余东亮, 刘云珍, 黄露露, 等. 河北产区马瑟兰干红葡萄酒非挥发性酚类物质组成及其挥发性风味特征研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 381−394. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070048
YU Dongliang, LIU Yunzhen, HUANG Lulu, et al. Composition of Non-volatile Phenolic Compounds and Volatile Flavor Characteristics of Marselan Dry Red Wine from the Hebei Region[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 381−394. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070048

· 分析检测 ·

河北产区马瑟兰干红葡萄酒非挥发性酚类物质组成及其挥发性风味特征研究

余东亮[1], 刘云珍[1], 黄露露[1], 张　建[1], 郑东许[1], 张　昂[2,*], 贾黎晖[1], 王高峰[1]
（1.秦皇岛金士通国际葡萄酒庄有限公司, 河北 秦皇岛 066600;
2.秦皇岛海关技术中心, 河北 秦皇岛 066000）

摘　要: 为深入解析河北产区不同产地马瑟兰干红葡萄酒中非挥发性酚类物质（单体酚、花色苷）和挥发性风味物质的典型特征，以产区内昌黎、怀来不同酒庄的市售代表性马瑟兰干红葡萄酒为研究对象，采用超高效液相色谱-串联质谱（Ultra-high Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry，UPLC-MS/MS）和顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（Headspace Solid-phase Micro Extraction Mass Spectrometry coupled with Gas Chromatography Mass Spectrometry，HS-SPME-GC-MS）技术，对样品的非挥发性酚类物质（单体酚、花色苷）及挥发性风味物质进行检测。结果表明，不同酒样的单体酚类物质存在显著差异（P<0.05），含量范围为 55.84~143.97 mg/L，其中没食子酸在 25 种单体酚中含量最高；不同酒样的花色苷含量也存在显著差异（P<0.05），含量范围为 1.99~34.11 mg/L，其中锦葵色素-3-半乳糖苷在 17 种花色苷中含量最高；综合单体酚和花色苷的检测结果表明，茅台凤凰庄园 2017 马瑟兰和 2018 金士马瑟兰精选级酒样中酚类物质更丰富。通过层次聚类分析（Hierarchical Cluster Analysis，HCA），单体酚和花色苷均可有效将河北产区内不同酒庄马瑟兰酒样区分开来。同时，挥发性成分共鉴定出 150 种，其中 9 种挥发性成分的香气活性值（Odor Activity Value，OAV）>1，对风味贡献显著，包括异戊酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯等，赋予河北马瑟兰葡萄酒甜美馥郁的花香和果香的典型特征；挥发性成分轮廓图、聚类热图以及正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis，OPLS-DA）显示不同酒庄马瑟兰酒样风味成分特征各异。在 OPLS-DA 中进一步筛选出 7 种可区分河北产区不同酒庄马瑟兰酒样的主要风味特征标志物（Variable Importance in Projection，VIP），其中苯乙醇、辛酸乙酯、己酸乙酯（VIP 值>2.64）为关键区分因子。本研究为阐明河北产区不同酒庄马瑟兰葡萄酒的典型风格特征提供了数据支撑，也为深入解析同一产区微域风土差异对葡萄酒典型风格特征的影响建立了方法学参考。

关键词: 马瑟兰干红葡萄酒, 非挥发性酚类物质, 挥发性风味物质, 风味特征, 多元统计分析
中图分类号: TS261.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0381−14
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070048
本文网刊:

Composition of Non-volatile Phenolic Compounds and Volatile Flavor Characteristics of Marselan Dry Red Wine from the Hebei Region

YU Dongliang[1], LIU Yunzhen[1], HUANG Lulu[1], ZHANG Jian[1], ZHENG Dongxu[1], ZHANG Ang[2,*], JIA Lihui[1], WANG Gaofeng[1]
（1.Chateau Kings International Co., Ltd., Qinhuangdao, Qinhuangdao 066600, China;
2.Technology Centre of Qinhuangdao Customs, Qinhuangdao 066000, China）

Abstract: To extensively analyze the typical characteristics of nonvolatile phenolic compounds (monomeric phenols and anthocyanins) and volatile flavor compounds in Marselan dry red wines from different subregions within the Hebei region,

收稿日期: 2025−07−04
基金项目: 秦皇岛金士通国际葡萄酒庄有限公司自主研发项目（JSGJ-YF-202205）。
作者简介: 余东亮（1982−）, 男, 博士, 研究方向: 葡萄与葡萄酒学, E-mail: jinshijiuzhuang@163.com。
*** 通信作者:** 张昂（1982−）, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品真实性及质量安全, E-mail: zhanganggrape@hotmail.com。

commercially representative Marselan wines from various wineries in Changli and Huailai were examined. Ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) and headspace solid-phase micro-extraction coupled with gas chromatography mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) techniques were employed to detect the non-volatile phenolic compounds (monomeric phenols, anthocyanins) and volatile flavor compounds in the samples. The results showed significant differences (P<0.05) in varieties of monomeric phenols (numbering 25) among different wine samples, with content ranging from 55.84 to 143.97 mg/L, where gallic acid had the highest content among the 25 monomeric phenolics. The content of anthocyanins (numbering 17) in different wine samples also differed significantly (P<0.05), ranging from 1.99 to 34.11 mg/L, where malvidin-3-galactoside had the highest content among the 17 anthocyanins. Comprehensive monomer phenol and anthocyanin detection revealed that samples from the 2017 Chateau Moutai Phoenix Marselan and 2018 Chateau Kings Selected Marselan wines were especially rich in nonvolatile phenolic compounds. Through hierarchical cluster analysis (HCA), monomeric phenols and anthocyanins could be used to effectively distinguish between Marselan wine samples from different wineries in Hebei province. Overall, 150 kinds of volatile components were identified. Of these, nine volatile components with OAV>1 contributed significantly to wine flavors. These included ethyl isovalerate, isoamyl acetate, and ethyl octanoate, which gave Hebei Marselan wine the typical characteristics of sweet and fragrant flowers and fruits. Volatile component profile, cluster thermogram, and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) highlighted differences in the characteristic flavor components in Marselan wines from different wineries. In OPLS-DA, seven main flavor characteristic markers (VIP values), which could be used to distinguish between Marselan wine samples from different wineries in Hebei province were further screened, among which phenylethanol, ethyl octanoate, and ethyl hexanoate (VIP values>2.64) were the key distinguishing factors. This study provides data to clarify the typical style characteristics of Marselan wines from different wineries in Hebei province and establishes a methodological reference for analyzing the influence of micro-regional terroir differences in the same producing area on the typical style characteristics of wines in depth.

Key words: Marselan dry red wine; non-volatile phenolic compounds; volatile flavor compounds; flavor characteristics; multivariate statistical analysis

马瑟兰是一种原产于法国的红色酿酒葡萄品种，由法国国家农业研究院于 1961 年以赤霞珠和歌海娜为亲本杂交选育而成，具有优良的抗病虫害特性。以其酿造的葡萄酒富含酚类物质[1]，香气特征通常表现为突出的果香与优雅的陈酿香气[2]。河北产区属温带大陆性季风气候，具有四季分明、光照充足、昼夜温差大等气候特点，地貌形态主要是平原、丘陵和山地等，土壤类型以褐土为主，粗沙含量大，排水性良好，且钾、钙元素含量丰富，十分适宜酿酒葡萄的生长，也是我国重要的葡萄酒知名产区[3]。马瑟兰自 2001 年引入河北产区种植以来，展现出优异的生态适应性和酿造潜力，被称为“中国葡萄酒的明日之星”[4−5]。目前，中国已成为全球马瑟兰种植面积位列第二的国家[6]，伴随着马瑟兰种植区域在中国的不断扩延，市场对高品质马瑟兰葡萄酒的需求也持续增长。

葡萄酒的品质主要由其非挥发性酚类物质和挥发性香气成分共同决定。葡萄酒中酚类物质（包括类黄酮与非类黄酮类）的组成复杂性直接影响其感官品质与保健功能[7−9]，围绕花色苷、黄烷醇及芪类等酚类物质的结构特性及其检测方法（如高效液相色谱）的研究，为葡萄酒的产区鉴别和品质调控提供了重要依据[10−12]。已有研究基于酚类物质组成成功实现了不同产区的区分，吕真真等[13] 对比新疆天山北麓、焉耆盆地与山东半岛赤霞珠葡萄酒的酚类物质发现，新疆产区的原花青素 B1、表儿茶素及总黄酮醇含量显著高于山东产区（P<0.05），并基于酚类物质的聚类分析实现了对山东与新疆样品的有效区分；宁夏贺兰山东麓子产区的马瑟兰干红葡萄酒虽在颜色参数上无显著差异，但其单体花色苷、黄烷醇类及羟基肉桂酸等酚类物质含量呈现显著风土特异性，基于酚类物质的判别分析可有效区分不同子产区酒样[14]。在挥发性香气方面，其种类、含量、感觉阈值以及它们之间的相互作用决定了葡萄酒的感官体验，是评价葡萄酒品质的关键要素[15]。目前，采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用（Headspace Solid-phase Micro Extraction Mass Spectrometry coupled with Gas Chromatography Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS）技术结合多元统计分析，已成为解析葡萄酒香气特征的有效手段[16]。Jurado 等[17] 采用 HS-SPME-GC-MS 技术，并结合主成分分析、线性判别分析和人工神经网络分析方法，确定了西班牙四种原产地保护葡萄酒的香气特征。Lan 等[1] 采用 GC-MS 及高效液相色谱-串联质谱技术对比分析了中国五个葡萄酒产区的马瑟兰葡萄酒的化学成分和感官特征，通过挥发性化合物的正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA），成功区分不同产区马瑟兰葡萄酒。然而，长期以来相关研究多集中于地域跨度大、生态条件差异明显的产区之间的对比，而对同一产区微域风土差异的葡萄酒酚类物质及挥发性风味物质差异分析仍较匮乏。因此，针对马瑟兰葡萄酒，深入解析同一产区不同微

域风土下的酚类物质及挥发性风味物质组成差异，进而挖掘其产区典型风格特征，具有重要的理论价值和现实意义。

基于此，本研究选取市场流通的 10 款河北产区不同酒庄的马瑟兰干红葡萄酒和 1 款赤霞珠干红葡萄酒样品为研究对象，综合运用超高效液相色谱-串联质谱（Ultra-high Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry，UPLC-MS/MS）与 HS-SPME-GC-MS 技术，全面解析其非挥发性酚类物质（单体酚、花色苷）及挥发性香气成分的组成特征，揭示不同酒庄马瑟兰干红葡萄酒的典型风格特征，旨在为河北产区马瑟兰干红葡萄酒的品质风格凝练及产区典型特征挖掘提供科学依据与方法学支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

10 款典型马瑟兰干红葡萄酒、1 款赤霞珠干红葡萄酒　取自河北产区不同酒庄，其中赤霞珠酒样为品种对照，酒样来源于金士酒庄、朗格斯酒庄、茅台凤凰庄园、怀古酒庄、贵族庄园、华夏酒庄和马丁酒庄，具体信息见表 1。所有酒样检测前均于 4 ℃ 条件下避光冷藏贮存；4-辛醇（纯度≥97.0%）、29 种单体酚标准品、18 种花色素单体标准品　德国 Sigma-Aldrich 公司；甲醇（色谱纯）　天津永晟精细化工有限公司；氯化钠（分析纯）　天津市汇杭化工科技有限公司。

表 1　葡萄酒样品信息

Table 1　Wine sample information

序号	编号	品种	产区	年份	酒样名称
1	JS2017	马瑟兰	昌黎	2017年	2017金士马瑟兰珍藏级
2	JS2018	马瑟兰	昌黎	2018年	2018金士马瑟兰珍藏级
3	JS2016	马瑟兰	昌黎	2016年	2016金士马瑟兰珍藏级
4	JS20172	马瑟兰	昌黎	2017年	2017金士马瑟兰精选级
5	JS20182	马瑟兰	昌黎	2018年	2018金士马瑟兰精选级
6	LS2018	马瑟兰	昌黎	2018年	朗格斯2018马瑟兰精选
7	MT2017	马瑟兰	昌黎	2017年	茅台凤凰庄园2017马瑟兰
8	HG2017	马瑟兰	怀来	2017年	怀谷2017马瑟兰
9	GZ2017	马瑟兰	怀来	2017年	贵族庄园2017马瑟兰
10	MD308	马瑟兰	怀来	2018年	马丁酒庄308马瑟兰
11	HX92	赤霞珠	昌黎	2018年	华夏92

GCMS-QP2020 NX 单四极杆型气相色谱质谱联用仪、SH-Rxi-5Sil MS 气相色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）、30-AD 液相色谱仪　日本岛津公司；固相微萃取手柄、65 μm PDMS/DVB 固相微萃取纤维头、15 mL 顶空瓶（配置硅胶/聚四氟乙烯隔垫和 15 mm 螺旋盖）　美国 Supelco 公司；ES35 B-Pro 磁力加热搅拌器　LabTech（莱伯泰科）有限公司；Triple QuadTM 4500 三重四极杆-线性离子阱复合质谱仪（配有电喷雾离子源、Turbo V 离子源和 Analyst 1.5 数据处理系统）　美国 AB Sciex 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　单体酚的测定　参照杨志伟等[18] 的方法，利用 UPLC-MS/MS 对单体酚进行测定。

1.2.1.1　葡萄酒样品前处理　取 1 mL 待测酒样用 10% 甲醇溶液（含 0.1% 甲酸）稀释 100 倍，26000 r/min 离心 5 min 后取上清液进行单体酚的测定，根据测定结果重新取样 1 mL 稀释至适当浓度重复离心，离心后取上清液至进样瓶待测。

1.2.1.2　色谱质谱条件　UPLC 条件：柱温为 30 ℃，进样体积 10 μL，流速 0.25 mL/min，C_{18} 色谱柱（2.1 mm×100 mm，1.7 μm）分离，根据单体酚性质确定流动相 A 为 0.1% 甲酸-水；流动相 B 为 0.1% 甲酸-乙腈。洗脱程序：0.00~3.00 min，5% B；3.00~6.00 min，30% B；6.00~9.00 min，50% B；9.00~12.00 min，70% B；12.00~17.00 min，5% B。质谱条件：电喷雾离子源，负离子模式；多反应监测；离子源温度 500 ℃；电喷雾电压−4500 V；气帘气压力 40 psi；碰撞气：Medium；雾化气压力 60 psi；辅助加热气压力 50 psi。

1.2.1.3　定性定量方法　单体酚的定性依据为秦皇岛海关技术中心葡萄酒实验室所建立的单体酚定性方法[18]。定量采用外标法，配制 29 种单体酚标准品混合标准工作液，分别在 0.00、0.001、0.010、0.020、0.050、0.100、0.200、0.500 mg/L 水平下测定，以目标化合物峰面积（y）对其相应质量浓度（x）绘制标准曲线，各单体酚的含量均以相应的单体酚标准品的含量计算。

1.2.2　花色苷的测定　参照金刚等[19] 的方法，利用 UPLC-MS/MS 对花色苷进行测定。

1.2.2.1　葡萄酒样品前处理　取 1 mL 干红葡萄酒样，用含 5% 甲醇的 1% 甲酸溶液稀释 500 倍，涡旋混合后吸取 1 mL 移至样品瓶，为减少目标物损失，未过滤膜。

1.2.2.2　色谱质谱条件　UPLC 条件：柱温 40 ℃，进样体积 30 μL，流速 0.25 mL/min，用 Phenyl-Hexyl 色谱柱（2.1 mm×150 mm，3.5 μm）分离，根据花色素单体性质确定流动相 A 为含 5% 甲醇的 1% 甲酸溶液，流动相 B 为 1% 甲酸-甲醇溶液。洗脱程序：0~3.1 min，0%~65% B；3.1~8.0 min，65% B；8.0~8.5 min，65%~100% B；8.5~12.5 min，100% B；12.5~13 min，100%~0% B；13~20 min，0% B。

MS 条件：电雾喷离子源，正离子模式；多反应监测；离子扫描范围 m/z 100~1000；雾化气压力 345 kPa；辅助气流速 10 L/min；干燥气温度 350 ℃；气帘气压力 30 psi；碰撞气 Medium；离子喷雾电压 5500 V；离子源温度 500 ℃。

1.2.2.3　定性定量方法　花色苷的定性依据为秦皇岛海关技术中心葡萄酒实验室所建立的花色苷定性方法[19]。定量采用外标法，配制 18 种花色苷标准品

的混合标准工作液，分别在 0.00、0.001、0.010、0.020、0.050、0.100、0.200、0.500 mg/L 8 个水平下测定，以目标化合物峰面积(y)对其相应质量浓度(x)绘制标准曲线，各花色苷的含量均以相应的花色苷标准品的含量计算。

1.2.3 挥发性化合物的测定 参照李叶凤[20]的方法，利用 HS-SPME-GC-MS 对挥发性化合物进行测定。

1.2.3.1 顶空-固相微萃取条件 准确量取 3 mL 待测葡萄酒样于装有磁力搅拌转子的 15 mL 顶空瓶中，加入 20%(即 0.6 g)的 NaCl，同时再加入 5 μL 4-辛醇内标溶液，即刻旋紧顶空瓶瓶盖。将装有待测酒样的顶空瓶置于磁力加热搅拌器工作台上，于 40 ℃ 恒温条件下平衡 15 min，然后将已活化好的 65 μm PDMS/DVB 固相微萃取纤维头插入顶空瓶内，注意调整好萃取纤维头与酒样之前的距离，避免接触到液面，于 40 ℃ 恒温条件下萃取 45 min。完成后取出萃取头立即插入 GC-MS 进样口解析 5 min，同时启动仪器进行数据采集。

1.2.3.2 色谱质谱条件 GC 条件：选用 SH-Rxi-5Sil MS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)；检测器及进样口温度分别为 230 ℃ 和 250 ℃；升温程序：40 ℃ 保持 3 min，以 2 ℃/min 升至 140 ℃，然后以 7.5 ℃/min 升至 270 ℃，保持 6 min；载气为高纯氦气(99.999%)；色谱柱流量为 1.78 mL/min，不分流进样[21]。

MS 条件：电子轰击离子源(EI)；电离能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；传输线温度 270 ℃；全扫描模式，质量扫描范围为 30~450 m/z。

1.2.3.3 香气化合物的定性定量 通过 GC-MS 分析所得的样品质谱图与 NIST 17 数据库进行比对分析，结合保留时间筛选出相似度>80% 的挥发性组分，再结合相关文献对谱图进行解析，进而确定酒样中的各个挥发性成分。采用内标法进行半定量分析，选取质量浓度为 0.822 mg/mL 的 4-辛醇为内标，通过公式计算酒样中各挥发性成分的含量，假定校正因子为 1，计算公式如下：

$$\text{挥发性成分含量}(\mu g/L)=\frac{f(\text{校正因子})\times\text{各挥发性组分峰面积}\times\text{内标物浓度}(mg/mL)\times10^6}{\text{内标物峰面积}}$$

计算酒样中各挥发性组分的香气活力值(OAV)，香气阈值和感官描述由文献 [21−23] 获得，计算公式如下：

$$\text{香气活力值}=\frac{\text{香气成分含量}(\mu g/L)}{\text{香气成分阈值}(\mu g/L)}$$

1.3 数据处理

使用 Origin 2021 软件绘制雷达图、聚类热图；SIMCA-P 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)，计算预测变量重要性投影 VIP 值；并结合 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)，将 $P<0.05$，VIP≥1 的化合物视为 OPLS 模型中最具影响力的香气标记物。

2 结果与分析

2.1 马瑟兰干红葡萄酒非挥发性酚类物质研究

2.1.1 单体酚含量与组成分析 酚类物质在葡萄酒感官评价中起着非常重要的作用，尤其是在颜色、收敛性、澄清度和稳定性等方面[24]。葡萄酒中的酚类化合物是其营养成分的重要来源，主要分为类黄酮类和非类黄酮类两大类[25]。在酒样中共检出 25 种单体酚类化合物(表 2)，其中类黄酮类化合物 14 种(黄酮类 6 种、黄烷醇类 8 种)，非类黄酮类 11 种(酚酸类 6 种、芪类物质 5 种)，并进一步对这 25 种单体酚进行了单因素方差分析。

由表 2 可知，11 款酒样中单体酚的种类和含量均存在显著性差异($P<0.05$)，其总量范围为 55.84~143.97 mg/L，茅台凤凰庄园 2017 单体酚总量最高(143.97 mg/L)，展现出较强的酚类物质潜力。(-)-表没食子儿茶素没食子酸酯和漆黄素仅在金士酒庄的 5 款酒样中检出，(-)-表儿茶素没食子酸酯仅在怀古 2017 和金士酒庄的 5 款酒样中检出，山柰酚仅在华夏 92 和金士酒庄的 5 款酒样中检出。这一分布特征表明，上述酚类物质可能与酒庄特有的栽培模式、酿造工艺以及陈酿条件有关。咖啡酸、没食子酸、槲皮素、杨梅素、(+)-儿茶素、(-)-表儿茶素、原花青素(B1、B2、C1)是 11 款酒样中的主要单体酚化合物。有研究表明新疆产区的马瑟兰葡萄酒中黄酮醇浓度较高(例如杨梅素-3-O-葡糖苷、槲皮素-3-O-半乳糖苷以及异鼠李素-3-O-葡糖苷等)，这表明来自不同产区葡萄酒中的酚类化合物可能受到气候条件的影响[1]。没食子酸在 9 款酒样中含量最高，其为葡萄酒提供抗氧化活性的同时，也贡献了重要的苦涩感与结构骨架，赋予酒体更佳的饱满度与复杂度[26]。朗格斯 2018 精选中含量最高的单体酚为咖啡酸，该物质除呈现辅色效应外，亦被报道对维持葡萄酒陈酿过程中的花果类香气具有积极作用[27]。马丁酒庄 308 中含量最高的则为原花青素 C1，这是一种具有强收敛性的低聚原花青素，其含量差异可能与葡萄原料(果实成熟度、健康度等)或酿造工艺密切相关。(-)-表没食子儿茶素没食子酸酯和(-)-表儿茶素没食子酸酯属于黄烷醇类物质，这类物质除了负责葡萄酒的涩味呈现[28]和支撑酒的“骨架感”[29]，还被认为是天然抗氧化剂之一，且具有神经保护与心血管保健等功能。漆黄素和山柰酚属于黄酮醇类物质，虽是葡萄酒中三大类黄酮物质中含量最少的一类，但其同样具有很强的功能性[30]。漆黄素对大脑健康、认知和记忆具有独特的影响，并展现出优异的抗衰老活性，其效果约为槲皮素的两倍[31]。山柰酚能够降低患癌风险，同时具有良好的抗菌活性和抗病毒等功能[32]。因此，金士酒庄酒样可能在健康功能性方面具备潜在优势，其功效价值有待进一步研究。

表 2　11 款葡萄酒中单体酚类化合物含量（mg/L）

Table 2　Contents of monophenolic compounds in 11 kinds of wine (mg/L)

中文名称	英文名称	类型	朗格斯2018精选	茅台凤凰2017	怀古2017	贵族庄园2017	华夏92	马丁308	2017金士马瑟兰橡木桶珍藏	2018金士马瑟兰橡木桶珍藏	2016金士马瑟兰橡木桶珍藏	2017金士马瑟兰橡木桶精选	2018金士马瑟兰橡木桶精选
顺式白藜芦醇	cis-resveratrol	芪类物质	0.07±0^{h}	0.57±0^{f}	1.11±0.01^{b}	0.72±0^{d}	1.3±0.01^{a}	0.42±0^{g}	0.43±0^{g}	0.69±0.05^{e}	0.83±0.01^{c}	0.59±0^{f}	0.57±0.01^{f}
桑色素	morin hydrate	黄酮类	0.92±0.03^{d}	0.73±0^{g}	1.16±0^{a}	1.07±0.01^{c}	1.12±0.01^{b}	0.76±0.01^{fg}	0.66±0.01^{h}	0.74±0.01^{g}	0.79±0.02^{f}	0.86±0^{e}	0.68±0.01^{h}
咖啡酸	caffeic acid	酚酸类	8.92±0.03^{a}	3.38±0.01^{h}	5.15±0.07^{f}	5.5±0.06^{d}	3.57±0.01^{g}	5.36±0.03^{e}	3.7±0.02^{g}	2.35±0.01^{i}	8.02±0.11^{b}	3.58±0.02^{g}	7.46±0.1^{c}
阿魏酸	ferulic acid	酚酸类	0.39±0.01^{a}	0.3±0^{b}	0.23±0^{e}	0.26±0^{cd}	0.16±0^{g}	0.26±0^{c}	0.14±0^{h}	0.14±0^{h}	0.25±0^{d}	0.13±0^{h}	0.2±0^{f}
(-)-表没食子儿茶素	(-)-epigallocatechin	黄烷醇	1.21±0.01^{i}	5.96±0.06^{e}	3.91±0.01^{g}	5.1±0.03^{f}	4.13±0.04^{g}	3.29±0.03^{h}	7.5±0.14^{d}	8.45±0.32^{c}	10.4±0^{a}	9.11±0.13^{b}	8.94±0.22^{b}
(-)-表没食子儿茶素没食子酸酯	(-)-epigallocatechin gallate	黄烷醇	–	–	–	–	–	–	0.22±0.01^{a}	0.04±0^{b}	0.04±0.01^{b}	0.03±0.01^{c}	0.01±0^{d}
(-)-表儿茶素没食子酸酯	(-)-epicatechin gallate	黄烷醇	–	–	0.08±0^{c}	–	–	–	0.51±0.04^{a}	0.09±0^{bc}	0.11±0.01^{b}	0.09±0.01^{bc}	0.04±0^{d}
没食子酸	gallic acid	酚酸类	7.91±0.03^{g}	32.45±0.07^{a}	24.85±0.35^{b}	22.85±0.35^{c}	23.35±0.21^{c}	11.85±0.21^{f}	19.5±0.57^{d}	17.95±0.21^{e}	19.9±0.57^{d}	17.85±0.07^{e}	23.55±0.21^{c}
虎杖苷	polydatin	芪类物质	0.03±0^{k}	0.55±0^{i}	1.07±0.07^{g}	0.72±0.01^{h}	1.46±0.01^{e}	0.43±0.02^{j}	1.27±0.01^{f}	2.27±0.07^{a}	2.18±0.05^{b}	1.72±0.03^{d}	1.81±0.04^{c}
葡萄素	viniferin	芪类物质	0.07±0^{cd}	0.05±0^{ef}	0.06±0de	0.05±0^{f}	0.03±0^{h}	0.12±0^{b}	0.04±0^{g}	0.07±0.01^{c}	0.06±0de	0.07±0.01^{cd}	0.14±0^{a}
原儿茶酸/3,4-二羟基苯甲酸	protocatechuate acid	酚酸类	0.37±0^{g}	2.3±0.03^{a}	1.18±0.01^{d}	0.45±0^{f}	2.35±0.06^{a}	0.43±0^{fg}	1.2±0.01^{d}	1.58±0.07^{c}	1.16±0.02^{d}	0.92±0.01^{e}	2.11±0.02^{b}
槲皮素	quercetin	黄酮醇	6.69±0.1^{e}	8.26±0.18^{d}	5.84±0.07^{f}	5.14±0.06^{g}	11.8±0.14^{b}	11.4±0.14^{b}	5.75±0.07^{f}	14±0.14^{a}	6.06±0.1^{f}	10.33±0.52^{c}	4.86±0.11^{g}
槲皮素-3-O-葡萄糖苷	quercetin-3-glucoside	黄酮醇	0.34±0^{g}	0.25±0^{h}	1.98±0.03^{b}	2.01±0.03^{b}	1.78±0.02^{c}	0.28±0^{gh}	1.35±0.11^{e}	0.6±0.02^{f}	1.44±0.01^{d}	2.27±0.01^{a}	0.53±0^{f}
山柰酚	kaemperol	黄酮醇	–	–	–	–	0.12±0^{c}	–	0.1±0.01^{e}	0.2±0.03^{b}	0.11±0^{c}	0.23±0^{a}	0.03±0^{d}
对香豆酸	trans-p-coumaric acid	酚酸类	4.95±0.06^{a}	3.12±0.01^{d}	1.8±0.04^{gh}	2.23±0.1^{f}	2.61±0.03^{e}	2.6±0.1^{e}	1.69±0.05^{hi}	1.66±0.04^{i}	3.71±0.04^{b}	1.81±0.04^{g}	3.46±0^{c}
漆黄素	fisetin	黄酮醇	–	–	–	–	–	–	0.02±0^{b}	0.02±0.01^{b}	0.02±0^{b}	0.07±0^{a}	0.02±0^{b}
白皮杉醇	piceatannol	芪类物质	0.22±0.03^{b}	0.18±0^{c}	0.09±0^{f}	0.09±0^{f}	0.1±0^{f}	0.27±0^{a}	0.06±0.01^{g}	0.15±0.01^{de}	0.15±0.01^{e}	0.17±0^{cd}	0.06±0^{g}
杨梅素	myricetin	黄酮醇	6.51±0.05^{e}	9.19±0.14^{d}	14.8±0.28^{a}	12.2±0.14^{b}	11.2±0.28^{c}	6.99±0.11^{e}	12.25±0.35^{b}	9.87±0.47^{d}	15.6±0.57^{a}	12.8±0.57^{b}	10.13±0.81^{d}
香草酸	vanillic acid	酚酸类	1.32±0^{d}	1.61±0.07^{c}	1.31±0.02^{d}	1.4±0.04^{d}	2.57±0.04^{a}	1.74±0.06^{b}	0.88±0.08^{f}	1.09±0.02^{e}	0.63±0.01^{g}	0.83±0^{f}	0.91±0.02^{f}
白藜芦醇	resveratrol	芪类物质	0.43±0^{g}	1.43±0.06^{a}	0.89±0.05^{d}	0.76±0.05^{ef}	1.02±0.01^{c}	1.22±0^{b}	0.39±0.02^{g}	0.92±0.05^{cd}	0.87±0.02^{de}	0.75±0.11^{f}	0.83±0.03^{def}
(+)-儿茶素	(+)-catechin	黄烷醇	7.46±0.2^{f}	14.8±0.28^{cd}	13.35±0.07^{de}	14.35±0.21^{d}	7.77±0.18^{f}	16.65±0.07^{b}	12.75±0.07^{e}	13.2±0.14^{e}	15.55±1.06^{c}	17.15±0.21^{b}	20.05±0.21^{a}
(-)-表儿茶素	(-)-epicatechin	黄烷醇	4.25±0.04^{i}	9.8±0.06^{d}	7.27±0.21^{fg}	8.32±0.08^{e}	4.97±0.05^{h}	10.75±0.21^{b}	7.12±0.23^{g}	7.59±0^{f}	9.65±0.33^{d}	10.35±0.07^{c}	13.05±0.07^{a}
原花青素 B1	procyandin B1	黄烷醇	0.3±0.01^{h}	17±0.28^{a}	10.55±0.21^{c}	11.7±0.14^{b}	6.06±0.07^{f}	16.4±0.42^{a}	4.92±0.11^{g}	7.14±0.08^{e}	8.27±0.86^{d}	8.3±0.02^{d}	10.45±0.07^{c}
原花青素 B2	procyandin B2	黄烷醇	2.36±0.08^{i}	12.9±0.28^{b}	10.35±0.35^{c}	9.12±0.25^{d}	4.26±0.12^{g}	13.6±0.28^{a}	3.31±0.16^{h}	4.41±0.25^{fg}	4.85±0.06^{f}	5.85±0.04^{e}	9.11±0.21^{d}
原花青素 C1	procyandin C1	黄烷醇	1.13±0.08^{h}	19.15±0.21^{b}	11.9±0.42^{d}	19.4±0^{b}	6.06±0.14^{g}	18.1±0^{c}	8.01±0.02^{f}	10.13±0.52^{e}	11.5±0.14^{d}	12.05±0.35^{d}	20±0.28^{a}
总含量		/	55.84±0.55^{h}	143.97±0.49^{a}	118.91±1.53^{d}	123.43±0.65^{c}	97.75±0.7^{f}	122.92±1.18^{c}	93.74±4.78^{g}	105.33±5.06^{e}	122.13±5.68^{c}	117.88±5.53^{d}	138.99±6.85^{b}

注：数据表示为($\bar{X}$±SD)(n=3)；“–”表示未检出；同行肩标小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.1.2 基于单体酚的聚类分析 为探究不同酒庄马瑟兰葡萄酒单体酚类物质组成的整体相似性与差异性，对 25 种单体酚化合物的含量数据进行聚类热图分析(图 1)。结果表明，7 个酒庄的酒样均得到明显区分。金士酒庄的 5 款酒样全部聚为一类，表明其酚类物质组成具有高度一致性，这可能源于该酒庄实施的标准化栽培与酿造工艺体系，从而最大程度地减少了年份间波动，保证了产品风格的稳定性。其余马瑟兰酒样依据各自的酚类特征被区分开来。怀古 2017 单独聚为一类，其桑色素、杨梅素和白藜芦醇含量较高；朗格斯 2018、茅台凤凰庄园 2017、贵族庄园 2017 和马丁 308 组成相似聚为一类；作为品种对照的赤霞珠酒样(华夏 92)单独聚为一类，其香草酸含量较高，凸显出马瑟兰与赤霞珠在酚类组成上的品种差异性。以上结果表明，基于非挥发性酚类物质的聚类分析可有效区分同一产区内不同酒庄的马瑟兰葡萄酒。

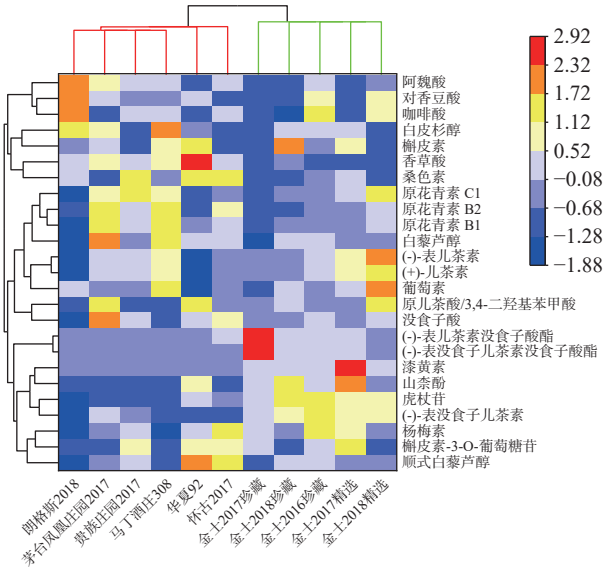


图 1 11 款葡萄酒中单体酚类化合物聚类热图

Fig.1 Cluster thermogram of monomer phenolic compounds in 11 wines

2.1.3 单体花色苷含量与组成分析 花色苷不仅具有良好的生物活性，并且影响葡萄酒的感官品质[33]。葡萄酒中的游离花色苷主要为锦葵类色素，此外常见的还有矢车菊色素、芍药色素、飞燕草素和矮牵牛素等[34]。在 11 款酒样中共检出 17 种花色素单体(表 3)，就其含量差异进行单因素方差分析。

由表 3 可知，11 款酒样中花色素单体的种类和含量均存在显著性差异(P<0.05)，总量范围为 1.99~34.11 mg/L，其中 2018 金士橡木桶珍藏酒样含量最高(34.11 mg/L)，茅台凤凰庄园 2017 次之(32.88 mg/L)，而朗格斯 2018 精选含量最低(1.99 mg/L)，且仅检出 4 种花色苷，这可能与其酒庄采用的闪蒸工艺有关，侍朋宝等[35] 的研究表明，闪蒸有利于提高发酵过程中多数单体花色苷的质量浓度，但不利于葡萄酒陈酿过程中单体花色苷的稳定。花色苷组成分析表明，锦葵花素、锦葵花素双葡萄糖苷和锦葵色素-3-半乳糖苷是 11 款酒样中共有的主要花色苷。矢车菊素葡萄糖苷仅在金士的 5 款酒样中检出，飞燕草素芸香糖苷仅在马丁 308 和金士的 5 款酒样中检出。金士酒庄酒样普遍表现出更高的花色苷多样性及总量，尤其是锦葵花素及衍生物含量显著高于其他酒庄，这为其葡萄酒深邃稳定的色泽提供了物质基础。

2.1.4 基于单体花色苷的聚类分析 基于 11 款酒样中 17 种花色苷单体的定量数据，采用组间平均法和相关性距离进行系统聚类分析，结果见图 2。从图中可以看出，朗格斯 2018、华夏 92、茅台凤凰庄园 2017 因花色苷组成独特而各自单独归类，怀古 2017、贵族庄园 2017、马丁酒庄 308 聚为一类，金士酒庄的 5 款酒样聚为一类。将图 2 与图 1 对比发现，怀古 2017 与茅台凤凰庄园 2017 在花色苷组成上差异明显，但在单体酚类物质、挥发性香气成分(见后文)上可能因年份或工艺影响而呈现某种相似性。同时，本研究结果表明，采用酒庄模式生产的葡萄酒，其酒体风格特征性差异的稳定性更高，这一现象可能与酒庄模式所推行的标准化管理的生产特点有关。

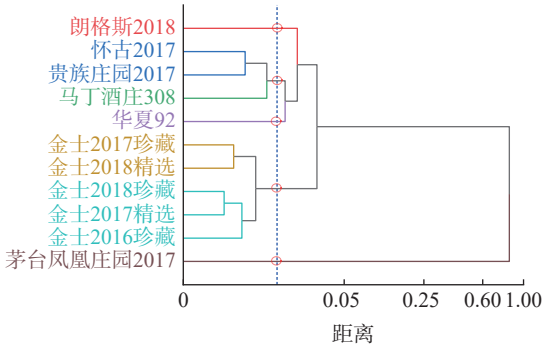


图 2 11 款葡萄酒中花色苷聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of anthocyanins in 11 wines

2.2 马瑟兰干红葡萄酒挥发性风味物质研究

2.2.1 关键挥发性化合物差异分析 采用 HS-SPME-GC-MS 技术从 11 款酒样中共检测出 150 种挥发性成分，其中决定葡萄酒品种香、发酵香和陈酿香的主要成分有 47 种，包括酯类化合物 23 种、醇类化合物 15 种、酸类化合物 3 种、醛类化合物 1 种、酮类化合物 2 种和酚类化合物 3 种。单因素方差分析进一步鉴定出 32 种在酒样间存在显著差异的特征挥发性成分(表 4)，该差异主要源于葡萄品种、生长环境以及酿造工艺等多种因素的综合影响[36]。

挥发性成分雷达图(图 3)直观展示了 11 款酒样在酯、醇、酸、醛、酮、酚类物质上的相对含量差异。朗格斯 2018 的酯类含量最高，可能是受其闪蒸工艺的影响，这与赵亮[37] 研究结果一致，经过闪蒸工艺处理的干红葡萄酒中酯类物质的含量增多。且有研究表明闪蒸工艺处理的赤霞珠葡萄酒中酯类增加了

表 3　11 款葡萄酒中花色素单体含量(mg/L)

Table 3　Content of anthocyanin monomer in 11 wines (mg/L)

中文名称	英文名称	朗格斯 2018精选	茅台凤凰 2017	怀古 2017	贵族庄园 2017	华夏92	马丁308	2017金士马瑟兰 橡木桶珍藏	2018金士马瑟兰 橡木桶珍藏	2016金士马瑟兰 橡木桶珍藏	2017金士马瑟兰 橡木桶精选	2018金士马瑟兰 橡木桶精选
花翠素	delphinidin	0.08±0^{i}	0.31±0^{f}	0.21±0^{h}	0.29±0^{g}	0.32±0^{f}	0.92±0^{b}	0.49±0.01^{d}	1.04±0.01^{a}	0.41±0.01^{e}	0.86±0.01^{c}	0.86±0.01^{c}
飞燕草素葡萄糖苷	delphinidin-3-glucoside	–	0.33±0^{f}	0.28±0^{g}	0.26±0^{g}	0.33±0^{f}	1.39±0.01^{a}	0.61±0.03^{d}	1.29±0.01^{b}	0.42±0.01^{e}	0.85±0.01^{c}	0.86±0.04^{c}
花翠素-3,5-二葡糖苷	delphinidin-3.5-diglucoside	–	0.56±0.01^{a}	0.18±0^{e}	0.19±0^{e}	0.19±0^{e}	0.24±0^{d}	0.23±0.01^{d}	0.22±0.02^{d}	0.18±0^{e}	0.27±0.02^{c}	0.32±0.01^{b}
矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷	cyanidin-3,5-diglucoside	–	0.16±0.01^{a}	–	–	0.06±0^{c}	0.05±0^{d}	0.03±0^{e}	0.08±0^{b}	0.02±0^{f}	0.07±0^{c}	0.07±0^{b}
矢车菊素	cyanidin	–	0.12±0^{g}	0.07±0^{i}	0.09±0^{h}	0.08±0^{i}	0.31±0^{c}	0.16±0^{f}	0.41±0^{a}	0.18±0^{e}	0.27±0.01^{d}	0.32±0^{b}
花葵素	pelargonidin	–	–	–	–	–	–	–	0.01±0.01	–	–	–
天竺葵色素苷	pelargonin	–	0.05±0^{a}	–	0.05±0.01^{a}	–	–	0.03±0^{d}	0.04±0^{b}	0.03±0^{cd}	0.04±0^{c}	0.03±0^{cd}
芍药素	peonidin	–	0.12±0^{f}	0.07±0^{g}	0.08±0^{g}	0.19±0.01^{e}	0.4±0.01^{c}	0.16±0.01^{e}	0.54±0.01^{a}	0.19±0.02^{e}	0.43±0.02^{b}	0.29±0.01^{d}
芍药素-3-邻-葡萄糖苷	peonidin-3-O-glcucoside	–	0.18±0^{h}	0.11±0^{i}	0.13±0^{i}	0.36±0^{e}	0.7±0.01^{b}	0.27±0^{f}	1.03±0.01^{a}	0.23±0.01^{g}	0.61±0.01^{c}	0.47±0.03^{d}
锦葵花素	malvidin	0.86±0^{f}	2.25±0.05^{e}	2.08±0^{e}	1.95±0.01^{e}	1.84±0.03^{e}	10.75±0.21^{c}	6.82±0.19^{d}	15.2±0.57^{a}	7.3±0.11^{d}	11.75±0.35^{b}	11.5±0.14^{b}
锦葵花素双葡萄糖苷	malvidin-3,5-diglucoside	0.2±0.01^{g}	22.3±0.28^{a}	0.44±0.01^{f}	0.5±0.01^{f}	0.45±0^{f}	1.94±0.02^{b}	0.85±0.04^{e}	1.59±0.05^{c}	0.93±0.01^{e}	1.25±0.01^{d}	1.8±0.05^{b}
锦葵色素-3-半乳糖苷	malvidin-3-galactoside	0.85±0^{g}	3.06±0.09^{e}	2.42±0.04^{f}	2.24±0.03^{f}	2.24±0.06^{f}	11.4±0^{a}	5.68±0.37^{d}	11.35±0.49^{a}	5.62±0.36^{d}	8.86±0.34^{c}	9.62±0.14^{b}
矢车菊素葡萄糖苷	cyanidin-3-glucoside	–	–	–	–	–	–	0.03±0^{d}	0.07±0^{a}	0.02±0^{e}	0.04±0^{b}	0.04±0^{c}
牵牛花色素	petunidin	–	0.06±0^{g}	–	–	–	0.17±0^{b}	0.09±0^{e}	0.22±0^{a}	0.08±0^{f}	0.16±0^{c}	0.13±0^{d}
矮牵牛素葡萄糖苷	petunidin-3-glucoside	–	0.05±0^{f}	–	–	–	0.13±0^{b}	0.07±0^{e}	0.15±0.01^{a}	0.05±0^{f}	0.09±0^{c}	0.09±0^{d}
飞燕草素芸香糖苷	delphinidin-3-O-rutinoside	–	–	–	–	–	0.25±0^{b}	0.09±0^{d}	0.4±0.03^{a}	0.07±0^{d}	0.25±0.01^{b}	0.16±0.01^{c}
芍药素3,5-二葡糖苷	peonidin-3,5-diglucoside	–	3.34±0.02^{a}	0.09±0^{h}	0.13±0^{g}	0.24±0^{e}	0.45±0^{c}	0.17±0.02^{f}	0.49±0.02^{b}	0.2±0.01^{f}	0.36±0.02^{d}	0.43±0.02^{c}
总含量	total content	1.99±0^{g}	32.88±0.42^{b}	5.95±0.04^{f}	5.9±0^{f}	6.3±0.04^{f}	29.08±0.18^{c}	15.76±0.6^{e}	34.11±1.06^{a}	15.91±0.51^{e}	26.16±0.7^{d}	26.99±0.18^{d}

注：数据表示为($\bar{X}$±SD)(n=3)；“–”表示未检出；同行肩标小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

表 4　11 款葡萄酒中具有显著差异的挥发性成分及相对含量

Table 4　Volatile compounds and their relative concentrations showing significant differences among the 11 wines

编号	中文名称	英文名称	相对含量(μg/L)										
			JS2017	JS2018	JS2016	JS20172	JS20182	LS2018	MT2017	HG2017	GZ2017	HX92	MD308
1	异戊醇	1-Butanol, 3-methyl-	5.6±1.56^{c}	7.45±2.9^{bc}	8.45±0.92^{bc}	8.8±0.85^{bc}	8.22±1.29^{bc}	–	81.4±13.84^{a}	11.25±4.45^{b}	–	–	–
2	丁酸乙酯	Butanoic acid, ethyl ester	16.65±6.15^{b}	–	18.1±0.71^{b}	17.6±2.69^{b}	47.27±31.92^{a}	–	–	–	–	–	–
3	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol	–	–	–	–	–	10.37±2.31^{b}	–	13.95±2.9^{a}	–	–	–
4	乳酸乙酯	Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester	52.65±9.69^{a}	–	–	45.4±8.34^{a}	–	17.91±12.86^{b}	14.2±16.55^{b}	–	–	–	–
5	二氢草莓酸乙酯	Butanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	10.5±4.95^{ab}	3.6±1.7^{cde}	8.9±1.13^{abc}	6.9±2.69^{bcde}	3.39±1.41^{de}	2.01±0.01^{e}	2.45±1.06^{de}	7.8±0.71^{bcd}	5.65±3.18^{bcde}	13.85±1.91^{a}	7.08±1.02^{bcde}
6	1-己醇	1-Hexanol	208.15±29.2^{bcd}	176.7±60.39^{cde}	254.4±12.45^{ab}	214.8±28.14^{abcd}	225.7±11.88^{abc}	139.69±38.76^{ef}	274.35±13.22^{a}	82.95±8.27^{f}	156.05±6.72^{de}	190.45±14.07^{cde}	217.19±3.53^{abcd}
7	乙酸异戊酯	1-Butanol, 3-methyl-, acetate	229.45±61.87^{b}	–	226.45±16.9^{b}	226.55±12.23^{b}	219.44±12.53^{b}	408.1±162.49^{a}	108.25±8.41^{b}	140.8±26.59^{b}	–	198.45±37.83^{b}	–
8	γ-丁内酯	γ-butyrolactone	–	–	2.2±0.28^{a}	0.9±0.14^{b}	–	–	–	–	–	–	–
9	1-庚醇	1-Heptanol	–	18.15±7.99^{b}	23.85±1.77^{b}	24.55±5.44^{b}	32.55±5.01^{a}	–	–	–	–	–	–
10	己酸乙酯	Hexanoic acid, ethyl ester	625.95±226.77^{b}	314.85±48.44^{c}	614.15±7^{b}	580.2±14.28^{b}	563.85±25.66^{b}	788.62±248.03^{ab}	880.5±12.73^{a}	678.3±24.32^{ab}	547.35±16.9^{b}	592.75±26.23^{b}	780.94±29.08^{ab}
11	乙酸己酯	Acetic acid, hexyl ester	5.2±1.41^{bc}	3.65±0.92^{c}	5.95±0.07^{bc}	5.2±0.14^{bc}	6.8±0.15^{ab}	8.29±2.42^{a}	4.05±0.64^{c}	4.7±0.71^{bc}	4.45±0.64^{bc}	4.45±0.49^{bc}	5.95±0.49^{bc}
12	异辛醇	1-Hexanol, 2-ethyl-	79.7±17.11^{a}	41.55±12.52^{bc}	45.2±6.65^{b}	34.15±1.48^{bcd}	42.67±1.23^{bc}	42.68±0.46^{bc}	46.05±1.48^{b}	18.85±1.48^{de}	14.15±1.63^{e}	26.4±8.06^{cde}	19.45±8.84^{de}
13	乳酸异戊酯	Isoamyl lactate	31.65±5.73^{cd}	35.4±12.3^{bcd}	48.3±0.28^{bc}	53.25±6.15^{b}	47.31±3.27^{bc}	78.38±22.09^{a}	22.6±0.99^{d}	21.8±1.56^{d}	32.9±0.14^{cd}	31.7±3.25^{cd}	43.51±1.82^{bc}
14	1-辛醇	1-Octanol	36.9±7.92^{bc}	27.5±7.78^{c}	54.05±0.35^{a}	47.85±2.47^{ab}	36.77±1.51^{bc}	48.16±9.67^{ab}	39.35±5.44^{bc}	27.85±2.19^{c}	38.25±4.03^{bc}	40.15±1.06^{bc}	42.15±4.6^{ab}
15	芳樟醇	Linalool	13.45±3.61^{bc}	15.9±9.19^{bc}	18±1.84^{bc}	22.5±5.37^{bc}	22.92±8.37^{bc}	36.55±9.12^{a}	–	–	10.65±2.47^{d}	–	24.65±3.32^{b}
16	苯乙醇	Phenylethyl Alcohol	–	–	934.35±11.67^{bc}	772.75±118.72^{cd}	517.11±1.26^{cd}	841.02±154.12^{cd}	416.65±39.1^{e}	826.65±181.37^{cd}	1538.4±193.18^{a}	1359.15±527.01^{a}^{b}	700.02±191.1^{cd}
17	4-乙基苯酚	Phenol, 4-ethyl-	11.45±4.17^{b}	–	–	–	–	–	–	–	–	49.75±15.91^{a}	–
18	1-壬醇	1-Nonanol	31.65±5.44^{bc}	19.2±3.11^{cd}	53.8±5.23^{a}	25.65±1.63^{bcd}	35.77±0.53^{abc}	33±4.24^{bc}	19±13.29^{cd}	8±1.27^{d}	29.55±21.43^{bc}	42.75±8.41^{ab}	19.83±3.22^{cd}

续表 4

编号	中文名称	英文名称	相对含量(μg/L)										
			JS2017	JS2018	JS2016	JS20172	JS20182	LS2018	MT2017	HG2017	GZ2017	HX92	MD308
19	癸醛	Decanal	11.3±1.84^{cde}	7.7±3.96^{e}	11.45±0.07^{cde}	8.8±0.85^{de}	10.9±0.43^{cde}	844.65±62.98^{a}	14.5±3.11^{cde}	22.15±0.21^{bc}	26.75±13.36^{b}	28.2±5.23^{b}	20.36±5.44^{bcd}
20	苯乙酸乙酯	Benzeneacetic acid, ethyl ester	20.3±5.37^{b}	12.1±4.1^{c}	16.8±0^{bc}	13.5±1.98^{bc}	20.03±3.72^{b}	12.29±2.56^{c}	14.2±4.38^{bc}	16.55±0.21^{bc}	18.35±3.75^{bc}	29.7±1.41^{a}	16.56±1.89^{bc}
21	乙酸苯乙酯	Acetic acid, 2-phenylethyl ester	55.4±15.27^{abc}	49.35±14.64^{bc}	49.6±2.97^{bc}	44.15±4.31^{bc}	38.48±1.81^{c}	58.35±7.99^{ab}	–	37.7±5.37^{c}	69.35±0.64^{a}	70.6±6.22^{a}	38.67±2.22^{c}
22	(E)-橡木内酯	trans-3-Methyl-4-octanolide	–	–	–	–	–	12.72±1.81^{b}	9.2±3.25^{bc}	7.7±0.85^{c}	10.15±1.48^{bc}	25.35±3.32^{a}	12.55±1.35^{b}
23	壬酸乙酯	Nonanoic acid, ethyl ester	2.2±0.99^{abc}	0.9±0^{d}	3.1±0.28^{a}	1.3±0^{cd}	2.64±0.19^{ab}	1.82±0.26^{bcd}	1.6±0.71^{bcd}	2.1±0^{abc}	2.55±0.64^{ab}	1.9±0.57^{bcd}	1.59±0.41^{bcd}
24	威士忌内酯	2(3H)-Furanone, 5-butyldihydro-4-methyl-	–	9.4±2.55^{c}	14.55±0.92^{b}	9.9±0.99^{c}	21.62±2^{a}	2.52±0.73^{d}	–	–	–	–	–
25	(Z)-橡木内酯	2(3H)-Furanone, 5-butyldihydro-4-methyl-, cis-	–	–	29.4±3.68^{ab}	12.55±0.49^{cd}	35.1±4.24^{a}	16.11±2.67^{c}	8.55±2.9^{d}	–	15.25±2.33^{cd}	26±7.07^{b}	13.57±1.52^{cd}
26	正癸酸	n-Decanoic acid	–	10.05±3.75^{bc}	–	–	3.11±1.85^{c}	52.08±40.9^{ab}	17.55±2.47^{bc}	12.45±9.83^{bc}	39.4±19.52^{bc}	86.95±49.85^{a}	–
27	癸酸乙酯	Decanoic acid, ethyl ester	204.95±69.93^{abc}	108.1±9.48^{cd}	192±13.86^{abc}	208.55±0.64^{abc}	249.32±24.21^{a}	275.26±47.71^{a}	67.05±92.56^{d}	–	135.4±9.33^{bcd}	228.95±60.03^{ab}	224.57±38.57^{ab}
28	月桂醇	1-Dodecanol	–	3.05±0.92^{ab}	–	–	–	–	–	–	5.15±4.45^{a}	1.75±0.07^{b}	1±0.57^{b}
29	反式-橙花叔醇	1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-, (E)-	–	1.3±0.42^{c}	1.35±0.07^{c}	2.05±0.07^{b}	–	3.52±0.68^{a}	–	–	–	–	–
30	月桂酸	Dodecanoic acid	–	–	–	–	–	5.06±1.33^{c}	5.05±3.75^{c}	–	5.9±5.37^{b}	11.15±2.33^{a}	6.64±1.64^{ab}
31	月桂酸乙酯	Dodecanoic acid, ethyl ester	6.3±0.99^{b}	–	2.95±0.49^{c}	4.25±0.64^{bc}	3.47±0.1^{bc}	19.44±0.62^{a}	9.05±7.28^{b}	–	5.75±2.76^{bc}	3.9±2.26^{bc}	5.37±0.24^{bc}
32	肉豆蔻酸乙酯	Tetradecanoic acid, ethyl	–	–	–	–	–	7.08±0.4^{a}	1.6±0.99^{b}	–	–	–	–

注：数据表示为($\bar{X}$±SD)(n=3)；“–”表示未检出；同行肩标小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

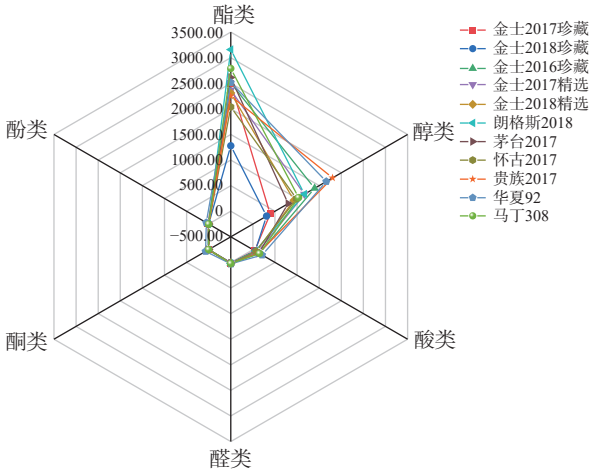


图 3　不同酒庄干红葡萄酒挥发性成分质量浓度雷达图

Fig.3　Radar chart of volatile components mass concentration of dry red wine from different wineries

2 种，相对含量提高了 12%[38]。醇类化合物在贵族 2017 酒样中质量浓度较高，作为对照品种的赤霞珠（华夏 92）酒样中酸类和醛酮酚类化合物质量浓度最高。尽管各酒样间挥发性成分含量存在差异，但所有马瑟兰酒样挥发性化合物的种类构成相似，印证了该品种在不同微域风土条件下品种特征香气的稳定性。

2.2.2　基于关键挥发性化合物的聚类分析　通过样品聚类热图分析可知（图 4），10 款马瑟兰酒样中月桂醇、反式-橙花叔醇、β-大马士酮、乙酸异戊酯、γ-丁内酯、苯甲酸乙酯和丁酸乙酯含量差异较大，赤霞珠（华夏 92）酒样中正癸酸、苯乙酸乙酯、γ-壬内酯、紫罗兰酮、4-乙基苯酚含量高于马瑟兰酒样。不同年份马瑟兰酒样挥发性成分具有不同的变化规律，醇类物质和酯类物质随着陈酿时间的延长含量有所增加；醛、酮、酚类物质也随陈酿时间增加含量有所增加，但是增长趋势较小；酸类物质的变化规律不是十分明显。该研究结果与前人的研究结果类似[39−40]。

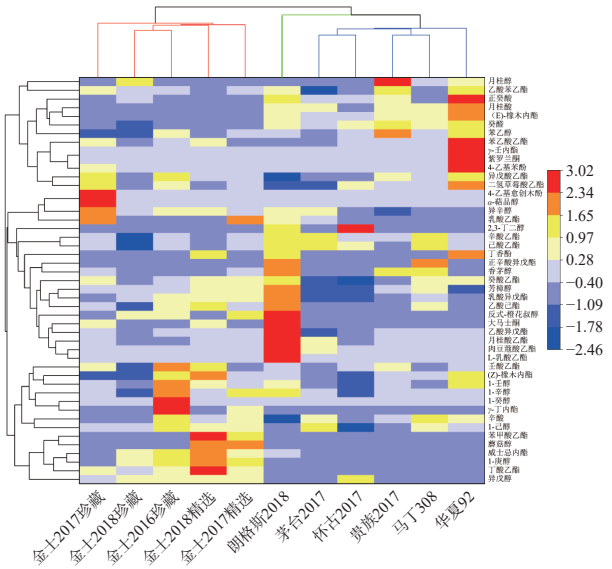


图 4　不同酒庄干红葡萄酒挥发性成分聚类热图

Fig.4　Cluster thermogram of aroma components in dry red wine from different wineries

此外，马瑟兰酒样从微地域聚类的趋势相对明显。金士酒庄的样品全部归为一类，朗格斯酒庄的样品归为一类，茅台和怀古酒庄的样品归为一类，贵族和马丁酒庄的样品归为一类，华夏酒庄的赤霞珠（华夏 92）样品单独归为一类，表明河北产区不同酒庄的马瑟兰酒样挥发性风味特征差异明显，且凸显出赤霞珠与马瑟兰品种之间存在香气组成差异。其中，茅台 2017 和怀古 2017 酒样归为一类，但花色苷成分的聚类结果显示茅台和怀古马瑟兰酒样差异明显，这表明影响葡萄酒特性的因素具有多样性，年份、酿造工艺和储存条件等可能在整体风格起主导作用，使得不同产地的同品种葡萄酒在特定年份表现相似，而品种遗传特性和微地域风土则在更精细的化学成分方面发挥关键作用，产生可区分的特征[41]。

2.2.3　挥发性化合物的 OAV 分析　为评估各挥发性成分对马瑟兰葡萄酒整体香气的实际贡献，计算其香气活性值（Odor Activity Value，OAV）。OAV 反映了某种化合物对葡萄酒香气质量的相对重要性和贡献度，OAV>1 表明该化合物对葡萄酒的香气特性具有明显贡献，而 OAV 越高，说明该化合物的贡献越显著[42]。OAV>1 的挥发性化合物有 9 种，分别是异戊酸乙酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯、芳樟醇、辛酸乙酯、癸醛、紫罗兰酮、大马士酮和癸酸乙酯，带来苹果、香蕉、柑橘及玫瑰等愉悦香气，赋予马瑟兰葡萄酒不同特征类型的甜美馥郁风格[23]。虽然其他香气化合物的 OAV<1，但是它们同样具有潜在香气贡献，可能会增加马瑟兰葡萄酒香气的复杂性和舒适度[43]。因此本实验将 OAV>0.1 的化合物均列出进行讨论，见表 5。

从表 5 中可以看出，OAV 高的物质以酯类为主，酯类是马瑟兰葡萄酒中含量最多的挥发性化合物，能带来果香味。最重要的酯是脂肪酸乙酯类和乙酸酯类，包括乙酸异戊酯、己酸乙酯、辛酸乙酯等。醇类物质包括 1-庚醇、芳樟醇、苯乙醇、香茅醇，1-庚醇能给马瑟兰葡萄酒带来柠檬、柑橘香气；苯乙醇能给马瑟兰葡萄酒带来玫瑰香气；香茅醇属于萜烯类化合物，同样赋予马瑟兰葡萄酒柠檬、柑橘、玫瑰香气；其中，芳樟醇的 OAV>1，是对葡萄酒香气质量贡献较大的醇类物质，给马瑟兰葡萄酒带来柑橘、玫瑰、薰衣草香气。紫罗兰酮、β-大马酮属于 C13-去甲类异戊二烯类，赋予马瑟兰葡萄酒紫罗兰、悬钩子及一些干果的芳香。在新疆焉耆产区相关研究中，β-大马酮、丁酸乙酯、辛酸乙酯等在马瑟兰葡萄酒贡献关键香气，风格以花香、甜香、果香为主[44]。宁夏马瑟兰干红中辛酸乙酯、正己酸乙酯、芳樟醇、香叶醇、乙酸异戊酯等相对含量较高，较同地块赤霞珠更具花香和酯香表达[45]。这综合体现了不同产区马瑟兰葡萄酒在关键香气物质组成与感官风格上的相似性。

表 5　11 款酒样中挥发性化合物的 OAV（OAV>0.1）

Table 5　OAV value of volatile compounds in 11 wine samples (OAV>0.1)

序号	中文名称	英文名称	OAV										
			JS2017	JS2018	JS2016	JS20172	JS20182	LS2018	MT2017	HG2017	GZ2017	HX92	MD308
1	丁酸乙酯	Butanoic acid, ethyl ester	0.83	0.63	0.91	0.88	2.36	–	–	–	–	–	–
2	二氢草莓酸乙酯	Butanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester	0.58	0.20	0.49	0.38	0.19	0.11	0.14	0.43	0.31	0.77	0.39
3	异戊酸乙酯	Butanoic acid, 3-methyl-, ethyl ester	2.38	1.03	2.46	1.74	1.60	0.40	1.06	1.24	1.98	2.78	1.67
4	乙酸异戊酯	1-Butanol, 3-methyl-, acetate	7.65	5.02	7.55	7.55	7.31	13.60	3.61	4.69	7.26	6.62	6.03
5	1-庚醇	1-Heptanol	–	0.09	0.12	0.12	0.16	–	–	–	–	–	–
6	己酸乙酯	Hexanoic acid, ethyl ester	44.71	22.49	43.87	41.44	40.27	56.33	62.89	48.45	39.10	42.34	55.78
7	乳酸异戊酯	Isoamyl lactate	0.16	0.18	0.24	0.27	0.24	0.39	0.11	0.11	0.16	0.16	0.22
8	芳樟醇	Linalool	0.90	1.06	1.20	1.50	1.53	2.44	–	–	0.71	–	1.64
9	苯乙醇	Phenylethyl Alcohol	–	–	0.07	0.06	0.04	0.06	0.03	0.06	0.11	0.10	0.05
10	4-乙基苯酚	Phenol, 4-ethyl-	0.06	–	–	–	–	–	–	–	–	0.28	–
11	辛酸	Octanoic acid	0.08	0.09	0.29	0.21	0.14	–	0.23	0.11	0.18	0.22	0.29
12	辛酸乙酯	Octanoic acid, ethyl ester	237.32	111.76	246.04	221.01	204.16	285.29	290.12	219.74	230.31	246.98	284.93
13	癸醛	Decanal	1.13	0.77	1.15	0.88	1.09	1.97	1.45	2.22	2.68	2.82	2.04
14	香茅醇	Citronellol	0.03	–	–	0.04	–	0.12	–	–	0.11	–	0.10
15	苯乙酸乙酯	Benzeneacetic acid, ethyl ester	0.28	0.17	0.23	0.18	0.27	0.17	0.19	0.23	0.25	0.41	0.23
16	乙酸苯乙酯	Acetic acid, 2-phenylethyl ester	0.22	0.20	0.20	0.18	0.15	0.23	–	0.15	0.28	0.28	0.15
17	紫罗兰酮	Ionone	–	–	–	–	–	–	–	–	–	770.56	–
18	威士忌内酯	2(3H)-Furanone, 5-butyldihydro-4-methyl-	–	0.14	0.22	0.15	0.32	0.04	–	–	–	–	–
19	(Z)-橡木内酯	2(3H)-Furanone, 5-butyldihydro-4-methyl-, cis-	–	–	0.40	0.17	0.47	0.22	0.12	–	0.21	0.35	0.18
20	丁香酚	Eugenol	–	–	–	–	0.53	0.64	–	–	–	0.68	–
21	γ-壬内酯	γ-Nonanoic lactone	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.11	–
22	大马士酮	2-Buten-1-one, 1-(2,6,6-trimethyl-1,3-cyclohexadien-1-yl)-, (E)-	95.00	–	–	–	106.92	288.26	–	–	–	–	–
23	癸酸乙酯	Decanoic acid, ethyl ester	1.02	0.54	0.96	1.04	1.25	1.38	0.34	–	0.68	1.14	1.12

2.2.4　挥发性香气成分的 OPLS-DA 分析　以 47 种挥发性成分作为因变量，不同酒庄作为自变量，通过 OPLS-DA 分析可以实现 7 个酒庄葡萄酒样品的有效区分，其 OPLS-DA 模型如图 5 所示，所有样本均在 95% 的置信区间内，模型拟合优度 R^2 为 0.850，预测优度 Q^2 为 0.633，R^2 和 Q^2 均大于 0.5，证明模型拟合良好可靠，具有统计学意义。此外，运用 permutation tests(n=200)来评估判别模型是否对数据过度拟合，对模型的 2 个成分重复 200 次排列实验，结果如图 6 所示，R^2 的截距为 0.398<0.4，Q^2 的截距为 −0.754<0.05，表明模型没有对数据进行过度拟合，该结果可用于葡萄酒香气的鉴别分析。

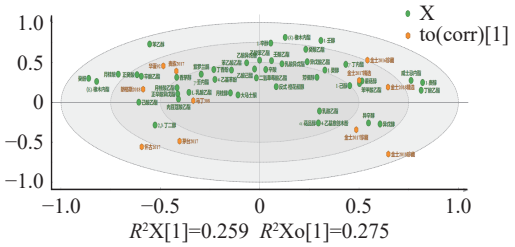


图 5　GC-MS 鉴定挥发物的 OPLS-DA Biplot 图

Fig.5　OPLS-DA Biplot of volatile compounds identified by GC-MS

该模型将 7 个酒庄样品区分开，分离度较好。从图 5 中可以看出，金士酒庄马瑟兰样品集中在第一、四象限，金士 2016 珍藏、金士 2017 精选和 2018 精选样品距离较近，与 γ-丁内酯(气味：甜香、焦糖)、1-己醇(气味：青草、生青味)、威士忌内酯(气味：花香、内酯香)、丁酸乙酯(气味：草莓味、苹果味)相关，金士 2017 珍藏和 2018 珍藏样品距离较近，与乳酸乙酯(气味：乳香、悬钩子果香)、4-乙基愈创木酚(气味：烟熏味、皮革味)、异戊醇(气味：苦杏仁味、涩味)、异辛醇(气味：蘑菇、甜果)相关。根据气味描述，金士酒庄马瑟兰葡萄酒样品的香气特征为果香、花香、甜香、焦糖、烟熏味。研究表明，威士忌内酯是橡木桶处理工艺的标志性产物，只存在于经过橡木桶储存的葡萄酒中[46]，这种物质仅在金士酒庄和朗格斯酒庄的酒样中检测到，且含量有一定差异，分析认为可能是橡木桶本身的差异性和陈酿时间不一致而造成的。朗格斯酒庄马瑟兰样品在第二象限，与己酸乙酯(气味：青苹果味、果香)、(E)-橡木内酯(气味：木头味、椰子味、香料味)、正癸酸(气味：脂肪味、奶酪味)、月桂酸乙酯(气味：甜香、花香、果香、奶油)

等呈正相关。根据气味描述，朗格斯酒庄马瑟兰葡萄酒样品的香气特征为甜味、花香、果香、香料。马丁、贵族酒庄马瑟兰样品同样位于第二象限，与香茅醇（气味：柠檬味、柑橘味）、γ-壬内酯（气味：桃味）、L-乳酸乙酯（气味：乳香、悬钩子果香）、肉豆蔻酸乙酯（气味：甜果、黄油）等相关。根据气味描述，两个样品的香气特征为花香、果香。茅台凤凰庄园、怀古酒庄马瑟兰样品位于第三象限，这两个样品与 2,3-丁二醇具有相关性，赋予葡萄酒黄油、乳酪香气。华夏酒庄赤霞珠样品位于第二象限，除与贵族 2017 样品较为接近，与其余样品距离较远，说明赤霞珠与马瑟兰葡萄酒的香气物质具有一定差异。华夏 92 与辛酸乙酯（气味：苹果味、花香、啤酒味）、正癸酸（气味：脂肪味、奶酪味）等相关。根据气味描述，华夏酒庄赤霞珠葡萄酒样品的香气特征为果香、花香。

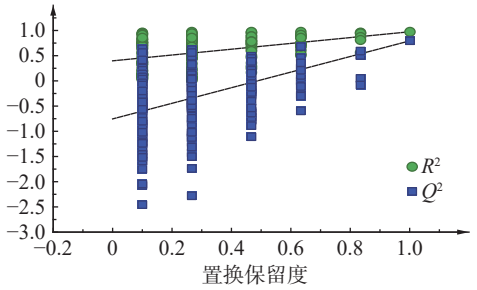


图 6 OPLS-DA 模型交叉验证结果

Fig.6 Cross-validation results of OPLS-DA model

VIP 值（Variable Importance in Projection，VIP 值）是 OPLS-DA 模型变量的权重值，可以反映挥发性化合物对模型分类的贡献程度。不同酒庄葡萄酒重要挥发性化合物 VIP 值分布图（图 7），VIP 值越大，变量在不同酒庄间差异越显著。从图 7 中可以看出，苯乙醇、辛酸乙酯、己酸乙酯、1-己醇、正癸酸、丁酸乙酯和 1-庚醇这 7 种化合物的 VIP 值均大于 1，表明这些物质与不同酒庄葡萄酒样品间具有强烈的相关性，是区分样品的特征性差异物质。其中苯乙醇（VIP 值 4.31），辛酸乙酯（VIP 值 3.33）、己酸乙酯（VIP 值 2.64）的 VIP 值较高，是样品挥发性风味差异的关键影响因子。

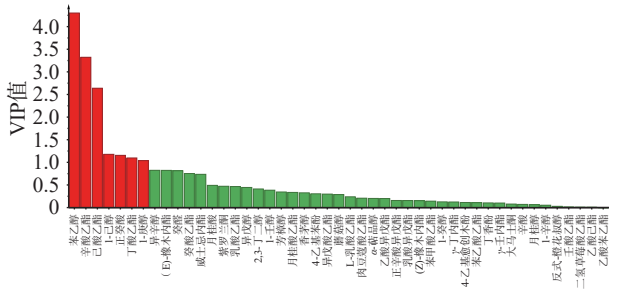


图 7 基于 OPLS-DA 分析 VIP 得分

Fig.7 VIP scores based on OPLS-DA

3 讨论与结论

马瑟兰凭借其较强的抗病性和优异的果实品质在中国迅速发展，除了冷凉的葡萄酒产区，该品种几乎都有种植。在过去的十多年中，研究人员更多专注于不同产区（地域跨度大、生态条件差异明显）之间葡萄酒的品质表达，如不同产区葡萄酒的化学特性、酚类物质组成、花色苷、感官特征以及香气特征差异等，而对同一产区微域风土差异的葡萄酒典型风格研究较少，且缺乏系统解析葡萄酒典型特征成分的有效方法。本研究系统的应用 UPLC-MS/MS 和 HS-SPME-GC-MS 技术证实了基于非挥发性酚类物质（单体酚、花色苷）和挥发性风味物质的化学分析，能够有效区分河北产区不同酒庄的马瑟兰葡萄酒。研究发现，不同酒庄酒样在单体酚与花色苷组成上具有显著差异，其中没食子酸和锦葵花素分别为其主要成分。同时，研究明确了异戊酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯等 9 种关键香气物质（OAV>1）共同赋予该产区马瑟兰葡萄酒典型的果香与花香风格；并通过 OPLS-DA 模型进一步筛选出 7 种关键风味标志物，其中苯乙醇、辛酸乙酯、己酸乙酯（VIP 值>2.64）为关键区分因子。

然而，由于马瑟兰葡萄酒的非挥发性酚类物质（单体酚、花色苷）及挥发性风味物质受产区、酿造工艺等其他因素的综合影响，因此未来的研究还需进一步控制变量、增加样本数量，并结合感官属性以及其他技术如 GC-O 和矿质元素等分析技术，以提供更加客观、全面的评定依据和理论参考。

© 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] LAN Yibin, LIU Min, ZHANG Xinke, et al. Regional variation of chemical characteristics in young marselan (*Vitis vinifera* L.) red wines from five regions of China[J]. Foods, 2022, 11(6): 787.

[2] LÜ Jiaheng, MA Yue, XU Yan, et al. Characterization of the key aroma compounds in marselan wine by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, aroma recombination, and omission tests[J]. Molecules, 2019, 24(16): 2978.

[3] 易黎, 亓桂梅. 秦皇岛产区：老产区的新角色[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2016(4): 67−68. [YI Li, QI Guimei. Qinhuangdao production area: The new role of the old production area[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2016(4): 67−68.]

[4] 白世践, 户金鸽, 蔡军社, 等. 极端干旱区酿酒葡萄品种马瑟兰的光合和酿酒特性分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(3): 511−521. [BAI Shijian, HU Jinge, CAI Junshe, et al. Studies on photosynthetic and vinification characteristics of wine grape variety marseland in extremely arid regions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(3): 511−521.]

[5] 开建荣, 马海燕, 张伟, 等. 贺兰山东麓子产区马瑟兰葡萄酒产地识别研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 278−285. [KAI Jianrong, MA Haiyan, ZHANG Wei, et al. Research on the identification of matheran wine region in the east foot of Helan Mountain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 278−285.]

[6] 王舒伟, 马雪蕾, 马银凤, 等. '马瑟兰'葡萄在我国的栽培表现

及研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2019(3)：66−70. [WANG Shuwei, MA Xuelei, MA Yinfeng, et al. Cultivation performance and research progress on 'Marselan' grapevine in China[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2019(3): 66−70.]

[7] VO G T, LIU Ziyao, CHOU O, et al. Screening of phenolic compounds in Australian grown grapes and their potential antioxidant activities[J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101644.

[8] PÉREZ-NAVARRO J, HERMOSÍN-GUTIÉRREZ I, GÓMEZ-ALONSO S, et al. *Vitis vinifera* Turkish novel table grape 'Karaerik'. Part II: Non-anthocyanin phenolic composition and antioxidant capacity[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(2): 813−822.

[9] JIANG Bao, SUN Zhanyu. Phenolic compounds, total antioxidant capacity and volatile components of Cabernet Sauvignon red wines from five different wine-producing regions in China[J]. Food Science and Technology, 2019, 39(3): 735−746.

[10] BIMPILAS A, TSIMOGIANNIS D, BALTA-BROUMA K, et al. Evolution of phenolic compounds and metal content of wine during alcoholic fermentation and storage[J]. Food Chemistry, 2015, 178: 164−171.

[11] WANG Shengnan, WANG Xiaoyu, ZHAO Pengtao, et al. Mannoproteins interfering wine astringency by modulating the reaction between phenolic fractions and protein in a model wine system[J]. LWT, 2021, 152: 112217.

[12] 张欣珂, 赵旭, 成池芳, 等. 葡萄酒中的酚类物质 I: 种类、结构及其检测方法研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 255−268. [ZHANG Xinke, ZHAO Xu, CHENG Chifang, et al. Phenolics in wines I: A review of categories, structures and detection methods [J]. Food Science, 2019, 40(15): 255−268.]

[13] 吕真真, 焦中高, 杨文博, 等. 不同产区赤霞珠葡萄酒酚类物质特征性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 177−183. [LÜ Zhenzhen, JIAO Zhonggao, YANG Wenbo, et al. Characteristic analysis of phenolic compounds in Cabernet Sauvignon wines from different regions[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 177−183.]

[14] 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. [WANG Chi, LAN Yibin, DUAN Changqing, et al. Comparison of color and phenolic composition of 'marselan' dry red wines from different sub-regions of the eastern foothills of the Helan Mountains, Ningxia[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 194−204.]

[15] 刘春艳, 张静, 李栋梅, 等. 葡萄酒风味物质研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 310−313,320. [LIU Chunyan, ZHANG Jing, LI Dongmei, et al. Research progress of the flavor compounds in wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(14): 310−313,320.]

[16] 于静, 李景明, 吴继红, 等. 顶空固相微萃取法(SPME)在红葡萄酒香气成分测定中的应用研究[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2006(3): 4−9,15. [YU Jing, LI Jingming, WU Jihong, et al. Rapid determination of aroma components in Cabernet sauvignon wine by HS-SPME and GC-MS[J]. Sino-Overseas Grapevine and Wine, 2006(3): 4−9,15.]

[17] JURADO J M, BALLESTEROS O, ALCÁZAR A, et al. Differentiation of certified brands of origins of Spanish white wines by HS-SPME-GC and chemometrics[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2008, 390(3): 961−970.

[18] 杨志伟, 王圣仪, 齐鹏宇, 等. UPLC-MS/MS 测定葡萄酒中 29 种单体酚方法的建立[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 214−219. [YANG Zhiwei, WANG Shengyi, QI Pengyu, et al. Establishment of ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for determination of 29 monophenols in wine[J]. Food Science, 2019, 40(24): 214−219.]

[19] 金刚, 杨志伟, 王圣仪, 等. 超高效液相色谱-串联质谱测定干红葡萄酒中 18 种花色素单体方法的建立[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 229−235. [JIN Gang, YANG Zhiwei, WANG Shengyi, et al. Establishment of ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for determination of 18 individual anthocyanins in wine[J]. Food Science, 2019, 40(18): 229−235.]

[20] 李叶凤. 基于多指纹图谱技术的澳大利亚五个产区葡萄酒产地鉴别研究[D]. 银川：宁夏大学, 2021. [LI Yefeng. Research on the identification of wine origin in five producing areas of Australia based on multi-fingerprint technology[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[21] 李华. 葡萄酒品尝学[M]. 北京：科学出版社, 2010: 33−46. [LI Hua. Wine tasting[M]. Beijing: Science Press, 2010: 33−46.]

[22] 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. [TAO Yongsheng, PENG Chuantao. Correlation analysis of aroma characters and volatiles in chardonnay dry white wines from five districts in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 130−139.]

[23] 陶永胜, 李娜. 葡萄酒中香气物质研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(3): 28−40. [TAO Yongsheng, LI Na. Research progress on aroma compounds in wine[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(3): 28−40.]

[24] 马懿, 熊蓉, 魏鑫, 等. 葡萄酒酚类物质的产生机制及影响因素研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(13): 195−201. [MA Yi, XIONG Rong, WEI Xin, et al. Formation mechanism of phenols during winemaking and the influencing factors: A review[J]. Food Research and Development, 2023, 44(13): 195−201.]

[25] 回学宽, 王艳丽, 祝贺, 等. 葡萄酒中酚类物质的研究进展[J]. 中国果菜, 2019, 39(11): 65−71,79. [HUI Xuekuan, WANG Yanli, ZHU He, et al. Progress in polyphenol of wines[J]. China Fruit Vegetable, 2019, 39(11): 65−71,79.]

[26] GAWEL R. Red wine astringency: A review[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1998, 4(2): 74−95.

[27] 李宁宁, 张波, 牛见明, 等. 发酵前咖啡酸和迷迭香酸添加对干红葡萄酒颜色与香气的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 132−140. [LI Ningning, ZHANG Bo, NIU Jianming, et al. The influence of pre-fermentative addition of caffeic acid and rosmarinic acid on the color and aroma compounds of dry red wines [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 132−140.]

[28] 谭立杭. 红葡萄酒中缩合单宁特性与感官收敛性的关系研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2019. [TAN Lihang. Relationship between condensed tannins properties and sensory astringency of wine[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.]

[29] 赵擎豪, 王升楠, 杜国荣, 等. 葡萄酒涩感物质及其评价研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 426−432. [ZHAO Qinghao, WANG Shengnan, DU Guorong, et al. Research progress on the astringency substances and evaluation of wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 426−432.]

[30] TOPI D, KELEBEK H, GUCLU G, et al. LC-DAD-ESI-MS/MS characterization of phenolic compounds in wines from *Vitis vinifera* 'Shesh i bardhë' and 'Vlosh' cultivars[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(6): e16157.

[31] MAHER P. The potential of flavonoids for the treatment of

neurodegenerative diseases[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(12): 3056.
[32] CHEN A Y, CHEN Y C. A review of the dietary flavonoid, kaempferol on human health and cancer chemoprevention[J]. Food Chemistry, 2013, 138(4): 2099−2107.
[33] 谢林君, 张劲, 谢太理, 等. 辅色素添加对桂葡 6 号葡萄酒花色苷组成及含量的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(9): 55−61. [XIE Linjun, ZHANG Jin, XIE Taili, et al. Effect of copigmentation addition on anthocyanins composition and content of Guipu 6 Wine[J]. China Brewing, 2023, 42(9): 55−61.]
[34] 马小强, 王有梁, 潘艺波, 等. 超声催陈对葡萄酒色泽品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 15−23. [MA Xiaoqiang, WANG Youliang, PAN Yibo, et al. The effect of ultrasonic aging on the color quality of wine[J]. Food Research and Development, 2023, 44(15): 15−23.]
[35] 侍朋宝, 崔彦志, 张昂, 等. 闪蒸对昌黎产区‘马瑟兰’葡萄酒单体酚类物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 102−110. [SHI Pengbao, CUI Yanzhi, ZHANG Ang, et al. Effect of flash vacuum expansion on monomeric phenolics in ‘marselan’ Wine from Changli[J]. Food Science, 2022, 43(21): 102−110.]
[36] 齐晓茹, 侯丽娟, 师旭, 等. 不同年份、不同葡萄品种葡萄酒品质特征分析研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 285−289. [QI Xiaoru, HOU Lijuan, SHI Xu, et al. Research of quality characteristics in grape wines from different aging vintages, grape varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9): 285−289.]
[37] 赵亮. 闪蒸工艺对干红葡萄酒质量影响分析[J]. 化工管理, 2016(20): 256. [ZHAO Liang. Analysis on the influence of flash evaporation process on the quality of dry red wine[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(20): 256.]
[38] 耿彦彦. 闪蒸工艺对干红葡萄酒质量影响的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013. [GENG Yanyan. Study on the dry red wine quality under flash evaporation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.]
[39] 陶永胜, 孙汉文, 彭传涛. 我国几个产区不同年份干红葡萄酒香气特征的差异[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2012(6): 31−34,39. [TAO Yongsheng, SUN Hanwen, PENG Chuantao. Aroma differences among Chinese dry red wines of distinct vintages from several districts[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012(6): 31−34,39.]
[40] 李佳. 昌黎原产地域赤霞珠葡萄酒香气成分研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [LI Jia. Study on aromatic compounds in cabernet sauvignon wines from Changli original producing area[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007.]
[41] 葛谦, 王小丽, 王云霞, 等. 宁夏贺兰山东麓不同产地‘赤霞珠’葡萄酒挥发性香气物质特征分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(2): 98−106. [GE Qian, WANG Xiaoli, WANG Yunxia, et al. Characteristics analysis of volatile aroma substances in ’Cabernet Sauvignon’ wines from different producing regions at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. China Brewing, 2022, 41(2): 98−106.]
[42] LAN Yibin, GUO Jingxian, QIAN Xu, et al. Characterization of key odor-active compounds in sweet Petit Manseng (*Vitis vinifera* L.) wine by gas chromatography–olfactometry, aroma reconstitution, and omission tests[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(4): 1258−1272.
[43] PENG Chuantao, WEN Yan, TAO Yongsheng, et al. Modulating the formation of meili wine aroma by prefermentative freezing process[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(7): 1542−1553.
[44] 杨华峰, 薛淑花, 权娣红, 等. 新疆焉耆盆地七个星小产区马瑟兰葡萄酒自然发酵过程香气成分及微生物群落分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(1): 264−273. [YANG Huafeng, XUE Shuhua, QUAN Dihong, et al. Analysis of aroma components and microbial communities during the spontaneous fermentation of marselan wine from the qigexing small production area in the Yanqi Basin, Xinjiang[J]. Modern Food Science & Technology, 2026, 42(1): 264−273.]
[45] 齐晓琴, 刘建花, 李金鹏, 等. 贺兰山东麓马瑟兰干红葡萄酒香气成分的分析[J]. 中国酿造, 2016, 35(9): 163−167. [QI Xiaoqin, LIU Jianhua, LI Jinpeng, et al. Analysis of aroma components of Marselan dry red wine from Helan Mountain Eastern[J]. China Brewing, 2016, 35(9): 163−167.]
[46] 姜文广, 吴训仓, 尹雷, 等. 张裕酒庄级蛇龙珠干红葡萄酒香气成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(6): 125−131. [JIANG Wenguang, WU Xunlun, YIN Lei, et al. The study of aroma compounds in cabernet gernischt red dry wine of Changyu castle[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(6): 125−131.]