

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241125001

引用格式: 孔凡华, 李菁菁, 郑佳, 等. 基于非靶向代谢组学解析五粮液系列白酒的挥发性组分特征及差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 203–208.

KONG FH, LI JJ, ZHENG J, *et al.* Analysis of characteristics and differences of volatile components in different Wuliangye liquor series based on non targeted metabonomics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 203–208. (in Chinese with English abstract).

基于非靶向代谢组学解析五粮液系列白酒的 挥发性组分特征及差异

孔凡华¹, 李菁菁¹, 郑佳², 厉姮³, 白沙沙¹, 卢彦坪¹, 周琪乐^{1*}, 崔亚娟^{1*}

(1. 北京市营养源研究所有限公司, 北京 100069; 2. 宜宾五粮液股份有限公司, 宜宾 644000;
3. 北京城市学院生物医药学部, 北京 100083)

摘要: **目的** 基于非靶向代谢组学技术, 解析五粮液系列白酒的挥发性组分特征及差异。 **方法** 利用非靶向代谢组学技术研究五粮液、五粮醇、五粮春、五粮特曲和五粮头曲5个系列白酒中挥发性组分特征及差异。 **结果** 5个系列白酒中共检出900种化合物, 其中胺类26种、醇类86种、芳烃类51种、酚类18种、含氮化合物类11种、含硫化合物类11种、卤代烃类3种、醚类4种、醛类47种、酸类28种、萜类143种、烃类78种、酮类79种、杂环化合物139种、酯类172种、其他类4种。不同五粮液白酒检出化合物的数量和组成存在差别, 五粮液中差异显著化合物数目显著高于五粮醇、五粮春、五粮特曲和五粮头曲。 **结论** 不同五粮液系列白酒中组成和含量的差异是反映白酒品质的重要因素, 非靶向代谢组学技术在白酒特征成分的分析鉴定中具有良好的应用性, 为科学区分五粮液系列白酒提供可靠的数据支持。

关键词: 五粮液; 白酒; 挥发性组分; 非靶向代谢组学; 气相色谱-质谱法

Analysis of characteristics and differences of volatile components in different Wuliangye liquor series based on non targeted metabonomics

KONG Fan-Hua¹, LI Jing-Jing¹, ZHENG Jia², LI Da³, BAI Sha-sha¹, LU Yan-Ping²,
ZHOU Qi-Le^{1*}, CUI Ya-Juan^{1*}

(1. Beijing Institute of Nutritional Resources Co., Ltd., Beijing 100069, China;
2. Wuliangye Yibin Co., Ltd., Yibin 644000, China; 3. School of Biomedicine,
Beijing City University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the characteristics and differences of volatile components in Wuliangye liquor based on non targeted metabonomics technology. **Methods** The characteristics and differences of volatile

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 中国轻工业浓香型白酒固态发酵重点实验室开放基金项目(2021JJ007)

第一作者: 孔凡华(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食物营养分析检测。E-mail: 605085941@qq.com

*通信作者: 周琪乐(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品功能因子和中药药效物质研究。E-mail: zqllzmy@163.com

崔亚娟(1979—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食物营养分析检测及应用研究。E-mail: cuiyj66@163.com

components of 5 series of liquor including Wuliangye, Wuliangye alcohol, Wuliangchun, Wuliangtequ and Wuliangtoutu liquor was analyzed by non targeted metabonomics technology. **Results** A total of 900 kinds of compounds were detected in 5 series of liquor, including 26 kinds of amines, 86 kinds of alcohols, 51 kinds of aromatics, 18 kinds of phenols, 11 kinds of nitrogenous compounds, 11 kinds of sulfur compounds, 3 kinds of halogenated hydrocarbons, 4 kinds of ethers, 47 kinds of aldehydes, 28 kinds of acids, 143 kinds of terpenes, 78 kinds of hydrocarbons, 79 kinds of ketones, 139 kinds of heterocyclic compounds, 172 kinds of esters, and 4 kinds of others. The number and composition of compounds detected in different Wuliangye liquor were different. The number of compounds with significant differences in Wuliangye was significantly higher than that in Wuliangye alcohol, Wuliangchun, Wuliangtequ and Wuliangtoutu. **Conclusion** The difference of composition and content in different Wuliangye series liquor is an important factor reflecting the quality of liquor. Non targeted metabonomics technology has good application in the analysis and identification of liquor characteristic components, providing reliable data support for scientific differentiation of Wuliangye series liquor.

KEY WORDS: Wuliangye; liquor; volatile components; non targeted metabolomics; gas chromatography-mass spectrometry method

0 引言

白酒的酿造和饮用在中国已经有几千年的历史,是世界上最古老的蒸馏酒之一^[1],主要以小麦、高粱等为原料采用固态发酵制成,距今已有 2000 多年的发展历史^[2]。白酒作为我国的国酒,不仅承载着悠久的中华文明和厚重的酒文化,而且具有健康促进作用,现代医学表明饮酒可以降低冠心病的死亡率^[3-4],降低空腹血糖含量^[5-6],预防心血管疾病^[7-8],预防癌症^[9-10],增强人体免疫功能^[11-14]。白酒中 98%的成分是水和乙醇,其他约 2%的微量成分决定了白酒的香型和风格,赋予白酒独特的风味特征和生物活性^[15]。微量成分中主要包括挥发性成分醇类、酚类、酸类、酯类、含氮化合物、含硫化合物,其中不同香型白酒的挥发性成分的种类、香气阈值、相互作用等已经进行了系统的报道^[16],非挥发性成分包括游离氨基酸、矿物质、维生素、肽等^[17],近年来,随着“健康中国 2030 纲要”的实施,非挥发性成分作为白酒中重要的微量成分也逐渐成为学者们研究的热点^[18]。

随着现代分析技术的发展,如高效的前处理方法,高精密度和低检出限的液相色谱法、液相色谱-质谱联用法、气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)等检测技术^[19-23]的应用使得白酒中的健康因子的鉴定成为可能。白酒中的健康因子在近些年得到了较为系统的研究。据统计,白酒微量成分已多达 1874 种^[24]。由于白酒中各物质的含量、极性、沸点、溶解度、挥发性差异较大,因此分析不同化合物没有固定的预处理方法。目前,样品提取的主要方法有直接进样法、液液萃取法、固相萃取法、液液微萃取法和固相微萃取法等^[25-29]。

白酒健康因子的鉴定和功能性验证,为白酒的健康作用提供了科学依据。白酒中的微量成分在摄入人体后作

为整体发挥健康促进作用,研究白酒中非挥发性成分的组成差异并验证其相应的生物活性具有重要意义。本研究以五粮液集团五粮系列白酒为研究对象,基于组学技术分析不同系列白酒的质谱测定结果,通过分层聚类和主成分分析确定不同系列白酒的非挥发性成分差异性,为不同系列白酒的分类提供技术支持,有利于优质白酒产品的开发和工艺改进,能够有效提高白酒企业的经济效益。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

采购宜宾五粮液股份有限公司酒精度相近的白酒产品 5 款,分别为:五粮液普五第八代(52%vol)(编号:BJ1)、五粮醇红装(50%vol)(编号:BJ2)、五粮春第二代(52%vol)(编号:BJ3)、五粮特曲(52%vol)(编号:BJ4)、五粮头曲醇品(52%vol)(编号:BJ5),生产日期均为 2022 年,采购于京东商城,所有样品均保存在干燥避光室温环境中。

正己烷(色谱纯,德国默克公司);氯化钠(色谱纯,中国医药集团有限公司);超纯水由实验室制备。

1.2 仪器与设备

GCMS-TQ 8050 气相色谱质谱联用仪(日本岛津公司);Vortex2 涡旋混合器(德国艾卡公司);DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

取 5 mL 白酒样品分别加入饱和氯化钠溶液中,将 5 种五粮液白酒等体积混合作为质量控制样品,在相同处理条件下进行样品的重复性测定。全自动顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME),以 GC-MS 分析。

1.3.2 HS-SPME 萃取条件

在 60 °C 恒温条件下, 振荡 5 min, 120 μ m DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶, 顶空萃取 15 min, 于 250 °C 下解析 5 min, 然后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头在老化装置中 250 °C 下老化 5 min。

1.3.3 色谱条件

DB-5MS 毛细管柱, 载气为高纯氮气(纯度不小于 99.999%), 流速 1.2 mL/min, 进样口温度 250 °C, 不分流进样, 溶剂延迟 3.5 min。程序升温: 40 °C 保持 3.5 min, 以 10 °C/min 升至 100 °C, 再以 7 °C/min 升至 180 °C, 最后以 25 °C/min 升至 280 °C, 保持 5 min。

1.3.4 质谱条件

电子轰击离子源(electron impact ionization, EI), 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 质谱接口温度 280 °C, 电子能量 70 eV, 扫描方式为选择离子检测模式(selected ion monitoring, SIM)。

1.3.5 定性定量条件

基于多物种、文献、部分标品以及保留指数, 自主建立数据库, 包含确定的保留时间以及定性定量离子进行选择离子检测模式进行精准扫描, 每种化合物分别选择 1 个定量离子, 2~3 个定性离子。每组所有需要检测的离子按照出峰顺序, 分时段分别检测, 如果检出的色谱峰的保留时间与标准参考相一致, 并且在扣除背景后的样品质谱图中, 所选择的离子均出现, 判定为该物质, 选择定量离子进行色谱峰的积分和校正工作, 增强定量的准确性。

1.4 数据处理

对于 GC-MS 平台, 用 MassHunter 定量软件处理样本下机质谱文件, 选择定量离子进行色谱峰的积分和校正工作。

为了比较所有检测到的代谢物中每个代谢物在不同样本中的物质含量差异, 根据代谢物保留时间与峰型的信息, 对每个代谢物在不同样本中检测到的质谱峰进行校正, 以确保定性定量的准确性。

主成分分析(principal component analysis, PCA): 通过统计函数 prcomp 在 R 软件(www.r-project.org)内进行无监督 PCA, 在无监督 PCA 前对数据进行单位方差缩放。

聚类分析(cluster analysis, CA): 一种分类的多变量统计分析方法。按照个体或样品的特征将它们分类, 使同一类别内的个体具有尽可能高的同质性, 而类别之间则应具有尽可能高的异质性。代谢物含量数据采用单位方差缩放(unit variance scaling, UV) 处理, 通过 R 软件 ComplexHeatmap 包绘制热图, 对代谢物在不同样本间的积累模式进行层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)。HCA 和皮尔逊相关系数均采用 R 包 ComplexHeatmap 进行。样品和化合物的 HCA 结果以带有树状图的热图表示, 样品之间的皮尔逊相关系数通过 R 中的相关函数计算。

差异化合物筛选: 根据差异倍数进行差异化合物筛选, 选取差异倍数 ≥ 2 和差异倍数 ≤ 0.5 的组分, 化合物在两组中的差异为 2 倍以上或 0.5 以下, 判定为差异显著。

2 结果与分析

2.1 化合物总体分析

经过非靶向代谢组学分析, 5 款白酒共检出 900 种化合物, 见图 1。其中胺类 26 种、醇类 86 种、芳烃类 51 种、酚类 18 种、含氮化合物类 11 种、含硫化合物类 11 种、卤代烃类 3 种、醚类 4 种、醛类 47 种、酸类 28 种、萜类 143 种、烃类 78 种、酮类 79 种、杂环化合物 139 种、酯类 172 种、其他类 4 种。

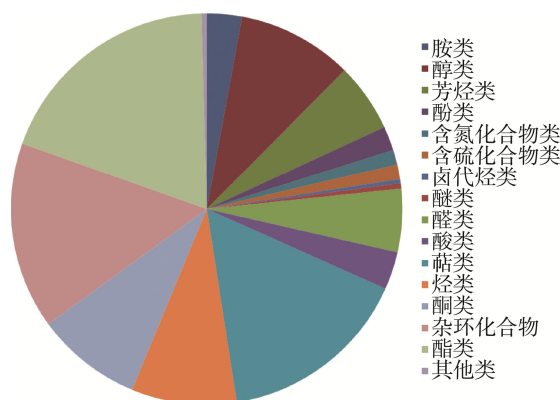


图 1 化合物统计饼状图

Fig.1 Compound statistical pie chart

2.2 主成分分析

采用多变量统计分析, 可以在最大程度保留原始信息的基础上将高维复杂的数据进行“简化和降维”, 建立可靠的数学模型对研究对象的代谢谱特点进行归纳和总结。其中, PCA 是一种无监督模式识别的多维数据统计分析方法, 通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量, 转换后的这组变量叫主成分。这个分析方法常用来研究如何通过少数几个主成分来揭示多个变量间的内部结构, 即从原始变量中导出少数几个主成分, 使它们尽可能多地保留原始变量的信息, 且彼此间互不相关, 通常数学上的处理就是将原来多人指标作线性组合, 作为新的综合指标。

PCA 的数据处理原理是将原始数据压缩成 n 个主成分来描述原始数据集的特征, PC1 表示能描述多维数据矩阵中最明显的特征, PC2 表示除 PC1 之外的所能描述数据矩阵中最显著的特征, PC3.....PC n 以此类推。PCA 用 R 软件的内置统计 prcomp 函数, 设置 prcomp 函数参数 scale=True, 表示对数据进行 UV 处理。5 款白酒 PCA 结果见图 2。

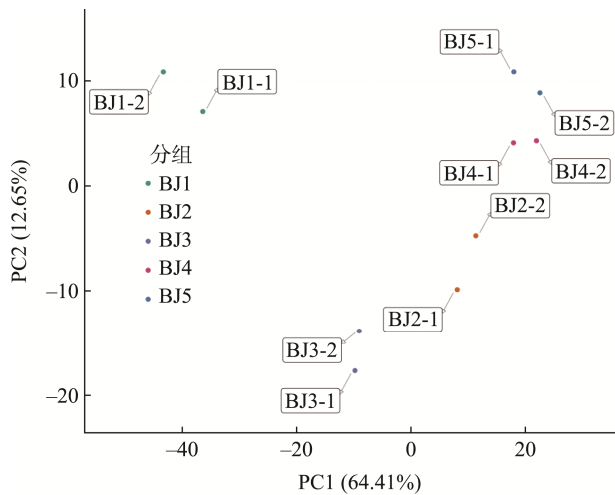


图2 白酒化合物 PCA
Fig.2 PCA of compounds in liquor

由 PCA 结果可知, 图中的每个点表示一个样品, 同一个组的样品使用同一种颜色表示。5 款白酒均具有较好地区分, 在第 1 主成分上, 五粮液和五粮春两款白酒明显区别于五粮醇、五粮特曲和五粮头曲 3 款白酒, 且五粮液与其他 4 款白酒在主成分二维分布图中距离均非常明显, 具有很好的区分特性。

2.3 聚类分析

GC-MS 测定结果经过数据预处理, 聚类算法根据距离进行判断类别, 需要在聚类之前进行标准化处理, 白酒中化合物 CA 热图见图 3, 白酒样品 CA 热图见图 4。

化合物 CA 热图中不同颜色代表不同相对含量标准化处理后得到的不同数值进行填充的颜色, 红色代表高含量, 绿色代表低含量。图中左侧的聚类线为代谢物聚类线, 图中上方的聚类线为样品聚类线。由化合物 CA 热图可以看出, 五粮液白酒在所有类别化合物中含量均比较显著, 其次是五粮春白酒, GC-MS 测定结果与白酒品鉴所呈现出的口味具有一定的相关性, 可以侧面反应白酒的品质。

由样品 CA 结果可知, 五粮特曲和五粮头曲首先聚为一类, 然后与五粮醇聚为一类, 再次与五粮春聚为一类, 最后是与五粮液聚类。由样品聚类结果也可看出 5 款白酒的品质存在显著性差异, 五粮液和五粮春在多数化合物中均存在含量优势。

2.4 重复相关性评估

通过样品之间的相关性分析可以观察组内样品之间的生物学重复。同时组内样品相对组间样品的相关系数越高, 获得的差异代谢物越可靠。将皮尔逊相关系数 r 作为生物学

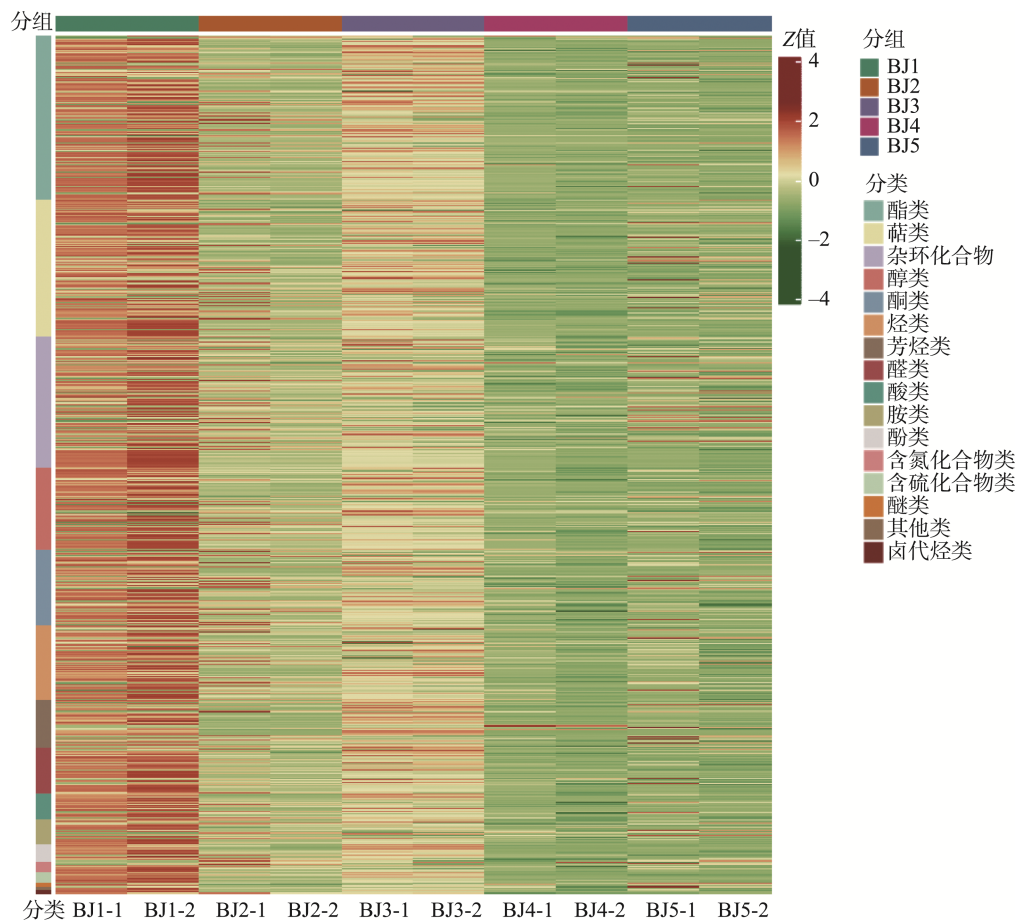


图3 化合物 CA 热图
Fig.3 CA heatmap of compound

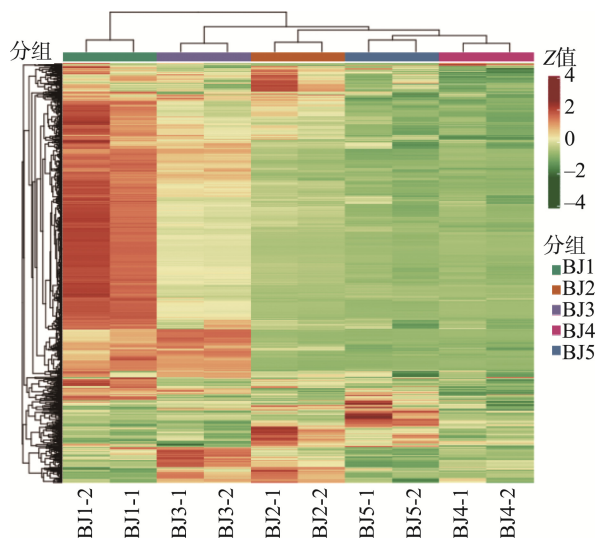


图 4 白酒样品 CA 热图
Fig.4 CA heatmap of liquor samples

重复相关性的评估指标。皮尔逊相关系数利用 R 软件的内置 cor 函数计算, r 越接近 1, 说明两个重复样品相关性越强。样品间相关性图见图 5, 纵向和对角线上分别代表不同样品的样品名称, 不同的颜色代表不同的皮尔逊相关系数大小, 颜色越红代表正相关性越强, 颜色越绿代表相关性越弱, 颜色越蓝代表负相关性越强, 同时两个样品之间的相关性系数大小标注在方格内。由图 5 可知, 样品的生物学重复的皮尔逊相关系数均为 1, 说明两个重复样品相关性强。

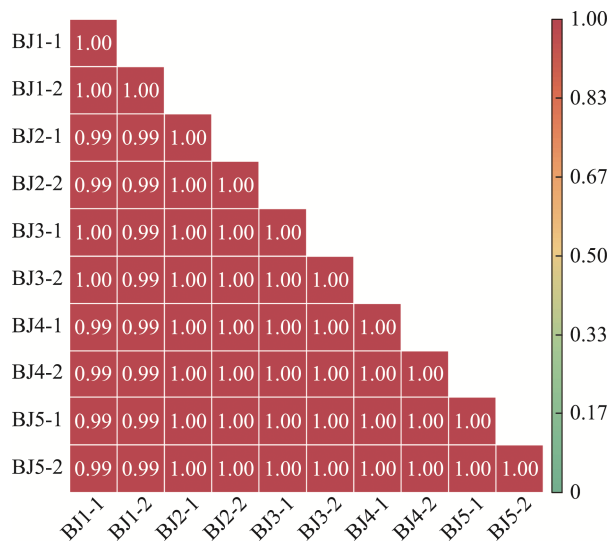


图 5 样品间相关性图
Fig.5 Correlation diagram between samples

2.5 差异化合物分析结果

由表 1 可知, 五粮液和五粮醇的差异显著化合物数目是 448 个, 其中 431 种化合物在五粮液中的含量显著高于五粮醇, 17 种化合物的含量显著低于五粮醇; 五粮液和五

粮春的差异显著化合物数目是 173 个, 其中 160 种化合物在五粮液中的含量显著高于五粮春, 13 种化合物的含量显著低于五粮春; 五粮液和五粮特曲的差异显著化合物数目是 531 个, 其中 523 种化合物在五粮液中的含量显著高于五粮特曲, 8 种化合物的含量显著低于五粮特曲; 五粮液和五粮头曲的差异显著化合物数目是 508 个, 其中 483 种化合物在五粮液中的含量显著高于五粮头曲, 25 种化合物的含量显著低于五粮头曲, 五粮液中差异显著化合物数目显著高于五粮醇、五粮春、五粮特曲和五粮头曲。

表 1 差异化合物数目统计表
Table 1 Statistics of the number of differential compounds

差异比较组信息	差异显著化合物数目	下调化合物数目	上调化合物数目
BJ1/BJ2	448	431	17
BJ1/BJ3	173	160	13
BJ1/BJ4	531	523	8
BJ1/BJ5	508	483	25
BJ2/BJ3	218	10	208
BJ2/BJ4	16	8	8
BJ2/BJ5	44	23	21
BJ3/BJ4	327	318	9
BJ3/BJ5	360	331	29
BJ4/BJ5	32	5	27

3 讨论与结论

基于非靶向代谢组学技术解析五粮液、五粮醇、五粮春、五粮特曲和五粮头曲 5 个系列白酒中挥发性组分特征及差异, 结果显示 5 款白酒共检出 900 种化合物, 不同五粮液白酒检出化合物的数量和组成存在差别。PCA 结果显示五粮液和五粮春两款白酒在第 1 主成分上明显区别于五粮醇、五粮特曲和五粮头曲 3 款白酒, 且五粮液与其他 4 款白酒在主成分二维分布图中距离均非常明显, 具有很好的区分特性。五粮液白酒在所有类别化合物中含量均比较显著, 其次是五粮春白酒。由样品聚类结果可看出 5 款白酒的品质存在显著性差异, 五粮液和五粮春在多数化合物中均存在含量优势。五粮液中差异显著化合物数目显著高于五粮醇、五粮春、五粮特曲和五粮头曲。

科学解析并阐明白酒中微量成分的组成与作用并加以控制是白酒现代化的重要任务, 将为丰富白酒酿造理论, 实现白酒品质提升奠定基础。白酒中的微量成分物质不仅赋予了白酒重要的特征风味与品质, 同时也让白酒具有一定的功能, 因此关于白酒微量成分的深入研究将为中国白酒风味与健康双导向酿造提供重要的技术保证, 提升白酒健康的科学内涵, 对于白酒品质与安全的提升, 以及传统白酒酿造产业的技术升级都具有重要的意义。“健康化”将是中国白酒的发展方向, 深入研究中国白酒中各种功能因子, 不断开发各种健康白酒将有助于消除消费者对白酒的误解。正确认识中国白酒, 并对中国白酒树立正确的价值

观和消费观,这不仅是中国白酒行业进一步发展的契机,也会是提升我们民族品牌在国际上竞争力的有利时机,引导广大消费者正确认识白酒,并对白酒树立正确的价值观和消费观,对于促进白酒行业进一步发展,提升我们的民族品牌在国际上的竞争力非常重要^[30]。

参考文献

- [1] JIN GY, ZHU Y, XU Y. Mystery behind Chinese liquor fermentation [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 63: 18–28.
- [2] XU Y, ZHAO J, LIU X, *et al.* Flavor mystery of Chinese traditional fermented baijiu: The great contribution of ester compounds [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130920.
- [3] RIMM EB, GIOVANNUCCI EL, WILLETT WC, *et al.* Prospective study of alcohol consumption and risk of coronary disease in men [J]. The Lancet, 1991, 338: 464–468.
- [4] WANG M, XIE Y, ZHAO S, *et al.* Association of alcohol consumption with prognosis of ischemic stroke by subtype in different follow-up periods: A hospital-based study in China [J]. Postgraduate Medicine, 2021, 133(2): 154–159.
- [5] DAVIES MJ, BAER DJ, JUDD JT, *et al.* Effects of moderate alcohol intake on fasting insulin and glucose concentrations and insulin sensitivity in postmenopausal women: A randomized controlled trial [J]. The Journal of the American Medical Association, 2002, 287: 2559–2562.
- [6] YUE F, ZHANG X, ZHANG H, *et al.* Association of alcohol consumption with the impaired β -cell function independent of body mass index among Chinese men [J]. Endocrine Journal, 2012, 59(5): 425–433.
- [7] 范文来, 徐岩, 黄永光. 白酒对健康有益还是有害? [J]. 酿酒科技, 2014(11): 1–5.
FAN WL, XU Y, HUANG YG. Is drinking harmful or beneficial to consumer's health? [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2014(11): 1–5.
- [8] 李钰, 张欢, 饶家权, 等. 适量白酒对动脉粥样硬化大鼠血脂及炎症因子的影响 [J]. 现代预防医学, 2017, 44(13): 2347–2350.
LI Y, ZHANG H, RAO JQ, *et al.* Effect of moderate drinking on blood lipids and inflammatory factors in rats with atherosclerosis [J]. Modern Preventive Medicine, 2017, 44(13): 2347–2350.
- [9] 李水红, 李奥利, 李思思, 等. 白酒中健康因子及其成因研究进展 [J]. 现代食品, 2022, 28(15): 53–57, 63.
LI SH, LI AOL, LI SS, *et al.* Research progress of the health factors and their causes in Chinese Baijiu [J]. Modern Food, 2022, 28(15): 53–57, 63.
- [10] 周金虎, 管健, 魏浩林, 等. 白酒中健康因子的研究进展 [J]. 酿酒科技, 2017(7): 90–94.
ZHOU JH, GUAN J, WEI HL, *et al.* Research progress in health factors in baijiu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2017(7): 90–94.
- [11] 孙宝国, 黄明泉, 王娟. 白酒风味化学与健康功效研究进展 [J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 1–13.
SUN BG, HUANG MQ, WANG J. Research progress on flavor chemistry and healthy function of baijiu [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 1–13.
- [12] 周新虎, 陈翔, 李磊, 等. 洋河绵柔型白酒风味特征成分与人体健康关系研究 [J]. 酿酒科技, 2014, 245(11): 31–34.
ZHOU XH, CHEN X, LI L, *et al.* The relationship between the flavoring components of soft-type yanghedaqu and people's health [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2014, 245(11): 31–34.
- [13] LAGUZZI F, BALDASSARRE D, VEGLIA F, *et al.* Alcohol consumption in relation to carotid subclinical atherosclerosis and its progression: Results from a European longitudinal multicentre study [J]. European Journal of Nutrition, 2021, 60(1): 123–134.
- [14] HUANG MQ, HUO JY, WU JH, *et al.* Structural characterization of a tetrapeptide from sesame flavor-type Baijiu and its interactions with aroma compounds [J]. Food Research International, 2019(119): 733–740.
- [15] ZHANG R, WU Q, XU Y, *et al.* Isolation, identification, and quantification of flichenysin, a novel nonvolatile compound in Chinese distilled spirits [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(10): C1907–C1915.
- [16] YUAN L, SI QY, XI HY, *et al.* Research progress on small peptides in Chinese Baijiu [J]. Functional Foods, 2017(7): 17–23.
- [17] 唐平, 山其木格, 王丽, 等. 白酒风味化学研究方法及其与酱香型白酒风味化学研究进展 [J]. 食品科学, 2020, 41(17): 315–324.
TANG P, SHAN QMG, WANG L, *et al.* A review of research methods in Baijiu flavor chemistry and recent progress in the flavor chemistry of maotai-flavored Baijiu [J]. Food Science, 2020, 41(17): 315–324.
- [18] 霍嘉颖, 黄明泉, 孙宝国, 等. 中国白酒中功能因子研究进展 [J]. 酿酒科技, 2017(9): 17–23.
HUO JY, HUANG MQ, SUN BG, *et al.* Research progress in functional factors in Baijiu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2017(9): 17–23.
- [19] QIN D, DUAN J, LI H, *et al.* Characterization and comparison of the aroma-active compounds on different grades of sesame-flavor Baijiu by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 79–88.
- [20] 滕明德. 气相色谱法鉴定酱香白酒 [J]. 现代食品, 2022, 28(18): 181–184.
TENG MD. Identification of jiangxiang baijiu by gas chromatography [J]. Modern Food, 2022, 28(18): 181–184.
- [21] 李永霞. 液相色谱分析法在白酒检测中的运用分析 [J]. 食品安全导刊, 2022(23): 184–186.
LI YX. Application analysis of liquid chromatography in baijiu detection [J]. China Food Safety Magazine, 2022(23): 184–186.
- [22] 韦露露, 张宗启, 陆伦维, 等. 基于白酒风味的现代分析技术及其生物活性研究进展 [J]. 中国酿造, 2021, 40(9): 12–18.
WEI LL, ZHANG ZQ, LU LW, *et al.* Research progress on modern analysis technology and biological activity based on Baijiu flavor [J]. China Brewing, 2021, 40(9): 12–18.
- [23] 施珂, 孙啸涛, 沈才洪, 等. 基于直接-气相色谱-嗅闻的整体感官评价模式分析泸香型白酒的关键香气成分 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 208–219.
SHI K, SUN XT, SHEN CH, *et al.* Study on the key aroma components of luzhou-flavor baijiu based on overall sensory evaluation model by direct-gas chromatography-olfaction [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 208–219.
- [24] 朱安然, 程平言, 尤小龙, 等. 白酒重要功能成分研究进展 [J]. 酿酒科技, 2023(8): 97–102.
ZHU ANR, CHENG PY, YOU XL, *et al.* Research progress in important functional components in Baijiu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(8): 97–102.
- [25] JIA W, FAN Z, DU A, *et al.* Recent advances in baijiu analysis by chromatography based technology: A review [J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126899.
- [26] 王瑛, 周森, 朱婷婷, 等. 液-液萃取结合 GC-MS 对牛栏山清香型白酒微量成分的分析 [J]. 酿酒科技, 2018(9): 101–104.
WANG Y, ZHOU S, ZHU TT, *et al.* Analysis of trace components in niulanshan qingxiang baijiu by liquid-liquid extraction combined with GC-MS [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2018(9): 101–104.
- [27] 王戎, 廖勤俭, 安明哲, 等. 白酒中酚酸及酚酸酯检测方法的研究 [J]. 酿酒科技, 2019(7): 110–113.
WANG R, LIAO QJ, AN MZ, *et al.* Detection methods of phenolic acids and phenolic acid esters in Baijiu [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019(7): 110–113.
- [28] 张萌, 田真, 魏建平, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法和固相微萃取-气相色谱-质谱法分析 6 种香型白酒挥发性风味物质 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 226–235.
ZHANG M, TIAN Z, WEI JP, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in 6 flavor types of baijiu based on gas chromatography-ion mobility spectrometry and solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 226–235.
- [29] 胡丽莎, 邱树毅, 戴怡凤. 直接进样与顶空固相微萃取结合 GC-MS 分析西凤酒中风味化合物 [J]. 广东化工, 2022, 49(16): 191–194.
HU LS, QIU SY, DAI YF. Direct injection and headspace solid-phase microextraction combined with GC-MS for the analysis of flavour compounds in Xi Feng Baijiu [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(16): 191–194.
- [30] 吴继红, 黄明泉, 郑福平, 等. 健康白酒的研究进展 [J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(2): 17–23.
WU JH, HUANG MQ, ZHENG FP, *et al.* Research progress of healthy Baijiu [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(2): 17–23.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)