

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032857

引用格式:李涛,李昀哲,冯翰杰,等.不同发酵工艺对石榴酒香气质量的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(8):137-144.
LI Tao, LI Yunzhe, FENG Hanjie, et al. Effect of different fermentation processes on aroma quality of pomegranate wine[J].
Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8):137-144.

不同发酵工艺对石榴酒香气质量的影响

李涛,李昀哲,冯翰杰,杨梅,石禾云,张军*

(天津农学院 食品科学与生物工程学院,天津,300392)

摘要 以策勒甜石榴为原料,分别进行清汁、带籽和带皮发酵处理,采用顶空固相微萃取技术对石榴汁及3种石榴酒的香气进行富集,用气相色谱-质谱联用技术对其进行定性定量分析,结合石榴酒的基本理化指标和感官评价比较不同发酵工艺对石榴酒香气质量的影响。结果表明,3种石榴酒的理化指标均符合国标要求,带皮发酵石榴酒的干浸出物和总酚含量较高且差异显著。清汁发酵、带籽发酵和带皮发酵石榴酒中分别检测出53、50、49种香气物质,共有成分33种,独有成分分别为10、6、6种,其中清汁发酵石榴酒的香气总量较高且差异显著。苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯为石榴酒的关键风味物质,赋予酒体浓郁的果香和花香。主成分分析结果显示,3种不同工艺酿造的石榴酒香气风格差异区分明显,清汁发酵石榴酒与乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯5种关键风味物质处于同一象限,具有石榴酒的典型香气特征。感官评价结果显示,清汁发酵石榴酒香气浓郁,果香细腻,具有较好的色泽和典型性,感官评分较高。带籽发酵和带皮发酵的石榴酒干浸出物和总酚含量较高,香气更为复杂,口感偏涩;而清汁发酵石榴酒香气物质含量较高,以花香和果香为主,酒体轻盈,口感细腻、纯正,结构感强,感官品质更优。该研究为今后石榴酒的发酵工艺优化及香气对比分析研究提供一定的理论基础。

关键词 石榴酒;发酵工艺;香气成分;相对气味活性值;主成分分析;感官评价

石榴(*Punica granatum*)是千屈菜科(Lythraceae)石榴属(*Punica* L.)落叶乔木^[1],果实酸甜可口、鲜艳美观,富含维生素、氨基酸、石榴苷、花青苷和黄酮等多酚类物质以及人体必需的微量元素^[2],具有抗氧化、预防细胞癌变、动脉硬化、血脂、血糖升高等多种功效^[3],被誉为超级水果^[2]。但石榴采后易出现果实软化、果皮颜色变褐、失水皱缩及腐烂等问题^[4]。以石榴为原料酿造成石榴果酒,既可以保留石榴丰富的营养成分,解决石榴果实易软化、失水皱缩等问题,还可以丰富果酒市场,提高石榴的附加值。

发酵工艺是影响果酒品质的重要因素^[5],跟葡萄酒相比,石榴酒的酿造工艺还不成熟,目前国内外学者对石榴酒的研究主要集中在发酵工艺优化^[6]、香气成分分析^[7]及澄清^[8]等方面,关于不同工艺发酵对石榴酒香气成分及感官分析的研究较少,仅有吕真真等^[9]以鲜石榴为原料,探究了5种制汁方式对石榴酒品质的影响,发现去籽制汁发酵石榴酒感官评分较高,最易被大众接受;WASILA等^[10]研究了石榴皮

对果汁及果酒感官、多酚组成和抗氧化能力的影响,发现石榴带皮榨汁会使果汁变苦变涩,但对石榴酒的感官品质有较好的改善作用,果皮可以贡献更多的总酚以及类黄酮;李晋丽^[11]以去籽、含籽和带1/3果皮的3种石榴汁分别进行发酵试验,发现含籽石榴汁发酵组酒精度最高,带1/3果皮的含籽石榴汁发酵组总黄酮含量最高。

香气是评价果酒感官品质的重要指标,决定着产品的风格与典型性,其受原料品种、发酵方式、酵母种类、澄清工艺、贮藏条件等因素影响^[12]。ANDREU-SEVILLA等^[13]通过气相色谱-质谱法对石榴汁和石榴酒中的风味物质组分进行比较,发现辛酸乙酯是石榴酒中主要的挥发性物质,同时发现乙酸苯乙酯、苯乙醇等14种化合物仅在发酵后的石榴酒中检测到。唐柯等^[7]采用顶空固相微萃取-气质联用(headspace-solid-phase micro extraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术对红玛瑙石榴发酵过程不同时期香气成分进行测定分析,结果表明,在石榴酒发

第一作者:李涛(硕士研究生)和李昀哲(硕士研究生)为共同第一作者(张军教授为通信作者,Email:zjaiwa@163.com)

基金项目:中央引导地方科技发展专项(21ZYCGSN00410);天津市特支计划青年拔尖人才项目(TJZJHQNBJRC-1-19);天津市技术创新引导专项(21YDTPJC00910)

收稿日期:2022-07-03,改回日期:2022-07-26

酵全过程中共检测出 123 种游离态物质,酯类、醇类、酸类无论是数量还是相对含量在整个发酵过程中均处于较高水平,醛类、酮类、烷烃类等化合物则随着发酵的进行相对含量显著降低。

本实验以策勒甜石榴为原料,分别进行清汁、带籽和带皮发酵,采用 HS-SPME-GC-MS 技术分别对石榴汁及 3 种石榴酒的香气进行定性定量分析,比较不同发酵工艺对石榴酒还原糖、总酚、总酸、乙醇体积分等数等基本理化指标、香气成分和感官品质的影响,并分析石榴酒的关键风味物质,旨在为提高石榴酒的品质提供技术支持,也为进一步研究石榴酒的发酵工艺优化及香气对比分析提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

策勒甜石榴,于 2021 年 10 月中旬采自新疆策勒,总糖质量浓度为 152 g/L,总酸质量浓度为 6.75 g/L,挑选成熟度好、无污染无破损的新鲜石榴作为酿造石榴酒的原料。

果胶酶、DL-酒石酸,河南万邦实业有限公司;F15 酵母、焦亚硫酸钾、皂土,法国 Laffort 公司;白砂糖,北京糖业烟酒集团有限公司;福林-酚试剂,天津市光复精细化工研究所;2-辛醇(色谱纯),上海泰坦科技股份有限公司;氯化钠、氢氧化钠、盐酸、葡萄糖等试剂均为分析纯,上海国药集团试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TRACE 1310-ISQLT 气相色谱-质谱联用仪,美国 Thermo Fisher 公司;HP-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm, 0.25 μm),美国 Agilent 公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取萃取头,美国 Supelco 公司;HH 系列数显型恒温水浴锅,江苏科研仪器有限公司;HPX-250 生化培养箱,上海跃进医疗器械有限公司;雷磁 pH-25 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;FA1204 电子精密天平,天津天马衡基仪器有限公司;L4 紫外可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司;JYZ-E25 螺杆式榨汁机,九阳股份有限公司;帝伯仕微孔膜三级过滤器,烟台帝伯仕自酿机有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵工艺流程及操作要点

清汁发酵工艺流程如下:

石榴→清洗→去皮去隔膜→石榴籽(果粒)→压榨取汁→加硫→酶解→过滤→石榴清汁→调糖调酸→接种酵母→主

发酵→倒灌→后发酵→澄清→过滤→装瓶

带籽发酵工艺流程如下:

石榴→清洗→去皮去隔膜→石榴籽(果粒)→破碎→石榴混汁→加硫→酶解→调糖调酸→接种酵母→主发酵→皮渣分离→倒灌→后发酵→澄清→过滤→装瓶

带皮发酵工艺流程如下:

石榴→清洗→带皮破碎→石榴混汁(带皮渣)→加硫→酶解→调糖调酸→接种酵母→主发酵→皮渣分离→倒灌→后发酵→澄清→过滤→装瓶

操作要点^[14]:(1)发酵液的制备:挑选成熟度好、无污染无破损的新鲜石榴,清洗后分成 3 组,分别破碎入罐(清汁发酵需在果胶酶酶解后过滤澄清取上层清汁入罐,带籽发酵直接将石榴籽破碎入罐,带皮发酵为清洗过的石榴带皮破碎入罐),添加 0.1 g/L 焦亚硫酸钾防止氧化,30 min 后分别加入 30 mg/L 果胶酶,15 ℃酶解 12 ~ 15 h。(2)调糖调酸:用白砂糖调整总糖质量浓度为 200 g/L,酒石酸调整总酸质量浓度为 7.5 g/L。(3)接种酵母:酵母的接种量为 0.2 g/L。将称量好的酵母加入 10 倍体积的蒸馏水,于 37 ℃恒温水浴锅中活化 25 min,然后倒入发酵罐中搅拌均匀。(4)主发酵:发酵温度为 18 ℃,每隔 24 h 测 1 次温度和比重(相对密度),当比重连续 2 次不再变化时,主发酵结束,带籽发酵和带皮发酵石榴酒进行皮渣分离。(5)后发酵:倒灌,去除酒脚,加入 0.1 g/L 焦亚硫酸钾,密封处理进行无氧发酵,20 ℃条件下后发酵 20 d。(6)澄清过滤:添加 1 g/L 皂土澄清酒液,15 d 后用帝伯仕微孔膜三级(5、5、0.2 μm 滤膜)过滤器过滤装瓶。每个样品做 3 组平行。

1.3.2 基本理化指标的测定

总酸(以酒石酸计):采用指示剂法测定;挥发酸(以乙酸计):采用滴定法测定;pH 值:采用 pH 计测定;游离及总 SO₂:采用直接碘量法测定;还原糖(以葡萄糖计):采用斐林试剂法测定;乙醇体积分:采用密度瓶法测定;总酚:采用福林酚比色法测定;甲醇:比色法测定;干浸出物:采用密度瓶法测定^[15]。所有指标均重复测定 3 次,取平均值。

1.3.3 挥发性香气成分的测定^[5,16]

香气成分萃取:取 4 mL 酒样放于 20 mL 顶空瓶中,加入 1.5 g 氯化钠和 40 μL 2-辛醇内标(500 μg/L),55 ℃平衡 10 min 后顶空萃取 20 min。萃取结束后,取出萃取头插入气相色谱进样口,

250 ℃解析 3 min。

色谱条件:HP-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm,0.25 μm);升温程序:40 ℃保持 5 min,以 4 ℃/min 升温至 120 ℃,保持 2 min,再以 7 ℃/min 升温至 240 ℃,保持 5 min;载气为氦气,流速 1 mL/min;进样口温度为 250 ℃;柱流量:1 mL/min,分流模式,分流流量 20 mL/min。

质谱条件:电子电离源(electron ionization, EI),电子能量 70 eV;离子源温度 250 ℃;传输线温度:250 ℃;质量扫描范围 m/z 33~350,溶剂延迟时间为 3 min。

石榴汁香气成分的测定方法与石榴酒相同。

1.3.4 香气成分分析^[16]

定性:采用保留指数和普库比对(NIST-11、Wiley 及香精香料标准谱库)进行定性,比对时要求与标准谱库匹配度 >800(最大值为 1 000)。

定量:采用内标法(2-辛醇)进行半定量分析,通过比较样品中的待测组分与 2-辛醇峰面积的比值,校正后计算出样品中各待测组分的质量浓度,计算如公式(1)所示:

$$X = \frac{A \times \rho}{A_0} \times f \quad (1)$$

式中: X ,各香气物质的质量浓度,μg/L; f ,内标物的校正因子, $f=1$; A ,酒样中香气物质的峰面积; ρ ,2-辛醇的质量浓度,μg/L; A_0 ,2-辛醇的峰面积。

1.3.5 关键挥发性物质评价

参照裴鹏正等^[17]的方法,采用相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)评价各香气成分对样品总体风味的贡献。规定对样品中贡献率最大的挥发性成分的 ROAV_{max} 为 100,其他物质的 ROAV 值则根据公式(2)进行计算:

$$\text{ROAV} = \frac{C_i}{C_{\text{stan}}} \times \frac{T_{\text{stan}}}{T_i} \times 100 \quad (2)$$

式中: C_i 和 T_i 分别表示样品中各挥发性成分的相对含量和嗅觉阈值,μg/L; C_{stan} 和 T_{stan} 分别表示样品中贡献率最大的挥发性成分的相对含量和嗅觉阈值,μg/L。

1.3.6 感官评价定量描述分析

在标准品尝室中,由 20 名经过专业培训的品尝员组成感官分析品尝小组,参照 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》对石榴酒的外观、香气、滋味和典型性进行感官评价,评分标准见表 1^[5]。

表 1 石榴酒的感官评价表

Table 1 Criteria for sensory evaluation of pomegranate wine

项目	评价标准	分值
外观(10分)	鲜红色,有光泽	4~5
	浅红色,略有光泽	2~3
	浅红色,无光泽	0~1
	澄清,透亮,无浑浊	4~5
香气(30分)	基本澄清	2~3
	浑浊	0~1
	香气纯正,优雅、浓郁	26~30
	香气纯正,中等浓郁度	21~25
滋味(40分)	香气较淡,无不良气味	11~20
	香气不足,有明显缺陷	0~10
	口感圆润,饱满、平衡,余味长	31~40
	口感比较平衡,余味中等	21~30
典型性(20分)	口感寡淡,无明显异味	11~20
	有明显缺陷	0~10
	具有石榴酒的典型风味,风格独特	16~20
	具有石榴酒的典型风味	11~15
	缺乏石榴酒的典型风味	0~10

参照陈红梅^[14]的方法,对石榴酒进行感官量化分析,采用感官评价定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)对不同工艺酿造的石榴酒根据品评表进行打分描述,通过对评价得分及香气特征描述词进行均一化处理,结果采用雷达图表示。

1.4 数据处理

用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行显著性和主成分分析(principal component analysis, PCA),Microsoft office Excel 2021 和 Origin 2021 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 发酵工艺对石榴酒理化指标的影响

由表 2 可知,3 种工艺酿造的石榴酒还原糖质量浓度均小于 4 g/L,按照 GB/T 15037—2006《葡萄酒》理化指标要求,属于干型果酒。清汁发酵酒中的总酸质量浓度(8.19 g/L)显著高于带籽发酵(7.76 g/L)和带皮发酵(7.59 g/L)石榴酒,由于带籽发酵和带皮发酵的浸渍作用,果籽、隔膜及石榴皮中的金属离子(钾离子、钙离子)转移到石榴酒中,与酒石酸发生反应生成酒石酸钾络合物,使得总酸质量浓度降低^[15]。3 种工艺酿造的石榴酒乙醇体积分数为 11.41%~11.79%,与清汁发酵相比,带籽发酵与带皮发酵石榴酒的乙醇体积分数较低,还原糖质量浓度相对较高,这可能是由于带籽发酵和带皮发酵过程中产生更多的柠檬酸,柠檬酸通过螯合酒中的二价钙离子和镁离子来

抑制酵母菌的生长^[18]。带皮发酵(409.16 mg/L)和带籽发酵(312.58 mg/L)石榴酒总酚质量浓度均高于清汁发酵酒(239.08 mg/L),主要是因为酚类物质主要存在于果皮和种子中,随着酒精发酵的进行会转移到果酒中,使总酚含量升高^[19]。干浸出物是指在一定物理条件下酒中非挥发性物质的总和,主要有固定酸、糖、甘油、单宁、色素、果胶和矿物质等^[5],带皮发酵和带籽发酵酒干浸出物质量浓度分别为23.28、19.21 g/L,显著高于清汁发酵石榴酒(17.54 g/L)。带籽发酵石榴酒挥发酸质量浓度为0.59 g/L,显著高于清汁发酵(0.26 g/L)和带皮发酵酒(0.31 g/L),虽然挥发酸质量浓度在3种不同工艺酿造的石榴酒中有显著差异,但都<1.2 g/L,符合GB/T 15037—2006《葡萄酒》要求。3种工艺酿造的石榴酒甲醇质量浓度为143.66~188.98 mg/L,均<400 mg/L,符合GB 15037—2006《葡萄酒》中的规定。GB 2760—2014《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》规定果酒中总SO₂质量浓度≤250 mg/L,游离SO₂质量浓度≤50 mg/L,在3种工艺酿造的石榴酒中,总SO₂质量浓度(125.78~133.53 mg/L)和游离SO₂质量浓度(25.62~26.35 mg/L)均符合国标要求。

表2 石榴酒的理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of pomegranate wines

理化指标	清汁发酵	带籽发酵	带皮发酵
还原糖质量浓度/(g·L ⁻¹)	3.19±0.05 ^b	3.48±0.01 ^a	3.68±0.01 ^b
总酸质量浓度/(g·L ⁻¹)	8.19±0.12 ^a	7.76±0.01 ^b	7.59±0.02 ^b
pH	3.69±0.01 ^b	3.71±0.01 ^b	4.09±0.02 ^a
乙醇体积分数/%	11.79±0.01 ^a	11.68±0.01 ^a	11.41±0.02 ^b
总酚质量浓度/(mg·L ⁻¹)	239.08±0.02 ^c	312.58±0.02 ^b	409.16±0.01 ^a
挥发酸质量浓度/(g·L ⁻¹)	0.26±0.01 ^b	0.59±0.01 ^a	0.31±0.01 ^b
干浸出物质量浓度/(g·L ⁻¹)	17.54±0.03 ^c	19.21±0.01 ^b	23.28±0.03 ^a
甲醇质量浓度/(mg·L ⁻¹)	159.56±0.02 ^b	143.66±0.01 ^c	188.98±0.01 ^a
总SO ₂ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	125.78±0.21 ^a	133.53±0.05 ^b	129.02±0.12 ^b
游离SO ₂ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	25.98±0.02 ^a	26.35±0.04 ^b	25.62±0.02 ^c

注:不同字母表示差异显著(P<0.05)

2.2 发酵工艺对石榴酒香气成分的影响

香气是评价果酒品质的重要指标^[16]。实验采用HS-SPME-GC-MS技术,对石榴汁及3种石榴酒的挥发性香气成分进行测定,分析石榴酒香气成分的变化。结果如附表1(<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20220812.1744.013.html>)所示,石榴汁及3种石榴酒中共检测出88种香气物质,包括醇类11种、酯类41种、酸类9种、萜烯类13种、醛酮类10种和酚类4种,含量分别占香气总量的33.54%、44.49%、6.03%、9.96%、5.14%和0.84%,其中酯

类物质种类最多,含量最高。3种不同工艺酿造的石榴酒中分别检测出53、50、49种香气成分,香气总量分别为36 925.18、29 172.63、23 243.72 μg/L,可见清汁发酵的石榴酒中无论香气种类还是香气总量均高于带籽和带皮发酵的石榴酒。

如图1所示,石榴汁和3种石榴酒中共检测出88种香气成分,其中石榴汁和石榴酒中共有成分有7种,33种为石榴酒中共有,清汁发酵石榴酒特有的香气成分有10种,带籽和带皮发酵石榴酒特有的香气成分均为6种。此外,由图2可知,石榴汁及3种石榴酒中的香气成分可分为醇类、酯类、酸类、萜烯类、醛酮类、酚类6个类别。大多数醇类、酯类和酸类物质是发酵的衍生物,在3种石榴酒中最多,而萜烯类、醛酮类和酚类物质是变体,在石榴汁中最多。

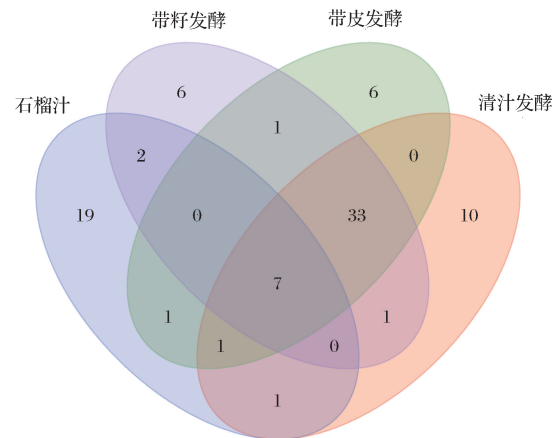


图1 石榴汁及石榴酒中挥发性香气化合物的 Venn 图

Fig. 1 Venn diagram of volatile aroma compounds in pomegranate juice and pomegranate wines

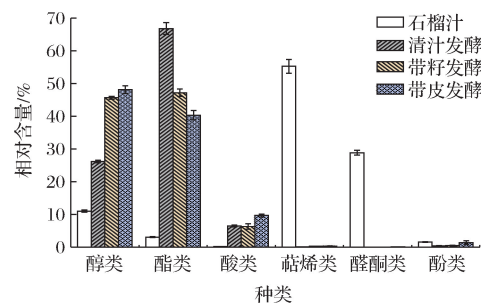


图2 石榴汁和不同工艺发酵石榴酒中各类香气物质

Fig. 2 Various aroma substances in pomegranate juice and pomegranate wines fermented by different processes

2.2.1 醇类香气成分比较

醇类物质是构成果酒风味特征的基本香气化合物,这些物质一部分来源于果实自身无氧代谢,另一部分来源于酵母菌的氨基酸代谢或糖代谢^[20]。由附

表1可知,3种石榴酒中共检测出10种醇类物质,共有物质有7种,分别为异戊醇、苯乙醇、2-甲基丁醇、2,3-丁二醇、2-壬醇、正庚醇和3-甲硫基丙醇,这些物质可以赋予酒体杂醇香^[5]。在带籽发酵石榴酒中可以检测到9-癸烯-1-醇和正己醇,具有青草、花香和玫瑰香味^[21],其中正己醇主要来源于石榴果实,在石榴汁样品中也有检出。2-戊醇仅在带皮发酵石榴酒中检出,具有葡萄酒和醚香味。酒样中醇类物质含量最高的是带籽发酵石榴酒,质量浓度为13 326.55 $\mu\text{g/L}$,其次是带皮发酵石榴酒,清汁发酵石榴酒含量最低。高级醇具有强烈的刺激性气味,有研究表明,葡萄酒中的高级醇质量浓度 $<0.3 \text{ g/L}$ 时,可以提高葡萄酒的复杂感,而质量浓度 $>0.4 \text{ g/L}$ 时,则会影响葡萄酒的感官品质^[22]。结合感官评价结果,3种不同工艺酿造的石榴酒醇香浓郁,并未感知到不良气味。

2.2.2 酯类香气成分比较

酯类化合物是构成果酒风味特征的主要香气物质,产生于酒精发酵,能赋予果酒浓郁的花香和果香^[23]。由附表1可知,3种酒样中共检测出38种酯类物质,包括7种乙酸酯、24种乙醇酯和7种其他酯。其中乙醇酯种类最多,且含量最高,占酯类物质总量的96.69%。乙醇酯是酵母的次级代谢产物,也称脂肪酸乙酯,有研究报道,乙醇酯含量增加可以增强葡萄酒的果香^[5]。3种酒样中,清汁发酵酒乙醇酯含量最高(23 850.3 $\mu\text{g/L}$),带籽发酵酒次之(13 235.55 $\mu\text{g/L}$),带皮发酵酒最低(9 155.08 $\mu\text{g/L}$)。

3种石榴酒中分别检测出33、29、24种酯类物质,其中,清汁发酵石榴酒中酯类物质质量浓度最高(24 680.69 $\mu\text{g/L}$),带皮发酵石榴酒中最低(9 378.44 $\mu\text{g/L}$),且差异显著。3种石榴酒中共存的酯类物质有23种,乙醇酯占主导,主要包括月桂酸乙酯、癸酸乙酯、辛酸乙酯、棕榈酸乙酯、肉豆蔻酸乙酯、乙酸苯乙酯等化合物,这些物质赋予石榴酒浓郁的脂肪味、玫瑰香、蜂蜜香、果香及花香^[5,16],与AN-DREU-SEVILLA等^[13]研究结果相似。乙酸香茅酯^[24]、乙酸橙花酯、乳酸乙酯、醋酸辛酯等9种物质仅在清汁发酵酒中检出,具有菠萝、玫瑰、薰衣草香和奶油香^[5,24]。月桂酸异戊酯在清汁发酵和带籽发酵石榴酒中均检出,且未在带皮发酵酒中检出,具有脂肪味,微甜。3-苯丙酸乙酯是带皮发酵石榴酒中的独有香气成分,具有清甜水果香和蜂蜜似花香。

2.2.3 酸类香气成分比较

由附表1可知,3种石榴酒中共检测出8种酸类

物质,清汁发酵酒中含量最高(2 394.66 $\mu\text{g/L}$),带皮发酵酒次之(2 251.31 $\mu\text{g/L}$),带籽发酵酒含量最低(1 845.96 $\mu\text{g/L}$)。在3种酒样中均能检测到辛酸、癸酸、9-癸烯酸和正己酸,这些物质赋予石榴酒乳制品、脂肪和奶酪味^[16],其中正己酸主要来源于石榴果实,在石榴汁中也检出,与发酵前的石榴汁相比,3种石榴酒中正己酸的含量显著提高,分别是石榴汁含量的34.61、35.16、34.84倍。在带籽发酵和带皮发酵酒中可以检测到壬酸,该物质具有脂肪的香气特征。月桂酸仅在清汁发酵酒中检出,具有干果和月桂油的香味^[16]。脂肪酸是酵母菌和细菌的代谢产物,研究发现,低浓度时具有奶酪味或奶油风味^[25],可以增加果酒的香气复杂性,含量过高则会产生醋酸、腐败和刺激性气味,影响果酒的品质^[16]。结合理化指标检测和感官分析结果,3种工艺酿造的石榴酒脂香浓郁,并未感知到不良气味。

2.2.4 萜烯类香气成分比较

萜烯类化合物是植物体内由乙酰辅酶A合成的次级代谢产物,具有浓郁的水果香和花香^[26]。由附表1可知,萜烯类物质在石榴汁中含量最高,约占香气总量的55.30%,而在3种石榴酒中含量较低,仅为0.10%、0.31%、0.33%。3种石榴酒中共检测出7种萜烯类物质,其中芳樟醇、(S)-(-)-柠檬烯和香叶基丙酮在石榴汁中也有检出,这些物质主要来源于石榴果实,具有紫丁香和玫瑰花香。芳樟醇、松油醇和香茅醇在3种石榴酒中均检出,可以给酒体带来浓郁的紫丁香和玫瑰花香,使酒体香气更加清新甜美。

2.2.5 醛酮类香气成分比较

醛酮类主要包括醛类、酮类和缩醛类物质,也是果酒香气的重要组成部分^[16]。由附表1可知,3种石榴酒中共检测出3种醛酮类物质,分别为壬醛、癸醛和甲基庚烯酮,这些物质均来自石榴果实,在石榴汁中均检出,具有甜橙、柠檬香和花香^[5,12]。甲基庚烯酮仅在带皮发酵石榴酒中检出,能赋予酒体柠檬草和水果香。

2.2.6 酚类香气成分比较

果酒中的酚类物质来源于果实本身或在酒精发酵过程(酚酸降解或酒香酵母代谢)产生^[27]。由附表1可知,3种石榴酒中共检测出3种酚类物质,2,4-二叔丁基苯酚在3种石榴酒中均被检出,具有石炭酸味。百里香酚和香芹酚仅在带皮发酵酒中检出,能赋予酒体甜药香、草辛香和麝香草酚气味。

2.3 不同工艺发酵石榴酒的关键香气化合物分析

采用ROAV分析各香气物质对石榴酒总体风味

的贡献大小^[28]。根据附表1各香气物质的相对含量和嗅觉阈值可知,辛酸乙酯在3种石榴酒中的相对含量偏高,嗅觉阈值偏小,因而辛酸乙酯对石榴酒的风味有重要贡献,定义辛酸乙酯在3种石榴酒中 $ROAV_{stan} = 100$,计算其他各香气化合物的 $ROAV$ ^[17]。当 $ROAV \geq 1$ 时,认为该物质为石榴酒的主体风味成分;当 $0.1 \leq ROAV < 1$ 时,认为该物质对石榴酒总体风味具有重要的修饰作用;当 $ROAV < 0.1$ 时,认为该物质对石榴酒的风味无显著影响,为潜在化合物^[29]。由附表2(<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20220812.1744.013.html>)可知,清汁发酵酒中关键风味物质有7种,分别为苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯;带籽发酵酒中关键风味物质有8种,分别为苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、十一酸乙酯和丁二酸二乙酯;带皮发酵酒中关键风味物质有11种,分别为异戊醇、苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、肉桂酸乙酯、苯甲酸乙酯和十一酸乙酯。3种石榴酒中均具有的关键风味物质为苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯,它们共同赋予石榴酒浓郁的果香和花香。

2.4 PCA

运用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对3种石榴酒的香气成分进行PCA,结果如图3所示。以特征值 > 1 为依据,3个样品中共提取了2个主成分,其中第一主成分贡献率为59.05%,第二主成分贡献率为40.74%,二者累计方差贡献率为99.79%,基本可以解释原变量绝大多数的变异信息^[16]。

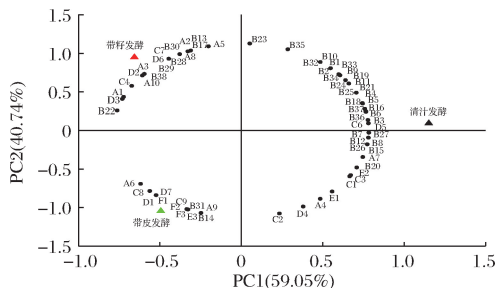


图3 石榴酒香气化合物PCA样品分布图和因子载荷图

Fig. 3 PCA sample distribution map and factor loading map of pomegranate wine aroma compounds

由图3可知,3种石榴酒在PCA图中得到了较好区分,清汁发酵酒主要分布在PC1的正半轴,带籽发酵酒主要分布在PC2的正半轴,带皮发酵酒主要分

布在PC1和PC2的负半轴。具体来说,清汁发酵酒位于第一象限,香气物质丰富,与乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、十一酸乙酯、棕榈酸乙酯、月桂酸、香叶基丙酮靠近,这些物质赋予酒体菠萝、梨、椰子等果香和花香。由附表2可知,石榴酒中关键风味物质共7种,其中5种位于第一象限,分别为乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯,说明清汁发酵酒具有石榴酒的典型香气特征。带籽发酵酒位于第二象限,与异戊醇、苯乙醇、2-壬醇、丁二酸二乙酯、乙酸苯乙酯靠近,它们给酒体带来杂醇、苦杏仁和水果香气。带皮发酵酒位于第三象限,与正庚醇、2-戊醇、3-苯丙酸乙酯、甲基庚烯酮靠近,正庚醇具有葡萄味,2-戊醇具有葡萄酒和醚香,3-苯丙酸乙酯具有蜂蜜香和水果似花香,甲基庚烯酮具有梨、苹果果香和花香。

2.5 感官评价

2.5.1 不同工艺发酵石榴酒的感官QDA

由图4可知,不同工艺发酵对石榴酒的感官质量影响较大。从外观角度,清汁发酵石榴酒呈鲜红色,酒体澄清透亮有光泽,而带籽发酵和带皮发酵石榴酒呈浅红色,酒体澄清无光泽,所以外观评分较低。从香气角度,清汁发酵石榴酒以花香和果香为主,在香气纯正度、香气浓度和质量方面均优于带籽发酵和带皮发酵酒。从口感角度,清汁发酵石榴酒酒体轻盈,口感细腻、纯正,结构感强,整体平衡性好,而带皮发酵和带籽发酵石榴由于酸度低,干浸出物和总酚含量较高,酒体比较饱满,口感偏涩,整体平衡性下降。

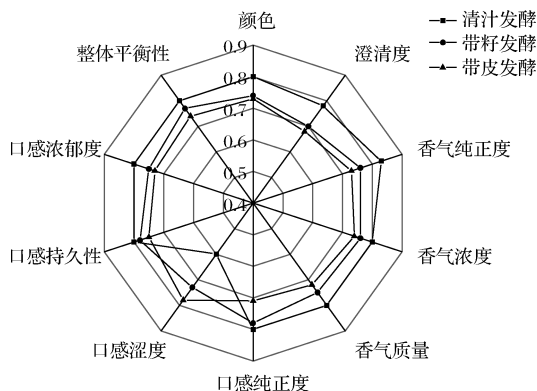


图4 不同工艺发酵石榴酒的感官QDA

Fig. 4 QDA of sense characteristics of pomegranate wines

2.5.2 不同工艺发酵石榴酒的香气QDA

由图5可知,不同工艺酿造的石榴酒具有坚果味、植物味、木质味、酒香、脂肪香、奶油香、果香和花香,其中清汁发酵酒中果香、花香、奶油香、脂肪香和

坚果香较为浓郁,带籽发酵酒中具有明显的酒香,带皮发酵酒中木质味比较突出。综合来看,清汁发酵石榴酒香气浓郁,果香细腻,具有典型性,而带籽发酵和带皮发酵酒香气较为复杂,缺乏协调感。

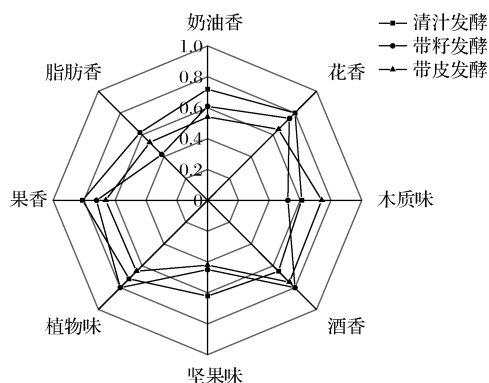


图5 不同工艺发酵石榴酒的香气 QDA

Fig.5 QDA of aroma characteristics of pomegranate wines

3 结论

本实验对3种不同工艺酿造的石榴酒进行比较,发现不同工艺发酵对石榴酒的理化指标、香气成分及感官品质具有显著影响。石榴汁及3种石榴酒中共检测出88种香气物质,清汁发酵、带籽发酵和带皮发酵石榴酒中分别检测出53、51、49种香气物质,共有成分为33种,独有成分分别为10、6、6种,香气总量分别为36 925.18、29 172.63、23 243.72 $\mu\text{g/L}$,其中清汁发酵石榴酒的香气总量较高且差异显著。3种石榴酒中醛酮类物质的种类和含量均少于石榴汁,且差异显著,这可能是酿造过程中的转化或损失所致,其机理还有待进一步研究。实验采用内标法进行定量并结合气相色谱-嗅闻分析,确定了苯乙醇、2-壬醇、乙酸异戊酯、月桂酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和十一酸乙酯为石榴酒的关键风味物质,为了更准确的确定石榴酒的特征香气物质,有必要采用外标法进行准确定量,并结合气相色谱-嗅闻或电子鼻等气味分析仪进一步进行分析论证。PCA结果显示,3种不同工艺酿造的石榴酒香气风格差异区分明显,清汁发酵酒具有石榴酒的典型香气特征。感官评价结果显示,清汁发酵石榴酒香气浓郁,果香细腻,具有较好的色泽和典型性,感官评分较高。

不同发酵工艺对石榴酒的基本理化指标、香气成分及感官品质具有显著影响。带籽发酵和带皮发酵石榴酒干浸出物和总酚含量较高,香气更为复杂,口感偏涩;而清汁发酵石榴酒香气物质含量较高,以花香和果香为主,酒体轻盈,口感细腻、纯正,结构感强,感官品质更优。

参 考 文 献

- [1] YUAN Z H, FANG Y M, ZHANG T K, et al. The pomegranate (*Punica granatum* L.) genome provides insights into fruit quality and ovule developmental biology [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 16(7):1 363 - 1 374.
- [2] 彭潇, 邹文静, 邵清清, 等. 石榴酒发酵过程中真菌种群演替及风味物质代谢规律解析[J]. *食品科学*, 2021, 42(6):157 - 163.
PENG X, ZOU W J, SHAO Q Q, et al. Fungal community succession and flavor compounds metabolism during pomegranate wine fermentation [J]. *Food Science*, 2021, 42(6):157 - 163.
- [3] VUČIĆ V, GRABEŽ M, TRCHOJANIĆ A, et al. Composition and potential health benefits of pomegranate: A review [J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2019, 25(16):1 817 - 1 827.
- [4] 陈利娜, 敬丹, 唐丽颖, 等. 新中国果树科学研究70年:石榴[J]. *果树学报*, 2019, 36(10):1 389 - 1 398.
CHEN L N, JING D, TANG L Y, et al. Fruit scientific research in New China in the past 70 years: Pomegranate [J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(10):1 389 - 1 398.
- [5] 刘敏, 高伟, 张睿梅. 杏汁发酵与杏皮渣发酵对杏酒香气质量的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(22):193 - 200.
LIU M, GAO W, ZHANG R M. Effect of juice or pomace fermentation on aroma quality of apricot wine [J]. *Food Science*, 2021, 42(22):193 - 200.
- [6] 朱玉章, 王俊人, 李西子, 等. 低高级醇石榴酒的酵母筛选及发酵工艺优化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(4):64 - 71.
ZHU Y Z, WANG J R, LI X Z, et al. Optimization of yeast and fermentation process for pomegranate wine with low higher alcohol [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(4):64 - 71.
- [7] 唐柯, 王茜, 周霞, 等. 石榴酒发酵过程中香气动态变化规律[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(6):197 - 202;214.
TANG K, WANG X, ZHOU X, et al. Dynamic changes in aroma during pomegranate wine fermentation [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(6):197 - 202; 214.
- [8] 刘亚萍, 楚杰, 何秋霞, 等. 发酵石榴酒澄清剂的筛选及澄清条件优化[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(3):175 - 179;185.
LIU Y P, CHU J, HE Q X, et al. Study on the selection and optimization of clarificants of pomegranate wine [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(3):175 - 179;185.
- [9] 吕真真, 焦中高, 刘慧, 等. 不同制汁方式对石榴酒品质的影响[J]. *果树学报*, 2020, 37(12):1 941 - 1 952.
LYU Z Z, JIAO Z G, LIU H, et al. Effect of different juicing methods on quality of pomegranate wines [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(12):1 941 - 1 952.
- [10] WASILA H, LI X, LIU L W, et al. Peel effects on phenolic composition, antioxidant activity, and making of pomegranate juice and wine [J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(8):C1 166 - C1 172.
- [11] 李晋丽. 石榴果酒发酵动力学及发酵工艺优化研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2011.
LI J L. Study on fermentation kinetics and the fermentation process optimization of pomegranate wine [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [12] 柴瑞雪, 安朝严, 刘涛, 等. 基于SAFE-GC-O-MS的‘双红’干红葡萄酒关键香气物质分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(4):175 - 182.
CHAI R X, AN Z Y, LIU T, et al. Analysis of key aroma compounds in ‘Shuanghong’ wine by solvent assisted flavor evaporation combined with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. *Food Science*, 2022, 43(4):175 - 182.
- [13] ANDREU-SEVILLA A J, MENA P, MARTÍ N, et al. Volatile composition and descriptive sensory analysis of pomegranate juice and wine [J]. *Food Research International*, 2013, 54(1):246 - 254.
- [14] 陈红梅, 王沙沙, 尹何南, 等. 不同工艺处理对野生猕猴桃酒品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(4):233 - 240.
CHEN H M, WANG S S, YIN H N, et al. Effects of different fermentation methods on the quality of wines made from wild kiwifruit

- [J]. Food Science, 2018, 39(4):233–240.
- [15] 王华. 葡萄酒分析检验[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
WANG H. Wine Analysis and Testing[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2011.
- [16] 马腾臻, 宫鹏飞, 史肖, 等. 红枣发酵酒香气成分分析及感官品质评价[J]. 食品科学, 2021, 42(4):247–253.
MA T Z, GONG P F, SHI X, et al. Aroma components and sensory properties of fermented jujube wine[J]. Food Science, 2021, 42(4):247–253.
- [17] 裴鹏正, 负建民, 贾琦, 等. 软儿梨果酒发酵过程中挥发性风味物质变化分析[J]. 生物技术进展, 2021, 11(6):758–769.
PEI P Z, YUN J M, JIA Q, et al. Analysis on changes of volatile flavor compounds in Ruan'er pear wine during fermentation[J]. Current Biotechnology, 2021, 11(6):758–769.
- [18] NIELSEN M K, ARNEBORG N. The effect of citric acid and pH on growth and metabolism of anaerobic *Saccharomyces cerevisiae* and *Zygosaccharomyces bailii* cultures[J]. Food Microbiology, 2007, 24(1):101–105.
- [19] 穆谈航, 叶嘉, 杨明建, 等. 石榴皮多酚提取工艺优化及其贮藏稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11):142–146.
MU T H, YE J, YANG M J, et al. Optimization of extraction technology and storage stability of polyphenols from pomegranate peel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11):142–146.
- [20] ZHANG W Y, ZHANG L, XU C P. Chemical and volatile composition of jujube wines fermented by *Saccharomyces cerevisiae* with and without pulp contact and protease treatment[J]. Food Science and Technology (Campinas), 2016, 36(2):204–209.
- [21] 李媛媛, 李德美, 张亚东, 等. 赤霞珠干红葡萄酒在不同子产区香气特征的差异[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6):256–262;268.
LI Y Y, LI D M, ZHANG Y D, et al. Comparative study of Aroma Characteristics of Cabernet Sauvignon dry red wine in different sub-regions[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6):256–262;268.
- [22] MOLINA A M, GUADALUPE V, VARELA C, et al. Differential synthesis of fermentative aroma compounds of two related commercial wine yeast strains[J]. Food Chemistry, 2009, 117(2):189–195.
- [23] HUAN Y M, GUAN J X, YING Y, et al. Effects of seven wild wine yeast strains on the aroma compounds of 'Guipu 3' dry white wines[J]. Food Science, 2019, 40(4):251–258.
- [24] 李春秀, 李勋兰, 梁国鲁, 等. 不同成熟阶段柠檬果皮挥发物和酚类成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(4):215–224.
LI C X, LI X L, LIANG G L, et al. Analysis of volatile components and phenols from peels of two lemon cultivars during fruit ripening[J]. Food Science, 2022, 43(4):215–224.
- [25] TAILLANDIER P, LAI Q P, JULIEN-ORTIZ A, et al. Interactions between *Torulaspora delbrueckii* and *Saccharomyces cerevisiae* in wine fermentation: Influence of inoculation and nitrogen content[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2014, 30(7):1 959–1 967.
- [26] CABRITA M J, FREITAS A M C, LAUREANO O, et al. Glycosidic aroma compounds of some Portuguese grape cultivars[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(6):922–931.
- [27] RODRÍGUEZ-BENCOMO J J, CABRERA-VALIDO H M, PREZ-TRUJILLO J P, et al. Bound aroma compounds of Gual and *Listán blanco* grape varieties and their influence in the elaborated wines[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3):1 153–1 162.
- [28] 裴晓静. 烘焙红枣果酒的工艺优化及香气成分分析[D]. 保定:河北农业大学, 2018.
PEI X J. Process optimization and aromatic composition analysis of baking red jujube wine[D]. Baoding:Hebei Agricultural University, 2018.
- [29] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7):370–374.
LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. “ROAV” Method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7):370–374.

Effect of different fermentation processes on aroma quality of pomegranate wine

LI Tao, LI Yunzhe, FENG Hanjie, YANG Mei, SHI Heyun, ZHANG Jun*

(College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

ABSTRACT Cele sweet pomegranate was used as raw material, the aroma of pomegranate juice and the wine fermented with clear juice, seed, and whole fruits were enriched by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME), and the qualitative and quantitative analysis was carried out by GC-MS. Additionally, the effects of different fermentation processes on the aroma quality of pomegranate wine were compared based on the basic physicochemical indexes and sensory evaluation. Results showed that the physical and chemical indexes of different pomegranate wine samples met the requirements of national standard. The dry extract and total phenol contents of whole fruits pomegranate wine were high and the differences were significant. The 53, 50, and 49 kinds of aroma compounds were detected in pomegranate wine fermented with clear juice, seed, and whole fruits, respectively. There were 33 kinds of common components, while 10, 6, and 6 kinds of unique components in three wine samples, respectively. The total aroma of pomegranate wine fermented with juice was higher and the difference was significant. Phenylethyl alcohol, 2-nonanol, isoamyl acetate, ethyl lauric acid, ethyl caprylate, ethyl decanoate, and ethyl undecanoate were the key flavor substances of pomegranate wine, which endowed the wine with strong fruit and floral aroma. The results of principal component analysis showed that the aroma styles of pomegranate wine brewed by the three different processes were significantly different. Pomegranate wine fermented with clear juice was in the same quadrant with five key flavor substances, isoamyl acetate, ethyl lauric acid, ethyl caprylate, ethyl decanoate, and ethyl undecanoate, and had typical aroma characteristics of pomegranate wine. The sensory evaluation results showed that the fermented pomegranate wine had rich aroma, delicate fruit aroma, good color and typicality, and high sensory score. Pomegranate wine fermented with seed and whole fruits had high content of total phenols, complex aroma and the taste was astringent. Pomegranate wine fermented with clear juice has high content of aroma substances with fruity and floral aromas, is light-bodied and tastes refreshing and better in sensory quality. This study provides a theoretical basis for the fermentation optimization and aroma comparative analysis of pomegranate wine in the future.

Key words pomegranate wine; fermentation process; aroma components; relative odor activity value (ROAV); principal component analysis (PCA); sensory evaluation

附表 1 石榴汁和不同工艺发酵石榴酒中各香气成分的含量和风味特征描述

Table S1 Contents and flavor characteristics of aroma components in pomegranate juice and pomegranate wines fermented by different processes

序号	物质名称	香气描述	阈值/ (μg/L)	质量浓度/(μg/L)			
				石榴汁	清汁发酵	带籽发酵	带皮发酵
醇类							
A1	异戊醇	醇香,涩味,辛辣味	3000	—	6013.58 ± 161.86 ^c	8507.27 ± 220.08 ^a	7361.73 ± 210.11 ^b
A2	苯乙醇	玫瑰香	82	—	1846.69 ± 32.09 ^b	2252.41 ± 145.56 ^a	1796.47 ± 22.45 ^c
A3	2-甲基丁醇	苹果白兰地香气和辛辣味	—	—	1682.36 ± 6.80 ^c	2486.22 ± 43.77 ^a	1896.04 ± 148.96 ^b
A4	2,3-丁二醇	黄油,乳酪	120000	—	57.97 ± 6.67 ^a	14.37 ± 3.25 ^c	54.91 ± 6.10 ^b
A5	2-壬醇	植物味	0.1	—	4.21 ± 0.35 ^b	5.36 ± 0.09 ^a	3.61 ± 0.61 ^c
A6	正庚醇	葡萄味	200	—	17.09 ± 2.20 ^c	28.93 ± 3.29 ^b	43.31 ± 0.89 ^a
A7	3-甲硫基丙醇	生土豆味,圆葱味	1000	—	39.16 ± 2.76 ^a	26.86 ± 1.69 ^c	31.59 ± 1.70 ^b
A8	9-癸烯-1-醇	花香,玫瑰香	—	—	—	3.39 ± 1.71 ^a	—
A9	2-戊醇	葡萄酒和醚香	—	—	—	—	2.09 ± 0.28 ^a
A10	正己醇	青草	4800	1616.46 ± 47.37 ^a	—	1.74 ± 0.24 ^b	—
A11	2-乙基己醇	玫瑰花香、青草味	5000	488.58 ± 15.98 ^a	—	—	—
	小计			2105.04	9661.06	13326.55	11189.75
酯类							
乙酸酯							
B1	乙酸异戊酯	香蕉香	30	—	339.99 ± 5.78 ^a	241.02 ± 69.94 ^b	102.14 ± 2.29 ^c
B2	乙酸 2-甲基丁酯	苹果皮和香蕉样香气	—	—	20.31 ± 4.26 ^a	13.67 ± 5.25 ^b	4.37 ± 0.93 ^c
B3	乙酸异丁酯	苹果,香蕉,蜡烛	1600	—	5.61 ± 1.03 ^a	—	—
B4	乙酸香茅酯	柠檬香、果香	4.68	—	1.33 ± 0.92 ^a	—	—
B5	乙酸橙花酯	玫瑰香	—	—	3.89 ± 0.71 ^a	—	—
B6	乙酸香叶酯	玫瑰和薰衣草香气	9	—	3.09 ± 0.42 ^a	—	—
B7	乙酸癸酯	菠萝香、花香	—	—	8.88 ± 1.42 ^a	—	—
乙醇酯							
B8	月桂酸乙酯	花香、果香	83	—	8279.49 ± 256.05 ^a	2600.53 ± 173.36 ^c	3264.27 ± 181.36 ^b
B9	癸酸乙酯	脂肪味,果香	39	—	8199.62 ± 208.52 ^a	5437.05 ± 100.57 ^b	2999.76 ± 38.85 ^c
B10	辛酸乙酯	菠萝、梨、花香	5	—	3065.23 ± 84.99 ^a	2327.98 ± 76.45 ^b	850.16 ± 49.25 ^c
B11	棕榈酸乙酯	脂肪味、水果味	1000	40.44 ± 10.20 ^d	2012.97 ± 118.11 ^a	988.75 ± 76.00 ^b	663.23 ± 19.43 ^c
B12	肉豆蔻酸乙酯	椰子香、果香	2000	—	510.64 ± 50.22 ^a	176.55 ± 23.64 ^c	234.99 ± 10.93 ^b
B13	乙酸苯乙酯	玫瑰花香、蜂蜜香	250	—	457.37 ± 50.55 ^b	558.43 ± 99.31 ^a	434.78 ± 2.31 ^c
B14	肉桂酸乙酯	肉桂香、草莓香和蜂蜜香	50	—	101.19 ± 19.17 ^b	96.28 ± 15.85 ^c	133.81 ± 13.51 ^a
B15	9-十六碳烯酸乙酯	温柏果香	100	—	206.69 ± 73.68 ^a	73.43 ± 17.72 ^c	106.62 ± 11.46 ^b
B16	反油酸乙酯	花香、果香及油脂香	—	75.43 ± 5.16 ^d	614.32 ± 34.08 ^a	238.96 ± 17.43 ^b	221.66 ± 10.29 ^c
B17	油酸乙酯	花果、奶油味	1500	26.21 ± 2.10 ^d	247.17 ± 43.31 ^b	485.53 ± 23.63 ^a	185.29 ± 4.92 ^c
B18	硬脂酸乙酯	略呈蜡香	—	—	31.51 ± 18.15 ^a	12.24 ± 5.37 ^b	5.97 ± 1.82 ^c
B19	丁酸乙酯	草莓,苹果,香蕉	20	—	23.13 ± 1.68 ^a	13.80 ± 3.19 ^b	8.48 ± 0.55 ^c
B20	苯甲酸乙酯	花香	4	—	15.19 ± 0.66 ^b	7.25 ± 1.37 ^c	10.31 ± 0.40 ^a
B21	2-甲基丁酸乙酯	苹果、菠萝香	19	—	19.93 ± 3.68 ^a	6.45 ± 4.05 ^b	4.02 ± 0.46 ^c
B22	苯乙酸乙酯	令人愉快的蜂蜜香,苦甜味	650	—	4.63 ± 1.07 ^c	7.30 ± 1.12 ^a	6.46 ± 0.30 ^b
B23	壬酸乙酯	玫瑰花,果香	1300	—	32.43 ± 3.97 ^b	40.17 ± 5.64 ^a	19.35 ± 6.50 ^c
B24	十一酸乙酯	椰子香气	0.1	—	4.74 ± 0.84 ^a	2.66 ± 0.22 ^b	2.31 ± 0.51 ^b
B25	乳酸乙酯	优雅的果香,奶油香	14000	—	20.73 ± 1.20 ^a	—	—
B26	惕各酸乙酯	蘑菇似香气	—	—	2.16 ± 0.27 ^a	—	—
B27	己酸-2-苯乙酯	水果青香香气,菠萝香气	—	—	1.16 ± 0.08 ^a	—	—
B28	丁二酸二乙酯	水果清香	15	—	—	148.53 ± 6.82 ^a	—
B29	亚油酸乙酯	植物香味	4	58.99 ± 6.99 ^a	—	9.43 ± 0.75 ^b	—
B30	异丁酸乙酯	甜香	15	—	—	4.23 ± 0.78 ^a	—
B31	3-苯丙酸乙酯	清甜水果香和蜂蜜似花香	—	—	—	—	3.61 ± 0.08 ^a
其他酯							
B32	辛酸异戊酯	水果香味	—	—	144.46 ± 21.81 ^a	120.65 ± 5.56 ^b	42.49 ± 2.31 ^c
B33	癸酸异戊酯	玫瑰香味	—	—	135.58 ± 6.28 ^a	104.50 ± 12.07 ^b	63.18 ± 4.38 ^c

续附表 1

序号	物质名称	香气描述	阈值/ ($\mu\text{g/L}$)	质量浓度/($\mu\text{g/L}$)			
				石榴汁	清汁发酵	带籽发酵	带皮发酵
B34	癸酸异丁酯		—	—	20.23 ± 4.85^a	13.20 ± 2.00^b	5.91 ± 0.93^c
B35	甲酸辛酯	桃、杏和柑橘香	—	—	9.56 ± 1.29^a	9.92 ± 0.40^b	5.27 ± 0.69^c
B36	醋酸辛酯	水果香	—	—	4.64 ± 0.68^a	—	—
B37	月桂酸异戊酯	脂香味,微甜	—	—	132.82 ± 53.15^a	23.85 ± 5.21^b	—
B38	癸酸甲酯	酒香、花香、果香	6	—	—	3.68 ± 2.13^a	—
B39	水杨酸-2-乙基己基酯	略带芳香气味	—	47.02 ± 4.77^a	—	—	—
B40	甲酸庚酯	梨、苹果果香,花香	—	42.05 ± 8.84^a	—	—	—
B41	2-(甲氨基)苯甲酸甲酯	橙花及葡萄香	—	18.62 ± 3.19^a	—	—	—
	小计			308.76	24680.69	13766.04	9378.44
	酸类						
C1	辛酸	脂肪酸、乳制品	1354	—	1657.82 ± 47.66^a	1316.17 ± 175.06^c	1520.62 ± 68.09^b
C2	癸酸	脂肪味,木头味	1400	—	458.89 ± 49.77^b	368.17 ± 48.70^c	498.57 ± 11.46^a
C3	9-癸烯酸	脂肪味	—	—	162.28 ± 9.43^a	54.12 ± 6.05^c	117.35 ± 13.63^b
C4	正己酸	青草、奶酪、腐臭	6700	2.45 ± 0.73^b	84.80 ± 6.95^a	86.14 ± 8.04^a	85.36 ± 7.51^a
C5	棕榈酸	脂肪味、水果味、甜味	—	32.62 ± 5.43^a	—	—	—
C6	月桂酸	干果、月桂油	1000	—	30.87 ± 10.44^a	—	—
C7	油酸	植物油气味	—	—	—	14.59 ± 2.09^a	—
C8	壬酸	脂肪味	500	—	—	6.77 ± 1.16^b	19.06 ± 0.62^a
C9	正戊酸	不愉快的气味	33.4	—	—	—	10.35 ± 0.77^a
	小计			35.07	2394.66	1845.96	2251.31
	萜烯类						
D1	芳樟醇	紫丁香,玫瑰花	25	836.46 ± 197.32^a	3.12 ± 0.53^c	5.70 ± 0.33^d	11.91 ± 4.14^b
D2	松油醇	紫丁香	120	—	19.61 ± 0.67^c	66.42 ± 8.21^a	33.07 ± 0.89^b
D3	香茅醇	蔷薇香、玫瑰香	100	—	3.34 ± 0.82^c	13.70 ± 2.03^a	9.17 ± 1.30^b
D4	(S)-(-)-柠檬烯	鲜花的清淡香气	—	280.51 ± 24.15^a	8.33 ± 0.46^c	—	9.34 ± 3.98^b
D5	香叶基丙酮	清甜、玫瑰	60	6.98 ± 2.25^a	2.34 ± 1.36^b	—	—
D6	(+)-柠檬烯	柠檬香	10	—	—	3.34 ± 0.92^a	—
D7	反式-橙花叔醇	苹果、玫瑰、木香	70	—	—	—	12.59 ± 2.40^a
D8	γ -松油烯	柑橘和柠檬香	260	146.58 ± 22.78^a	—	—	—
D9	萜品油烯	柑橘香,松木香	—	109.95 ± 10.86^a	—	—	—
D10	β -石竹烯	丁香味	—	216.09 ± 78.64^a	—	—	—
D11	叶醇	浓郁新鲜草叶的青香	400	899.45 ± 28.36^a	—	—	—
D12	α -松油醇	丁香香气	330	3483.47 ± 251.5^a	—	—	—
D13	4-萜烯醇	花香	5	4597.94 ± 503.7^a	—	—	—
	小计			10577.43	36.74	89.16	76.08
	醛酮类						
E1	壬醛	甜橙,花香,油脂	100	384.48 ± 26.50^a	1.99 ± 0.93^b	1.18 ± 1.03^b	1.83 ± 0.48^b
E2	癸醛	甜橙、柠檬油香	10	163.93 ± 7.93^a	7.61 ± 0.85^b	3.39 ± 0.58^d	5.49 ± 0.49^c
E3	甲基庚烯酮	柠檬草,水果香气	—	21.57 ± 10.97^a	—	—	13.15 ± 1.08^b
E4	2-壬酮	水果、花、油脂和药草似香气	—	53.14 ± 6.25^a	—	—	—
E5	2-辛酮	苹果香和樟脑香	—	241.93 ± 36.95^a	—	—	—
E6	正己醛	青草气及苹果香	—	4386.89 ± 161.9^a	—	—	—
E7	2-己烯醛	果香和绿叶清香	—	98.01 ± 98.01^a	—	—	—
E8	2-己烯醛	水果香	—	149.66 ± 11.31^a	—	—	—
E9	苯甲醛	苦杏仁味,樱桃及坚果香	1	16.68 ± 3.62^a	—	—	—
E10	苯乙醛	花香,玫瑰花	1	8.43 ± 2.00^a	—	—	—
	小计			5524.72	9.6	4.57	20.47
	酚类						
F1	2,4-二叔丁基苯酚	石碳酸味	200	—	142.43 ± 41.91^b	140.35 ± 24.81^c	308.56 ± 137.39^a
F2	百里香酚	甜药香、草辛香	—	—	—	—	6.60 ± 0.43^a
F3	香芹酚	麝香草酚气味	—	—	—	—	12.51 ± 0.49^a
F4	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	丁香和发酵似香气	—	297.02 ± 14.97^a	—	—	—
	小计			297.02	142.43	140.35	327.67
	总计			18848.04	36925.18	29172.63	23243.72

注:—,表示未检出。表4同。

附表 2 三种不同工艺发酵石榴酒挥发性成分的 ROAV

Table S2 ROAV of volatile components in pomegranate wines fermented by three different processes

序号	物质名称	ROAV		
		清汁发酵	带籽发酵	带皮发酵
1	异戊醇	0.33	0.61	1.44
2	苯乙醇	3.67	5.9	12.88
3	2-壬醇	6.87	11.51	21.23
4	正庚醇	0.01	0.03	0.13
5	3-甲硫基丙醇	0.01	0.01	0.02
6	乙酸异戊酯	1.85	1.73	2
7	乙酸香茅酯	0.05	—	—
8	乙酸香叶酯	0.06	—	—
9	月桂酸乙酯	16.27	6.73	23.13
10	癸酸乙酯	34.29	29.95	45.23
11	辛酸乙酯	100	100	100
12	棕榈酸乙酯	0.33	0.21	0.39
13	肉豆蔻酸乙酯	0.04	0.02	0.07
14	乙酸苯乙酯	0.3	0.48	1.02
15	肉桂酸乙酯	0.33	0.41	1.57
16	9-十六碳烯酸乙酯	0.34	0.16	0.63
17	油酸乙酯	0.03	0.07	0.07
18	丁酸乙酯	0.19	0.15	0.25
19	苯甲酸乙酯	0.62	0.39	1.52
20	2-甲基丁酸乙酯	0.17	0.07	0.12
21	苯乙酸乙酯	—	—	0.01
22	壬酸乙酯	—	0.01	0.01
23	十一酸乙酯	7.73	5.71	13.59
24	丁二酸二乙酯	—	2.13	—
25	亚油酸乙酯	—	0.51	—
26	异丁酸乙酯	—	0.06	—
27	癸酸甲酯	—	0.13	—
28	辛酸	0.2	0.21	0.66
29	癸酸	0.05	0.06	0.21
30	正己酸	—	—	0.01
31	月桂酸	0.01	—	—
32	壬酸	—	—	0.02
33	正戊酸	—	—	0.18
34	芳樟醇	0.02	0.05	0.28
35	松油醇	0.03	0.12	0.16
36	香茅醇	0.01	0.03	0.05
37	香叶基丙酮	0.01	—	—
38	(+)-柠檬烯	—	0.07	—
39	反式-橙花叔醇	—	—	0.11
40	壬醛	—	—	0.01
41	癸醛	0.12	0.07	0.32
42	2,4-二叔丁基苯酚	0.12	0.15	0.91