

微波辐射对原瓶包装酱香型白酒 主要风味物质的影响

黄纪民^{1,2,3} 覃海波^{1,2,3} 吴钊龙^{1,2,3} 赵郭慧⁴ 梁金枝⁴
李秉正^{1,2,3} 黄志民^{1,2}

(1. 广西科学院非粮生物质能技术全国重点实验室, 广西 南宁 530007; 2. 广西微波先进制造技术重点实验室, 广西 南宁 530007; 3. 广西科学院大健康研究所, 广西 南宁 530007;
4. 南宁学院食品与质量工程学院, 广西 南宁 530200)

摘要: [目的] 为提升原瓶包装酱香型白酒的品质与市场价值, 研究微波辐射对其陈化过程中主要风味物质的影响规律, 优化微波催陈工艺。[方法] 对酱香型白酒样品进行微波辐射, 研究微波辐射时间、微波辐射温度及微波功率密度等因素对处理 28 d 后样品中乙酸乙酯、乳酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乙酸、乙醛等主要风味物质含量的影响。[结果] 随微波辐射时间延长, 酯类含量呈先升高后波动下降趋势, 乙酸与乙醛含量则先升高后下降再升高; 随着微波辐射温度增加, 酯类与乙酸含量先升高随后小幅降低再升至新高, 乙醛含量则呈先升高后波动降低; 随着微波功率密度增加, 酯类、乙酸及乙醛含量均先增加后减少。根据研究结果, 样品经微波辐射时间 45 min、微波辐射温度 50 °C、微波功率密度 1.0 W/mL 的较优工艺辐射后, 与未处理样品相比, 乙酸乙酯增加 10.1%, 乳酸乙酯增加 10.0%, 丁酸乙酯增加 8.6%, 己酸乙酯增加 7.9%, 乙醛增加 9.7%。[结论] 在较优工艺参数下, 微波辐射可促进酯类、酸类等物质生成, 加速酱香型白酒的陈化进程。

关键词: 白酒; 酱香型; 微波; 催陈; 酯; 乙酸; 乙醛

Effects of microwave irradiation on major flavor compounds in Maotai-flavor Baijiu with original bottled packaging

Huang Jimin^{1,2,3} Qin Haibo^{1,2,3} Wu Zhaolong^{1,2,3} Zhao Guohui⁴ Liang Jinzhi⁴
Li Bingzheng^{1,2,3} Huang Zhimin^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Non-Food Biomass Energy Technology, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Microwave Advanced Manufacturing Technology, Nanning, Guangxi 530007, China; 3. Institute of Grand Health, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 4. College of Food Science and Quality Engineering, Nanning University, Nanning, Guangxi 530200, China)

Abstract: [Objective] To enhance the quality and market value of original bottled Maotai-flavored Baijiu, this study investigates the effects of microwave irradiation on major flavor compounds during the aging process and optimizes the microwave-assisted aging process. [Methods] Maotai-flavored Baijiu samples were subjected to microwave irradiation, and the effects of irradiation time, irradiation temperature, and power density on the contents of key flavor compounds, including ethyl acetate, ethyl lactate, ethyl butyrate, ethyl hexanoate, acetic acid, and acetaldehyde, were examined in samples stored for 28 days after treatment. [Results] With increasing irradiation time, ester contents first increased and then fluctuated and decreased, while acetic acid and acetaldehyde contents first increased, then decreased, and increased again. As the irradiation temperature increased, ester and acetic acid contents first increased, then slightly

基金项目: 广西科技基地和人才专项 (编号: 桂科 AD23026033); 广西科学院科技发展基金项目 (编号: 2023YFJ2201)

通信作者: 黄志民 (1965—), 男, 广西科学院研究员, 博士。E-mail: hzming@163.com

收稿日期: 2025-04-09 **改回日期:** 2025-12-08

引用格式: 黄纪民, 覃海波, 吴钊龙, 等. 微波辐射对原瓶包装酱香型白酒主要风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 214-219.

Citation: Huang Jimin, Qin Haibo, Wu Zhaolong, et al. Effects of microwave irradiation on major flavor compounds in Maotai-flavor Baijiu with original bottled packaging[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 214-219.

decreased, and finally reached a new peak, whereas acetaldehyde content first increased and then fluctuated and decreased. With increasing power density, the contents of esters, acetic acid, and acetaldehyde all first increased and then decreased. According to the results, under the optimal microwave conditions of 45 min irradiation time, 50 °C irradiation temperature, and 1.0 W/mL power density, ethyl acetate, ethyl lactate, ethyl butyrate, ethyl hexanoate, and acetic acid increased by 10.1%, 10.0%, 8.6%, 7.9%, and 9.7%, respectively, compared with untreated samples. **[Conclusion]** Under the optimized process parameters, microwave irradiation promotes the formation of esters and acids, thereby accelerating the aging process of Maotai-flavored Baijiu.

Keywords: Baijiu; Maotai-flavor; microwave irradiation; accelerated aging; ester; acetic acid; acetaldehyde

白酒是以粮谷为主要原料,以大曲、小曲、麸曲、酶制剂及酵母等为糖化发酵剂,经蒸煮、糖化、发酵、蒸馏、陈酿、勾调而成的蒸馏酒^[1],是世界上最古老的蒸馏酒之一^[2],以其独特的酿造工艺、丰富的香型和深远的文化底蕴而闻名。

新酿造的白酒通常具有浓烈且辛辣刺激的口感,酒香不足、整体风味欠佳。为此,需经过一定时间的陈化。在此过程中,酒体中的醇类物质逐渐转化为醛类与酸类,并参与酯化反应。酯类物质的积累赋予酒体丰富香气,酸类物质则有效中和辛辣感,平衡甜味与苦味,同时提升口感的层次性。最终使白酒呈现出香气协调、醇厚绵柔的平衡状态,实现品质的全面提升^[3]。

由于自然陈化耗时长、损耗大、占地面积广、资金积压严重,因此,白酒的人工催陈技术受到关注,多种技术手段被应用到相关研究中。邱重晏等^[4]使用紫外线处理清香型白酒 70 min,结果酒的总酯质量浓度由 1.000 g/L 升至 1.329 g/L,但活化程度不稳定、批次处理产能有限;He 等^[5]发现,浓香型白酒经 3 kGy 的 ⁶⁰Co 辐射后,能促进白酒中醛类和酸类物质的生成,从而促进陈酿的风味,但辐射后白酒中糠醛和亚油酸乙酯的含量与自然老化过程中的变化不一致;Zhu 等^[6]采用高压(HP)处理白酒,经电子鼻分析发现,在 400 MPa、15 min HP 处理条件下总酯达到最高水平,增加了 5.7%,总酸含量降低,但 HP 处理导致固体含量增加,影响外观;Zhang 等^[7]采用 100 Hz/10 W 电场处理邛崃、泸州和宜宾 3 个白酒样品后,样品中己酸乙酯含量分别增加了 36.38%, 17.32%, 25.16%;魏群舒等^[8]发现,超声波可加速酒体分子水解,形成更多羟自由基加速反应,在超声功率 180 W、超声温度 40 °C、超声处理 40 min 下处理的米香型白酒质感与传统陈酿酒相似;王本盛等^[9]通过高能电子束对酱香型白酒进行不同剂量辐射,发现在辐射剂量 8 kGy 时催陈效果最佳,其中酸类物质增加明显,酯类物质有所下降;醛类物质中乙醛、乙缩醛增加明显;张大力等^[10]、Liu 等^[11]发现,高压、超高压处理对高品质酒品质提升不明显且可能破坏原有品质;Jia 等^[12]发现,采用强度 150 mT 的磁场处理后的凤香型白酒的风味较佳;Dai 等^[13]发现,53%vol 酱香型郎酒经 0.7 T 脉冲电磁场处理后味道比较醇厚,但香气变化趋势较小;Xiong 等^[14]发现,经 0.8 V 氧化电位处理 20 min 后的现酿白酒与 1 年自然陈化白酒在电子舌比较数据点上无显著差异。

微波催陈利用高频电磁场(常用 915 MHz 或

2 450 MHz 频率)诱导白酒中极性分子(如乙醇和水)发生高频取向极化与振荡,通过介电热效应与非热效应协同加速酒体陈化。热效应方面,微波能转化为热能,加速酯化、氧化、缩合等陈酿相关反应,同时促使低沸点醛类与硫化物挥发,降低新酒辛辣感与异味;非热效应方面,微波可瞬时打断缔合水分子团的氢键结构,使缔合水释放,促进乙醇与水分子重新缔合,形成更稳定的大分子缔合群,从而缩短陈化周期^[15-16]。与传统自然陈酿相比,微波催陈具有处理时间短、可控性强、操作简便等优势。杨婷等^[17]将白酒在不同的微波条件下进行处理,通过检测其总酯、总酸、醛类等理化指标的变化,发现(40±2) °C、45 min 为最佳微波催陈工艺条件;江倩等^[18]考察了微波辐射处理对浓香型白酒中挥发性物质的影响,发现新酿优级酒在微波辐射温度 45 °C、微波辐射时间 80 min、微波辐射功率 500 W 条件下,其挥发性物质的种类及比例与 4 年中级酒最接近,与新酿优级酒相比,最佳微波辐射酒以及 4 年中级酒中酯类含量分别上升 31.20% 和 21.57%,醇类含量分别下降 21.99% 和 47.64%,醛类含量分别下降 14.18% 和 9.00%,酸类含量分别下降 18.07% 和 22.90%;代佳慧等^[19]使用微波辐射对浓香型白酒进行不同温度的处理,结果表明,经微波辐射(500 W、50 °C、60 min)的 4 年陈酿中级原酒的乙酸乙酯提升了约 13.3%;江倩等^[20]以浓香型杜康酒为研究对象,新酿优级原酒在 45 °C、100 min 的微波辐射条件下,乙醛含量最低,与未处理酒样相比减少了 12.57 mg/100 mL;4 年优级陈酿原酒在 50 °C、100 min 的微波辐射条件下,乙醛含量最低,与未处理酒样相比减少了 16.75 mg/100 mL。

以上研究表明,人工催陈技术对白酒陈化有不同程度的促进作用,但值得注意的是,现有研究多聚焦于即时成分变化,而对处理后酒体存放稳定后的状态关注不足。有研究发现,白酒在催陈处理后会出现“返生”,即其物理化学状态有时会发生逆转,回归到初始状态或变得更差。如:王本盛等^[9]发现,使用 2, 6, 8 kGy 高能电子束催化后的酱香型白酒,其乙酸乙酯含量在存放 90 d 后比存放 30 d 时减少;Jia 等^[21]发现,经过 5.9 kGy 的 ⁶⁰Co- γ 射线照射后,白酒中的芳香族有机酸含量有所增加,而致癌物质邻苯二甲酸二丁酯含量则有所下降,同时,处理后的白酒产生了大量芳香族物质,需要经过至少 28 d 的存放,其风味才能达到稳定状态;申圣丹等^[22]发现,超高压射流技术催陈 1 个月后的白酒,其总酸、电导率、乳酸乙酯、异戊醇/异丁

醇高于刚处理时,乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯则低于刚处理时。这些研究提示,对白酒催陈后存放一段时间后的状态进行研究,有助于更准确地评估催陈效果。

相较于其他香型的白酒,酱香型白酒由于其“四高两长”的复杂酿造工艺,其中含有的风味物质种类更多,风味层次更加丰富,为达到最佳的风味和口感,酱香型白酒自然陈化时间更长,通常需要 3 年或更长的时间来陈化^[23]。因此,对酱香型白酒进行人工加速陈化技术的研究有现实意义,但针对酱香型白酒微波催陈中主要的酯类、醇类及醛类物质在同一条件下变化的相关研究仍较为匮乏。

此外,现有的微波催陈研究鲜有针对原瓶包装白酒的。在白酒实际流通中,经销商与消费者接触的多为瓶装成品酒,经销商和饮酒爱好者普遍希望在不开启瓶盖、不破坏原瓶包装的前提下,对酒体进行品质优化处理,以提升其市场价值或饮用体验。但当前有关微波催陈白酒的研究多以开瓶后将酒液取出进行辐射处理的方式进行。此种方式除了会破坏酒品的完整性和收藏价值,也存在一定局限性:① 辐射过程中易导致白酒中挥发性物质的散失;② 开瓶操作改变了酒体的保存环境,可能对酒质产生潜在影响。

研究拟选取原瓶包装的酱香型白酒作为微波辐射试验对象,分析辐射 28 d 后白酒样品中乙酸乙酯、乳酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯以及乙酸、乙醛等物质含量的变化,探究辐射时间、辐射温度及功率密度等因素对以上主要风味物质的影响,旨在为酱香型白酒微波催陈技术在保持包装容器完整性的应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

酱香型白酒:网购平台销售瓶装成品酒,500 mL/瓶,酒精度为 53%vol。将白酒样品置于 30 ℃恒温柜中,随用随取。

1.2 主要仪器与设备

气相色谱仪:Agilent 7890A 型,安捷伦科技有限公司;
超高惰性毛细管气相色谱柱:Agilent J&W DB-WAX 柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),安捷伦科技有限公司;

微波转炉干燥杀菌系统:Webox-A6 型,株洲市微朗科技有限公司;

电子分析天平:PA2004 型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

恒温柜:HWS-380 型,宁波江南仪器厂。

1.3 试剂

标准品(乙酸乙酯、乳酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乙酸、乙醛)、内标物(叔戊醇、乙酸正戊酯、2-甲基丁醇):纯度≥99%,上海安谱实验科技股份有限公司。

1.4 试验方法

1.4.1 微波处理 为避免酒液辐射后升温过热溢出,经预试验,确定试验的最高辐射维持温度为 50 ℃,最长辐射

持续时间为 60 min。

将样品放入微波转炉干燥杀菌系统,在微波功率密度 1.0 W/mL,保持温度 45 ℃(通过实时红外成像测温,间歇辐射,保持温度不低于温度设定值 2 ℃)条件下,处理 0, 15, 30, 45, 60 min;在微波功率密度 1.0 W/mL,辐射时间 45 min 条件下,将样品升温到 30, 40, 45, 50 ℃;在微波辐射时间 45 min,保持温度 45 ℃条件下,采用 0.5, 1.0, 1.5 W/mL 微波功率密度进行处理。

样品完成辐射后,在 30 ℃恒温柜存放 28 d 后检测各项成分含量。

1.4.2 成分检测 按 GB/T 10345—2022《白酒分析方法》中的方法检测乙酸乙酯、乳酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯、乙酸、乙醛的质量浓度;数据以相对对照样质量浓度的相对质量浓度表示。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 软件对试验数据进行分析,使用 Origin 2018 绘图。

2 结果与讨论

2.1 微波辐射时间对主要风味成分的影响

由图 1(a)可知,经微波辐射处理后样品中的乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯和乳酸乙酯 4 种酯类物质含量呈现出相似的变化趋势。微波辐射时间为 15 min 时,样品中 4 种酯类成分的含量明显增加,其中乳酸乙酯增加最多,为对照的 108.3%,己酸乙酯增加最少,为对照的 105.6%;微波辐射时间为 30 min 时,样品中 4 种酯类成分的含量减少到略低于对照的水平,其中丁酸乙酯的含量最低,为对照的 98.3%;微波辐射时间继续增加后,酯类含量为对照的 98.4%~101.4%。表明短时间微波辐射促进酯化,而长时间微波辐射诱导水解反应。这种现象产生的原因可能是,微波处理初期,微波作用于乙醇—水分子群,将其切割为小分子,提升分子活化能,从而加速酯化反应,生成更多酯类物质。随着微波辐射时间延长,酯化和水解反应达到动态平衡,酯浓度趋于稳定。由于酯浓度增加导致水解反应速率上升,最终与酯化反应速率相近,从而形成这一先升高后下降的趋势。这种现象与江倩等^[18]在研究微波催陈 4 年优级浓香型白酒时的发现类似。

由图 1(b)可知,微波辐射时间为 15 min 时,样品中乙酸含量增加,为对照的 108.3%;微波辐射时间为 30 min 时,样品中乙酸含量减少到略低于对照的水平,为对照的 99.6%;微波辐射时间为 45, 60 min 时,样品中乙酸含量再次增加,分别达到对照的 102.2% 和 103.0%。这种现象产生的原因可能是,微波辐射初期,加热促进了乙醇的氧化反应,增加了乙酸的生成,从而推动了酯化反应。随着反应的进行,乙酸逐渐减少,酯化与水解反应达到动态平衡。此后,尽管微波继续促进乙酸生成,但由于酯化和水解反应速率趋于平衡,导致乙酸含量虽然有所增加,但增幅减缓。这一趋势与张满满等^[24]在研究 10 MeV 电子束

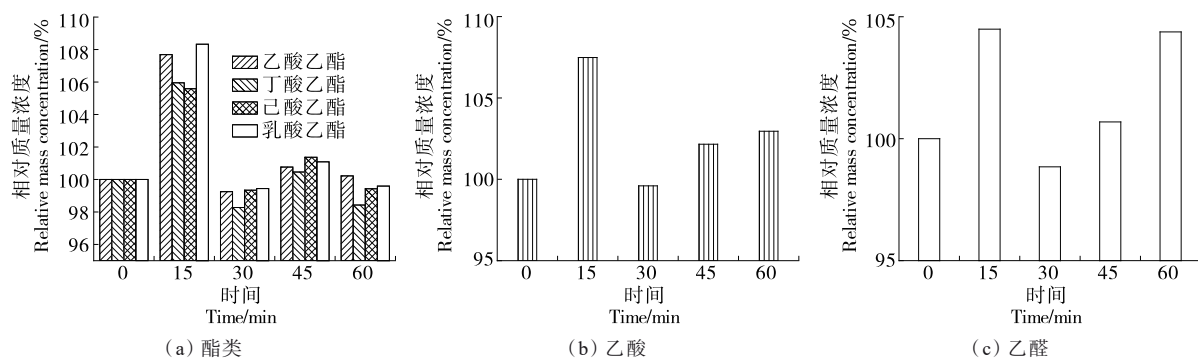


图1 微波辐射时间对主要风味物质的影响

Figure 1 Effect of microwave irradiation time on main flavor substances

辐射催陈小曲养米酒时观察到的现象类似。

由图1(c)可知,微波辐射时间为15 min时,样品中乙醛含量增加,为对照的104.5%;微波辐射时间为30 min时,样品中乙醛含量减少,为对照的98.8%;微波辐射时间为45,60 min时,样品中乙醛含量再次增加,分别为对照的100.7%和104.4%。这种现象产生的原因可能是,乙醛在白酒中具有较高的反应活性,可以被还原为乙醇,氧化为乙酸,或与乙醇缩合生成乙缩醛。在微波处理初期,乙醇氧化生成乙醛,导致其含量上升。随后,随着乙醛发生缩合反应或进一步氧化,其含量逐渐下降。随着反应的持续,酯类物质的水解增加了体系中的乙醇浓度,微波再次加速了乙醛的生成,从而使乙醛含量在下降后再度回升。

2.2 微波辐射温度对主要风味成分的影响

由图2(a)可知,样品中乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯及乳酸乙酯的含量均发生了改变,且4种酯类成分含量呈现相似的变化趋势。微波辐射温度为40℃时,4种酯类成分的含量增加,其中乙酸乙酯增加最多,为对照的106.6%,丁酸乙酯增加最少,为对照的103.8%;微波辐射温度为45℃时,样品中4种酯类成分的含量减少到略高于对照的水平,其中最高的是己酸乙酯(为对照的101.4%),最低的是丁酸乙酯(为对照的100.5%);微波辐

射温度为50℃时,样品中4种酯类成分的含量再次升高,并升到高于40℃时的水平,其中最高的是乙酸乙酯(为对照的110.1%),最低的是己酸乙酯(为对照的107.9%)。这种现象产生的原因可能是,酯化—水解反应是一个动态平衡过程,其中酯的形成和水解是相互竞争的反应。微波辐射温度为30~40℃时,酯化反应占优势,促进酯类物质的生成,导致酯含量增加。微波辐射温度升至45℃时,水解反应加速,超过酯化反应速率,导致酯含量下降。随着微波辐射温度进一步升高至50℃,分子热能增加,酯化反应再次加速,并重新占据优势,因而酯含量再度上升。

由图2(b)可知,微波辐射温度为40℃时,样品中乙酸含量增加,为对照的108.4%;微波辐射温度为45℃时,样品中乙酸含量减少,为对照的102.2%;微波辐射温度为50℃时,乙酸含量再次升高,为对照的109.7%,其含量变化趋势与酯类物质的相似。这种现象产生的原因是,乙酸在酒中的含量主要受酯化—水解反应平衡的影响。

由图2(c)可知,微波辐射温度为40℃时,样品中乙醛含量增加,为对照的106.6%;微波辐射温度为45℃时,样品中乙醛含量减少到略高于对照的水平(100.7%);微波辐射温度为50℃时,样品中乙醛含量再次升高,为对照的102.4%。这种现象产生的原因可能是,微波处理初期,微波能量加速了乙醇向乙醛的氧化反应,导致乙醛含量上

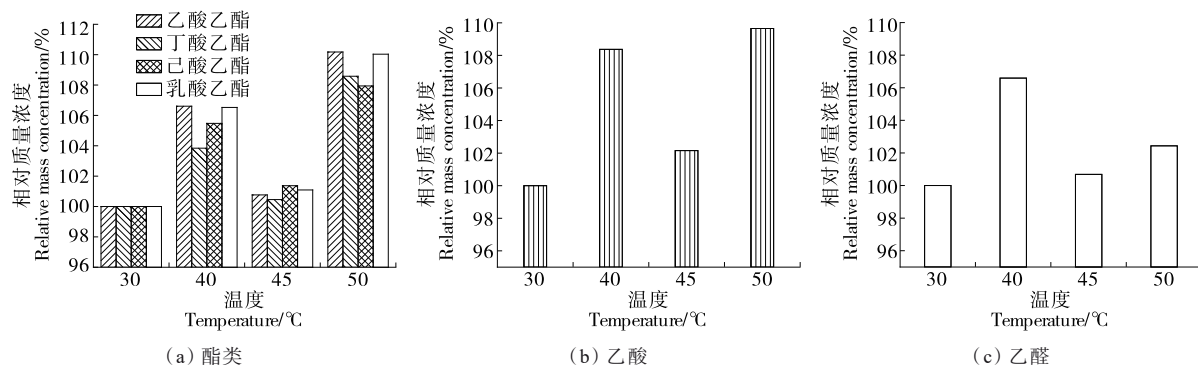


图2 微波辐射温度对主要风味物质的影响

Figure 2 Effect of microwave irradiation temperature on main flavor substances

升;当微波辐射温度升高到 45 ℃时,乙醛的氧化速度加快,部分乙醛被转化为乙酸或与乙醇发生缩合反应生成乙缩醛;随着微波辐射温度进一步升高到 50 ℃,乙醛氧化与缩合反应的产物乙酸、乙缩醛的积累产生抑制作用,导致其进一步氧化与缩合的反应速率增长趋缓,而持续的微波能量输入使得乙醇氧化为乙醛速度超过乙醛的消耗速度,因而乙醛含量增加。

2.3 微波功率密度对主要风味物质的影响

由图 3(a)可知,样品中乙酸乙酯、丁酸乙酯、己酸乙酯及乳酸乙酯含量呈现相似的变化趋势。微波功率密度为 0.5 W/mL 时,4 种酯类成分的含量增加,其中乙酸乙酯

增加最多,为对照的 103.8%,丁酸乙酯增加最少,为对照的 102.4%;随着微波功率密度进一步增加,4 种酯类的含量逐渐下降。当微波功率密度增加到 1.5 W/mL 时,样品中 4 种酯类成分的含量降到最低,其中最高的是乙酸乙酯(为对照的 99.9%),最低的是丁酸乙酯(为对照的 96.6%)。这种现象产生的原因可能是,微波功率密度较低时,微波辐射能量加速反应物分子的运动,增加分子间的碰撞频率,促进了酯化反应的进行;随着功率密度的增加,微波辐射强度继续增大,过高的辐射能量可能导致酯类分子获得足够的能量来断裂酯键,从而发生水解反应,使酯类含量下降。

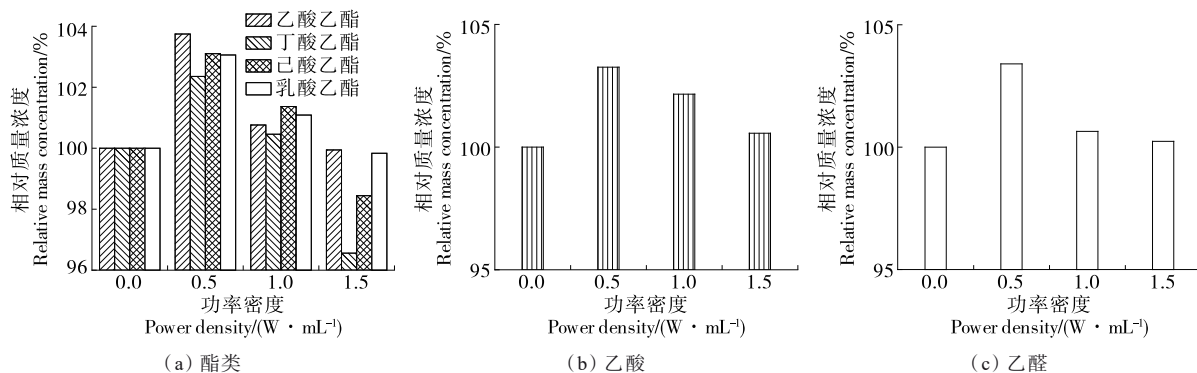


图3 微波功率密度对主要风味物质的影响

Figure 3 Effect of microwave irradiation power density on main flavor substances

由图 3(b)可知,微波功率密度为 0.5 W/mL 时,乙酸含量增加到对照的 103.3%;随着微波功率密度增加,乙酸含量逐渐下降。当微波功率密度增加到 1.5 W/mL 时,乙酸含量降到最低,为对照的 100.6%,与魏群舒等^[8]用超声波催陈米香型白酒时,总酸随着超声波功率的变化趋势类似。这可能与乙酸在酒中的含量主要受酯化—水解反应平衡的影响有关。

由图 3(c)可知,微波功率密度为 0.5 W/mL 时,乙醛含量增加到对照的 103.6%;随着微波功率密度增加,乙醛含量逐渐下降。当微波功率密度增加到 1.5 W/mL 时,乙醛含量降到最低,为对照的 100.3%。这种现象可能与微波功率密度对乙醇氧化路径的影响有关。在较低功率下,乙醇氧化生成乙醛,导致其含量增加;而随着功率升高,乙醛进一步氧化为乙酸,或与乙醇缩合生成乙缩醛^[20],这些反应会导致乙醛含量的降低。

由以上结果可见,酱香型白酒经微波辐射后,其主要酯类成分、乙酸及乙醛变化呈现出显著的相互作用关系,这是由于白酒中包含酯、酸、醇、醛酮、呋喃、萜烯、酚类等复杂成分^[25],它们之间存在氧化、还原、酯化、水解、缩合等多种可逆化学反应,形成了复杂的动态平衡。

3 结论

随微波辐射时间延长,酱香型白酒中的酯类含量呈先升高后波动下降趋势,乙酸与乙醛含量则先升高后下

降再升高;随着微波辐射温度增加,酯类与乙酸含量先升高后小幅回落再升至新高,乙醛含量则先升高后波动降低;随着微波功率密度增加,酯类、乙酸及乙醛含量均先增加后减少。

与未处理样品相比,经较优微波辐射工艺(微波辐射温度 50 ℃、微波辐射时间 45 min、微波功率密度 1.0 W/mL)处理的样品中乙酸乙酯增加 10.1%,乳酸乙酯增加 10.0%,丁酸乙酯增加 8.6%,己酸乙酯增加 7.9%,乙酸增加 9.7%。原瓶包装酱香型白酒中酯类含量增加可提升酒体风味,而酸类物质含量增加有助于加强醇厚感,此变化趋势与自然陈化作用方向一致,说明微波工艺起到加速陈化的效果。

该研究对微波辐射后原瓶包装酱香型白酒的主要风味成分进行了化学分析,下一步可增加更多风味物质的分析并结合消费者的感官品评数据与贮藏条件进行研究,还可以进一步延长观察周期,考察催陈处理后的白酒在更长时间尺度下的品质变化,以期更准确地评价微波对酱香型白酒的催陈效果。

参考文献

- [1] GB/T 15109—2021 白酒工业术语[S].
- [2] GB/T 15109—2021 Terminology of Baijiu industry[S].
- [2] Wang G N, Song X B, Zhu L, et al. A flavoromics strategy for the

- differentiation of different types of Baijiu according to the non-volatile organic acids[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131641.
- [3] 秦丹, 段佳文, 李有明, 等. 白酒老熟过程中风味成分的变化及人工催陈技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 260-267.
- Qin D, Duan J W, Li Y M, et al. A review of changes of flavor compounds during Baijiu aging and recent progress in artificial aging techniques[J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 260-267.
- [4] 邱重晏, 王万能, 王东, 等. 清香型白酒快速陈酿化的初步研究[J]. *酿酒*, 2011, 38(6): 26-29.
- Qiu C Y, Wang W N, Wang D, et al. Preliminary study on accelerated aging Fen-flavor Liquor[J]. *Liquor Making*, 2011, 38(6): 26-29.
- [5] He J, Chen Q, Jia X, et al. The effects of gamma irradiation and natural aging on the composition of Nongxiangxing Baijiu[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12): e17146.
- [6] Zhu S M, Xu M L, Ramaswamy H S, et al. Effect of high pressure treatment on the aging characteristics of Chinese liquor as evaluated by electronic nose and chemical analysis[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30273.
- [7] Zhang W, Xiao Y, Deng R J, et al. An electric-field instrument for accelerated aging to improve flavor of Chinese Baijiu[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2023, 174: 114446.
- [8] 魏群舒, 杨勇, 陈雨, 等. 超声波催陈米香型白酒的研究[J]. *中国酿造*, 2017, 36(10): 66-70.
- Wei Q S, Yang Y, Chen Y, et al. Accelerating aging of rice-flavor Baijiu by ultrasonic wave[J]. *China Brewing*, 2017, 36(10): 66-70.
- [9] 王本盛, 张莉丽, 赵瑞, 等. 高能电子束辐照酱香型白酒的催陈效应[J]. *食品科技*, 2021, 46(9): 79-86.
- Wang B S, Zhang L L, Zhao R, et al. Aging effect of Maotai-flavor liquor irradiated by high energy electron beam[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 79-86.
- [10] 张大力, 冯艳鹤, 修琳, 等. 超高压技术对白酒催陈作用的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(7): 23-28.
- Zhang D L, Feng Y H, Xiu L, et al. Effect of ultra-high pressure technology on the aging of liquor[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(7): 23-28.
- [11] Liu Y, He F, Shi Y, et al. Effect of the high pressure treatments on the physicochemical properties of the young red wines supplemented with pyruvic acid[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 48: 56-65.
- [12] Jia W, Fan Z B, Du A, et al. Untargeted foodomics reveals molecular mechanism of magnetic field effect on Feng-flavor Baijiu ageing[J]. *Food Research International*, 2021, 149: 110681.
- [13] Dai N, Zhang X, Cai Z P, et al. The effect of different pulsed magnetic field and microwave composite treatment on the aroma compounds and sensory characteristics of soy-sauce flavor Chinese liquor[J]. *CyTA - Journal of Food*, 2021, 19(1): 793-804.
- [14] Xiong A Y, Zhao K, Hu Y R, et al. Influence of electrochemical oxidation on the maturation process of the distilled spirit[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(29): 18 349-18 355.
- [15] 蒋祥瑞, 蒋燕明, 张娟, 等. 白酒人工催陈技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 389-396.
- Jiang X R, Jiang Y M, Zhang J, et al. Research advances in artificial aging technology of Baijiu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 389-396.
- [16] 吴知非, 梁慧珍, 刘正, 等. 白酒陈酿机理及催陈技术研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(13): 196-202.
- Wu Z F, Liang H Z, Liu Z, et al. Research status of liquor aging mechanisms and technology[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(13): 196-202.
- [17] 杨婷, 农绍庄, 刘畅, 等. 白酒的微波陈化研究[J]. *食品工业*, 2014, 35(2): 109-112.
- Yang T, Nong S Z, Liu C, et al. Study on aging of liquor by microwave[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(2): 109-112.
- [18] 江倩, 刘建学, 李佩艳, 等. 微波辐射处理对浓香型白酒中挥发性物质的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 341-349.
- Jiang Q, Liu J X, Li P Y, et al. Effect of microwave radiation treatment on volatile substances in Luzhou-flavor liquor[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(2): 341-349.
- [19] 代佳慧, 刘建学, 韩四海, 等. 微波辐射对浓香型白酒中乙酸和乙酸乙酯的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 33-36, 54.
- Dai J H, Liu J X, Han S H, et al. Effect of microwave radiation on acetic acid and ethyl acetate in Luzhou-flavor liquor[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(2): 33-36, 54.
- [20] 江倩, 刘建学, 李佩艳, 等. 微波辐射处理对浓香型白酒中甲醇和乙醛的影响[J]. *微波学报*, 2021, 37(3): 92-98.
- Jiang Q, Liu J X, Li P Y, et al. Effect of microwave radiation treatment on methanol and acetaldehyde in Luzhou-flavor liquor[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(3): 92-98.
- [21] Jia W, Li Y L, Du A, et al. Foodomics analysis of natural aging and gamma irradiation maturation in Chinese distilled Baijiu by UPLC-Orbitrap-MS/MS[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126308.
- [22] 申圣丹, 王盛民, 刘睿颖. 超高压射流技术对白酒的催陈作用[J]. *食品科技*, 2012, 37(4): 83-85.
- Shen S D, Wang S M, Liu R Y. Effectiveness of ultra-high incoming on liquor aging[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(4): 83-85.
- [23] Zhu L, Song X B, Li X, et al. Interactions between kaffir and pickle-like odorants in soy sauce flavor Baijiu: aroma profile change and binding mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2023, 400: 133854.
- [24] 张满满, 谢康俊, 齐伟, 等. 电子束辐照陈化大曲白酒和小曲白酒[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2018, 36(5): 39-45.
- Zhang M M, Xie K J, Qi W, et al. Electron-beam irradiation aging of Daqu liquor and Xiaoqu liquor[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2018, 36(5): 39-45.
- [25] Hong J X, Huang H, Zhao D R, et al. Investigation on the key factors associated with flavor quality in northern strong aroma type of Baijiu by flavor matrix[J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136576.