陈向阳, 杨子怡, 柴菊华, 等. 闪蒸处理对马瑟兰葡萄酒品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 353−364. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060338

CHEN Xiangyang, YANG Ziyi, CHAI Juhua, et al. Effect of Flash Release Treatment on the Quality of Marselan Wines[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 353−364. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060338

· 分析检测 ·

闪蒸处理对马瑟兰葡萄酒品质的影响

陈向阳[1], 杨子怡[1], 柴菊华[1], 崔彦志[2], 雷玉娟[1], 华玉波[2,*], 侍朋宝[1,*]

（1.河北科技师范学院食品科技学院, 河北 秦皇岛 066600;
2.朗格斯酒庄（秦皇岛）有限公司, 河北 秦皇岛 066600）

摘　要: 本研究旨在探究闪蒸处理对陈酿期间马瑟兰葡萄酒品质的影响，以昌黎产区同一批次成熟的马瑟兰葡萄作为原料，分别采用传统和闪蒸工艺酿造马瑟兰葡萄酒，通过比较两种工艺酿造下葡萄酒常规理化指标以及陈酿期间色度色调、酚类物质和香气物质含量变化，全面评价闪蒸处理对葡萄酒品质的影响。结果表明，与传统酿造工艺相比，闪蒸工艺马瑟兰葡萄原酒中残糖由 3.73 g/L 提高至 4.93 g/L，总酸由 6.87 g/L 提高至 7.39 g/L，pH 由 3.78 提高至 3.88，酒精度由 13.96%vol 提高至 14.87%vol，差异均达到显著水平（P<0.05）。闪蒸处理显著提高了陈酿期间葡萄酒的色度，显著降低了陈酿期间葡萄酒的色调（P<0.05）。闪蒸处理显著增加了陈酿期间葡萄酒的总酚、总花色苷、类黄酮以及黄烷醇酚类物质的含量（P<0.05）。在 AAF 阶段，闪蒸马瑟兰葡萄酒酯类物质含量提高了 269.39 mg/L，醇类物质含量降低了 50.29 mg/L，在 6MAAF 阶段，酯类物质含量提高了 278.39 mg/L，醇类物质含量降低了 6.58 mg/L，在 12MAAF 阶段，酯类物质含量提高了 243.03 mg/L，醇类物质含量提高了 22.55 mg/L。闪蒸处理可以显著促进酯类合成，有效抑制醇类生成。闪蒸处理是一种有效的葡萄酒酿造工艺优化手段，对于提升葡萄酒的色泽稳定性、酚类物质以及香气质量具有积极作用。

关键词: 闪蒸处理, 马瑟兰葡萄酒, 理化指标, 陈酿期间, 色度色调, 酚类物质, 香气成分
中图分类号: R155.6+3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0353−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060338　　本文网刊:

Effect of Flash Release Treatment on the Quality of Marselan Wines

CHEN Xiangyang[1], YANG Ziyi[1], CHAI Juhua[1], CUI Yanzhi[2], LEI Yujuan[1], HUA Yubo[2,*], SHI Pengbao[1,*]

（1.College of Food Science and Technology, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, China;
2.Bodega-Langes Co., Ltd., Qinhuangdao 066600, China）

Abstract: The aim of this study was to investigate the effect of flash release treatment on the quality of aged Marselan wines. Mature Marselan grapes from the same batch in Changli production region were used as raw materials and then fermented through traditional method and flash release treatment respectively. The conventional physicochemical indicators, as well as color related indicators, phenolic substances, and aroma components during aging, were compared between the two processes to comprehensively evaluate the impact of flash release treatment on wine quality and aroma characteristics. Results showed that flash release treatment played a significant impact on the quality of Marselan wine (P<0.05) by increasing the content of conventional physicochemical indicators such as residual sugars, the concentration increased from 3.73 g/L to 4.93 g/L, the total acidity rose from 6.87 g/L to 7.39 g/L, the pH climbed from 3.78 to 3.88, and the alcohol content elevated from 13.96%vol to 14.87%vol, improving wine chroma and reducing the color tone, and increasing the content of total phenols, total anthocyanins, flavonoids, and flavanols during aging. During the AAF phase, the ester content in the flash release treated Marselan wine increased by 269.39 mg/L, while the alcohol content decreased by 50.29 mg/L. In

收稿日期: 2025−06−26
基金项目: 秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目（202201B019）。
作者简介: 陈向阳（2001−）, 男, 硕士, 研究方向: 葡萄与葡萄酒学, E-mail: 1597010177@qq.com。
*** 通信作者:** 华玉波（1983−）, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 葡萄与葡萄酒学, E-mail: huayubo-111@163.com。
侍朋宝（1979−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 葡萄与葡萄酒学, E-mail: pengbaoshi@163.com。

the 6MAAF phase, the ester content rose by 278.39 mg/L, and the alcohol content decreased by 6.58 mg/L. For the 12MAAF phase, the ester content increased by 243.03 mg/L, whereas the alcohol content increased by 22.55 mg/L. The flash release treatment could significantly promote ester synthesis and effectively inhibit alcohol production. Therefore, flash release treatment is an effective method for optimizing the wine making process by exerting a positive effect on improving the color stability, phenolic substances, and aroma quality of wine.

Key words: flash release treatment; Marselan wines; physicochemical indicators; during aging; chroma and hue; phenolic substances; aroma components

葡萄酒的品质是其市场竞争力的核心体现，而品质的优劣主要由口感、色泽、香气及营养物质含量等多方面因素共同决定。其中，香气作为葡萄酒给消费者带来的首要感官体验，其物质种类的丰富度与总量直接影响着葡萄酒的风味层次和品鉴价值。酚类物质、多糖、花色苷等营养成分则不仅赋予葡萄酒独特的口感和色泽，更与葡萄酒的抗氧化能力、保健功效及陈酿潜力密切相关[1]。因此，如何通过优化酿造工艺提升葡萄酒的香气品质和营养物质含量，一直是葡萄酒产业研究的核心课题。

闪蒸工艺在葡萄酒产业中的应用最早可追溯至 1993 年，首度由法国酿酒企业引入，该工艺可显著提升葡萄酒的出汁率与营养物质含量，目前只有秦皇岛的朗格斯酒庄配备了完整的闪蒸处理设备[2]。闪蒸工艺作为一种新型的酿造技术，近年来逐渐受到研究者的关注，张哲等[2] 的研究表明，闪蒸工艺可以改善葡萄酒的理化指标并增加总酚和多糖的物质含量。另外，多品种研究一致证实，闪蒸处理可以显著增加葡萄酒单体酚、总酚及花色苷含量，也有学者发现闪蒸后进行浸渍可以显著提高酒中的总酚及单宁含量[3−7]。在香气研究方面，柴菊华等[8] 的研究表明，与传统工艺相比，闪蒸工艺可使品丽珠干红香气物质种类和总量增加。此外，耿彦彦等[5] 和曹芳玲等[9] 发现经闪蒸处理后的葡萄酒感官品质更佳，能有效提升葡萄酒的口感和外观质量。侍朋宝等[4] 的最新研究表明，随着陈酿时间的延长，闪蒸使葡萄酒中多数单体酚含量高于传统酿造的葡萄酒。

昌黎产区作为中国葡萄酒地理标志产区，属半湿润大陆性气候，日照时间长，紫外线适中，有助于葡萄果实中酚类物质的积累[10−12]，为闪蒸技术的应用提供了独特的自然生态基础，有望借助闪蒸技术进一步提升该产区葡萄酒的品质与特色。前期的研究表明闪蒸工艺可以显著提高该产区葡萄酒的酚类物质含量以及香气物质种类[2,4,6,8]，但现有研究主要集中在赤霞珠、品丽珠、美乐、蛇龙珠等传统葡萄品种上，对于马瑟兰这种新兴葡萄品种的研究还相对较少。此外，现有研究主要关注闪蒸处理对葡萄酒中酚类物质和香气成分的影响，但关于闪蒸对葡萄酒陈酿期间色度色调、酚类物质及香气物质含量的影响及闪蒸后葡萄酒陈酿期间色度色调、酚类物质及香气物质含量的变化规律鲜有研究。因此本研究以目前昌黎产区重点栽培品种马瑟兰葡萄为试材，通过对比分析传统酿造工艺与闪蒸工艺下酿造的马瑟兰葡萄酒，深入探讨陈酿期间闪蒸处理对葡萄酒色度色调、酚类物质及香气物质含量的影响，以期为葡萄酒酿造工艺的优化提供科学依据，推动当地葡萄酒产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验所用酿酒葡萄原料为 2018 年采收于朗格斯酒庄（秦皇岛）有限公司的‘马瑟兰’（‘Marselan’）葡萄，葡萄汁总糖含量为 236.0 g/L（以葡萄糖计），总酸含量为 4.79 g/L（以酒石酸计），pH 为 3.99；Fx10 酵母、HE Grand Cru 果胶酶（8600 PGNU/g）、偏重亚硫酸钾　法国 Laffort 公司；Vitilactic 乳酸菌　法国 Lallemand 公司；Jean Vicard Premium 橡木桶（225 L）　法国 Vicard公司。

AUW220 电子分析天平　日本岛津公司；PHS-3EpH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司；UV759 紫外分光光度计　上海佑科仪器仪表有限公司；8860 气相色谱×5977B 质谱、HP-INNOWax 色谱柱（60 m×0.25 nm×0.25 μm）　美国安捷伦科技有限公司；CTC CombiPAL autosampler 多功能自动进样器　瑞士思特斯分析仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　不同葡萄酒的酿造　将葡萄原料分为传统组和闪蒸组 2 组，每组 12 吨。

1.2.1.1　传统组葡萄酒酿造　葡萄经人工筛选后进行除梗破碎，破碎后的葡萄醪输入 15 kL 发酵罐中，期间按 60 mg/L 加量添加偏重亚硫酸钾，间隔 4 h 后加入 HE Grand Cru 果胶酶（30 mg/kg），然后接种活化后的 Fx10 酵母（200 mg/L）启动发酵，发酵过程中温度控制在 22~28 ℃，每天监测发酵比重并循环压帽 2 次，当酒液密度不再下降时分离皮渣，结束发酵。

1.2.1.2　闪蒸组葡萄酒酿造　葡萄分选、除梗破碎方法与传统工艺相同，破碎后的葡萄醪先转移至缓冲罐，转移过程中加入 6% 二氧化硫溶液（使总二氧化硫含量为 60 mg/L），将自流汁转移至加热罐，快速加热至 90 ℃，然后将缓冲罐中的葡萄果粒输送至加热罐，与自流汁进行热交换，保温 15~30 s，随后转移至闪蒸罐，在−95 Pa 的条件下，果粒迅速膨胀，果皮破裂。闪蒸后的葡萄醪降温后转移至 15 kL 发酵罐，接种活化后的酵母启动发酵（方法、用量与传统法相

同），浸渍发酵 2 d 后进行皮渣分离，葡萄酒继续发酵至密度不再下降（浸渍发酵过程中的管理同传统法）。

两组酒样均经过澄清处理后装瓶，进行陈酿。

1.2.1.3　样品采集及保存　本实验传统组和闪蒸组马瑟兰葡萄酒均在酒精发酵结束时（AAF）、酒精发酵结束后 6 个月（6MAAF）和酒精发酵结束后 12 个月（12MAAF）3 个时间点进行取样，每个时间点每处理取样重复 3 次，所有样品均置于−20 ℃ 冰箱中保存待测。

1.2.2　测定指标

1.2.2.1　常规理化指标的测定　参考《葡萄酒、果酒通用分析方法》[13] 测定酒精发酵结束时的总糖（以葡萄糖计）、总酸（以酒石酸计）、pH、酒精度、挥发酸（以乙酸计）、游离 SO_2 含量、总 SO_2 含量。

1.2.2.2　色度色调的测定　参照孙文静等[14] 的方法，测定样品 pH，使用 0.1 mol/L 柠檬酸和 0.2 mol/L 磷酸氢二钠溶液配制溶液，使其 pH 与样品 pH 一致，取 9 mL pH 调配溶液和 1 mL 过滤酒样混匀，以蒸馏水为空白对照，分别在 420、520 和 620 nm 波长处测定样品的吸光度值，其中色度值通过 3 个波长吸光度值的总和乘以 10 计算得出，色调则为 420 nm 与 520 nm 吸光度值的比值。

1.2.2.3　总酚的测定　参照《葡萄酒分析与检验》[15] 的方法。总酚标准曲线制作：精确称取 0.5 g 干没食子酸（120 ℃，3 h），配制 5 g/L 干没食子酸母液，分别取母液 0.5、1.0、1.5、2.0、4.0、5.0、6.0、8.0、10.0 mL 至 100 mL 容量瓶，用蒸馏水定容得到梯度干没食子酸溶液（0.025、0.050、0.075、0.100、0.200、0.250、0.300、0.400、0.500 g/L），取上述各梯度溶液 1 mL，添加 5 mL 福林-肖卡溶液、15 mL 饱和碳酸钠溶液，混匀，用蒸馏水定容至 100 mL，在室温避光条件下反应 120 min，以空白溶液为对照，于 765 nm 波长处测定各梯度样品的吸光值。以总酚浓度为横坐标，吸光值为纵坐标绘制标准曲线，进而获得总酚的标准曲线方程：y=1.2651x−0.0039，R^2=0.9978。

样品测定：移取 0.1 mL 酒样，其余操作参照总酚标准曲线的制作方法执行。

1.2.2.4　总花色苷的测定　参考彭昕等[16] 的方法并稍作调整，取两份 0.2 mL 样品分别至 10 mL 容量瓶中，分别用 pH 为 1.0 的 KCl 缓冲液（0.025 mol/L）和 pH 为 4.5 的 CH_3COONa 缓冲溶液（0.4 mol/L）进行定容，摇匀，避光放置 15 min，以空白为对照，分别在 520 nm 和 700 nm 下测定这两种稀释液的吸光度，葡萄糖总花色苷含量用矢车菊素-3-O-葡萄糖苷（mg/L）表示，并通过下式计算：

$$\text{总花色苷(mg/L)} = \frac{\Delta A \times Mw \times DF \times 1000}{\varepsilon \times L}$$

式中：$\Delta A = (A_{520} - A_{700})pH1.0 - (A_{520} - A_{700})pH4.5$；Mw 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷相对分子质量；DF 为稀释倍数；ε 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的摩尔吸光系数 26900/(mol·cm)；L 为比色皿光程，1 cm。

1.2.2.5　类黄酮的测定　总黄酮的测定参考丛龙蛟等[17] 的方法并稍作调整，总黄酮标准曲线的制作如下：称取 0.025 g 芦丁标准品，加入 95% 乙醇溶解并定容至 50 mL，配制成 0.5 g/L 的芦丁母液。分别移取上述母液 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20 mL 至 25 mL 容量瓶中，定容得到芦丁梯度溶液（0.04、0.08、0.12、0.16、0.20、0.24、0.28、0.32、0.36、0.40 g/L），取上述各梯度溶液 1 mL 至 10 mL 容量瓶，添加 5 mL 三氯化铝溶液（0.1 mol/L），用蒸馏水定容至 10 mL，在室温避光条件下反应 15 min，以空白溶液为对照，于 374 nm 波长处测定各梯度样品的吸光值，获得总黄酮标准曲线方程：y=1.6457−0.0014，R^2=0.9944。样品测定步骤如下：移取 0.1 mL 酒样至 10 mL 容量瓶中，其余操作参照芦丁标准曲线的制作方法执行。

1.2.2.6　黄烷醇的测定　参考 p-DMACA 法[18]。称取适量儿茶素标准品，用甲醇溶解并定容至 1000 μg/mL，制备成储备液，于避光冷藏条件下保存。使用前，用甲醇将储备液稀释为 0、20、40、60、80、100 μg/mL 的系列标准溶液。取各标准溶液 1 mL 于试管中，加入 2 mL p-DMACA 试剂，混匀后室温避光反应 15~30 min。以不含标准品的 p-DMACA 溶液作为空白参比，于 640 nm 波长处测定吸光度，以浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制“浓度-吸光度”标准曲线，获得线性回归方程：y=0.0105x+0.0068，R^2=0.9934。取稀释后的样品溶液 1 mL，按标准曲线步骤加入 p-DMACA 试剂，混匀后反应相同时间，记录样品的吸光度值。

1.2.2.7　葡萄酒香气的测定　样品预处理：将 5 mL 葡萄酒样品、10 μL 内标（4-甲基-2-戊醇，0.1 g/L）和 1.5 g 氯化钠加入 20 mL 顶空瓶中。使用 CTC CombiPAL 自动进样器（CTC Analytics, Zwingen, Switzerland）进行顶空固相微萃取（HS-SPME）。样品瓶在 40 ℃ 条件下加热平衡 30 min，加热槽振摇速度为 450 r/min。然后，将已活化的 SPME 萃取头（50/30 μm DVB/CAR/PDMS, Supelco, Bellefonte, PA, USA）插入样品瓶中，并在 40 ℃ 下萃取吸附 30 min。萃取后，立即将萃取头转移至气相色谱进样口。

GC-MS 条件：载气：高纯度氦气；色谱条件：进样口温度 250 ℃，5∶1 分流模式进样，热解析时间 8 min。气相色谱升温模式为 50 ℃ 保持 1 min，3 ℃/min 速度升温至 220 ℃ 保持 5 min。质谱条件：电子轰击电离源（EI），离子源温度 230 ℃，质谱接口温度 250 ℃，离子能 70 eV，四级杆温度 150 ℃，采用 SCAN 全离子扫描模式，质量扫描范围为 29~350 u。

定性和定量分析：利用自动质谱解卷积定性系统解谱，将峰质谱图与 NIST 2011 标准谱库的质谱

信息进行人工检索匹配，匹配度 80% 以上，并比对 CAS 号，最终确定挥发性化合物的种类。采用内标物半定量法进行定量分析，公式如下：

$$Xi = \frac{Ai}{As} \times \frac{\text{内标物含量}}{\text{加入酒样的体积}}$$

式中：Xi 为待测物的浓度，Ai 为待测物的峰面积，As 为内标物的峰面积。

内标物的含量=内标物的浓度×加入内标的体积

1.3 数据处理

每组实验重复进行 3 次，采用 Excel 软件进行数据处理，采用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析，$P<0.05$ 表示差异显著，采用 OriginPro 2021 软件进行作图以及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 闪蒸处理对葡萄原酒常规理化指标的影响

对闪蒸及传统工艺酒精发酵后的‘马瑟兰’葡萄原酒进行基本理化指标分析，结果见表 1。两种处理原酒的残糖、总酸、pH、酒精度等指标均符合国家标准 GB/T 15037-2006 对干红葡萄酒理化指标的要求。数据显示，与传统工艺相比闪蒸处理使原酒残糖含量显著提高了 32.17%（$P<0.05$）。总酸作为葡萄酒的核心成分之一，在塑造口感与风味的过程中发挥着关键作用，闪蒸处理使葡萄原酒的总酸含量相比传统工艺提高了 7.57%。同时，闪蒸处理使葡萄原酒的 pH、酒精度以及挥发酸含量分别较传统工艺提高了 2.65%、6.52%、19.05%。两种工艺酿造的葡萄酒挥发酸含量均远低于 GB/T 15037-2006《葡萄酒》中的限定要求（≤1.2 g/L），说明葡萄酒卫生状况良好。闪蒸处理的葡萄酒在酒精发酵结束时游离 SO_2 和总 SO_2 含量均高于传统工艺的葡萄酒，说明闪蒸可能更有利于发挥偏重亚硫酸钾的作用。

总体来讲，闪蒸处理可使酒精发酵结束时葡萄原酒残糖、总酸、pH、酒精度等均高于传统工艺，可能是由于闪蒸可使葡萄汁中的水分蒸发，起到了浓缩效应。这些发现与张哲等[2] 的研究结果相同。本研究结果显示，闪蒸处理后葡萄原酒总酸及 pH 均有所升高，与部分文献报道的总酸、pH 降低趋势[4,19] 存在差异，其原因可能与闪蒸工艺条件、葡萄原料特性及前处理方式不同有关。其中 pH 降低可防止酒石酸盐析出，同时提高游离 SO_2 含量以增强杀菌能力，进而提升葡萄酒酒体稳定性。

2.2 闪蒸处理对葡萄酒颜色指标的影响

颜色是评估葡萄酒品质与风格的关键指标，其主要影响因子包括产区、品种、工艺等，红葡萄酒的颜色特征可反映酿造工艺、浸渍强度及陈酿潜力[20−22]。由表 2 可知，传统工艺酿造的葡萄酒随陈酿时间的延长色度较酒精发酵结束时显著降低，闪蒸处理酿造的葡萄酒经 12 个月的陈酿后色度显著增加（$P<0.05$）；两种处理相比，闪蒸处理葡萄酒的色度在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段均显著高于传统工艺酿造葡萄酒（$P<0.05$），分别提高了 7.18%、27.01%、36.64%。色调是葡萄酒颜色的另一个重要指标，色调值越高，则酒样颜色偏黄，反之则偏红[23]。由表 2 可见，随陈酿时间的延长，两种处理所酿葡萄酒的色调均呈增加趋势，即不论传统工艺还是闪蒸工艺酿造的葡萄酒均随着陈酿时间的延长颜色向黄色调转变；两种处理相比，传统处理葡萄酒的色调在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段均显著高于闪蒸工艺组（$P<0.05$），说明与传统工艺相比闪蒸处理的葡萄酒颜色更红。

表 2 闪蒸处理对葡萄酒颜色指标的影响

Table 2 Effect of flash release treatment on wine color indicators

颜色	处理	AAF	6MAAF	12MAAF
色度	传统	7.94±0.03^{a}	6.70±0.03^{c}	6.96±0.01^{b}
	闪蒸	8.51±0.02^{b*}	8.51±0.06^{b*}	9.51±0.02^{a*}
色调	传统	0.66±0.00^{b*}	0.74±0.00^{a*}	0.75±0.00^{a*}
	闪蒸	0.63±0.00^{c}	0.70±0.00^{b}	0.72±0.00^{a}

注：小写字母不同代表相同处理不同取样时间差异显著（$P<0.05$），*代表相同取样时间闪蒸处理与传统处理的相同指标间差异显著（$P<0.05$）。

闪蒸处理可有效提高酒精发酵结束时葡萄酒的色度，但会降低葡萄酒的色调，这与前期的研究结果一致[2−3,6,9,19,24]。另外，本研究还发现，在陈酿 6 个月及 12 个月闪蒸葡萄酒的色度均高于传统工艺的葡萄酒，色调则均低于传统工艺的葡萄酒，这可能与前期工艺中闪蒸罐-95 Pa 低压使果皮细胞破裂，破坏了果皮细胞壁的完整性，显著促进了胞内色素向醪液的溶出有关；同时，闪蒸处理不仅提升初始色素提取量，还可能通过改变色素存在形态增强其储存稳定性，减缓传统处理中色素因氧化、降解导致的色度下降。闪蒸与传统工艺葡萄酒的色调均呈上升趋势，但闪蒸处理的葡萄酒色调值在各阶段均显著低于传统工艺，这可能与闪蒸使果皮中易溶且色调更优的游离态花色苷浸出较多有关，而传统处理色素提取效率较低，且易混入少量褐变色素（如酚酸氧化产物）。整体来讲，可推测为闪蒸处理通过低压破坏果皮细胞，提升

表 1 闪蒸处理对葡萄原酒常规理化性质的影响

Table 1 Effect of flash release treatment on the routine physical and chemical indexes of wine after alcohol fermentation

处理	残糖（g/L）	总酸（酒石酸计，g/L）	pH	酒精度（%vol）	挥发酸（乙酸计，g/L）	游离SO_2（mg/L）	总SO_2（mg/L）
传统	3.73±0.02	6.87±0.01	3.78±0.01	13.96±0.01	0.21±0.01	18.67±0.58	54.33±0.58
闪蒸	4.93±0.06*	7.39±0.01*	3.88±0.01*	14.87±0.01*	0.25±0.01*	30.67±1.15*	61.00±1.73*

注：*代表闪蒸处理与传统处理的相同指标间差异显著（$P<0.05$）。

初始色素提取量，同时促进色素-大分子复合物形成，起到增强储存稳定性的作用，显著改善葡萄酒色度（各时间点提升 7.18%~36.64%）与色调品质（前期红色调更鲜艳，后期劣变更缓慢）；传统处理则色素提取效率低、稳定性较差。

2.3　闪蒸处理对葡萄酒中总酚含量的影响

葡萄酒中的酚类物质，对人体健康具有保护作用，可以赋予葡萄酒抗氧化、抗炎及心血管保护等健康功效，在构建葡萄酒的“骨架”方面也起着重要作用[25−26]。由图 1 可知，传统工艺酿造的葡萄酒在 12MAAF 时的总酚含量（3351.11 mg/L）显著高于 AAF（3121.48 mg/L）和 6MAAF（2965.92 mg/L）阶段（P<0.05），而 AAF 与 6MAAF 阶段的总酚含量无显著差异。闪蒸工艺下的总酚含量，随着陈酿时间的延长，AAF、6MAAF 与 12MAAF 之间的差异并不显著，整体变化幅度不大，说明在闪蒸工艺下，总酚含量在陈酿过程中相对稳定。两种处理相比，经闪蒸工艺处理的马瑟兰葡萄酒在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段的总酚含量均显著高于传统工艺（P<0.05），较传统工艺葡萄酒分别提高了 13.65%、21.73% 和 5.19%。此结果与前人研究结果一致[2,6−7]。可能原因为，闪蒸通过高温使葡萄果实中的氧化酶迅速变性失活，一方面有效抑制了酒精发酵及陈酿期间酚类物质的氧化降解，减少其损失；另一方面，高温真空环境可破坏葡萄果皮、果肉细胞壁结构，促进胞内酚类物质更充分溶出，使得酒精发酵结束时总酚含量显著高于传统工艺。同时，破壁效应使酚类溶出与降解速率趋于平衡，在后续陈酿过程中总酚含量也较传统工艺更加稳定。

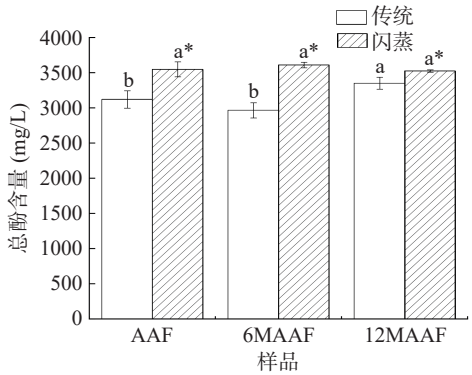


图 1　闪蒸处理对葡萄酒中总酚含量的影响

Fig.1　Effect of flash release treatment on total phenolic content in wine

注：不同小写字母表示不同取样时间相同处理间差异显著（P<0.05），*表示相同取样时间不同处理间差异显著（P<0.05），图 2~图 4 同。

2.4　闪蒸处理对葡萄酒总花色苷含量的影响

花色苷的主要来源是葡萄果皮，是一类重要的水溶性植物色素，对评估葡萄酒颜色稳定性至关重要[27−29]。由图 2 可知，传统工艺酿造的马瑟兰葡萄酒总花色苷含量随着陈酿时间的延长呈现降低趋势，AAF 阶段花色苷含量为 208.42 mg/L，之后随着陈酿时间延长，到 6MAAF 阶段花色苷含量为 175.08 mg/L，12MAAF 阶段花色苷含量进一步降到 140.71 mg/L，且各取样点间差异显著（P<0.05），说明陈酿时间对该葡萄酒花色苷影响较大；闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒在陈酿的前 6 个月内总花色苷含量变化不显著，AAF 阶段的花色苷含量是 230.60 mg/L，6MAAF 阶段是 231.18 mg/L，AAF 阶段与 6MAAF 阶段差异不显著，6MAAF 至 12MAAF 阶段（147.17 mg/L）呈显著降低趋势（P<0.05），说明闪蒸工艺在短时间内对葡萄酒花色苷有一定的保持作用，但时间延长后保持作用明显减弱。两种工艺相比，经闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段的总花色苷含量均显著高于传统工艺（P<0.05），较传统工艺葡萄酒分别提高了 10.64%、32.04%、4.59%。此结果与前人研究结果一致[2,7]，可能原因为闪蒸抑制了氧化酶活性，减少了陈酿过程中花色苷的氧化聚合，延缓色泽衰退。从本研究结果可见，自 6MAAF 至 12MAAF 阶段花色苷出现明显降解，表明葡萄酒在长期陈酿中花色苷的自然降解难以完全避免，但闪蒸处理通过使氧化酶提前失活，有效阻断了花色苷在后期的大幅降解路径，显著提升色泽成分稳定性，对葡萄酒在一定时间内保持鲜亮红色具有重要价值。

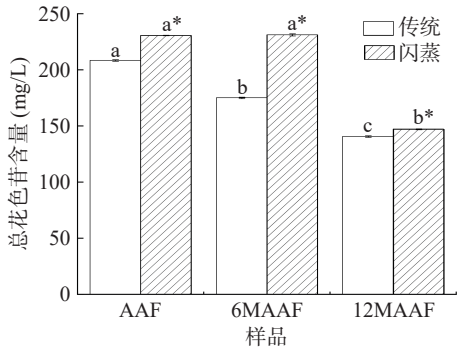


图 2　闪蒸处理对葡萄酒花色苷类物质含量的影响

Fig.2　Effect of flash release treatment on the content of anthocyanins in wine

2.5　闪蒸处理对葡萄酒类黄酮含量的影响

据报道，类黄酮可以通过改善血液循环的方式来对抗癌症，其包括原花青素（PA）、花青素和黄酮醇，是重要的次级代谢物，有助于提高葡萄浆果和葡萄酒的营养价值和感官质量，在酿酒葡萄的形成和葡萄酒品质特性中起着重要作用[30−32]。由图 3 可知，随着陈酿的进行，传统工艺酿造的马瑟兰葡萄酒的类黄酮含量呈先降低再升高的趋势，并且在 AAF（1976.67 mg/L）阶段的类黄酮含量显著高于 6MAAF（1755.61 mg/L）和 12MAAF（1829.3 mg/L）阶段（P<0.05），各取样点之间差异显著（P<0.05）；闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒类黄酮含量随着陈酿时间的延长呈先增加后降低的趋势，6MAAF 阶段

(2483.68 mg/L)的类黄酮含量显著高于其他阶段(P<0.05)。两种工艺相比,经闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段的类黄酮含量均显著高于传统工艺(P<0.05),较传统工艺葡萄酒分别提高了 8.25%、41.47%、33.37%。出现以上变化趋势,可能是因为传统工艺葡萄酒在储存过程中类黄酮与氧气、乙醛反应生成聚合物,或被氧化酶降解为小分子化合物。闪蒸处理葡萄酒因闪蒸对酶的抑制作用,降低氧化酶活性减少类黄酮氧化损失,同时破壁效应促进结合态类黄酮溶出,缓解含量下降,对维持葡萄酒健康价值具有重要作用。

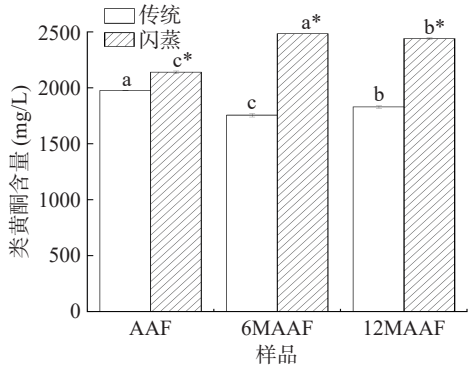


图 3 闪蒸处理对葡萄酒中类黄酮含量的影响

Fig.3 Effect of flash release treatment on the flavonoid content in wine

2.6 闪蒸处理对葡萄酒黄烷醇含量的影响

黄烷醇是葡萄单宁的组成部分,直接影响葡萄酒口感的复杂性,其感官特征以苦味、涩味以及结构感为主[33]。由图 4 可知,传统工艺酿造的马瑟兰葡萄酒黄烷醇含量呈先降低后增加的趋势,12MAAF 阶段黄烷醇含量显著高于其他阶段(P<0.05),从 AAF 阶段的 249.87 mg/L,降到 6MAAF 阶段的 231.45 mg/L,12MAAF 阶段又升高到 259.85 mg/L,和总酚类似;闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒黄烷醇含量呈先升高后降低的趋势,从 AAF 阶段的 407.12 mg/L,到 6MAAF 阶段达到最高(468.19 mg/L),12MAAF 阶段降至 436.44 mg/L。两种工艺相比,经闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒在 AAF、6MAAF 和 12MAAF 阶段的黄烷醇含量均显著高于传统工艺(P<0.05),较传统工艺葡萄酒分别提高了 62.93%、110.06%、67.96%。以上结果的原因可能为,传统工艺葡萄酒游离态黄烷醇在氧化酶作用下快速聚合为原花青素,或与花色苷形成复合物,导致游离态检测量下降;对于闪蒸葡萄酒,虽闪蒸无法阻止黄烷醇非酶促聚合,但通过抑制酶活性减少氧化驱动的聚合速率,延缓游离态黄烷醇损失,可能对维持葡萄酒口感平衡具有积极意义。

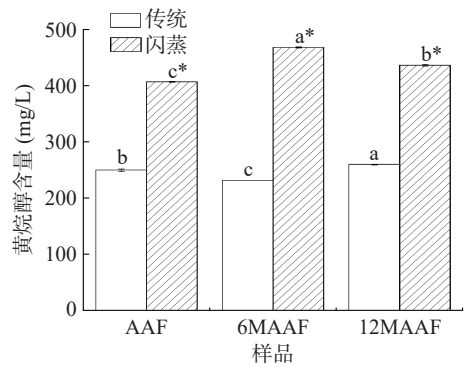


图 4 闪蒸处理对葡萄酒中黄烷醇含量的影响

Fig.4 Effect of flash release treatment on the content of flavanols in wine

2.7 闪蒸处理对葡萄酒挥发性香气物质的影响

葡萄酒的香气是影响其质量和商业价值的关键因素,这些香气物质来自于挥发性化合物间复杂的相互作用,它们显著影响其整体质量和感官品质[34−35]。河北昌黎产区酿造的葡萄酒香气通常表现为菠萝、香蕉、柑橘等气味特征[12],先前的研究已经在葡萄酒中鉴定出 1300 多种芳香族化合物,包括醇类、酯类、醛类和萜烯类[36]。与传统酿造工艺相比,闪蒸处理可通过高温和真空过程快速破坏葡萄细胞壁,从而更有效地提取香气物质。

2.7.1 闪蒸处理对葡萄酒酯类挥发性物质的影响

葡萄酒的香气成分会随着陈酿时间发生变化[37],由表 3 数据,整个陈酿阶段闪蒸工艺酯类较传统工艺种类更多、总量占比更高,AAF 阶段传统工艺酒的酯类总量为 351.21 mg/L,闪蒸工艺酒则达 620.60 mg/L,后者酯类总量约为前者的 1.8 倍;6MAAF 阶段传统工艺酒的酯类总量为 297.06 mg/L,闪蒸工艺酒为 575.45 mg/L,后者酯类总量约为前者的 1.9 倍;12MAAF 阶段传统工艺酒的酯类总量为 292.36 mg/L,闪蒸工艺酒为 535.39 mg/L,后者酯类总量同样约为前者的 1.8 倍。整体来看,在整个陈酿周期内,闪蒸工艺可使酒品酯类总量稳定保持在传统工艺的 1.8~1.9 倍,酯类物质保留优势显著,印证闪蒸工艺对酯类积累的促进作用,这与柴菊华等[8] 的研究相吻合。闪蒸工艺通过短时高温处理,可能破坏葡萄原料中酯类分解酶活性,减少酯类降解;同时促进醇与酸的酯化反应,生成传统工艺中难以形成的酯类(如水杨酸乙酯、乙酸香叶酯),进而增加酯类种类与总量[38]。

有研究发现[39−41],酯类化合物作为葡萄酒酒精发酵的副产物,是酒体果香(如苹果、香蕉、柑橘香气)的主要贡献物质,其生成与稳定性直接影响香气的复杂性和感官品质,高浓度的酯类化合物可以赋予葡萄酒独特的香气特性。闪蒸酒更高的酯类占比和更丰富的种类,能赋予酒体更浓郁、复杂的香气层次(如乙酸-3-甲基丁酯带香蕉香,其含量高,可强化果香);虽部分酯类含量略低,但新增酯类可弥补风味缺口,整体提升香气品质。

以上结果表明,传统工艺葡萄酒在陈酿前期风味略有变淡,后期香气复杂度与浓郁度虽有所回升,但酯类组成易随陈酿时间发生明显变化,整体风味层

表 3　闪蒸处理对葡萄酒挥发性香气物质的影响

Table 3　Effect of flash release treatment on the volatile aroma compounds of wine

序号	化合物名称	分子式	分子量	含量(mg/L)					
				传统酒			闪蒸酒		
				AAF	6MAAF	12MAAF	AAF	6MAAF	12MAAF
	酯类								
1	丁内酯	$C_4H_6O_2$	86	0.16±0.01^{a}	0.12±0.00^{b}	0.17±0.02^{a}	0.17±0.03^{b}	0.18±0.03^{b*}	0.35±0.06^{a*}
2	正己酸乙酯	$C_8H_{16}O_2$	144	65.17±2.34^{a}	46.65±18.07^{c*}	52.91±5.45^{b*}	85.99±0.95^{a*}	42.97±2.22^{c}	50.55±0.60^{b}
3	乙酸己酯	$C_7H_8O_3$	144	1.12±0.23^{a}	0.76±0.10^{b}	0.64±0.20^{b}	3.23±0.00^{a*}	2.43±0.00^{b*}	1.85±0.23^{c*}
4	2-己烯酸乙酯	$C_8H_{14}O_2$	142	0.19±0.03^{a*}	0.10±0.01^{b}	0.17±0.02^{a*}	0.07±0.00^{a}	0.08±0.01^{a}	0.08±0.01^{a}
5	2-糠酸乙酯	$C_7H_8O_3$	140	0.02±0.00^{c}	0.06±0.01^{b}	0.14±0.01^{a}	0.11±0.01^{b*}	0.08±0.01^{b}	0.17±0.03^{a*}
6	2-羟基己酸乙酯	$C_8H_{16}O_3$	160	0.09±0.00^{b}	0.09±0.00^{b}	0.99±0.00^{a*}	0.18±0.04^{c*}	0.28±0.01^{b*}	0.52±0.04^{a}
7	辛酸甲酯	$C_9H_{18}O_2$	158	0.82±0.07^{a*}	0.86±0.15^{a*}	0.56±0.02^{b}	0.80±0.08^{a}	0.81±0.12^{a}	0.63±0.07^{b*}
8	苯甲酸乙酯	$C_9H_{10}O_2$	150	0.07±0.02^{b}	0.14±0.01^{a}	0.14±0.06^{a}	0.12±0.00^{a*}	0.15±0.02^{a}	0.15±0.02^{a}
9	丁二酸二乙酯	$C_8H_{14}O_4$	174	1.20±0.13^{c}	11.16±4.22^{b*}	39.71±13.41^{a*}	2.29±0.19^{c*}	10.44±1.21^{b}	34.19±11.55^{a}
10	水杨酸甲酯	$C_8H_8O_3$	152	1.35±0.26^{c}	3.17±0.07^{b}	4.50±0.54^{a}	1.49±0.06^{c*}	5.71±0.38^{b*}	10.94±0.71^{a*}
11	辛酸乙酯	$C_{10}H_{20}O_2$	172	198.71±9.55^{a}	178.24±30.94^{a}	142.82±9.59^{b}	232.87±55.85^{a*}	228.86±15.76^{a*}	190.72±16.40^{b*}
12	苯乙酸乙酯	$C_{10}H_{12}O_2$	164	0.13±0.02^{b}	0.13±0.02^{b}	0.22±0.05^{a}	0.09±0.13^{c}	0.18±0.01^{b}	0.27±0.03^{a*}
13	反式-3-甲基-4-辛内酯	$C_9H_{20}O$	144	0.12±0.01^{b}	0.19±0.06^{b}	0.42±0.05^{a}	0.64±0.13^{c*}	1.03±0.08^{b*}	1.59±0.15^{a*}
14	辛酸丙酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	0.25±0.04^{a*}	0.18±0.00^{b}	0.19±0.01^{b}	0.13±0.16^{b}	0.29±0.02^{a*}	0.29±0.01^{a*}
15	壬酸乙酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	0.23±0.01^{a*}	0.24±0.05^{a}	0.22±0.00^{a}	0.09±0.11^{b}	0.38±0.05^{a*}	0.41±0.04^{a*}
16	正辛酸异丁酯	$C_{12}H_{24}O_2$	200	0.09±0.01^{a}	0.05±0.00^{b}	0.06±0.01^{b}	0.08±0.01^{a}	0.10±0.02^{a*}	0.11±0.00^{a*}
17	3,7-二甲基-6-辛烯乙酸酯	$C_{12}H_{22}O_2$	198	0.08±0.03^{a}	0.01±0.00^{c}	0.05±0.01^{b}	0.12±0.02^{b}	0.21±0.01^{a*}	0.14±0.03^{b*}
18	癸酸甲酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	1.27±0.08^{a*}	0.19±0.00^{b}	0.08±0.02^{b}	0.47±0.69^{c}	0.69±0.09^{b*}	0.81±0.41^{a*}
19	癸酸乙酯	$C_{12}H_{24}O_2$	200	46.37±0.30^{a}	27.50±1.29^{c}	31.84±1.52^{b}	56.88±1.04^{c*}	65.58±2.49^{b*}	81.51±6.87^{a*}
20	乙基9-癸烯酸酯	$C_{12}H_{22}O_2$	198	0.28±0.26^{c}	0.46±0.07^{b}	0.61±0.06^{a}	0.43±0.47^{b*}	1.86±0.22^{a*}	2.07±0.21^{a*}
21	十二酸乙酯	$C_{14}H_{28}O_2$	228	1.00±0.00^{c}	1.48±0.03^{b}	1.70±0.21^{a}	2.52±0.17^{c*}	3.76±0.24^{b*}	4.05±0.01^{a*}
22	十六酸乙酯	$C_{18}H_{36}O_2$	284	0.23±0.12^{a*}	0.19±0.02^{a}	0.06±0.01^{b}	0.08±0.00^{b}	0.26±0.01^{a}	0.23±0.02^{a*}
23	乙酸-3-甲基丁酯	$C_8H_{14}O_2$	142	27.71±1.97^{a}	20.78±0.58^{b}	6.74±0.14^{c}	226.59±8.69^{a*}	201.97±21.08^{b*}	150.19±2.00^{c*}
24	乳酸乙酯	$C_5H_{10}O_3$	118	4.40±0.15^{b*}	3.89±2.22^{b}	6.65±1.66^{a*}	3.82±0.58^{b}	6.38±0.20^{a*}	1.58±0.09^{c}
25	乳酸异戊酯	$C_8H_{16}O_3$	160	0.14±0.02^{c}	0.29±0.04^{b}	0.73±0.18^{a}	0.51±0.04^{b*}	0.35±0.04^{b}	1.69＋0.16^{a*}
26	水杨酸乙酯	$C_9H_{10}O_3$	166	0.02±0.01^{c}	0.11±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}	0.14±0.01^{a*}	0.07±0.00^{b}	0.14±0.01^{a}
27	乙酸庚酯	$C_9H_{18}O_2$	158	–	–	–	0.44±0.05^{a*}	0.17±0.03^{b*}	0.02±0.00^{c*}
28	乙酸苄酯	$C_9H_{10}O_2$	150	–	–	–	0.03±0.02^{a*}	0.05±0.01^{a*}	0.05±0.01^{a*}
29	乙酸香叶酯	$C_{12}H_{20}O_2$	196	–	–	–	0.20±0.01^{a*}	0.16±0.02^{b*}	0.08±0.02^{c*}
	小计			351.21	297.06	292.36	620.60	575.45	535.39
30	3-甲基-1-丁醇	$C_5H_{12}O$	88	24.66±5.62^{a*}	14.56±0.76^{c*}	20.11±7.23^{b}	5.74±2.00^{b}	3.94±2.07^{b}	19.33±0.85^{a}
31	2,3-丁二醇	$C_4H_{10}O_2$	90	1.78±0.19^{b}	5.13±0..53^{a*}	1.38±0.62^{b}	4.68±1.12^{b*}	4.45±0.07^{b}	6.29±0.23^{a*}
32	4-甲基-1-戊醇	$C_6H_{14}O$	102	0.52±0.27^{b*}	0.69±0.02^{a*}	0.48±0.11^{b*}	0.43±0.12^{a}	0.17±0.05^{c}	0.32±0.08^{b}
33	3-甲基-1-戊醇	$C_6H_{14}O$	102	1.12±0.61^{a*}	0.66±0.34^{c*}	1.10±0.57^{a*}	0.15±0.09^{c}	0.50±0.20^{b}	0.86±0.06^{a}
34	顺式-3-己烯-1-醇	$C_6H_{12}O$	100	0.28±0.12^{b*}	0.47±0.06^{a*}	0.27±0.05^{b}	0.10±0.00^{b}	0.29±0.09^{a}	0.28±0.26^{a}
35	1-己醇	$C_6H_{14}O$	102	11.70±0.89^{b*}	20.39±0.29^{a}	11.21±0.21^{b}	11.11±0.38^{c}	22.57±0.77^{a*}	16.02±0.41^{b*}
36	3-甲硫基丙醇	$C_4H_{10}OS$	106	0.09±0.00^{b*}	0.24±0.08^{a*}	0.08±0.00^{b*}	–	–	–
37	1-庚醇	$C_7H_{16}O$	116	0.37±0.03^{b*}	0.56±0.00^{a*}	0.57±0.15^{a}	0.03±0.01^{c}	0.39±0.01^{b}	0.50±0.05^{a}
38	2-乙基己醇	$C_8H_{18}O$	130	0.27±0.01^{c*}	0.53±0.06^{b*}	0.71±0.01^{a*}	0.01±0.01^{b}	0.35±0.09^{a}	0.26±0.07^{a}
38	1-辛醇	$C_8H_{18}O$	130	1.84±0.51^{a*}	1.80±0.42^{a*}	1.71±0.25^{b*}	0.54±0.73^{b}	1.51±0.30^{c}	1.57±0.10^{a}
40	里那醇	$C_{10}H_{18}O$	154	0.49±0.05^{c*}	0.79±0.04^{b*}	1.26±0.26^{a}	0.05±0.00^{c}	0.64±0.03^{b}	1.57±0.08^{a*}
41	1-壬醇	$C_9H_{20}O$	144	0.28±0.03^{b*}	0.43±0.06^{a}	0.57±0.01^{a}	0.03±0.01^{c}	0.75±0.17^{b*}	1.03±0.02^{a*}
42	苯乙醇	$C_8H_{10}O$	122	50.93±6.22^{a*}	43.60±14.67^{b}	38.24±10.22^{c}	22.05±9.67^{b}	47.35±6.48^{a*}	51.54±10.33^{a*}
43	5-甲基-5-壬醇	$C_{10}H_{22}O$	158	0.32±0.08^{b*}	0.42±0.10^{a}	0.31±0.13^{b}	0.12±0.14^{b}	0.43±0.06^{a}	0.53±0.08^{a*}
44	4-萜烯醇	$C_{10}H_{18}O$	154	1.03±0.45^{b*}	0.89±0.06^{c*}	1.26±0.28^{a}	0.04±0.01^{c}	0.42±0.04^{b}	1.11±0.02^{a}
45	1-癸醇	$C_{10}H_{22}O$	158	0.53±0.20^{a*}	0.26±0.03^{b*}	0.42±0.12^{a*}	0.12±0.15^{a}	0.06±0.01^{b}	0.12±0.01^{a}
46	香茅醇	$C_{10}H_{20}O$	156	0.24±0.02^{b*}	0.39±0.28^{a}	0.23±0.00^{b}	0.19±0.00^{c}	0.53±0.07^{a*}	0.39±0.08^{b*}
47	苯甲醇	C_7H_8O	108	0.07±0.00^{b}	0.08±0.00^{b}	0.31±0.22^{a}	0.85±0.00^{c*}	0.97±0.02^{b*}	1.07±0.01^{a*}
	小计			96.53	91.88	80.24	46.24	85.30	102.79
48	苯甲醛	C_7H_6O	106	0.16±0.04^{a}	0.01±0.00	0.11±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}	0.01±0.00^{b}	0.15±0.04^{a}

续表 3

序号	化合物名称	分子式	分子量	含量(mg/L)					
				传统酒			闪蒸酒		
				AAF	6MAAF	12MAAF	AAF	6MAAF	12MAAF
49	苯乙醛	C_8H_8O	120	0.12±0.01^{a*}	0.11±0.01^{a}	0.03±0.01^{b}	0.01±0.00^{b}	0.08±0.01^{a}	0.09±0.01^{a*}
50	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	156	0.46±0.09^{b*}	0.74±0.01^{a*}	0.57±0.10^{b}	0.04±0.00^{c}	0.57±0.10^{b}	0.86±0.20^{a*}
51	3-糠醛	$C_5H_4O_2$	96	0.76±0.39^{b*}	12.50±2.15^{a*}	1.43±0.31^{b*}	–	1.34±0.10	–
52	5-甲基呋喃醛	$C_6H_6O_2$	110	–	1.95±0.77^{a*}	0.39±0.01^{b*}	–	0.75±0.19^{a}	0.29±0.02^{b}
53	十二醛	$C_{12}H_{24}O$	184	–	0.08±0.01	–	0.01±0.02^{c*}	0.07±0.02^{b}	0.17±0.05^{a*}
	小计			1.50	15.39	2.53	0.19	2.82	1.56
54	4-辛酮	$C_8H_{16}O$	128	2.58±0.12^{a*}	2.57±0.02^{a}	2.42±0.12^{a}	1.68±2.49^{b}	2.68±0.29^{a*}	2.50±0.09^{a}
55	反式-5-丁基二氢-4-甲基-2(3H)-呋喃酮	$C_9H_{16}O_2$	156	0.05±0.00^{b*}	0.10±0.01^{b}	0.31±0.04^{a}	–	0.25±0.07^{b*}	0.79±0.17^{a*}
56	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	$C_{13}H_{22}O$	194	0.08±0.02^{b*}	0.36±0.10^{a*}	0.31±0.01^{a*}	–	0.13±0.00	–
57	植酮	$C_{18}H_{36}O$	268	0.05±0.01^{a*}	0.06±0.02^{a}	0.04±0.02^{a}	–	0.08±0.01^{a}	0.07±0.01^{a}
58	大马仕酮	$C_{13}H_{18}O$	190	–	1.39±0.10^{a*}	1.17±0.37^{b*}	0.56±0.09^{b*}	0.73±0.12^{a}	0.83±0.10^{a}
	小计			2.77	4.48	4.25	2.24	3.87	4.18
59	十一酸	$C_{11}H_{22}O_2$	186	3.57±1.70*	–	–	0.01±0.01^{b}	0.28±0.02^{a*}	–
60	十四酸	$C_{14}H_{28}O_2$	228	0.07±0.01^{b}	–	0.18±0.06^{a}	0.03±0.01^{c}	0.09±0.05^{b*}	0.16±0.01^{a}
61	十六酸	$C_{16}H_{32}O_2$	256	0.04±0.00^{b}	0.36±0.13^{a*}	0.05±0.04^{b*}	0.14±0.02^{a*}	0.10±0.01^{a}	–
62	辛酸	$C_8H_{16}O_2$	144	–	3.66±0.07	–	0.81±0.25^{c*}	5.24±1.50^{a*}	2.48±2.12^{b*}
	小计			3.69	4.02	0.23	1.00	5.71	2.64
	总计			455.70	412.82	379.60	670.27	673.15	646.57

注: –表示未检出, 不同小写字母表示不同取样时间相同处理间差异显著(P<0.05), *表示相同取样时间不同处理间差异显著(P<0.05)。

次与稳定性较弱。闪蒸工艺葡萄酒在陈酿过程中虽酯类总量略有下降, 但酯类种类始终丰富, 核心风味酯类含量稳定, 香气浓郁度与复杂度的持久性优于传统工艺, 风味稳定性更强。闪蒸工艺可通过抑制酯类分解、促进新酯生成, 显著增加葡萄酒酯类的种类与总量, 并在长期陈酿中更好地维持酯类组成稳定; 而传统工艺对酯类的保护作用较弱, 其含量与组成易受陈酿影响而波动。整体而言, 闪蒸工艺可通过优化酯类组成, 有效提升葡萄酒香气品质。

2.7.2 闪蒸处理对葡萄酒醇类挥发性物质的影响

有研究表明, 多数醇类物质带有不悦气味, 对葡萄酒的香气品质具有负面作用[42]。整个陈酿阶段传统工艺较闪蒸工艺醇类物质种类更多, AAF 阶段传统工艺酒醇类总量(96.53 mg/L)显著高于闪蒸工艺酒(46.24 mg/L), 差值达 50.29 mg/L(P<0.05), 差距超 1 倍, 这与前期研究结果相同[8]。闪蒸工艺通过短时高温处理, 可能快速挥发部分低沸点醇类(如甲醇、乙醇等), 而传统工艺初始发酵更易积累醇类物质。传统工艺酒初始醇类丰富, 可能带来更浓郁风味, 但高醇类可能增加辛辣感; 闪蒸工艺酒醇类含量低, 口感更清爽, 但风味层次较单薄[43]。

6MAAF 阶段传统工艺酒醇类总量(91.88 mg/L)略高于闪蒸工艺酒(85.30 mg/L), 差值仅 6.58 mg/L, 差距较小, 此阶段为酒陈化初期, 说明初期醇类生成受工艺影响较小。12MAAF 阶段时, 闪蒸工艺酒醇类总量(102.79 mg/L)显著高于传统工艺酒(80.24 mg/L), 差值达 22.55 mg/L(P<0.05)。原因可能是长期储存中, 闪蒸工艺酒基质更易促进醇类生成(如残糖转化), 而传统工艺酒醇类持续挥发或转化, 导致总量下降[44]。闪蒸工艺酒风味更浓郁, 但需注意高醇类带来的异味; 传统工艺酒口感更柔和, 风味稳定性更强。

随着陈酿时间增加, 传统工艺酒醇类总量随时间持续下降, 从 AAF 阶段 96.53 mg/L 降至 12MAAF 阶段 80.24 mg/L, 降幅 16.88%。核心原因可能是储存过程中, 醇类物质因挥发(尤其是低沸点醇)、与有机酸酯化反应(生成酯类, 提升风味)而不断消耗, 且传统工艺酒基质更易发生此类转化。闪蒸工艺酒醇类总量从 AAF 阶段的 46.24 mg/L 到 6MAAF 阶段的 85.30 mg/L(增幅 84.47%), 到 12MAAF 阶段的 102.79 mg/L(续增 20.50%), 整体呈上升趋势。出现这种变化趋势的原因可能是初始阶段闪蒸去除大量醇类, 中期至后期, 酒中残糖、氨基酸等基质在微生物作用下持续转化为醇类(如高级醇), 且闪蒸工艺酒的基质环境(如水分、pH)更利于醇类合成, 抵消部分挥发消耗[45]。

2.7.3 闪蒸处理对葡萄酒醛类挥发性物质的影响

传统工艺酒的醛类含量在各陈酿阶段始终显著高于闪蒸工艺(P<0.05), 且含量均很低, 两种工艺检测出的醛类物质共有 6 种。传统工艺酒醛类总量波动剧烈, 在 6MAAF 阶段时醛类总量达到最高; 闪蒸工艺酒醛类总量先增后减, 相较于传统工艺波动较平稳, AAF 阶段的醛类总量为 0.19 mg/L, 最终 12MAAF 阶段醛类总量上升至 1.56 mg/L。闪蒸工艺通过快

速升温、降压，可高效去除酒中低沸点醛类，初始阶段醛类总量显著降低；传统工艺无针对性除醛步骤，醛类随发酵、陈化过程累积。醛类过量会使酒带有刺激性“杂味”（辛辣感、酸涩感）。闪蒸工艺始终保持低醛含量，酒的口感更醇厚、柔和，风味协调性更佳；传统工艺 6MAAF 阶段醛类总量为 15.39 mg/L，醛类过量，易出现风味缺陷，12MAAF 阶段虽有改善，但仍不及闪蒸工艺。低沸点醛类（如甲醛）具有一定毒性，闪蒸工艺大幅降低其含量，提升酒的饮用安全性；传统工艺中期醛类总量高，存在安全风险，后期虽下降，但仍高于闪蒸工艺。

2.7.4　闪蒸处理对葡萄酒酮类挥发性物质的影响

传统工艺酒酮类总量始终略高于闪蒸工艺，但差异随阶段推移逐渐缩小，酮类沸点高于醛类，闪蒸工艺虽能去除低沸点杂质，但对酮类去除能力有限，仅初始阶段因轻微挥发使酮类略低于传统工艺；传统工艺无特殊分离步骤，初始酮类保留更完整，故含量稍高。传统工艺酒在 6MAAF 阶段酮类总量为 4.48 mg/L，此时微生物代谢旺盛，脂肪族化合物氧化、氨基酸脱氨脱羧均会生成酮类，总量升至峰值；到 12MAAF 阶段部分酮类与醇类发生缩合反应，总量略有下降，为 4.25 mg/L。闪蒸工艺酒初始酮类总量低，陈酿过程中微生物缓慢代谢持续生成酮类，且无明显缩合消耗，故总量稳步上升，后期与传统工艺趋近。

适量酮类（如大马士酮）能赋予酒果香、花香等愉悦香气，是风味的重要组成部分[46]。两种工艺酮类总量均处于合理范围，但传统工艺中期峰值更高，香气更浓郁；闪蒸工艺后期与传统工艺持平，风味稳定性更佳。传统工艺酮类“升-降”波动，可能导致不同陈化阶段风味差异较大；闪蒸工艺平稳上升，风味过渡更平缓，品质一致性更好。且两工艺最终酮类含量接近，说明后期风味特征趋同，仅前期存在细微差异（传统工艺略浓郁，闪蒸工艺略清淡）。

2.7.5　闪蒸处理对葡萄酒羧酸类挥发性物质的影响

AAF 阶段传统工艺酒羧酸类总量（3.69 mg/L）是闪蒸工艺（1.00 mg/L）的 3.7 倍，传统工艺酒显著偏高（P<0.05）；到 6MAAF 阶段闪蒸工艺酒总量超过传统工艺，差值达 1.69 mg/L；12MAAF 阶段传统工艺酒骤降，但闪蒸工艺酒仍保持较高水平，闪蒸工艺酒羧酸类总量为 2.64 mg/L，而传统工艺酒羧酸类总量仅为 0.23 mg/L，差异显著（P<0.05）。羧酸是酒酸度的主要来源，适量酸度可提升清爽感，过量则显酸涩[47]。传统工艺后期羧酸骤降，酯类生成受限，风味易固化；闪蒸工艺虽在前期至中期羧酸含量上升明显，但后期含量稳定无骤降，可持续转化为酯类，风味更鲜活，整体酸度变化趋势更为平稳，品质稳定性更优。

2.8　两种工艺葡萄酒酚类物质及香气主成分分析结果

为更好体现两种工艺之间酚类物质以及香气物质成分的差异，对数据进行主成分分析。图 5 和图 6 分别为两种工艺葡萄酒主成分分析的得分图与载荷图。数据显示，主成分 PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 38.8% 和 21.3%，累计贡献率达 60.1%。两种工艺的马瑟兰葡萄酒在图 5 中可明显区分，样品间的重复性和分散度比较好。从图 6 可见，PC1 与 1-壬醇、里那醇、1-庚醇、苯乙醇、1-辛醇等醇类物质呈正相关，PC2 则与酚类物质（总酚、类黄酮、黄烷醇）以及丁内酯、苯乙酸乙酯、水杨酸乙酯、反式-3-甲基-4-辛内酯等酯类物质呈正相关。结合图 5 分析，闪蒸葡萄酒与传统葡萄酒在 PC1 维度上差异明显，表明闪蒸处理对与 PC1 正相关的香气物质成分影响更为显著。闪蒸处理的 AAF、6MAAF 及 12MAAF 样品在 PC2 上的差异较大，对与 PC2 正相关的成分影响较大；传统处理的 AAF 和 6MAAF 样品在 PC2 维度上差异较小，但与 12MAAF 样品在 PC2 上存在显著差异，表明陈酿时间对 PC2 正相关成分的影响较大。闪蒸处理使得 AAF 阶段葡萄酒中 1-壬醇、里那醇、1-庚醇、苯乙醇、1-辛醇等与 PC1 呈正相关的醇类物质的含量降低。闪蒸处理会增加与 PC1 呈负相关的酚类物质（总酚、花色苷、类黄酮、黄烷醇）以及香气中酯类物质的含量，酚类物质可增强葡萄酒的抗氧化能力，而酯类物质作为葡萄酒中关键的香气成分，能赋予酒体果香与酯香。

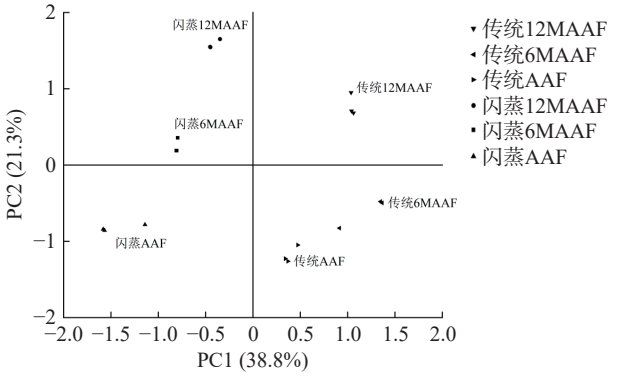


图 5　两种工艺葡萄酒酚类物质及香气主成分分析得分图

Fig.5　Scores of the principal component analysis of phenolics and aroma of wines of the two processes

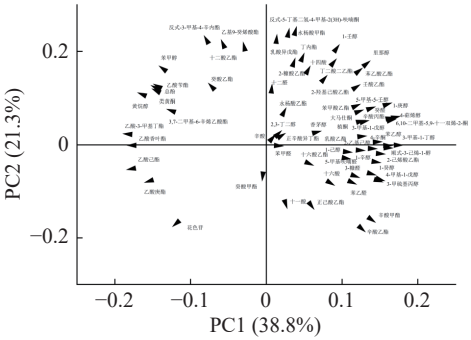


图 6　两种工艺葡萄酒酚类物质及香气主成分分析载荷图

Fig.6　Loadings from the principal component analysis of phenolics and aroma of wines of two processes

综上，通过主成分分析（PCA）清晰揭示了闪蒸工艺与传统工艺对马瑟兰葡萄酒酚类物质及香气物质成分的差异化影响，且两种工艺的样品在主成分空间

内实现有效区分，数据重复性与分散度符合分析要求，为工艺差异的量化表征提供了可靠依据。从实际应用价值来看，闪蒸工艺通过降低 1-壬醇、里那醇等醇类物质含量，同时提升总酚、花色苷等酚类物质及丁内酯、苯乙酸乙酯等酯类物质含量，在优化葡萄酒品质方面呈现出双重优势：一方面，酚类物质的增加有助于强化酒体抗氧化能力，可延长葡萄酒货架期并减缓风味劣变；另一方面，酯类物质的富集能够进一步凸显葡萄酒的果香与酯香特征，提升感官愉悦度，为消费者带来更丰富的香气体验。而传统工艺下葡萄酒成分受陈酿时间影响显著，尤其是 12MAAF 样品与 AAF、6MAAF 样品在 PC2 维度的差异，提示传统工艺需通过精准控制陈酿周期，才能实现对酚类与酯类物质的有效调控。后续研究可基于此 PCA 分析结果，进一步探究闪蒸工艺参数（如温度、时间）对目标物质的调控机制，或针对传统工艺陈酿过程中的成分变化规律开展深入研究，为马瑟兰葡萄酒品质提升与工艺优化提供更具针对性的理论支撑。

3 结论

相较于传统酿造工艺，采用闪蒸工艺酿造的马瑟兰葡萄酒，其残糖含量、总酸含量、pH 及酒精度均实现显著提升。在陈酿阶段，闪蒸工艺酿造的葡萄酒展现出更优的色度表现，酒体颜色显著深于传统工艺酿造产品；同时，其总酚、总花色苷、类黄酮及黄烷醇的含量均显著高于传统工艺酿造的葡萄酒，这一特性为酒体赋予了更强的耐陈酿能力。在香气品质维度，闪蒸工艺的应用使马瑟兰葡萄酒中酯类物质的种类与含量较传统工艺出现显著增加，而醇类物质的种类与含量则相应降低，改善了葡萄酒的香气质量，丰富了香气层次感。上述研究发现为葡萄酒酿造技术的优化提供了坚实的理论依据和切实的实践指导，未来通过进一步优化闪蒸处理参数和酿造工艺，有望进一步提升葡萄酒的品质和感官特性。

© 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] ĆORKOVIĆ I, PICHLER A, ŠIMUNOVIĆ J, et al. A comprehensive review on polyphenols of white wine: Impact on wine quality and potential health benefits[J]. Molecules, 2024, 29(21): 5074.

[2] 张哲, 柴菊华, 崔彦志, 等. 闪蒸处理对干红葡萄酒品质的影响[J]. 酿酒科技, 2010(5): 51−54,59. [ZHANG Zhe, CHAI Juhua, CUI Yanzhi, et al. Effects of flash distillation on claret quality[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2010(5): 51−54,59.]

[3] 曹芳玲, 康登昭. 闪蒸处理在蛇龙珠迟采甜红葡萄酒酿造中的应用[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 320−323. [CAO Fangling, KANG Dengzhao. Application of flash evaporation treatment in the brewing of late-picked sweet red wine from Cabernet Sauvignon[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 320−323.]

[4] 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.]

[5] 耿彦彦, 张先舟, 马晓燕, 等. 闪蒸工艺对干红葡萄酒中多酚含量和感官特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(1): 142−145. [GENG Yanyan, ZHANG Xianzhou, MA Xiaoyan, et al. Effect of flash evaporation on mono-phenolics and sensory characteristics in dry red wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(1): 142−145.]

[6] 华玉波, 崔彦志, 王莉, 等. 浸渍时间对闪蒸赤霞珠干红酚类物质和颜色特征的影响[J]. 中国酿造, 2012, 31(7): 90−93. [HUA Yubo, CUI Yanzhi, WANG Li, et al. Effect of maceration time on polyphenol and colour features of Cabernet Sauvignon wine produced with flash evaporation[J]. China Brewing, 2012, 31(7): 90−93.]

[7] SAMOTICHA J, WOJDYŁO A, CHMIELEWSKA J, et al. The effects of flash release conditions on the phenolic compounds and antioxidant activity of Pinot noir red wine[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(6): 999−1007.

[8] 柴菊华, 崔彦志, 刘维维, 等. 闪蒸品丽珠干红葡萄酒香气成分的 GC/MS 分析[J]. 中国酿造, 2011, 30(5): 49−52. [CHAI Juhua, CUI Yanzhi, LIU Weiwei, et al. GC/MS analysis of aroma compounds in Cabernet Franc wine made with flash evaporation[J]. China Brewing, 2011, 30(5): 49−52.]

[9] 曹芳玲, 康登昭, 刘宗芳. 闪蒸技术对美乐干红葡萄酒品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 102−105. [CAO Fangling, KANG Dengzhao, LIU Zongfang. Influence of flashing steam technology on the quality of merlot red wine[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(26): 102−105.]

[10] 孙丽华, 郭鸿鸣, 杜建双. 昌黎酿酒葡萄产区气候适宜性分析[J]. 现代农业科技, 2018(11): 76−78. [SUN Lihua, GUO Hongming, DU Jianshuang. Analysis on climate suitability of wine-making grape in Changli[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(11): 76−78.]

[11] 张晓燕, 陈荣萍, 侍朋宝. 昌黎碣石山产区环境条件及其对酿酒葡萄西拉的影响[J]. 现代农业科技, 2022(7): 49−53. [ZHANG Xiaoyan, CHEN Rongping, SHI Pengbao. Environmental conditions of Jieshi Mountain production area in Changli and their effects on wine grape Syrah[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(7): 49−53.]

[12] 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. [LING Mengqi, WANG Shi, SHI Tonghua, et al. Analysis of varietal traits and wine flavor characteristics of different white grape varieties from Jieshi Mountain region[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 112−119.]

[13] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 葡萄酒、果酒通用分析方法: GB/T 15038-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2−9. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Analytical methods of wine and fruit wine: GB/T 15038-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 2−9.]

[14] 孙文静, 吴明, 张众, 等. 无釉陶罐陈酿对贺兰山东麓'赤霞珠'干红葡萄酒的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 60−66.

［SUN Wenjing, WU Ming, ZHANG Zhong, et al. Effects of aging in unglazed pottery pot on Cabernet Sauvignon dry red wine from the foot of Helan Mountain[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(1): 60−66.］
［15］ 陈武, 卢浩成, 陈超, 等. 酿酒葡萄‘美乐’4 个无性系在新疆玛纳斯的引种表现[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2019(3): 51−54,60.［CHEN Wu, LU Haocheng, CHEN Chao, et al. Cultivation performance of four clones of wine grape variety ‘Merlot’ in Manas region of Xinjiang[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2019(3): 51−54,60.］
［16］ 彭昕, 杨兴元, 艾赛提·阿合旦, 等. 游离 SO_2、溶解氧浓度对葡萄酒颜色及花色苷含量的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 11−16,23.［PENG X, YANG X Y, AISAITI AHEDAN, et al. Effects of different concentrations of free SO_2 and dissolved oxygen on wine color and anthocyanins content[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 11−16,23.］
［17］ 丛龙娇, 史锐, 吴鹏, 等. 不同产地黑果腺肋花楸果实中总多酚、总黄酮含量测定[J]. 辽宁中医药大学学报, 2021, 23(1): 31−34.［CONG Longjiao, SHI Rui, WU Peng, et al. Determination of total polyphenols and total flavonoids in fruits of Heiguoxianleihuaqiu (*Aronia melanocarpa*) from different habitats[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 23(1): 31−34.］
［18］ 张舒凡. 烟台地区特色酿酒红葡萄品种酿酒特性及陈酿潜力研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2023.［ZHANG Shufan. Study on brewing characteristics and aging potential of characteristic red grape varieties in Yantai area[D]. Yantai: Yantai University, 2023.］
［19］ 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.］
［20］ 李运奎, 范舒悦, 张煜, 等. 西北地区红葡萄酒颜色微观量化分类与宏观量化分级[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 379−386.［LI Yunkui, FAN Shuyue, ZHANG Yu, et al. Micro-quantitative classification and macro-quantitative gradation of color of dry red wines in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 379−386.］
［21］ 黄小晶, 李阿波, 沈甜, 等. 贺兰山东麓红葡萄酒颜色差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(10): 180−186.［HUANG Xiaojing, LI Abo, SHEN Tian, et al. Color features analysis of red wines from eastern foot of Helan Mountain[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(10): 180−186.］
［22］ 马懿, 喻康杰, 赖晓琴, 等. 单宁添加对赤霞珠葡萄酒颜色和花色苷含量变化的影响及其相关性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 81−88.［MA Yi, YU Kangjie, LAI Xiaoqin, et al. Effects of tannin addition on changes in color and anthocyanin content of cabernet sauvignon wine and their correlation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 81−88.］
［23］ 卢冬晴, 周雪健, 蒋庆玲, 等. 贺兰山东麓产区‘马瑟兰’干红葡萄酒在不同来源橡木桶中陈酿特性差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(8): 307−314.［LU Dongqing, ZHOU Xuejian, JIANG Qingling, et al. Analysis of differences in aging characteristics of ‘Marselan’ dry red wine in oak barrels from different sources in east foothill of Helan Mountain[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(8): 307−314.］
［24］ 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.］
［25］ LIU W H, JI R J, AIMAIER A, et al. Adjustment of impact phenolic compounds, antioxidant activity and aroma profile in Cabernet Sauvignon wine by mixed fermentation of *Pichia kudriavzevii* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Chemistry, 2023, 18: 100685.
［26］ 王张钰, 黄勇策, 杨伟明, 等. 贺兰山东麓不同风土条件下红葡萄酒酚类及感官特征分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(6): 32−42.［WANG Zhangyu, HUANG Yongce, YANG Weiming, et al. Analysis of phenolic and sensory characteristics of red wines under different terroir conditions in the eastern foothills of Helan mountains[J]. China Brewing, 2024, 43(6): 32−42.］
［27］ CHEN Huawei, WANG Miaomiao, ZHANG Lijian, et al. Anthocyanin profiles and color parameters of fourteen grapes and wines from the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102034.
［28］ DELIĆ K, MILINČIĆ D D, PEŠIĆ M B, et al. Grape, wine and pomace anthocyanins: Winemaking biochemical transformations, application and potential benefits[J]. OENO One, 2024, 58(4).
［29］ SÁNCHEZ-ORTIZ A, MATEO-SANZ J M, MATEOS-FERNÁNDEZ M A, et al. New labeling rules for wine: Wine alcohol-derived calories and polyphenol consumption on health[J]. Foods, 2024, 13(2): 295.
［30］ SHI Tianci, SU Yue, LAN Yibin, et al. The molecular basis of flavonoid biosynthesis response to water, light, and temperature in grape berries[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1441893.
［31］ YU Huan, LI Hongyan, ZHOU Sihong, et al. The metabolomic profiling of the flavonoid compounds in red wine grapes and the impact of training systems in the southern subtropical region of China[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(16): 8624.
［32］ PYO Y, KWON K H, JUNG Y J. Anticancer potential of flavonoids: Their role in cancer prevention and health benefits[J]. Foods, 2024, 13(14): 2253.
［33］ OYÓN-ARDOIZ M, MANJÓN E, ESCRIBANO-BAILÓN M T, et al. Supramolecular study of the interaction between mannoproteins from *Torulaspora delbrueckii* and flavanols[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137044.
［34］ ROSSI S, BESTULIĆ E, ORBANIĆ F, et al. Comprehensive analysis of Teran red wine aroma and sensory profiles: Impacts of maceration duration, pre-fermentation heating treatment, and barrel aging[J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 8729.
［35］ LIGAS I, GOULIOTI E, TARANTILIS P, et al. A new simple method for the determination of complex wine aroma compounds using GC-MS/MS: The case of the Greek variety “Agiorgitiko”[J]. AppliedChem, 2024, 4(2): 122−139.
［36］ LI Chunyan, PU Xilei, YE Piping, et al. Flavor characterization of six white wines from Xinjiang: Physicochemical property, antioxidant activity, and volatile compounds analysis[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 20: 101725.
［37］ 刘霞, 朱涛涛, 贾玉莹, 等. 河西走廊产区赤霞珠干红葡萄酒陈酿过程香气特征分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(8): 106−114.［LIU Xia, ZHU Taotao, JIA Yuying, et al. Analysis on aroma characteristics of Cabernet Sauvignon dry red wine in Hexi Corridor dur-

ing ageing[J]. China Brewing, 2024, 43(8): 106−114.]
[38] MOREL-SALMI C, SOUQUET J M, BES M, et al. Effect of flash release treatment on phenolic extraction and wine composition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(12): 4270−4276.
[39] 刘杰, 周鹏辉, 李进, 等. 山东胶东半岛产区不同葡萄品种葡萄酒香气成分差异性研究[J]. 酿酒科技, 2025(1): 65−68. [LIU Jie, ZHOU Penghui, LI Jin, et al. Differences in aroma composition of wines from different grape varieties from Jiaodong Peninsula[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2025(1): 65−68.]
[40] 马云青, 孙佳勰, 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. [MA Yunqing, SUN Jiaxie, BI Yujie, et al. Effect of different yeasts on aroma changes during dry white wine fermentation[J]. China Brewing, 2021, 40(6): 113−118.]
[41] YI Zicheng, ZHAO Danqing, CHANG Tengwen, et al. Effects of high-hydrostatic-pressure treatment on polyphenols and volatile aromatic compounds in Marselan wine[J]. Foods, 2024, 13(15): 2648.
[42] 李记明, 贺普超, 刘玲. 优良品种葡萄酒的香气成分研究[J]. 酿酒科技, 2000(1): 95. [LI Jiming, HE Puchao, LIU Ling. Study on aroma components of fine varieties of wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2000(1): 95.]
[43] TONG Wenzhe, ZHAI Hongyue, QI Mengyao, et al. Characterization of chemical and sensory properties of Cabernet Sauvignon and Marselan wines made by flash détente technique[J]. Food Research International, 2024, 184: 114229.
[44] 郭伟. 不同环境温度条件下传统绍兴黄酒发酵过程中菌群结构及香气物质变化的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022. [GUO Wei. Study on changes of community structure and aroma substances during fermentation of traditional Shaoxing Huangjiu under different ambient temperature conditions[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2022.]
[45] 刘振, 曾爱武. 同步闪蒸汽提发酵制乙醇[J]. 化学工程, 2008, 36(8): 50−53. [LIU Zhen, ZENG Aiwu. Ethanol production by flash-stripping fermentation[J]. Chemical Engineering (China), 2008, 36(8): 50−53.]
[46] TORRES-DÍAZ L L, MURILLO-PEÑA R, IRIBARREN M, et al. Exploring *Metschnikowia pulcherrima* as a co-fermenter with *Saccharomyces cerevisiae*: Influence on wine aroma during fermentation and ageing[J]. Beverages, 2024, 10(2): 26.
[47] TAN Jianxin, JI Mingyue, GONG Jiangang, et al. The formation of volatiles in fruit wine process and its impact on wine quality[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2024, 108(1): 420.