

引用格式: 李琳馨, 李文超, 杨彭程, 等. 贺兰山东麓不同生态区‘霞多丽’葡萄果实品质和葡萄酒香气特征[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(X): 1-12. LI Linxin, LI Wenchao, YANG Pengcheng, et al. Fruit quality and wine aroma characteristics of ‘Chardonnay’ grapes in different ecological zones of Helan Mountain’s east foothill[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(X): 1-12.

## 贺兰山东麓不同生态区‘霞多丽’葡萄果实品质和葡萄酒香气特征

李琳馨<sup>1</sup>, 李文超<sup>2</sup>, 杨彭程<sup>3</sup>, 马丹阳<sup>2</sup>, 王振平<sup>1</sup>, 李栋梅<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区管理委员会, 宁夏银川 710005; 3. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

**摘要:** 【目的】探究宁夏贺兰山东麓产区不同风土条件对葡萄 *Vitis vinifera* 果实中氨基酸积累及葡萄酒香气形成的影响, 为优化该产区葡萄种植风土选择及提升葡萄酒品质提供理论依据。【方法】以宁夏贺兰山东麓永宁、青铜峡、银川 3 个产区 4 个地块 (玉泉、御马、西鸽和志辉) 的‘霞多丽’ *V. vinifera* ‘Chardonnay’ 葡萄果实及其酿造的葡萄酒为研究对象, 检测果实氨基酸组成与质量浓度, 并解析葡萄酒中的挥发性成分。【结果】在 4 个地块的葡萄果实中, 氨基酸总量志辉地块最高, 为 6 876.62 mg·L<sup>-1</sup>, 玉泉最低, 为 3 873.65 mg·L<sup>-1</sup>, 4 个地块中御马与西鸽之间差异不显著, 但其他 2 个地块之间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同地块葡萄果实的丙氨酸、精氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸的质量浓度差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而甘氨酸和脯氨酸的差异更为突出。4 个地块葡萄酒的香气成分主要由 4 大类物质构成, 共占总香气成分的 95.1%, 其中高级醇类占 49.3%, 脂肪酸乙酯类占 22.2%, 其他酯类占 12.6%, 脂肪酸类占 11.0%。利用正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 可较好地地区分 4 个地块, 其中御马和西鸽组间差异较小, 可归为一类。通过变量投影重要性 (VIP) 得分图可显著区分地块的香气物质为 8 种, 其中异戊醇、十三酸乙酯、乙基 9-癸烯酸酯、辛酸乙酯、异丁醇为御马和西鸽葡萄酒的主要特征物质; 苯乙醇、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二甲酯为玉泉葡萄酒的主要特征物质。【结论】宁夏贺兰山东麓各子产区‘霞多丽’葡萄果实氨基酸积累和葡萄酒的香气特征均受到风土条件差异的影响, 其中, 丙氨酸受生态条件影响最大, 并对葡萄酒的香气物质高级醇类有突出贡献。图 5 表 5 参 33

**关键词:** ‘霞多丽’; 氨基酸; 风土; 挥发性化合物

中图分类号: S663.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)00-0001-12

## Fruit quality and wine aroma characteristics of ‘Chardonnay’ grapes in different ecological zones of Helan Mountain’s east foothill

LI Linxin<sup>1</sup>, LI Wenchao<sup>2</sup>, YANG Pengcheng<sup>3</sup>, MA Danyang<sup>2</sup>, WANG Zhenping<sup>1</sup>, LI Dongmei<sup>1</sup>

(1. College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Administrative Committee of Wine Industry Zone of Ningxia Helan Mountain’s East Foothill, Yinchuan 710005, Ningxia, China; 3. College of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of diverse terroir factors in Ningxia Helan Mountain’s east foothill production area on grape (*Vitis vinifera*) berry amino acid accumulation and wine aroma formation are investigated, with the goal of providing theoretical support for optimizing local grape planting terroir and upgrading wine quality. [Method] The fruit amino acid composition and content were analyzed by high

收稿日期: 2025-04-23; 修回日期: 2025-12-30

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金 (U20A2042); 财政部和农业农村部国家葡萄产业技术体系 (CARS-29-zp-3)

作者简介: 李琳馨 (ORCID: 0009-0000-7852-3547), 从事葡萄栽培生理与分子生物学研究。E-mail: 15320218792@163.com。通信作者: 李栋梅 (ORCID: 0009-0000-1357-4466), 副教授, 从事葡萄栽培生理与分子生物学研究。E-mail: ldm2022068@nxu.edu.cn

performance liquid chromatography (HPLC) in 4 plots (Yuquan, Yuma, Xige, Zihui) of ‘Chardonnay’ grape berries and wines made during the harvest period in Yongning, Qingtongxia, and Yinchuan, three sub-appellations in Ningxia Helan Mountain’s east foothill, with Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used to analyze the volatile components in the wines. [Result] The results showed that the total amino acid content of grape berries from plot Zihui was the highest at  $6\ 876.62\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Yuquan was the lowest at  $3\ 873.65\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the difference between Yuma and Xige was not significant, but there was a significant difference with the other 2 plots ( $P<0.05$ ). The contents of alanine, arginine, phenylalanine, and tyrosine in the grape berries of the 4 plots, phenylalanine and tyrosine, and glycine and proline. The aroma composition of the wines from the 4 plots mainly consisted of 4 types of substances, accounting for a total of 95.1%, of which higher alcohols accounted for 49.3%, fatty acid ethyl esters accounted for 22.2%, other esters accounted for 12.6%, and fatty acids accounted for 11.0%. By using Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis (OPLS-DA), 4 plots could be better distinguished, among which the differences between Yuma and Xige groups were small and could be categorized as one group; the aroma substances that could significantly distinguish the plots were identified as eight by the VIP score plot, among which isoamyl alcohol, ethyl tridecanoate, ethyl ethyl 9-decenoate, ethyl caprylate, isobutyl alcohol were the main characteristic substances of Yuma and Xige wines; phenylethanol, diethyl phthalate, dimethyl phthalate were the main characteristic substances of Yuquan wine. [Conclusion] The accumulation of amino acids in ‘Chardonnay’ grape berries and the aroma characteristics of wines from various sub-appellations in Ningxia Helan Mountain’s east foothill were affected by the differences in terroir conditions, among which, alanine was most affected by the ecological conditions and made a prominent contribution to the higher alcohols of the wine’s aroma substances. [Ch, 5 fig. 5 tab. 33 ref.]

**Key words:** ‘Chardonnay’; amino acids; terroir; volatile compounds

葡萄酒风味受葡萄 *Vitis vinifera* 果实品质的影响, 而葡萄果实品质与营养成分密切相关。氨基酸作为葡萄果实的重要含氮化合物, 对葡萄酒风味形成起着重要作用<sup>[1]</sup>。葡萄果实氨基酸积累受多种生态条件的调控, 其中温度是关键因素之一。有研究表明: 高温可提高‘佳丽酿’ *V. vinifera* ‘Carignan’ 葡萄脯氨酸含量; 低温可延长成熟周期, 有利于葡萄氨基酸累积<sup>[2]</sup>。水分条件亦有重要影响, 水分胁迫可显著提高脯氨酸含量<sup>[3]</sup>; 调亏灌溉下氨基酸总量不变, 但甲硫氨酸、色氨酸、丝氨酸及酪氨酸含量受其影响<sup>[4]</sup>。上述研究表明: 生态条件对葡萄果实氨基酸含量的影响是复杂且多样的, 不同生态因素通过不同的机制影响着葡萄果实中氨基酸的积累, 进而影响葡萄酒的风味和品质。

葡萄果实氨基酸的种类及含量与葡萄酒香气、风味密切相关。葡萄酒酿造过程中, 氨基酸既是酵母生长与发酵的主要氮源, 也参与香气的风味调控, 部分香气物质源于以氨基酸为底物的酒精发酵<sup>[5]</sup>, 但高浓度半胱氨酸和赖氨酸会抑制酵母生长发酵<sup>[6]</sup>。例如, 苯丙氨酸作为苯环和苯丙烷化合物合成的重要前体, 可增强‘霞多丽’ *V. vinifera* ‘Chardonnay’ 葡萄酒花香特性并提高香气复杂度<sup>[7]</sup>。通过调控发酵过程中氨基酸的种类和数量, 可精准优化葡萄酒香气特征<sup>[8]</sup>。

香气是葡萄酒品质的核心指标, 葡萄果实挥发性物质及其前体直接影响葡萄酒香气成分<sup>[9]</sup>。生态条件对酿酒葡萄香气物质的积累起着关键作用。光照可增加糖苷挥发性化合物前体含量, 进而影响单萜和降低异戊二烯含量<sup>[10]</sup>。水分胁迫抑制单萜类化合物合成, 同时促进特征香气物质积累<sup>[11]</sup>。土壤质地影响‘雷司令’ *V. vinifera* ‘Riesling’ 葡萄单萜类化合物合成<sup>[12]</sup>。海拔升高使酯类物质相对含量降低、葡萄酒感官分数升高, 但过高海拔会对感官品质产生不利影响<sup>[13]</sup>。

但近年来, 对不同生态区葡萄与葡萄酒风格特征的研究较少。鉴于此, 本研究以宁夏贺兰山东麓3个产区4个地块采收期的‘霞多丽’葡萄果实和葡萄酒为研究对象, 研究不同产区葡萄果实氨基酸积累及葡萄酒香气的产区特异性, 为‘霞多丽’葡萄种植区域选择, 以及不同产区‘霞多丽’葡萄酒风格

特征的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地点

该研究于 2022 年在宁夏贺兰山东麓产区进行, 在永宁、青铜峡、银川 3 个产区分别设置了玉泉 (YQ)、御马 (YM)、西鸽 (XG) 和志辉 (ZH) 共 4 个地块采样。4 个地块的气象数据 (2022 年 6 月 1 日至 9 月 30 日) 均由当地气象站提供 (表 1)。

表 1 4 个地块的气象数据

地块	经纬度	海拔/m	降水/mm	日照时数/h	有效积温/℃	平均气温/℃
玉泉	38.27°N, 106.04°E	1 141	139.0	1 021.3	1 536.3	22.57
御马	38.03°N, 106.08°E	1 166	72.2	1 425.6	1 783.7	24.62
西鸽	38.07°N, 105.88°E	1 189	104.5	1 569.8	1 711.9	24.58
志辉	38.57°N, 106.03°E	1 158	83.7	1 351.2	1 680.1	23.74

### 1.2 材料

‘霞多丽’葡萄 4 个地块均为南北走向, 采用自根苗定植, 株行间距均为 1.0 m×3.2 m, 整体呈“厂字形”, 种植效果良好。在每个葡萄园中, 设置 3 个生物学重复, 每个重复选择 3 行挂牌标识。于采收期 10:00 前完成采样, 每个重复随机在葡萄植株阴阳面果穗的不同位置采摘 100 粒果实, 用于氨基酸测定。同时, 每个重复随机采样 40 kg, 用于酿造葡萄酒。

### 1.3 方法

1.3.1 葡萄果实基本品质测定 测定方法在李栋梅等<sup>[14]</sup>的基础上有所改动。随机选取 100 粒葡萄果实, 百粒重采用万分之一电子天平测定; 可溶性固形物体积分数使用 WYT-32 型便携式数字折光仪测定; 可滴定酸质量浓度采用酸碱中和滴定法 (酚酞指示剂) 测定; 糖酸比为可溶性固形物与可滴定酸之比。

1.3.2 葡萄果实氨基酸质量浓度测定 氨基酸的测定方法在王亚钦<sup>[15]</sup>的基础上进行了适当调整。色谱条件为 C18 柱 (250.0 mm×4.6 mm, 5.0 μm), 样品量为 5 μL; 信号值为 280 nm。流动相 A 为 10 mmol·L<sup>-1</sup> 的磷酸氢二钠和四硼酸钠混合液 (pH 8.2), 流动相 B 为体积分数 45% 甲醇+45% 乙腈+10% 水, 流速为 1.5 mL·min<sup>-1</sup>, 柱温为 45℃。

1.3.3 葡萄酒酿造 采用 50 L 不锈钢桶作为容器, 经质量分数为 2% 的亚硫酸水消毒并冲洗干净后备用。去除葡萄果梗并破碎后榨汁, 随后添加偏重亚硫酸钾 (65 mg·L<sup>-1</sup>), 将其装入不锈钢桶内, 静置后加入果胶酶 (20 mg·L<sup>-1</sup>)。在低温下静置澄清 48 h 后, 将澄清的葡萄汁自然升温至 15℃, 随后接种维勒 1 号酵母 (VL1), 并将发酵温度控制在 15~18℃。严格检测葡萄汁的比重, 每天早中晚测定 1 次, 比重小于 0.993 时, 结束发酵, 各地块的酒样均由单独容器酿造而成。酒精发酵后进行常规理化指标检测, 原酒经过苹果酸-乳酸发酵后, 澄清 1 个月后装瓶带回实验室检测香气物质。

1.3.4 葡萄酒理化指标测定 葡萄酒基本理化指标 (残糖、酒精度、可滴定酸、挥发酸) 测定方法参照国标 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》执行。

1.3.5 香气物质测定 采用顶空-固相微萃取-气相色谱质谱联用 (HS-SPME-GC-MS) 技术分析样品中的香气物质, 参照问亚琴<sup>[16]</sup>的方法进行测定。

### 1.4 数据分析

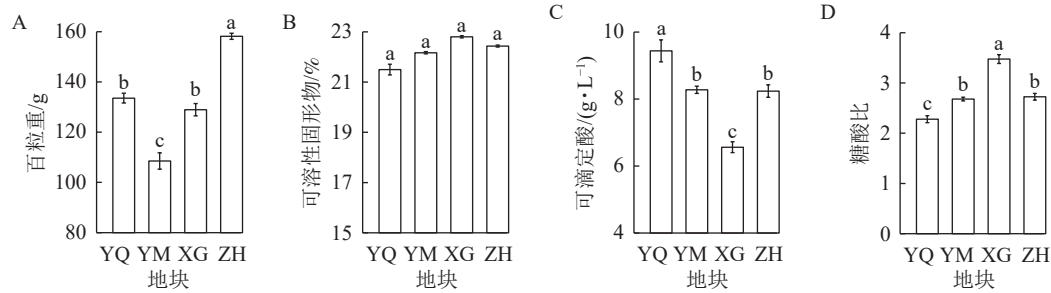
数据统计用 Excel 2021 完成, 单因素方差分析和皮尔逊相关性分析使用 SPSS 20.0 完成, 主成分分析 (PCA) 和正交偏最小二乘法判别分析 (OPLS-DA) 利用 SIMCA 14.1 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生态区‘霞多丽’葡萄果实基本品质分析

志辉地块葡萄果实百粒重最大 (图 1A), 为 158.15 g, 分别比玉泉、御马、西鸽高 18.43%、45.82%、29.22%。西鸽地块可溶性固形物体积分数较高, 为 22.84%, 玉泉最低, 为 21.52%, 4 个地块

之间无显著差异(图1B)。玉泉与西鸽可滴定酸(图1C)、糖酸比(图1D)差异显著( $P<0.05$ )，玉泉可滴定酸较西鸽高43.75%，西鸽糖酸比较玉泉高52.49%。



YQ. 玉泉; YM. 御马; XG. 西鸽; ZH. 志辉。不同字母表示同一果实品质不同地块间差异显著( $P<0.05$ )。

图1 ‘霞多丽’葡萄果实的基本品质

Figure 1 Basic physicochemical indicators of ‘Chardonnay’ grape berry at harvest in different vineyards

## 2.2 不同生态区‘霞多丽’葡萄果实中氨基酸质量浓度分析

从表2可见：4个地块‘霞多丽’葡萄中均检测出17种氨基酸，总量为3 873.65~6 876.62  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其中志辉最高，较玉泉高77.52%；御马、西鸽居中，较玉泉分别高62.86%、59.90%，较志辉分别低9.01%、11.02%。丙氨酸质量浓度最高且变化幅度最大；御马甘氨酸质量浓度最高，较西鸽、志辉和玉泉分别高150.96%、23.50%、47.88%；玉泉脯氨酸质量浓度最低，较西鸽、御马、志辉分别低13.09%、20.17%、44.41%。

表2 不同地块‘霞多丽’葡萄果实中17种氨基酸质量浓度

Table 2 Content of 17 amino acids in ‘Chardonnay’ berry in different plots

氨基酸	不同地块氨基酸质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$			
	玉泉	御马	西鸽	志辉
胱氨酸(Cys)	3.23±0.13 c	5.34±0.17 a	4.94±0.20 ab	4.47±0.50 b
丝氨酸(Ser)	382.16±2.14 b	490.37±1.16 a	428.26±36.84 b	393.93±27.94 b
甘氨酸(Gly)	22.18±0.86 d	32.80±1.44 a	13.07±1.39 b	26.56±1.74 c
苯丙氨酸(Phe)	75.38±0.41 b	74.93±1.78 b	76.46±4.15 b	111.56±6.67 a
酪氨酸(Tyr)	38.04±3.18 b	88.84±13.20 a	82.90±9.92 a	72.81±9.61 a
天冬氨酸(Asp)	204.00±2.37 a	142.00±19.00 b	152.00±6.41 b	129.00±6.57 b
异亮氨酸(Ile)	42.32±2.93 b	47.17±1.66 b	48.73±3.32 b	60.35±5.34 a
赖氨酸(Lys)	47.08±1.07 a	33.62±1.22 b	33.79±1.26 b	35.15±0.22 b
苏氨酸(Thr)	633.75±43.75 a	202.54±23.86 b	215.74±4.56 b	230.22±5.09 b
甲硫氨酸(Met)	13.09±0.94 b	15.62±3.82 a	13.20±1.40 b	15.19±1.60 a
精氨酸(Arg)	383.05±31.63 b	1 109.20±117.73 a	1 056.90±121.30 a	1 256.60±74.25 a
谷氨酸(Glu)	336.98±3.13 b	291.66±24.70 b	390.45±21.72 a	316.74±22.05 b
组氨酸(His)	556.10±6.12 c	506.41±62.06 c	1 003.00±42.08 a	673.08±46.95 b
脯氨酸(Pro)	37.04±0.44 d	44.51±0.28 b	41.89±0.58 c	53.49±1.47 a
缬氨酸(Val)	103.60±0.59 b	98.41±5.63 b	110.76±7.75 b	147.32±11.65 a
亮氨酸(Leu)	26.42±0.66 c	29.34±1.24 bc	30.48±1.29 b	43.54±2.02 a
丙氨酸(Ala)	969.23±84.64 c	3 095.70±80.30 a	2 491.60±346.67 b	3 306.60±198.66 a
总计	3 873.65±80.72 a	6 308.47±250.76 b	6 194.16±46.96 b	6 876.62±30.58 c

说明：不同字母表示同一氨基酸不同地块间差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 不同生态区‘霞多丽’葡萄酒理化指标分析

从表3可见：4个地块葡萄酒残糖、挥发酸均符合GB/T 15037—2006《葡萄酒》干白标准。御马、西鸽葡萄酒酒精度最高，分别为10.63%和10.47%，显著高于玉泉和志辉( $P<0.05$ )。志辉可滴定酸最高，为7.53  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，较御马、西鸽、玉泉分别高12.72%、13.06%、46.78%。

表 3 不同地块‘霞多丽’葡萄酒基本理化指标

Table 3 Basic physicochemical indicators of ‘Chardonnay’ wine in different plots

地块	残糖/(g·L <sup>-1</sup> )	酒精度/%	可滴定酸/(g·L <sup>-1</sup> )	挥发酸/(g·L <sup>-1</sup> )
玉泉	1.78±0.18 a	8.57±0.33 c	5.13±0.23 c	0.47±0.008 a
御马	2.30±0.34 a	10.63±0.51 a	6.68±0.24 b	0.26±0.042 b
西鸽	2.06±0.16 a	10.47±0.52 a	6.66±0.05 b	0.30±0.032 b
志辉	2.39±0.23 a	9.23±0.63 b	7.53±0.19 a	0.35±0.067 b

说明：不同字母表示同一指标不同地块间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.4 不同生态区‘霞多丽’葡萄酒香气物质分析

从表 4 可见：4 个地块葡萄酒挥发性香气物质种类相近，共检测出 57 种，包括 C<sub>6</sub> 醇类 1 种、高级醇类 6 种、脂肪酸乙酯类 15 种、乙酸酯类 2 种、其他酯类 8 种、萜烯类 2 种、醛酮类 8 种、脂肪酸类

表 4 ‘霞多丽’葡萄酒的香气物质质量浓度

Table 4 Aromatic substance content of ‘Chardonnay’ wines

分类	香气物质	不同地块葡萄酒香气物质质量浓度/(μg·L <sup>-1</sup> )			
		玉泉	御马	西鸽	志辉
C <sub>6</sub> 醇类 C <sub>6</sub> -alcohols	正己醇 n-hexanol	1 365.12±127.51 a	773.43±112.62 b	770.49±13.66 b	158.55±0.78 c
	鲸蜡醇 cetyl alcohol	925.69±9.57 a	862.66±5.47 b	ND	86.96±2.40 c
高级醇类 higher alcohols	3-丁烯二醇 3-butenediol	7 305.02±177.13 a	6 754.66±387.74 a	ND	5 888.63±297.83 b
	5-十二烷醇 5-dodecanol	849.53±268.82 a	833.09±229.96 a	ND	170.72±11.39 b
	异戊醇 isopentanol	67 651.73±6 792.64 c	85 388.09±720.55 c	237 743.66±14 376.85 a	111 508.16±11 219.45 b
	苯乙醇 phenethyl alcohol	73 491.50±4 895.14 a	35 308.36±1 865.92 b	36 362.91±104.14 b	7 550.53±466.96 c
	异丁醇 isobutyl alcohol	18 158.39±127.50 a	14 866.24±943.42 a	32 650.00±19 898.02 a	11 118.89±8 538.24 a
	正己酸乙酯 ethyl hexanoate	ND	849.69±71.38 a	ND	713.61±204.60 a
酯类-脂肪酸乙酯 esters-fatty acid ethyl esters	辛酸乙酯 ethyl octanoate	ND	19 395.37±13 892.03 a	7 641.74±62.88 a	3 395.78±1 548.68 a
	癸酸乙酯 ethyl decanoate	8 567.73±4.72 b	16 190.81±3 173.86 a	7 978.28±655.29 b	3 488.91±1 221.37 c
	月桂酸乙酯 ethyl laurate	ND	ND	ND	1 067.36±446.99
	琥珀酸乙酯 ethyl succinate	ND	2 335.67±89.18 a	4 039.50±6.70 a	4 538.05±1 505.90 a
	十四酸乙酯 ethyl tetradecanoate	4 620.70±219.27 a	2 382.70±18.12 c	2 908.18±16.55 b	201.30±55.31 d
	棕榈酸乙酯 ethyl palmitate	14 502.81±7.48 a	4 690.58±103.77 b	1 456.76±196.27 c	693.28±152.69 d
	亚油酸乙酯 ethyl linoleate	ND	3 450.27±45.91 a	2 617.03±90.62 a	3 798.95±507.89 a
	反式-肉桂酸乙酯 ethyl trans-cinnamate	984.33±7.65	ND	ND	ND
	乳酸乙酯 ethyl lactate	2 914.29±652.12 a	1 318.03±221.13 b	788.72±146.54 bc	159.64±14.57 c
	十三酸乙酯 ethyl tridecanoate	ND	53 479.00±41 818.33 a	23 658.25±3 328.17 a	ND
	肉桂酸乙酯 ethyl cinnamate	ND	1 240.47±9.52 a	446.97±26.48 b	ND
	邻苯二甲酸二乙酯 diethyl phthalate	67 008.84±6 023.37 a	39 122.74±7 104.50 b	7 657.22±1 278.17 c	7 694.83±1 317.32 c
	反油酸乙酯 ethyl trans-oleate	10 665.67±341.12 a	12 333.96±7 629.48 a	12 638.43±494.63 a	1 680.52±1 578.52 b
	十一酸乙酯 ethyl undecanoate	2 235.45±26.71 a	ND	ND	3 232.67±801.90 a
	酯类-乙酸酯 ethyl acetate	乙酸苯乙酯 phenethyl acetate	6 987.00±1 052.42 a	5 902.43±2 194.35 a	8 133.66±272.24 a
乙二醇二乙酸酯 diethylene glycol diacetate		ND	ND	ND	2 321.69±1 265.71

表4 (续)

Table 4 Continued

分类	香气物质	不同地块葡萄酒香气物质质量浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )			
		玉泉	御马	西鸽	志辉
其他酯类 other esters	乙酸异戊酯 isoamyl acetate	3 716.37±149.96 a	2 262.06±741.85 b	2 249.03±115.44 b	2 129.83±515.96 b
	癸酸异戊酯 isopentyl decanoate	ND	3 482.61±2 893.20 a	2 081.19±1 382.78 a	259.43±29.32 a
	邻苯二甲酸二甲酯 dimethyl phthalate	65 241.87±6 034.52 a	37 685.92±7 253.61 b	7 643.73±1 320.54 c	8 043.62±1 523.11 c
	乙基-9-癸烯酸酯 ethyl 9-decenoate	3 390.47±1 019.50 b	30 375.67±19 329.30 a	11 010.59±1 651.63 b	4 596.86±397.15 b
	月桂酸异戊酯 isopentyl laurate	ND	2 645.98±78.69 a	1 683.01±942.06 a	ND
	邻苯二甲酸二丁酯 dibutyl phthalate	6 052.05±246.06 a	3 947.72±1 535.43 b	4 006.80±768.02 b	829.80±181.27 c
	4-羟基丁酸乙酰酯 acetyl 4-hydroxybutyrate	2 286.60±77.86 a	ND	ND	188.38±27.08 b
	邻苯二甲酸二异丁酯 diisobutyl phthalate	ND	ND	ND	210.62±99.52
萜烯 terpenes	顺式,反式-金合欢醇 cis,trans-acacodyl alcohol	459.76±19.46	ND	ND	ND
	反式-橙花叔醇 trans-nerolidol	ND	ND	ND	230.60±22.71
醛酮类 aldehydes and ketones	苯乙醛 phenylacetaldehyde	4 244.49±156.94 a	ND	ND	131.31±27.12 b
	5-羟甲基糖醛 5-hydroxymethylglyceraldehyde	3 582.81±3.85 a	ND	ND	1 264.46±102.78 b
	糠醛 furfural	ND	ND	ND	954.01±106.08
	2-甲基-4-甲壬酮 2-methyl-4-methylnonanone	878.38±57.39 a	ND	ND	316.90±51.13 b
	1-戊烯-3-酮 ethyl vinyl ketone	ND	1 155.60±157.79 a	736.63±130.77 b	ND
	3-羟基-2-丁酮 3-hydroxy-2-butanone	10 110.69±390.08 a	ND	ND	404.18±76.62 b
	2(5h)-呋喃酮 2(5h)-furanone	2 580.11±286.21 a	ND	ND	479.68±20.02 b
	2-吡咯烷酮 2-pyrrolidone	976.11±59.04	ND	ND	ND
脂肪酸 fatty acids	辛酸 octanoic acid	8 516.19±388.31 a	6 191.71±5 300.76 a	8 471.96±291.86 a	962.55±259.98 b
	正癸酸 decanoic acid	4 015.64±242.98 a	ND	ND	610.23±44.42 b
	月桂酸 lauric acid	1 932.98±293.18 a	1 268.05±226.11 b	1 569.32±228.88 ab	374.85±236.25 c
	己酸 hexanoic acid	1 325.65±111.82 a	1 849.35±551.47 a	1 298.22±793.79 a	200.86±32.67 b
	9-癸烯酸 9-decenoic acid	883.80±30.15 b	ND	ND	1 039.90±8.48 a
	氰乙酸 cyanoacetic acid	ND	1 266.33±18.35 a	9 287.16±7 969.69 a	ND
	棕榈酸 palmitic acid	3 904.55±58.02 c	6 840.62±79.54 b	7 443.61±100.89 a	1 494.13±239.14 d
	甲酸 formic acid	5 436.64±178.02 a	ND	ND	194.94±8.53 b
	硬脂酸 stearic acid	2 318.63±58.14 a	ND	ND	854.48±15.98 b
	肉豆蔻酸 myristic acid	3 806.42±40.10 a	1 166.18±28.07 d	1 338.41±23.41 c	2 210.63±35.86 b
其他类 others	2,5-二甲酰基呋喃 diformylfuran	1 443.87±96.54 a	ND	ND	151.74±15.87 b
	2,5-二叔丁基酚 2,5-di-tert-butylphenol	200.97±19.52 d	1 193.42±62.82 a	1 075.45±41.35 b	320.65±5.20 c
	苯酚 phenol	596.72±33.35	ND	ND	ND
	2,4-二叔丁基酚 2,4-di-t-butylphenol	ND	ND	ND	85.33±4.03

说明: ND表示未检测出。不同字母表示同一香气物质不同地块间差异显著 ( $P<0.05$ )。

11 种、其他类 4 种。其中 37 种香气物质质量浓度差异显著 ( $P < 0.05$ ), 十四酸乙酯、棕榈酸乙酯、棕榈酸、肉豆蔻酸和 2,5-二叔丁基酚在 4 个地块间差异显著 ( $P < 0.05$ )。二乙二醇二乙酸酯、邻苯二甲酸二异丁酯、反式-橙花叔醇仅存在于志辉葡萄酒中。玉泉十四酸乙酯质量浓度最高, 较西鸽、御马、志辉分别高 58.89%、93.93%、2195.43%; 2,5-二叔丁基酚质量浓度最低, 较志辉、西鸽、御马分别低 37.32%、81.31% 和 83.16%。

聚类分析 (图 2A) 显示: 4 个地块均以高级醇类香气物质为主, 除志辉外, 其余 3 个地块香气物质随着地理位置由南向北逐渐上升。主成分分析 (图 2B) 表明: 贡献率主成分 1 (PC1) 为 54.6%, 主成分 2 (PC2) 为 25.5%, 累计解释总变异为 80.1%, 区分度良好。玉泉葡萄酒样聚于第 4 象限, 志辉位于第 3 象限, 御马与西鸽相近分布于第 1、2 象限。特征物质方面, 西鸽与御马在 PC2 上以除萜烯类等外的其他香气物质为主; 玉泉在 PC1 上以除高级醇类外的其他物质及 PC2 中的萜烯类等为主; 志辉特征物质为 PC1 的高级醇类及 PC2 的萜烯类等, 各酒样差异较小。

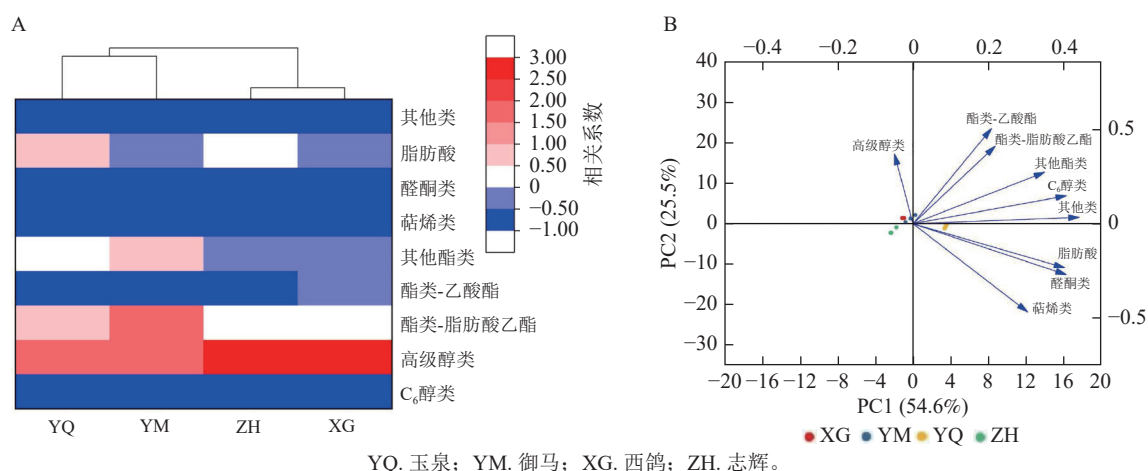


图 2 ‘霞多丽’酒样香气物质类别的聚类热图 (A) 和主成分分析 (B)

Figure 2 Cluster heat map (A) and principal component analysis (B) of aroma substance kinds of ‘Chardonnay’ wine samples

从表 5 可见: 葡萄酒香气物质总质量浓度玉泉为  $494.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 御马为  $410.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 西鸽为  $455.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 志辉为  $230.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 均以高级醇类、脂肪酸乙酯类、其他酯类、脂肪酸类为主要香气物质, 占比相差较大, 高级醇类占比为 34.03%~59.88%, 脂肪酸乙酯类占比为 15.78%~33.92%, 其他酯类占比为 7.07%~18.70%, 脂肪酸类占比为 4.05%~20.01%, 其他物质占比约 4.88%。不同地块醛酮类质量浓度差异显著 ( $P < 0.05$ ), 玉泉最高, 较志辉、御马、西鸽分别高 5.30、18.28、29.23 倍。

## 2.5 葡萄酒香气成分的 OPLS-DA 分析

由图 3 可见: 解释变量 ( $R^2_x$ ) 和预测能力 ( $R^2_y$ ) 分别为 0.931 和 0.992, 分类良好; 预测能力核心指标 ( $Q^2$ ) 为 0.957, 预测能力强。主成分得分 (图 3A) 可知: 4 个地块葡萄酒样明显分为 4 类, PC1 与 PC2 累计贡献率为 68.1%。玉泉聚于 PC1 正向端, 志辉、西鸽位于 PC1 负向端; 御马、西鸽位于 PC2 正向端, 志辉位于 PC2 负向端, 可有效区分。置换图 (图 3B) 显示: 模型无过拟合, 区分能力强, 可有效识别 4 个地块葡萄酒挥发性成分差异。

从变量投影重要性 (VIP) 分布 (图 4) 可知: 8 种  $VIP > 1$  的香气物质为地块区分关键, 其中异戊醇 ( $VIP=3.59$ )、十三酸乙酯 ( $VIP=2.33$ )、乙基 9-癸烯酸酯 ( $VIP=1.65$ )、辛酸乙酯 ( $VIP=1.35$ )、异丁醇 ( $VIP=1.23$ ) 为御马、西鸽的主要特征物质; 苯乙醇 ( $VIP=2.21$ )、邻苯二甲酸二乙酯 ( $VIP=2.06$ )、邻苯二甲酸二甲酯 ( $VIP=2.05$ ) 为玉泉的主要特征物质。这 8 种物质可作为 4 个地块之间香气物质相互区分的主要标志物。

## 2.6 不同生态区环境因素与‘霞多丽’葡萄酒香气物质的关联性分析

将海拔、降水、日照时数、有效积温、平均气温与 8 种  $VIP > 1$  的香气物质进行皮尔逊相关性分析 (图 5) 显示: 环境因子与香气物质存在相关性。十三酸乙酯、乙基 9-癸烯酸酯、辛酸乙酯与环境因子相关显著 ( $P < 0.05$ ), 除降水外与其他环境因子呈显著正相关; 邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯与降

表5 4个地块葡萄酒各类香气物质质量浓度及占比

Table 5 Content and proportion of volatile substances in the wines of the 4 plots

香气类别	不同地块葡萄酒香气物质质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				占比/%			
	玉泉	御马	西鸽	志辉	玉泉	御马	西鸽	志辉
C <sub>6</sub> 醇类	1.37±0.13 a	0.77±0.11 b	0.77±0.01 b	0.16±0.00 c	0.28±0.04 a	0.20±0.06 b	0.17±0.01 b	0.07±0.01 c
高级醇类	168.38±12.00 b	144.01±0.81 c	306.76±5.63 a	136.32±15.01 c	34.03±0.72 b	35.92±6.93 b	67.34±0.02 a	59.88±6.67 a
酯类-脂肪酸乙酯	111.50±5.89 ab	156.79±52.50 a	71.83±3.71 bc	40.63±29.79 c	22.55±0.06 b	33.92±3.74 a	15.78±1.11 b	16.57±8.98 b
酯类-乙酸酯	6.99±1.05 a	5.90±2.19 ab	8.13±0.27 a	2.62±2.66 b	1.41±0.14 a	1.25±0.17 a	1.79±0.03 a	1.03±0.87 a
其他酯类	82.45±7.52 a	81.84±17.47 a	36.82±0.99 b	15.91±1.37 c	16.65±0.69 a	18.70±1.73 a	8.09±0.37 b	7.07±1.48 b
萜烯类	0.46±0.02 a	ND	ND	0.23±0.02 b	0.09±0.01 a	ND	ND	0.10±0.02 a
醛酮类	22.37±0.26 a	1.16±0.16 c	0.74±0.13 d	3.55±0.14 b	4.53±0.17 a	0.27±0.03 c	0.16±0.03 c	1.57±0.26 b
脂肪酸	98.70±1.95 a	18.58±5.95 c	29.41±7.36 b	30.37±1.08 b	20.01±1.40 a	4.05±0.42 c	6.44±1.50 c	13.46±2.19 b
其他类	2.24±0.11 a	1.19±0.06 b	1.08±0.04 b	0.56±0.01 c	0.45±0.00 a	0.30±0.07 b	0.24±0.00 b	0.25±0.05 b

说明：ND 表示未检测到。不同字母表示同一香气物质不同地块间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

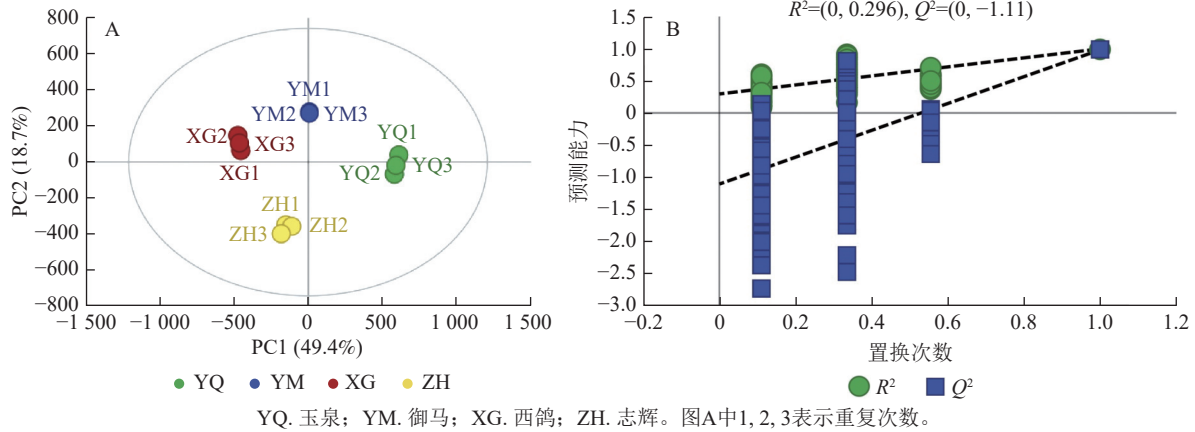


图3 不同地块葡萄酒香气成分正交偏最小二乘得分图(A)和置换图(B)

Figure 3 Score chart (A) and permutation plot (B) of Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis of aroma components in different plots

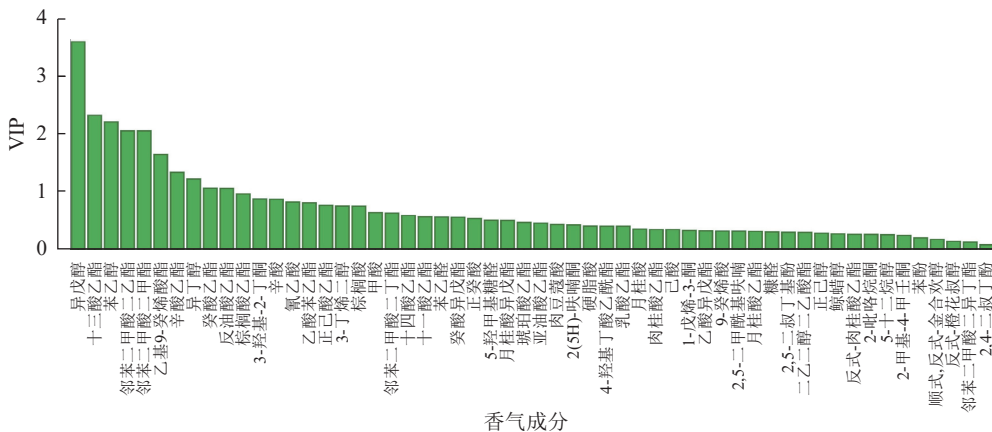


图4 不同地块葡萄酒香气成分正交偏最小二乘VIP图

Figure 4 VIP figure of Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis of aroma components in different plots

水正相关，与其他环境因子负相关。

### 3 讨论

本研究结果显示：不同生态区葡萄酒果实氨基酸总量志辉最高、玉泉最低，这种差异与气候条件密切相关。玉泉灌水、降水量显著高于其他3个地块，同时日照时数又相对较低，这些因素共同导致了葡萄

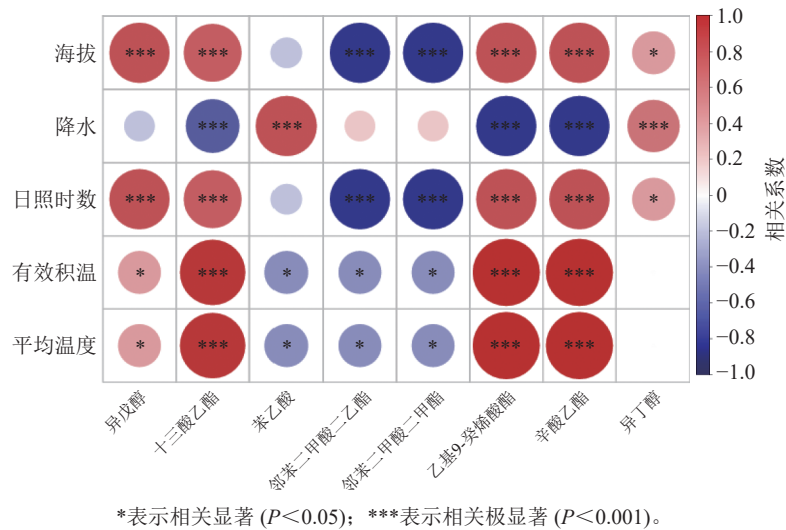


图 5 不同生态区环境因素与葡萄酒香气物质的关联性分析

Figure 5 Correlation analysis between environmental factors and aroma substances in wines from different ecological zones

果实氨基酸质量浓度的差异。日照时数通过影响葡萄叶片光合作用直接调控果实氨基酸的合成与积累<sup>[17]</sup>, 当日照时数不足时, 葡萄植株光合作用减弱, 无法为果实氨基酸的合成提供充足的物质基础和能量; 同时水分过多会改变葡萄植株的生理状态, 影响其养分吸收和分配, 进而干扰氨基酸的合成与积累<sup>[18]</sup>。于惠春等<sup>[19]</sup>发现白色酿酒葡萄主要氨基酸为脯氨酸、精氨酸、丝氨酸、苏氨酸和谷氨酸。甘氨酸和脯氨酸对葡萄酒风味影响最大<sup>[20]</sup>, 本研究则以谷氨酸、丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸为主要氨基酸, 这与于惠春等<sup>[19]</sup>的研究结果相似。付涛等<sup>[21]</sup>研究表明: ‘鄞红’ *V. vinifera* ‘Yinhong’ 葡萄氨基酸总量为  $1\ 350\sim 4\ 860\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与本研究差异较大, 推测不同品种的葡萄在生长发育过程中, 其基因表达和代谢途径存在差异, 从而导致果实中氨基酸质量浓度和组成不同。综上, 葡萄果实氨基酸成分受环境和品种特性的共同影响。

3个产区葡萄酒仅滴定酸与酒精度差异显著, 表明这2个指标对产区差异敏感性较高<sup>[22]</sup>。葡萄酒酒精含量与葡萄果实含糖量正相关, 而含糖量随成熟度逐渐积累<sup>[23]</sup>。同一生态区不同地块(御马、西鸽)葡萄酒理化指标无显著差异, 而不同产区(玉泉、志辉)差异显著 ( $P < 0.05$ ), 说明“风土”对葡萄酒品质具有基础性作用<sup>[24]</sup>。葡萄果实氨基酸对葡萄酒香气形成贡献显著, 发酵阶段谷氨酸消耗高<sup>[25]</sup>, 本研究中谷氨酸对葡萄酒香气贡献度较高, 为葡萄酒香气的形成提供了丰富的前体物质。侯阳阳等<sup>[26]</sup>研究发现: 在葡萄醪中添加苯丙氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸和蛋氨酸等氨基酸, 能够显著提升葡萄酒中的高级醇含量, 进而增强葡萄酒香气的复杂性, 这与本研究结果一致, 即4个地块葡萄果实中丙氨酸质量浓度均最高, 且葡萄酒中高级醇类香气物质占比最高, 这进一步说明丙氨酸与葡萄酒中高级醇含量密切相关。

葡萄酒的香气是其品质的重要体现, 目前已鉴定出近1000种挥发性化合物, 主要分为高级醇、酯类等8类<sup>[27]</sup>。本研究鉴定出57种香气物质, 与左俊伟等<sup>[28]</sup>的研究结果相近, 表明生态条件对香气物质种类的影响有限。在一定范围内, 不同生态区的葡萄酒在香气物质种类上具有一定的共性, 这可能与葡萄品种的遗传特性以及酿酒工艺的相对稳定性有关<sup>[29]</sup>。在本研究中, 4个地块葡萄酒以高级醇类(占比为49.3%)、脂肪酸乙酯类(占比为22.2%)、其他酯类(占比为12.6%)和脂肪酸类(占比为11.0%)为主, 总占比超过95%, 这与陶永胜等<sup>[30]</sup>对‘霞多丽’葡萄酒香气成分的研究结果相符。本研究筛选出了异戊醇、十三酸乙酯、乙基9-癸烯酸酯、辛酸乙酯、异丁醇、苯乙醇、邻苯二甲酸二乙酯和邻苯二甲酸二甲酯这8种关键特征物质, 这与李华等<sup>[31]</sup>的研究结果较为一致, 说明酯类香气贡献率明显高于醇类和酸类。这一结果进一步证实了酯类物质在葡萄酒香气形成中的主导作用, 可能因为酯类化合物具有较低的嗅觉阈值, 能够在较低浓度下显著影响葡萄酒的香气特征。主成分分析可有效区分3个生态区‘霞多丽’葡萄酒特征, 但难以识别同一生态区不同地块差异, 这与孙丽君<sup>[32]</sup>发现的产区之间区分不理想的结果有所不同, 推测葡萄酒的香气特征受品种的影响较大, 不同纬度和地理气候特征的综合影响使得不同

品种葡萄酒之间表现出较好的区分度, 而不同产区之间的香气特征差异则相对较小。这一结果表明: 在葡萄酒香气特征的形成过程中, 品种特性可能起到了更为基础和关键的作用, 而产区环境则在一定程度上对香气特征进行影响。除志辉外, 其余3个地块香气物质质量浓度随着地理位置由南向北递增。这与李媛媛等<sup>[33]</sup>的研究结果较为相似。由于志辉地块距贺兰山较近, 受海拔、光照、辐射和气温等各方面的综合影响, 该地块在纬度上的变化不明显; 同时, 有研究发现: 大马士酮是贺兰山东麓‘赤霞珠’*V. vinifera* ‘Cabernet Sauvignon’葡萄酒花香和果香特性的主要贡献物质<sup>[33]</sup>, 而本研究未检测到大马士酮, 其差异主要源于不同酿酒葡萄品种所赋予的特殊风味物质。这一发现进一步强调了葡萄品种在葡萄酒香气形成中的决定性作用, 不同品种的葡萄由于其独特的代谢途径和风味前体物质, 最终导致了葡萄酒香气特征的显著差异。

## 4 结论

3个产区4个地块葡萄果实丙氨酸质量浓度均最高, 且对‘霞多丽’葡萄酒高级醇类香气物质贡献显著。永宁产区葡萄酒主要风味物质为苯乙醇、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二甲酯; 青铜峡产区葡萄酒主要风味物质为异戊醇、十三酸乙酯、乙基-9-癸烯酸酯、辛酸乙酯、异丁醇; 银川产区葡萄酒的主要特征物质为二乙二醇二乙酸酯、邻苯二甲酸二异丁酯、反式-橙花叔醇。

## 5 参考文献

- [1] STINES A P, GRUBB J, GOCKOWIAK H, *et al.* Proline and arginine accumulation in developing berries of *Vitis vinifera* L. in Australian vineyards: influence of vine cultivar, berry maturity and tissue type[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2000, **6**(2): 150–158. DOI: [10.1111/j.1755-0238.2000.tb00174.x](https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00174.x).
- [2] GUTIÉRREZ-GAMBOA G, CARRASCO-QUIROZ M, MARTÍNEZ-GIL A M, *et al.* Grape and wine amino acid composition from Carignan noir grapevines growing under rainfed conditions in the Maule Valley, Chile: effects of location and rootstock[J]. *Food Research International*, 2018, **105**: 344–352. DOI: [10.1016/j.foodres.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.021).
- [3] CANOURA C, KELLY M T, OJEDA H. Effect of irrigation and timing and type of nitrogen application on the biochemical composition of *Vitis vinifera* L. cv. Chardonnay and Syrah grape berries[J]. *Food Chemistry*, 2018, **241**: 171–181. DOI: [10.1016/j.foodchem.2017.07.114](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.114).
- [4] BOUZAS-CID Y, TRIGO-CÓRDOBA E, ORRIOLS I, *et al.* Influence of soil management on the red grapevine (*Vitis vinifera* L.) mencia must amino acid composition and wine volatile and sensory profiles in a humid region[J]. *Beverages*, 2018, **4**(4): 76. DOI: [10.3390/beverages4040076](https://doi.org/10.3390/beverages4040076).
- [5] GARDE-CERDÁN T, ANCÍN-AZPILICUETA C. Effect of the addition of different quantities of amino acids to nitrogen-deficient must on the formation of esters, alcohols, and acids during wine alcoholic fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, **41**(3): 501–510. DOI: [10.1016/j.lwt.2007.03.018](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.03.018).
- [6] 朱晓琳. 糖苷酶处理葡萄酒酿造过程中香气物质的动态变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. ZHU Xiaolin. *Evolution of Aroma Compounds during Winemaking Process through the Treatment with Glycosidases*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [7] VALERA M J, OLIVERA V, PÉREZ G, *et al.* Impact of phenylalanine on *Hanseniaspora vineae* aroma metabolism during wine fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2024, **415**: 110631. DOI: [10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110631](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110631).
- [8] HE Yang, WANG Xinyuan, LI Penghui, *et al.* Research progress of wine aroma components: a critical review[J]. *Food Chemistry*, 2023, **402**: 134491. DOI: [10.1016/j.foodchem.2022.134491](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134491).
- [9] BERGER R G. *Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 241–267. DOI: [10.1007/978-3-540-49339-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-49339-6).
- [10] LEE S H, SEO M J, RIU M, *et al.* Vine microclimate and norisoprenoid concentration in cabernet sauvignon grapes and wines[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2007, **58**(3): 291–301. DOI: [10.5344/ajev.2007.58.3.291](https://doi.org/10.5344/ajev.2007.58.3.291).
- [11] REYNOLDS A G, LOWREY W D, TOMEK L, *et al.* Influence of irrigation on vine performance, fruit composition, and wine quality of chardonnay in a cool, humid climate[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2007, **58**(2):

- 217–228. DOI: [10.5344/ajev.2007.58.2.217](https://doi.org/10.5344/ajev.2007.58.2.217).
- [12] REYNOLDS A G, SENCHUK I V, VAN DER REEST C, *et al.* Use of GPS and GIS for elucidation of the basis for terroir: spatial variation in an Ontario Riesling vineyard[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2007, **58**(2): 145–162. DOI: [10.5344/ajev.2007.58.2.145](https://doi.org/10.5344/ajev.2007.58.2.145).
- [13] 刘伟, 钟奇, 付伟, 等. 海拔对美乐和赤霞珠葡萄酒中酚类物质含量、抗氧化活性及酯类香气成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, **39**(20): 47–54. LIU Wei, ZHONG Qi, FU Wei, *et al.* Effect of cultivation altitudes on phenolics compounds content, antioxidant activities and ester aromatic components of merlot and cabernet sauvignon wines[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, **39**(20): 47–54. DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.009](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.20.009).
- [14] 李栋梅, 李春阳, 王世平, 等. 不同栽植密度对 ‘霞多丽’ 葡萄光合特性和果实品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, **27**(4): 571–575. LI Dongmei, LI Chunyang, WANG Shiping, *et al.* Effects of different planting densities on chardonnay photosynthetic characteristics and quality[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, **27**(4): 571–575. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2018.04.014](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2018.04.014).
- [15] 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. WANG Yaqin. *Influence of Bunch Exposure on Amino Acid Accumulation in Grape Berries and Volatile Compound Production in Wines*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [16] 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. WEN Yaqin. *Accumulation of Free and Glycosidically-bound Terpenes and Its Transcriptional Regulation in Wine Grapes*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [17] 陈华伟, 乐小凤, 张振文. 长相思葡萄生长发育过程中理化指标及氨基酸含量分析[J]. *中国酿造*, 2021, **40**(4): 33–37. CHEN Huawei, LE Xiaofeng, ZHANG Zhenwen. Analysis of physical and chemical indicators and amino acids contents during the growth and development process of Sauvignon Blanc[J]. *China Brewing*, 2021, **40**(4): 33–37. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2021.04.007](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2021.04.007).
- [18] 陈华伟, 乐小凤, 张振文. 不同棚膜颜色对赤霞珠葡萄果实氨基酸含量的影响[J]. *中国酿造*, 2021, **40**(3): 143–148. CHEN Huawei, LE Xiaofeng, ZHANG Zhenwen. Effects of different colors of rain-shelter plastic films on the amino acid content of Cabernet Sauvignon grape fruit[J]. *China Brewing*, 2021, **40**(3): 143–148. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2021.03.027](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2021.03.027).
- [19] 于惠春, 高菁, 李飞飞, 等. 烟台产区 6 种酿酒白葡萄中氨基酸的测定[J]. *江西科学*, 2016, **34**(2): 173–177. YU Huichun, GAO Jing, LI Feifei, *et al.* Determination of amino acids in different varieties of white wine grapes[J]. *Jiangxi Science*, 2016, **34**(2): 173–177. DOI: [10.13990/j.issn1001-3679.2016.02.008](https://doi.org/10.13990/j.issn1001-3679.2016.02.008).
- [20] NISHIMURA A. Regulations and functions of proline utilization in yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2024, **88**(2): 131–137. DOI: [10.1093/bbb/zbab165](https://doi.org/10.1093/bbb/zbab165).
- [21] 付涛, 吴月燕, 王立如, 等. 鄞红葡萄及其突变体果实氨基酸和香气分析[J]. *核农学报*, 2014, **28**(11): 2038–2050. FU Tao, WU Yueyan, WANG Liru, *et al.* Amino acids and aroma analysis of ‘Yinhong’ and its mutants of *Vitis vinifera* L.[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, **28**(11): 2038–2050. DOI: [10.11869/j.issn.100-8551.2014.11.2038](https://doi.org/10.11869/j.issn.100-8551.2014.11.2038).
- [22] JORDÃO A, VILELA A, COSME F. From sugar of grape to alcohol of wine: sensorial impact of alcohol in wine[J]. *Beverages*, 2015, **1**(4): 292–310. DOI: [10.3390/beverages1040292](https://doi.org/10.3390/beverages1040292).
- [23] SABIR A, KAFKAS E, TANGOLAR S. Distribution of major sugars, acids, and total phenols in juice of five grapevine (*Vitis* spp.) cultivars at different stages of berry development[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2010, **8**(2): 425–433. DOI: [10.5424/sjar/2010082-1186](https://doi.org/10.5424/sjar/2010082-1186).
- [24] 何少华, 都振江, 商华, 等. 贺兰山东麓产区 ‘美乐’ 和 ‘赤霞珠’ 葡萄酒香气特征研究[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2024(1): 55–64. HE Shaohua, DU Zhenjiang, SHANG Hua, *et al.* Study of aroma profile on ‘merlot’ and ‘cabernet sauvignon’ wines in the eastern foot of Helan Mountains[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2024(1): 55–64. DOI: [10.13414/j.cnki.zwpp.2024.01.008](https://doi.org/10.13414/j.cnki.zwpp.2024.01.008).
- [25] BELTRAN G, ESTEVE-ZARZOSO B, ROZÈS N, *et al.* Influence of the timing of nitrogen additions during synthetic grape must fermentations on fermentation kinetics and nitrogen consumption[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, **53**(4): 996–1002. DOI: [10.1021/jf0487001](https://doi.org/10.1021/jf0487001).
- [26] 侯阳阳, 杨哲皓, 张梦瑶, 等. 不同氨基酸对模拟葡萄汁发酵的影响[J]. *中国酿造*, 2021, **40**(10): 95–101. HOU

- Yangyang, YANG Zhehao, ZHANG Mengyao, *et al.* Effects of different amino acids on simulated grape juice fermentation[J]. *China Brewing*, 2021, **40**(10): 95–101. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2021.10.015](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2021.10.015).
- [27] 曹炜玉, 路文鹏, 舒楠, 等. 葡萄酒风味物质及其影响因素研究进展[J]. *中国酿造*, 2022, **41**(5): 1–7. CAO Weiyu, LU Wenpeng, SHU Nan, *et al.* Research progress on wine flavor substances and their influencing factors[J]. *China Brewing*, 2022, **41**(5): 1–7. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2022.05.001](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2022.05.001).
- [28] 左俊伟, 亓相媛, 赵彩云, 等. 宁夏贺兰山东麓产区霞多丽、贵人香干白葡萄酒香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2016, **42**(10): 149–155. ZUO Junwei, QI Xiangyuan, ZHAO Caiyun, *et al.* Analysis on aroma composition in Chardonnay and Riesling dry white wines from eastern region of Ningxia Helan Mountain[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, **42**(10): 149–155. DOI: [10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201610025](https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201610025).
- [29] 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. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2022.02.017](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2022.02.017).
- [30] 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. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.025](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.025).
- [31] 李华, 胡博然, 张予林. 贺兰山东麓地区霞多丽干白葡萄酒香气成分的 GC/MS 分析[J]. *中国食品学报*, 2004, **4**(3): 72–75. LI Hua, HU Boran, ZHANG Yulin. Analysis of aromatic composition in the dry white wine of chardonnay by gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2004, **4**(3): 72–75. DOI: [10.16429/j.1009-7848.2004.03.018](https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2004.03.018).
- [32] 孙丽君. 贺兰山东麓赤霞珠和美乐干红葡萄酒香气典型性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022. SUN Lijun. *Study on the Typical Aroma of Cabernet Sauvignon and Merlot Dry Red Wine from Eastern Foothill of Helan Mountain*[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [33] 李媛媛, 李德美, 张亚东, 等. 赤霞珠干红葡萄酒在不同子产区香气特征的差异[J]. *食品与发酵工业*, 2020, **46**(6): 256–262, 268. LI Yuanyuan, LI Demei, ZHANG Yadong, *et al.* Comparative study of aroma characteristics of Cabernet Sauvignon dry red wine in different sub-regions[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, **46**(6): 256–262, 268. DOI: [10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022313](https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022313).