

仪器分析在白酒有机成分检测中的应用

王泽霖, 刘刚, 王梦冉, 张培育, 宋爱新, 郝京诚, 崔基炜*

山东大学化学与化工学院, 胶体与界面化学教育部重点实验室, 济南 250100

摘要: 本实验将白酒组分分析与大学化学仪器分析实验相结合, 设计了包含气相色谱、核磁共振波谱和气相色谱-质谱联用的探究实验, 让学生通过文献检索、实验设计、实验探究, 对市面上常见的25种白酒的酒精度、风味成分进行定性及定量分析, 让学生深度参与到仪器分析实验课程中, 提高实验教学效果, 锻炼学生的综合思维能力和自主创新能力。

关键词: 仪器分析; 气相色谱; 核磁共振氢谱; 气-质联用; 白酒组分

中图分类号: G64; O6

Application of Instrumental Analysis in the Detection of Organic Components in Liquor

Zelin Wang, Gang Liu, Mengran Wang, Peiyu Zhang, Aixin Song, Jingcheng Hao, Jiwei Cui *

Key Laboratory of Colloid and Interface Chemistry of the Ministry of Education, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China.

Abstract: This study combines liquor component analysis with university-level chemistry instrumental analysis education. An exploratory experiment was designed incorporating gas chromatography, nuclear magnetic resonance spectroscopy, and gas chromatography-mass spectrometry. Through literature review, experimental design, and investigative research, students conducted qualitative and quantitative analyses of alcohol content and flavor compounds in 25 commercially available Chinese liquor samples. This approach facilitates active student engagement in instrumental analysis courses, improves teaching effectiveness, and develops students' comprehensive thinking skills and independent innovation capabilities.

Key Words: Instrumental analysis; Gas chromatography; Proton nuclear magnetic resonance; Gas chromatography-mass spectrometry; Liquor component

我国白酒历史悠久, 风味口感独特, 与白兰地、威士忌、伏特加、金酒、朗姆酒共称为世界六大蒸馏酒^[1]。由于自然环境、酿造原料、发酵剂种类和生产工艺的不同, 我国白酒形成了清香、浓香、酱香等12种不同香型的白酒类型^[2,3]。白酒的主要成分是水 and 乙醇(占98%–99%), 其他微量成分, 如风味物质和有害物质等, 占总量的1%–2%。酒精度是白酒生产及质量控制的一个重要指标, 按照白酒中乙醇含量可以分为高度白酒(> 50% Vol, 体积分数)、中度白酒(38%–50% Vol)与低度白酒(< 38% Vol)。对酒精度进行快速、准确测量是白酒生产过程中的基本要求。白酒中的微量成分如酯类、醇类、酚类、有机酸类、醛酮类等使白酒呈现出独特的香味^[4]。面对白酒中纷繁复杂的有机成

收稿: 2025-02-17; 录用: 2025-04-07; 网络发表: 2025-08-01

*通讯作者, Email: jwcu@sd.edu.cn

基金资助: 山东大学本科教育教学改革研究项目(2024Y120, 2024Y119, 2023Y101); 山东省本科教学改革研究项目(Z2021039, Z2024043, M2024007); 山东大学实验室建设与管理研究项目(sy20232204; sy20221201)

分,人们很难通过颜色、口感直观判断这些成分的有无及含量。近年来,不良生产厂家白酒品控不严,有害成分超标,“新瓶装旧酒”等报道时有发生,使得白酒的质量问题成为人们心头挥之不去的阴影。因此,利用仪器分析方法深入分析白酒组分及含量,让人们充分认识白酒中的成分具有重要意义。

仪器分析实验是化学专业本科生大二学习阶段的重要实验课程,是在学生已经初步掌握仪器分析基本原理的基础上进行的更为深入、细致的实践学习,对学生巩固仪器分析理论知识、掌握仪器分析基本操作、培养基本科研能力和创新素养发挥了重要作用。但由于本科生课程设置及实验教学的局限性,学生在仪器分析实验课上通常只能在规定时间内按照实验任务完成规定教学实验项目,教学内容的趣味性和探究性不足,学生参与实验学习的主动性和积极性不高,教学效果不够理想。

为了充分激发学生专业课学习兴趣,加强仪器分析实验课程与实际生产、生活的紧密联系,我们将白酒中成分的分析鉴定与仪器分析实验相结合,建设了供大二本科生进行自主探究的仪器分析综合实验。实验选取了市面上常见的25种白酒作为样品,让学生综合运用气相色谱仪、核磁共振波谱仪和气相色谱-质谱(气-质)联用仪对白酒的主要组成进行自拟题目的分析检测。学生自主设计超脱于教材的仪器分析实验方案,开展完整性和综合性较强的实验,让学生在认识仪器组成、熟悉仪器原理与操作的同时,培养学生的动手实践和思维创新能力以及基本的科研素养。以下是学生以白酒中酒精度的分析检测及白酒中微量有机组分的定性、定量分析为例,自主设计的自主探究型实验,主要目标是解决两个问题:一、市场上白酒包装所标的酒精度是否准确,如何利用仪器分析检测方法对白酒中的酒精含量进行快速定量分析;二、市面上白酒的种类繁多,不同价格、不同类型白酒之间是否存在有害物质或其他有机物质的明显差异。

本实验旨在运用现代仪器分析技术,针对白酒商品市场中的两个关键问题展开探究:通过定量分析方法,快速检测市售白酒样品中乙醇的含量,评估其与商品包装标识信息的符合度;基于不同价格区间与香型的白酒样本,探索其中潜在有害物质以及其他微量有机成分的含量分布。

1 实验目的

仪器分析实验是化学专业大二本科生的重要专业实验课程,实验教学内容的基础仪器分析实验和设计实验两部分组成。本实验是仪器分析实验中的设计实验部分,是在学生完成仪器分析基础实验的基础上,进一步开展的18学时设计型探究实验。此设计型仪器分析实验成绩由实验设计(30%)、实验操作(20%)、文章总结(25%)、PPT讲解(25%)四部分,在进一步巩固仪器分析基本原理和基本方法的同时,重点培养学生运用仪器分析基本原理和实验操作解决实际问题的能力。

本实验的主要教学目的:

- (1) 通过自主设计实验,选择合适、正确的方法解决白酒成分的分析问题,让学生自主设计实验方案,规划整个实验流程,熟练绘制及运用标准曲线,培养学生分析、解决实际问题的能力;
- (2) 通过仪器操作让学生学习并巩固色谱分析理论知识,学会不同仪器的调试和操作方法,提高学生动手能力;
- (3) 通过让学生自主分析实验结果,处理气相、核磁和气-质联用数据,提升学生自主探索以及数据处理、分析能力。

2 实验部分

2.1 主要试剂

选取市面上常见的25种白酒作为白酒分析样品(表1),无水乙醇(国药,分析纯)。

2.2 主要仪器

气相色谱仪(Agilent, 7820A, 美国)。气相色谱-质谱联用仪(岛津, GCMS-QP2020NX, 日本)。高分辨台式核磁共振波谱仪(Nanalysis, NMRReady-60Pro, 加拿大)。

表1 白酒样品

序号	名称	酒精度/%Vol	序号	名称	酒精度/%Vol
1	百年汾藏	53	14	古贝春	42
2	章红莲子酒	50	15	水井坊井台	52
3	杏宇原浆酒	42	16	洋河大曲	38
4	私藏沙头	42	17	泸州福	42
5	红星二锅头	56	18	稳如泰山中天门	51.8
6	北京军功二锅头	45	19	西凤银醇酒	38
7	水晶剑南	52	20	金泰山	36
8	水井坊臻酿八号	52	21	迎福郎四川迎宾郎酒	52
9	国窖1573	52	22	茅台白金酒	43
10	国窖1573	38	23	国台	53
11	沱牌12酒窖	42	24	半江半湖	53
12	金六福	50	25	华樽杯	53
13	冠宜春	52			

2.3 仪器分析条件

气相色谱实验条件：色谱柱：30 m × 0.25 mm × 0.25 μm DB-WAX聚乙二醇毛细管柱；色谱柱温度：初温25 °C，保持6 min，以5.0 °C·min⁻¹升到75 °C，保持2 min，然后以7 °C·min⁻¹升到160 °C，保持6 min，再以25 °C·min⁻¹升到230 °C，保持12 min；进样口温度：240 °C；测器温度：250 °C；载气流量：初速0.35 mL·min⁻¹，保持20 min，以0.05 mL·min⁻¹速率升到0.43 mL·min⁻¹，保持30 min；进样量：1.0 μL；分流比：30 : 1；检测器：火焰离子化检测器(Flame Ionization Detector, FID)检测器。

核磁氢谱实验条件：观察核：¹H；锁定核：¹H；溶剂：H₂O；实验：1D；扫描次数：16；扫描点数：2048；扫描延迟：1.0 s；接收增益：14；检测脉冲：激发角度为80.17°的单脉冲。

气-质联用实验条件：色谱柱及色谱分析条件同气相色谱实验条件，载气：氦气，控制模式：线速，压力：11.5 kPa，总流量：21.8 mL·min⁻¹，色谱柱流量：0.61 mL·min⁻¹，线速：27.8 cm·s⁻¹，吹扫流量：3.0 mL·min⁻¹，分流比：30.0，进料量：1 μL。质谱条件：离子源温度：200 °C；接口温度：250 °C；溶剂延迟时间：1 min；开始时间：3.00 min；结束时间：50.94 min；扫描速度：1666。

3 结果与讨论

3.1 酒精度分析

酒精度是白酒的一个重要指标，是指白酒中乙醇所占体积百分比，通常以20 °C的体积比表示。白酒酒精度的传统测量方法有密度瓶法、酒度比重计法。密度瓶法，是用密度瓶测出试样(酒精水溶液)20 °C时的密度，查表求得在20 °C时乙醇的体积分数，即为酒精度。酒度比重计法是根据乙醇的密度小于水，所以酒精度越大，酒的密度越小，浮力也越小，通过测量这种差异而算出乙醇的含量，再将结果进行温度校正，求得在20 °C时乙醇的体积分数，即为酒精度。但这两种方法需要的白酒样品较多，误差较大且会造成白酒样品的损失。

为了简捷、快速、准确地进行检测，结合仪器分析化学实验的教学内容，我们选择了常用的气相色谱仪和低场核磁共振波谱仪对白酒的酒精度进行定量分析。利用分析仪器定量检测酒精度的实验中，通常采用三种方法：标准曲线法、外标法、内标法。标准曲线法是通过测量乙醇标准样品得到线性回归方程，利用标准曲线和待测样品的测量结果求得白酒样品中乙醇含量。外标法使用外部参考样品，通过外部参考样品来校准实际样品，即可得到结果。内标法需在样品中加入一定量的已

知浓度内部参考物,通过参考物与测量结果的对比得到样品中乙醇含量。本实验我们选择学生较为熟悉的标准曲线法,分别取20、25、30、35、40、45、50、55、60、65、70、75、80、90 mL的无水乙醇于100 mL容量瓶中用纯净水定容,得到酒精度为20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、90%的乙醇标准溶液。利用乙醇标准溶液得到酒精度检测的标准曲线。

3.1.1 气相色谱法测量白酒酒精度

气相色谱法是利用气体作流动相的色谱分离分析方法,利用样品各组分与固定相相互作用的差异实现样品中各组分的分离及鉴定。可以通过不同组分的峰面积和保留时间进行定量和定性分析。气相色谱法具有高效、灵敏、分辨率高等优点,适用于多种有机物和无机物的分析,特别是那些易被气化的物质。白酒中各组分都具有较高的挥发性,水和乙醇的含量通常超过98%,其余微量有机成分的沸点也相对较低,因此气相色谱分析法可以对白酒中乙醇及各有机组分进行定量和定性分析。与密度瓶法、酒精计法等传统酒精度测量方法相比,气相色谱测量白酒酒精度的方法具有准确、样品用量少的优势。

在气相色谱分析中,为实现白酒样品的高效分离,我们借鉴了赵文武等人的气相色谱分析方法,利用DB-WAX聚乙二醇色谱柱进行酒精度的分析鉴定^[5]。图1a为1号白酒样品的气相色谱分析结果,白酒中各组分分离效果较好,其中乙醇的保留时间为23.055 min,完全满足本实验中酒精度分析检测的实验要求。

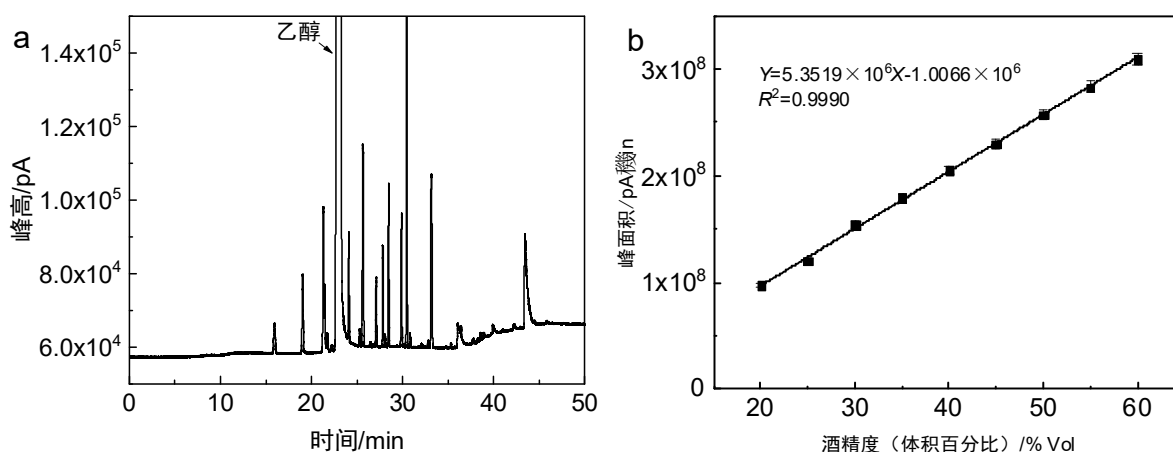


图1 (a) 1号样品气相色谱; (b) 酒精度标准曲线(气相色谱法)

将标准样品中乙醇的气相色谱峰面积和酒精度进行线性关系拟合。以酒精度为横坐标,峰面积为纵坐标,得到乙醇的气相色谱标准曲线(图1b): $Y = 5.3519 \times 10^6 X - 1.0066 \times 10^6$, 线性相关系数: $R^2 = 0.9990$ 。乙醇体积百分浓度在20%–60%范围内线性关系良好。

对25种白酒样品进行气相色谱分析检测,利用乙醇的气相色谱标准曲线求得不同样品的准确酒精度。分析结果见表2,大部分白酒样品的瓶标酒精度和分析检测出的酒精度偏差在5%以内,6号(-9.47%)、10号(-8.53%)、20号(-8.03%)偏差相对较大。

3.1.2 核磁共振氢谱法测量白酒酒精度

核磁共振波谱是一种基于具有自旋性质的原子核在外磁场作用下,吸收射频辐射而产生能级跃迁的谱学技术。核磁共振技术可以用来确定分子结构,也可以用来进行定性或定量检测。核磁共振氢谱法可以利用分子中¹H的核磁共振效应对物质的化学结构和化学键类型进行分析检测。由于测试过程中只对样品施加了磁场,所以测试过程无损,极大地减小了对白酒样品的影响。在平时教学中,我们主要利用低场核磁共振波谱仪定性分析物质的结构,对其定量的功能使用较少。白酒中的主要

成分水和乙醇在氢谱中都有极其明显的特征谱峰，相互之间干扰较少，且白酒中微量成分的峰面积较小甚至没有，所以我们尝试利用低场核磁氢谱对白酒中酒精含量进行定量检测。

表2 白酒样品的酒精度对照结果(气相色谱法)

序号	测量酒精度(体积百分比)/%Vol	偏差/%	序号	测量酒精度(体积百分比)/%Vol	偏差/%
1	51.31	-3.20	14	39.89	-5.01
2	48.75	-2.49	15	49.28	-5.23
3	40.32	-4.01	16	36.25	-4.61
4	39.09	-6.93	17	39.73	-5.40
5	53.54	-4.39	18	49.50	-4.44
6	40.74	-9.47	19	36.80	-3.15
7	49.64	-4.55	20	33.11	-8.03
8	49.15	-5.49	21	49.85	-4.14
9	48.63	-6.48	22	41.12	-4.37
10	34.76	-8.53	23	50.09	-5.50
11	40.63	-3.25	24	49.77	-6.09
12	48.11	-3.78	25	50.77	-4.21
13	49.91	-4.03			

核磁共振氢谱扫描速度快，测量时间短，比气相色谱法更为便捷。但核磁分析对温度的稳定性要求较高，检测温度对峰面积影响较大，通常采用内标法或外标法会取得较好的实验结果^[6]。本实验中，实验室环境稳定性较好，环境温度变化小，为了兼顾样品的无损检测，我们要求学生采用标准曲线法测量酒精度。

图2a为50%乙醇标准溶液的核磁氢谱结果。将谱图中水峰(H¹)的化学位移 δ 定为4.79，乙醇甲基峰(H³)的化学位移 δ 在1.00–1.50之间，由于白酒中乙醇所占的百分含量远大于其他有机物，为了简化处理，近似认为氢谱中的甲基都源自乙醇。

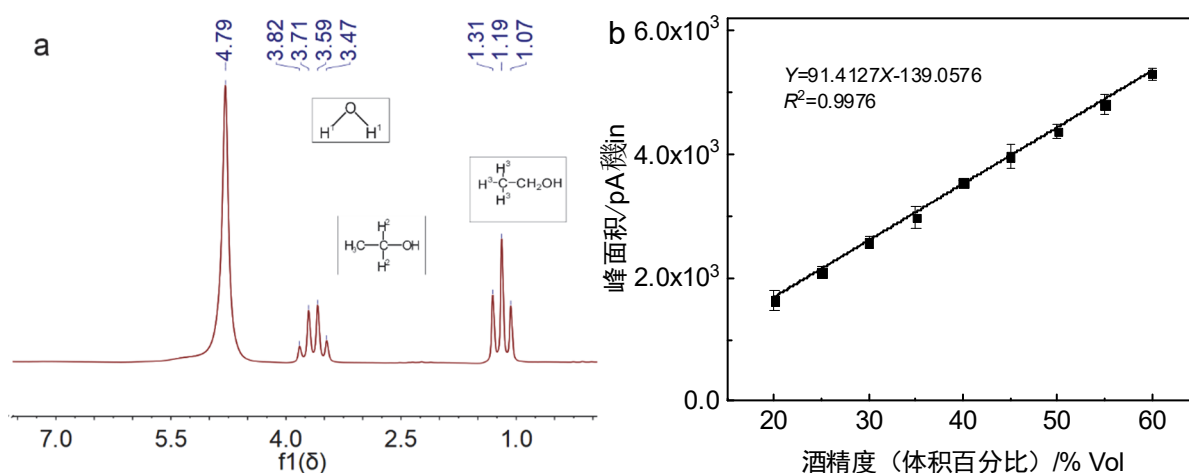


图2 (a) 体积分数50%乙醇水溶液的核磁共振氢谱；(b) 酒精度标准曲线(核磁共振氢谱法)

以乙醇甲基氢谱峰积分面积的绝对值为纵坐标，酒精度为横坐标，得到图2b所示的乙醇核磁氢谱标准曲线： $Y = 91.4127X - 139.0576$ ， $R^2 = 0.9976$ ，甲基氢谱峰面积大小与乙醇浓度具有较好线性

相关。

利用相同方法得到25种白酒样品甲基峰积分面积，代入标准方程可得样品酒精度。详细结果见表3，由表中数据可知测量的酒精度与瓶标酒精度符合性较高，大部分样品的偏差都小于1%。

表3 白酒样品的酒精度对照结果(核磁共振氢谱法)

序号	测量酒精度(体积百分比)/%Vol	偏差/%	序号	测量酒精度(体积百分比)/%Vol	偏差/%
1	52.48	-0.973	14	41.88	-0.290
2	49.88	-0.240	15	51.70	-0.584
3	41.75	-0.599	16	37.63	-0.980
4	41.60	-0.955	17	41.14	-2.048
5	55.72	-0.505	18	51.38	-0.817
6	44.59	-0.907	19	37.39	-1.610
7	52.17	0.317	20	35.97	-0.079
8	51.48	-1.007	21	51.55	-0.872
9	51.58	-0.815	22	42.73	-0.637
10	37.78	-0.586	23	52.99	-0.013
11	41.91	-0.219	24	53.02	0.044
12	50.05	0.100	25	53.02	0.044
13	52.06	0.106			

综上所述，与传统密度瓶法、酒度比重计法相比，气相色谱法和核磁共振氢谱法都可以准确、便捷地检测白酒中的酒精度，试剂用量少、快速、准确等特点显著。两种方法相比，气相色谱法受环境温度影响较小，同时可以将白酒中微量有机组分分离并检测出来，可以在谱图中清晰观察到各种物质的色谱峰。但样品分析速度较慢，将不同有机物完全分开需要合理设计分析方法，分析时间较长。与气相色谱法相比，核磁共振氢谱法分析准确度高，用时短，在扫描次数较少(如扫描16次)的情况下，核磁共振氢谱仪的分析速度较快，通常不超过2分钟，而且分析过程不会造成样品的损失。但核磁共振氢谱法无法分析白酒中的微量有机成分，白酒中除乙醇之外的有机成分较多时会造成较大的误差。核磁共振测试对环境温度要求较高，温度波动较大时不建议使用此方法。另外，利用核磁共振氢谱法检测白酒酒精度的方法具有一定的局限性，设备投入过高，酒精度适用范围较窄，不适用于低酒精度饮料如啤酒、果酒等的测量。

3.2 气-质联用法分析白酒中的微量成分

白酒中除了含大量水和乙醇外，还含有微量有机成分，其对白酒的品质及口感风味影响较大。白酒中含有的微量酯类、醇类、有机酸及少量的醛类物是构成白酒典型风味和口感的物质基础，决定着白酒的风格和质量，被称为风味物质^[7,8]。酯类物质是白酒香气的主体，是白酒的呈味物质，其构成和配比是影响酒体风格和品质的关键因素^[9]。少量的醛类和酮类物质可以协调酯类的香味，有的醛类物质有较强的刺激性，可借此增大酒劲并衬托香气，例如，糠醛能够使酒类具有焦香或糊香的特征^[10]。对白酒中除乙醇外的微量有机成分进行分析鉴定也是本实验探究的重点，要求同学们利用气相色谱-质谱联用技术进行白酒中有害物质和风味物质的分析鉴定。

气相色谱-质谱联用检测技术是一种非常便捷的分析技术，样品可以在气相色谱中分离，在质谱离子源当中进行离子化，生成特征碎片离子，根据碎片离子的质荷比差异在电场中由检测器获得相应的质谱图，通过与标准谱图的比对进行定性鉴定^[11]。该方法灵敏度高，通用性强，检测范围广，适合用来检测白酒中丰富多样的微量物质^[12]。

采用2.3小节中的气-质联用分析条件对25种白酒样品进行分析, 其中, 7号样品的有机成分含量列于表4。为了定量比较不同白酒中各微量有机成分的含量差异, 我们将各微量组分峰面积与浓度相互关系的校正因子都设为1, 利用峰面积归一化法进行粗略比较。分析时我们只着重分析峰面积百分比大于等于0.01%的有机物质。由表4可以发现, 7号白酒样含有79种有机成分, 含量大于0.01%的有33种, 其中乙醇含量最多, 达到95.89%, 正丙醇、正丁醇、正戊醇、正己醇等醇类物质的总含量为1.22%, 乙酸乙酯、丁酸乙酯、戊酸乙酯、己酸乙酯、庚酸乙酯、辛酸乙酯、乳酸乙酯等酯类的总含量为1.67%, 乙酸、正己酸等有机酸的总含量为0.55%。

表4 7号样品的有机成分含量

序号	名称	含量/%	序号	名称	含量/%
1	丙酮	0.16	18	己酸乙酯	0.9
2	乙酸乙酯	0.35	19	正戊醇	0.02
3	1,1-二乙氧基乙烷	0.17	20	3-羟基-2-丁酮	0.01
4	甲醇	0.01	21	庚酸乙酯	0.01
5	异戊醛	0.01	22	乳酸乙酯	0.29
6	乙醇	95.89	23	正己醇	0.16
7	2-戊酮	0.18	24	辛酸乙酯	0.01
8	(R)-(-)-仲丁醇	0.02	25	乙酸	0.11
9	丁酸乙酯	0.05	26	糠醛	0.07
10	正丙醇	0.29	27	己酸2-羟乙基酯	0.01
11	2-己酮	0.01	28	丙二醇	0.01
12	1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷	0.01	29	己酸己酯	0.01
13	异丁醇	0.15	30	正己酸	0.44
14	戊酸乙酯	0.02	31	3-甲基-1-己醇	0.01
15	(S)-(+)-2-戊醇	0.16	32	棕榈酸乙酯	0.01
16	正丁醇	0.22	33	亚油酸乙酯	0.01
17	异戊醇	0.18			

白酒中的风味物质数量繁多, 为简化风味物质的分析检测, 本实验将有害物质以外的微量有机成分都视为风味物质。图3a为25个白酒样品中风味物质的统计结果。分析发现, 风味物质的种类及含量与白酒香型关系密切。清香型白酒的平均风味物质的含量为1.67%, 浓香型为3.40%, 酱香型为4.04%, 清香型白酒平均含有13种风味物质, 浓香型22种, 酱香型25种。随香味增重, 风味物质的种类和含量都明显增多。

为进一步探究不同香型白酒中风味物质的组成, 我们详细分析了白酒中酯类、醇类和有机酸类物质的含量。在酯类物质的分析中, 重点关注了乙酸乙酯、乳酸乙酯^[13-16]、己酸乙酯^[17,18]等白酒中最常见的几种酯类物质。图3b为白酒样品中乙酸乙酯、乳酸乙酯、己酸乙酯、总醇类和总有机酸类的平均含量。通过图3b可以发现, 不同类型白酒中, 酯类通常是白酒风味物质的主要组成部分, 并且不同香型中酯类物质的主要成分各不相同。清香型白酒中, 乙酸乙酯是其典型风格的主体物质, 含量约为0.49%, 远高于其他风味物质, 总醇类和乳酸乙酯含量次之, 有机酸类物质含量最少; 浓香型白酒中, 己酸乙酯含量最高, 平均含量超过0.80%, 有机酸含量次之, 超过0.60%, 其次是醇类、乙酸乙酯和乳酸乙酯; 酱香型白酒中, 醇类物质含量高(主要为正丙醇), 其次是乙酸乙酯和乳酸乙酯, 己酸乙酯含量最少。

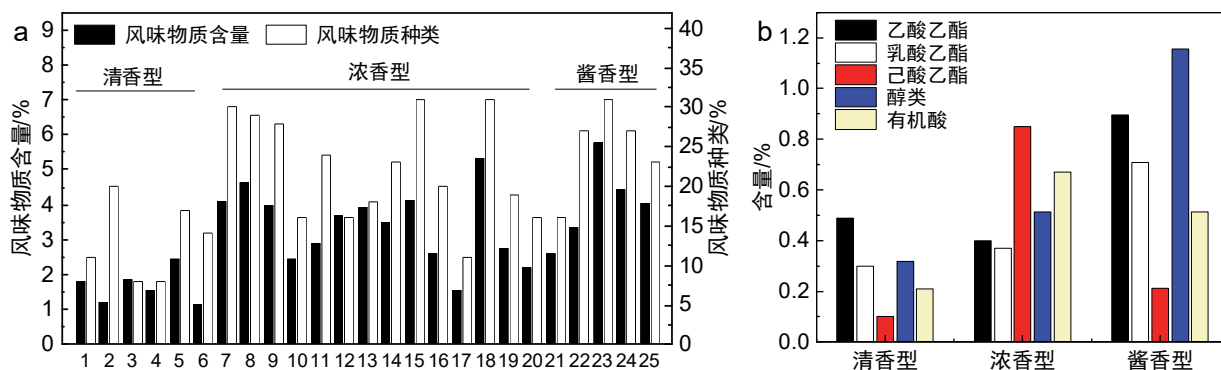


图3 (a) 样品中风味物质含量和种类; (b) 不同香型白酒中主要风味物质的含量均值

4 实验组织运行及建议

本实验是综合性化学实验, 主要目的是提高学生利用常见仪器分析检测物质及含量的能力, 主要内容为利用气相色谱仪、低场核磁共振波谱仪分别检测酒精度, 利用气-质联用仪分析检测风味物质种类及含量。通过综合运用所学知识, 分析日常用品的成分及含量, 激发学生科研兴趣。实验自2022年开始运行, 积累了比较丰富的经验, 建议如下:

(1) 本实验以小组形式开展, 建议每组3-4人, 分工合作, 共同完成实验任务。通过资源共享, 达到合作共赢的目的。

(2) 建议学生在实验前回顾色谱分析理论知识, 以便快速开展实验; 学会常见的数据处理工具的使用, 实现数据快速处理。

(3) 乙醇具有较高的挥发性, 实验过程所配制的标准溶液及所用样品取用完成后应立即密封保存。

(4) 实验前需采用滤膜过滤样品, 以免污染设备。

5 结语

本实验中, 我们以白酒中各有机成分的分析鉴定为出发点, 让学生利用实验室常见的气相色谱仪、低场核磁共振波谱仪、气-质联用仪自主设计实验, 探讨了白酒中酒精度检测及微量有机成分组成的测定方法。学生发现白酒中的有机成分主要是乙醇和各种风味物质。本实验借助气相色谱和核磁共振氢谱, 运用标准曲线对白酒中乙醇含量进行了细致的分析总结, 验证了25种白酒的酒精度。另外, 使用定性能力较强的气-质联用仪对白酒中各种微量有机组分进行了分析, 发现了白酒中主要的风味物质为乙酸乙酯、乳酸乙酯、己酸乙酯、总醇类和有机酸, 找到了香型和风味物质之间的关系。在三种香型的白酒中, 清香型、浓香型、酱香型风味物质的含量依次增大, 种类也逐渐增多。

通过此次实验, 培养了学生自主设计和完成实验的能力, 让学生通过一次贴近实战的探究实验, 深度参与到仪器分析课程中来, 提高了实验教学效果, 锻炼了学生综合思维能力、自主创新能力和解决实际问题的能力。

参 考 文 献

- [1] 肖冬光. 白酒生产技术. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [2] 李维青. 酿酒, 2007, 34 (2), 5.
- [3] Zheng, X. W.; Han, B. Z. *J. Ethnic Foods* 2016, 3 (1), 19.
- [4] 郭学武, 范恩帝, 马冰涛, 李泽霞, 张煜行, 张志民, 陈叶福, 肖冬光. 食品科学, 2020, 41 (11), 267.
- [5] 赵文武, 陈梦元. 现代食品, 2020, 6, 198.

- [6] 许紫薇, 冯翠萍, 樊双喜, 张柏林, 赵宏飞, 刘一诺, 岳红卫, 吉鑫, 张松祥, 陆玮, 等. 食品与发酵工业, **2022**, *48* (21), 254.
- [7] 丁海龙, 敖灵, 邓波, 敖宗华, 宋川, 刘淼, 林锋. 中国酿造, **2018**, *37* (2), 11.
- [8] 唐平, 山其木格, 王丽, 王凡, 李长文, 卢君. 食品科学, **2020**, *41* (17), 315.
- [9] Xu, Y.; Zhao, J.; Liu, X.; Zhang, C.; Zhao, Z.; Li, X.; Sun, B. *Food Chem.* **2022**, *369*, 130920.
- [10] 陈志宏, 张余, 徐有山. 中国酿造, **2020**, *39* (6), 13.
- [11] 龚红升, 廖列文, 胡文斌, 尹国强. 食品与机械, **2013**, *29* (5), 245.
- [12] 张馨予, 陈芳芳. 现代农业科技, **2011**, *10*, 13.
- [13] 王乃军, 马美荣, 赵国锋, 李晶晶, 李洪媛. 酿酒科技, **2023**, No. 11, 65.
- [14] Dong, J.; Hong, K. Q.; Hao, A. L.; Zhang, C. Y.; Fu, X. M.; Wang, P. F.; Xiao, D. G. *Biotechnol. Progr.* **2018**, *34* (2), 328.
- [15] 刘明, 李袁林. 酿酒科技, **2023**, No. 5, 113.
- [16] Ren, J. Y.; Liu, G.; Chen, Y. F.; Jiang, S.; Ma, Y. R.; Zheng, P.; Guo, X. W.; Xiao, D. G. *J. Agric. Food. Chem.* **2020**, *68* (47), 13863.
- [17] 赵宏朋, 雷康, 吴华星, 李浩, 熊峰, 陈勇, 邱毅, 廖俊羊, 朱亮. 酿酒科技, **2024**, No. 1, 107.
- [18] 徐岩, 范文来, 王海燕, 吴群. 酿酒科技, **2010**, No. 11, 73.