

不同香型白酒中的乳酸及乳酸乙酯 旋光异构体的分析比较

黄治国^{1,2}, 刘履常¹, 李彦中³, 卫春会^{1,2}, 任志强^{1,2}, 谢军^{1,2}, 邓杰^{1,2*}

(1. 四川轻化工大学酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川宜宾 644000)(2. 轻工业酿酒生物技术与智能制造重点实验室, 四川宜宾 644000)(3. 四川江口醇隆鼎酒业有限公司, 四川巴中 636400)

摘要: 为了解不同香型白酒中乳酸和乳酸乙酯异构体含量差异, 建立了直接测定白酒中乳酸和乳酸乙酯异构体的测定方法, 并分析其含量规律。结果表明, 乳酸对映体在 $0.02\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内呈线性关系; 乳酸乙酯对映体在 $0.01\sim 2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内呈线性关系。不同香型白酒乳酸和乳酸乙酯旋光性含量存在显著差异。在酱香型白酒中, D-乳酸和 L-乳酸含量较高, 平均质量浓度分别为 $1.348\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.440\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓香型白酒的平均质量浓度为 $0.402\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.244\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 清香型白酒平均质量浓度为 $0.161\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.042\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在酱香型白酒中, D-乳酸乙酯和 L-乳酸乙酯含量较高, 平均质量浓度分别为 $1.280\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.283\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓香型白酒平均质量浓度为 $0.592\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.352\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 清香型白酒的平均质量浓度为 $0.211\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.038\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。综上所述, 该方法操作简便, 精密度和准确度高, 适用于白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光性的测定, 明确不同香型白酒在乳酸和乳酸乙酯旋光性含量上的差异, 为进一步认识乳酸和乳酸乙酯对风味的贡献奠定了基础。

关键词: 白酒; 乳酸; 乳酸乙酯; 对映体

文章编号: 1673-9078(2026)3-290-296

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1812

Comparison of the Optical Isomers of Lactic Acid and Ethyl Lactate in Baijiu of Different Aroma Types

HUANG Zhiguo^{1,2}, LIU Lvchang¹, LI Yanzhong³, WEI Chunhui^{1,2}, REN Zhiqiang^{1,2}, XIE Jun^{1,2}, DENG Jie^{1,2*}

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Liquor Brewing Biotechnology and Application Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 644000, China)(2. Liquor Brewing Biotechnology and Intelligent Manufacturing Key Laboratory of China Light Industry, Sichuan, Yibin 644000, China)
(3. Sichuan Jiangkou Alcohol Longding Wine Industry Co. Ltd., Bazhong 636400, China)

Abstract: To understand the differences in lactic acid and ethyl lactate isomer concentrations across Baijiu of different aroma types, a method to directly measure them in Baijiu was established, and their concentration patterns analyzed. Results showed that lactic acid enantiomers had a linear relationship within the range of $0.02\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, whereas ethyl lactate enantiomers exhibited a linear relationship within the range of $0.01\sim 2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Significant differences were observed in the optical purity of lactic acid and ethyl lactate in Baijiu of different aroma types. The contents of d- and l-lactic acid were relatively high in sauce-aroma type Baijiu,

引文格式:

黄治国, 刘履常, 李彦中, 等. 不同香型白酒中的乳酸及乳酸乙酯旋光异构体的分析比较[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 290-296.

HUANG Zhiguo, LIU Lvchang, LI Yanzhong, et al. Comparison of the optical isomers of lactic acid and ethyl lactate in Baijiu of different aroma types [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 290-296.

收稿日期: 2024-12-05; 修回日期: 2025-04-09; 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 酿酒生物技术及应用四川省重点实验室开放课题 (NJ2022-07); 四川轻化工大学研究生创新基金项目 (Y2023236)

作者简介: 黄治国 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 酿酒生物技术及应用, E-mail: hzgwww@126.com

通讯作者: 邓杰 (1988-), 男, 博士研究生, 实验师, 研究方向: 酿酒生物技术及应用, E-mail: 380553839@qq.com

with average mass concentrations of $1.348 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.440 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The average mass concentrations of d- and l-lactic acid in strong-aroma type baijiu were $0.402 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.244 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and those in light-aroma type Baijiu were $0.161 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.042 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. In sauce-aroma type baijiu, the contents of d- and l-ethyl lactate were relatively high, with average mass concentrations of $1.280 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.283 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The average mass concentrations of d- and l-ethyl lactate in strong-aroma type Baijiu were $0.592 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.352 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and those in light-aroma type Baijiu were $0.211 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.038 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. In conclusion, the method developed in this study is easy to operate, exhibiting high precision and accuracy, and it is suitable for determining the optical activity of lactic acid and ethyl lactate in Baijiu. The study findings clarify differences in the optical purity of lactic acid and ethyl lactate in Baijiu of different aroma types, providing a foundation for further understanding the contribution of these compounds to the aroma profile of Baijiu.

Key words: Baijiu; lactic acid; ethyl lactate; enantiomers

中国白酒是世界著名六大蒸馏酒之一^[1], 多以富含淀粉的谷物、高粱为原料, 将大曲、小曲或麸曲等作为糖化发酵剂^[2], 经过蒸粮、拌曲、发酵、蒸馏、勾兑、贮存等步骤而制成^[3,4]。一方面, 酒曲中存在复杂多样的微生物; 另一方面, 白酒在生产过程中是开放的, 期间环境中复杂多样的微生物群体可能会进入酿酒体系中, 最终发酵出以乙醇为主体且包含有种类繁多有机化合物成分的酒样, 这些物质形成了中国白酒的香和味^[5]。目前已经在白酒中检测出大量风味物质, 包括了酸、醇、酯、硫类物质等^[6]。其中, 乳酸是白酒中最重要的非挥发性有机酸之一^[7], 其通过蒸馏进入酒体, 赋予白酒酸香的风味, 减少白酒的糙辣味和苦涩味, 增加醇厚感^[8]。研究表明, 在浓香型白酒中, 乳酸对主体香味成分己酸乙酯有很好的助香作用, 能起到缓冲调和酒味的作用, 可以掩盖酒精的刺激性, 还能与多种成分亲和使酒体更加协调, 在酱香型白酒中, 乳酸是“空杯香”中含量最高的物质, 增强空杯香气^[9]。乳酸与乙醇在酯化酶的作用下生成乳酸乙酯^[10], 乳酸乙酯是白酒中四大酯之一, 呈现柔和的果香, 能缓冲和平衡酒香, 具有使白酒更加醇厚^[11]。在低度浓香型白酒中, 乳酸乙酯可以提高低度浓香型白酒的厚重口感, 减少水味及寡淡的口感^[12], 乳酸乙酯和乙酸乙酯的含量和比例与清香型白酒的风味品质密切相关^[13], 对白酒整体风味的形成具有重要意义。

由于乳酸分子内含有不对称 C 原子, 因此具有旋光异构现象, 即 L-乳酸和 D-乳酸^[14]。由于人体内只含有 L-乳酸脱氢酶, 能有效代谢 L-乳酸, 而人体内不含 D-乳酸脱氢酶^[15], 当 D-乳酸积累过多时可能会造成乳酸酸中毒^[16]。多项研究表明, 泡菜中 L-乳酸的含量在整个乳酸含量中占据主导地位^[17]。在泡菜发酵过程中, L-乳酸脱氢酶对 L-乳酸的催化作用, 使得 L-乳酸在发酵体系中大量生成^[18]。乳酸乙酯是白酒的四大酯类之一, 因其分子中含有不对称碳原子, 存在两种

异构体, 即 D-乳酸乙酯和 L-乳酸乙酯^[19]。在葡萄酒中, 乳酸乙酯主要以 D 型存在^[20], D-乳酸乙酯是酵母发酵糖的产物, 而 L-乳酸乙酯的存在是由乳酸菌在苹果酸乳酸发酵过程中引起的, 可用于微生物感染的测定^[21]。白酒中的乳酸和乳酸乙酯异构体的风味存在明显区别, L-乳酸具有酸涩和微甜感, D-乳酸辛辣味较强, D-乳酸乙酯果香味较浓郁, L-乳酸乙酯奶香味及油脂味较浓。

区分 L-乳酸与 D-乳酸手性对映体的方法主要包括酶法^[22]、气相色谱 (GC)^[23]、毛细管电泳 (CE)^[24]、手性高效液相色谱法 (HPLC)^[25]以及柱前衍生将手性对映体改变成非手性物质再测定的方法^[26]。但是目前还没有建立同时测定白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光异构体的相关方法, 研究白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光性含量关系。本研究采用气相色谱法和高效液相色谱法, 并结合手性柱建立一种适用于白酒中乳酸和乳酸乙酯的定量检测方法, 对方法的精密度、准确性、定量限、线性范围及稳定性指标进行验证, 利用该方法对白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光性的定量检测, 探究不同香型白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光性的差异, 为白酒中对映体的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白酒, 包括浓香型白酒 (53%vol, 共计 106 个样品), 四川浓香型白酒厂; 清香型白酒 (53%vol, 共计 8 个样品), 山西汾酒; 酱香型白酒 (53%vol, 共计 6 个样品), 贵州夜郎古。

无水乙醇 (色谱纯)、甲醇 (色谱纯)、异丙醇 (色谱纯), 成都市科隆化学品有限公司; L-乳酸 (色谱纯)、D-乳酸 (色谱纯)、罗恩试剂; 硫酸铜, 天津市致远化学试剂有限公司; L-乳酸乙酯 (色谱纯)、D-乳酸乙酯 (色谱纯), 南京源植生物科技有限公司

1.2 仪器与设备

悟空 K2025 高效液相色谱仪, 山东悟空仪器有限公司; FMB-AAOA3-EONU Chiral AAOA 3u 5×4.6 mm 手性分离柱, 菲罗门; Agilent 8890A 气相色谱仪、氢火焰检测器 (FID), 色谱用载气为氢气, 美国 Agilent; FBX-DEX DAC Beta-0.25 m×0.25 mm×0.25 μm 手性毛细管柱, 菲罗门。

1.3 高效液相色谱法

1.3.1 样品前处理

当白酒中的乳酸对映体的质量浓度较高时, 在测定过程中容易出现双峰, 故实验使用超纯水进行稀释。取 1 mL 白酒样品于 5 mL 离心管中, 加入 1 mL 的超纯水进行稀释, 旋涡震荡混匀, 经过 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后用于高效液相色谱测定。

1.3.2 流动相配制

流动相为 2 mmol·L⁻¹ 的硫酸铜 (含有 5% 的异丙醇): 称取 0.5 g 五水硫酸铜于 1 000 mL 烧杯中, 加入 500 mL 的超纯水溶解硫酸铜, 添加 50 mL 的异丙醇, 将液体移入 1 000 mL 容量瓶, 补加超纯水至 1 000 mL。将流动相经过 0.22 μm 滤膜, 并超声 20 min 除去流动相中的空气。

1.3.3 色谱条件

流量为 1 mL·min⁻¹; 柱温为 25 °C, 紫外检测波长为 254 nm, 进样量为 10 μL, 流动相为 2 mmol·L⁻¹ 的硫酸铜 (含有 5% 的异丙醇)。

1.4 气相色谱法

初温为 50 °C, 保持 3 min, 再以 3 °C·min⁻¹ 快速升温到 120 °C, 保持 1 min, 再以 8 °C·min⁻¹ 快速升温到 200 °C, 分流比为 10:1, 进样量为 0.4 μL。

1.5 方法准确性与有效性

1.5.1 标准曲线的绘制

乳酸对映体标准曲线: 准确称取 L-乳酸标准品和 D-乳酸标准品, 由于乙醇对乳酸对映体的基线和保留时间影响较大, 故用 φ=25% 乙醇溶液溶解并定容至 10 mL 容量瓶中, 配制质量浓度为 10 g·L⁻¹ 的标准品溶液, 并将标准品稀释为不同浓度的 D/L-乳酸混合标准溶液, 分别为 0.02、0.05、1.0、2.0、3.0、4.0 g·L⁻¹ 等质量浓度, 经过 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后用于高效液相色谱测定。

乳酸乙酯对映体的标准曲线绘制: 准确称取 L-乳酸乙酯和 D-乳酸乙酯标准品, 用 50% 乙醇溶液溶解并定容至 10 mL 容量瓶中, 配制质量浓度为 10 g·L⁻¹ 的乳酸乙酯标准品溶液, 并将标准品稀释为不同浓度的 D/L-乳酸乙酯混合标准溶液, 分别为 0.01、0.02、0.1、0.5、2.5 g·L⁻¹ 等质量浓度。

1.5.2 检出限

以 3 倍信噪比确定为乳酸和乳酸乙酯对映体的检出限。

1.5.3 精确度

取混合标准溶液, 反复进样测定 6 次, 对乳酸和乳酸乙酯对映体的保留时间和峰面积进行相对标准偏差的计算。

1.5.4 加标回收率

分别向已知浓度的酒样中加入 3 种浓度的标品溶液, 重复进样 3 次, 观察保留时间, 并计算加标回收率。

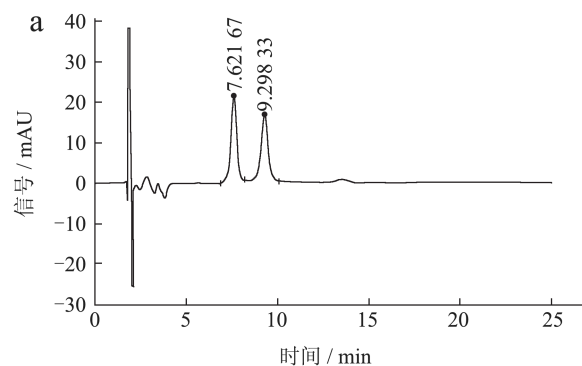
1.6 数据处理

使用 SPSS 软件 *t* 检验用于评估不同香型白酒中乳酸对映体水平的显著性差异; 使用软件 Origin 2018 绘制乳酸对映体峰图和箱线图。

2 结果与讨论

2.1 乳酸对映体和乳酸乙酯对映体色谱的检测结果

乳酸对映体的手性拆分 HPLC 图谱见图 1, 乳酸乙酯对映体的手性拆分图谱见图 2。由图中可知, L-乳酸的保留时间为 7.6 min, D-乳酸的保留时间为 9.2 min, L-乳酸乙酯的保留时间为 15.62 min, D-乳酸乙酯的保留时间为 15.33 min。乳酸对映体和乳酸乙酯对映体完全分离, 无其他物质干扰, 并且保留时间与酒样中的保留时间一致, 满足检测需求。



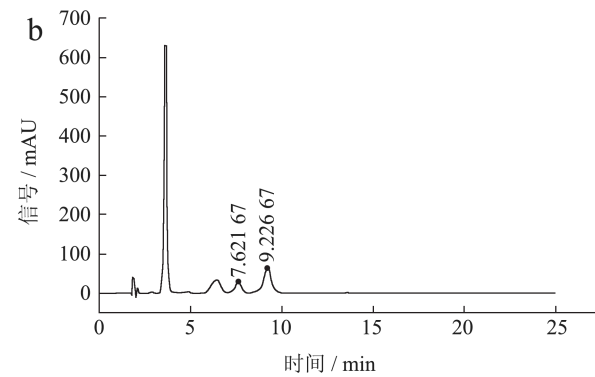


图 1 乳酸对映体色谱图

Fig.1 Enantiomer chromatogram of lactic acid

注: (a) D/L-乳酸标准品色谱图; (b) 白酒样品色谱图。

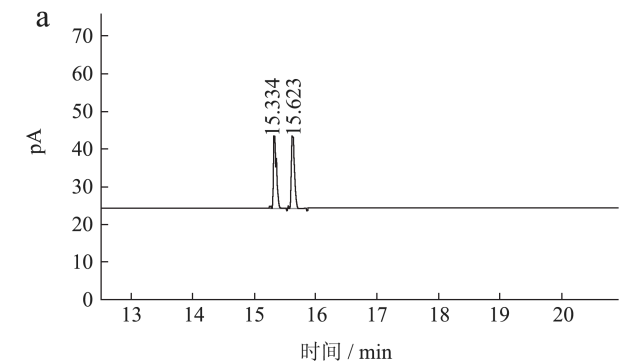


图 2 乳酸乙酯对映体色谱图

Fig.2 Ethyl lactate enantiomer chromatogram

注: (a) D/L-乳酸乙酯标准品色谱图; (b) 白酒样品色谱图。

2.2 乳酸对映体和乳酸乙酯对映体的定量标准曲线

乳酸对映体标准曲线见图 3，乳酸乙酯对映体标准曲线见图 4。结果表明，乳酸对映体的标准溶液在质量浓度为 0.01~0.6 g·L⁻¹ 的范围内线性关系良好，乳酸乙酯对映体的标准溶液在质量浓度为 0.01~2.5 g·L⁻¹ 的范围内线性关系良好，R² 为 0.999 9。

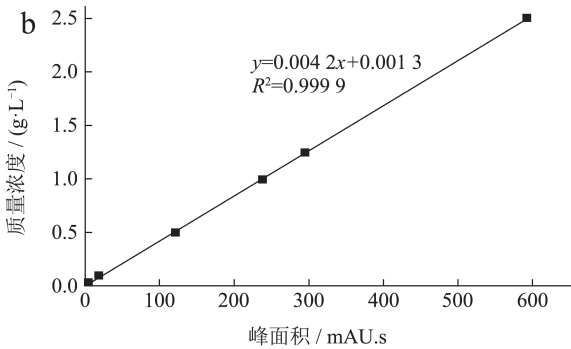
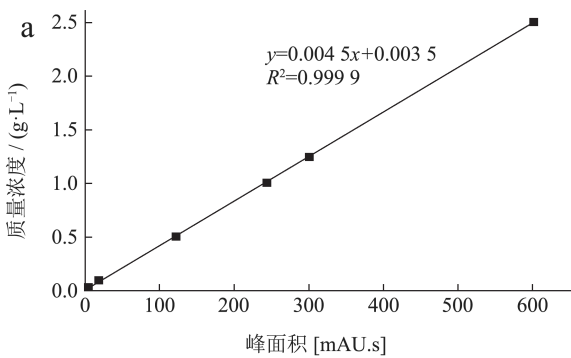


图 3 乳酸对映体标准曲线

Fig.3 Lactate enantiomer standard curve

注: (a) L-乳酸校准曲线, (b) D-乳酸校准曲线。

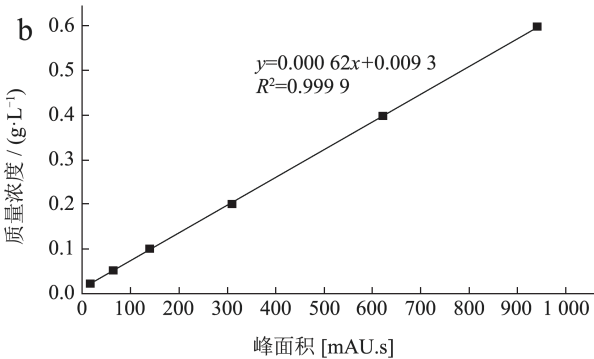
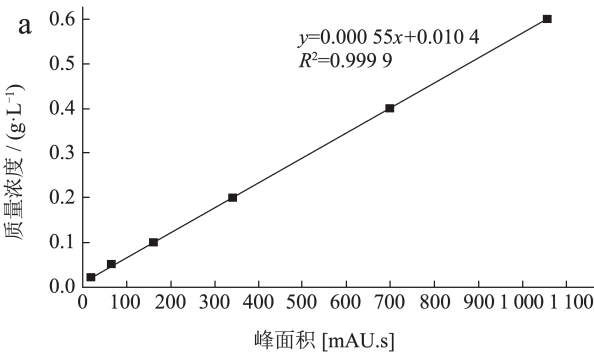


图 4 乳酸乙酯对映体的标准曲线

Fig.4 Standard curve of ethyl lactate enantiomers

注: (a) L-乳酸乙酯校准曲线; (b) D-乳酸乙酯校准曲线。

2.3 乳酸对映体和乳酸乙酯对映体的加标回收率结果

取白酒样品，分别向其中加入质量浓度为 0.1、0.2、0.4 g·L⁻¹ 的 L-乳酸标品和 0.5、1.0、2.5 g·L⁻¹ 的 L-乳酸乙酯标品后，涡旋混匀，通过 0.22 μm 滤膜后进样。加标样品进行 3 次平行测定，计算方法的回收率，结果见表 1。样品中的乳酸对映体的加标回收率在 93.67%~107.66%，乳酸乙酯对映体的加标回收率在 100.86%~106.46%。

表 1 加标回收率实验结果					
Table 1 Experimental results of recovery rate with added standard					
标样	加标质量浓度/(g·L ⁻¹)	第一次进样的质量浓度/(g·L ⁻¹)	第二次进样的质量浓度/(g·L ⁻¹)	第三次进样的质量浓度/(g·L ⁻¹)	回收率/%
L-乳酸	0	0.057	0.058	0.059	
	0.1	0.135	0.137	0.138	107.66
	0.2	0.215	0.216	0.218	93.67
	0.4	0.441	0.445	0.450	104.08
L-乳酸乙酯	0	0.423	0.425	0.424	
	0.5	0.488	0.490	0.489	106.46
	1	0.692	0.684	0.700	100.86
	2.5	1.512	1.522	1.507	104.13

2.4 乳酸对映体和乳酸乙酯对映体的精密度实验结果

取同一份白酒样品按照上述方法进行测样，记录每次测样后的乳酸和乳酸对映体质量浓度，测定相对标准偏差（RSD），数据见表 2。由表可知，测定相对标准偏差（RSD）为 0.55%~0.87%，表明该方法重复性较好。

表 2 精密度试验结果				
Table 2 Precision test results				
次数	L-质量浓度/(g·L ⁻¹)	D-质量浓度/(g·L ⁻¹)	L-质量乳酸乙酯/(g·L ⁻¹)	D-质量乳酸乙酯/(g·L ⁻¹)
1	0.183	0.179	0.417 7	1.453
2	0.181	0.180	0.418	1.458
3	0.182	0.180	0.416	1.447
4	0.181	0.178	0.412	1.438
5	0.180	0.178	0.409	1.425
6	0.179	0.178	0.417	1.454
RSD/%	0.78	0.55	0.87	0.85

2.5 乳酸对映体和乳酸乙酯对映体的检出限

通过将乳酸和乳酸乙酯对映体的混合标准品进行逐

级稀释，并且根据信噪比计算得出乳酸对映体的检出限为 1 mg·L⁻¹，乳酸乙酯对映体的检出限为 12.5 mg·L⁻¹。

2.6 白酒中乳酸和乳酸乙酯对映体的测定结果

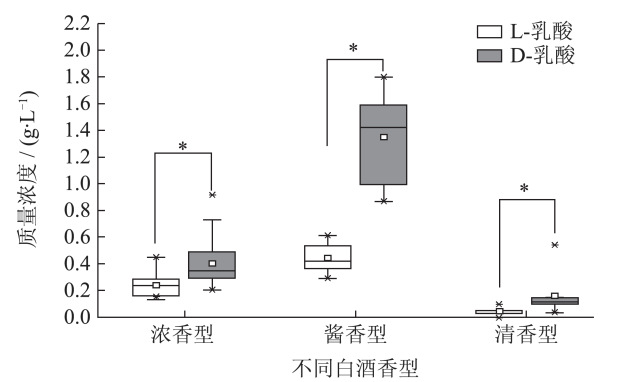


图 5 不同香型白酒中 L-乳酸和 D-乳酸的含量箱线图
Fig.5 Box plot of L-lactic acid and D-lactic acid content in different flavor liquors

注：* 表示 $P<0.05$ ，下同。

利用手性柱检测了白酒样品中乳酸对映体的质量浓度，白酒中乳酸对映体的测定结果如图 5。从图 5 可以看出，D-乳酸在酱香型白酒中的含量最高，平均质量浓度为 1.348 g·L⁻¹，浓香型白酒中 D-乳酸的平均质量浓度为 0.402 g·L⁻¹，清香型白酒中 D-乳酸含量的平均质量浓度为 0.161 g·L⁻¹；酱香型白酒中 L-乳酸的含量最高，平均质量浓度为 0.440 g·L⁻¹，浓香型白酒的平均质量浓度为 0.244 g·L⁻¹，清香型白酒中 L-乳酸的平均质量浓度为 0.042 g·L⁻¹。酱香型白酒，浓香型白酒和清香型白酒中的 D-乳酸含量显著高于 L-乳酸含量 ($P<0.05$)，对比三种香型白酒，酱香型白酒中的 L-乳酸含量显著高于清香型白酒 ($P<0.05$)，但与浓香型白酒中 L-乳酸含量没有显著差异 ($P>0.05$)，酱香型白酒中的 D-乳酸含量显著高于浓香型白酒和清香型白酒 ($P<0.05$)，研究结果表明，不同香型白酒的乳酸异构体存在差异，酱香型白酒中的乳酸异构体含量最高，浓香型和清香型白酒中乳酸异构体浓度较低。Xu 等^[27]通过高效液相色谱法测定来自酒厂和市售的 70 种白酒中的乳酸对映体含量，其中 38 种酱香型白酒，16 种浓香型白酒，10 种清香型白酒，研究表明，酱香型白酒中 D-乳酸和 L-乳酸的浓度较高，在大部分白酒样品中对映体比例显示出 D-乳酸占优势；江锋等^[28]测定 20 种市售白酒中的乳酸对映体含量，其中 17 种白酒的 D-乳酸比 L-乳酸含量高；这可能是由于白酒样本来自不同的企业，它们的生产环境、条件、工艺都略有不同。由于许多乳酸菌在低温时产 D-乳酸，在较高温度下产生 L-乳酸^[13]，Li 等^[29]研究发现，乳酸

片球菌 ZY 271 能在 45~50 °C 的高温环境下稳定生长并产生 L-乳酸, Akao 等^[30]研究发现, 凝结芽孢杆菌在 55 °C 条件下产生 L-乳酸。大多数的白酒厂发酵温度在 20~40 °C^[31], 故浓香型白酒和清香型白酒中 D-乳酸含量高于 L-乳酸含量。目前, 酱香型白酒中 D-乳酸含量偏高的内在机制仍未完全明晰。

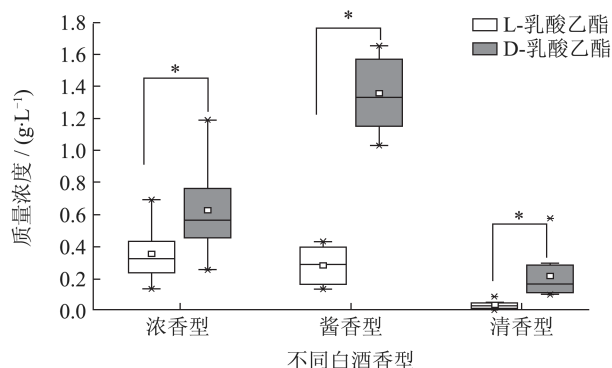


图 6 不同香型白酒中 D-乳酸乙酯和 L-乳酸乙酯的含量箱线图

Fig.6 Box plots of ethyl D-lactate and ethyl L-lactate in different flavor liquors

利用手性柱检测了白酒样品中乳酸乙酯对映体的质量浓度, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, D-乳酸乙酯在酱香型白酒中的含量最高, 平均质量浓度为 1.280 g·L⁻¹, 浓香型白酒中 D-乳酸乙酯的平均质量浓度为 0.592 g·L⁻¹, 清香型白酒中 D-乳酸乙酯平均质量浓度为 0.211 g·L⁻¹, 酱香型白酒中 L-乳酸乙酯的平均质量浓度为 0.283 g·L⁻¹, 浓香型白酒的平均质量浓度为 0.352 g·L⁻¹, 清香型白酒的平均质量浓度为 0.380 g·L⁻¹。酱香型白酒, 浓香型白酒和清香型白酒中的 D-乳酸乙酯含量显著高于 L-乳酸乙酯含量 ($P < 0.05$)。酱香型白酒和浓香型白酒的 L-乳酸乙酯没有显著差异 ($P > 0.05$), 但显著高于清香型白酒中 L-乳酸乙酯含量 ($P < 0.05$), 酱香型白酒中 D-乳酸乙酯显著高于浓香型白酒和清香型白酒中 D-乳酸乙酯 ($P < 0.05$)。研究结果表明, 不同香型白酒的乳酸乙酯异构体存在差异, 酱香型白酒中的乳酸乙酯对映体含量最高, 浓香型和清香型白酒中乳酸乙酯异构体浓度较低。乳酸与乳酸乙酯异构体表现出强烈的相关性, 这可能是因为白酒中的 L-乳酸与 L-乳酸乙酯处于不断酯化和水解的动态平衡中。与研究结果相同的是, 刘刚军利用气相色谱法分离乳酸乙酯对映体, 研究发现纯粮固态发酵的白酒中乳酸乙酯以右旋的形式存在, 但是没有具体分析不同香型白酒中乳酸乙酯旋光性的差异^[32]; 王明等^[33]测定 6 种市售白酒样品 (茅台王子酒、飞天茅台、水晶剑南春、泸州老窖特曲、山西杏花村汾酒、红星二锅头) 中的乳酸乙酯, 其中

酱香型白酒中的 D-乳酸乙酯是 L-乳酸乙酯的 4.7 倍, 清香型白酒中 D-乳酸乙酯是 L-乳酸乙酯的 1.2 倍, 蒲璐璐^[34]测定 97 种白酒乳酸乙酯异构体含量的比例 (包括酒厂提供的基酒和成品酒), 其中 84 种样品中 D-乳酸乙酯占 50% 以上, D-乳酸乙酯与轮次酒呈正比关系, 不同酒厂中的乳酸乙酯异构体含量存在差异, 这可能是因为生产工艺以及微生物种类的不同导致。

3 结论

该试验利用手性柱和高效液相色谱法可以将白酒中的乳酸对映体分开, 乳酸对映体的标准曲线在质量浓度为 0.020~0.600 g·L⁻¹ 范围线性良好, 两者的线性相关系数都为 0.999 9, 乳酸对映体的回收率是 93.67%~107.66%, 采用手性柱和气相色谱法可以将白酒中的乳酸乙酯对映体分开, 乳酸乙酯对映体的标准曲线在 0.01~2.5 g·L⁻¹ 范围线性良好, 两者的线性相关系数为 0.999 9 和 0.999 8, 乳酸乙酯对映体的回收率是 100.86%~106.46%。不同香型白酒中乳酸和乳酸乙酯异构体存在差异, 白酒中乳酸和乳酸乙酯大多以右旋的形式存在, 酱香型白酒的乳酸和乳酸乙酯对映体含量高于浓香型白酒和清香型白酒含量。本研究成功建立了一种分离白酒中乳酸与乳酸乙酯对映体的方法, 为白酒中乳酸和乳酸乙酯旋光异构体的比例提供理论基础。

参考文献

- [1] QIAO L, WANG J, WANG R, et al. A review on flavor of Baijiu and other world-renowned distilled liquors [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100870.
- [2] 郑宇琴. 白酒微量物质检测及其风味化学研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [3] REN Z, LIU L, TANG T, et al. Effectively increase the L(+)-isomer proportion of ethyl lactate in Baijiu by isolating and applying L(+)-lactic acid-producing bacteria [J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105615.
- [4] YANG J G, DOU X, HAN P J, et al. Microbial diversity in Daqu during production of luzhou flavored liquor [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2017, 75(2): 136-144.
- [5] TU W, CAO X, CHENG J, et al. Chinese Baijiu: The perfect works of microorganisms [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 919044.
- [6] SONG X, ZHU L, JING S, et al. Insights into the role of 2-methyl-3-furanthiol and 2-furfurylthiol as markers for the differentiation of Chinese light, strong, and soy sauce aroma types of Baijiu [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(30): 7946-7954.
- [7] ZHANG Q, SHI J, WANG Y, et al. Research on interaction regularities and mechanisms between lactic acid and aroma compounds of Baijiu [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133765.
- [8] 张河云, 王学娇, 张曼, 等. 酸类物质对浓香型白酒风味的影响研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(11): 82-89.

- [9] 陈乔,罗珠,廖勤俭,等.白酒中乳酸的检测与分析方法[J].酿酒科技,2021,7(7):115-118.
- [10] 韩经,肖冬光.白酒生产用L-乳酸的发酵工艺[J].食品与发酵工业,2019,45(24):134-139.
- [11] 杨荣,华进,周亚宾.白酒酿造过程中乳酸乙酯产生机理及“降乳”技术研究进展[J].食品工业科技,2024,45(20):398-406.
- [12] 简何.论乳酸乙酯在低度浓香型白酒中的作用[J].酿酒,2024,51(2):21-23.
- [13] ZHAO X, LI J, DU G, et al. The influence of seasons on the composition of microbial communities and the content of lactic acid during the fermentation of fen-flavor Baijiu [J]. Fermentation, 2022, 8(12): 740.
- [14] BOONPAN A, PIVSA-ART S, PONGSWAT S, et al. Separation of D, L-lactic acid by filtration process [J]. Energy Procedia, 2013, 34: 898-904.
- [15] KANG K P, LEE S, KANG S K. D-lactic acidosis in humans: review of update [J]. Electrolytes & Blood Pressure: E & BP, 2006, 4(1): 53-56.
- [16] WANG X, ZHENG Z, DOU P, et al. Cloning, expression, purification, and activity assay of proteins related to D-lactic acid formation in *Lactobacillus rhamnosus* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 87: 2117-2123.
- [17] 黎婕,刘冬梅,冯细漫.几种泡菜中的乳酸两种手性对映体和亚硝酸盐的测定[J].食品研究与开发,2010,31(12):129-133.
- [18] KIM K H, CHUN B H, BAEK J H, et al. Genomic and metabolic features of *Lactobacillus sakei* as revealed by its pan-genome and the metatranscriptome of kimchi fermentation [J]. Food Microbiology, 2020, 86: 103341.
- [19] ZHAO Z, SUGIMACHI M, YOSHIZAKI Y, et al. Correlation between key aroma and manufacturing processes of rice-flavor baijiu and awamori, Chinese and Japanese traditional liquors [J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101375.
- [20] 徐浩,戴怡凤,田露琴,等.饮料酒中手性风味物质研究进展[J].食品科学,2022,43(7):281-288.
- [21] VYVUURSKA O, KOLJANČIĆ N, THAI H A, et al. Classification of botrytized wines based on producing technology using flow-modulated comprehensive two-dimensional gas chromatography [J]. Foods, 2021, 10(4): 876.
- [22] 陈碧娥.单酶法快速测定发酵液中的L-乳酸[J].华侨大学学报(自然科学版),1998,3(3):97-99.
- [23] 陶国忠,郭耘,卢冠忠,等.乳酸乙酯对映体和丙酮酸乙酯混合物的气相色谱分析[J].分析化学,2007,3(3):447-450.
- [24] 王羽,葛卫红.高效毛细管电泳法同时测定人血浆D,L-乳酸对映体[J].中国药科大学学报,2007,5(5):412-414.
- [25] 梅芊,刘英.HPLC法测定醋酸奥曲肽注射剂中乳酸对映异构体含量[J].药物分析杂志,2017,37(11):2019-2024.
- [26] 贺瑛,柴晓鹃,曾苏.柱前手性衍生化反相高效液相色谱法测定转运液中7种芳氧丙醇胺类 β 受体阻断剂对映体的含量[J].中国药理学,2010,19(2):104-109.
- [27] XU H, QIU S, DAI Y, et al. Distribution and quantification of lactic acid enantiomers in Baijiu [J]. Foods, 2022, 11(17): 2607.
- [28] 江锋,赵振宇,聂叶,等.高效液相色谱法对白酒中的L-乳酸和D-乳酸的手性分离和测定[J].酿酒科技,2019,9(9):93-97.
- [29] LI Z, ZHANG L, HE N, et al. Competition between biodegradation fungus and lactic acid bacterium in the biorefinery processing chain for production of cellulosic L-lactic acid [J]. Bioresources and Bioprocessing, 2024, 11(1): 54.
- [30] AKAO S, TSUNO H, HORIE T, et al. Effects of pH and temperature on products and bacterial community in L-lactate batch fermentation of garbage under unsterile condition [J]. Water Research, 2007, 41(12): 2636-2642.
- [31] TONG W, WANG H, LI J, et al. Strengthening the microbial community and flavor structure of jiupei by simulating strong-aroma Baijiu fermentation with *Bacillus velezensis* DQA21 [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(9): 5338-5349.
- [32] 刘刚军.纯粮固态发酵白酒中乳酸乙酯的手性分析[J].食品与发酵科技,2017,53(5):103-105,111.
- [33] 王明,王道,陈嘉杰,等.白酒中特征手性物质的SLE-GC-MS识别方法[J].食品与发酵工业,2021,47(5):180-185.
- [34] 蒲璐璐.白酒中乳酸乙酯手性异构体及其对酒体风味贡献研究[D].贵阳:贵州大学,2020.