

新疆‘和田红’葡萄酿造的5种酒品质特性及挥发性风味物质分析

冯梦涵^{1,2}, 胡佳星², 毕金峰², 张爱东³, 王丽萍³, 李 旋², 杨 杨^{1,*}

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193;

3. 新疆阆丰农业科技有限责任公司, 新疆 和田 848400)

摘 要: 以新疆‘和田红’葡萄为原料, 分别制备干型葡萄酒、半甜型葡萄酒(均为发酵酒)、加强型葡萄酒及乙醇体积分数52%、76%葡萄蒸馏酒, 分别分析基本理化指标、功能性成分、矿物元素及挥发性风味化合物。结果表明, 干型、半甜型、加强型葡萄酒中功能性成分(总酚、总黄酮、单宁及总黄烷醇)和矿物元素含量高于2种葡萄蒸馏酒。76%蒸馏酒中挥发性风味化合物种类丰富(44种), 总质量浓度最高(1 726.47 $\mu\text{g/L}$)。结合气味活度值(odor activity value, OAV), 5种酒共鉴定出8种关键香气物质($\text{OAV} \geq 1$), 共有关键香气物质为乙醇、异丁醇、己酸乙酯、异戊醇、癸酸甲酯及9-癸酸乙酯为蒸馏酒独有关键香气物质, 1-壬醇、壬醛为加强型葡萄酒独有关键香气物质。相关性分析表明, 挥发性风味物质(除酸类)之间呈正相关。锌、锰、磷、钾、钠、钙元素可促进酯类合成, 镁元素促进萜烯类物质生成。本研究明确了‘和田红’葡萄不同酿造工艺的制酒品质差异, 为‘和田红’葡萄酒工艺优化及产品开发提供理论支撑。

关键词: ‘和田红’葡萄; 酿造工艺; 发酵酒; 葡萄蒸馏酒; 品质特性; 矿物质元素; 挥发性化合物

Analysis of Quality Characteristics and Volatile Flavor Compounds of Five Alcoholic Drinks Produced from ‘Hotan Hong’ Grapes in Xinjiang

FENG Menghan^{1,2}, HU Jiaying², BI Jinfeng², ZHANG Aidong³, WANG Liping³, LI Xuan², YANG Yang^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

3. Xinjiang Khotan Feng Agricultural Science and Technology Co. Ltd., Hotan 848400, China)

Abstract: In this study, Xinjiang ‘Hotan Hong’ grapes were used as raw material to prepare dry wine, semi-sweet wine (both fermented wines), fortified wine, as well as grape distilled spirits with ethanol volume fractions of 52% and 76%. Basic physicochemical indexes, functional components, mineral elements and volatile flavor compounds were analyzed respectively. The results showed that the contents of functional components (total phenols, total flavonoids, tannins and total flavanols) and mineral elements in dry, semi-sweet and fortified wines were higher than those in the two grape distilled spirits. The 76% distilled spirit possessed the richest types of volatile flavor compounds (44) and the highest total content (1 726.47 $\mu\text{g/L}$). Combined with odor activity value (OAV), a total of 8 key aroma compounds ($\text{OAV} \geq 1$) were identified in the five wines. Ethanol, isobutanol and ethyl hexanoate were the common key aroma substances; isoamyl alcohol, methyl decanoate and ethyl 9-decanoate were the unique key aroma substances of distilled spirits; and 1-nonanol and nonanal were unique to fortified wine. Correlation analysis showed that volatile flavor compounds (except acids) were positively correlated with each other. Zn, Mn, P, K, Na and Ca promoted the synthesis of esters, and Mg facilitated the formation of terpenoids. This study clarified the quality differences of wines produced from ‘Hotan Hong’ grapes under different brewing processes, and provided theoretical support for the process optimization and product development of ‘Hotan Hong’ wine.

收稿日期: 2025-10-09

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02029-3); 和田葡萄种植与精深加工关键技术研究示范项目

第一作者简介: 冯梦涵(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学与工程。E-mail: 2929613719@qq.com

*通信作者简介: 杨杨(1981—), 女, 教授, 博士, 研究方向为果蔬采后生理与分子生物学、果蔬贮藏加工。

E-mail: northerapril@126.com

Keywords: ‘Hotan Hong’ grape; brewing process; fermented wine; grape distilled spirit; quality characteristics; mineral; volatile compound

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.022

中图分类号: TS262.6

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 05-0171-10

引文格式:

冯梦涵, 胡佳星, 毕金峰, 等. 新疆‘和田红’葡萄酿造的5种酒品质特性及挥发性风味物质分析[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 171-180. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.022. <http://www.chinabrewing.net.cn>

FENG Menghan, HU Jiaxing, BI Jinfeng, et al. Analysis of quality characteristics and volatile flavor compounds of five alcoholic drinks produced from ‘Hotan Hong’ grapes in Xinjiang[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 171-180. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.022. <http://www.chinabrewing.net.cn>

‘和田红’葡萄 (*Vitis vinifera* L. cv. ‘Hotan Hong’) 是新疆和田地区特有的本土欧亚种葡萄, 在当地酿酒葡萄品种中占据核心地位^[1-2]。该品种不仅表现出极强的耐旱、耐盐碱特性, 其果实品质优异, 可溶性固形物质量分数高达18%~24%, 且富含花色苷和萜烯类物质, 是酿造优质葡萄酒的天然原料^[3]。‘和田红’葡萄因其种植地区独特的钙质土壤积累了钾 (K)、钙 (Ca)、镁 (Mg) 及特征性的锶等矿物元素^[4]。然而, 目前针对‘和田红’葡萄的系统性研究多集中于栽培生理或基础理化性质分析^[5]。对其在特定风土条件下积累的独特矿物元素及特征挥发性香气物质的研究尚显不足, 制约了该品种葡萄酒的市场竞争力。

葡萄酒的酿造工艺是决定产品风格、营养功能与市场定位的核心因素。发酵型工艺通过调控发酵进程保留品种天然成分, 如干型葡萄酒追求糖分彻底转化, 半甜型葡萄酒利用残糖平衡感官, 加强型葡萄酒的酿造工艺通过添加乙醇终止发酵以提升陈酿潜力; 而蒸馏工艺则依赖“富集-分离”效应, 利用沸点差异实现组分重组并诱发酯化、美拉德反应等化学变化, 赋予酒体复杂浓郁的香气^[6], 但同时也伴随着热敏感成分的损失或转化^[7]。薛菊兰等^[8]研究表明, 慕萨莱思酿酒酵母通过酶促途径释放“和田红”葡萄中结合态的潜在香气。葡萄蒸馏酒依赖“富集-分离”效应, 利用乙醇与其他成分的沸点差异显著提升乙醇含量。在蒸馏过程中, 挥发性成分会发生酯化、乙酰化、美拉德反应和Strecker降解等化学反应, 促使芳香化合物显著增加, 赋予酒体复杂浓郁的香气^[9]。目前, 国内关于‘和田红’葡萄酒的研究集中于传统的发酵工艺 (如慕萨莱思的酿造方法研究^[10]), 关于不同工艺酿造‘和田红’葡萄酒品质差异的系统性研究鲜见报道。

本研究以‘和田红’葡萄为研究对象, 分别采用不同工艺酿造干型葡萄酒、半甜型葡萄酒 (均为发酵酒)、加强型葡萄酒及乙醇体积分数52%、76%蒸馏酒, 采用常规检测方法测定基本理化指标及功能性成分, 采用电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled

plasma-mass spectrometry, ICP-MS) 法测定矿物元素含量, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 法解析各酒样挥发性风味物质组成的差异, 并对矿物元素及挥发性风味物质进行相关性分析, 旨在阐明不同工艺酿造酒的品质差异, 为提高‘和田红’酿造酒的品质及风味提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新疆‘和田红’葡萄于2022年9月份采摘自新疆维吾尔自治区和田地区于田县昆仑山葡萄园, 挑选可溶性固形物含量达18~20 °Brix、无病虫害、无腐烂、无机械损伤的葡萄浆果, 采摘后放入4~7 °C冷库中预冷24 h, 散去田间热。加工前除去表面杂物, 剔除腐烂粒, 用清水漂洗干净, 沥干后备用。酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) CECA 安琪酵母股份有限公司。

净化活性炭 (食品级) 美国卡尔冈碳素公司; 单宁含量检测试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; 甲醇、乙腈、对二甲氨基肉桂醛 (4-(dimethylamino) cinnamaldehyde, DMACA) (均为色谱纯) 上海麦克林生化科技股份有限公司; 4-辛醇、乙醇、氢氧化钠、氯化钠、亚硝酸钠、九水合硝酸铝、苯酚、盐酸、硫酸铜、酒石酸钾钠、氯化钠、福林酚试剂 (均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司; 葡萄糖、芦丁、没食子酸标准品 (纯度>98%) 上海源叶生物科技有限公司; 2-乙基-1-己醇 (色谱纯) 梯希爱 (上海) 化成工业发展有限公司; 镉 (Ge)、钠 (Na)、镁 (Mg) 等多元素混合内标、HNO₃多元素校准标样 (纯度>98%) 美国Agilent公司; 锶 (Sr) 元素、硼 (B) 元素、铷 (Rb) 元素 (纯度>98%) 国家标准物质中心; C₈~C₃₀正构烷烃 (纯度>98%) 美国Sigma公司。

1.2 仪器与设备

7700×ICP-MS 美国Agilent公司; GC-MS-QP2010 Plus GC-MS仪、AOC-5000多功能GC自动进样装置 日本岛津公司; 1525高效液相色谱仪 美国Waters公司; Spectra MAX190酶标仪 美国Molecular Devices公司; 5810R冷冻离心机 德国Eppendorf公司; DK-S26电热恒温水浴锅 上海精宏实验设备有限公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 默克化工技术(上海)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 ‘和田红’葡萄酒及葡萄蒸馏酒的酿造工艺

‘和田红’干型葡萄酒(DW): 葡萄经气囊榨汁机破碎、压榨取汁后去除皮、籽, 收集葡萄汁, 按0.1% (V/V) 接种量接种活化酵母(于2%蔗糖溶液中39℃活化30 min)。25℃恒温发酵, 当残糖量降至2 g/L以下终止发酵, 将温度降低至10℃以下进行转罐并分离酒泥, 将酒液于(4±2)℃的低温环境中贮存5个月, 待酒体稳定后装瓶^[11]。

‘和田红’半甜型葡萄酒(SDW): 于葡萄汁(制备方法同上)中添加20 mg/L果胶酶, 16~24℃室温下静置酶解36 h。弃去沉淀物, 分离得到清汁, 加入0.1%活化酵母, 于22℃恒温发酵, 乙醇体积分数达9.5%时, 急速降温至5℃时终止发酵, 并于4℃低温贮存30 d, 离心(8 000 r/min、5 min)分离酵母后将酒液转入-4℃稳定7 d, 以防止酒石沉淀。使用0.2 μm孔径滤膜进行错流过滤、无菌装瓶^[11]。

‘和田红’加强型葡萄酒(FW): 在‘和田红’干型葡萄酒酿造工艺基础上, 从发酵第3天起每小时监测乙醇体积分数, 乙醇体积分数达到7.0%时, 添加乙醇体积分数76%葡萄蒸馏酒, 混合(乙醇体积分数达到18.0%)后于10℃环境中陈酿, 每日搅拌1次后静置, 7 d后转入中度烘烤的橡木桶中, 于15℃条件下陈酿2年, 在此期间每30 d进行1次倒桶操作。陈酿完成后, 对酒液进行澄清和冷冻过滤处理后装瓶^[12]。

乙醇体积分数52%葡萄蒸馏酒(52%vol): 以‘和田红’干型葡萄酒为原料, 将其注入壶式蒸馏器中初次蒸馏得乙醇体积分数28%~32%的粗馏液, 随后进行2次精馏, 收集乙醇体积分数为75%~80%且甲醇质量浓度小于0.1 g/L的酒精馏分, 加入蒸馏水将乙醇体积分数降至60%~65%, 再转入橡木桶中于15℃条件下陈酿2年。陈酿结束后2次降度至乙醇体积分数52%, 经冷稳定处理和膜过滤后灌装^[12]。

乙醇体积分数76%葡萄蒸馏酒(76%vol): 按照制备乙醇体积分数52%葡萄蒸馏酒步骤进行第1次蒸馏, 对乙醇体积分数28%~32%的粗馏液进行2次精馏, 收集乙醇体积分数为85%~90%的馏分, 添加超纯水将乙醇体积分数精确调整至76%, 于充氮保护的不锈钢罐中陈酿5年。陈酿结束后, 酒液通过0.1 μm孔径的分子筛膜进行过滤, 最后使用棕色玻璃瓶进行充氮灌装^[12]。

1.3.2 理化指标测定

总糖: 参照GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》中的斐林试剂法^[13]; pH值: 参照GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品pH值的测定》^[14]; 乙醇体积分数: 参照GB 5009.225—2023《食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定》中的酒精计法^[15]; 总酸: 参照GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的酸碱指示剂滴定法^[16]。

1.3.3 功能成分含量测定

总酚: 采用福林酚比色法测定^[17], 结果以没食子酸当量表示。单宁: 采用单宁含量检测试剂盒测定^[18], 结果以单宁酸含量计。总黄酮含量: 采用亚硝酸钠-氯化铝比色法^[18-19], 结果以芦丁当量表示。总黄烷醇: 采用DMACA-盐酸法测定^[20], 结果以(+)-儿茶素当量表示。

1.3.4 矿物元素含量测定

采用ICP-MS法测定矿物质含量^[21]。仪器主要工作参数如下: 射频功率1 600 W, 载气流量1.0 L/min, 雾化室温度2℃; 采用镍(Ni)锥, 并在氦气碰撞模式下进行分析。测定过程中在线加入Ge、In、Bi作为内标元素进行定量校正。

1.3.5 挥发性风味化合物含量测定

采用HS-SPME-GC-MS法^[22]测定挥发性风味化合物含量。

样品预处理: 准确吸取4 mL稀释10倍的酒样加入含有1.2 g NaCl的20 mL螺口瓶中, 再加入10 μL内标2-乙基-1-己醇(10 μg/mL)。

HS-SPME条件: 样品于60℃保持30 min, 50/30 μm DVB/CAR/PDMS SPME头于55℃萃取40 min, 进样口250℃解吸附5 min, 老化条件为270℃、15 min。

GC-MS条件: 采用VF-WAX毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm), 载气为高纯氮气, 载气流速为1 mL/min; SPME自动进样, 采用不分流模式; 进样口温度为250℃; 升温程序: 50℃保持5 min, 然后以5℃/min升温至220℃, 保持5 min。MS接口温度为250℃, 离子源温度为230℃, 电子电离源, 电子能量为70 eV, 质量扫描范围为 m/z 30~350。

定性定量分析: 将采集的质谱图和NIST 17谱库的标准图谱进行比对检索, 选取匹配度均大于80%的化合物。同时根据混合正构烷烃(C_8 ~ C_{30})标准品的保留指数比对进行定性, 采用内标法进行定量。

1.3.6 关键挥发性风味化合物筛选

气味活度值(odor activity value, OAV)为挥发性风味成分含量与其香气阈值的比值。挥发性风味成分OAV越大, 对风味贡献程度越大^[23]。一般, $OAV \geq 1$ 的挥发性风味成分为关键挥发性风味物质, $0.1 < OAV < 1$ 的挥发性风味成分为重要挥发性风味物质。其计算公式如下:

$$\text{OAV} = \frac{\text{挥发性成分的质量浓度} / (\mu\text{g/L})}{\text{香气阈值} / (\mu\text{g/L})}$$

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2021软件进行数据处理；使用SPSS 20.0统计软件进行单因素方差分析；使用SIMCA 14.1软件进行主成分分析（principal component analysis, PCA）；使用OriginPro 2021进行Pearson相关性分析。使用在线免费平台OmicStudio（<http://www.omicstudio.cn/doc/1152>）及GenesCloud（<http://www.genescloud.cn>）绘制热图。

2 结果与分析

2.1 5种酒基础理化指标及功能成分分析

由表1可知，各酒样乙醇体积分数由高到低依次为：76%蒸馏酒>52%蒸馏酒>加强型葡萄酒（18.00%）>干型葡萄酒（12.00%）>半甜型葡萄酒（10.50%）。加强型葡萄酒总糖质量浓度最高（110.00 g/L），半甜型葡萄酒次之（37.20 g/L），二者含量均显著高于其他酒样。其原因在于加强型葡萄酒在发酵过程中通过加入高浓度乙醇中断酵母代谢，保留大量天然残糖^[24-25]；而干型葡萄酒（1.25 g/L）与蒸馏酒的总糖含量较低，符合GB/T 15037—2006《葡萄酒》标准及蒸馏酒的低糖特性。总酸与pH值是维持酒体感官平衡及微生物稳定性的关键指标^[26-27]。干型葡萄酒与2种蒸馏酒总酸质量浓度较高（6.20~6.40 g/L），且发酵酒中干型葡萄酒总酸质量浓度最高，达6.30 g/L，显著高于半甜型与加强型葡萄酒（分别为5.23、4.08 g/L）。而所有酒样的pH值均稳定在3.58~3.76之间，保证了酒体稳定的缓冲能力与清新口感。

表1 5种酒的基础理化指标及功能成分含量
Table 1 Main physicochemical indicators and functional component contents of five alcoholic drinks

指标	干型葡萄酒	半甜型葡萄酒	加强型葡萄酒	52%蒸馏酒	76%蒸馏酒
乙醇体积分数/%	12.00±0.17 ^d	10.50±0.21 ^d	18.00±0.23 ^c	52.00±0.42 ^b	76.00±0.24 ^a
总糖质量浓度/(g/L)	1.25±0.45 ^e	37.20±1.57 ^b	110.00±0.06 ^a	3.75±2.37 ^c	1.80±0.64 ^e
总酸质量浓度/(g/L)	6.30±0.41 ^a	5.23±0.37 ^b	4.08±0.50 ^c	6.20±0.63 ^a	6.40±0.41 ^a
pH	3.63±0.71 ^a	3.76±0.16 ^a	3.76±0.01 ^a	3.59±0.27 ^a	3.58±0.27 ^a
总酚质量浓度/(mg/L)	116.23±2.17 ^a	115.88±2.73 ^a	92.57±3.39 ^b	54.83±0.77 ^c	53.58±2.94 ^c
总黄酮质量浓度/(mg/L)	207.06±28.55 ^a	158.2±12.68 ^b	123.6±3.16 ^b	2.59±2.50 ^c	4.87±1.18 ^c
单宁质量浓度/(g/L)	0.13±0.02 ^e	0.27±0.06 ^b	0.47±0.01 ^a	0.02±0.01 ^{cd}	0.08±0.02 ^d
总黄烷醇质量浓度/(mg/L)	8.06±0.02 ^a	3.13±0.55 ^b	2.71±0.35 ^b	—	—

注：同行小写字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）；—，未检出。表2同。

功能成分分析显示，干型葡萄酒总酚（116.23 mg/L）、总黄酮（207.06 mg/L）及总黄烷醇（8.06 mg/L）质量浓度均最高，这表明传统的发酵与果皮浸渍工艺能最大限度地保留‘和田红’葡萄中的天然抗氧化组分。加强型葡萄酒单宁质量浓度（0.47 g/L）显著高于其他酒样（0.02~0.27 g/L）。2种蒸馏酒中的酚类及黄酮类物质含量较低，可能是由于物理汽化限制，其可能来源于蒸馏设备接触或后续工艺的微量溶出^[19,28]。

综上所述，蒸馏工艺通过乙醇浓缩和物质选择性挥发，形成高乙醇、低酚类的典型烈酒风格；中断发酵工艺则通过调控发酵进程，塑造了加强型酒和半甜型葡萄酒的高糖特性；而传统酿造工艺则更好地保留了葡萄本源的酚类物质，赋予酒体丰富的风味层次^[27]。

2.2 5种酒矿物元素含量分析

葡萄酒矿物元素是反映产区风土特征的重要化学指标^[29]。由图1a可知，5种酒中共检出27种矿物质元素，其中26种元素为所有样品共有，钯（Pd）元素在76%蒸馏酒因精馏截留作用导致未检出。干型、加强型及半甜型葡萄酒矿物元素总质量浓度在1 116.82~1 628.23 mg/L之间，显著高于2种蒸馏酒（12.35~24.78 mg/L）。矿物元素作为人体必需的营养素，在维持机体渗透压、酸碱平衡及细胞能量代谢中发挥核心生理功能^[30]。钾（K）、磷（P）、镁（Mg）、钠（Na）元素在发酵型酒样中质量浓度较高（分别为806.35~1265.66、101.24~137.09、86.53~117.49 mg/L与88.39~112.25 mg/L），其作为人体必需的常量元素赋予了‘和田红’葡萄酒较高的营养价值。蒸馏过程中，矿物元素受其非挥发性物理特性的影响，在液相（釜残液）中富集，使52%与76%蒸馏酒馏出液中的钾元素质量浓度显著降低（分别为1.30、4.48 mg/L）。在检出的矿物元素中，钾元素质量浓度在5种酒中均最高（806.35~1 265 mg/L），锶元素（Sr）质量浓度稳定在0.62~0.97 mg/L。得益于和田地区独特的土壤地球化学特征，使5种酒在富集钾、锶等碱金属及碱土金属元素具有天然优势^[31]。

钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）等金属离子能通过金属络合作用与葡萄中的花色苷分子结合，形成更稳定的辅助着色复合体，从而在乙醇发酵及陈酿过程中延缓红色素的降解与氧化，是葡萄酒能保持良好色泽的重要理化基础^[32]。而蒸馏酒中矿物阳离子因多在高温蒸馏过程中留于釜残液中，缺乏金属离子的辅助稳色作用，导致其色泽呈现不同的感官特征^[33]。5种酒样中，半甜型葡萄酒中钙质量浓度（68.06 mg/L）较低，可能因其易与酒石酸结合形成酒石酸钙沉淀；而加强型葡萄酒镁质量浓度最低（86.53 mg/L），可能是由于高乙醇环境促进了镁离子与花色苷的络合沉淀^[34]。然而，过量的铜元素及铁元素均会产生沉淀，影响葡萄酒的品质^[31]，干型葡

萄酒铁元素质量浓度最高 (1.31 mg/L), 铜质量浓度为 0.06 mg/L。76%蒸馏酒中铁 (5.45 mg/L) 与铜 (0.106 mg/L) 元素来自高温酒蒸汽对冷凝系统中金属材质的微量溶蚀^[35]。因此, 矿物元素含量会受到蒸馏程度、盐类结晶、金属-酚络合沉淀及设备溶蚀、添加剂释放等因素共同影响。

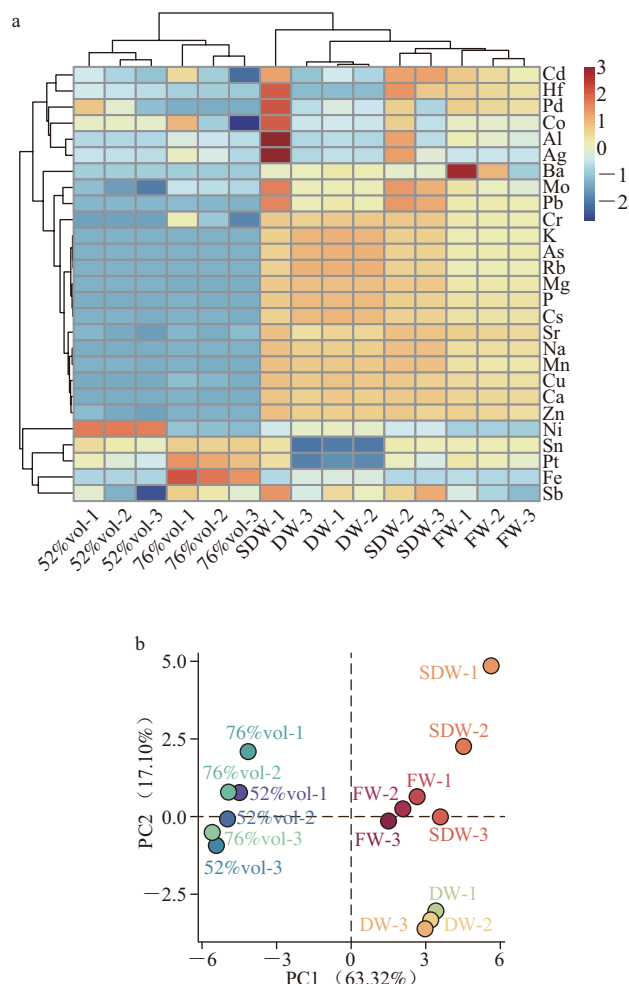


图1 5种酒样矿物元素含量聚类分析 heatmap (a) 及 PCA 得分图 (b)
Fig. 1 Cluster analysis heatmap (a) and principal component analysis score plot (b) of mineral element contents in five alcoholic drinks

由图1b可知, PC1方差贡献率为63.32%, PC2方差贡献率为17.10%, 2个PC累计方差贡献率为80.42%。52%与76%蒸馏酒集中分布于第2、3象限, 矿物元素组成相近; 半甜型葡萄酒、加强型葡萄酒主要聚集于第1象限; 干型葡萄酒单独分布在第4象限。这种基于矿物元素的空间分布差异, 验证了酿造工艺对酒样理化基质的重塑作用。因此, PCA可有效区分5种酒样。

2.3 5种酒样的挥发性风味化合物含量分析

由图2及表2可知, 干型、半甜型、加强型葡萄酒中酸类化合物质量浓度最高, 为157.61~160.30 $\mu\text{g/L}$, 占

比达38.91%~49.27%, 醇类化合物质量浓度为81.47~111.63 $\mu\text{g/L}$, 占比为25.04%~27.56%。酯类化合物质量浓度为80.03~129.16 $\mu\text{g/L}$, 占比为24.60%~31.88%。蒸馏型酒样中酯类化合物质量浓度为1 034.93~1 240.44 $\mu\text{g/L}$, 占比高达70.23%~71.85%; 醇类化合物质量浓度为402.97~453.85 $\mu\text{g/L}$, 占比为27.34%~26.29%; 而酸类化合物质量浓度为1.83~15.47 $\mu\text{g/L}$, 占比为0.10%~1.06%。其原因可能是酵母发酵控温与蒸馏高温环境对挥发性化合物生成路径的调控^[36]。在发酵阶段, 酵母厌氧代谢生成挥发性脂肪酸构建高酸特征, 且酵母中醇乙酰转移酶与酯酶的活性平衡限制酯类积累, 这与Lilly等^[37]的研究结论一致; 而蒸馏过程中, 体系特性加速非酶促脂肪酸酯化反应^[38], 同时乙醇体积分数从12%升至52%~76%促使酯化-水解平衡正向移动, 结合酯类与酸类物质的富集, 最终形成蒸馏酒高酯低酸的特征。上述结果与Zhang Lu等^[39]研究的酵母代谢调控挥发性成分的规律相印证, 明确了工艺对酒体的香气形成作用。

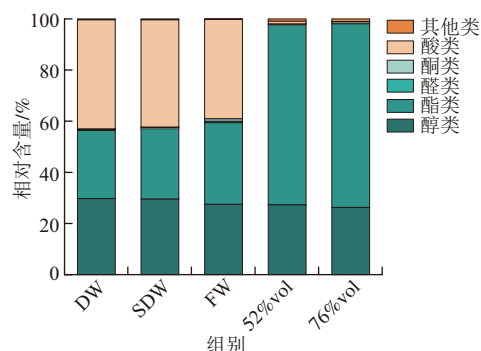


图2 5种酒样各类挥发性化合物含量占比
Fig. 2 Proportion of volatile compounds in five alcoholic drinks

不同酒样共鉴定出68种挥发性化合物, 包括醇类16种、酯类35种、有机酸类6种、醛酮类5种及其他类6种。干型与半甜型葡萄酒均共检出30种挥发性风味化合物, 其中, 酯类13种、醇类8种、酸类6种、醛酮类2种、其他类1种, 其总质量浓度分别为325.32 $\mu\text{g/L}$ 和369.49 $\mu\text{g/L}$ 。加强型葡萄酒检出34种挥发性风味化合物, 其中, 酯类12种、醇类11种、酸类6种、醛酮类4种以及其他类1种, 其总质量浓度为405.11 $\mu\text{g/L}$, 52%蒸馏酒中共检出挥发性风味成分45种, 其中, 酯类27种、醇类9种、酸类2种、醛酮类3种及其他类4种, 其总质量浓度为1 473.73 $\mu\text{g/L}$ 。76%蒸馏酒中共检出挥发性风味成分44种, 其中, 酯类25种、醇类14种、酸类1种、醛酮类1种、其他类3种, 其总质量浓度为1 726.47 $\mu\text{g/L}$ 。

表2 5种酒样挥发性化合物含量
Table 2 Content of volatile compounds in five alcoholic drinks

种类	化合物	阈值/ (μg/L) ^[40-50]	DW	SDW	FW	52%vol	76%vol
醇类	乙醇	6.5	10.57±3.59 ^c	18.57±3.59 ^c	30.7±1.38 ^c	114.37±2.6 ^b	196.44±23.37 ^a
	异丁醇	0.6	0.62±0.08 ^d	0.72±0.08 ^d	1.43±0.19 ^c	15.37±0.59 ^a	10.39±0.10 ^b
	异戊醇	71	48.99±0.61 ^d	58.99±0.61 ^c	61.46±1.42 ^c	245.88±26.66 ^c	208.18±13.73 ^b
	正辛醇	40	0.81±0.05 ^d	0.92±0.05 ^c	0.60±0.03 ^c	4.42±0.25 ^c	1.27±0.04 ^b
	正癸醇	NF	1.02±0.01 ^c	1.08±0.01 ^c	0.49±0.01 ^d	6.21±0.04 ^c	3.05±0.25 ^b
	2-苯基乙醇	774.27	18.87±0.61 ^b	28.87±0.61 ^a	13.49±0.17 ^c	10.85±0.17 ^d	9.37±0.48 ^c
	月桂醇	73	0.59±0.07 ^b	0.69±0.07 ^b	0.62±0.03 ^b	3.38±0.07 ^c	2.96±1.44 ^c
	正庚醇	NF	—	—	0.49±0.01 ^c	1.00±0.09 ^b	3.05±0.25 ^b
	反式-橙花叔醇	826	—	—	—	1.49±0.47 ^b	5.68±0.55 ^b
	芳樟醇	10	—	—	0.98±0.03 ^b	—	5.02±0.45 ^b
	十五烷醇	NF	—	—	—	—	3.88±0.04 ^a
	DL-2,3-二氢-6-反式法尼醇	NF	—	—	—	—	2.43±0.08 ^a
	α-松油醇	1 000	—	—	0.55±0.01 ^b	—	1.45±0.03 ^a
	叶醇	10	—	—	—	—	0.68±0.09 ^a
	1-壬醇	0.02	—	—	0.82±0.05 ^a	—	—
	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	NF	0.13±0.01 ^a	0.16±0.01 ^a	—	—	—
	小计		81.47	109.82	111.63	402.97	453.85
	己酸乙酯	5	7.48±0.35 ^d	13.48±0.35 ^d	22.55±1.13 ^c	70.45±0.21 ^b	92.87±5.29 ^a
	辛酸乙酯	580	28.42±1.58 ^d	38.42±1.58 ^c	43.11±1.16 ^c	205.13±6.14 ^b	268.58±18.65 ^a
酯类	癸酸乙酯	510	21.34±1.79 ^c	23.34±1.79 ^c	24.43±0.12 ^c	317.65±17.53 ^b	350.43±20.2 ^a
	乙酸苯乙酯	20 000	6.21±0.08 ^d	8.21±0.08 ^d	16.17±0.27 ^c	20.44±0.58 ^b	27.71±0.30 ^b
	月桂酸乙酯	3 500	3.12±0.21 ^b	3.52±0.21 ^b	2.90±0.07 ^b	163.52±18.9 ^a	150.33±4.43 ^a
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	NF	1.93±0.12 ^c	1.71±0.12 ^c	1.47±0.35 ^c	2.16±0.21 ^b	8.32±0.22 ^a
	棕榈酸乙酯	1 500	1.56±0.11 ^c	1.04±0.11 ^c	0.38±0.04 ^c	64.27±3.67 ^b	102.95±2.32 ^a
	邻苯二甲酸二丁酯	NF	0.43±0.05 ^c	0.63±0.05 ^c	1.05±0.06 ^c	10.15±0.44 ^a	5.97±0.23 ^b
	乙酸异戊酯	30	—	—	11.08±0.62 ^c	28.41±4.08 ^b	29.06±0.39 ^b
	辛酸异戊酯	125	0.56±0.05 ^c	0.84±0.05 ^c	—	18.30±0.57 ^a	15.95±1.24 ^b
	己酸异戊酯	130 00	—	—	—	1.11±0.01 ^b	1.23±0.09 ^b
	辛酸异丁酯	NF	—	—	—	0.49±0.01 ^b	0.56±0.07 ^a
	癸酸甲酯	1.2	—	—	—	2.41±0.06 ^b	4.01±0.77 ^a
	9-癸酸乙酯	0.0012	—	—	—	1.83±0.3 ^a	1.89±0.32 ^a
	癸酸正丙酯	NF	—	—	—	3.9±0.15 ^a	3.74±0.31 ^a
	十一酸乙酯	1 000	—	—	—	0.44±0.06 ^b	1.37±0.07 ^a
	癸酸异戊酯	3 000	—	—	—	26.33±2.35 ^a	25.87±1.3 ^a
	月桂酸异戊酯	NF	—	—	—	6.04±0.55 ^b	12.85±1.19 ^a
	9-十六碳烯酸乙酯	NF	—	—	—	20.23±1.59 ^b	27.51±0.56 ^c
	辛酸苯乙酯	NF	—	—	—	2.69±0.28 ^a	2.42±0.04 ^a
	反油酸乙酯	NF	—	—	—	6.76±1.08 ^b	12.78±0.11 ^a
其他类	亚油酸乙酯	4 000	—	—	—	34.41±2.58 ^b	53.96±1.41 ^a
	3-羟基十三烷酸乙酯	NF	—	—	—	2.90±0.01 ^a	2.63±0.04 ^b
	十二烷酸异丁酯	NF	—	—	—	1.51±0.03 ^a	—
	癸酸异丁酯	NF	—	—	—	2.22±0.17 ^a	—
	亚麻酸乙酯	NF	—	—	—	16.57±1.98 ^a	—
	十五酸乙酯	NF	—	—	—	4.61±0.6 ^a	—
	肉豆蔻酸乙酯	NF	—	—	—	—	35.58±1.02 ^a
	辛酸甲酯	200	—	—	—	—	1.87±0.22 ^a
	乙酸己酯	670	—	—	4.54±0.41 ^a	—	—
	3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯	NF	—	—	0.66±0.08 ^a	—	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	NF	1.09±0.11 ^a	0.99±0.11 ^a	0.82±0.03 ^b	—	—
	丁二酸二乙酯	500 000	7.34±0.03 ^a	5.64±0.03 ^b	—	—	—
	水杨酸甲酯	40	0.29±0.04 ^a	0.55±0.04 ^a	—	—	—
	丁二酸单乙酯	NF	0.26±0.12 ^a	0.40±0.12 ^a	—	—	—
	小计		80.03	98.77	129.16	1 034.93	1 240.44

续表2

种类	化合物	阈值/ (μg/L) ^[40-50]	DW	SDW	FW	52%vol	76%vol
酸类	正癸酸	130	75.28±4.37 ^a	63.28±4.37 ^a	59.03±1.61 ^a	14.34±1.33 ^b	—
	苯甲酸	NF	1.12±0.04 ^b	1.13±0.04 ^b	1.17±0.03 ^b	1.13±0.49 ^b	1.83±0.16 ^c
	辛酸	910	68.36±1.2 ^b	78.36±1.2 ^b	86.72±0.49 ^a	—	—
	己酸	250	10.53±0.19 ^a	9.53±0.19 ^a	7.61±0.05 ^b	—	—
	壬酸	2	1.54±0.33 ^a	1.49±0.33 ^a	1.62±0.25 ^a	—	—
	月桂酸	NF	3.47±1.27 ^a	3.96±1.27 ^a	1.46±0.39 ^b	—	—
酯类	小计		160.30	157.75	157.61	15.47	1.83
	壬醛	1.1	0.47±0.04 ^c	0.78±0.04 ^b	2.15±0.05 ^a	—	—
	十一醛	5	—	—	0.13±0.02 ^a	—	—
	小计		0.47	0.78	2.28	—	—
酮类	紫罗兰酮	NF	—	—	—	0.81±0.05 ^a	—
	大马士酮	NF	1.89±0.02 ^c	1.26±0.02 ^c	3.11±0.12 ^b	0.81±0.05 ^d	13.00±0.16 ^c
	3,4-二甲基苯乙酮	NF	—	—	0.77±0.00	5.46±0.56 ^c	—
	小计		1.89	1.26	3.88	7.08	13.00
其他类	2,3-二氢苯并呋喃	NF	1.16±0.09 ^a	1.11±0.09 ^a	—	—	—
	2,4-二叔丁基苯酚	NF	—	—	0.55±0.13 ^c	9.39±0.19 ^b	13.28±0.41 ^c
	α-卡拉烯	NF	—	—	—	0.54±0.09 ^b	2.24±0.24 ^a
	十五烷	NF	—	—	—	2.28±0.28 ^a	—
其他类	十七烷	NF	—	—	—	1.07±0.11 ^a	—
	糠醛	956.2	—	—	—	—	1.83±0.74 ^a
	小计		1.16	1.11	0.55	13.28	17.35
	总计		325.32	369.49	405.11	1 473.73	1 726.47

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；—未检出，下同；NF未查找到。

2.3.1 醇类物质

醇类化合物是‘和田红’酒中重要的挥发性风味化合物，主要源于酵母对氨基酸或糖类物质的代谢转化^[41]。由表2可知，5种酒中共检出16种醇类化合物，其中76%蒸馏酒中醇类种类最为丰富（14种）。5种酒样共有的醇类包括异戊醇（白兰地酒风味、花香^[42]）、乙醇（辛辣味、水果香）、2-苯基乙醇（果香、玫瑰香^[43]）、异丁醇（苹果、生青香）、正辛醇（脂蜡、柑橘香）、正癸醇（柑橘花、脂肪香^[44]）、月桂醇（花香）。其中异戊醇、乙醇和2-苯基乙醇含量较高，但其含量在不同酒样中差异明显。异戊醇质量浓度在52%蒸馏酒中最高（245.88 μg/L），高于3种发酵酒（48.99~61.46 μg/L），可形成典型的白兰地风味。乙醇质量浓度在76%蒸馏酒中高达196.44 μg/L。2-苯基乙醇在半甜型葡萄酒中质量浓度最高，为28.87 μg/L，其含量在2种蒸馏酒较低。芳樟醇和反式-橙花叔醇具有萜烯物质的化学结构，可赋予葡萄酒花香、果香等感官特征，丰富了酒的香气^[45]。加强型葡萄酒中检出其特有的1-壬醇，赋予其独特的青草香。2,3-丁二醇则仅在干型葡萄酒和半甜型葡萄酒中检出，质量浓度分别为0.13、0.16 μg/L，赋予2种发酵酒特有的黄油、乳酪香。此外，76%蒸馏酒中特有的十五烷醇、叶醇及DL-2,3-二氢-6-反式法尼醇，进一步强化了高乙醇含量蒸馏酒的油脂感与蜡质风味。

2.3.2 酯类物质

酯类化合物是葡萄酒中种类最丰富的挥发性风味化合物^[46]。由表2可知, 5种酒样中共检出35种酯类化合物, 52%蒸馏酒中酯类物质种类最多(27种), 其次是76%vol蒸馏酒(25种)。5种酒样中主要酯类物质有己酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯等, 其中辛酸乙酯(28.42~268.58 $\mu\text{g/L}$)和癸酸乙酯(21.34~350.43 $\mu\text{g/L}$)的质量浓度较高。2种蒸馏酒检出了其他3种葡萄酒中未检出的19种酯类化合物, 包括乙酸异戊酯(玫瑰花香、果香^[47])、辛酸异丁酯、癸酸甲酯、9-癸酸乙酯等。76%蒸馏酒中己酸乙酯(92.87 $\mu\text{g/L}$)、辛酸乙酯(268.58 $\mu\text{g/L}$)、癸酸乙酯(350.43 $\mu\text{g/L}$)及月桂酸乙酯(150.33 $\mu\text{g/L}$)等共有酯类物质质量浓度均较高, 分别赋予酒体苹果香、白兰地酒香及甜美的椰子香。此外, 乙酸己酯(4.54 $\mu\text{g/L}$)和3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯(0.66 $\mu\text{g/L}$)是加强型葡萄酒中特有的挥发性化合物, 为其带来青苹果与紫罗兰的香甜风味^[48]。丁二酸二乙酯(淡淡的果香、乙醇味)、水杨酸甲酯、丁二酸单乙酯则为干型和半甜型葡萄酒中独有。十二烷酸异丁酯、癸酸异丁酯、亚麻酸乙酯、十五酸乙酯为52%蒸馏酒中特有的挥发性风味化合物。肉豆蔻酸乙酯(紫罗兰和鸢尾根味)和辛酸甲酯(药草和甜橙味^[49])仅在76%蒸馏酒中检出。

2.3.3 酸类物质

有机酸类化合物对酒样的口感平衡及生物稳定性具有重要意义^[49]。有机酸主要存在于干型、半甜型、加强型葡萄酒中, 且这3种酒中均含有6种有机酸, 其质量浓度由高到低依次为正癸酸(59.03~75.28 $\mu\text{g/L}$)、辛酸(68.36~86.72 $\mu\text{g/L}$)和己酸(7.61~10.53 $\mu\text{g/L}$)。这些中短链脂肪酸能赋予酒体细腻的乳酪香, 增加风味复杂性^[50]。76%蒸馏酒中仅检出少量苯甲酸(1.83 $\mu\text{g/L}$); 除苯甲酸外, 52%蒸馏酒中检出正癸酸(14.34 $\mu\text{g/L}$)。主要源于原料中结合态前体物在高温下的水解以及高级醇在蒸馏过程中的部分氧化。

2.3.4 醛酮类及其他类物质

醛酮类化合物在葡萄酒中起不可或缺的协调作用^[50]。5种‘和田红’酒中共检出2种醛类及3种酮类物质。壬醛为干型、半甜型、加强型葡萄酒中共有(0.47~2.15 $\mu\text{g/L}$); 十一醛在加强型葡萄酒中独有(0.13 $\mu\text{g/L}$); 52%蒸馏酒中检出酮类物质种类最丰富, 其中, 3,4-二甲基苯乙酮的质量浓度最高(5.46 $\mu\text{g/L}$)。大马士酮(玫瑰果香)在76%蒸馏酒中质量浓度最高(13.00 $\mu\text{g/L}$)。76%蒸馏酒则检出了美拉德反应产物糠醛(1.83 $\mu\text{g/L}$)。其他类化合物中2,3-二氢苯并呋喃仅在2种发酵酒中检出; 2,4-二叔丁基苯酚在加强型及2种蒸馏酒中检出; α -卡拉烯为2种蒸馏酒共有, 而十五烷与十七烷仅在52%蒸馏酒中检出。

综上, 加工工艺的不同构建了‘和田红’酒样的丰富的挥发性风味轮廓。发酵工艺制备干型、半甜型葡萄酒可保留葡萄本源及代谢产生的酸类与多元醇类物质, 赋予酒体细腻的乳酪与黄油香; 加强型工艺制备葡萄酒通过乙醇强化与发酵中断的协同, 促进1-壬醇与十一醛的积累, 而蒸馏工艺制备的2种酒中检出了乙酸异戊酯、肉豆蔻酸乙酯及糠醛等19种挥发性风味化合物, 丰富了物质种类, 显著富集了己酸乙酯、癸酸乙酯等酯类物质, 强化椰子香、油脂感及白兰地风味。

2.3.5 OAV分析

由表3可知, 5种酒共鉴定出8种关键香气物质($\text{OAV} \geq 1$), 6种重要香气物质($0.1 < \text{OAV} < 1$)。乙醇、异丁醇与己酸乙酯作为5种酒样中共有的关键香气物质, 构成该品种酒样的基础风味轮廓。其中, 己酸乙酯贡献典型的菠萝与香蕉果香, 异丁醇贡献杏仁香^[51], 且其OAV在蒸馏酒中较高, 反映了蒸馏过程中物理富集效应显著增强了酯类、醇类物质对酒体复杂度的塑造能力。1-壬醇与壬醛仅为加强型葡萄酒中关键挥发性风味物质, 使葡萄酒兼具清新草本香与柑橘甜香^[52]。2种蒸馏酒中9-癸酸乙酯的OAV均大于1 500, 其释放的强烈玫瑰与桃类、椰子果香使其成为区分其他酒与蒸馏酒的最突出特征组分, 这与Tian Tiantian等^[53]关于蒸馏白兰地关键气味活性化合物的风味特征研究结论一致。

表3 5种酒中挥发性风味化合物的OAV及香气描述
Table 3 OAV and aroma descriptions of volatile flavor compounds in five alcoholic drinks

种类	化合物	香气描述	DW	SDW	FW	52%vol	76%vol
醇类	乙醇	辛辣、水果香	1.63	2.86	4.72	17.60	30.22
	异戊醇	香蕉果香	0.69	0.83	0.87	3.46	2.93
	异丁醇	杏仁香	1.03	1.20	2.38	25.62	17.32
	2-苯乙醇	玫瑰香、蜂蜜香	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01
	1-壬醇	青草、油脂香	—	—	41.00	—	—
酯类	己酸乙酯	菠萝、香蕉果香	1.50	2.70	4.51	14.09	18.57
	辛酸乙酯	菠萝香、梨果香	0.05	0.07	0.07	0.35	0.46
	癸酸乙酯	葡萄香、油脂香	0.04	0.05	0.05	0.62	0.69
	乙酸异戊酯	香蕉、梨果香	—	—	0.37	0.95	0.97
	癸酸甲酯	蜡质、油脂香	—	—	—	2.01	3.34
	9-癸酸乙酯	玫瑰香、梨、桃果香、椰子香	—	—	—	1 525.00	1 575.00
醛类	壬醛	柑橘香、玫瑰香	—	—	2.28	—	—
酸类	正癸酸	脂肪香、油脂香	0.58	0.49	0.45	0.11	—
	壬酸	蜡质、油脂香	0.77	0.75	0.81	—	—

注: 根据Flavornet and human odor space (<http://www.flavornet.org/flavornet.html>) 和气味数据库 (<http://www.odour.org.uk/odour/index.html>) 确定每种挥发性成分的香气表征并进行描述。

2.4 矿物元素与挥发性风味化合物之间的相关性分析

采用Pearson相关性分析与Mantel检验对人体必需的8种矿物元素与含量排名前38的挥发性风味化合物进行相关性分析。由图3可知, 除酸类物质外, 挥发

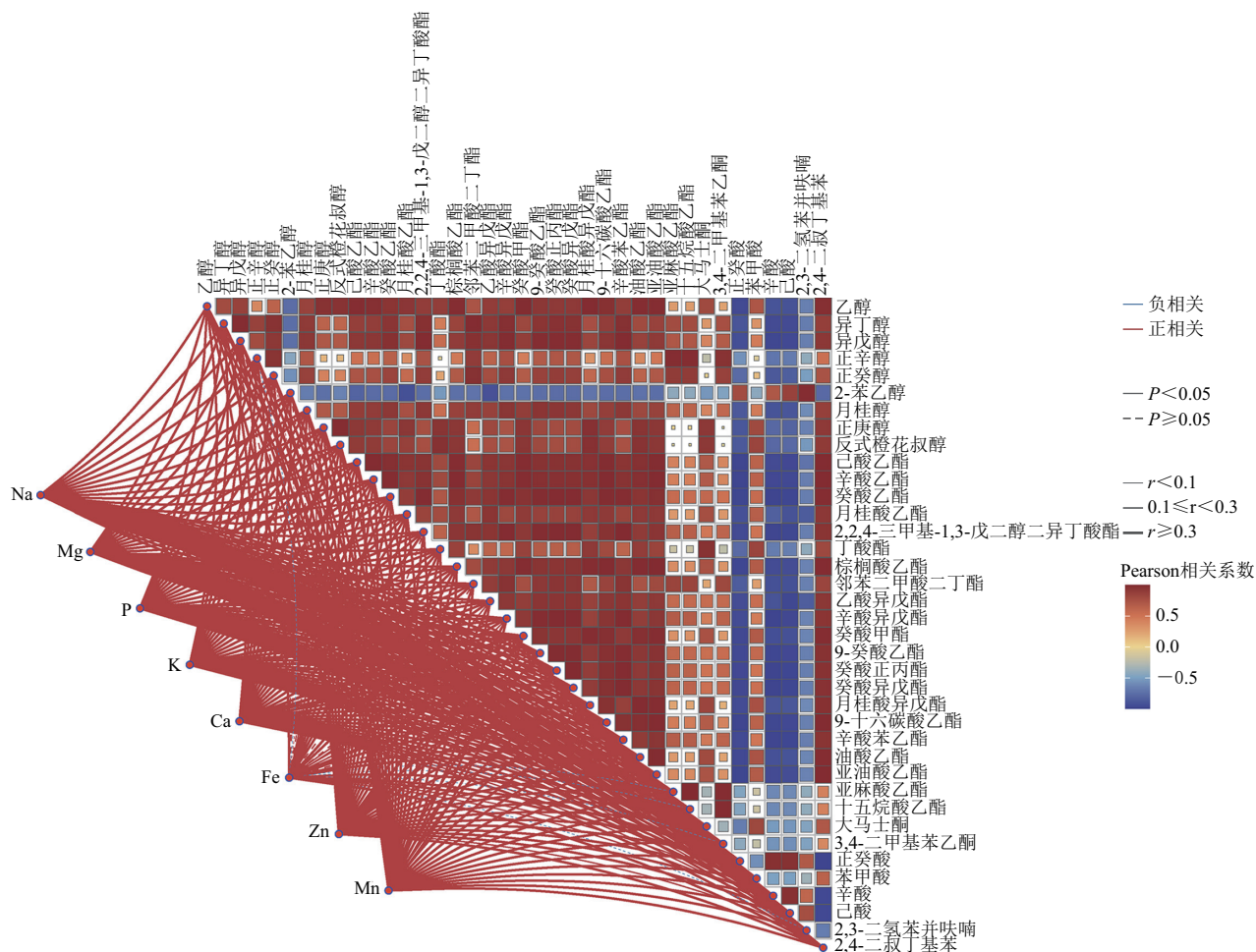


图3 矿物元素与主要挥发性风味化合物的相关性分析
Fig.3 Correlation analysis of mineral elements and major volatile flavor compounds

性风味化合物之间呈正相关；正癸酸、辛酸及己酸与己酸乙酯、癸酸乙酯、异戊醇、乙醇均呈现显著负相关 ($P < 0.05$)，锌 (Zn)、锰 (Mn)、磷 (P)、钾 (K) 元素与癸酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯等酯类物质呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，表明这些元素作为辅助因子参与了酵母代谢并促进脂肪酸乙酯、芳香族酯的合成^[54]。此外，钠 (Na)、钙 (Ca) 元素与己酸乙酯、月桂酸乙酯等酯类物质呈正相关。镁 (Mg) 元素与芳樟醇、反式-橙花叔醇等萜烯类化合物正相关，推测其参与了萜烯前体的生物合成^[55]。与之相反，铁 (Fe) 元素与芳樟醇、反式-橙花叔醇及部分易氧化酯类呈显著负相关 ($P < 0.05$)，表明其可能通过催化氧化反应抑制相关挥发性化合物的稳定性^[56]。综上，矿物元素通过代谢调控与氧化反应深度影响‘和田红’挥发性风味化合物生成，在一定程度上解释了发酵酒与蒸馏酒特征风味轮廓的差异。

3 结论

本研究以新疆‘和田红’葡萄为原料，分别对干型、半甜型、加强型葡萄酒及52%、76%蒸馏酒基本理化指标、功能性成分、矿物质及挥发性风味化合物进行分析，结果表明，干型、半甜型及加强型葡萄酒的功能性成分与矿物质含量均高于2种蒸馏酒；76%蒸馏酒风味物质种类丰富 (44种)，其总质量浓度最高 (1 726.47 $\mu\text{g/L}$)。5种酒共检出8种关键香气物质 ($\text{OAV} \geq 1$)，乙醇、异丁醇、己酸乙酯为共有关键挥发性风味物质，构成基础风味轮廓。干型、半甜型发酵酒中关键香气物质有己酸乙酯、异丁醇，可呈现奶酪与果香；加强型葡萄酒独有关键香气物质1-壬醇、壬醛，赋予草本与柑橘甜香；蒸馏酒中酯类富集明显，9-癸酸乙酯 ($\text{OAV} > 1\ 500$) 是蒸馏酒的标志性挥发性风味物质，形成玫瑰、桃香及浓郁椰子风味。相关性分析表明，挥

发性风味物质（除酸类）之间呈正相关。锌、锰、磷、钾、钠、钙元素可促进酯类合成，镁元素促进萜烯类物质生成。本研究明确了‘和田红’葡萄不同酿造工艺的品质调控机制，为产区优化酿造工艺、开发差异化产品提供了科学依据。

参考文献：

- [1] 郭文场, 杨旭, 刘佳贺, 等. 新疆葡萄的生产发展现状及主栽品种[J]. 特种经济动植物, 2015, 18(8): 48-51.
- [2] 樊士昊, 白羽嘉, 郑万财, 等. 不同冷冻浓缩度对和田红葡萄酒品质影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 82-87.
- [3] 王伟华, 胡菁梅. 慕萨莱思酒及其酿造葡萄“和田红”中多酚类物质分布规律研究[J]. 北方园艺, 2016(5): 156-159.
- [4] 王利娜, 赵文, 王姝婧, 等. 新疆干旱区枣园不同土层土壤全量养分元素含量与变化特征[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 86-96.
- [5] 蒋丽丽. 不同栽培方式对和田红葡萄生长发育的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- [6] GONZALEZ-BARREIRO C, RIAL-OTERO R, CANCHO-GRANDE B, et al. Wine aroma compounds in grapes: a critical review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2015, 55(2): 202-218.
- [7] JU Y, XU X, YU Y, et al. Effects of winemaking techniques on the phenolics, organic acids, and volatile compounds of Muscat wines[J]. Food Biosci, 2023, 54: 102937.
- [8] 薛菊兰, 程玉米, 张佰清, 等. 慕萨莱思酿酒酵母产果胶酶及 β -葡萄糖苷酶定性分析[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 166-169.
- [9] 王家梅, 张军翔. 葡萄酒香气来源和形成研究进展[J]. 中国酿造, 2014, 33(5): 5-9.
- [10] 朱丽霞, 甄文, 王丽玲, 等. 新疆慕萨莱思感官特性定量描述分析[J]. 食品科学, 2013, 34(1): 38-44.
- [11] 李洋, 李娜娜, 崔佳伟, 等. 基于GC-MS的霞多丽葡萄酒及蒸馏酒挥发性化合物分析[J]. 食品工业, 2024, 45(2): 292-296.
- [12] 杨继红, 来疆文, 高畅. 新疆和田红干白葡萄酒挥发性化合物分析[J]. 中国酿造, 2011(11): 163-166.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 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, 2006.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品pH值的测定: GB 5009.237—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] 国家市场监督管理总局. 国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定: GB 5009.225—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 12456—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [17] 马军, 单守明, 李光宗, 等. 贺兰山东麓不同酿酒葡萄品种的酚类物质及其相关性分析[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2024(6): 40-49.
- [18] CHEN K, ESCOTT C, LOIRA I, et al. Use of non-*Saccharomyces* yeasts and oenological tannin in red winemaking: influence on colour, aroma and sensorial properties of young wines[J]. Food Microbiol, 2018, 69: 51-63.
- [19] 皮西瑞, 王家琪, 康璐瑶, 等. 不同杀菌方式对葡萄汁理化特性、功能性指标及代谢物的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 20-31.
- [20] 都晗, 梁艳英, 王鑫, 等. 酿酒和鲜食葡萄酿造起泡葡萄酒品质差异研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(12): 22-27.
- [21] 苏菲热·艾则孜. 新疆葡萄及葡萄酒的矿质元素含量及其产区特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025.
- [22] 秦燕飞, 李泽福, 孙建平, 等. 被氧化的葡萄酒蒸馏过程中挥发性风味物质的变化[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 151-160.
- [23] STYGER G, PRIOR B, BAUER F F. Wine flavor and aroma[J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 2011, 38(9): 1145.
- [24] 钟海霞, 丁祥, 周晓明, 等. 新疆10个酿酒葡萄品种(系)可溶性糖组分及含量分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(7): 1323-1331.
- [25] 杨雪莲. 不同糖度对简易酿造红葡萄酒品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(8): 62-67.
- [26] 郑峰, 段继华, 黄伟, 等. 不同风干度对赤霞珠葡萄酒品质影响[J]. 食品科技, 2015, 40(8): 54-58.
- [27] 高琛瑜, 石淼, 王晶, 等. 混菌发酵对赤霞珠干红葡萄酒有机酸含量及感官品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 47-53.
- [28] VILLAMOR R R, EVANS M A, MATTINSON D S, et al. Effects of ethanol, tannin and fructose on the headspace concentration and potential sensory significance of odorants in a model wine[J]. Food Res Int, 2013, 50(1): 38-45.
- [29] 何锡超. 原子吸收光谱法在测定葡萄酒中钙、铁、锌、镁的含量应用分析[J]. 大科技, 2017(11): 304-305.
- [30] 赵遵乐, 邹琴艳, 吴帅, 等. 葡萄酒中矿质元素的研究进展[J]. 中国果菜, 2020, 40(4): 22-28.
- [31] 王月娟, 海凤, 何明明, 等. 和田地区农田土壤养分和盐分空间分布特征[J]. 新疆农业大学学报, 2024, 47(4): 298-309.
- [32] 黄雨珊, 范舒悦, 勾叙衡, 等. 金属元素在葡萄酒中的作用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 446-456.
- [33] 董荣. 钾离子对葡萄果实酚类物质代谢和葡萄酒颜色品质的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
- [34] 李金梁. 葡萄酒中铁、铜、锰的形态分析及其分布特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [35] PIOTRKA-WASYLKA J, FRANKOWSKI M, SIMEONOV V, et al. Determination of metals content in wine samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Molecules, 2018, 23(11): 2886.
- [36] LONČARIĆ A, PATLJAK M, BLAŽEVIĆ A, et al. Changes in volatile compounds during grape brandy production from ‘Cabernet Sauvignon’ and ‘Syrah’ grape varieties[J]. Processes, 2022, 10(5): 988.
- [37] LILLY M, BAUER F F, LAMBRECHTS M G, et al. The effect of increased yeast alcohol acetyltransferase and esterase activity on the flavour profiles of wine and distillates[J]. Yeast, 2006, 23(9): 641-659.
- [38] GAO J X, ZHAO P T, LI H. A DFT study on esterification and ester hydrolysis reactions in dry red wine[J]. Rev Environ Health, 2021, 36(1): 1-10.
- [39] ZHANG L, FANG Q, HUANG D W, et al. Using *Saccharomyces cerevisiae* inoculant for anaerobic fermentation of peanut meal to produce even-chain volatile fatty acids[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(42): 11434-11442.
- [40] WANG X J, LI Y K, SONG H C, et al. Phenolic matrix effect on aromaformation of terpenes during simulated wine fermentation-Part I: Phenolic acids[J]. Food Chem, 2021, 46: 128288.
- [41] 张昱. 采用电子鼻和GC-MS技术研究慕萨莱思葡萄酒中呈香物质的变化[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017.
- [42] PAIXÃO N, PERESTRELO R, MARQUES J C, et al. Relationship between antioxidant capacity and total phenolic content of red, rosé and white wines[J]. Food Chem, 2007, 105(1): 204-214.
- [43] RUDNISKAYA A, NIEUWOUDT H H, MULLER N, et al. Instrumental measurement of bitter taste in red wine using an electronic tongue[J]. Anal Bioanal Chem, 2010, 397(7): 3051-3060.
- [44] 彭传涛, 刘浩, 牟含, 等. 媚丽葡萄酒品种挥发性化合物的气味贡献研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 230-239.
- [45] 孙健, 姜文广, 李记明. 贺兰山东麓产区赤霞珠和马瑟兰葡萄酒发酵中风味物质分析[J]. 酿酒科技, 2025(5): 46-53.
- [46] LIU W, JI R, AIMAIA 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 Chem X, 2023, 18: 100685.

- [47] LI N, LI G, LI A, et al. Synergy effect between fruity esters and potential odorants on the aroma of Hutai-8 rose wine revealed by threshold, *S*-curve, and σ - τ plot methods[J]. *J Agr Food Chem*, 2023, 71(37): 13869-13879.
- [48] 何曦, 陈方圆, 孙文静, 等. 典型加强型葡萄酒香气特征及主要挥发性成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(18): 75-82.
- [49] 王清龙. 干红葡萄酒发酵后处理中酿酒酵母活性与酒精发酵乙醛形成特征的响应关系[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.
- [50] 刘媛春. 清香型白酒及其风味成分对乙醇代谢酶活性的影响与分子机制研究[D]. 成都: 四川大学, 2022.
- [51] SACCHI K L, BISSON L F, ADAMS D O. A review of the effect of wine making techniques on phenolic extraction in red wines[J]. *Am J Enol Vitic*, 2005, 56(3): 197-206.
- [52] 丁燕, 韩晓梅, 王超萍, 等. 不同浸渍发酵方式对红葡萄酒风味物质及感官特征的影响[J]. *酿酒科技*, 2021(5): 39-45.
- [53] TIAN T T, RUAN S L, ZHAN Y P, et al. Multi-objective evaluation of freshly distilled brandy: characterisation and distribution patterns of key odour-active compounds[J]. *Food Chem: X*, 2022, 14: 100276.
- [54] LIANG C, DIMITRA L C, EMILY L N, et al. Investigation of intraregional variation, grape amino acids, and pre-fermentation freezing on varietal thiols and their precursors for *Vitis vinifera* Sauvignon blanc[J]. *Food Chem*, 2019, 44: 637-645.
- [55] PENG C T, WEN Y, TAO Y S, et al. Modulating the formation of 'Meili' wine aroma by pre-fermentative freezing process[J]. *J Agr Food Chem*, 2013, 61(7): 1542-1553.
- [56] TEMERDASHEY Z, ABAKUMOV A, KHALAFYAN A, et al. The influence of the soil profile on the formation of the elemental image of grapes and wine of the Cabernet Sauvignon variety[J]. *Molecules*, 2024, 29(10): 2251.