孙细珍, 熊亚青, 倪兴婷, 等. 毛铺草本白酒关键香气成分及其相互作用分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 306−318. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030280

SUN Xizhen, XIONG Yaqing, NI Xingting, et al. Key Aroma Compounds and Their Interactions in Maopu Herbal Baijiu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 306−318. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030280

·营养与保健·

毛铺草本白酒关键香气成分及其相互作用分析

孙细珍[1,2,*], 熊亚青[1], 倪兴婷[1], 吴　鑫[1], 李　强[1,2], 柯　锋[1], 杨　强[1,2]

（1.劲牌有限公司, 湖北黄石 435100;
2.中药保健食品质量与安全湖北省重点实验室, 湖北黄石 435100）

摘　要: 本研究旨在明确毛铺草本白酒的香气成分差异、特征香气成分及其相互作用机制。采用香气萃取物稀释分析（AEDA）测定三种草本白酒（草本 8 年、草本 12 年、草本 15 年）的挥发性成分及香气活性成分（FD≥2），运用液液萃取、顶空固相微萃取法结合气相色谱-质谱（GC-MS）对香气活性成分进行定量。基于 FD 值、香气活性值（OAV）与香气重组实验筛选并验证重要及特征香气成分，通过 Feller 加和模型和 S 曲线法探究特征香气成分间的相互作用。结果表明，从草本白酒中共鉴定出 84 种香气活性成分，主要包括酯类、酸类、醛类、萜烯类等，三种产品间挥发性物质含量存在显著差异（P<0.05）；三种草本白酒（草本 8 年、草本 12 年、草本 15 年）中 OAV≥1 的重要香气物质分别为 51、53、54 种，己酸乙酯、丁酸乙酯、3-甲基丁醛、丁酸、己酸、3-甲基丁酸乙酯、2-甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、二甲基三硫、1,1-二乙氧基乙烷等 10 种物质被鉴定为草本白酒的特征香气成分；不同成分间存在掩盖、加成和协同等相互作用，如己酸乙酯与二甲基三硫间为掩盖作用，己酸乙酯与 3-甲基丁酸乙酯间为加成作用，3-甲基丁酸乙酯与己酸间为协同作用。本研究结果可为草本白酒产品设计、风味重构以及品质提升提供理论依据与数据参考。

关键词: 草本白酒, 香气活性值, 香气重组, 特征香气成分, Feller 加和模型, S 曲线法

中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0306−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030280

本文网刊:

Key Aroma Compounds and Their Interactions in Maopu Herbal Baijiu

SUN Xizhen[1,2,*], XIONG Yaqing[1], NI Xingting[1], WU Xin[1], LI Qiang[1,2], KE Feng[1], YANG Qiang[1,2]

（1.Jing Brand Co., Ltd., Huangshi 435100, China;
2.Hubei Key Laboratory of Quality and Safety of Traditional Chinese Medicine & Health Food, Huangshi 435100, China）

Abstract: Aroma extract dilution analysis (AEDA) was employed to detect the aroma-active compounds of Maopu herbal Baijiu. The aroma-active compounds with FD≥2 were quantified through liquid-liquid extraction and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The characteristic compounds were investigated via their FD values, aroma activity values (OAVs), and aroma recombination experiment. The interactions among these compounds were then investigated using the Feller additive model and S-curve. The result showed that a total of 84 aroma-active compounds were identified, mainly esters, acids, aldehydes, and terpenes. Significant differences were distinguished in the content of aroma compounds of the three herbal Baijiu (P<0.05). Furthermore, a total of 51, 53, and 54 compounds with OAV≥1 were confirmed as important aroma compounds in the three herbal Baijiu, respectively. The result revealed that ethyl hexanoate and ethyl butanoate played critical roles in the overall aroma characteristics. In addition, 3-methylbutanal, butanoic acid, hexanoic acid, ethyl 3-methylbutanoate, ethyl 2-methylpropanoate, ethyl 2-methyl-

收稿日期: 2025−03−20

基金项目: 湖北省自然科学基金（2024AFD022）。

作者简介/通信作者*: 孙细珍（1974−）, 女, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 食品安全与食品风味化学, E-mail: 347739489@qq.com。

butanoate, dimethyl trisulphide, and 1,1-diethoxyethane also significantly contributed to the aroma characteristics. Further experimental results showed interactions between different compounds, including masking, addition, and synergism. For example, a masking effect occurs between ethyl hexanoate and dimethyl trisulfide, an additive effect occurs between ethyl hexanoate and ethyl 3-methylbutyrate, and a synergistic effect occurs between ethyl 3-methylbutyrate and hexanoic acid. The findings of this study can offer theoretical foundations and data-driven references for product design, flavor reconstruction, and quality enhancement in the herbal Baijiu industry.

Key words: herbal Baijiu; odor activity value; aroma recombination experiment; characteristic compounds; Feller additive model; S-curve

白酒是中国特有的一种蒸馏酒，也是世界六大蒸馏酒之一[1]。按照风格特征的差异，中国白酒由最初的三大香型发展为 12 种香型，主要包括清香、浓香、酱香、米香、兼香、药香、凤型、特香、芝麻香、老白干、馥郁香和豉香型等[2]。近年来，随着酿造技术的飞速发展，白酒的酿造过程更加精细化和智能化。同时，酿酒原料的选择也呈现出多样化的趋势，从传统的粮食原料到水果、草本植物等新型原料的引入，为白酒的风味带来了新的变化。这些变化使得不同香型白酒之间的风味界限逐渐模糊，复合香型白酒作为融合多种传统香型的创新产品，以其独特的风味和丰富的层次感赢得了消费者的喜爱。随着消费水平与需求的不断提升与变化，消费者在享受饮酒乐趣的同时，更加追求产品的品质与健康。草本白酒是以白酒为酒基，利用可食用或按照传统既是食品又是中药材（或符合相关规定）的植物及其制品，经再加工制成，不直接或间接添加食品添加剂，不改变或基本保持白酒风格[3]。毛铺草本白酒选用贵州茅台镇酱香、四川宜宾浓香、湖北黄石清香三种地标原酒为基酒，按照科学的比例勾调形成复合香型白酒，既有酱香的醇厚丰满、浓香的浓郁甘冽，又有清香的纯正柔和。同时，毛铺草本白酒还添加了苦荞麦、葛根、枸杞子等草本植物提取物，可增强其烘焙香、青草香和甜香，还赋予减小肝损伤、辅助降血脂的健康功能[4−5]，深受消费者喜爱，有望成为未来白酒行业的重要发展趋势。

香气是中国白酒的重要属性，决定着白酒的风味品质，直接影响消费者对产品的接受度与认可度[6]。中国白酒中 98% 的成分为乙醇和水，余下约 2% 的微量成分对白酒的质量起着至关重要的作用[7]。相较于世界上其他蒸馏酒，白酒中微量组分种类繁多，包括酯、有机酸、醇、醛、酮及硫化物等，且不同组分的极性、溶解度以及含量差异跨度大。白酒中不同微量组分的含量及其比例，以及组分之间的相互作用等因素影响着白酒的风味特征及其品质[8]。近年来，气相色谱-嗅闻（gas chromatography-olfactometry, GC-O）、香气活度值（odor activity value, OAV）、感官组学等方法广泛应用于白酒香气成分研究，为白酒的品质提升及风味调控提供了良好的数据指导[9−10]。Wang 等[11] 确定了清香型白酒中 14 种香气化合物在 52% 乙醇水基质中的阈值，并利用费勒加成模型和 OAV 方法对清香型白酒中主要香气化合物之间的相互作用进行了全面分析。易封萍等[12] 采用 GC-O 和 OAV 方法，明确了酱香型习酒主要特征性香气成分，并利用 Feller 加和模型和 S 曲线法研究了习酒中 11 种关键香气物质间的感官交互作用。牛云蔚等[13] 采用多种技术手段将 45 种香气成分鉴定为茅台酒的关键香气物质，并研究了三种关键酯类香气成分间的感知相互作用。与传统白酒一样，香气同样是草本白酒重要的风味品质，目前针对草本白酒特征香气成分的研究已取得阶段性进展[14−15]，但这些研究并未考虑香气成分之间的相互作用，导致特征香气成分鉴定结果不完全准确，难以实现对特定香气成分及产品香气风格的靶向调控，制约了草本白酒品质提升与风味设计的科学化发展。

本研究以毛铺草本白酒系列产品为研究对象，基于感官评价定量描述，采用液液萃取、顶空固相微萃取法联合气相色谱-质谱（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）、GC-O 技术对草本白酒中的香气成分进行定性和定量分析，通过芳香萃取物稀释分析（aroma extract dilution analysis, AEDA）、OAV 鉴定三种草本白酒的重要香气成分，应用香气重组实验对重要香气成分进行验证，并采用热图分析三种草本白酒间香气物质的差异性，最后利用 Feller 加和模型和 S 曲线法对草本白酒中关键香气成分之间的相互作用进行研究。通过全面解析草本白酒的香气轮廓与香气成分差异，以期为提高复合香型草本白酒的香气质量及新型白酒的酿造开发提供数据参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

毛铺草本白酒系列酒（草本 8 年（Y1）、草本 12 年（Y2）、草本 15 年（Y3））　乙醇体积分数为 52%，劲牌有限公司（中国湖北），生产日期为 2022 年，500 mL/瓶，所有样品于 4 ℃ 环境中贮存；乙醛、乙酸乙酯、二甲基二硫、氧化芳樟醇、1,1-二乙氧基乙烷、糠醛、γ-丁内酯、3-甲基丁醛、4-甲基戊酸、丙酸乙酯、苯甲醛、2-甲基丙酸乙酯、γ-壬内酯、β-大马酮、2,3-丁二酮、仲丁醇、二氢-β-紫罗兰酮、芳樟醇、丁酸乙酯、正丙醇、2-甲基丁酸乙酯、1-辛烯-3-醇、3-甲基丁酸乙酯、己醛、异丁醇、乙酸异戊酯、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、戊酸乙酯、正丁

醇、4-甲基戊酸乙酯、异戊醇、丁酸丁酯、异戊酸、2-糠酸乙酯、β-苯乙醇　纯度均大于 98%, 上海安谱实验科技股份有限公司; 2-戊基呋喃、己酸乙酯、3-羟基-2-丁酮、庚酸乙酯、4-乙烯基愈创木酚、香草醛、乳酸乙酯、正己醇、二甲基三硫、2,3,5-三甲基吡嗪、苯丙酸乙酯、2,6-二乙基吡嗪、辛酸乙酯、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、乙酸、2,3-二甲基-5-乙基吡嗪、2,3,5,6-四甲基吡嗪、2-乙酰基呋喃、丙酸、异丁酸、5-甲基糠醛、己酸己酯、2-乙酰基-5-甲基呋喃、丁酸、癸酸乙酯、苯乙醛、戊酸、苯乙酸乙酯、己酸、β-紫罗兰酮、2-乙酰基吡咯、4-甲基苯酚、2-辛醇(IS1)、正己醛-d_{12}(IS2)、2-甲基丁酸-d_3(IS3)、辛酸乙酯-d_{15}(IS4)、C_7~C_{30} 正构烷烃标准品　纯度均大于 98%, 美国 Sigma-Aldrich 上海分公司; 二氯甲烷(使用前重蒸)、无水乙醇、氯化钠(NaCl)、无水硫酸钠(Na_2SO_4)　分析纯, 中国国药集团化学试剂有限公司。

8890-5977B 气质联用仪、DB-FFAP 毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm)、HP-5 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)　美国 Agilent 科技有限公司; ODP4 嗅闻仪、MPS 2 多功能样品前处理平台　德国 Gerstel 公司; 50/30 μm CAR/DVB/PDMS 固相微萃取纤维头　美国 Supelco 公司; DC12H 氮吹仪　上海安谱科技有限公司; Flex 2 纯水系统　上海威立雅水处理技术有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　液液萃取流程　参考文献 [16] 将试验酒样(50 mL)用超纯水稀释至体积分数为 10%, 加入 20 μL 内标液(2-辛醇、正己醛-d_{12}、2-甲基丁酸-d_3)充分混合均匀后, 用颗粒状 NaCl 使溶液达到饱和, 接着用二氯甲烷分三次萃取(40、30、30 mL), 收集并合并萃取液于三角瓶中, 向三角瓶中加入适量无水 Na_2SO_4, 摇匀后静置过夜。将萃取物用氮吹仪缓慢浓缩至 0.5~1.0 mL, 保存于−20 ℃ 冰箱中, 供进样分析。

1.2.2　HS-SPME 条件　参考文献 [17] 的方法, 将试验样品用超纯水稀释至体积分数为 10%, 取 8 mL 稀释液, 转移至 20 mL 顶空瓶中, 向顶空瓶中加入 20 μL 内标液(辛酸乙酯-d_{15}), 并加入 NaCl 约 3 g 使溶液饱和, 以增强挥发性化合物的萃取效率, 将 50/30 μm CAR/DVB/PDMS 固相微萃取纤维头插入顶空瓶上方, 将顶空瓶置于 50 ℃ 下振动萃取 45 min, 以确保充分吸附目标化合物。萃取结束后, 立即将纤维头插入气相色谱进样口, 在 250 ℃ 下脱附 5 min 进行 GC-MS 分析。每次使用前后, 将萃取头在 250 ℃ 下老化 15 min, 以去除残留物, 确保后续分析的准确性。

1.2.3　GC-MS 分析条件　GC 条件: 采用两种极性色谱柱(DB-FFAP 和 HP-5 色谱柱), 不分流模式; 载气为高纯氦气(99.999%), 恒流模式, 柱流速设定为 1.2 mL/min。柱温箱温度初始为 40 ℃, 保持 5 min 后以 3 ℃/min 升至 150 ℃, 保持 10 min, 然后以 5 ℃/min 升至 250 ℃, 最终保持 10 min。

MS 条件: 使用 EI 电子轰击离子源(能量为 70 eV); 离子源和四极杆温度分别为 230 和 150 ℃, 传输线温度为 280 ℃; 全扫描模式, 质量扫描范围为 m/z 30~500。

1.2.4　GC-O 分析过程　由 3 名经过训练的实验人员(1 男 2 女)开展嗅闻实验, 记录香气物质的保留时间和香气特征。嗅闻口和传输线温度分别为 200 ℃ 和 280 ℃, 加湿器空气流速为 50 mL/min。用二氯甲烷将液液萃取所获得的萃取物按照体积 1∶2^n(n = 0, 1, 2, 3……)进行逐级稀释后, 在 FFAP 极性柱进行 GC-O 分析[18]。香气物质被嗅闻到的最高稀释比例, 记为稀释因子(flavor dilution, FD)值。每位实验人员对每个样品连续嗅闻两次, 且两次间保持足够间歇以防嗅觉疲劳。

1.2.5　定性与定量分析　将 C_7~C_{30} 正构烷烃标准溶液与样品在相同条件下, 经 DB-FFAP 极性柱和 HP-5 非极性柱分析, 根据改进的 Kovats 法计算各化合物的保留指数(retention index, RI); 采用安捷伦 Masshunter 软件的解卷积功能对质谱数据进行处理后, 通过 NIST20.L 谱库对化合物进行匹配检索, 以双柱 RI 计算值与文献报道值差值不超过 20 为初步鉴定标准, 结合化合物的 MS 谱图、RI 及 GC-O 嗅闻结果与它们的标准品进行对照确认[19]。

以乙醇水溶液(52 %vol, pH4.2)为溶剂, 配制待测组分系列标准溶液, 按照与试验样品同样的方法处理后经 DB-FFAP 柱进行 GC-MS 分析。以目标物与内标物的浓度比为横坐标, 定量离子响应值比为纵坐标, 绘制各香气物质的标准曲线并进行定量。每个样品重复测定 3 次。

1.2.6　OAV 计算　通过 OAV 评估气味物对试验样品整体香气的贡献。OAV 定义为气味物的定量浓度与气味阈值的比值, 气味阈值通过查阅文献获得。在不考虑基质效应与风味物质相互影响的情况下, OAVs 大于 1 表示气味物对试验样品总体香气特征有贡献, OAVs 越大则该化合物的香气贡献越大[20]。

1.2.7　感官分析　感官评价小组由经过闻香训练且考核合格的 11 名感官评价员组成, 包括 6 名男性, 5 名女性, 其中国家级评酒委员 6 名, 省级评酒委员 5 人。感官评价在恒温实验室(20±1 ℃)进行, 小组成员对 70 种气味物的系列浓度标准溶液和草本白酒样品进行三个月的鼻前嗅闻实验, 要求能准确描述每种气味物的气味特征、香气强度以及草本白酒的整体香气特征。

参照文献 [21] 的方法并略作改进, 将 15 mL 实验样品倒入白酒专用品评杯中, 评价员对样品进行嗅闻并尽可能多地记录感官描述词, 根据描述词的出现频次进行排序, 由评价小组充分讨论后选取 9 个描述词用于评价草本白酒的感官属性, 包括果香(异戊

酸乙酯）、甜香（γ-壬内酯）、陈香（葫芦巴内酯）、花香（乙酸苯乙酯）、粮香（4-乙烯基愈创木酚）、酸香（乙酸）、醇香（乙醇）、青草香（1,1-二乙氧基乙烷）和烘焙香（2-乙基-3,5-二甲基吡嗪）。

评价小组在 9 个感官属性上对样品的香气强度从 0 至 5 进行打分，0 表示未闻到香气，5 表示香气最强；剔除离群值后计算所有评价员打分结果的平均值，绘制香气轮廓图。每次嗅闻不低于 90 s，不同轮次间隔 30 min，所有实验均重复 3 次。

1.2.8　香气重组试验　通过香气重组实验对 AEDA 和 OAV 法从 3 个草本白酒中筛选出来的关键香气成分进行确认[16]。以乙醇水溶液（52 %vol，pH4.2）为模拟基质，将 OAV≥1 的香气物质按其质量浓度建立对应的香气重组模型，对重组模型与原始酒样进行感官评价，分别在 9 个感官属性上打分。

1.2.9　关键香气物质间的协同作用　参照文献[22] 方法测定气味物在 52%v/v 乙醇水溶液中的嗅觉阈值。将实验过程中筛选出来的重要香气物质配制成不同浓度梯度的标准溶液，组织感官评价小组进行嗅辨训练。正式实验中，参照每种气味物在草本白酒中的定量结果配制最高浓度的标准溶液，然后按 2 倍稀释梯度进行逐级稀释。采用三点选配法测定气味阈值，共三个样品瓶，其中一个含待测物，另外两个对照样为 52%v/v 乙醇水溶液。

由小组成员对三个样品进行嗅辨，能正确嗅辨含待测物的样品，则继续测试下一个低浓度样品，直至无法正确辨别，实验重复三次。使用校正公式（1）对正确识别概率进行校正[23]。以待测物浓度的对数值为横坐标（x），校正概率（P）为纵坐标绘制曲线，采用 S 曲线（式（2））拟合数据点，x_0 为待测物的嗅觉检测阈值；D 为函数的陡坡。

$$P = (3A - 1)/2 \qquad 式（1）$$

式中：P 为校正后的正确识别概率；A 为实测值。

$$P = 1/\left[1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{D}\right)\right] \qquad 式（2）$$

式中：x_0 为待测物的嗅觉检测阈值；D 为函数的陡坡。

按照草本白酒中香气物质的定量浓度配制二元混合物（A+B），采用上述相同方法测定其阈值。气味物 A 和 B 的正确检测概率分别为 P（A）和 P（B），按加合公式（3）计算二元混合物（A+B）的正确检测概率；二元混合物的理论阈值采用 S 曲线拟合，计算实验阈值与理论阈值的比值 R。若 R≤0.5，表明混合物间存在协同作用；若 0.5<R<1，则为加成作用；若 R=1，表明无相互作用；若 R>1，则为掩盖作用[24]。

$$P(AB) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) \qquad 式（3）$$

1.3　数据处理

使用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析（ANOVA），以确定样本间的最小显著差异。P<0.05 被认为具有统计意义。使用 Origin 2021 软件进行线性和非线性回归图形绘制。所有试验均重复 3 次，气味物的定量结果以重复试验的均值±标准差表示。

2　结果与分析

2.1　AEDA 技术鉴定草本白酒中的香气物质

采用 AEDA 法从三种草本白酒中鉴别出 FD≥2 的气味物共 84 种，其中酯类 21 种、醇类 8 种、醛及缩醛类共 6 种，酮类为 3 种，酸类 8 种，吡嗪和呋喃分别为 7 种和 6 种，酚类 5 种，硫化物和萜烯类分别为 2 种和 13 种，其他类 5 种。根据表 1 数据，三种草本白酒 FD 居前的香气物质种类基本一致，但是在气味强度上存在一定的差异，如己酸乙酯在三种草本白酒中 FD 均居于首位，高达 2048、4096、4096；其次为丁酸乙酯，分别为 512、1024、1024。整体而言，Y2 与 Y3 中香气物质的气味强度无显著差异（P>0.05），但二者的气味强度均显著高于 Y1（P<0.05）。Y1 中共有 6 种高风味稀释倍数（FD≥256）香气物质，分别为己酸乙酯、丁酸乙酯、3-甲基丁醛、3-甲基丁酸乙酯、丁酸和己酸；Y3 中高 FD 香气物质在 Y1 的基础上另增 3 种，为二甲基三硫、2-甲基丙酸乙酯和 2-甲基丁酸乙酯，总数为 9 种；Y2 则在 Y3 基础上再增加一种高 FD 香气物质 1,1-二乙氧基乙烷，共计 10 种。

从表 1 可知，酯类是草本白酒中种类最多的香气物质，大多呈果香、花香、甜香等悦人的香气，是中国白酒中重要的风味物质。白酒中的酯类来源主要有三种途径：a. 在白酒的酿造过程中相关微生物代谢形成；b. 发酵过程中酵母和部分微生物活动产生；c. 在发酵的后期或者贮存过程中，游离的酸醇分子通过化学反应合成相应的酯类物质[25]。其中乙酯主要由酵母、丝状真菌等微生物代谢以及有机酸在发酵过程中经酯化反应而形成[26]。其中己酸乙酯、丁酸乙酯、异戊酸乙酯、乙酸乙酯、戊酸乙酯、辛酸乙酯、异丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、4-甲基戊酸乙酯和苯丙酸乙酯因具有较高的香气强度（FD≥32），对草本白酒的果香和甜香具有重要贡献。

酸类物质大多呈现酸味、奶酪香，对白酒的香气与口感具有非常重要的影响，主要由酿酒原料中的淀粉、蛋白质、脂肪在细菌、酵母菌和霉菌等微生物的作用下转化而成，此外部分醇类及醛类物质发生氧化也能生成酸类物质[27]。如表 1 所示，己酸和丁酸在草本白酒中均具有较高的香气强度（FD≥256），它们对形成草本白酒的风味轮廓具有重要贡献。己酸和丁酸在浓香型白酒“泥香”和“烤香”中起到关键作用[28]，适量有机酸能使酒体丰满、协调，有效地降低白酒的辛辣味和苦味，增加白酒的甜度[29]。

与其他白酒一样，醇类物质是草本白酒中重要的香气活性物质。通过 GC-O，从草本白酒中共鉴定出 8 种醇类物质，大多呈现青香、果香、酒香。这些醇类物质主要由酵母在发酵过程中通过氨基酸降解

表 1 草本白酒中香气化合物 AEDA 鉴定结果

Table 1 Aroma compounds in herbal Baijiu identified using AEDA

编号	香气成分	保留指数		香气特征	FD值		
		DB-FFAP	HP-5MS		Y1	Y2	Y3
1	乙醛	711	–	青香, 醚样气味	64	64	64
2	乙酸乙酯	892	–	菠萝香	64	128	128
3	1,1-二乙氧基乙烷	895	732	青草香, 木香, 威士忌味道	128	256	128
4	3-甲基丁醛	925	–	青草香, 麦芽香	256	512	512
5	丙酸乙酯	967	717	苹果香	4	4	4
6	2-甲基丙酸乙酯	973	759	菠萝香, 甜香	128	256	256
7	2,3-丁二酮	996	–	甜香, 奶油香, 黄油香	32	64	128
8	仲丁醇	1030	–	醇香	8	8	16
9	丁酸乙酯	1037	808	苹果香, 菠萝香	512	1024	1024
10	正丙醇	1047	–	酒香, 醇香	8	16	16
11	2-甲基丁酸乙酯	1049	853	新鲜苹果香, 菠萝蜜香	128	256	256
12	3-甲基丁酸乙酯	1065	870	苹果香, 甜香	256	512	512
13	二甲基二硫	1069	748	强烈的洋葱气息	8	16	32
14	己醛	1083	805	青香, 木香, 草香	32	64	64
15	异丁醇	1098	–	指甲油气味	4	4	4
16	乙酸异戊酯	1121	880	香蕉香, 梨香	4	8	8
17	戊酸乙酯	1132	910	草莓香, 菠萝蜜香	32	64	64
18	正丁醇	1145	–	香蕉味, 威士忌	16	32	32
19	月桂烯	1162	993	蜡香, 青香, 柑橘香	2	2	2
20	4-甲基戊酸乙酯	1188	968	水果香, 花香	64	128	128
21	D-柠檬烯	1193	1026	甜香, 柑橘香	2	2	2
22	异戊醇	1210	769	发酵香, 指甲油, 臭味	32	64	64
23	丁酸丁酯	1216	998	强烈、甜润的水果香气	16	32	32
24	2-戊基呋喃	1232	993	泥土香, 水果香	4	8	4
25	己酸乙酯	1244	1001	菠萝香, 香蕉香, 窖香	2048	4096	4096
26	对伞花烃	1267	1022	胡萝卜, 萜烯香气	2	2	2
27	3-羟基-2-丁酮	1286	908	愉悦的奶油香气	64	128	128
28	1-辛烯-3-酮	1302	980	清新泥土, 蘑菇香, 蔬菜香	2	2	2
29	庚酸乙酯	1338	1101	菠萝蜜香气	4	8	8
30	乳酸乙酯	1346	829	清甜、带酸味的水果香气	8	8	8
31	正己醇	1354	877	青香, 醇香, 醚香	8	4	8
32	二甲基三硫	1380	964	硫磺, 卷心菜味	128	256	512
33	2-乙基-6-甲基吡嗪	1387	996	杏仁味, 烘焙香, 甜香	32	32	32
34	2-乙基-5-甲基吡嗪	1393	999	焙烤香	8	8	8
35	2,3,5-三甲基吡嗪	1408	1001	坚果味, 烤谷物味	4	8	4
36	2,6-二乙基吡嗪	1434	1077	花香, 烘焙香	4	4	4
37	辛酸乙酯	1438	1203	奶油香, 菠萝香	64	128	128
38	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	1448	1081	坚果香, 咖啡香, 巧克力香	8	8	8
39	1-辛烯-3-醇	1448	982	蘑菇香, 青香	16	32	32
40	乙酸	1449	–	乳酪酸香	32	64	64
41	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	1462	1086	坚果香, 烤香	4	4	4
42	氧化芳樟醇	1469	1087	木香, 花香	4	8	8
43	糠醛	1470	841	面包香, 焦糖香	32	64	64
44	2,3,5,6-四甲基吡嗪	1477	1085	坚果香, 霉味	4	4	4
45	2-乙酰基呋喃	1512	918	坚果, 烤香, 焦糖味	4	4	4
46	右旋樟脑	1517	1140	类似薄荷的清凉香气	2	2	2
47	苯甲醛	1531	967	杏仁香, 坚果香	8	16	16
48	丙酸	1537	723	刺激、尖酸的气味	4	4	4
49	芳樟醇	1546	1101	柑橘香, 玫瑰香, 浆果香	4	4	4
50	*α*-柏木烯	1564	1407	花香, 草药香	2	2	2
51	异丁酸	1567	760	奶酪味, 酸味	32	32	32
52	5-甲基糠醛	1583	964	咖啡香, 甜香	4	4	4

续表 1

编号	香气成分	保留指数		香气特征	FD值		
		DB-FFAP	HP-5MS		Y1	Y2	Y3
53	己酸己酯	1612	1391	青香，蜡香，浆果香韵	4	8	4
54	γ-丁内酯	1619	915	奶油香，脂肪香	32	64	64
55	2-乙酰基-5-甲基呋喃	1623	1043	坚果，可可，烤面包	4	4	4
56	丁酸	1625	832	哈喇味，奶酪味	256	512	512
57	2-糠酸乙酯	1628	1059	烧焦的气味	4	4	4
58	癸酸乙酯	1640	1397	梨和白兰地似的香韵	4	4	4
59	苯乙醛	1653	1047	甜香，玫瑰香，巧克力香	64	64	128
60	异戊酸	1669	855	汗臭，酸臭，脂肪臭	16	32	32
61	丁二酸二乙酯	1679	1185	熟苹果味	2	2	2
62	γ-己内酯	1711	1058	甜而浓的奶油味	2	2	2
63	戊酸	1738	916	奶酪味，汗臭味	64	128	128
64	苯乙酸乙酯	1790	1249	玫瑰香，蜂蜜香	16	16	16
65	4-甲基戊酸	1804	969	汗臭，腐臭	32	64	64
66	乙酸苯乙酯	1820	1256	柑桔带有酵母香的味道	2	2	2
67	β-大马酮	1823	1383	甜的木香，花香	8	8	16
68	香叶基丙酮	1830	1435	花生香，坚果香	2	2	2
69	二氢-β-紫罗兰酮	1833	1437	木香，紫罗兰香	4	8	8
70	十二酸乙酯	1843	1596	朗姆酒香，甜香，花香	2	2	2
71	己酸	1846	1074	奶酪味，汗臭味	256	512	512
72	愈创木酚	1867	1088	辛香，药香，木香	2	2	2
73	苯丙酸乙酯	1890	1354	菠萝蜜香，蜂蜜香，干花香	32	32	64
74	β-苯乙醇	1917	1118	清甜的玫瑰样花香	8	16	16
75	β-紫罗兰酮	1943	1483	浆果香，紫罗兰香	4	4	4
76	4-甲基愈创木酚	1963	1191	辛香，药香，香荚兰香气	2	2	2
77	2-乙酰基吡咯	1980	1062	面包香，胡桃香	4	4	4
78	橙花叔醇	1999	1533	温和的苹果味道	2	2	2
79	4-乙基愈创木酚	2036	1278	辛香，类似丁香香气	2	2	2
80	γ-壬内酯	2038	1361	奶油香，椰子样香气	32	64	64
81	4-甲基苯酚	2088	1083	药香，烟熏香	8	8	8
82	柏木脑	2120	1596	温和的柏木香气	2	2	2
83	4-乙烯基愈创木酚	2205	1315	丁香味，甜香	4	4	4
84	香草醛	2582	1396	甜香，奶油香	32	64	32

注：–表示无数据。

途径和酮酸合成途径产生[30]，其含量及种类与原料、菌种及发酵条件（如温度、湿度、时间等）等有关[31]。正丁醇、异戊醇、1-辛烯-3-醇和 β-苯乙醇具有较大的香气强度，对草本白酒的香气轮廓具有重要影响。

醛酮类化合物是草本白酒中非常重要的香气物质，本实验从草本白酒中共检出 5 种醛类、1 种缩醛类和 3 种酮类物质，大多具有青草香、果香、花香和甜香。白酒中醛酮类化合物生成途径众多，如醇氧化、氨基酸脱氨脱羧、酮酸脱羧等[32]，其中乙醛来源于丙氨酸，3-甲基丁醛来源于异亮氨酸和亮氨酸[33]，乙缩醛则主要来源于乙醛与乙醇的缩合反应，缩醛在酸的作用下易分解为原来的醛和醇；此外草本植物也是草本白酒中醛酮类的重要来源途径之一。3-甲基丁醛、乙醛、乙缩醛、2,3-丁二酮、3-羟基-2-丁酮具有较高的香气强度，对形成草本白酒的香气特征具有重要影响。

除上述化合物外，7 种吡嗪、6 种呋喃、5 种酚类、2 种硫化物、13 种萜烯类以及 5 种其他类化合物被检测出来。吡嗪类物质主要由于糖和氨基酸在高温下产生[34]，草本植物在热提取的过程中也会产生一些吡嗪类物质，大多具有烘焙和坚果的香气，赋予酒体典型、优雅的风格[35]，同时具有扩张人体血管并改善微循环，以及抑制血小板积聚、保肝护肝等健康功能[36]。二甲基三硫、β-大马酮、糠醛、γ-丁内酯和 γ-壬内酯也具有较高的 FD 值，对草本白酒的香气影响不可忽略。其中二甲基三硫由一些含硫氨基酸如蛋氨酸、胱氨酸通过热分解产生，其气味阈值较低[37−38]，呈煮熟的卷心菜气味，是白酒中重要的香气化合物之一。糠醛通常表现出甜香、焦糖香，一般由糖和氨基酸相互作用形成，对白酒的风味有积极的贡献[39−40]，γ-丁内酯和 γ-壬内酯具有奶油香、甜香，同时还具有抗菌、抗肿瘤和抗炎等生理作用[41−42]。从草本白酒中检测出 13 种萜烯类化合物，萜烯类大多呈现愉悦的花香，对提高草本白酒的花香与细腻度具有重要作

用, 如 β-大马酮具在较强的花香和甜香, 草本白酒中萜烯类化合物主要来源于草本植物。此外氧化芳樟醇、β-紫罗兰酮、二氢-β-紫罗兰酮的香气强度并不高, 但是对草本白酒的香气影响也需要关注。

2.2 定量与 OAV 分析

GC-O 与 AEDA 方法通过构建感官与气味物间的联系, 将气味物的香气强度进行数据化, 解决了饮料酒香气活性化合物的有效鉴定问题。但是 AEDA 并不能全面地评价气味物对整体香气的贡献, 基质效应对气味物的香气表达具有巨大影响[43], 比如基质中的主要成分乙醇会影响酒中微量成分的挥发性, 因此, 需要在 AEDA 法的基础上结合 OAV 对气味物的香气表达进行进一步的探究。本实验对表 1 中 FD≥4 的 68 种气味物进行了定量分析, 定量结果与

表 2 3 种草本白酒中香气物质定量结果

Table 2 Quantitative results of aroma compounds in three kinds of herbal Baijiu

序号	香气成分	质量浓度(μg/L)			阈值(μg/L)[14,44]	OAV		
		Y1	Y2	Y3		Y1	Y2	Y3
1	乙醛*	290.06±8.32^{b}	387.57±23.62^{a}	308.71±24.42^{b}	25000	12	16	12
2	乙酸乙酯*	959.85±21.51^{c}	1587.13±22.41^{a}	1258.35±24.03^{b}	32600	29	49	39
3	1,1-二乙氧基乙烷*	272.76±10.77^{b}	343.02±9.42^{a}	289.85±4.33^{b}	2090	131	164	139
4	3-甲基丁醛*	17.63±0.64^{c}	25.69±1.76^{b}	31.12±2.45^{a}	178	99	144	175
5	丙酸乙酯*	20.32±0.79^{b}	26.37±1.57^{a}	26.61±1.17^{a}	19000	1	1	1
6	2-甲基丙酸乙酯*	6.21±0.26^{c}	10.36±0.81^{a}	8.07±0.57^{b}	57.5	108	180	140
7	2,3-丁二酮	579.45±32.56^{c}	1069.39±41.10^{b}	3496.15±1203.81^{a}	100	6	11	37
8	仲丁醇*	46.18±3.16^{c}	60.99±1.23^{b}	76.63±1.87^{a}	16000	3	4	5
9	丁酸乙酯*	126.61±2.90^{c}	199.17±3.66^{b}	210.40±3.73^{a}	140	904	1423	1503
10	正丙醇*	408.59±8.96^{c}	507.89±10.11^{b}	570.92±11.96^{a}	314000	1	2	2
11	2-甲基丁酸乙酯	1755.08±109.56^{b}	2456.29±168.01^{a}	2270.39±166.03^{a}	8	219	307	284
12	3-甲基丁酸乙酯	4341.01±218.06^{b}	6410.02±389.98^{a}	6838.45±366.59^{a}	15	289	427	456
13	二甲基二硫	16.48±1.42^{c}	88.71±5.25^{b}	113.88±10.21^{a}	9.13	2	10	12
14	己醛	888.25±71.23^{c}	1075.40±42.99^{b}	1398.23±67.71^{a}	88	10	12	16
15	异丁醇*	83.45±3.55^{c}	139.31±0.61^{b}	161.02±2.35^{a}	200000	<1	<1	<1
16	乙酸异戊酯	613.18±28.02^{b}	1326.25±107.63^{a}	1204.49±106.16^{a}	500	1	3	2
17	戊酸乙酯*	24.17±1.21^{b}	32.82±1.82^{a}	36.17±2.19^{a}	900	27	36	40
18	正丁醇*	85.38±1.45^{b}	126.63±1.23^{a}	124.78±2.78^{a}	2730	31	46	46
20	4-甲基戊酸乙酯	604.98±11.79^{b}	895.05±76.16^{a}	986.49±81.63^{a}	5	121	179	197
22	异戊醇*	198.17±5.08^{c}	308.90±3.27^{b}	366.93±5.25^{a}	70000	3	4	5
23	丁酸丁酯	246.95±17.62^{c}	467.27±38.11^{a}	383.26±12.68^{b}	28	9	17	14
24	2-戊基呋喃	4.31±0.21^{c}	11.15±0.98^{a}	8.18±0.75^{b}	14.5	<1	<1	<1
25	己酸乙酯*	860.98±18.73^{c}	1276.93±27.76^{a}	1198.69±17.39^{b}	200	4305	6385	5993
27	3-羟基-2-丁酮*	16.21±0.31^{b}	31.46±2.44^{a}	28.89±2.14^{a}	259	63	121	112
29	庚酸乙酯*	6.66±0.10^{c}	12.36±0.74^{a}	10.48±0.21^{b}	400	17	31	26
30	乳酸乙酯*	686.08±39.32^{b}	992.97±15.34^{a}	1017.16±34.33^{a}	250000	3	4	4
31	正己醇*	27.21±0.41^{c}	36.73±0.34^{b}	40.66±0.77^{a}	4000	7	9	10
32	二甲基三硫	27.18±1.67^{c}	64.98±0.84^{b}	121.23±4.37^{a}	0.36	75	180	337
33	2-乙基-6-甲基吡嗪	35.55±0.18^{c}	45.90±0.57^{a}	42.45±0.22^{b}	5.4	7	9	8
34	2-乙基-5-甲基吡嗪	15.96±0.28^{b}	20.32±0.70^{a}	19.89±0.38^{a}	10	2	2	2
35	2,3,5-三甲基吡嗪	217.19±4.83^{c}	399.04±26.05^{a}	284.94±8.62^{b}	378.5	<1	1	<1
36	2,6-二乙基吡嗪	4.19±0.07^{b}	5.18±0.15^{a}	5.09±0.21^{a}	11.57	<1	<1	<1
37	辛酸乙酯*	6.82±0.08^{c}	11.47±0.14^{b}	12.21±0.02^{a}	900	8	13	14
38	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	15.82±0.51^{c}	24.50±0.76^{a}	21.15±0.75^{b}	10.1	2	2	2
39	1-辛烯-3-醇	41.30±1.85^{b}	55.00±4.67^{a}	60.23±2.81^{a}	6.12	7	9	10
40	乙酸*	363.97±18.56^{b}	678.26±5.97^{a}	697.31±50.06^{a}	200000	2	3	3
41	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪	31.42±0.35^{c}	50.22±1.08^{a}	41.45±0.55^{b}	95	<1	<1	<1
42	氧化芳樟醇	31.52±2.00^{c}	38.87±1.22^{b}	49.86±4.30^{a}	36.2	<1	1	1
43	糠醛*	46.62±0.68^{b}	68.65±6.06^{a}	65.03±5.73^{a}	3000	16	23	22
44	2,3,5,6-四甲基吡嗪	152.06±6.04^{c}	485.59±28.36^{a}	171.42±6.04^{b}	58280	<1	<1	<1
45	2-乙酰基呋喃	195.56±6.09^{b}	269.48±3.25^{a}	266.43±5.04^{a}	80000	<1	<1	<1
47	苯甲醛	993.77±43.17^{b}	1757.70±45.46^{a}	1644.59±60.31^{a}	990	1	2	2
48	丙酸*	18.31±1.78^{a}	16.02±1.34^{b}	20.73±1.93^{a}	18100	1	<1	1

续表 2

序号	香气成分	质量浓度(μg/L)			阈值(μg/L)[14,44]	OAV		
		Y1	Y2	Y3		Y1	Y2	Y3
49	芳樟醇	8.60±0.34^{c}	13.32±0.11^{b}	17.83±0.12^{a}	30	<1	<1	<1
51	异丁酸	3797.20±304.81^{b}	7802.66±716.86^{a}	6680.23±540.73^{a}	1580	2	5	4
52	5-甲基糠醛	147.57±4.29^{b}	192.78±6.97^{a}	199.95±3.09^{a}	466000	<1	<1	<1
53	己酸己酯	903.77±64.23^{b}	1736.72±97.40^{a}	1029.08±59.63^{b}	500	2	3	2
54	γ-丁内酯	314.09±21.64^{c}	486.32±16.52^{a}	405.74±28.12^{b}	35	9	14	12
55	2-乙酰基-5-甲基呋喃	166.82±0.39^{c}	273.49±7.58^{a}	228.84±2.64^{b}	40870	<1	<1	<1
56	丁酸*	73.81±3.37^{c}	102.12±6.36^{b}	135.64±4.85^{a}	964	77	106	141
57	2-糠酸乙酯	245.95±7.57^{a}	241.08±13.56^{a}	138.38±5.06^{b}	16000	<1	<1	<1
58	癸酸乙酯	681.13±59.35^{b}	1004.47±87.55^{a}	1107.97±102.07^{a}	1120	<1	<1	<1
59	苯乙醛	964.39±26.06^{c}	1114.78±89.92^{b}	2321.03±51.07^{a}	25	39	45	93
60	异戊酸*	7.36±0.51^{b}	11.93±1.17^{a}	10.28±0.84^{a}	1050	7	11	10
63	戊酸*	18.91±1.50^{c}	26.46±1.10^{b}	32.06±1.61^{a}	389	49	68	82
64	苯乙酸乙酯	1062.26±25.91^{b}	1288.21±60.65^{a}	1180.09±42.42^{a}	407	3	3	3
65	4-甲基戊酸	1384.38±114.51^{b}	2203.57±218.27^{a}	2387.21±155.11^{a}	144	10	15	17
67	β-大马酮	8.12±0.81^{c}	10.01±0.63^{b}	12.70±1.47^{a}	2.5	3	4	5
69	二氢-β-紫罗兰酮	0.62±0.09^{b}	0.84±0.11^{a}	1.12±0.14^{a}	0.9	<1	<1	1
71	己酸*	458.22±6.59^{c}	573.81±4.20^{b}	670.66±5.30^{a}	2520	182	228	266
73	苯丙酸乙酯	534.19±17.12^{c}	652.83±3.83^{b}	866.08±14.23^{a}	125	4	5	7
74	β-苯乙醇*	5.58±0.03^{b}	11.07±0.36^{a}	10.50±0.01^{a}	8500	<1	1	1
75	β-紫罗兰酮	0.91±0.11^{b}	1.03±0.05^{b}	1.59±0.18^{a}	0.8	1	1	2
76	2-乙酰基吡咯	47.68±1.34^{b}	56.62±3.73^{a}	54.16±2.72^{a}	2000	<1	<1	<1
80	γ-壬内酯	61.13±5.34^{b}	70.93±7.02^{a}	78.57±4.19^{a}	11.2	5	6	7
81	4-甲基苯酚	392.66±10.33^{b}	406.78±7.80^{b}	434.72±12.56^{a}	167	2	2	3
83	4-乙烯基愈创木酚	6.89±0.67^{b}	5.33±0.49^{c}	12.69±0.93^{a}	40	<1	<1	<1
84	香草醛	35.21±3.23^{b}	52.39±3.87^{a}	40.18±3.76^{b}	26	1	2	2

注：表中同一行不同小字字母表示不同样品之间存在显著性差异(P<0.05)；“*”表示该物质质量浓度单位为mg/L。

OAV 如表 2 所示。

根据表 2 中的定量结果对三种草本白酒中香气物质的总体含量分布进行对比分析。从图 1 可知，Y2 中挥发性物质最为丰富，Y1 中挥发性物质总量少于另外两种产品。酯类、酸类及醇类物质是三种草本白酒中含量最为丰富的挥发性成分，三者总量占挥发性物质总量的 80% 以上，构成了酒体风味的物质基础；醛与缩醛类物质在草本白酒中绝对含量相对较低，但在草本白酒的放香、香气层次构建与风味平衡中发挥着重要作用；此外，吡嗪类、萜烯类、内酯类等微量成分在草本白酒中的含量较低，但是对整体风味轮廓的形成、增强酒体的协调性及独特性具有重要作用。

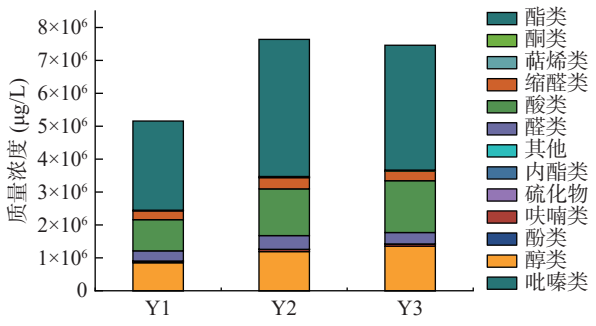


图 1　草本白酒中香气物质含量分布

Fig.1　Distribution of aroma compounds in herbal Baijiu

进一步，对三种草本白酒中含量较高的骨架指

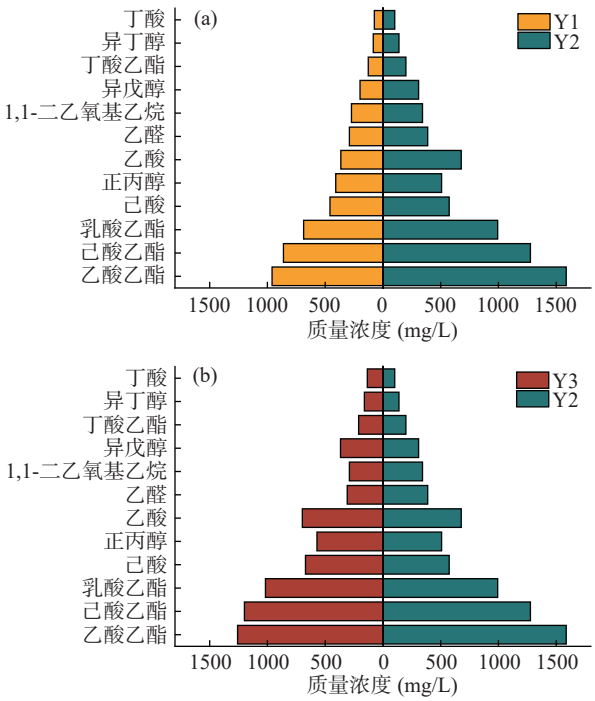


图 2　草本白酒中高含量香气物质对比

Fig.2　Comparison of high-content aroma compounds in herbal Baijiu

标(100 mg/L 以上)进行对比分析,从图 2 可知,乙酸乙酯、己酸乙酯和乳酸乙酯是草本白酒中含量最为丰富的酯类物质。其中,乙酸乙酯的含量最高,达 900~1600 mg/L,赋予酒体菠萝香与清香气息;己酸乙酯的含量次之,对白酒的甜香、香蕉等水果香的形成具有重要作用。有机酸在草本白酒中的含量也较为丰富,尤其乙酸、己酸的含量居前,有机酸可增强白酒的后味,使口感更显绵柔圆润。正丙醇是草本白酒中除乙醇外含量最高的醇类物质,含量适当时可增强酒体的醇厚感,与酯类、有机酸等共同形成草本白酒的风味骨架。

根据香气物质的定量结果和气味阈值计算 OAV,OAV 大于 1 的物质被认为对样品的香气有贡献。从表 2 可知,三种草本白酒(草本 8 年、草本 12 年、草本 15 年)中 OAVs 大于 1 的化合物分别为 51、53、54 种。结合表 1,发现高 OAV 物质通常具有高 FD 值,如己酸乙酯、丁酸乙酯,另有少部分香气物质尽管 FD 值很高,但却有很低的 OAV,或者相反。如苯丙酸乙酯、异戊醇和香草醛具有较高的 FD,但是 OAV 却相对较低,正己醇的 FD 值并不高,但是具有较高的 OAV;2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙酰基吡咯和 γ-己内酯的 FD 均大于 4,但是它们的 OAV 却小于 1。分析原因可能为基质效应对气味物的香气表达存在一定的影响,同时也可能存在检测误差等干扰因素,后续需采用香气重组实验进一步明晰气味物的香气贡献。

一般来说,化合物的 OAV 越大,其香气贡献越大,进一步对三种草本白酒中关键香气物质(OAV≥100)进行对比分析(图 3)。从图 3 可知,己酸乙酯(4305~6385)、丁酸乙酯(904~1503)、异戊酸乙酯(289~456)、异丁酸乙酯(108~180)、2-甲基丁酸乙酯(219~307)、二甲基三硫(75~337)、己酸(182~266)、丁酸(77~141)、乙缩醛(131~164)、3-甲基丁醛(99~175)等在三种草本白酒中均具有较高 OAV,这些化合物对形成草本白酒的香气特征具有重要影响。结合图 2 和图 3,可以发现含量高的化合物并不一定具有高 OAV,单纯通过含量判断风味贡献具有局限性,需结合气味阈值综合评估。如乙酸乙酯在草本白酒中含量最高,但由于其气味阈值也较高,OAV 并不高;相反地,3-甲基丁醛、二甲基三硫在草本白酒中含量较低,但因低阈值而成为草本白酒中重要的香气物质。

为系统剖析草本白酒的香气特征,采用热图对三种草本白酒中重要香气物质(OAV≥1)进行综合对比(图 4)。统计分析显示,三种草本白酒中重要香气物质含量存在显著差异(P<0.05),其中 Y1 与其余两种草本样品的差异尤为突出,这些差异赋予三种草本白酒各具特色的香气特征。Y1 中香气物质的整体含量明显低于 Y2 和 Y3,这与草本白酒 8 年淡雅型风格特征较为吻合。具体来看,Y1 与 Y2 间主要的差异物质为辛酸乙酯、正丁醇、二甲基三硫、乙酸乙酯、2-乙基-6-甲基吡嗪、乙酸和己酸等;而 Y2 与 Y3 之间主要差异物质则包括苯丙酸乙酯、己酸、二甲基三硫、苯乙醛、乙酸乙酯、异戊醇、仲丁醇等。值得注意的是,Y3 中有机酸以及 β-大马酮、二氢-β-紫罗兰酮等萜烯类物质的含量显著高于 Y2;同时,1-辛烯-3-醇、3-甲基丁醛以及醇类在 Y3 中的含量较

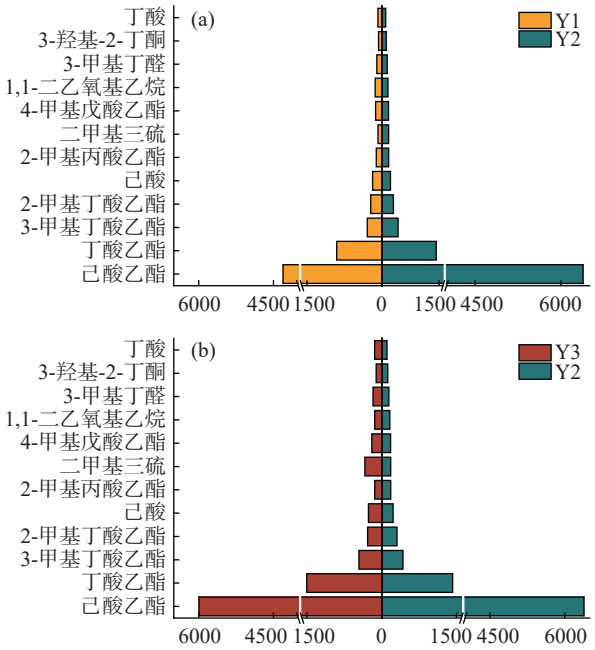


图 3 草本白酒中重要香气物质 OAV 对比

Fig.3 Comparison of OAV of key aroma compounds in herbal Baijiu

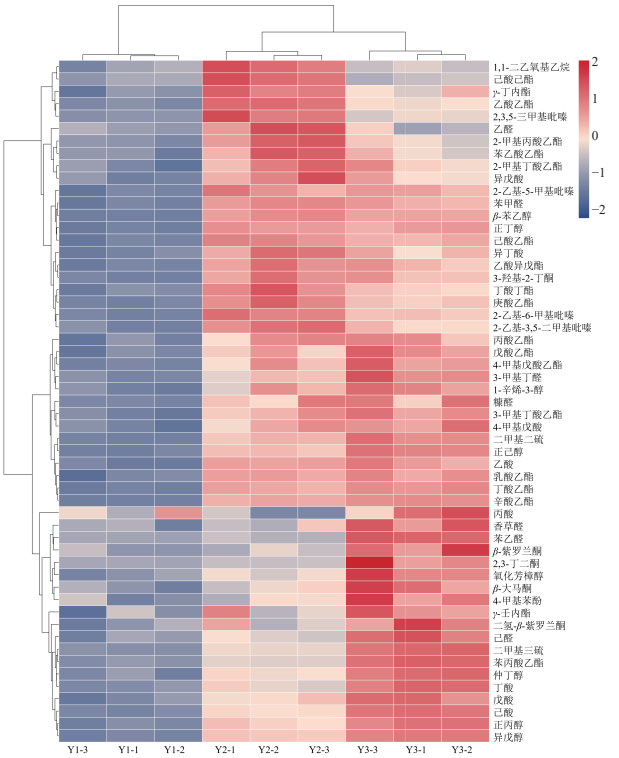


图 4 草本白酒中重要香气物质含量热图

Fig.4 Heatmap for major aroma compounds in three kinds of herbal Baiji

高，这些特征共同形成了草本白酒 15 年香气馥郁优雅、口感醇厚饱满、风味层次丰富细腻的风格。此外，在果香相关的酯类物质方面，如己酸乙酯、乙酸乙酯、丁酸乙酯等，Y2 的含量最高；而具有烘焙香气的 2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪，它们在 Y2 中的含量也明显高于 Y1 和 Y3，共同形成了草本白酒 12 年香气和谐，口感绵甜、圆润顺滑的风格特征。

2.3　香气重组实验

由于气味物在空气与乙醇中的嗅觉阈值存在差异，且气味物在不同基质中表现出来的香气特征也不相同，故采用香气重组实验对 AEDA 和 OAVs 方法的识别结果进行验证，以进一步评估上述气味物对草本白酒香气特征形成的贡献度。将表 2 中 OAV≥1 的香气物质按其定量结果溶解于模拟基质中，获得 3 个香气重组模型。在 9 个感官描述属性（果香、甜香、醇香、花香、粮香、青草香、陈香、酸香和烘焙香）上，感官评价小组分别对香气重组模型与原始样品进行打分，根据得分平均值绘制风味轮廓图（图 5）。

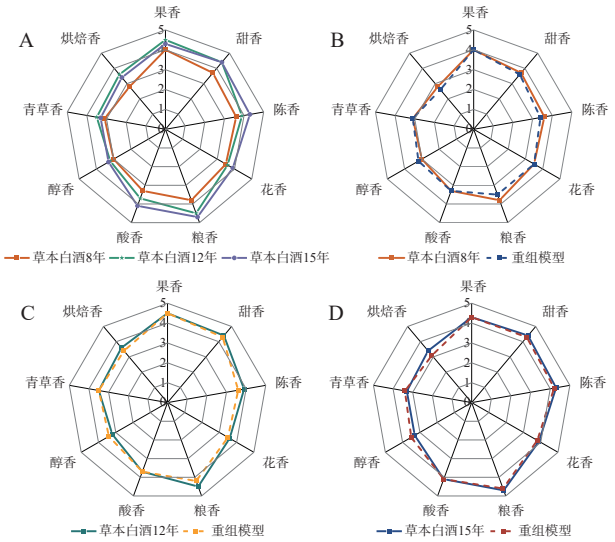


图 5　草本白酒香气重组实验

Fig.5　Aroma profile of herbal Baijiu (solid line) and the respective recombinant (broken line)

通过图 5（A）的感官分析可知，草本 12 年与 15 年的香气轮廓无显著差异（P>0.05），而草本 8 年在果香、甜香、烘焙香等 9 个关键感官属性评分上均低于其他两个样品（P<0.05）；草本 12 年与 15 年的果香和甜香特征突出，主要归因于其较高含量的酯类物质，如乙酸乙酯、异戊酸乙酯、己酸乙酯等，与此同时 β-大马酮也呈现甜香香韵；2-乙基-6-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、四甲基吡嗪等吡嗪类对提升这两款产品的烘焙香气具有促进作用。草本 15 年的酸香、陈香、花香强度均高于另外两款样品，这与其较长的贮存年份密切相关，其中己酸、丁酸、乙酸等有机酸是酸香的主要贡献物质；香草醛、二甲基三硫等对陈香的形成具有重要作用；β-大马酮、二氢-β-紫罗兰酮等萜烯类化合物则显著提升了花香感知。此外，推测 1-辛烯-3-醇、3-甲基丁醛、乳酸乙酯可能是草本 12 年和 15 年粮香更为浓郁的影响因素；而草本 12 年青草香较高，这与其乙醛、1,1-二乙氧基乙烷的含量较高密切相关。

图 5（B）~图 5（D）显示，在果香、青草香、酸香、花香上，三个草本白酒的重组模型均与各自的原始酒样基本一致，而重组模型的醇香均高于原始酒样（P>0.05），分析原因为采用乙醇水溶液作为重组基质，乙醇与香气物质间尚未产生充分的缔合作用，故醇香更强。此外，重组模型 YR1 的烘焙香、粮香、陈香低于原始酒样；草本 12 重组模型（YR2）与原始酒样在烘焙香、陈香、粮香、花香香韵得分上略有差异（P>0.05），其他香韵基本一致；草本 15 重组模型（YR3）与原始酒样在整体香气轮廓上相似，重组模型 YR3 的烘焙香香韵得分低于原始酒样，醇香得分高于原始酒样。推测产生上述差异的主要原因包括以下几方面，首先由于草本白酒微量成分的多样性与复杂性，可能还有一些量小香大的化合物未被识别出来；其次某些含量较低的香气物质定量结果可能存在实验误差，影响香气重组模型准确度；最后，样品中存在一些不挥发或难挥发组分，虽然不直接贡献香气，但是对气味物的呈香具有交互作用，显然重组实验并没有考虑该因素。综合以上结果，重组模型可以成功地模拟三种草本白酒原始样品的香气轮廓，但是要实现所有感官属性的完全重组还需要进一步研究。

2.4　关键香气成分间相互作用

FD 和 OAV 结果表明酯类是草本白酒中非常重要的香气物质，如己酸乙酯、丁酸乙酯等直链脂肪酸乙酯，3-甲基丁酸乙酯、异丁酸乙酯等支链脂肪酸乙酯；此外，二甲基三硫、己酸、1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁醛对草本白酒的香气也具有重要的影响，这些化合物与酯类物质间的相互作用尚不清楚。故选择

表 3　二元混合物阈值测定结果及其相互作用

Table 3　Thresholds for binary mixtures and their interactions in herbal Baijiu

序号	二元混合物	实验阈值（μg/L）	理论阈值（μg/L）	实验阈值/理论阈值	相互作用
1	己酸乙酯+二甲基三硫	1266.31	344.40	3.68	掩盖作用
2	己酸乙酯+己酸	1173.25	580.84	2.02	掩盖作用
3	己酸乙酯+1,1-二乙氧基乙烷	347.36	430.87	0.81	加成作用
4	己酸乙酯+3-甲基丁醛	728.45	318.54	2.29	掩盖作用
5	己酸乙酯+3-甲基丁酸乙酯	192.36	350.19	0.55	加成作用
6	3-甲基丁酸乙酯+二甲基三硫	23.94	15.24	1.57	掩盖作用
7	3-甲基丁酸乙酯+己酸	838.90	2 280.03	0.37	协同作用
8	3-甲基丁酸乙酯+1,1-二乙氧基乙烷	323.65	486.60	0.67	加成作用
9	3-甲基丁酸乙酯+3-甲基丁醛	37.34	44.21	0.84	加成作用

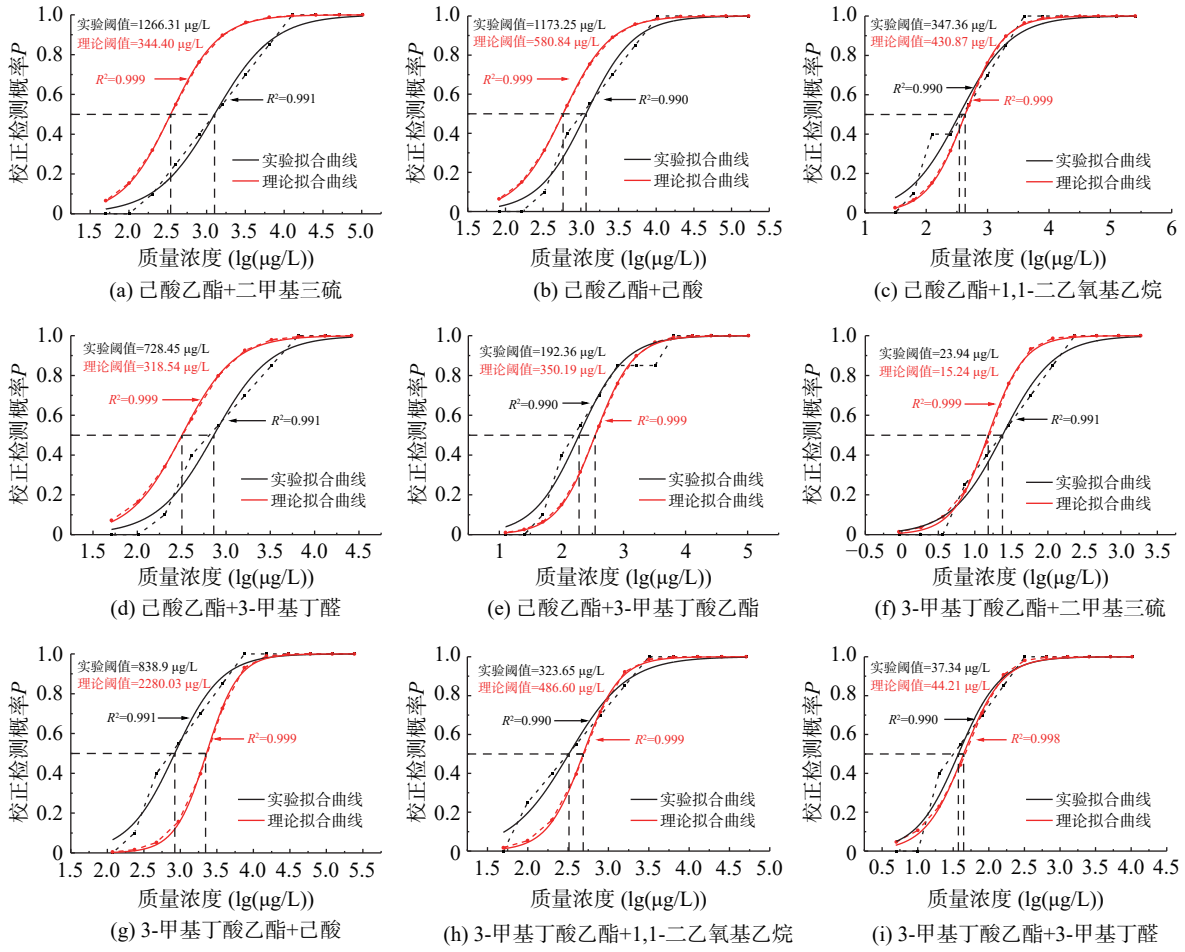


图 6 基于 S 曲线法测定香气相互作用

Fig.6 Determination of aroma interactions based on the S-curve method

Y2 中的己酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯分别作为直链和支链酯的代表，考察二甲基三硫、己酸、1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁醛与它们间的感官交互作用。6 种化合物组成 9 个二元混合物，每种化合物按其在 Y2 样品中的实际质量浓度混合(表 3)。

获取的实验阈值与 Feller 加和模型计算得到的理论阈值进行比较[12]，结果如图 6 所示，二元混合物 1#、2#、4#、6#的 *R* 值分别为 3.68、2.02、2.29 和 1.57，均大于 1，表明己酸乙酯与二甲基三硫、己酸、3-甲基丁醛之间，以及 3-甲基丁酸乙酸与二甲基三硫之间均存在掩盖作用。而 3#、5#、8#、9#的 *R* 值分别为 0.81、0.55、0.67 和 0.84，均介于 0.5 和 1 之间，表明己酸乙酯与 1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁酸乙酯之间，3-甲基丁酸乙酯与 1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁醛之间均为加成作用。7#的 *R* 值为 0.37，小于 0.5，表明 3-甲基丁酸乙酯与己酸间出现了协同作用。

实验结果表明，草本白酒中二甲基三硫含量较低，却对其香气表达影响重大，二甲基三硫能够掩盖草本白酒中酯类香气，削弱酒中的果香与甜香香韵。1,1-二乙氧基乙烷与草本白酒中酯类间呈现出香气增强作用，可促进草本白酒放香；但是，在 1,1-二乙氧基乙烷与己酸乙酯组成的二元混合体系中，果香与甜香强度却低于己酸乙酯单独构成的一元体系，说明香气成分间的相互作用与香韵间的相互作用规律并不一致。己酸和 3-甲基丁醛对草本白酒香气表达同样关键，它们会掩盖己酸乙酯的香气，与 3-甲基丁酸乙酯间却具有增强作用；己酸乙酯与 3-甲基丁酸乙酯两种酯之间则存在互相增强作用。由此可见，香气成分间的交互作用机制极为复杂。以己酸为例，其与不同酯类之间的交互作用机制截然不同。表明香气成分间的交互作用机制，与它们的含量比例、化学结构、香韵等性质紧密相关，因此有必要深入探究香气物质在多元体系下的相互作用，明确各香气物质对草本白酒香气的贡献，以期定向调控草本白酒的香气品质。

3 讨论与结论

通过 LLE、HS-SPME 结合 GC-MS-O 技术对草本白酒中的香气成分进行提取分离和定性分析，并采用 AEDA 从三种草本白酒中共鉴定出 84 种挥发性香气成分(FD≥2)。基于定量结果与气味阈值，从三种草本白酒中分别鉴定出 51、53、54 种 OAV≥1 的重要香气物质，通过香气重组实验，己酸乙酯、丁酸乙酯、3-甲基丁醛、丁酸、己酸、3-甲基丁酸乙酯、2-甲基丙酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、二甲基三硫、1,1-二乙氧基乙烷由于具有高 FD 和 OAV 被鉴定为草本白酒的特征香气成分。通过热图分析，发现三种草

本白酒在香气物质种类上基本无差异，在香气物质含量与比例上存在显著差异（$P<0.05$）。两种方法结合使用有利于草本白酒中香气成分的定性与定量分析，其中 SPME 方法对于酯类具有较好的重复性与准确度，LLE 方法对于酸类、醛类具有良好的选择性。

研究了二甲基三硫、1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁醛、己酸与己酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯间的香气相互作用。Feller 加和模型和 S 曲线法研究结果表明，二甲基三硫、3-甲基丁醛、己酸与己酸乙酯混合后具有掩盖作用，1,1-二乙氧基乙烷与己酸乙酯间存在加成作用；二甲基三硫与 3-甲基丁酸乙酯间则为掩盖作用，1,1-二乙氧基乙烷、3-甲基丁醛与 3-甲基丁酸乙酯混合后发生加成作用，己酸与 3-甲基丁酸乙酯间存在协同作用；己酸乙酯与 3-甲基丁酸乙酯间为加成作用。实验结果表明香气物质间的交互作用机制极为复杂，与它们的含量比例、化学结构、香韵等性质存在紧密关系，香气成分间的交互作用与香韵间的相互作用规律不一致，有必要深入研究多元体系下香气物质间的交互作用，以及不同香韵的相互作用。综上，本研究明确了三种草本白酒的特征香气成分及其香气作用机制，对实现特征香气成分及产品香气风格的靶向调控具有良好的指导作用，也为草本白酒的产品设计、风味重构提供理论参考，对提升草本白酒的风味品质具有重要意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ ZHENG Xiaowei, HAN Beizhong. Baijiu, Chinese liquor: History, classification and manufacture[J]. Journal of Ethnic Foods, 2016, 3(1): 19−25.

［2］ WANG Lianqing, TANG Ping, ZHANG Pengjie, et al. Unraveling the aroma profiling of Baijiu: Sensory characteristics of aroma compounds, analytical approaches, key odor-active compounds in different Baijiu, and their synthesis mechanisms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 146: 104376.

［3］ 中国酒业协会. T/CBJ 9103-2024 草本白酒[S]. 北京：中国标准出版社，2024. ［China Alcoholic Drinks Association. T/CBJ 9103-2024 Caoben baijiu[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.］

［4］ YANG Qiang, LUO Chengliang, ZHANG Xinmu, et al. Tartary buckwheat extract alleviates alcohol-induced acute and chronic liver injuries through the inhibition of oxidative stress and mitochondrial cell death pathway[J]. American Journal of Translational Research, 2020, 12(1): 70−89.

［5］ 王萌萌，梅振东，张淼，等. 葛根提取物对高脂血症大鼠血脂及抗氧化能力的影响[J]. 食品工业科技，2015, 36(11): 369−372. ［WANG Mengmeng, MEI Zhendong, ZHANG Miao, et al. Effects of pueraria extract on blood lipid and anti- oxidant activity in hyperlipidemia rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(11): 369−372.］

［6］ SHA S, CHEN S, QIAN M, et al. Characterization of the typical potent odorants in Chinese roasted sesame-like flavor type liquor by headspace solid phase microextraction-aroma extract dilution analysis, with special emphasis on sulfur-containing odorants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(1): 123−131.

［7］ 赵侨，杨花，田茂玲，等. 酱香型白酒堆积发酵微生物与风味物质相关性研究进展[J]. 中国酿造，2024, 43(12): 6−12. ［ZHAO Qiao, YANG Hua, TIAN Maoling, et al. Research progress on the correlation between microorganisms and flavor substances in stacking fermentation of sauce-flavor Baijiu[J]. China Brewing, 2024, 43(12): 6−12.］

［8］ 张卫卫，刘建学，韩四海，等. 白酒基酒典型风味物质含量的测定方法与差异性研究[J]. 食品科学，2015, 36(24): 122−126. ［ZHANG Weiwei, LIU Jianxue, HAN Sihai, et al. Determination and comparison of the contents of typical flavor substances in base liquor of dukang, a Chinese liquor[J]. Food Science, 2015, 36(24): 122−126.］

［9］ 杜静怡，朱婷婷，黄明泉，等. 清香型志都五谷酒关键香气成分分析[J]. 食品科学，2021, 42(2): 185−192. ［DU Jingyi, ZHU Tingting, HUANG Mingquan, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese zhiduwugu light-flavor Baijiu (Chinese liquor)[J]. Food Science, 2021, 42(2): 185−192.］

［10］ 孙细珍，熊亚青，刘家欢，等. 清香型白酒新酒和陈酒感官特征及香气物质的差异性分析[J]. 食品科学，2023, 44(14): 266−273. ［SUN Xizhen, XIONG Yaqing, LIU Jiahuan, et al. Differences in sensory characteristics and aroma compounds between young and aged qingxiangxing Baijiu[J]. Food Science, 2023, 44(14): 266−273.］

［11］ WANG Zhen, CHANG Xiaoyue, HAO Wenjun, et al. Study on interaction of aromatic substances and correlation between electroencephalogram correlates of odor perception in light flavor Baijiu[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(29): 16519−16529.

［12］ 易封萍，马宁，朱建才. 基于 GC-O、OAV 及 Feller 加和模型对酱香型习酒特征香气成分的分析[J]. 食品科学，2022, 43(2): 242−256. ［YI Fengping, MA Ning, ZHU Jiancai. Identification of characteristic aroma compounds in soy sauce aroma type xi Baijiu using gas chromatography-olfactometry, odor activity value and feller's additive model[J]. Food Science, 2022, 43(2): 242−256.］

［13］ 牛云蔚，朱全，肖作兵. 茅台酒香气组成及关键香气成分间的协同作用[J]. 中国食品学报，2021, 21(10): 215−226. ［NIU Yunwei, ZHU Quan, XIAO Zuobing. The aroma composition and synergistic effect among key aroma compounds in Moutai Baijiu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 215−226.］

［14］ SUN Xizhen, XIONG Yaqing, NI Xingting, et al. Characterization of the key aroma compounds in herbal Baijiu via a sensitivity approach[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 139: 107085.

［15］ WANG Lulu, GAO Mengxin, LIU Zhipeng, et al. Three extraction methods in combination with GC×GC-TOFMS for the detailed investigation of volatiles in Chinese herbaceous aroma-type Baijiu[J]. Molecules, 2020, 25(19): 4429.

［16］ SUN Xizhen, QIAN Quanquan, XIONG Yaqing, et al. Characterization of the key aroma compounds in aged Chinese Xiaoqu Baijiu by means of the sensomics approach[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132452.

［17］ 孙细珍，杜佳炜，黄盼，等. 现代工艺和传统工艺酿造小曲清香型白酒感官表征及风味成分分析[J]. 食品科学，2021, 42(6): 282−290. ［SUN X Z, DU J W, HUANG P, et al. Analysis of sensory characteristics and flavor components in light-flavor Chinese liquor (Baijiu) made with Xiaoqu Starter by modern and traditional technologies[J]. Food Science, 2021, 42(6): 282−290.］

[18] LI Hehe, QIN Dan, WU Ziyang, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese Guojing sesame-flavor Baijiu by means of molecular sensory science[J]. Food Chemistry, 2019, 284: 100−107.
[19] 孙细珍, 熊亚青, 倪兴婷, 等. 吡嗪类化合物对酱香型白酒香气特征的影响分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 305−311. [SUN Xizhen, XIONG Yaqing, NI Xingting, et al. Analysis of the effect of pyrazine compounds on the aroma characteristics of Jiangxiangxing Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 305−311.]
[20] 张一, 李小燕, 牛丽敏, 等. 4 款单一麦芽威士忌特征风味成分解析[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 111−117. [ZHANG Yi, LI Xiaoyan, NIU Limin, et al. Analysis of key aroma components of four kinds of single malt whisky[J]. Food Science, 2024, 45(5): 111−117.]
[21] ZHAO Dongrui, SHI Dongmei, SUN Jinyuan, et al. Characterization of key aroma compounds in Gujinggong Chinese Baijiu by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, and sensory evaluation[J]. Food Research International, 2018, 105: 616−627.
[22] 马宁. 酱香型习酒特征香气成分鉴定及香气协同作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021. [MA Ning. Study on key aroma compounds and perceptual interaction among odorants in soy sauce aroma type xi Baijiu[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.]
[23] COMETTO–MUÑIZ J E, CAIN W S, ABRAHAM M H, et al. Chemosensory detectability of 1-butanol and 2-heptanone singly and in binary mixtures[J]. Physiology & Behavior, 1999, 67(2): 269−276.
[24] 朱全. 茅台酒香气组成及香韵结构协同作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020. [ZHU Quan. Study on the synergistic effect of aroma composition and sensory attributes of Moutai Baijiu[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2020.]
[25] 邢爽. 白酒发酵过程中酯类物质形成机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018. [XING Shuang. Research of the formation mechanism of esters in process of liquor fermentation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2018.]
[26] YU Haiyan, XIE Tong, XIE Jingru, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese rice wine using gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 8−14.
[27] 郭学武, 范恩帝, 马冰涛, 等. 中国白酒中微量成分研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 267−276. [GUO Xuewu, FAN Endi, MA Bingtao, et al. Recent progress in micro components of Chinese Baijiu[J]. Food Science, 2020, 41(11): 267−276.]
[28] DONG Wei, GUO Ruonan, LIU Miao, et al. Characterization of key odorants causing the roasted and mud-like aromas in strong-aroma types of base Baijiu[J]. Food Research International, 2019, 125: 108546.
[29] WU Yashuai, HOU Yaxin, CHEN Hao, et al. "Key factor" for Baijiu quality: Research progress on acid substances in Baijiu[J]. Foods, 2022, 11(19): 2959.
[30] JIANG Xiaohui, LU Yuyun, LIU Shaoquan. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*[J]. LWT, 2020, 132: 109929.
[31] FAN W L, QIAN M C. Characterization of aroma compounds of Chinese "wuliangye" and "Jiannanchun" liquors by aroma extract dilution analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2695−2704.
[32] 陈燕梅. 川法小曲白酒风味品质特征解析[D]. 成都: 成都大学, 2024. [CHEN Yanmei. Analysis of the flavor characteristics of Sichuan xiaoqu Baijiu[D]. Chengdu: Chendu University, 2024.]
[33] 于俊婷. 黄酒中挥发性羰基化合物的检测方法优化及其在黄酒鉴别中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [YU Junting. Optimization of determination of volatile carbonyl compounds in Huangjiu and its application in differentiating Huangjiu[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
[34] 史改玲, 郭莹, 李景辉, 等. LLE-GC-MS-SIM 检测白酒中 9 种微量功能成分[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 114−119. [SHI Gailing, GUO Ying, LI Jinghui, et al. Determination of nine trace functional components in Chinese Baijiu by liquid-liquid extraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry-selective ion monitoring[J]. Food Science, 2021, 42(20): 114−119.]
[35] LI Xin, ZHANG Busheng, LI Wenxuan, et al. Unraveling the chemosensory characteristics dependence of sauce-flavor Baijiu on regionality using descriptive sensory analysis and quantitative targeted flavoromics[J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138274.
[36] 程伟, 陈雪峰, 陈兴杰, 等. 全二维气相色谱-飞行时间质谱法分析馥合香白酒中挥发性特征组分[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 239−245. [CHENG Wei, CHEN Xuefeng, CHEN Xingjie, et al. Characterization of volatile compounds in Fuhe-flavor Baijiu by GC×GC-TOF-MS[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(11): 239−245.]
[37] LIU Jun, WU Qun, WANG Peng, et al. Synergistic effect in core microbiota associated with sulfur metabolism in spontaneous Chinese liquor fermentation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2017, 83(24): e01475−e01417.
[38] LIU Huilin, SUN Baoguo. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(22): 5425−5432.
[39] 杨婷婷, 黄永光, 左乾程, 等. 酱香白酒酿造过程糠醛及糠醇的时空分布规律及溯源分析[J]. 食品科学, 2025, 46(5): 38−47. [YANG Tingting, HUANG Yongguang, ZUO Qiancheng, et al. Temporal and spatial distribution patterns and traceability analysis of furfural and furfuryl alcohol in the brewing process of sauce-flavor Baijiu[J]. Food Science, 2025, 46(5): 38−47.]
[40] GONG Min, ZHOU Zhilei, YU Yongjian, et al. Investigation of the 5-hydroxymethylfurfural and furfural content of Chinese traditional fermented vinegars from different regions and its correlation with the saccharide and amino acid content[J]. LWT, 2020, 124: 109175.
[41] 聂庆庆, 徐岩, 范文来. 固相萃取结合气相色谱-质谱技术定量白酒中的 γ-内酯[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4): 159−164. [NIE Qingqing, XU Yan, FAN Wenlai. Quantification of γ-lactones in Baijiu with solid phase extraction (SPE)-gas chromatography mass spectrometry (GC-MS)[J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(4): 159−164.]
[42] POOJA B, DEEPA K. Green tea catechins: Defensive role in cardiovascular disorders: Green tea catechins: Defensive role in cardiovascular disorders[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2013, 11(4): 345−353.
[43] 赵东瑞. 古井贡酒风味物质及酚类风味物质的抗氧化性和抗炎性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [ZHAO Dongrui. Research on the aroma compounds of gujinggong Chinese Baijiu and evaluation of the antioxidant and anti-inflammatory effects of phenolic aroma compounds[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
[44] VANVAN GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media[M]. 2nd ed. Oliemans Punter and Partners, 2011.