乙酯*	110-38-3	200.00	甜味、水果香	1 919.02±95.13a	1 555.02±113.87b	1 020.74±76.15c
	A14 癸酸异戊酯	2306-91-4	580.00	蜡香、奶油味、脂肪味	19.54±2.99b	31.54±4.44a	10.11±2.26c
	A15 乳酸乙酯	97-64-3	154 636.00	乳酪香、覆盆子味、优雅果香	475.85±37.27b	205.87±12.46c	735.41±17.15a
	A16 水杨酸甲酯	119-36-8	40.00	薄荷味	49.25±5.72a	24.33±3.58b	62.87±10.01a
	A17 十一酸乙酯*	627-90-7	1.10	椰子香	230.86±18.46a	145.90±19.90b	106.16±13.14c

续表3 Continued3

编号	化合物	CAS号	阈值 ^[23-28] ($\mu\text{g/L}$)	香气描述	CH9 ($\mu\text{g/L}$)	CHD ($\mu\text{g/L}$)	VL2 ($\mu\text{g/L}$)	
A18	琥珀酸二乙酯	123-25-1	6 000.00	葡萄味、果香、瓜香	488.18 \pm 32.76b	87.63 \pm 10.75c	1 341.27 \pm 48.10a	
A19	月桂酸乙酯*	106-33-2	1 500.00	花香、果香、肥皂味	-	50.54 \pm 6.38b	105.10 \pm 13.73a	
A20	棕榈酸甲酯	112-39-0	-	-	-	19.96 \pm 1.31	-	
A21	棕榈酸乙酯*	628-97-7	1 500.00	腐败水果味	24.41 \pm 1.41a	8.54 \pm 0.69c	13.15 \pm 1.13b	
醇类	B1	丙醇*	71-23-8	50 000.00	清新醇香	1 432.97 \pm 65.47c	1 970.71 \pm 154.59b	2 505.96 \pm 83.71a
B2	丁醇	71-36-3	150 000.00	草药味、醇味	63.44 \pm 4.32a	12.10 \pm 2.36b	67.47 \pm 3.57a	
B3	异丁醇	78-83-1	40 000.00	杂醇香	167.89 \pm 13.85a	152.49 \pm 11.36a	151.14 \pm 8.19a	
B4	2,3-丁二醇	513-85-9	120 000.00	黄油味、乳酪味	305.26 \pm 20.48b	85.58 \pm 5.10c	356.07 \pm 22.38a	
B5	异戊醇*	123-51-3	30 000.00	刺激味、苦杏仁味	4 263.48 \pm 191.71c	5 264.53 \pm 342.85b	6 832.27 \pm 276.56a	
B6	3-甲基-1-戊醇	589-35-5	500.00	杂醇油味、可味、青果味、威士忌味	8.10 \pm 0.37b	27.57 \pm 1.87a	9.13 \pm 0.69b	
B7	正己醇*	111-27-3	1 100.00	生青味	180.57 \pm 8.98b	209.05 \pm 20.21b	284.26 \pm 15.52a	
B8	顺式-3-己烯醇	928-96-1	400.00	生青味	-	6.18 \pm 1.43	-	
B9	反式-3-己烯醇	928-97-2	70.00	青草味、脂香	-	8.18 \pm 1.00	-	
B10	庚醇	111-70-6	1 000.00	柠檬味、柑桔味	-	22.28 \pm 1.36	-	
B11	1-壬醇*	143-08-8	400.00	甜果香	5.93 \pm 0.91c	94.57 \pm 8.03a	37.15 \pm 3.01b	
B12	1-癸醇	112-30-1	1 000.00	柑橘花香、脂肪味	1.63 \pm 0.09b	-	11.44 \pm 1.56a	
B13	苯甲醇*	100-51-6	100 000.00	杏仁香、胡桃味	113.37 \pm 9.52a	77.75 \pm 6.00b	27.52 \pm 2.41c	
B14	苯乙醇	62-12-8	10 000.00	玫瑰香、花粉香	1 750.67 \pm 58.46a	861.02 \pm 39.48b	1 764.78 \pm 53.87a	
酸类	C1	异丁酸	79-31-2	2 300.00	黄油味、乳酪味、馊味	-	-	21.01 \pm 1.31
C2	己酸	142-62-1	420.00	乳酪味、腐臭味	497.64 \pm 23.69a	467.74 \pm 24.60a	357.56 \pm 9.99b	
C3	辛酸*	124-07-2	500.00	奶酪味、涩味、腐败味	2 857.30 \pm 89.88a	1 838.89 \pm 61.14b	1 311.29 \pm 36.62c	
C4	壬酸*	112-05-0	500.00	-	31.43 \pm 3.44c	45.19 \pm 4.74b	65.53 \pm 5.92a	
C5	癸酸*	334-48-5	1 000.00	酸腐味、脂肪味	1 298.15 \pm 51.57a	839.32 \pm 65.27b	742.91 \pm 86.50b	
C6	9-癸烯酸	14436-32-9	1 000.00	脂肪味	-	15.34 \pm 2.55	-	
C7	月桂酸	143-07-7	1 500.00	-	26.22 \pm 2.11b	27.78 \pm 3.09b	67.56 \pm 7.14a	
醛酮及萜烯类	D1	壬醛	124-19-6	15.00	生青味	39.96 \pm 2.49b	17.96 \pm 1.02c	106.70 \pm 2.36a
D2	癸醛	112-31-2	10.00	生青味	68.17 \pm 4.35a	30.03 \pm 3.87b	65.15 \pm 3.51a	
D3	糠醛*	98-01-1	1 400.00	熏香、果香	125.98 \pm 7.92a	18.26 \pm 1.35c	33.55 \pm 2.16b	
D4	大马士酮	23726-93-4	50.00	树皮味、桃罐头味、烤苹果味、话梅味	39.35 \pm 1.64a	8.94 \pm 2.10b	34.47 \pm 4.60a	
D5	紫罗兰酮	8013-90-9	0.09	悬钩子味、紫罗兰味、甜果味	-	14.72 \pm 1.78	-	
D6	橙花醇*	106-25-2	300.00	蔷薇花香	20.64 \pm 2.77a	-	15.55 \pm 1.78a	
D7	α -松油醇	98-55-5	330.00	樟脑味、辛辣味	29.26 \pm 3.11a	-	27.21 \pm 5.87a	
D8	香茅醇	106-22-9	100.00	柠檬味、柑桔香	-	-	5.55 \pm 0.60	
D9	芳樟醇*	78-70-6	25.00	花香、麝香	55.09 \pm 2.17a	12.65 \pm 1.98c	25.06 \pm 4.00b	
其他类	E1	2,4-二叔丁基苯酚*	96-76-4	200.00	石碳酸味	47.66 \pm 4.20a	40.08 \pm 3.29b	19.86 \pm 0.98c
E2	3-甲硫基丙醇	505-10-2	500.00	洋葱味、甜汤味	13.01 \pm 0.82b	11.74 \pm 1.35b	25.06 \pm 1.93a	

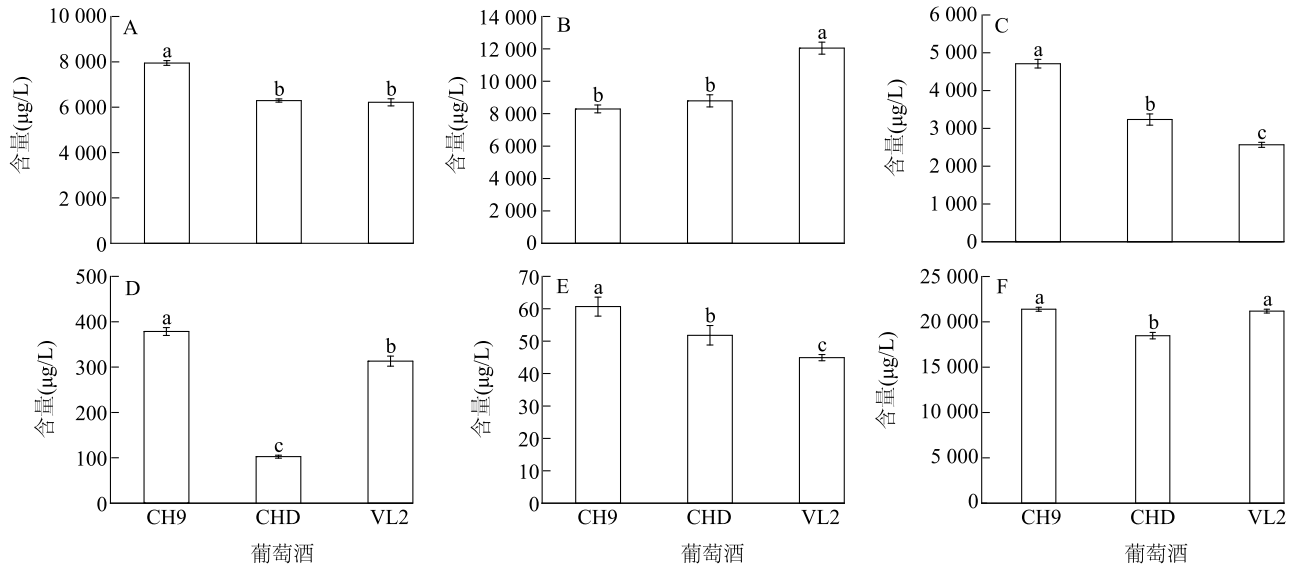
CH9:CH9 酵母酿造的葡萄酒;CHD:CHD 酵母酿造的葡萄酒;VL2:VL2 酵母酿造的葡萄酒。-:该香气成分未检测到*;该化合物变量投影重要性值(VIP)>1。同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。



CH9: CH9 酵母酿造的葡萄酒; CHD: CHD 酵母酿造的葡萄酒; VL2: VL2 酵母酿造的葡萄酒。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中挥发性化合物种类的影响

Fig.2 The impact of *Saccharomyces cerevisiae* on the diversity of volatile compounds in Chardonnay wine



A: 酯类; B: 醇类; C: 酸类; D: 醛酮及萜烯类; E: 其他类; F: 挥发性化合物。CH9: CH9 酵母酿造的葡萄酒; CHD: CHD 酵母酿造的葡萄酒; VL2: VL2 酵母酿造的葡萄酒。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中挥发性化合物含量的影响

Fig.3 The impact of *Saccharomyces cerevisiae* on the content of volatile compounds in Chardonnay wine

CHD 酵母、CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒中, 辛酸乙酯和癸酸乙酯在酯类化合物中占比最高, 对霞多丽葡萄酒的果香特征贡献显著^[25]。其中, CH9 酵母酿造的葡萄酒中辛酸乙酯和癸酸乙酯含量显著高于 CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。CHD 酵母酿造的葡萄酒中己酸乙酯和乙酸异戊酯含量显著高于 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。VL2 酵母酿造的葡萄酒中琥珀酸二乙酯和乙酸乙酯含量显著高于 CHD 酵母

和 CH9 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。

2.3.1 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中酯类化合物的影响 酯类化合物赋予葡萄酒果香、花香和甜香等特征, 对葡萄酒整体风味的形成具有重要作用^[29]。本研究在葡萄酒中共检测出 21 种酯类化合物, 其中 CHD 酵母酿造的葡萄酒有 21 种, CH9 酵母酿造的葡萄酒有 18 种, VL2 酵母酿造的葡萄酒有 17 种。CH9 酵母酿造的葡萄酒酯类总含量 ($7\,949.31\ \mu\text{g/L}$) 显著高于 CHD 酵母 ($6\,293.67\ \mu\text{g/L}$) 和 VL2 酵母 ($6\,215.06\ \mu\text{g/L}$) 酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。Balmaseda 等^[30] 研究发现, 在葡萄酒酿造过程中添加 CH9 酵母产生的酒泥可促进酯类化合物的生成。

和 CH9 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。

2.3.2 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中醇类化合物的影响 醇类化合物在葡萄酒中含量最为丰富。本研究中, CHD 酵母酿造的葡萄酒含有 13 种醇类化合物, CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒均含有 11 种醇类化合物。VL2 酵母酿造的葡萄酒中醇类化合物含量 ($12\,047.19\ \mu\text{g/L}$) 显著高于 CHD 酵母 ($8\,792.01\ \mu\text{g/L}$) 和 CH9 酵母 ($8\,293.34\ \mu\text{g/L}$) 酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。研究结果表明, 异丁醇和异戊醇是影响

葡萄酒香气的重要化合物^[31-32]。CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒中异戊醇在醇类化合物中的占比分别为 51.41%、59.88%和 56.71%,异戊醇为葡萄酒中醇类化合物的主要组成成分。

2.3.3 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中酸类化合物的影响 酸类化合物是酵母的代谢产物,能够抑制芳香族化合物的水解,脂肪酸是其主要组成成分^[15]。本研究中,CH9 酵母酿造的葡萄酒中含有 5 种酸类化合物,CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒中均含有 6 种酸类化合物。CH9 酵母酿造的葡萄酒中酸类化合物含量(4 710.74 $\mu\text{g/L}$)显著高于 CHD 酵母(3 234.26 $\mu\text{g/L}$)和 VL2 酵母(2 565.86 $\mu\text{g/L}$)酿造的葡萄酒($P<0.05$)。除壬酸外,其他酸类化合物均为脂肪酸,是合成脂肪酸乙酯的必要前体物质。低浓度时,这些酸类化合物呈现奶酪和奶油香气,但浓度过高时,这些酸类化合物会产生腐臭、油腻或汗味等不良气味^[33]。

2.3.4 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中醛酮类和萜烯类化合物的影响 在酶催化下,氨基酸代谢生成醛酮类化合物^[34]。萜烯类化合物在葡萄酒中的含量较低,但对葡萄酒的香气特征具有重要作用^[35]。VL2 酵母酿造的葡萄酒中含有 8 种醛酮类和萜烯类化合物,CH9 酵母酿造的葡萄酒中含有 7 种醛酮类和萜烯类化合物,CHD 酵母酿造的葡萄酒中含有 6 种醛酮类和萜烯类化合物。CH9 酵母酿造的葡萄酒中醛酮类和萜烯类化合物(378.45 $\mu\text{g/L}$)显著高于 VL2 酵母(313.23 $\mu\text{g/L}$)和 CHD 酵母(102.56 $\mu\text{g/L}$)酿造的葡萄酒($P<0.05$)。壬醛、糠醛和萜烯类化合物芳樟醇增强了 CH9 酵母酿造的葡萄酒的花香和果香;癸醛和大马士酮则增强了 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的果香和花香。紫罗兰酮为 CH9 酵母酿造的葡萄酒特有的醛酮类化合物,赋予葡萄酒紫罗兰香气。香茅醇为 VL2 酵母酿造的葡萄酒特有的萜烯类化合物,Wang 等^[36]采用非酿酒酵母和 VL2 酵母对龙眼葡萄进行顺序发酵,在所得葡萄酒中检测到香茅醇,该化合物可为葡萄酒带来青柠檬香气。

2.3.5 酿酒酵母对霞多丽葡萄酒中其他类化合物的影响 3 种酵母酿制的葡萄酒中均检测到 2 种其他类香气成分,包括 2,4-二叔丁基苯酚和 3-甲硫基丙醇。

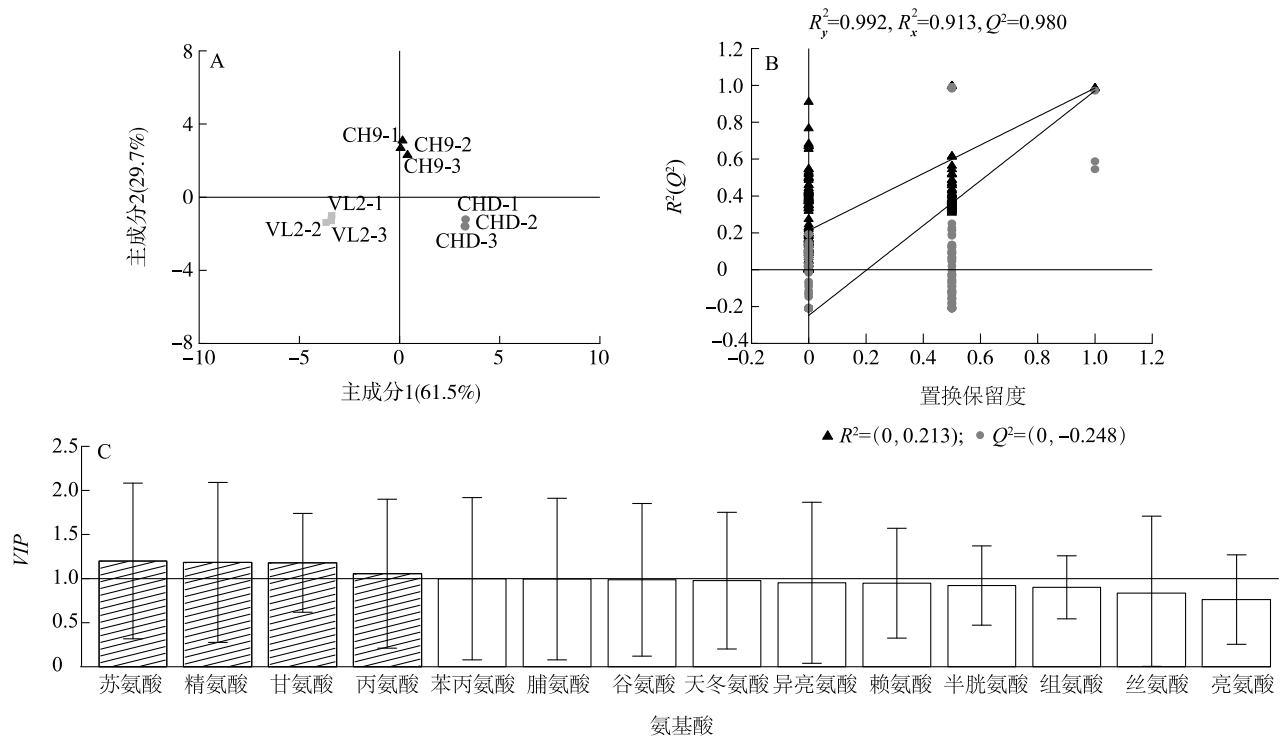
2.4 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒中差异性代谢物

以 CH9 酵母、CHD 酵母、VL2 酵母酿造的葡萄酒作为自变量,14 种氨基酸含量作为因变量,建立偏最小二乘判别分析(PLS-DA)模型。如图 4 所示,第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 61.5%和 29.7%,累积贡献率达到 91.2%。模型因变量拟合指数 $R_y^2=0.992$,自变量拟合指数 $R_x^2=0.913$,模型预测指数 $Q^2=0.980$ 。 R^2 和 Q^2 均 >0.8 ,表示模型具有较高的解释和预测能力。经过 200 次置换检验, Q^2 回归线截距 <0 ,表明模型不存在过拟合。变量投影重要性值(VIP)可以用于筛选区分 CH9 酵母、CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒中的氨基酸标志物,苏氨酸、精氨酸、甘氨酸和丙氨酸 4 种氨基酸的 VIP 均 >1 ,表明这 4 种氨基酸可作为区分 3 种葡萄酒的特征性标志物。

如图 5 所示,PLS-DA 模型 $R_y^2=0.957$, $R_x^2=0.999$, $Q^2=0.997$,表明模型具有较高的解释能力和预测性能,且不存在过拟合现象,验证结果可靠。筛选出变量投影重要性值(VIP) >1 的关键挥发性化合物,包括糠醛(D3)、辛酸(C3)、芳樟醇(D9)、棕榈酸乙酯(A21)、癸酸(C5)、壬酸乙酯(A12)、十一酸乙酯(A17)、辛酸乙酯(A10)、月桂酸乙酯(A19)、丙醇(B1)、苯甲醇(B13)、庚酸乙酯(A9)、乙酸苯乙酯(A4)、癸酸乙酯(A13)、1-壬醇(B11)、异戊醇(B5)、2,4-二叔丁基苯酚(E1)、壬酸(C4)、橙花醇(D6)和正己醇(B7)。其中,辛酸、芳樟醇、癸酸、十一酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯和癸酸乙酯 7 种化合物的气味活性值(OAV) >1 ,这些物质不仅对葡萄酒整体香气具有直接贡献,同时也是区分 3 种酵母酿造的葡萄酒的关键差异成分。辛酸异戊酯、庚酸乙酯、壬酸乙酯、1-壬醇、异戊醇和 2,4-二叔丁基苯酚 6 种化合物的气味活性值(OAV)为 0.1~1.0。

2.5 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒香气轮廓与感官评价

根据气味特征将气味活性值(OAV) >0.1 的挥发性化合物分为果香、花香、甜香、脂肪香、植物香和化学香 6 类。如图 6 所示,CH9 酵母、CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的香气均以果香和花香为主,其次为植物香和脂肪香。其中,CHD 酵母酿造的葡萄酒的香气最优异,其果香化合物累计气味活性值分别是 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的



A: 3 种葡萄酒中氨基酸 PLS-DA 评分图; B: 置换检验图; C: 氨基酸标志物筛选图。CH9: CH9 酵母酿造的葡萄酒; CHD: CHD 酵母酿造的葡萄酒; VL2: VL2 酵母酿造的葡萄酒。PC1: 第一主成分 1; PC2: 第二主成分。 R_y^2 : 因变量拟合指数; R_x^2 : 自变量拟合指数; Q^2 : 模型预测指数。VIP: 变量投影重要性值。

图 4 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒中氨基酸的偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 结果

Fig.4 Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) of amino acids in Chardonnay wines brewed with three types of yeast strains

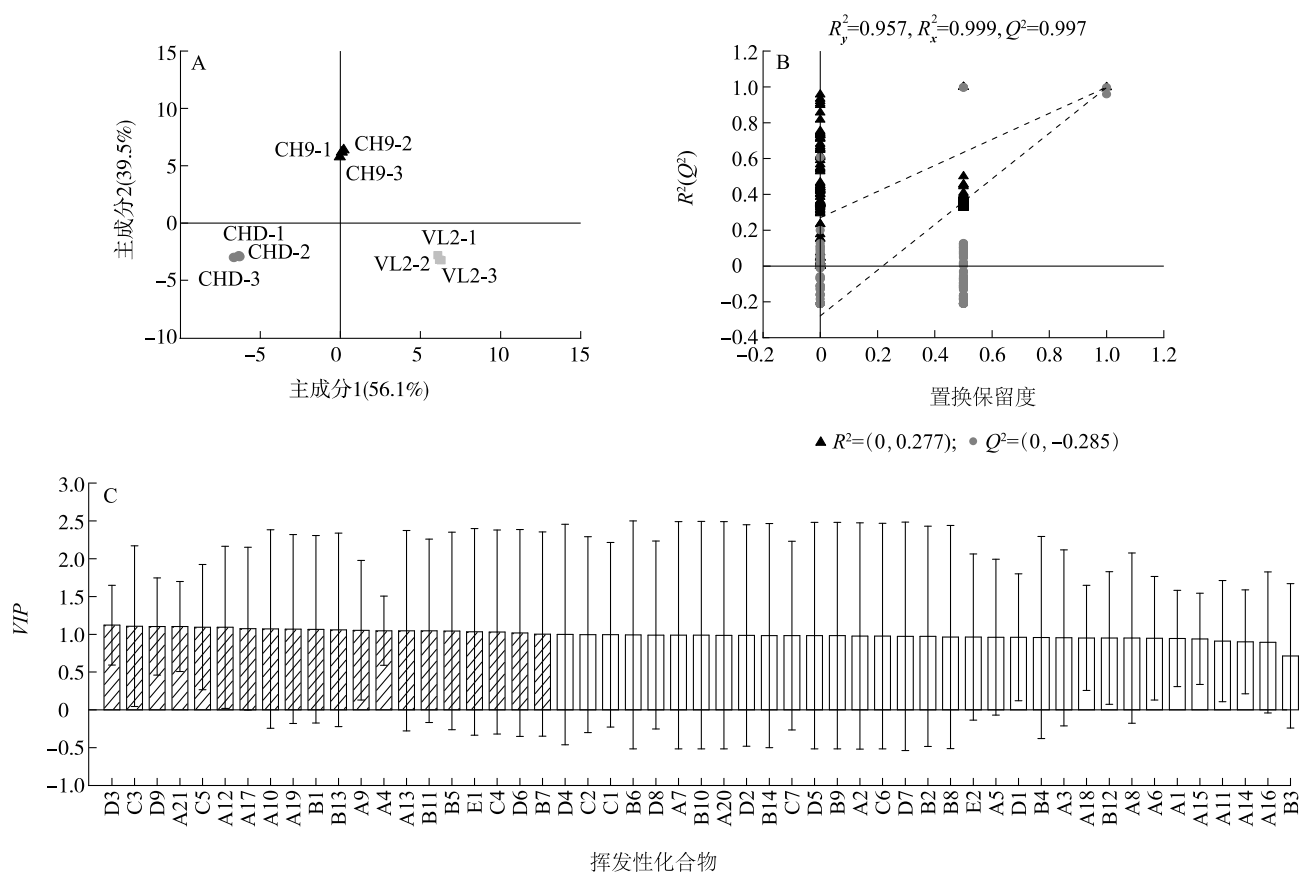
1.11 倍和 2.35 倍, 花香化合物累计气味活性值也显著高于 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒。己酸乙酯和紫罗兰酮是 CHD 酵母酿造的葡萄酒中贡献最大的果香和花香组分。在外观方面, CH9 酵母、CHD 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒均呈现典型的秸秆黄色, 酒体清澈透明; 在香气方面, CHD 酵母酿造的葡萄酒果香最为突出, 花香显著优于 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒, 与香气轮廓分析结果一致; 在口感方面, CHD 酵母酿造的葡萄酒具有更持久的余味和更佳的酸甜平衡度。综合评分显示, CHD 酵母酿造的葡萄酒显著优于 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒。

2.6 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒基础理化指标、氨基酸含量、挥发性化合物含量之间的相关性

本研究对葡萄酒基础理化指标与氨基酸总含量、挥发性化合物总含量之间的关系进行了相关性分析。如图 7A 所示, 酒精度与氨基酸总含量之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 这是因为在高酒精度环

境下, 酵母具有较高的代谢活性, 能够促进氨基酸积累。总酸含量与氨基酸总含量之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而残留糖分含量与挥发性化合物总含量之间呈显著负相关 ($P < 0.05$), 挥发酸含量与挥发性化合物含量之间呈显著正相关 ($P < 0.05$), 这是因为酵母在代谢糖分的过程中产生挥发性化合物、挥发酸和氨基酸^[37]。

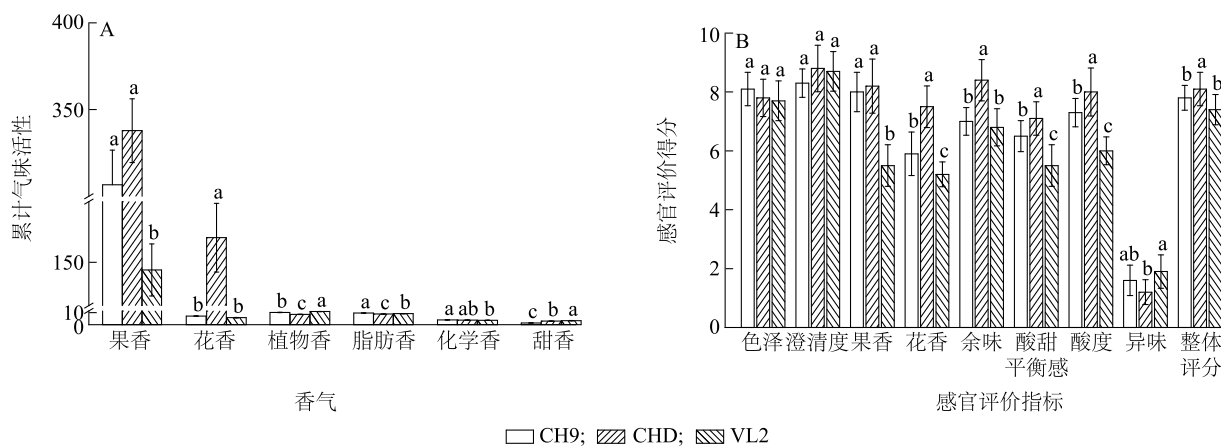
进一步对 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒中 7 种重要差异挥发性化合物含量与 14 种氨基酸含量进行相关性分析。如图 7B 所示, 葡萄酒中精氨酸、苏氨酸和脯氨酸含量与辛酸、辛酸乙酯、癸酸乙酯 3 种酯类化合物含量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。葡萄酒中辛酸乙酯含量与天冬氨酸、赖氨酸、半胱氨酸含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。张双梅等^[38]研究结果表明, 发酵前外源添加异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和缬氨酸均可增加桑葚酒中辛酸乙酯含量。表明这些氨基酸可能作为辛酸乙酯合成的前体物质被消耗。芳



A: 3 种葡萄酒中挥发性物质 PLS-DA 评分图; B: 置换检验图; C: 挥发性化合物标志物。CH9: CH9 酵母酿造的葡萄酒; CHD: CHD 酵母酿造的葡萄酒; VL2: VL2 酵母酿造的葡萄酒。PC1: 第一主成分; PC2: 第二主成分。 R_y^2 : 因变量拟合指数; R_x^2 : 自变量拟合指数; Q^2 : 模型预测指数。VIP: 变量投影重要性值; 挥发性化合物 A1~A21、B1~B14、C1~C7、D1~D9、E1、E2 见表 3。

图 5 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒中挥发性化合物的偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 结果

Fig.5 Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) of volatile compounds in Chardonnay wines brewed with three types of yeast strains

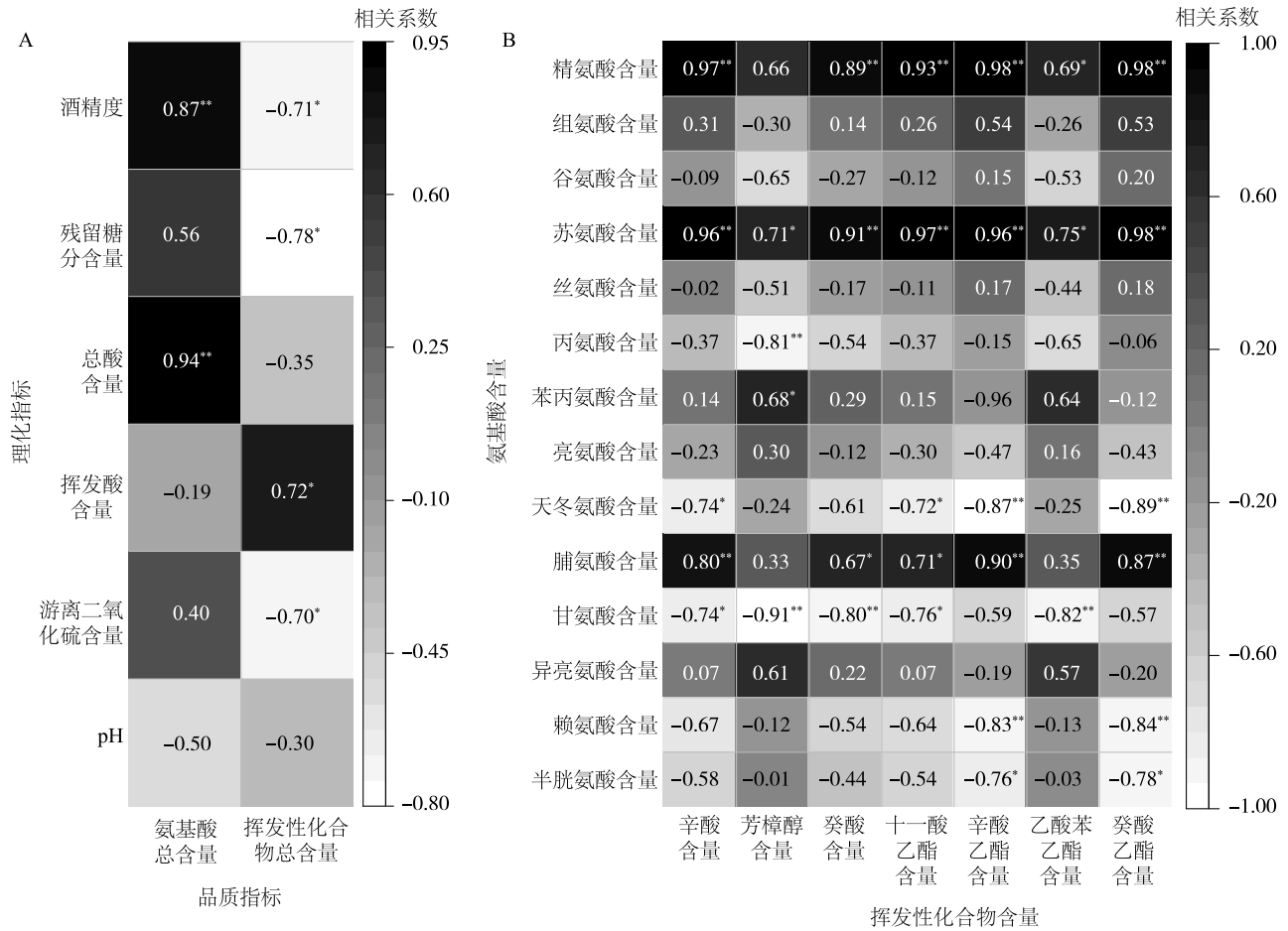


A: 3 种葡萄酒香气轮廓图; B: 3 种葡萄酒感官评价雷达图。CH9: CH9 酵母酿造的葡萄酒; CHD: CHD 酵母酿造的葡萄酒; VL2: VL2 酵母酿造的葡萄酒。同一指标图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 3 种酿酒酵母酿造的霞多丽葡萄酒的香气轮廓和感官评价

Fig.6 The aroma profile and sensory evaluation of Chardonnay wines brewed with three types of yeast strains

樟醇含量与苏氨酸、苯丙氨酸含量均呈正相关，与丙氨酸、甘氨酸含量均呈负相关。



* 表示在 0.05 水平上呈显著相关；** 表示在 0.01 水平上呈极显著相关。

图 7 霞多丽葡萄酒基础理化指标、氨基酸含量、挥发性化合物含量之间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between the basic physicochemical parameters, amino acid content and volatile compound content in Chardonnay wine

3 结论

本研究结果表明,霞多丽葡萄汁经酵母发酵后,葡萄酒中氨基酸总含量均呈下降趋势,其中 VL2 酵母酿造的葡萄酒中氨基酸总含量显著低于 CH9 酵母和 CHD 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。苏氨酸、精氨酸、甘氨酸和丙氨酸可作为区分 CHD 酵母、CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的关键氨基酸。在挥发性化合物方面,CHD 酵母酿造的葡萄酒挥发性化合物种类最多,但 CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒挥发性化合物总含量均显著高于 CHD 酵母酿造的葡萄酒 ($P < 0.05$)。辛酸、芳樟醇、癸酸、十一酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯和癸酸乙酯是区分

CHD 酵母、CH9 酵母和 VL2 酵母酿造的葡萄酒的关键挥发性化合物。CHD 酵母酿造的葡萄酒中己酸乙酯和紫罗兰酮使其呈现出更突出的花香和果香特征。

研究发现,发酵过程中氨基酸含量与挥发性化合物含量存在相关性,但二者并非简单的线性关系^[39]。且随着酿造时间的延长,葡萄酒中氨基酸含量和挥发性化合物含量呈现动态变化^[40]。关于酵母调控葡萄酒中氨基酸代谢与香气形成的分子机制较为复杂,仍需开展更深入的系统研究。

参考文献:

[1] 韩雨岐,王建峰,关茹文,等. 苯并噻二唑施用对霞多丽葡萄和

- 葡萄酒香气物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 58-67.
- [2] 靳国杰, 李爱华, 刘浩, 等. 发酵温度对霞多丽干白葡萄酒香气质量的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(10): 134-144.
- [3] 凌梦琪, 王诗, 时同华, 等. 碣石山产区不同白葡萄品种性状及葡萄酒风味品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 112-119.
- [4] 胡丽, 卢浩成, 胡娟, 等. 玛纳斯产区五个白色品种葡萄酒的香气分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2021(5): 1-7.
- [5] 王瑞. 贺兰山东麓不同地块‘霞多丽’葡萄与葡萄酒风味分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [6] 张鑫, 刘树文. 三种酵母酿造霞多丽干白葡萄酒的效果研究[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2012(2): 15-18.
- [7] GONZÁLEZ-MARCO A, JIMÉNEZ-MORENO N, ANCÍN-AZPI-LICUETA C. Concentration of volatile compounds in Chardonnay wine fermented in stainless steel tanks and oak barrels[J]. Food Chemistry, 2008, 108(1): 213-219.
- [8] GONZÁLEZ-CENTENO M R, CHIRA K, TEISSEDE P L. Use of oak wood during malolactic fermentation and ageing: impact on chardonnay wine character[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 460-468.
- [9] 杨莹, 徐艳文, 薛军侠, 等. 葡萄酒相关酵母的香气形成及香气特征[J]. 微生物学通报, 2007(4): 757-760.
- [10] 李景明, 于静, 吴继红, 等. 不同酵母发酵的赤霞珠干红葡萄酒香气成分研究[J]. 食品科学, 2009, 30(2): 185-189.
- [11] 张奎, 马云青, 冯方圆, 等. 两种酵母对不同品种干白葡萄酒香气的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2022(5): 73-79.
- [12] 陈思雨. 刺葡萄酒精发酵过程中氨基酸的动态变化及其与发酵香气成分之间的关联[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [13] 刘冲通, 王亚钦, 燕国梁. 复合添加支链氨基酸对‘赤霞珠’干红葡萄酒挥发性物质的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 174-182.
- [14] POZO-BAYÓN M Á, MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ A, PUEYO E, et al. Chemical and biochemical features involved in sparkling wine production: from a traditional to an improved winemaking technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(6/7): 289-299.
- [15] 李惠琳, 王婧, 许引虎, 等. 不同酵母多糖对霞多丽干白葡萄酒品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 142-153.
- [16] 王亚钦. 果穗曝光对酿酒葡萄氨基酸积累及葡萄酒发酵香气合成的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [17] 问亚琴. 酿酒葡萄果实游离态和糖苷结合态萜烯的积累及其转录调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [18] LILLY M, BAUER F F, STYGER G, et al. The effect of increased branched-chain amino acid transaminase activity in yeast on the production of higher alcohols and on the flavour profiles of wine and distillates[J]. FEMS Yeast Research, 2006, 6(5): 726-743.
- [19] 蒋成, 付云云, 杨云洁, 等. 不同酵母对无花果酒高级醇、氨基酸的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 147-153.
- [20] JIRANEK V, LANGRIDGE P, HENSCHKE P A. Amino acid and ammonium utilization by *Saccharomyces cerevisiae* wine yeasts from a chemically defined medium[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1995, 1(46): 75-83.
- [21] 沈颖, 刘晓艳, 白卫东, 等. 荔枝酒酿造过程中氨基酸的变化[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(5): 191-196.
- [22] VALERO E, MILLÁN C, ORTEGA J M, et al. Concentration of amino acids in wine after the end of fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2003, 83(8): 830-835.
- [23] CULLERE L, ESCUDERO A, CACHO J, et al. Gas chromatography-olfactometry and chemical quantitative study of the aroma of six premium quality spanish aged red wines[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(6): 1653-1660.
- [24] GUTH H. Quantitation and sensory studies of character impact odorants of different white wine varieties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(8): 3027-3032.
- [25] 陶永胜, 彭传涛. 中国霞多丽干白葡萄酒香气特征与成分关联分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 130-139.
- [26] MEDINA K, BOIDO E, FARIÑA L, et al. Increased flavour diversity of Chardonnay wines by spontaneous fermentation and co-fermentation with *Hanseniaspora vineae* [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2513-2521.
- [27] GEMERT L J V. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Zeist: Oliemans Punter & Patners BV, 2003.
- [28] 郭松年, 孙海燕, 房俊芳, 等. 气质联用仪对不同年份赤霞珠干红葡萄酒香气的测定分析[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(4): 101-107.
- [29] 马云青, 孙佳懿, 毕玉杰, 等. 不同酵母对干白葡萄酒发酵过程中香气变化的影响[J]. 中国酿造, 2021, 40(6): 113-118.
- [30] BALMASEDA A, MIOT-SERTIER C, LYTRA G, et al. Application of white wine lees for promoting lactic acid bacteria growth and malolactic fermentation in wine[J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 413: 110583.
- [31] DE-LA-FUENTE-BLANCO A, SÁENZ-NAVAJAS M, FERREIRA V. On the effects of higher alcohols on red wine aroma[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 107-114.
- [32] 商浥, 陈胜, 郝燕, 等. 民勤产区自然发酵与接种发酵霞多丽干白葡萄酒香气成分及感官品质的对比分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 317-323.
- [33] LONGO R, CAREW A, SAWYER S, et al. A review on the aroma composition of *Vitis vinifera* L. Pinot noir wines: origins and influencing factors[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(10): 1589-1604.
- [34] WANG Y Q, LI C S, ZHAO Y Q, et al. Novel insight into the formation mechanism of volatile flavor in Chinese fish sauce (Yu-lu) based on molecular sensory and metagenomics analyses[J]. Food Chemistry, 2020, 323: 126839.

- [35] 杨 婕,王玉华,米 兰,等. 耐热克鲁维酵母与酿酒酵母顺序接种发酵对霞多丽干白葡萄酒感官品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2019,45(18):144-154.
- [36] WANG X D, CHEN J W, GE X X, et al. Sequential fermentation with indigenous non-*Saccharomyces* yeasts and *Saccharomyces cerevisiae* for flavor and quality enhancement of Longyan dry white wine [J]. Food Bioscience,2023,55:102952.
- [37] FLEET G H. Wine yeasts for the future [J]. FEMS Yeast Research,2008,8(7):979-995.
- [38] 张双梅,郑莹媛,张秀艳. 外源添加单一氨基酸对桑葚酒风味品质的影响[J]. 中国酿造,2021,40(12):29-34.
- [39] FAIRBAIRN S, MCKINNON A, MUSARURWA H T, et al. The impact of single amino acids on growth and volatile aroma production by *Saccharomyces cerevisiae* strains [J]. Frontiers in Microbiology,2017,8:2554.
- [40] 邓星星,肖志欣,江 英. 陈酿期间无花果酒风味品质的变化 [J]. 中国酿造,2022,41(9):118-123.

(责任编辑:成纾寒)