中国农业科学 2024,57(8):1592-1605
Scientia Agricultura Sinica doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2024.08.013

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

没食子酸稳定‘户太八号’桃红葡萄酒香气与色泽

冯帆[1]，姜醒睿[1]，王凌云[2]，张永刚[3]，李爱华[4]，陶永胜[1,5]✉

[1]西北农林科技大学葡萄酒学院，陕西杨凌 712100；[2]商洛市特色产业与休闲农业指导中心，陕西商洛 726000；[3]陕西丹凤酒业有限责任公司，陕西丹凤 726200；[4]西北农林科技大学食品科学与工程学院，陕西杨凌 712100；[5]陕西省葡萄与葡萄酒重点实验室，陕西杨凌 712100

摘要：【目的】针对‘户太八号’桃红葡萄酒贮藏期色泽和香气损失的问题，研究酿造过程中没食子酸处理对色泽与香气的提升效果，以优化桃红葡萄酒的护色增香工艺。【方法】以‘户太八号’葡萄为试材，酿酒过程中分别在发酵前（Pr）、中（M）、后（Po）3个时期添加200和300 mg·L^{-1}的没食子酸，发酵结束后贮藏6个月，然后利用HS-SPME-GC-MS对酒样香气物质进行分析，通过CIELab颜色空间参数（L^*、a^*、b^*、C^*_{ab}、H_{ab}、ΔE^*_{ab}）和紫外分光光度计进行色泽指标的测定，再结合感官品评分析不同处理对供试酒样香气特征的影响。【结果】在发酵后添加没食子酸处理的发酵香气物质含量显著高于对照组，增加约16%，但两种添加浓度处理造成的差异不显著。发酵前添加没食子酸处理对供试酒样香气的保留起到积极作用，相比于对照组增加约65%—73%，而发酵中添加没食子酸对葡萄酒香气物质的稳定作用较小。感官品评结果显示，对于整体香气的影响，发酵后添加没食子酸有最优的葡萄酒香气改善效果，发酵前处理的添加效果优于发酵中处理。偏最小二乘回归（PLSR）模型揭示萜烯、脂肪酸、高级醇、乙酸酯和脂肪酸乙酯（回归系数＞0.1）是‘户太八号’桃红葡萄酒花香和柑橘香气（R^2c＞0.80且R^2v＞0.70）的重要贡献成分，其中脂肪酸乙酯和乙酸酯这两类果香酯类物质对其贡献更突出。色泽分析结果显示，发酵前添加没食子酸处理具有显著的护色作用，且200 mg·L^{-1}处理（Pr1）效果优于300 mg·L^{-1}（Pr2），Pr1处理组酒样L^*值比对照降低0.58%，a^*值提高45.38%。另外，颜色表征结果显示，发酵前添加没食子酸处理增强了‘户太八号’桃红葡萄酒的紫红色调，且200 mg·L^{-1}处理效果优于300 mg·L^{-1}。【结论】发酵前添加没食子酸处理对‘户太八号’桃红葡萄酒色泽稳定具有显著作用，且添加量为200 mg·L^{-1}的效果更好，而发酵后没食子酸添加处理对葡萄酒香气稳定性具有显著作用。

关键词：葡萄；葡萄酒；没食子酸；色泽；香气；酿酒工艺

The Stabilization of Aroma and Color During Hutai-8 Rose Winemaking by Gallic Acid Treatment

FENG Fan[1], JIANG XingRui[1], WANG LingYun[2], ZHANG YongGang[3], LI AiHua[4], TAO YongSheng[1,5]✉

[1]College of Enology, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; [2]Guiding Center for Featured Industries and Leisure Agriculture, Shangluo 726000, Shaanxi; [3]Shaanxi Danfeng Winery Co., Ltd., Danfeng 726200, Shaanxi; [4]College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100,Shaanxi; [5]Shaanxi Key Laboratory of Viticulture and Enology, Yangling 712100, Shaanxi

Abstract: 【Objective】This study was aimed to investigate the effects of gallic acid treatment on color and aroma preservation during the aging process of Hutai-8 rosé wine, in order to optimize the design of color and aroma enhancement techniques for rosé wine production.【Method】In this study, Hutai-8 grape was used as raw material. Gallic acid was added at three different stages,

收稿日期：2023-09-22；接受日期：2024-01-31
基金项目：陕西省科技创新团队项目（2023-CX-TD-59）、西北农林科技大学创新团队专项（XYTD2023-12）、国家自然科学基金（31972199）
联系方式：冯帆，E-mail：fengfan20000604@nwsafu.edu.cn。通信作者陶永胜，E-mail：taoyongsheng@nwsafu.edu.cn

including pre-fermentation (Pr), mid-fermentation (M), and post-fermentation (Po), with the concentrations of 200 and 300 mg·L^{-1}. After a 6-month storage period following fermentation, the aroma compounds of the wine samples were analyzed by headspace solid-phase microextraction-Gaschromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The color parameters (L^*, a^*, b^*, C^*_{ab}, H_{ab}, and Δ^*E_{ab}) were determined by the CIELab color space parameters, and the color indices were measured by ultraviolet spectrophotometer (UV). Finally, the sensory evaluation was conducted to analyze the influences of different treatments on the aroma characteristics of the wine samples. 【Result】The post-fermentation treatments significantly increased the content of fermentation aroma compounds compared with CK, with an increase of approximately 16%. However, there was little difference between treatments of the two additive concentrations. The pre-fermentation treatments positively contributed to the preservation of varietal aroma compounds, with an increase of approximately 65%-73% compared with CK. The mid-fermentation treatments had a lesser stabilizing effect on the aroma compounds of the wine. Sensory evaluation results showed that post-fermentation treatment had the best effect on improving the overall aroma of the wine, and the pre-fermentation treatment was more effective than the mid-fermentation treatment. PLSR models revealed that terpenols, fatty acids, higher alcohols, acetates and fatty acid ethyl esters were the main aroma contributors (regression coefficients＞0.1) to floral and citrus attributes (R^2c＞0.80 & R^2v＞0.70), with fatty acid ethyl esters and acetates being particularly prominent contributors. The color analysis results showed that pre-fermentation had a significant color-preserving effect, and the treatment with 200 mg·L^{-1} (Pr1) was more effective than the treatment with 300 mg·L^{-1} (Pr2). Compared with CK, Pr1 treatment group's, L^* value decreased by 0.58% and a^* value increased by 45.38%. Furthermore, the color characterization results showed that pre-fermentation treatment enhanced the purple-red tone of Hutai-8 rosé wine and the treatment with 200 mg·L^{-1} was more effective than the treatment with 300 mg·L^{-1}.【Conclusion】The addition of 200 mg·L^{-1} gallic acid before fermentation had a significant effect on stabilizing the color of Hutai-8 rose wine, while the post-fermentation treatments could significantly increase the fermentative aroma content of wine.

Key words: grapes; wine; gallic acid; color; aroma; winemaking

0　引言

【研究意义】我国葡萄种植面积世界排名第三，年产量世界第二，其中鲜食葡萄的面积和产量位居世界第一[1]。‘户太八号’葡萄是陕西省广泛种植的鲜食葡萄，种植面积占比在 70%以上，该品种是由西安葡萄研究所从‘奥林匹亚’芽变中选育的欧美杂交品种[2]，果粒较大、色泽较深、酸甜适口，具有典型香气。然而，‘户太八号’葡萄的大量种植使其在成熟季节供大于求，加上其不耐贮藏，造成较大的经济损失。因此，‘户太八号’葡萄亟待进行深加工来解决产量过剩问题，而葡萄酒是附加值较高的葡萄加工产品[3]。鲜食葡萄粒大、皮薄、果穗较为松散，果皮所占比例较低，所以来源于果皮的色素等多酚物质含量较低，适合酿造颜色较浅的桃红葡萄酒产品[4]。另外，‘户太八号’桃红葡萄酒贮藏期间色泽和香气损失较快，货架期较短，因此急需开发一套稳定颜色、保护香气的酿酒工艺。【前人研究进展】色泽和香气是桃红葡萄酒重要的感官属性，与产品质量密切相关。葡萄酒的桃红色主要由花色苷赋予，而典型香气与葡萄果皮上的香气前体物质有关，大部分葡萄本身的游离态香气前体物质会在酒精发酵过程中损耗掉。与酿酒葡萄相比，‘户太八号’葡萄粒大皮薄，发酵葡萄醪中花色苷等酚类物质以及香气前体物质少很多。目前，已经有改善桃红葡萄酒香气和色泽的相关研究，例如发酵前果皮浸渍工艺能够提高香气前体物质的浸提率[5]，混合非酿酒酵母接种发酵能够促进一些香气物质的生成[6-7]，通过添加单宁等辅料来稳定葡萄酒的颜色并调节口感[8-10]。有研究报道，酚酸可以通过辅色反应稳定葡萄酒的颜色[11]，还能对葡萄酒中酯类和萜烯类物质的香气稳定有积极作用[12-15]。【本研究切入点】目前，在用鲜食葡萄酿造的桃红葡萄酒中，有关稳定色泽与香气的研究报道较少，难以指导相关工艺技术的开发。【拟解决的关键问题】研究没食子酸处理调控‘户太八号’桃红葡萄酒的典型香气特征及其关键香气物质的效果，探究没食子酸处理改善供试酒样色泽的应用潜力，优化‘户太八号’桃红葡萄酒的护香护色工艺。

1　材料与方法

试验于 2021 年在西北农林科技大学进行。

1.1　葡萄原料与菌株

‘户太八号’葡萄原料：2021 年 8 月采自陕西省西安市鄠邑区，原料卫生状况良好，含糖量 157 g·L^{-1}，含酸量 5.4 g·L^{-1}（酒石酸计）。

酿酒酵母活性干粉：中国安琪酵母有限公司 RV002

活性干酵母产品。

1.2 仪器与试剂

UV-1780 型紫外可见分光光度计，岛津仪器（苏州）有限公司；光学显微镜（BX51），日本 Olympus；恒温摇床（NRY-2102C），上海南荣实验室设备有限公司；恒温培养箱（MP-250B），上海南荣实验室设备有限公司；超净工作台（SW-CJ-1FD），苏州安泰空气技术有限公司；高压灭菌锅（SX-500），日本 Tomy；万分之一天平（AUX320），日本岛津。GC-MS 仪器，TRACE 1310 GC-ISQ LT Single Quadrupole MS（Thermo SCITNTIFIC 公司，USA）；气相色谱柱：DB-WAXETR 毛细管柱（长度 60 m，内径 0.25 m，膜厚 0.25 μm，Agilent Technologies，美国）；固相微萃取装置：DVB/CAR/PDMS 萃取纤维（膜厚 50/30 μm，2 cm 可伸缩长度）联用 57330-U SPME 手柄（Supelco，Bellefonte PA，美国）。

所有分析纯化学品，包括乙酸乙酯、无水乙醇、氢氧化钠、硫酸、亚硫酸氢钠、乙醛、氯化钠和浓盐酸均购自四川西陇化工有限公司。色谱纯试剂没食子酸（≥98.0%）和香气成分标准品（≥99%），包括香茅醇、*β*-紫罗兰酮、里哪醇、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸异戊酯、乙酸己酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯、月桂酸乙酯和 2-辛醇等 34 种香气化合物，均购自 Sigma-Aldrich 公司。纯净水来自 Millipore Milli-Q 系统（Bedford，MA，USA）。

1.3 试验方法与设计

1.3.1 酵母的活化 酵母的活化：以 5%的接种量将酵母接种于发酵培养基中，于 28 ℃下恒温培养 48 h。培养基配方如下：20 g·L^{-1} 葡萄糖、20 g·L^{-1} 蛋白胨、0.5 g·L^{-1} $MgSO_4·7H_2O$、4 g·L^{-1} KH_2PO_4、3 g·L^{-1} NH_4NO_3、10 mL·L^{-1} 吐温 80 和 10 mg·L^{-1} 酵母浸粉。酵母的扩增培养：以 10%的接种量将活化好的酵母菌液接种到发酵培养基中，于 180 r/min、28 ℃的条件下扩增培养 72 h。酵母菌株的计数：在显微镜下使用血球计数板法计数观察。

1.3.2 葡萄酒酿造试验 酿造工艺：分选新鲜、无病害且成熟度良好的‘户太八号’葡萄，经除梗破碎后分装至 14 个 10 L 玻璃广口瓶，在 4 ℃条件下浸渍 24 h（冷浸渍）后接种酵母启动发酵，接种方案为活化好的 RV002 以 10^6 cfu/mL 的接种量添加到发酵液中。在发酵过程中实时监测比重和温度，控制发酵温度 20 ℃，并在发酵旺盛期添加蔗糖使最终酒度达到（11±0.5）% vol。当含糖量低于 2.0 g·L^{-1} 时，添加 30 mg·L^{-1} 的 SO_2 终止发酵，并将葡萄酒转入干净卫生的 5 L 玻璃罐中满罐、密封，进行正常的澄清、稳定。最后，装瓶贮藏 6 个月后进行采样分析。

没食子酸处理：该试验为双因素（添加量、添加时间）试验，其中添加时间设置发酵前（除梗破碎后）、发酵中（皮渣分离后）和发酵结束后（澄清后）3 水平，参考 WANG 等[13]的研究，添加量设置 200 mg·L^{-1} 和 300 mg·L^{-1} 两个水平，共 6 个处理。各处理代号如下：200 和 300 mg·L^{-1} 发酵前处理组（Pr1、Pr2）；200 和 300 mg·L^{-1} 发酵中处理组（M1、M2），200 和 300 mg·L^{-1} 发酵后处理组（Po1、Po2）。同时设置不添加没食子酸的对照组（CK）。每一处理重复 2 次。

1.3.3 常规理化指标的测定 各项常规理化指标的测定参考葡萄酒、果酒通用分析方法国家标准 GB/T 15038—2006。

1.3.4 葡萄酒香气成分的仪器分析 葡萄酒香气物质采用顶空固相微萃取（headspace solid-phase microextraction，HS-SPME）吸附，使用 DVB/CAR/PDMS 萃取纤维及 SPME57330-U 联用手柄。15 mL 顶空瓶中加入 8 mL 酒样、2.0 g NaCl、2-辛醇（内标，40 μg·L^{-1}）和搅拌子，在 40 ℃水浴中平衡 15 min 后，萃取纤维在 40 ℃下搅拌吸附 30 min，取出后插入 GC 进样口，230 ℃解析 5 min 取出。每个酒样重复 2 次。

GC-MS 分析条件：岛津 GC/MS-QP2020，柱型号为 DB-WAXETR（60 m×0.25 mm i.d.，涂层厚度 0.25 μm，美国 Agilent 公司）。不分流进样，载气为高纯氦气（99.999%），流速 1.5 mL·min^{-1}。柱升温程序：40℃保持 5 min，然后以 2 ℃·min^{-1} 上升到 130 ℃，再以 5 ℃·min^{-1} 上升到 220 ℃，保持 10 min。进样口温度 230 ℃，连接杆温度 220 ℃，离子源温度 200 ℃，电子源电压 70 eV，质谱为电离轰击（EI）模式，全扫描质谱范围 35—350 amu，扫描频率 0.2 s/次。定量定性方法：采用标准品保留时间对比、Wiley 275.L 谱库查询和文献保留指数比对法进行化合物定性。采用内标-标准曲线法定量，2-辛醇为内标，具体定量方法参考 TAO 等[16]，标准曲线信息见附表。对于无标准物质的香气物质，计算时采用与其他化学结构相似化合物的标准曲线进行相对定量。

1.3.5 香气特征的感官分析 葡萄酒香气特征采用感官量化分析法进行评价，具体方法参考 TAO 等[17]。品评小组由 28 名品评员组成（12 男 16 女），经过 6 周专业闻香训练。闻香时，品评员用葡萄酒标准香气

中的 5—6 个特征词汇描述样品香气特征，并用“五点标度法”（“1”-弱；“2”-较弱；“3”-中等；“4”-较强；“5”-强）对每一香气特征进行量化。最终量化强度值 MF（%）由品尝小组对某一香气特征词汇的使用频率 F（%）和强度平均值 I（%）表示，计算公式：

$$MF\ (\%) = \sqrt{F(\%)I(\%)}$$ 。

1.3.6　CIELab 颜色空间参数的测定　测定方法参照李运奎等[18]，葡萄酒样品通过 0.45 μm 水系滤膜，使用 2 mm 石英比色皿，紫外分光光度计扫描范围为 380—780 nm，间隔 1 nm，蒸馏水调零，每个样品重复 3 次。

1.3.7　色泽相关理化指标的测定　酒石酸酯、黄酮醇、花色苷含量的测定参考彭传涛等[19]和 CLIFF 等[20]的方法，分别用紫外分光光度计测定 320、360 和 520 nm 下的吸光度，依次对应酒石酸酯、黄酮醇、花色苷的吸光度，根据标准曲线计算出含量（酒石酸酯以橡黄素计，黄酮醇以咖啡酸计，花色苷以二甲花翠素-3-葡萄糖苷计）。

单体花色苷、多聚体花色苷、辅色花色苷含量的测定参考 BOULTON 等[21]的方法，分别进行如下处理：在 2 mL 酒样中加入 10%（v/v）乙醛溶液 20 μL，室温静置 45 min；取 2 mL 酒样；160 μL 的 5% SO_2（w/v）加入 2 mL 酒样，用 1 mm 比色皿在 520 nm 分别测定吸光度 A_{acet}、A_{520}、A_{SO_2}，每个样品重复 3 次。

x（辅色花色苷）=c（辅色花色苷）/c（总花色苷）=（A_{acet}-A_{520}）/A_{acet}×100%；

x（单体花色苷）=c（单体花色苷）/c（总花色苷）=（A_{520} - A_{SO_2}）/A_{acet}×100%；

x（多聚体花色苷）=c（多聚体花色苷）/c（总花色苷）=A_{SO_2}/A_{acet}×100%。

离子化指数的测定方法参考文献[20]，酒样经稀释在 520 nm 下测定吸光度 A_1；酒样中加入 7%（w/v）的 $NaHSO_3$ 溶液，520 nm 下测定吸光度 A_2；稀释酒样中加入 HCl 溶液（0.1 N），在 520 nm 下测定吸光度 A_3；在酒样中加入 HCl 溶液（0.1 N）及质量浓度 7%（w/v）的 $NaHSO_3$ 溶液，在 520 nm 下测定吸光度 A_4。

x（离子化指数）=[（A_1-A_2）×（12/10）/（A_3-A_4）×（100/95）]×100%。

1.4　数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 25.0 进行主成分分析（PCA）和单因素方差分析；使用 Origin 2021 进行雷达图绘制；使用 Origin 2018 绘制主成分分析图及颜色表征图；使用 The Unscrambler X 10.4 进行偏最小二乘回归分析（PLSR）。

2　结果

2.1　没食子酸处理对葡萄酒香气成分的影响

供试酒样的常规理化指标，酒度、总酸、挥发酸、pH、SO_2、残糖、干浸出物等符合 GB 15037—2006，说明采集酒样均符合相关要求。HS-SPME-GC-MS 对供试酒样香气物质的定性定量分析结果见表 1。分析可见，共有 42 种挥发性化合物，品种香气成分共 10 种，总含量在 522.9—903.1 μg·L^{-1}，包括 2 种 C6 化合物、4 种萜烯类化合物、1 种 C13-去异戊二烯类化合物、1 种挥发性酚和 2 种醛酮类化合物。结合气味活性值分析得出（OAV，即含量与嗅觉阈值的比值），OAV 值大于 1 的物质有 3 种，分别是香茅醇、*β*-紫罗兰酮、丁子香酚。在 0.1—1 的有两种，分别是（Z）-3-己烯醇和里哪醇。与 CK 相比，Pr1 和 Pr2 的香气成分总含量显著高于其他供试酒样。其中 Pr1 和 Pr2 的 C6 化合物和萜烯类化合物总含量也显著高于其他酒样（P＜0.05）。

供试酒样共分析出发酵香气化合物 32 种，总含量在 82 512.1—98 294.6 μg·L^{-1}，包括 7 种高级醇、6 种乙酸酯、8 种 C4—C14 脂肪酸乙酯、5 种其他酯类、4 种脂肪酸、2 种苯衍生物。有 9 种香气化合物的 OAV 值大于 1，分别是异戊醇、乙酸乙酯、乙酸异戊酯、丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、异戊酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯，其中 7 种为果香酯类物质，为‘户太八号’桃红葡萄酒贡献了主体香气。有 8 种香气化合物 OAV 值在 0.1—1，分别是异丁醇、乙酸异丁酯、乳酸乙酯、己酸、辛酸、癸酸、乙酸苯乙酯、苯乙醇。本研究中，OAV＞1 的香气物质中，发酵香气中的果香酯类物质，即乙酸酯和 C4—C14 脂肪酸乙酯占比较多。Po1 和 Po2 处理组的发酵香气总含量显著高于其他组（比 CK 高约 16%），其中乙酸酯含量比 CK 组高约 50%，C4—C14 脂肪酸乙酯含量比 CK 组高约 30%。Pr1 和 Pr2 处理组中的乙酸酯含量均显著高于 CK，只有 Pr2 酒的 C4—C14 脂肪酸乙酯含量显著高于 CK。而在 M1 和 M2 处理组中，发酵香气总含量没有明显的提升，且 C4—C14 脂肪酸乙酯含量都显著低于 CK。综上，发酵后处理（Po）对桃红葡萄酒发酵香气的改善作用最佳。其中，乙酸酯中的乙酸乙酯（OAV＞1）、乙酸异丁酯（0.1＜OAV＜1）

表 1　不同处理供试酒样中香气成分含量

Table 1　Aroma compounds in the wine samples with different treatments (μg·L^{-1})

保留指数 RI	化合物 Compounds	酒样 Wine sample							阈值 Odor threshold	气味活性值 OAV	气味描述 Odor description
		Pr1	Pr2	M1	M2	Po1	Po2	CK			
品种香气 Varietal aroma compound		903.1±71.2a	861.9±107.3a	549.0±52.4b	557.1±19.5b	567.2±19.0b	545.7±20.5b	522.9±13.6b			
C6 化合物 C6 compounds		534.8±41.8a	475.1±81.3a	244.0±32.7b	245.1±5.4b	229.5±11.6b	221.7±8.5b	252.6±8.2b			
1472	1-己醇 1-Hexanol	73.5±2.6a	56.3±10.1b	37.7±12.7c	41.8±01.6c	33.4±2.0c	32.9±1.1c	42.1±1.8c	8000[22]	＜0.1	生青，果香 Green, Fruity
1503	(Z)-3-己烯醇 Z-3-Hexen-1-ol	461.3±39.8a	418.8±71.2a	206.4±20.5b	203.3±4.0b	196.1±11.9b	188.8±7.5b	210.5±9.2b	400[23]	0.1-1	绿叶，草本 Green, herb
萜烯类 Terpenols		355.9±31.2a	371.6±30.4a	293.3±20.4c	297.6±17.7bc	326.6±8.4b	314.8±14.9bc	260.9±7.8d			
1665	里哪醇 Linalool	6.5±0.5	7.0±0.3	7.7±1.3	6.5±0.2	7.3±0.3	7.1±0.3	7.2±0.7	25[24]	0.1-1	花香，橙子 Flower, orange
1697	4-萜烯醇 Terpinen-4-ol#	4.2±0.1a	4.3±0.1a	4.3±0.4a	4.0±0.6ab	3.7±0.3ab	3.2±0.1c	3.4±0.2c	NF		木香，土壤 Wood, soil
1825	α-萜品醇 α-Terpineol	5.2±0.2c	5.5±0.1bc	5.7±0.1b	5.8±0.4b	5.7±0.1b	5.7±0.2b	6.1±0.2a	250[22]	＜0.1	甜香，蘑菇 Sweet, mushroom
1881	香茅醇 Citronellol	339.9±31.4a	354.8±30.1ab	275.6±19.0cd	281.3±17.7cd	310.0±8.5abc	298.8±14.9bc	244.2±9.9d	100[24]	＞1	橙子，玫瑰 Orange, rose
C13-去甲类异戊二烯 C13-norisoprenoids		2.2±0.0a	2.2±0.1a	2.1±0.0b	2.1±0.0b	2.1±0.0b	2.2±0.0ab	2.1±0.0b			
2252	β-紫罗兰酮 β-Ionone	2.2±0.0a	2.2±0.1a	2.1±0.0b	2.1±0.0b	2.1±0.0b	2.2±0.0ab	2.1±0.0b	0.09[25]	＞1	紫罗兰，果香 Violet, fruity
挥发性酚 Volatile phenols		9.4±2.3b	12.2±1.6a	8.7±1.9b	11.5±0.8a	8.2±0.8bc	6.2±1.7d	6.5±0.5d			
2501	丁子香酚 Eugenol	9.4±2.3b	12.2±1.6a	8.7±1.9b	11.5±0.8a	8.2±0.8bc	6.2±1.7d	6.5±0.5d	6[26]	＞1	丁子花香
醛酮类 Aldoketones		0.8±0.0bc	0.8±0.0c	0.8±0.0bc	0.8±0.0bc	0.8±0.0bc	0.8±0.0a	0.8±0.0ab			
1408	辛醛 Octanal#	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0	0.4±0.0	15	＜0.1	不良化学气味，苦味，柠檬味 Adverse chemical odor, bitterness, lemon flavor
1515	壬醛 Nonanal#	0.4±0.0b	0.4±0.0b	0.4±0.0b	0.4±0.0b	0.4±0.0b	0.4±0.0a	0.4±0.0ab	15[24]	＜0.1	橙子 Orange
发酵香气 Fermentative aroma compounds		87544.8±2670.8b	87848.5±3560.8b	84646.9±5894.5bc	82512.0±1010.6c	98294.6±2708.7a	97196.8±1539.3a	84054.9±2612.5bc			
高级醇 Higher alcohols		60686.7±952.4ab	59828.4±2762.8ab	59042.9±5289.3b	58659.0±772.4b	64512.1±1746.2a	63646.8±1255.9ab	59583.1±1537.1ab			
1212	异丁醇 Isobutyl alcohol	7777.1±241.4	8098.6±419.7	7651.9±615.8	7557.4±62.3	8314.8±253.1	8136.1±196.3	7691.2±451.2	40000[24]	0.1-1	淡甜，醇香 Mild sweet, alcohol

续表 1　Continued table 1

保留指数 RI	化合物 Compounds	酒样 Wine sample							阈值 Odor threshold	气味活性值 OAV	气味描述 Odor description
		Pr1	Pr2	M1	M2	Po1	Po2	CK			
1330	异戊醇 Isoamyl alcohol	52447.1±1146.0ab	51241.2±2404.1ab	50975.3±4589.5b	50625.5±784.2b	55746.4±1499.9a	55071.3±1055.3ab	51406.2±1285.6ab	30000[24]	＞1	威士忌，香蕉 Whisky, banana
1446	3-甲基-1-戊醇 Isohexyl alcohol#	301.7±32.6ab	287.6±16.5ab	239.3±56.7c	263.3±5.0bc	326.6±13.2a	321.6±7.9a	273.5±13.4bc	5000[25]	＜0.1	杏仁，烤面包 Almond, toasted
1575	1-庚醇 1-Heptanol	157.6±14.9c	197.9±4.3ab	173.0±42.8bc	209.5±33.2a	120.8±3.5d	114.4±2.8d	209.0±15.0a	1000[25]	＜0.1	生青，甜香 Green, sweet
1677	1-辛醇 1-Octanol	2.1±0.2	2.2±0.1	2.3±0.0	2.2±0.0	2.2±0.0	2.2±0.0	2.1±0.0	120[24]	＜0.1	柑橘，玫瑰 Citrus, rose
1881	1-癸醇 1-Decanol	0.7±0.0d	0.7±0.1cd	0.7±0.0bcd	0.7±0.1bc	0.8±0.0a	0.8±0.0b	0.7±0.0bd	400[24]	＜0.1	果香，花香 Fruity, flowery
2265	1-月桂醇 1-Dodecanol#	0.3±0.0	0.3±0.0	0.3±0.1	0.3±0.0	0.4±0.0	0.4±0.1	0.3±0.1	1000[22]	＜0.1	花香 Flowery
乙酸酯 Acetates		19066.0±945.3bc	20085.3±1191.5b	18190.8±327.7c	16428.2±202.7d	25725.1±747.2a	25594.2±245.3a	16952.6±993.3d			
897	乙酸乙酯 Ethyl acetate	17737.8±776.7bc	18658.4±1016.4b	17191.2±343.0c	15573.2±211.8d	23919.8±705.2a	23821.4±223.3a	15989.1±882.1d	7500[24]	＞1	菠萝，果香 Pineapple, fruity
1029	乙酸异丁酯 Isobutyl acetate	106.4±11.6b	109.4±23.0b	77.1±11.1c	59.4±3.5c	138.9±6.5a	135.7±2.6a	67.8±13.4c	1600[24]	0.1-1	梨，香蕉 Pear, banana
1093	乙酸丁酯 Butyl acetate	8.6±1.9ab	8.8±0.8ab	7.2±0.8bc	6.5±1.2c	9.5±0.4a	10.3±0.5a	7.3±1.1bc	1800[23]	＜0.1	苦杏仁味，青草味 Bitter almond flavor, grassy flavor
1238	乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	1195.4±159.6b	1283.5±159.0b	903.1±53.4c	776.7±28.1c	1638.0±45.5a	1609.0±42.1a	875.3±102.5c	30[24]	＞1	香蕉 Banana
1390	乙酸己酯 Hexyl acetate	10.9±2.9a	12.7±0.1a	6.7±0.2b	6.8±1.6b	12.2±0.8a	11.4±0.4a	7.0±0.6b	1500[25]	＜0.1	梨，甜果 Pear, sweet fruity
1493	乙酸庚酯 Heptyl acetate#	7.0±0.7b	12.5±1.0a	5.4±0.8c	5.6±1.0c	6.8±0.7b	6.4±0.3bc	6.1±0.1bc	NF		樱桃，梨 Cherry, pear
C4—C14 脂肪酸乙酯 C4-C14 Ethyl esters		1053.6±104.4bc	1144.7±30.4b	992.4±56.5c	948.3±40.4c	1294.2±70.0a	1299.6±42.4a	1001.9±66.8c			
1056	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	431.5±30.7c	477.6±19.8b	384.7±17.5de	351.8±19.3e	561.2±33.4a	571.2±21.7a	403.2±46.6cd	20[22]	＞1	草莓，苹果 Strawberry, apple
1074	2-甲基丁酸乙酯 Ethyl 2-methylbutyrate	28.2±10.8a	26.4±6.7a	13.6±2.0b	13.0±0.5b	21.0±3.9ab	24.7±4.7ab	17.4±4.2ab	18[24]	＞1	生青，果香 Green, fruity
1089	异戊酸乙酯 Ethyl isovalerate	15.2±0.5ab	14.0±1.6ab	15.5±1.7ab	16.4±1.8a	16.9±0.3a	16.7±1.0a	13.2±1.7b	3[25]	＞1	甜果，苹果 Sweet fruity, apple
1353	己酸乙酯 Ethyl hexanoate	172.0±31.8bc	192.2±13.4b	174.6±8.4bc	167.1±3.0bc	224.5±11.1a	227.6±2.2a	164.1±15.1c	5[24]	＞1	苹果，草莓 Apple, strawberry

续表 1　Continued table 1

保留指数 RI	化合物 Compounds	酒样 Wine sample							阈值 Odor threshold	气味活性值 OAV	气味描述 Odor description
		Pr1	Pr2	M1	M2	Po1	Po2	CK			
1559	辛酸乙酯 Ethyl octanoate	216.0±45.1b	219.3±21.0b	203.9±14.4b	193.2±4.0bc	262.6±16.2a	266.2±5.3a	172.4±9.7c	5[25]	＞1	苹果，梨，花香 Apple, pear, flowery
1762	癸酸乙酯 Ethyl decanoate	92.0±3.5c	94.3±3.6c	95.6±13.2c	95.8±7.5c	125.5±13.8a	125.1±10.8a	111.2±6.3c	100[25]	＞1	蜡味，果香 Wax, fruity
1966	月桂酸乙酯 Ethyl laurate	97.2±6.3ab	119.7±2.9a	103.5±17.8ab	110.3±26.9a	81.7±33.4ab	67.3±9.2b	119.2±9.6a	1500[27]	＜0.1	花香，果香，奶油 Flowery, fruity, cream
2371	肉豆蔻酸乙酯 Ethyl tetradecanoate	1.5±0.4a	1.3±0.4ab	0.8±0.0c	0.8±0.1c	0.8±0.1c	0.9±0.1bc	1.3±0.4ab	800[22]	＜0.1	NF
其他酯类 Other esters		3616.3±506.6	3668.9±346.9	3721.1±398.1	3752.9±241.1	3819.1±135.9	3791.9±50.0	3722.0±145.4			
1462	乳酸乙酯 Ethyl lactate	2416.6±476.5	2432.2±281.4	2615.8±183.0	2627.8±24.8	2515.5±75.4	2488.7±46.5	2683.6±27.4	14000[22]	0.1-1	乳香，树莓 Lactic, raspberry
1510	辛酸甲酯 Methyl caprylate#	13.4±0.0b	13.5±0.0a	13.5±0.0a	13.5±0.0a	13.5±0.1a	13.5±0.0a	13.3±0.0c	200[27]	＜0.1	柑橘 Citrus
1795	琥珀酸二乙酯 Diethyl succinate	1174.9±49.6ab	1212.4±67.0ab	1079.9±215.0ab	1100.1±237.5ab	1277.0±69.0a	1277.3±8.0a	1012.7±140.8b	200000[22]	＜0.1	生青，果香 Green, fruity
1876	癸酸异丁酯 Isobutyl caprate#	2.7±0.0c	2.7±0.0b	2.7±0.0b	2.7±0.0b	2.8±0.0a	2.8±0.0a	2.8±0.0a	NF		NF
1984	癸酸异戊酯 Isoamyl caprate#	8.8±1.8ab	8.1±1.2b	9.2±1.0ab	8.8±0.9ab	10.2±0.8a	9.6±0.8ab	9.5±0.8ab	NF		NF
脂肪酸 Fatty acids		744.2±161.1b	787.1±114.6b	774.7±83.7b	740.5±37.8b	931.4±77.5a	929.7±66.8a	769.1±35.4b			
1975	己酸 Hexanoic acid#	134.4±37.1b	139.8±18.7ab	135.7±7.0b	129.6±2.7b	162.5±4.2a	161.5±3.1a	149.1±8.7ab	420[25]	0.1-1	奶油，果香 Cream, fruity
2378	辛酸 Octanoic acid	366.4±68.8b	392.7±49.7ab	378.3±26.8b	352.2±14.9b	444.8±17.0a	442.1±29.0a	363.2±17.6b	500[25]	0.1-1	刺激，腐败 Harsh, rancid
2531	壬酸 Nonanoic acid#	61.8±2.2abc	60.4±1.8bc	59.4±3.0a	62.2±0.4abc	63.8±2.9a	62.6±1.4ab	59.2±1.1a	500-800[24]	＜0.1	脂肪，椰子 Fat, coconut
2775	癸酸 Decanoic acid	181.6±53.8b	194.3±45.0ab	201.2±52.0ab	196.5±21.3ab	260.4±63.0a	263.5±37.1a	197.5±25.5ab	1000[25]	0.1-1	脂肪，奶油 Fat, cream
苯衍生物 Phenylethyls		2378.0±123.7a	2334.0±73.9a	1925.0±215.2b	1983.3±26.9b	2012.6±64.5b	1934.7±66.5b	2026.3±111.3b			
1949	乙酸苯乙酯 Phenylethyl acetate	112.6±25.7b	136.0±2.4a	82.3±10.0c	70.6±7.8c	122.3±5.7ab	112.0±7.2b	88.4±15.2c	250[25]	0.1-1	花香，果香，木香 Flowery, fruity, wood
2085	苯乙醇 2-Phenylethanol	2265.4±98.9a	2198.0±71.6a	1842.8±221.6b	1912.7±29.7b	1890.3±60.7b	1822.6±59.8b	1937.8±97.7b	14000[25]	0.1-1	玫瑰，香水 Rose, perfume

表中同一行数据后的不同字母表示处理间差异显著（Duncan 检验，$P<0.05$）；下同。RI：保留指数；OAV：气味活性值=香气化合物浓度/该香气化合物气味阈值；NF：未检测到。#：4-萜烯醇由 α-萜品醇标准曲线定量，辛醛、壬醛由癸醛标准曲线定量，3-甲基-1-戊醇由 1-戊醇标准曲线定量，1-月桂醇由 1-癸醇标准曲线定量，乙酸庚酯由乙酸己酯标准曲线定量，辛酸甲酯由庚酸乙酯标准曲线定量，癸酸异丁酯、癸酸异戊酯由癸酸乙酯标准曲线定量，己酸由辛酸标准曲线定量，壬酸由癸酸标准曲线定量

Data followed by different letters in a row are significantly different ($P<0.05$) by Duncan test; The same as below. RI: Retention indices (on a DB-WAX column); OAV (odor activity value) equals the ratio of the aroma compound concentration to its odor threshold; NF: not found. #: 4-Terpenol was quantified by α-Terpenol, Octanal and Nonanal by Decanal, Isohexyl alcohol by 1-Pentanol, 1-Dodecanol by 1-Decyl alcohol, Heptyl acetate by Hexyl acetate, Methyl caprylate by Ethyl enanthate, Isobutyl caprate and Isoamyl caprate by Ethyl decanoate, Hexanoic acid by Octanoic acid, Nonanoic acid by Decanoic acid

和乙酸异戊酯（OAV＞1）的含量都显著高于其他组。C4—C14 脂肪酸乙酯，包括丁酸乙酯、异戊酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯和癸酸乙酯（上述化合物 OAV 值均大于 1）含量在 Po 处理中显著高于其他酒样。除了果香酯类物质外，Po1 和 Po2 中脂肪酸含量显著高于其他酒样，尤其是辛酸。Pr1 和 Pr2 的苯衍生物显著高于 CK。所有酒样中的高级醇和其他酯类的含量均无显著性差异。

为了观察不同处理对‘户太八号’桃红葡萄酒挥发性香气成分的整体影响，选取 OAV＞0.1 的香气成分进行主成分分析（PCA）。如图 1 所示，前 2 个主成分解释了总方差的 87.99%，其中 PC1、PC2 分别占数据总方差的 61.26%和 26.73%，PC1 为关键主成分。可以看出，香气化合物主要分布在 PC1 的正向端，其中品种香气物质中的 β-紫罗兰酮、香茅醇，发酵香气成分中的 2-甲基丁酸乙酯、苯乙醇、乙酸苯乙酯在 Pr1、Pr2 周围，表明在发酵前添加没食子酸的桃红葡萄酒其苯衍生物以及某些品种香气化合物的含量更高，而发酵香气成分，如癸酸乙酯、癸酸、己酸、辛酸、异戊醇、异戊酸乙酯、己酸乙酯、乙酸乙酯、辛酸乙酯、丁酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸异丁酯、异丁醇等，聚集于 Po1、Po2 周围，表明在发酵后添加没食子酸会更好地稳定桃红葡萄酒中的发酵香气成分。而在 M1、M2、CK 酒样周围，仅有乳酸乙酯位于第四象限，说明发酵中添加没食子酸对葡萄酒香气物质的稳定作用较小。

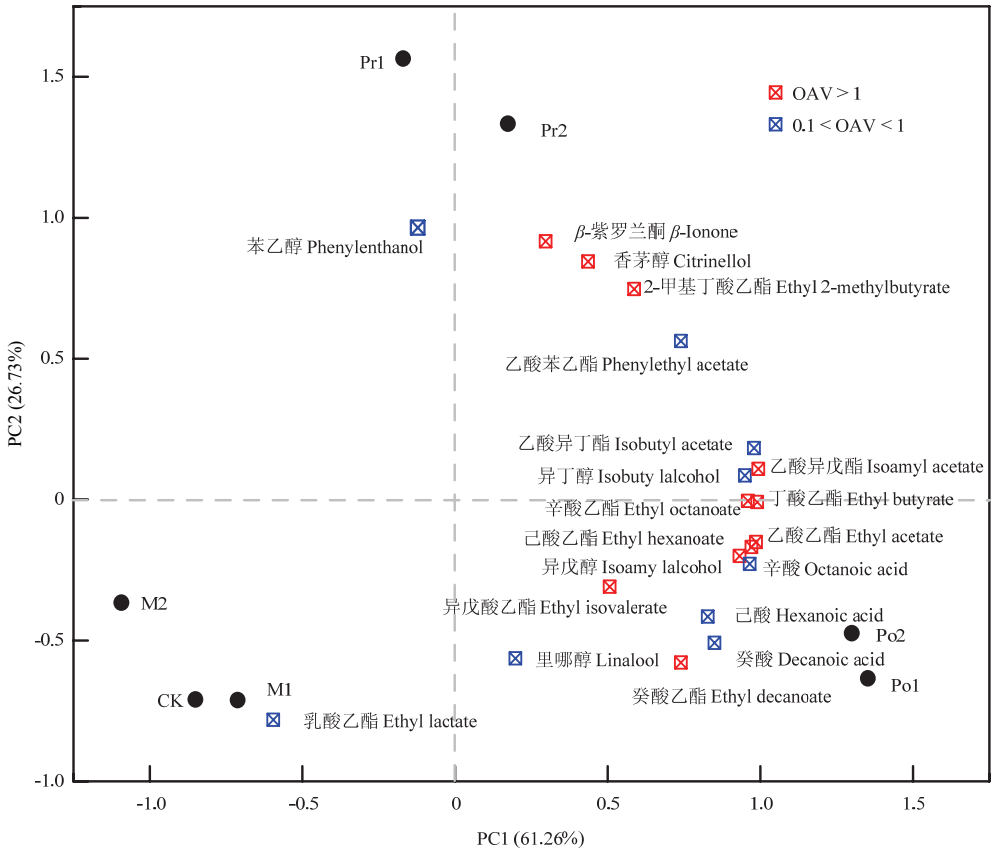


图 1　前两个主成分上的香气成分载荷值及酒样分布

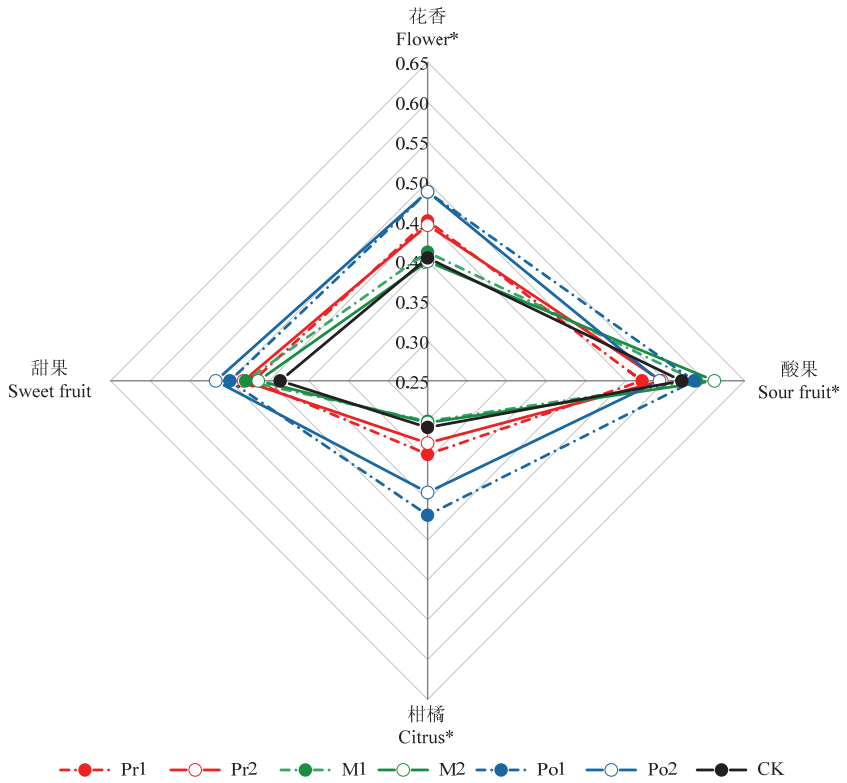
Fig. 1　Loadings of aroma components and distribution of wine samples on the first two PCs

2.2　没食子酸处理对葡萄酒香气特征的影响

经过训练的品评员对供试酒样的 4 种典型香气特征进行量化品评，7 款酒样香气特征的强度评分如图 2 所示。与对照相比，在发酵前（Pr1、Pr2）及发酵后（Po1、Po2）添加没食子酸的处理组均增强了花香、柑橘和甜果香气，且相较于发酵前处理，发酵后处理组对上述香气的增强效果更佳。其中，Po1 更具柑橘和酸果的香气特征，而 Po2 则表现出更多的甜

果香气。Pr1、Pr2 及 Po2 处理一定程度削弱了酸果香气。发酵中添加没食子酸的处理组（M1、M2）中甜果及酸果香气得到增强。对于整体香气的影响，发酵后添加没食子酸效果最佳，发酵前的添加效果优于发酵中处理。

为了揭示不同处理下，葡萄酒的香气特征与香气化合物之间的复杂关系，本研究对 4 种香气特征和 OAV＞0.1 的 10 个类别香气化合物进行了 PLSR。4 种香气特征中，只有柑橘和花香的特征模型满足 PLSR 模型的校正相关系数 R^2c ＞0.80 且预测相关系数 R^2v＞0.70。PLSR 分析结果表明，对于花香特征，除挥发性酚和其他酯类外，其余香气化合物对花香特征均有积极贡献，品种香气物质与发酵香气成分共同作用表现出花香。对于柑橘特征，挥发性酚和其他酯类与其呈负相关，萜烯、脂肪酸及高级醇的回归系数在 0.1—0.2，乙酸酯和 C4—C14 脂肪酸乙酯的回归系数大于 0.2（表 2）。由此可见，果香酯类物质对‘户太八号’桃红葡萄酒的柑橘和花香贡献较大，其次是萜烯类、脂肪酸和高级醇等。



*表示处理间差异显著（Duncan 检验，P＜0.05）
* denote the differences between treatments were significant at 0.05 level by Duncan test

图 2 供试酒样香气特征的感官量化分析结果

Fig. 2 Aroma quantification of different sample wines by sensory analysis

2.3 没食子酸处理对葡萄酒色泽相关理化指标的影响

Pr1 处理组酒样 L^*值显著低于对照，说明该处理可以使酒的颜色加深。Pr1、Pr2 处理组的 a^*值显著增高，反映出发酵前添加没食子酸对酒体红色色调具有显著增强的效果，且 Pr1 效果更好。Pr1、Pr2 处理组的 b^*值显著降低，增强了酒体的蓝色调，Pr2 的降低幅度大于 Pr1，说明发酵前添加没食子酸可有效抑制酒体黄化，且添加量为 300 mg·L^{-1} 的效果更好。h^*_{ab} 是指葡萄酒的色调，越年轻的红葡萄酒 h^*_{ab} 值越小，酒体呈紫红或宝石红，反之则呈瓦红或砖红。除 Po2 外，各处理 h^*_{ab} 均显著低于对照组，其中 Pr1、Pr2 处理组与对照组的差异最显著（P＜0.05）（表 3）。说明发酵前处理可以延缓葡萄酒的老化，使其颜色向

紫色和宝石红转变。除了 Pr1、Pr2 处理组外，其他各处理组的 L^*、a^*、b^*和 ΔE^*_{ab} 值与对照均无显著差异，而只有 M1 处理组的 C^*_{ab} 值（饱和度）显著增加。综上，说明发酵前添加没食子酸对于葡萄酒色泽更有益处。结合各处理葡萄酒的颜色表征也可观察到，Pr1 和 Pr2 酒增强了‘户太八号’桃红葡萄酒的紫红色调，且 Pr1 的紫红色调强于 Pr2。因此，在发酵前添加 200 $mg·L^{-1}$ 可能是改善葡萄酒色泽的有效方案。

表 2　香气化合物与 4 种香气特征 PLSR 分析

Table 2　PLS regression of four aroma attributes by aroma volatiles

香气特征 Aroma trait	花香 Floral fragrance	柑橘 Orange	酸果 Sour fruit	甜果 Sweet fruit
萜烯类 Terpenols	0.121	0.113	-0.060	0.102
C6 化合物 C6 compounds	0.016	0.015	-0.008	0.014
C13-去甲类异戊二烯 C13-norisoprenoids	0.084	0.079	-0.041	0.071
挥发性酚 Volatile phenols	-0.068	-0.064	0.033	-0.057
高级醇 Higher alcohols	0.205	0.193	-0.101	0.173
乙酸酯 Acetates	0.214	0.201	-0.105	0.180
C4—C14 脂肪酸乙酯 C4-C14 Ethyl esters	0.215	0.202	-0.106	0.181
其他酯类 Other esters	-0.159	-0.150	0.079	-0.134
脂肪酸 Fatty acids	0.188	0.177	-0.093	0.159
苯衍生物 Phenylethyls	0.019	0.018	-0.010	0.016
B_{0w}	0.117	3.642	23.548	8.471
R^2 (calibration/validation)	0.995/0.877	0.878/0.701	0.242/NA	0.708/0.451
RMSE	0.002	0.015	0.026	0.013

系数为标准系数；NA：无法得到有效值

The coefficient is the standard coefficient; NA: The valid value is not available

表 3　不同处理葡萄酒中 CIELab 颜色空间参数

Table 3　Phenolics content and color attributes of wine samples with different treatments

颜色参数 Chromatic parameter	Pr1	Pr2	M1	M2	Po1	Po2	CK
L^*	96.41±0.28b	96.88±0.11ab	96.83±0.44ab	96.78±0.16ab	97.08±0.12a	96.86±0.04ab	96.97±0.05a
a^*	3.78±0.23a	3.18±0.46b	2.56±0.12c	2.76±0.06bc	2.29±0.05c	2.75±0.00bc	2.60±0.32bc
b^*	2.35±1.04bc	1.82±0.27c	4.73±1.17a	4.30±0.53a	3.71±0.10ab	3.63±0.04ab	3.82±0.11a
C^*_{ab}	4.50±0.35abc	3.67±0.26c	5.39±1.08a	5.11±0.41abc	4.36±0.11abc	4.56±0.03abc	4.14±0.54bc
h^*_{ab} (°)	31.35±12.87d	30.01±7.24d	61.03±4.93a	57.16±3.80b	58.27±0.12ab	52.92±0.31c	55.02±15.93c
ΔE^*_{ab}	2.04±0.81a	2.10±0.39a	1.01±1.10ab	0.57±0.48b	0.36±0.11b	0.26±0.01b	0.23±0.14b
颜色表征 Color representation							

同一指标不同处理间同行数据后的不同字母表示差异显著（Duncan 检验，$P<0.05$）。$\triangle E^*_{ab}$ 的计算选取对照酒样之一作为参照酒样

Different lowercase letters in a row indicate significant difference among treatments at 0.05 level. In the calculation of $\triangle E^*_{ab}$, one of the control samples was selected as the reference sample

经过 6 个月的储藏，供试酒样的花色苷浓度为 49.55—70.00 mg·L^{-1}，各处理组之间差异显著（$P<0.05$），Pr1、Pr2 处理组浓度最高，但与对照差异均不显著。Pr1、Po1 处理则使辅色花色苷比例（CA）显著提升，说明这两种处理有效促进了辅色反应。Pr1 处理还显著提升了酒样的黄酮醇含量。Po2 处理对酒石酸酯的提升作用最显著，其次是 Pr1、Pr2 处理。相反地，M2 处理导致酒石酸酯含量显著降低。推测可能是因为发酵后期乙醇含量最高，酒石酸、乙醇和酚酸之间会发生更多的酯化反应；另外，发酵后添加没食子酸可使酒石酸酯更稳定。

表 4 不同处理葡萄酒的色泽理化指标

Table 4 Physicochemical indexes of wine samples under different treatments

指标 Index	Pr1	Pr2	M1	M2	Po1	Po2	CK
总花色苷 Anthocyanins (mg·L^{-1})	70.00±6.43a	70.00±0.00a	58.64±3.21ab	49.55±3.21b	60.91±6.43b	54.09±3.21ab	58.64±5.87ab
游离花色苷比例 FA (%)	23.16±4.47bc	33.81±0.67a	17.58±3.43c	19.10±2.76c	22.90±4.11bc	29.46±3.95ab	19.78±2.39c
多聚体花色苷比例 PA (%)	61.17±4.63b	55.49±2.33b	73.59±3.06a	71.35±4.15a	59.03±1.37b	62.37±6.08b	71.21±2.62a
辅色花色苷比例 CA (%)	15.67±0.17a	10.70±3.00b	8.83±0.37b	9.55±1.38b	18.06±2.74a	8.17±2.13b	9.01±1.21b
黄酮醇 Xanthone alcohol (mg·L^{-1})	56.00±6.76a	44.57.89±2.02b	46.00±4.54b	47.43.00±3.22b	44.57±3.18b	44.32±2.86b	45.99±0.53b
酒石酸酯 Tartaric acid ester (mg·L^{-1})	66.76±6.23ab	66.76±2.07ab	55.00±2.98ab	50.59±1.56b	60.88±6.24ab	74.12±10.80a	59.41±3.13ab
离子化指数 Ionization index (%)	17.71±0.87d	12.41±1.50e	32.05±2.33a	27.54±1.05ab	21.97±0.21cd	23.55±2.43bc	26.16±0.98bc

3 讨论

3.1 没食子酸影响‘户太八号’桃红葡萄酒香气物质含量

葡萄酒中香气化合物的挥发呈香不仅取决于其含量和化学特性，还取决于葡萄酒中的非挥发性物质[28]，如酚类、多糖和蛋白质，这一现象称为基质效应。酚类物质是红葡萄酒中主要的非挥发性基质，对葡萄酒香气有重要影响[29]，被认为是一种潜在的重要香气调节因子。LAMBROPOULOS 等[15]研究认为，咖啡酸和没食子酸可以减缓葡萄酒贮藏过程中几种酯类和萜烯类化合物含量下降的速度。研究还表明，模拟葡萄酒环境下酚酸可以减缓里哪醇、香茅醇、α-萜品醇[13]及 2-甲基吡嗪的挥发释放[14]。本研究中，没食子酸的添加时间对葡萄酒的香气影响较大，且多为正向影响，可能是因为添加没食子酸一方面可以延缓一些香气化合物的释放，另一方面还可以延缓一些果香酯类物质的水解。香气物质的定性定量分析结果表明，发酵前处理对品种香气物质的稳定效果显著，而发酵后处理稳定发酵香气物质的效果显著。

酚类物质在香气物质气液分配中通过与其相互作用而产生影响，主要是分子间弱的非共价相互作用，如氢键、色散力和疏水作用等。有研究表明，不同类别的酚类物质与香气化合物之间的相互作用力存在差异，JUNG 等[30]通过 1D 和 2D ^{1}H NMR 发现没食子酸与 2-甲基吡嗪、香兰素和苯甲酸乙酯的相互作用通过 π-π 键和氢键来调节，DUFOUR 等[31]使用 NMR 和可见吸收光谱发现儿茶素、花青素与香气物质之间主要是疏水作用。本研究未涉及没食子酸与葡萄酒香气物质之间的分子互作，相关研究将在未来通过感官组学、分子互作热力学、量子化学计算展开。

3.2 没食子酸处理对‘户太八号’桃红葡萄酒典型香气的影响

据 LI 等[7]报道，‘户太八号’桃红葡萄酒的典型香气是果香和花香，本研究中，品评员清晰感知供试酒样的花香、柑橘、酸果、甜果香气特征并进行了强度量化分析，与对照酒样相比，没食子酸添加处理的葡萄酒具有更高的香气强度，且发酵后处理改善葡萄酒香气的效果最佳。偏最小二程回归（PLSR）常被应用于探索葡萄酒典型香气与气味化合物之间的数学关系。YANG 等[32]构建了 PLSR 模型，揭示萜烯中的里那醇对媚丽葡萄酒的柑橘和花香特征有重要贡献，LI 等[7]通过 PLSR 模型发现乙酸酯和高级醇对‘户太八号’桃红葡萄酒的典型香气

有重要作用。本研究采用供试酒样中的香气物质构建了典型香气的 PLSR 回归模型，发现没食子酸处理改善的柑橘和花香特征的主要贡献香气物质是乙酸酯、脂肪酸乙酯、高级醇、脂肪酸和萜烯类化合物（回归系数＞0.1），说明稳定的发酵香气物质对‘户太八号’桃红葡萄酒的典型香气贡献最大，这与 ROUSSIS 等[33]的研究结果一致，即谷胱甘肽、咖啡酸和没食子酸的混合物可以稳定低二氧化硫年轻干红葡萄酒的果香特征。

3.3　没食子酸处理对‘户太八号’桃红葡萄酒的护色作用

酚类化合物是红葡萄酒中重要的辅色物质[34-35]，本研究发现，发酵前添加处理具有良好的护色效果，且 200 mg·L^{-1} 处理水平对色泽的改善效果优于 300 mg·L^{-1} 水平。WANG 等[36]发现在葡萄酒发酵浸渍过程中，花色苷最早被浸提达到含量峰值，而无色多酚的浸提速度较慢，这与本研究中发酵前添加没食子酸处理具有更好护色效果的结论一致。花色苷等指标的分析结果表明，发酵前添加 200 mg·L^{-1} 的没食子酸显著提升了‘户太八号’桃红葡萄酒的辅色花色苷比例，而 300 mg·L^{-1} 处理增加了酒中游离花色苷的比例。桃红葡萄酒中花色苷含量较低，200 mg·L^{-1} 没食子酸的辅色作用较好，而更高含量的酚酸添加反而不利于辅色反应。本研究中添加的没食子酸具有既苦又涩的味感特征，在葡萄酒中没食子酸的含量最高可达 120 mg·L^{-1}[37]。有研究发现，没食子酸浓度在 1 000 mg·L^{-1} 以下时不会给葡萄酒带来明显的苦涩味[38]，因此，200—300 mg·L^{-1} 的没食子酸添加量不会影响‘户太八号’桃红葡萄酒味感特征。

4　结论

以‘户太八号’葡萄为试材酿造桃红葡萄酒，研究在酿造过程中没食子酸添加处理稳定桃红葡萄酒香气和色泽的应用潜力。研究得出，发酵前没食子酸处理对品种香气物质的稳定效果显著，而发酵后处理对稳定发酵香气物质的效果显著；感官分析得出，发酵后没食子酸处理对葡萄酒香气的改善效果最佳，且 200 和 300 mg·L^{-1} 处理水平的效果差异不大，PLSR 模型揭示稳定的发酵香气物质对‘户太八号’桃红葡萄酒的典型香气贡献最大；对于葡萄酒色泽，发酵前没食子酸处理的护色效果最佳，200 mg·L^{-1} 处理显著提升了‘户太八号’桃红葡萄酒的辅色花色苷比例。

参考文献 References

[1] 刘寅喆, 于祎飞, 刘俊, 梁志涛, 刘雯斐. 葡萄产业现状与发展对策研究. 河北林业科技, 2019(2): 50-56.
LIU Y Z, YU Y F, LIU J, LIANG Z T, LIU W F. Current situation and development strategy of grape industry in mountainous areas of Hebei Province. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2019(2): 50-56. (in Chinese)

[2] ZHANG L, TAO Y S, LIANG Y Y, WANG H. On-vine grape freezing effect on volatile compounds in must from ‘Hutai No. 8’ grape. Proceedings of the Eighth International Symposium on Viticulture and Enology, 2013: 123-129.

[3] 王海波, 王宝亮, 王孝娣, 魏长存, 聂继云, 刘凤之. 我国葡萄产业现状与存在问题及发展对策. 中国果树, 2010(6): 69-71.
WANG H B, WANG B L, WANG X D, WEI C C, NIE J Y, LIU F Z. Present situation, existing problems and development countermeasures of grape industry in China. China Fruits, 2010(6): 69-71. (in Chinese)

[4] 都晗, 梁艳英, 王鑫, 李华, 王华. 酿酒和鲜食葡萄酿造起泡葡萄酒品质差异研究. 中国酿造, 2018, 37(12): 22-27.
DU H, LIANG Y Y, WANG X, LI H, WANG H. Quality difference in sparkling wines fermented by wine grape and table grape. China Brewing, 2018, 37(12): 22-27. (in Chinese)

[5] MASSERA A, ASSOF M, SARI S, CIKLIC I, MERCADO L, JOFRÉ V, COMBINA M. Effect of low temperature fermentation on the yeast-derived volatile aroma composition and sensory profile in Merlot wines. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111069.

[6] COMITINI F, GOBBI M, DOMIZIO P, ROMANI C, LENCIONI L, MANNAZZU I, CIANI M. Selected non-*Saccharomyces* wine yeasts in controlled multistarter fermentations with *Saccharomyces cerevisiae*. Food Microbiology, 2011, 28(5): 873-882.

[7] LI N, WANG L Y, YIN J, MA N, TAO Y S. Adjustment of impact odorants in Hutai-8 rose wine by co-fermentation of *Pichia fermentans* and *Saccharomyces cerevisiae*. Food Research International, 2022, 153: 110959.

[8] CHEN K, ESCOTT C, LOIRA I, DEL FRESNO J M, MORATA A, TESFAYE W, CALDERON F, SUÁREZ-LEPE J A, HAN S Y, BENITO S. Use of non-*Saccharomyces yeasts* and oenological tannin in red winemaking: Influence on colour, aroma and sensorial properties of young wines. Food Microbiology, 2018, 69: 51-63.

[9] JEREMIC J, VONGLUANNGAM I, RICCI A, PARPINELLO G P, VERSARI A. The oxygen consumption kinetics of commercial

oenological tannins in model wine solution and Chianti red wine. Molecules, 2020, 25(5): 1215.

[10] ZHANG X K, HE F, ZHANG B, REEVES M J, LIU Y, ZHAO X, DUAN C Q. The effect of prefermentative addition of Gallic acid and ellagic acid on the red wine color, copigmentation and phenolic profiles during wine aging. Food Research International, 2018, 106: 568-579.

[11] HERAS-ROGER J, DÍAZ-ROMERO C, DARIAS-MARTÍN J. What gives a wine its strong red color? Main correlations affecting copigmentation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(34): 6567-6574.

[12] CHEN K, ESCOTT C, LOIRA I, DEL FRESNO J M, MORATA A, TESFAYE W, CALDERON F, BENITO S, SUÁREZ-LEPE J A. The effects of pre-fermentative addition of oenological tannins on wine components and sensorial qualities of red wine. Molecules, 2016, 21(11): 1445.

[13] WANG X J, LI Y K, SONG H C, TAO Y S, RUSSO N. Phenolic matrix effect on aroma formation of terpenes during simulated wine fermentation-Part I: Phenolic acids. Food Chemistry, 2021, 341: 128288.

[14] ARONSON J, EBELER S E. Effect of polyphenol compounds on the headspace volatility of flavors. American Journal of Enology and Viticulture, 2004, 55(1): 13-21.

[15] LAMBROPOULOS I, ROUSSIS I G. Inhibition of the decrease of volatile esters and terpenes during storage of a white wine and a model wine medium by caffeic acid and Gallic acid. Food Research International, 2007, 40(1): 176-181.

[16] TAO Y S, LI H, WANG H, ZHANG L. Volatile compounds of young Cabernet Sauvignon red wine from Changli County (China). Journal of Food Composition and Analysis, 2008, 21(8): 689-694.

[17] TAO Y S, LIU Y Q, LI H. Sensory characters of Cabernet Sauvignon dry red wine from Changli County (China). Food Chemistry, 2009, 114(2): 565-569.

[18] 李运奎, 韩富亮, 张予林, 王华. 基于 CIELAB 色空间的红葡萄酒颜色直观表征. 农业机械学报, 2017, 48(6): 296-301.
LI Y K, HAN F L, ZHANG Y L, WANG H. Visualization for representation of red wine color based on CIELAB color space. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 296-301. (in Chinese)

[19] 彭传涛, 贾春雨, 文彦, 陶永胜. 苹果酸-乳酸发酵对干红葡萄酒感官质量的影响. 中国食品学报, 2014, 14(2): 261-268.
PENG C T, JIA C Y, WEN Y, TAO Y S. Influence of *Malo*-lactic fermentation on the sensory quality of dry red wine. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(2): 261-268. (in Chinese)

[20] CLIFF M A, KING M C, SCHLOSSER J. Anthocyanin, phenolic composition, colour measurement and sensory analysis of BC commercial red wines. Food Research International, 2007, 40(1): 92-100.

[21] BOULTON R. The copigmentation of anthocyanins and its role in the color of red wine: A critical review. American Journal of Enology and Viticulture, 2001, 52(2): 67-87.

[22] LI H, TAO Y S, WANG H, ZHANG L. Impact odorants of Chardonnay dry white wine from Changli county (China). European Food Research and Technology, 2008, 227(1): 287-292.

[23] CULLERÉ L, ESCUDERO A, CACHO J, FERREIRA V. Gas chromatography-olfactometry and chemical quantitative study of the aroma of six premium quality Spanish aged red wines. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(6): 1653-1660.

[24] PENG C T, WEN Y, TAO Y S, LAN Y Y. Modulating the formation of Meili wine aroma by prefermentative freezing process. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(7): 1542-1553.

[25] WANG X J, TAO Y S, WU Y, AN R Y, YUE Z Y. Aroma compounds and characteristics of noble-rot wines of Chardonnay grapes artificially botrytized in the vineyard. Food Chemistry, 2017, 226: 41-50.

[26] LÓPEZ R, AZNAR M, CACHO J, FERREIRA V. Determination of minor and trace volatile compounds in wine by solid-phase extraction and gas chromatography with mass spectrometric detection. Journal of Chromatography A, 2002, 966(1/2): 167-177.

[27] HU K, JIN G J, MEI W C, LI T, TAO Y S. Increase of medium-chain fatty acid ethyl ester content in mixed *H. uvarum*/*S. cerevisiae* fermentation leads to wine fruity aroma enhancement. Food Chemistry, 2018, 239: 495-501.

[28] EBELER S E, THORNGATE J H. Wine chemistry and flavor: Looking into the crystal glass. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(18): 8098-8108.

[29] PEREZ-JIMÉNEZ M, CHAYA C, POZO-BAYÓN M Á. Individual differences and effect of phenolic compounds in the immediate and prolonged in-mouth aroma release and retronasal aroma intensity during wine tasting. Food Chemistry, 2019, 285: 147-155.

[30] JUNG D M, DE ROPP J S, EBELER S E. Application of pulsed field

gradient NMR techniques for investigating binding of flavor compounds to macromolecules. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(15): 4262-4269.

[31] DUFOUR C, SAUVAITRE I. Interactions between anthocyanins and aroma substances in a model system. Effect on the flavor of grape-derived beverages. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(5): 1784-1788.

[32] YANG Y, JIN G J, WANG X J, KONG C L, LIU J B, TAO Y S. Chemical profiles and aroma contribution of terpene compounds in Meili (*Vitis vinifera* L.) grape and wine. Food Chemistry, 2019, 284: 155-161.

[33] ROUSSIS I G, PATRIANAKOU M, DROSSIADIS A. Protection of aroma volatiles in a red wine with low sulphur dioxide by a mixture of glutathione, caffeic acid and Gallic acid. South African Journal of Enology and Viticulture, 2016, 34(2): 262-265.

[34] GÓMEZ-MÍGUEZ M, GONZÁLEZ-MANZANO S, ESCRIBANO-BAILÓN M T, HEREDIA F J, SANTOS-BUELGA C. Influence of different phenolic copigments on the color of malvidin 3- glucoside. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(15): 5422-5429.

[35] LIU Y, ZHANG B, HE F, DUAN C Q, SHI Y. The influence of prefermentative addition of Gallic acid on the phenolic composition and chromatic characteristics of cabernet sauvignon wines. Journal of Food Science, 2016, 81(7): C1669-C1678.

[36] WANG L H, SUN X Y, LI F, YU D, LIU X Y, HUANG W D, ZHAN J C. Dynamic changes in phenolic compounds, colour and antioxidant activity of mulberry wine during alcoholic fermentation. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 254-265.

[37] STERNEDER S, STOEGER V, DUGULIN C A, LISZT K I, PIZIO A D, KORNTHEUER K, DUNKEL A, EDER R, LEY J P, SOMOZA V. Astringent Gallic acid in red wine regulates mechanisms of gastric acid secretion *via* activation of bitter taste sensing receptor TAS2R4. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(36): 10550-10561.

[38] ROBICHAUD J L, NOBLE A C. Astringency and bitterness of selected phenolics in wine. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1990, 53(3): 343-353.

（责任编辑　赵伶俐）

附表　香气标准曲线

Appendix　Table Standard aroma curve

保留时间 RT	物质名称 Substance Name	方程 Equation	R^2	浓度范围 Concentration Range (μg·L^{-1})
发酵香气 Fermentative aroma compounds				
8.06	乙酸乙酯 Ethyl acetate	y=6137.4x+1670.6	0.9994	600-90200
11.63	乙酸异丁酯 Isobutyl acetate	y=611.67x+2.5272	0.9995	40-240
12.48	丁酸乙酯 Ethyl butyrate	y=1368.4x+8.9756	0.9992	7-1080
13.02	2-甲基丁酸乙酯 Ethyl 2-methylbutyrate	y=1256.7x-0.3623	0.9985	3-100
13.54	异戊酸乙酯 Ethyl isovalerate	y=1340.4x-3.0966	0.9981	0.7-100
13.69	乙酸丁酯 Butyl acetate	y=1133.7x+0.7744	0.9961	6-40
14.57	异丁醇 Isobutyl alcohol	y=10193x-504.61	0.9953	600-90000
15.54	乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	y=117.72x+3.9194	0.9955	53-80000
19.07	异戊醇 Isoamyl alcohol	y=3907x-342.31	0.9987	2157-323600
20.06	己酸乙酯 Ethyl hexanoate	y=34.728x-12.257	0.9961	24-3600
20.52	1-戊醇 1-Pentanol	y=6600.3x-20.443	0.9997	3-500
21.42	乙酸己酯 Hexyl acetate	y=31.471x+0.1069	0.9991	7-1000
24.06	乳酸乙酯 Ethyl lactate	y=58808x+689.14	0.9989	1375-206200
24.49	1-己醇 1-Hexanol	y=338.42x-33.127	0.9993	200-30000
28.05	1-庚醇 1-Heptanol	y=201.8x-1.3246	0.9997	0-1000
28.1	辛酸乙酯 Ethyl octanoate	y=23.32x+12.793	0.996	20-3000
30.08	癸醛 Decanal	y=1.0056x+0.38	0.9972	9-1400
31.61	1-辛醇 1-Octanol	y=11.538x+0.7669	0.9997	3-12500
34.26	癸酸乙酯 Ethyl decanoate	y=40.701x+2.515	0.9974	5-800
35.34	琥珀酸二乙酯 Diethyl succinate	y=552.68x-414.01	0.9973	533-80000
37.98	1-癸醇 1-Decanol	y=6.2735x+0.1666	0.9988	0-1600
39.14	乙酸苯乙酯 Phenylethyl acetate	y=124.14x-6.9326	0.9987	4-600
39.59	月桂酸乙酯 Ethyl laurate	y=275.42x+2.4218	0.9981	2-360
41.35	苯乙醇 2-Phenylethanol	y=980.01x-124.12	0.9994	1333-200000
43.76	肉豆蔻酸乙酯 Ethyl tetradecanoate	y=63.373x-0.2355	0.9996	0-240
43.99	辛酸 Octanoic acid	y=61.544x+30.96	0.9985	40-6000
49.54	癸酸 Decanoic acid	y=135x+17	0.999	9-1400
品种香气 Varietal aroma compounds				
25.6	(Z)-3-己烯-1-醇 Z-3-Hexen-1-ol	y=11494x+7.8778	0.9975	0.02-1600
31.16	里哪醇 Linalool	y=1871x-200.32	0.9989	0.02-1600
36.08	α-萜品醇 α-Terpineol	y=5238.5x-165.45	0.9926	0.02-1600
37.64	香茅醇 Citronellol	y=3511.9x-7.5813	0.9999	0.02-1600
42.05	β-紫罗兰酮 β-Ionone	y=675.69x-11.848	0.998	0.02-1600
46.68	丁子香酚 Eugenol	y=15037x-76.044	0.9949	0.02-1600

此标准曲线仅适用于 Shimadzu QP2020 GC-MS 和 DB-WAX 色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm，Agilent J&W，USA）通过 SCAN 法所分析的酒样谱图；y：真实浓度；x：稀释 4 倍酒样的目标物峰面积/2-辛醇峰面积；2-辛醇加量为 40 μg·L^{-1}，其余稀释倍数酒样的香气定量分析可进行相应倍数调整

This standard curve is only applicable to wine samples analyzed by Shimadzu QP2020 GC-MS and DB-WAX columns (60 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent J&W, USA) by SCAN method; y: True concentration; x: Diluted 4 times the target material peak area/2-octane peak area of the wine sample; The dosage of 2-octanol was 40 μg·L^{-1}, and the quantitative analysis of aroma of wine samples with other dilution ratios could be adjusted accordingly