

市售纯米酒与大吟酿清酒风味品质差异分析

吕永轩^{1,2,3,4} 刘 华^{1,2,3,4} 陈星光^{1,2,3,4} 陆 健^{1,2,3,4*} 吴殿辉^{1,2,3,4}

(1. 江南大学生物工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心, 江苏 无锡 214122; 4. 江南大学江苏省生物活性制品加工工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要: 为了研究大吟酿与纯米酒风味品质差异, 采用理化指标、感官审评和气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对两类清酒的感官品质及风味化合物进行分析, 并结合气味活度值(odor activity value, OAV)和变量投影重要性值(variable importance in projection, VIP)进一步确定两类清酒的关键风味物质和香气差异化合物。结果表明, 大吟酿与纯米酒在理化指标、感官品质和关键风味物质上存在显著差异。大吟酿的乙醇体积分数和氨基酸态氮质量浓度相对较高, 而总糖与总酸质量浓度相对较低。大吟酿口感浓厚, 香气呈吟酿香略带甜香; 纯米酒口感单调, 香气呈谷物香带草木香。两类清酒共鉴定出 62 种挥发性风味物质, 其中酯类在大吟酿中的质量浓度占比最高, 而醇类在纯米酒中的质量浓度占比最高, 均超过 50%。两类清酒在正交偏最小二乘法判别(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)中均表现出明显的聚类分离, 通过 OAV 和 VIP 确定了己酸、己酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸苯乙酯、丁酸乙酯、异戊醇、辛酸乙酯、庚酸乙酯和庚醇是造成两者差异的关键物质, 其中辛酸乙酯、庚酸乙酯和乙酸苯乙酯是大吟酿仅有的关键香气成分。该研究得到的差异物质可为深入解析大吟酿与纯米酒品质差异及国内清酒生产与加工提供理论依据。

关键词: 清酒; 纯米酒; 大吟酿清酒; 风味品质; 吟酿香

Analysis of the Flavor Quality Between Commercial Daiginjo and Junmai Sake

LYU Yongxuan^{1,2,3,4} LIU Hua^{1,2,3,4} CHEN Xingguang^{1,2,3,4} LU Jian^{1,2,3,4*} WU Dianhui^{1,2,3,4}

(1. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. National Engineering Research Center of Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Jiangsu Provincial Research Center for Bioactive Product Processing Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to investigate the differences in flavor quality between Daiginjo and Junmai sake, basic physical and chemical indicators, sensory evaluation and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to analyze the sensory qualities and aroma compounds. The key flavor compounds and aroma differences were determined by odor activity value (OAV) and variable importance in projection (VIP). The results indicated significant differences in the physical and chemical indicators, sensory quality and key flavor substances between Daiginjo and Junmai sake. Daiginjo sake had a rather high level of alcohol and nitrogen amino acid but relatively low content of total sugar and total acid. It also performed a mellow taste, full-bodied ginjo-ka, and sweet aroma, while Junmai sake displayed a monotonous taste, cereal and herbaceous aroma. The two varieties of sake contained 62 volatile flavor components. Daiginjo showed the highest percentage of esters, while Junmai had the highest

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(111-206); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

通信作者: 陆健(1968—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事酿酒工程与食品生物技术研究。E-mail: jlu@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2022-12-02 修回日期: 2023-01-06

proportion of alcohol, both of which exceeded 50%. The orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) revealed a significant cluster separation between the two varieties of sake. According to OAV and VIP analysis, various aroma compounds were detected, including caproic acid, ethyl hexanoate, isoamyl acetate, phenethyl acetate, ethyl butyrate, isoamyl alcohol, ethyl caprylate, ethyl heptanoate, and 1-heptanol. The particular key aroma compounds of Daiginjo sake were ethyl caprylate, ethyl heptanoate and phenylethyl acetate. The identification of different aroma compounds in this study can theoretically support further investigation for the characteristics variations between Daiginjo and Junmai sake as well as domestic sake production and processing.

Keywords: sake; Daiginjo sake; Junmai sake; flavor quality; ginjo-ka

日本清酒是日本酒的典型代表,作为日本的国酒深受国民喜爱,其酿造工艺是基于中国黄酒的酿造方法不断发展创新而成。日本清酒是以大米为原料,通过米曲霉培养制成米曲,然后加入纯种酵母进行低温糖化和发酵,最终获得乙醇体积分数为14%~17%的酿造酒^[1]。根据其品质特点,日本清酒分为吟酿酒、纯米酒和本酿造酒。3类清酒之间最大的区别在于原料大米的精白度,其中吟酿酒使用精白度不大于60%的大米,而纯米酒和本酿造酒使用的大米精白度不大于70%。大吟酿作为吟酿酒的典型代表被誉为“清酒之王”,其口感醇厚,在发酵过程中还会添加酿造酒精突出其香气,该系列酒以其独特的花果香(被称为吟酿香)而深受消费者喜爱。然而,吟酿酒的产量一般较低,价格昂贵;相比之下,纯米酒的价格更多样化,产量较高,但口感较为厚重,香气较杂。

清酒的香气特性因所用原料、清酒酵母及发酵工艺的性质而有所不同^[2-4],这些因素对清酒品质起着决定性影响,因此关于清酒风味物质的研究一直是人们关注的热点。GC-MS技术具有自动化程度高、便于操作、高效等特点^[4],被广泛用于酒类风味成分的表征^[5]。目前日本清酒已检出的香气成分有300多种,主要以酯类和醇类为主。Mimura等^[6]利用GC-MS结合正交偏最小二乘法探究清酒属性与风味化合物的关系,共鉴定出141种化合物,并确定己酸酯与辛酸酯等酯类对清酒吟酿香具有较大影响。此外,Iwano等^[7]通过分析76款吟酿酒香气成分,发现含有己酸乙酯、乙酸乙酯和乙酸异戊酯的清酒综合评价良好。然而,目前国内关于清酒风味成分的研究,特别是针对大吟酿及纯米酒香气成分差异的研究鲜有报道。

作者以市售大吟酿清酒和纯米酒为研究对象,通过感官评价和GC-MS,结合OAV与OPLS-DA

分析两类清酒的关键挥发性风味物质及其香气差异成分,旨在为国内清酒生产及香气品质的提升提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

5种大吟酿(A1~A5)、5种纯米酒(B1~B5):日本盛株式会社、白鹤酒造株式会社、菊正宗酒造株式会社、旭酒造株式会社、月桂冠株式会社和菊姬合资会社。样品信息见表1。

表1 市售清酒及配料信息

Table 1 Ingredient information of the commercial sake amples

分组	编号	原料	大米精白度/%
大吟酿 (A组)	A1	水、米、米曲、酿造酒精	50
	A2	水、米、米曲、酿造酒精	50
	A3	水、米、米曲、酿造酒精	50
	A4	水、米、米曲、酿造酒精	50
	A5	水、米、米曲、酿造酒精	50
纯米酒 (B组)	B1	水、米、米曲	70
	B2	水、米、米曲	70
	B3	水、米、米曲	70
	B4	水、米、米曲	70
	B5	水、米、米曲	70

2-辛醇(色谱纯)、甲醇(色谱纯)、氯化钠(分析纯):上海国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高速离心机:5415D型,德国Eppendorf股份公司;单四极杆气质联用仪:TSQ8000型,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 基本理化指标测定

总糖、总酸、氨基酸态氮及乙醇的测定参照GB/T 13662—2018。

1.3.2 感官评定方法

选择作者所在实验室15名具有专业知识且接

受过专业培训的人员,对清酒的口感、香气、外观进行描述性分析感官测试,以综合评估其感官属性。评估属性参照清酒风味感官评价术语标准^[8]来确定。感官评定采用 10 分制,分值从 0~10 分,数值越高表示强度越大,其中 0 分表示强度最小,10 分表示强度最大,见表 2。

表 2 感官测试评估属性
Table 2 Evaluation of sensory test

属性	描述词	分值
口感	回味	0~10
	醇厚	0~10
	柔和度	0~10
	酸味	0~10
	甜味	0~10
香气	吟酿香	0~10
	草木香	0~10
	谷物香	0~10
	甜香	0~10
外观	颜色、澄清度	0~10

1.3.3 挥发性香气化合物测定

1) 样品前处理:使用蒸馏水将各清酒样品稀释至乙醇体积分数相同。取 3 mL 稀释后的清酒样品,置于 20 mL 的顶空钳口样品瓶中,然后分别加入 3 g 氯化钠和终质量浓度为 50 $\mu\text{g/L}$ 的 2-辛醇内标物,进行 GC-MS 测试。

2) 挥发性香气化合物测定:采用 HS-SPME 进行测定。SPME 萃取头为 50/30 μm BAR/AVB/PAMS,设定搅拌速度为 250 r/min,在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下预热 5 min,萃取 45 min,解吸温度为 250 $^{\circ}\text{C}$,解吸时间为 1 min。GC 条件:采用 AB-Wax 色谱柱(60 m \times 0.5 mm \times 0.5 μm),进样口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$;使用氦气作为载气,流量为 1.5 mL/min。升温程序:60 $^{\circ}\text{C}$ 维持 5 min,以 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 230 $^{\circ}\text{C}$,并保持 15 min。MS 条件:离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$,电离电压为 70 eV,amu 为 30~450。

3) 化合物定性分析:通过 NIST05 质谱库的标准图谱对未知化合物进行定性,并根据改进的 Kovats 法计算各物质的保留指数(RI)。

4) 化合物定量分析:根据被测物质与 2-辛醇吸收峰面积的比值,计算各化合物的质量浓度。

1.3.4 气味活度值

对各挥发性化合物定量后,依据各挥发性物质在水中的气味阈值^[9],根据式(1)计算气味活性值。

$$O_i = \frac{C_i}{T_i} \quad (1)$$

式中:

O_i ——化合物 i 的香气活度值;

C_i ——化合物 i 在清酒中的质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

T_i ——化合物 i 在水中的气味阈值, $\mu\text{g/L}$ 。

1.4 数据分析

所有试验均为 3 次平行,采用平均值 \pm 标准差表示试验结果。使用 SPSS 25.0 统计分软件进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用 SIMCA-P14.1 软件进行 OPLS-DA 和 VIP 分析。

2 结果与讨论

2.1 纯米酒与大吟酿清酒基本理化指标与感官评价分析

不同种类的清酒中乙醇体积分数、总糖质量浓度、总酸质量浓度和氨基酸态氮质量浓度差异明显,见表 3。大吟酿的乙醇体积分数普遍较高,而总糖和总酸质量浓度较低,氨基酸态氮质量浓度优于纯米酒。A 组感官评价综合得分明显高于 B 组,见表 4。与 B 组酒样相比,A 组酒样吟酿香更突出,酒体也更加醇厚,因此其综合感官得分更高。其中 A1 的感官得分最高,达到 91.21,总酸质量浓度与乙醇体积分数较高,吟酿香更加浓郁,且酒体更加绵柔醇厚、回味悠长。B5 的感官得分最低,表现为无明显特征香气,且酒体酸涩、甜腻,杂味明显。

2.2 纯米酒与大吟酿清酒挥发性风味物质分析

采用 GC-MS 对两组清酒样品的挥发性风味物质进行比较。由表 5 和表 6 可知,共检测出 62 种挥发性风味物质,包括 30 种酯类、16 种醇类、8 种醛类、4 种酸类和 4 种其他类型的化合物。其中,共有成分 18 种,且这些成分大多数来源于酵母发酵过程^[10]。在所有样品中,酯类和醇类的质量浓度占比最大,分别为 18.90%~72.07% 和 17.70%~77.98%,是两组清酒中主要的挥发性风味物质。

不同酒样的香气成分质量浓度存在显著差异 ($P < 0.05$),A 组的挥发性风味物质总质量浓度均不低于 10 000.00 $\mu\text{g/L}$,而 B 组的最高质量浓度仅为 5 843.91 $\mu\text{g/L}$ 。其中 A 组质量浓度最低的样品 A1 (10 578.53 $\mu\text{g/L}$)比 B 组质量浓度最高的样品 B1 (5 836.56 $\mu\text{g/L}$)高 81.25%。总挥发性化合物种类和质量浓度占比在两组清酒之间也存在一定差异,见图 1。A 组的种类普遍高于 B 组,且 A 组样品中的酯类

表3 市售清酒理化指标

Table 3 Physical and chemical characteristics of commercial sake samples

种类	编号	总糖质量浓度/(g/L)	总酸质量浓度/(g/L)	氨基酸态氮质量浓度/(g/L)	乙醇体积分数/%
A组	A1	22.35±1.03 ^{cd}	1.81±0.04 ^e	0.31±0.01 ^a	16.52±0.90 ^a
	A2	23.82±1.05 ^c	1.21±0.02 ^d	0.31±0.01 ^a	15.51±0.69 ^{abc}
	A3	24.23±0.90 ^c	1.73±0.05 ^d	0.31±0.02 ^a	16.01±0.64 ^{ab}
	A4	21.10±0.97 ^d	1.22±0.09 ^d	0.31±0.02 ^a	15.01±0.72 ^{bed}
	A5	22.42±1.00 ^{cd}	1.40±0.04 ^e	0.31±0.01 ^a	15.53±0.61 ^{abc}
B组	B1	23.13±1.03 ^{cd}	1.52±0.02 ^e	0.22±0.01 ^b	14.52±0.33 ^{cde}
	B2	23.71±1.75 ^c	1.51±0.05 ^e	0.23±0.01 ^b	14.02±0.34 ^{de}
	B3	40.43±1.72 ^a	1.10±0.06 ^d	0.21±0.01 ^b	13.51±0.96 ^e
	B4	39.70±1.59 ^a	2.61±0.06 ^a	0.22±0.01 ^b	14.02±0.65 ^{de}
	B5	36.75±0.10 ^b	2.42±0.09 ^b	0.21±0.02 ^b	12.02±0.91 ^f

注：同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表4 市售清酒感官评价

Table 4 Sensory evaluation of commercial sake

种类	编号	口感	香气	外观	综合得分
A组	A1	回味悠长、酒体醇厚、绵柔顺口、酸甜协调	吟酿香浓郁、谷物香明显、香气协调	无色透明	91.21±2.31 ^a
	A2	入口柔绵、酒体浓厚、但酸味较明显	吟酿香、甜香明显、无杂味	无色透明	82.23±2.90 ^{bc}
	A3	醇厚、酒精味较明显、不柔和	吟酿香、谷物香均衡	微黄透明	79.90±0.33 ^c
	A4	回味绵长、酒体较浓厚	吟酿香、草木香突出	无色透明	82.23±2.89 ^{bc}
	A5	回味甘甜、酒体绵柔醇厚、酸甜协调	吟酿香、谷物香浓郁	无色透明	85.65±0.58 ^b
B组	B1	回味余长、酒体柔和爽口	谷物香突出、略有吟酿香	无色透明	74.63±1.26 ^d
	B2	酒体甘甜、淡薄	草木香较浓郁	深黄色透明	65.31±1.92 ^e
	B3	回味短、酒体平淡、略甜	香气寡淡、无明显特征香气	深黄色透明	58.82±0.14 ^f
	B4	回味短、酒体糙辣不柔和	酒精味明显	浅黄色透明	55.80±1.43 ^f
	B5	酒体酸涩、甜腻、杂味明显	香气杂、无明显特征香气	深黄色、略浑浊	55.15±0.19 ^g

注：同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

质量浓度占比最大；而B组中醇类质量浓度占比最大。这表明酯类对A组的总体风味贡献最大，而醇类对B组的总体风味贡献最大。这与酯类和醇类物质是清酒主要香气物质的观点一致^[11-12]。酿造所用的酒米外层含有大量的蛋白质和脂肪，这些物质易使酒体产生更多的杂味与苦味，且口感更加厚重^[13]。A组和B组之间香气成分差异的原因可能有两个方面：一方面，A组使用的原料均为精白度为50%的酒米，杂味少，且保留了更多的淀粉层，更利于酵母生长，从而产生更多的风味物质；另一方面，大吟酿通常是使用特别酵母经低温发酵而成^[14]，还会添加酿造乙醇促进酯类合成，这些都会使酒样中风味物质的质量浓度增加。

酯类物质在两类清酒中的质量浓度差异显著($P<0.05$)，A组质量浓度(6 219.19~14 121.91 $\mu\text{g/L}$)明显高于B组(488.89~2 235.83 $\mu\text{g/L}$)。己酸乙酯、

乙酸异戊酯、乙酸乙酯、乙酸苯乙酯在所有酒样中的质量浓度均较高，对两类清酒的整体香气贡献较大。醇类在A组中的总质量浓度(3 066.43~3 850.30 $\mu\text{g/L}$)普遍高于B组(1 510.65~3 272.97 $\mu\text{g/L}$)。其中苯乙醇和异戊醇的质量浓度最高，均不低于500 $\mu\text{g/L}$ ，是两组清酒的主要成分。从酸类物质的总质量浓度来看，A组(526.83~1 861.77 $\mu\text{g/L}$)明显高于B组(14.16~48.62 $\mu\text{g/L}$)。其中己酸在所有样品中质量浓度最高，且在A组酒样中的质量浓度比B组高10倍。己酸和乙酸乙酯的质量浓度在两类清酒中相似，这与Tamura等^[15]的结果一致。A组中醛类物质的质量浓度(66.97~333.69 $\mu\text{g/L}$)普遍高于B组(41.35~288.13 $\mu\text{g/L}$)，其中苯甲醛、糠醛、壬醛、乙醛在所有样品中均能检出。在两类清酒中共检出4种其他类物质，分别为2-壬酮、乙基苯、月桂烯和仲辛酮，

表 5 大吟酿挥发性化合物质量浓度

Table 5 Mass concentration of volatile compounds in Daiginjo sake

化合物名称	RI	A1 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A2 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A3 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A4 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A5 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)
3-羟基丁酸乙酯	1 508.33	—	—	2.99±0.12 ^a	—	—
4-羟基丁酸内酯	1 634.67	—	—	—	7.73±0.40 ^a	—
苯乙酸乙酯	1 783.81	—	—	—	13.91±0.85 ^a	5.75±0.15 ^b
丙酸乙酯	944.76	4.50±0.13 ^c	17.14±0.86 ^a	—	—	9.12±0.25 ^b
丙酸异戊酯	1 181.61	—	8.23±0.33 ^a	—	—	—
丁二酸单乙酯	2 379.73	7.88±0.29 ^a	3.09±0.14 ^d	2.08±0.09 ^e	1.64±0.09 ^f	5.05±0.29 ^b
丁二酸二乙酯	1 672.49	13.26±0.54 ^e	9.45±0.53 ^e	5.33±0.27 ^f	22.94±2.12 ^d	32.39±2.20 ^c
丁酸乙酯	1 027.33	86.02±4.50 ^a	69.31±3.20 ^c	81.96±3.74 ^{ab}	76.15±6.01 ^b	51.48±1.83 ^d
庚酸乙酯	1 326.74	5.12±0.16 ^c	11.32±0.55 ^a	3.92±0.12 ^d	2.26±0.18 ^e	8.84±0.58 ^b
癸酸乙酯	1 634.10	5.40±0.23 ^d	6.07±0.30 ^c	6.96±0.29 ^b	5.23±0.27 ^d	7.49±0.19 ^a
己酸丙酯	1 311.86	3.22±0.16 ^b	—	—	1.89±0.12 ^c	5.56±0.14 ^a
己酸乙酯	1 228.37	11 186.56±26.00 ^a	7 410.15±145.23 ^c	3 354.54±272.72 ^c	4 111.00±337.64 ^d	8 659.68±683.25 ^b
己酸异丁酯	1 345.35	1.36±0.07 ^a	—	—	—	0.85±0.05 ^b
己酸异戊酯	1 452.61	1.27±0.06 ^a	—	—	0.66±0.04 ^c	—
乳酸乙酯	1 334.88	11.10±0.46 ^{de}	5.45±0.27 ^f	—	17.96±0.97 ^b	15.01±0.85 ^c
乳酸异丁酯	1 451.18	—	—	—	—	—
辛酸 3-甲基丁酯	1 452.13	—	1.47±0.07 ^b	—	—	2.40±0.08 ^a
辛酸乙酯	1 428.20	729.23±36.46 ^c	1 240.14±52.34 ^a	561.78±14.38 ^d	239.58±17.28 ^c	818.33±73.00 ^b
乙酸苯乙酯	1 814.00	558.16±26.78 ^a	384.59±18.34 ^c	475.88±14.90 ^b	494.40±50.58 ^b	265.12±17.90 ^d
乙酸丁酯	1 062.06	—	—	—	—	—
乙酸己酯	1 266.43	3.38±0.17 ^a	—	—	—	—
乙酸乙酯	870.49	500.95±25.12 ^b	352.33±16.34 ^c	779.31±47.77 ^a	550.09±46.59 ^b	215.49±9.89 ^c
乙酸异丁酯	1 005.79	16.13±0.81 ^{bc}	10.25±0.51 ^e	16.37±0.68 ^{bc}	16.62±0.57 ^b	6.37±0.16 ^f
乙酸异戊酯	1 114.25	983.36±34.24 ^a	668.19±66.23 ^d	923.52±19.67 ^{ab}	876.47±79.62 ^b	778.75±28.31 ^{ef}
异丁酸乙酯	952.38	—	0.70±0.04 ^a	—	—	—
异戊酸丁酯	1 258.16	—	0.70±0.04 ^a	—	—	—
异戊酸乙酯	1 056.27	—	—	—	—	—
硬脂酸甲酯	2 413.89	—	—	—	—	2.27±0.10 ^a
硬脂酸乙酯	2 035.40	—	—	—	—	1.75±0.12 ^a
棕榈酸乙酯	2 240.94	5.01±0.15 ^e	4.28±0.21 ^{ef}	4.55±0.19 ^e	6.45±0.40 ^d	12.37±0.31 ^b
鲸蜡醇	2 151.30	5.65±0.18 ^a	1.40±0.07 ^c	—	5.80±0.36 ^a	—
正辛醇	1 545.34	10.51±0.63 ^a	6.98±0.35 ^b	4.63±0.19 ^{cd}	9.22±0.58 ^a	4.25±0.17 ^d
2-庚醇	1 308.14	0.72±0.04 ^b	0.51±0.03 ^c	—	0.94±0.01 ^a	0.40±0.14 ^d
异辛醇	1 477.73	1.98±0.10 ^c	1.36±0.07 ^c	1.16±0.05 ^c	2.03±0.04 ^c	1.27±0.05 ^c
3-甲硫基丙醇	1 707.14	—	3.47±0.17 ^c	3.59±0.15 ^c	2.59±0.05 ^c	3.98±0.16 ^b
3-乙氧基丙醇	1 365.58	—	—	1.84±0.08 ^{bc}	2.23±0.09 ^b	1.53±0.07 ^{bc}
苯乙醇	1 905.83	1 994.61±92.88 ^{bc}	1 829.51±91.48 ^{cd}	2 135.51±152.26 ^{ab}	2 256.22±172.60 ^a	1 788.58±139.96 ^{cd}
丙醇	1 023.47	26.07±1.23 ^c	32.16±1.61 ^b	31.28±1.43 ^b	33.12±2.06 ^b	40.83±0.83 ^a
芳樟醇	1 550.00	—	—	—	—	—
庚醇	1 443.36	11.59±0.57 ^b	24.31±1.22 ^a	4.06±0.09 ^d	5.46±0.39 ^e	4.56±0.09 ^{cd}
甲醇	878.69	—	—	—	—	17.18±0.69 ^a
香茅醇	1 755.71	—	4.37±0.22 ^b	—	4.91±0.25 ^a	—
异丁醇	1 082.32	107.07±5.23 ^b	94.12±4.71 ^b	175.68±6.01 ^{ab}	138.39±14.16 ^a	96.22±5.80 ^b

续表

化合物名称	RI	A1 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A2 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A3 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A4 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	A5 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)
异戊醇	1 196.63	1 306.61 \pm 60.33 ^{ab}	1 069.60 \pm 53.48 ^c	1 392.54 \pm 171.28 ^a	1 385.90 \pm 72.25 ^a	1 098.71 \pm 112.66 ^c
正丁醇	1 134.46	—	4.05 \pm 0.20 ^e	—	—	8.22 \pm 0.70 ^b
正己醇	1 341.16	2.50 \pm 0.12 ^b	—	1.35 \pm 0.06 ^c	3.49 \pm 0.18 ^a	0.70 \pm 0.02 ^e
苯甲醛	1 527.21	54.12 \pm 2.54 ^{de}	42.10 \pm 2.11 ^{ef}	64.43 \pm 3.95 ^d	256.77 \pm 16.23 ^a	136.99 \pm 7.71 ^c
苯乙醛	1 649.00	—	1.03 \pm 0.05 ^e	0.44 \pm 0.01 ^f	2.70 \pm 0.17 ^b	1.82 \pm 0.14 ^c
癸醛	1 495.26	2.72 \pm 0.13 ^b	1.34 \pm 0.07 ^e	0.67 \pm 0.03 ^e	—	1.25 \pm 0.04 ^c
糠醛	1 464.93	37.96 \pm 1.90 ^c	4.82 \pm 0.24 ^e	—	45.57 \pm 2.56 ^b	56.89 \pm 5.13 ^a
壬醛	1 390.23	12.83 \pm 0.63 ^a	7.53 \pm 0.38 ^e	4.96 \pm 0.34 ^d	9.38 \pm 0.43 ^b	6.92 \pm 0.69 ^c
十二醛	1 706.19	7.55 \pm 0.33 ^a	—	—	1.69 \pm 0.04 ^c	—
乙醛	684.38	15.77 \pm 0.79 ^a	8.13 \pm 0.41 ^d	5.31 \pm 0.07 ^e	7.48 \pm 0.79 ^{de}	6.61 \pm 0.07 ^{ef}
异戊醛	910.00	1.87 \pm 0.09 ^d	2.02 \pm 0.10 ^d	2.00 \pm 0.08 ^d	10.10 \pm 0.63 ^b	2.00 \pm 0.02 ^d
癸酸	2 254.33	45.30 \pm 2.43 ^b	48.25 \pm 2.41 ^a	11.13 \pm 0.46 ^d	25.00 \pm 1.68 ^c	8.23 \pm 0.41 ^c
己酸	1 837.33	1 034.08 \pm 20.56 ^a	494.91 \pm 24.75 ^c	266.63 \pm 21.68 ^d	774.10 \pm 59.31 ^b	773.34 \pm 79.30 ^b
辛酸	2 044.25	260.80 \pm 45.17 ^d	523.68 \pm 26.18 ^a	249.07 \pm 50.14 ^d	495.41 \pm 44.89 ^b	317.86 \pm 30.91 ^c
乙酸	1 456.87	—	—	—	2.83 \pm 0.20 ^b	—
2-壬酮	1 385.12	8.95 \pm 0.55 ^a	8.17 \pm 0.41 ^b	2.01 \pm 0.08 ^c	4.25 \pm 0.18 ^c	3.24 \pm 0.03 ^d
乙基苯	1 120.98	—	—	—	—	—
月桂烯	1 154.15	—	—	—	—	—
仲辛酮	1 281.32	1.32 \pm 0.07 ^d	1.31 \pm 0.07 ^d	1.05 \pm 0.03 ^c	1.52 \pm 0.08 ^c	2.08 \pm 0.04 ^a

注：同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表6 纯米酒挥发性化合物质量浓度

Table 6 Mass concentration of volatile compounds in Junmai sake

化合物名称	RI	B1 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B2 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B3 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B4 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B5 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)
3-羟基丁酸乙酯	1 508.33	—	—	1.50 \pm 0.01 ^b	—	—
4-羟基丁酸内酯	1 634.67	—	3.01 \pm 0.03 ^c	2.99 \pm 0.02 ^c	—	5.17 \pm 0.26 ^b
苯乙酸乙酯	1 783.81	—	—	—	5.93 \pm 0.04 ^b	3.91 \pm 0.20 ^c
丙酸乙酯	944.76	2.91 \pm 0.01 ^d	2.88 \pm 0.06 ^d	—	—	1.88 \pm 0.04 ^e
丙酸异戊酯	1 181.61	—	—	—	—	—
丁二酸单乙酯	2 379.73	2.82 \pm 0.01 ^d	—	2.35 \pm 0.01 ^e	—	3.49 \pm 0.11 ^c
丁二酸二乙酯	1 672.49	9.27 \pm 0.06 ^e	2.86 \pm 0.01 ^f	14.44 \pm 0.08 ^c	298.55 \pm 2.12 ^a	91.92 \pm 8.28 ^b
丁酸乙酯	1 027.33	21.48 \pm 0.22 ^f	45.67 \pm 0.50 ^d	39.58 \pm 0.22 ^e	12.74 \pm 0.09 ^g	4.46 \pm 2.24 ^h
庚酸乙酯	1 326.74	1.28 \pm 0.13 ^f	—	—	—	0.53 \pm 0.11 ^g
癸酸乙酯	1 634.10	4.23 \pm 0.14 ^e	—	—	1.58 \pm 0.14 ^f	—
己酸丙酯	1 311.86	—	—	—	—	—
己酸乙酯	1 228.37	813.43 \pm 43.96 ^f	160.29 \pm 15.50 ^g	68.43 \pm 1.38 ^g	46.09 \pm 4.11 ^g	20.86 \pm 1.68 ^g
己酸异丁酯	1 345.35	0.76 \pm 0.02 ^c	—	—	—	—
己酸异戊酯	1 452.61	0.72 \pm 0.07 ^b	—	—	—	—
乳酸乙酯	1 334.88	11.34 \pm 0.20 ^d	—	9.31 \pm 0.04 ^e	13.82 \pm 0.63 ^c	133.54 \pm 2.69 ^a
乳酸异丁酯	1 451.18	—	—	—	—	2.08 \pm 0.10 ^a
辛酸 3-甲基丁酯	1 452.13	—	—	—	—	—
辛酸乙酯	1 428.20	73.33 \pm 7.35 ^f	6.60 \pm 0.13 ^g	5.53 \pm 0.03 ^g	35.05 \pm 0.82 ^f	1.65 \pm 0.08 ^g
乙酸苯乙酯	1 814.00	165.12 \pm 1.03 ^d	6.45 \pm 0.24 ^f	5.44 \pm 0.02 ^f	68.72 \pm 7.35 ^e	9.69 \pm 1.06 ^f
乙酸丁酯	1 062.06	—	1.97 \pm 0.01 ^a	—	—	—
乙酸己酯	1 266.43	0.76 \pm 0.02 ^b	—	—	—	—

续表

化合物名称	RI	B1 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B2 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B3 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B4 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)	B5 质量浓度/ ($\mu\text{g/L}$)
乙酸乙酯	870.49	317.46±6.47 ^{cd}	329.86±16.82 ^{cd}	294.34±29.63 ^d	161.40±3.34 ^f	128.30±13.13 ^f
乙酸异丁酯	1 005.79	20.77±0.19 ^a	14.92±0.36 ^d	15.59±0.05 ^{cd}	3.81±0.08 ^g	3.26±0.30 ^g
乙酸异戊酯	1 114.25	777.72±23.36 ^c	392.05±19.25 ^e	299.11±1.77 ^f	154.94±16.74 ^g	68.24±5.74 ^g
异丁酸乙酯	952.38	—	—	—	—	—
异戊酸丁酯	1 258.16	—	—	—	—	—
异戊酸乙酯	1 056.27	0.73±0.00 ^b	—	—	—	3.05±0.33 ^a
硬脂酸甲酯	2 413.89	—	—	—	—	—
硬脂酸乙酯	2 035.40	1.26±0.01 ^b	0.71±0.00 ^c	0.65±0.07 ^c	—	—
棕榈酸乙酯	2 240.94	9.14±0.27 ^c	3.54±0.01 ^f	3.29±0.02 ^f	18.31±1.80 ^a	1.90±0.19 ^g
鲸蜡醇	2 151.30	—	—	2.04±0.00 ^b	—	—
正辛醇	1 545.34	—	—	—	3.15±0.01 ^d	6.57±3.34 ^{bc}
2-庚醇	1 308.14	—	—	—	—	—
异辛醇	1 477.73	1.34±0.02 ^c	1.11±0.01 ^c	1.11±0.01 ^c	17.86±1.62 ^a	8.96±0.54 ^b
3-甲硫基丙醇	1 707.14	4.17±0.04 ^{ab}	3.01±0.18 ^d	—	2.24±0.02 ^f	4.48±0.41 ^a
3-乙氧基丙醇	1 365.58	1.22±0.06 ^c	5.31±0.16 ^a	—	—	2.13±1.08 ^b
苯乙醇	1 905.83	1 751.03±29.84 ^d	605.06±30.43 ^e	559.25±28.59 ^e	1 630.13±179.43 ^d	541.11±57.15 ^e
丙醇	1 023.47	18.99±0.07 ^e	28.08±0.13 ^c	22.95±0.11 ^d	7.60±0.78 ^g	15.12±1.86 ^f
芳樟醇	1 550.00	—	—	—	12.23±1.27 ^a	—
庚醇	1 443.36	0.61±0.00 ^{ef}	0.23±0.00 ^{ef}	0.54±0.00 ^{ef}	—	1.12±0.12 ^c
甲醇	878.69	—	—	—	—	8.14±0.55 ^b
香茅醇	1 755.71	—	—	—	3.97±0.28 ^c	—
异丁醇	1 082.32	177.80±1.05 ^{ab}	98.29±0.11 ^b	105.19±0.62 ^b	182.41±16.54 ^{ab}	226.63±136.26 ^a
异戊醇	1 196.63	1 316.73±7.48 ^{ab}	1 015.52±111.37 ^c	814.12±7.25 ^d	1 187.66±107.57 ^{bc}	1 189.90±60.96 ^{bc}
正丁醇	1 134.46	—	20.93±0.22 ^a	3.13±0.01 ^d	—	4.30±0.39 ^c
正己醇	1 341.16	1.08±0.00 ^d	0.65±0.00 ^c	2.32±0.01 ^b	—	3.33±0.33 ^a
苯甲醛	1 527.21	45.20±0.92 ^{ef}	19.66±0.06 ^g	15.56±1.11 ^g	229.75±15.78 ^b	29.52±1.48 ^{fd}
苯乙醛	1 649.00	1.39±0.01 ^d	—	1.09±0.01 ^c	5.74±0.34 ^a	—
癸醛	1 495.26	1.22±0.01 ^c	0.58±0.00 ^c	0.92±0.01 ^d	7.31±0.25 ^a	0.94±0.10 ^d
糠醛	1 464.93	18.37±1.36 ^c	3.68±0.15 ^{gh}	26.95±0.16 ^d	14.67±0.03 ^{ef}	14.15±1.46 ^f
壬醛	1 390.23	4.58±0.01 ^d	4.92±0.12 ^d	4.21±0.02 ^d	7.20±0.06 ^c	4.90±0.45 ^d
十二醛	1 706.19	—	—	1.55±0.02 ^c	2.10±0.19 ^b	—
乙醛	684.38	5.92±0.02 ^{fg}	10.96±0.84 ^c	5.27±0.04 ^g	—	12.22±0.62 ^b
异戊醛	910.00	1.06±0.00 ^d	1.55±0.02 ^d	4.73±0.02 ^c	21.36±1.69 ^a	1.56±0.11 ^d
癸酸	2 254.33	2.38±0.03 ^{fg}	1.26±0.00 ^{fg}	—	3.03±0.15 ^f	0.70±0.04 ^{fg}
己酸	1 837.33	108.93±1.38 ^e	22.37±0.13 ^f	15.62±0.08 ^f	2.70±0.05 ^f	4.99±0.38 ^f
辛酸	2 044.25	37.31±0.15 ^c	—	5.08±0.57 ^f	7.24±0.30 ^f	3.99±0.49 ^f
乙酸	1 456.87	—	—	—	1.19±0.01 ^c	5.20±0.54 ^a
2-壬酮	1 385.12	0.64±0.00 ^f	—	—	—	0.42±0.05 ^{fg}
乙基苯	1 120.98	—	—	—	—	0.74±0.09 ^a
月桂烯	1 154.15	—	—	—	1.76±0.02 ^a	—
仲辛酮	1 281.32	1.77±0.01 ^b	2.11±0.01 ^a	—	0.79±0.00 ^f	—

注：同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

且这 4 种物质在两类清酒中的质量浓度均较低，尤其是在 B3 样本中未检出这些物质。

2.3 纯米酒与大吟酿挥发性风味物质 OAV 分析

清酒中尽管存在多种挥发性化合物，但只有少

数对整体香气特性具有决定性影响。OAV ≥ 1 的物质对整体风味具有积极作用，被视为关键风味成分，且 OAV 越高，该成分的香气强度越大，从而对总体香气的贡献也越大^[16]。不同市售清酒中挥发性

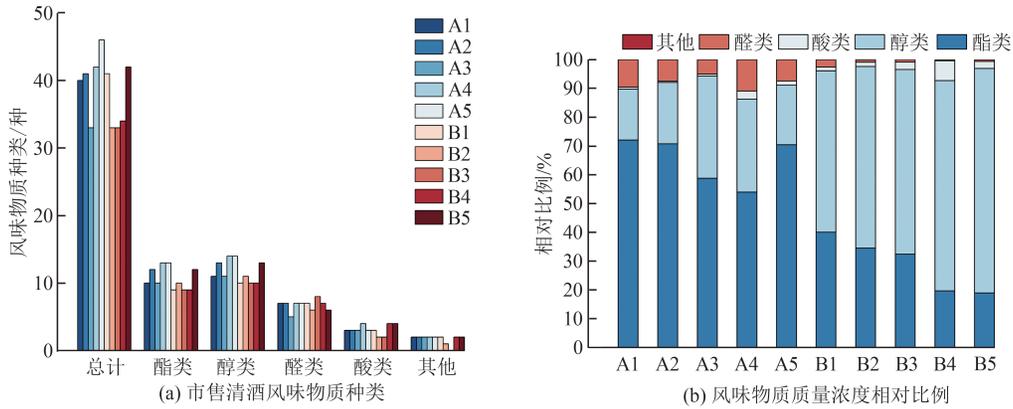


图1 市售清酒风味物质种类和风味物质质量浓度相对比例

Fig. 1 Types of flavor compounds and relative proportion of their mass concentration in commercial sake samples

化合物的OAV结果见表7。A组中OAV≥1的风味成分共有13种,包括8种酯类、2种醇类、1种酸类和2种醛类。而B组仅有9种关键风味成分,包括4种酯类、2种醇类、1种酸类和2种醛类。

表7 不同市售清酒中挥发性化合物的OAV

Table 7 OAV of volatile compounds in commercial sake samples

化合物名称	呈味特性	阈值/ (μg/L)	OAV									
			A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
丁酸乙酯	强烈菠萝香、苹果香	0.90	95.58	77.01	91.07	84.61	57.20	23.86	50.74	43.98	14.16	4.96
庚酸乙酯	菠萝香	1.90	2.69	5.96	2.06	1.19	4.65	<1	<1	<1	<1	<1
癸酸乙酯	椰子香	5.00	1.08	1.21	1.39	1.05	1.50	<1	<1	<1	<1	<1
己酸乙酯	香蕉、菠萝、花香	5.00	2 237.31	1 482.03	670.91	822.20	1 731.94	162.69	32.06	13.69	9.22	4.17
辛酸乙酯	果香、花香、白兰地酒香	19.30	37.78	64.26	29.11	12.41	42.40	3.80	<1	<1	1.82	0.09
乙酸苯乙酯	蜜香、玫瑰香	249.59	2.24	1.54	1.91	1.98	1.06	<1	<1	<1	<1	<1
乙酸乙酯	菠萝香	5.00	100.19	70.47	155.86	110.02	43.10	63.49	65.97	58.87	32.28	25.66
乙酸异戊酯	香蕉香气	2.00	491.68	334.10	461.76	438.24	389.38	388.86	196.03	149.56	77.47	34.12
异丁酸乙酯	果香	0.20	<1	<1	<1	<1	4.10	6.51	2.00	<1	<1	24.80
异戊酸乙酯	苹果香气、桑子香气	0.10	<1	<1	<1	<1	<1	7.29	<1	<1	<1	30.50
苯乙醇	玫瑰香气	564.23	3.54	3.24	3.78	4.00	3.17	3.10	1.07	0.99	2.89	0.96
芳樟醇	清新的花木香、柑橘香	0.22	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	55.59	<1
庚醇	果香、酒香	5.40	2.15	4.50	0.75	1.01	<1	<1	<1	<1	<1	<1
异戊醇	果香、酒香	300.00	4.36	3.57	4.64	4.62	3.66	4.39	3.39	2.71	3.96	3.97
壬醛	玫瑰、柑橘香	1.10	11.66	6.85	4.51	8.53	6.29	4.17	4.47	3.83	6.55	4.45
十二醛	果香	0.29	26.03	<1	<1	5.83	<1	<1	<1	5.34	7.24	<1
异戊醛	苹果香	1.10	1.70	1.84	1.82	9.18	1.82	0.96	1.41	4.30	19.42	1.42
己酸	奶酪香、甜香、果香	0.60	1 723.47	824.85	444.38	1 290.17	1 288.90	181.55	37.28	26.03	4.50	8.32
月桂烯	香甜味	1.20	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1.47	<1

酯类物质中,己酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸乙酯和丁酸乙酯是对清酒样品香气贡献较大的共有成分。己酸乙酯能够赋予清酒菠萝和香蕉香气,以及浓郁的酒香,是吟酿香的主要成分之一。己酸乙酯在A组的OAV(670.91~2 237.31)明显高于B组(4.17~162.69),且其香气阈值较低,因此对A

组整体香气的形成有显著贡献。吟酿香的另一重要成分是乙酸异戊酯,具有浓郁的果香;但Mimura等^[6]认为乙酸异戊酯在所有样品间的差异较小,对吟酿香产生的贡献较小。在本研究中,A组酒样中乙酸异戊酯的OAV(334.10~491.68)普遍高于B组酒样(34.12~388.86),且A组酒样的吟酿

香更突出,因此乙酸异戊酯对吟酿香有较大贡献。不同酒样发酵所用的原料和菌种不同,导致风味物质存在差异,这可能是造成与 Mimura 结果不一致的原因之一。乙酸乙酯与丁酸乙酯具有强烈的果香,但在浓度较高时会有刺激性气味,它们的低阈值使其在所有酒样中表现出较强的呈香能力。辛酸乙酯、庚酸乙酯、癸酸乙酯和乙酸苯乙酯仅在 A 组样品中显示出较强的香气贡献能力,因此推测这些物质可能对区分大吟酿与纯米酒具有一定的积极作用。综上所述,A 组与 B 组酒样中酯类的 OAV 存在明显差异,酯类在 A 组中的香气更强,对总体香气的贡献更大。其中呈现吟酿香的主要成分由己酸乙酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯等具有花果香的酯类^[17]组成,使 A 组酒样表现出更明显的吟酿香,与感官评价结果一致。因此推测酯类物质是形成两组酒样香气品质差异的主要因素。

醇类和酸类是酯类的前体物质^[18],这两类物质的高阈值导致它们的整体 OAV 较低。在醇类中,仅苯乙醇与异戊醇在所有样品中的 OAV>1,且两者的差异变化不明显。芳樟醇具有带甜的花木香气,仅在 B4 样品中的 OAV>1,是该样品中一种重要的香气物质。酸类中仅己酸在所有样品中的 OAV>1,具有奶酪香,并且其在 A 组中的 OAV (444.38~1 720.47)明显高于 B 组(4.50~181.55),表明己酸对 A 组样品的整体香气贡献更大。此外,己酸对酒体的回味也有一定的贡献,这与感官评价中 A 组酒样回味更悠长的结果一致。

此外,醛类物质也是清酒的重要香气物质,大多呈现出酒香与草木香。壬醛和异戊醛在两组清

酒中的 OAV>1,但它们的 OAV 差异较小,表明这两种物质不是造成两组酒样香气差异的主要因素。

2.4 纯米酒与大吟酿挥发性风味物质的 OPLS-DA 及 VIP 分析

为了更直观地比较大吟酿与纯米酒挥发性成分的差异,使用 SIMCA 软件对上述清酒样品中 OAV>1 的风味物质进行 OPLS-DA 分析,见图 2(a)。OPLS-DA 模型可以实现 A 组与 B 组样品的分离,且拟合模型预测成分的累计统计量 $R^2_x=0.771$,模型解释率参数 $R^2_y=0.997$,预测能力参数 $Q^2=0.898$,均超过 0.5,表示 OPLS-DA 模型对两组清酒风味分析的预测能力较好。A1~A4 样品分布较为集中,而 A5 样品由于其乙酸异戊酯与乙酸苯乙酯的质量浓度明显低于 A 组其他产品,因此与其他 4 个酒样有所区别。B 组样品由于检测到的挥发性化合物质量浓度相近,所以分布较集中。

关键变量 VIP 是 OPLS-DA 模型的权重值,可以反映风味物质对模型分类的贡献程度,VIP 值越大,贡献率越大,通常将 VIP>1 作为筛选差异风味物质的标准。市售清酒中挥发性风味物质的 VIP 值见图 2(b)。其中 VIP>1 的物质共有 9 种,分别是己酸、己酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸苯乙酯、丁酸乙酯、异戊醇、辛酸乙酯、庚酸乙酯和庚醇,由于这些物质是基于 OAV>1 及 VIP>1 筛选获得的,因此它们既是大吟酿与纯米酒的差异物质,又对清酒风味具有较大贡献。结合表 5 和表 6,这 9 种物质在 A 组中的质量浓度普遍高于 B 组,且辛酸乙酯、庚酸乙酯和乙酸苯乙酯是大吟酿独有的关键香气成分。

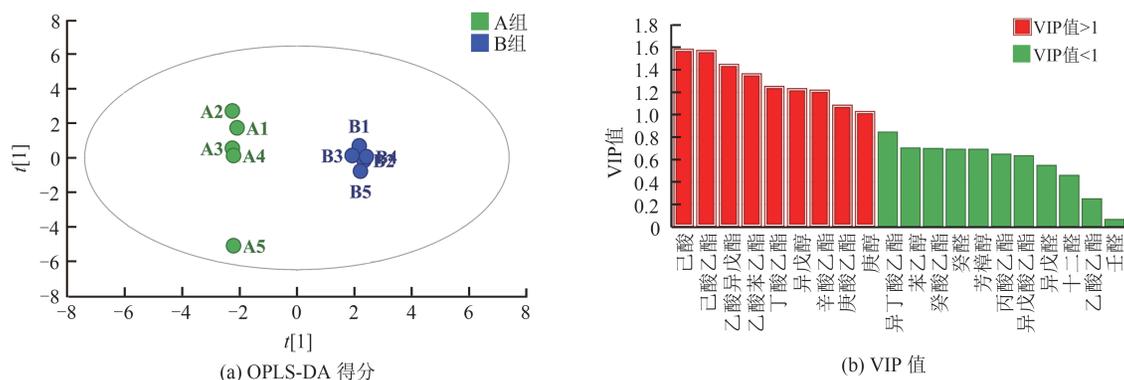


图 2 市售清酒中挥发性风味化合物的 OPLS-DA 得分和 VIP 值

Fig. 2 OPLS-DA score and VIP value of volatile flavor compounds in commercial sake samples

3 结论

在对大吟酿与纯米酒进行理化指标、感官评价和香气成分的分析中发现,大吟酿的香气明显优于纯米酒,且具有突出的吟酿香。两类清酒中共检测到62种风味物质,包括30种酯类、16种醇类、8种醛类、4种酸类及4种其他类化合物。在大吟酿中,酯类物质的质量浓度占比最高,而在纯米酒中醇类物质的质量浓度占比最高,均超过了50%。通过OPLS-DA和OAV分析,筛选得到9种可以区分这两类清酒的标志性差异风味化合物,这些物质包括己酸、己酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸苯乙酯、丁酸乙酯、异戊醇、辛酸乙酯、庚酸乙酯和庚醇。这些物质在大吟酿中的质量浓度普遍高于纯米酒,其中辛酸乙酯、庚酸乙酯和乙酸苯乙酯是大吟酿特有的关键香气成分。风味化合物与清酒香气品质显著相关,该研究分析得到的差异风味物质可为大吟酿与纯米酒风味解析及国内清酒生产和香气品质提升提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] YAZAWA H, TOKUOKA M, KOZATO H, et al. Investigation of relationship between sake-making parameters and sake metabolites using a newly developed sake metabolome analysis method[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 128(2):183-190.
- [2] OHYA Y, KASHIMA M. History, lineage and phenotypic differentiation of sake yeast[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2019, 83(8):1442-1448.
- [3] FURUKAWA S. Sake: quality characteristics, flavour chemistry and sensory analysis[M]. England: Woodhead Publishing, 2012.
- [4] TUFARIELLO M, PATI S, PALOMBI L, et al. Use of multivariate statistics in the processing of data on wine volatile compounds obtained by HS-SPME-GC-MS[J]. Foods, 2022, 11(7):910.
- [5] LANCIONI C, CASTELLS C, CANDAL R, et al. Headspace solid-phase microextraction: fundamentals and recent advances[J]. Advances in Sample Preparation, 2022, 3:100035.
- [6] MIMURA N, ISOGAI A, IWASHITA K, et al. Gas chromatography/mass spectrometry based component profiling and quality prediction for Japanese sake[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 118(4):406-414.
- [7] IWANO K, ITO T, NAKAZAWA N. Correlation analysis between a sensory evaluation and the chemical components of *Ginjo-shu* [J]. Journal of the Brewing Society of Japan, 2005, 100(9):639-649.
- [8] UTSUNOMIYA H. Flavor terminology and reference standards for sensory analysis of sake[J]. Journal of the Brewing Society of Japan, 2006, 101(10):730-739.
- [9] GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
- [10] ZHANG K Z, WU W C, YAN Q. Research advances on sake rice, koji, and sake yeast: a review [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(7):2995-3003.
- [11] SHIMOFUJI S, MATSUI M, MURAMOTO Y, et al. Machine learning in analyses of the relationship between Japanese sake physicochemical features and comprehensive evaluations[J]. Japan Journal of Food Engineering, 2020, 21(1):37-50.
- [12] KANG H R, HWANG H J, LEE J E, et al. Quantitative analysis of volatile flavor components in Korean alcoholic beverage and Japanese sake using SPME-GC/MS [J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(4):979-985.
- [13] OKUDA M. Rice used for Japanese sake making [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2019, 83(8):1428-1441.
- [14] ARITE T, YAMADA Y, MIWA S, et al. Investigation of a new small-scale brewing process for Daiginjo-syu [J]. Journal of the Brewing Society of Japan, 2012, 107(8):611-619.
- [15] TAMURA H, OKADA H, KUME K, et al. Isolation of a spontaneous cerulenin-resistant sake yeast with both high ethyl caproate-producing ability and normal checkpoint integrity[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2015, 79(7):1191-1199.
- [16] TIAN P, ZHAN P, TIAN H L, et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa L. var. aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariate analysis[J]. Food Chemistry, 2021, 345:128748.
- [17] TAKAHASHI T, OHARA Y, SUENO K. Breeding of a sake yeast mutant with enhanced ethyl caproate productivity in sake brewing using rice milled at a high polishing ratio[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2017, 123(6):707-713.
- [18] XU Y Q, ZHAO J R, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented Baijiu: the great contribution of ester compounds[J]. Food Chemistry, 2022, 369:130920.

(责任编辑:刘冬梅)