

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.81115

多孔紫砂陶瓷球的制备及其在馥郁香型白酒陈酿中的应用研究

徐海峰¹ 姚茂君¹ 梁超宇¹ 靳喜庆² 余 佶¹

(1. 吉首大学化学化工学院, 湖南 吉首 416000; 2. 酒鬼酒股份有限公司, 湖南 吉首 416000)

摘要: [目的] 探究多孔紫砂陶瓷材料对馥郁香型白酒基酒陈酿品质的影响, 优化陈酿工艺。[方法] 制备多孔紫砂陶瓷球, 采用场发射扫描电镜与表面积估算模型表征陶瓷球; 设计单因素试验, 通过气相色谱法定量分析 23 种主要挥发性风味物质并结合理化性质与感官评价, 研究温度、多孔紫砂陶瓷球添加量与处理时间对酒体品质的影响。[结果] 同等质量下多孔紫砂陶瓷球的表面积是陶坛的 714 倍; 最佳陈酿工艺为: 陈酿温度 50 °C、多孔紫砂陶瓷球用量 0.10%、陈酿时间 210 d。该工艺下馥郁香基酒 pH 为 3.53, 电导率为 11.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 总酸质量浓度为 2.58 g/L, 总酯质量浓度为 0.78 g/L; 19 种风味物质为主要贡献组分, 风味物质呈现“酸增酯减”特征, 总醇质量浓度略有下降; 感官评价平均得分为 93.67, 酒体品质优于自然贮藏 1 年的馥郁香型基酒。[结论] 多孔紫砂陶瓷材料辅助控温的陈酿工艺, 能够缩短馥郁香型白酒基酒的陈化时间。

关键词: 馥郁香型白酒; 基酒; 多孔紫砂陶瓷球; 温度; 理化性质; 风味物质; 感官品质; 金属离子

Preparation of porous purple clay ceramic balls and their application in the aging of Fuyuxiangxing Baijiu

XU Haifeng¹ YAO Maojun¹ LIANG Chaoyu¹ JIN Xiqing² YU Ji¹(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China;
2. Jiugui Liquor Co., Ltd., Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of porous purple clay ceramic materials on the aging quality of Fuyuxiangxing Baijiu, thereby optimizing the aging process. [Methods] Porous purple clay ceramic balls are prepared and characterized using field emission scanning electron microscopy (FESEM) and a surface area estimation model. Then, a single-factor experiment is designed to quantitatively analyze 23 main volatile flavor substances via gas chromatography. Combining physicochemical properties with sensory evaluation, the effect of temperature, the addition amount of porous purple clay ceramic balls, and treatment time on the quality of the Baijiu is studied. [Results] Porous purple clay ceramic balls possess an area 714 times that of ceramic jars of the same mass. The optimal aging process is: aging temperature 50 °C, porous purple clay ceramic balls 0.10%, aging time 210 d. Under this process, the crude Fuyuxiang Baijiu demonstrates a pH of 3.53, a conductivity of 11.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a total acidity of 2.58 g/L, and a total esters concentration of 0.78 g/L. Nineteen primary flavor substances are detected, showing a trend of "increased acidity and reduced esters", with a slight decrease in total alcohol content. The average sensory score is 93.67, and the liquor quality is superior to that of crude Fuyuxiangxing Baijiu naturally stored for one year. [Conclusion] The aging process assisted by porous purple clay ceramic materials under controlled temperature can shorten the aging time of crude Fuyuxiangxing Baijiu.

Keywords: Fuyuxiangxing Baijiu; crude Baijiu; porous purple clay ceramic ball; temperature; physicochemical property; flavor substance; sensory quality; metal ion

基金项目: 湘西州技术攻关“揭榜挂帅”项目(编号: 2022JBGS0002); 湖南省重点研发计划项目(编号: 2024JK2151-3); 吉首大学研究生校级科研项目(编号: Jdy24010)

通信作者: 姚茂君(1968—), 男, 吉首大学教授, 硕士。E-mail: yaomaojun@126.com

收稿日期: 2025-11-03 改回日期: 2026-01-28

引用格式: 徐海峰, 姚茂君, 梁超宇, 等. 多孔紫砂陶瓷球的制备及其在馥郁香型白酒陈酿中的应用研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 1-9.

Citation: XU Haifeng, YAO Maojun, LIANG Chaoyu, et al. Preparation of porous purple clay ceramic balls and their application in the aging of Fuyuxiangxing Baijiu[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 1-9.

馥郁香型白酒是以粮谷为原料,采用小曲和大曲为糖化发酵剂,经泥窖固态发酵、清蒸混入、陈酿、勾调而成,具有前浓、中清、后酱独特风格的白酒^[1]。新酿基酒通常呈现出显著的刺激性特征^[2],需将基酒置于容器中贮存,通过氧化还原反应、分子缔合作用及挥发性物质逸散等物理化学变化,可有效降低刺激性成分含量,促进风味物质重新组合,最终实现酒体感官品质的显著提升,该过程被称为白酒的陈酿(又称老熟或陈化)^[3]。目前常用的陈酿容器为陶坛与不锈钢罐。Yang等^[4]使用6种不同配方的陶坛贮藏酱香型白酒,通过检测白酒中的金属离子和48种风味物质的变化,发现陶坛可以影响白酒中金属离子的含量,通过调整陶坛配方可定向促进或抑制特定风味物质的形成,从而提升白酒品质和风味特性。然而,陶坛作为传统白酒陈酿工艺的核心贮存容器也存在明显的缺陷,如贮酒损耗多、占地面积大、库容利用率低、搬运劳动强度大等缺点^[5]。不锈钢罐贮存白酒具有占地面积小、贮量大、损耗低、计量准等优点,但惰性金属材质导致其无法提供陶坛特有的微氧环境,抑制了酯类物质与醇类物质的分子缔合作用^[6]。白酒行业中的传统工艺仍存在一些弊端^[7]。

目前,馥郁香型基酒贮藏工艺研究尚不充分。研究拟融合陶坛与不锈钢罐的陈酿优势,针对传统贮藏方式周期长、损耗大、成本高等问题,采用多孔紫砂陶瓷材料加速基酒陈酿,为优化馥郁香型基酒的贮藏工艺提供科学依据与实证参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

馥郁香型基酒:酒精度为72.5%~75.2%vol,酒鬼酒股份有限公司;

丙酮:色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙醇:色谱纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

浓硫酸、氢氧化钠、浓硝酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

邻苯二甲酸氢钾、无水碳酸钠:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

白酒混标(甲酸乙酯、正丙醇、乙酸乙酯、2-戊酮、异丁醇、正丁醇、仲丁醇、丙酸、乙酸、异戊醇、2-甲基-1-丁醇、正戊醇、丁酸乙酯、乙酸丁酯、正丁酸、2,3-丁二醇、乙酸异戊酯、正己醇、戊酸乙酯、正戊酸、己酸乙酯、己酸、庚酸乙酯、辛酸己酯、壬酸乙酯、癸酸乙酯):色谱纯,上海安谱瑞世标准技术服务有限公司;

紫砂陶土:湖南鑫隆陶瓷材料有限公司;

活性炭:酒类活性炭,四川省申联生物科技有限责任公司。

1.1.2 主要仪器设备

气相色谱仪:7890 B型,安捷伦科技有限公司;

自动电位滴定仪:907 Titrand型,瑞士万通中国有限公司;

电导率仪:856 Conductivity Module型,瑞士万通中国有限公司;

分析天平:ME 204型,瑞士梅特勒—托利多公司;

全自动制丸机:MZQ-6640型,温岭市铭大药材机械设备有限公司;

高温气氛炉: SX-3-17型,湘潭市仪器仪表有限公司;

珀金埃尔默电感耦合等离子体发射光谱仪: Avio 200 ICP-OES型,珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 多孔紫砂陶瓷材料制备 按质量比9:1将紫砂陶土与活性炭混合,搅拌直至黑色活性炭颗粒均匀分布于陶土中。向混合物料中加入其总质量10%~20%的水,反复揉搓直至物料表面无明显水分残留,制作直径为0.5~0.8 cm、质量为0.6~0.8 g的泥球。将泥球均匀铺置于托盘中,于100℃下干燥至恒重(约5 h)。随后转移至高温气氛炉中,以5℃/min升温至600℃并保温2 h,以5℃/min升温至1200℃并保温4 h,随炉冷却至室温即得多孔紫砂陶球。取多孔紫砂陶瓷球用清水洗净后依次进行如下处理:纯净水中浸泡7 d(每日换水1次);2%稀盐酸溶液中浸泡24 h,取出洗净;70%vol乙醇溶液中浸泡24 h;清水冲洗干净。处理后的样品用清水封存。使用前取出并用清水冲洗,再置于100℃恒温干燥箱内干燥5 h后即可投入使用。

1.2.2 单因素试验设计 取馥郁香型基酒(酒精度74%vol)为对象,采用玻璃瓶(500 mL)作为贮藏容器,先后研究陈酿温度(20, 30, 40, 50, 60℃)、多孔陶瓷球添加量(0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%)和陈酿时间(30, 90, 150, 210, 270 d)3个因素对酒样的影响。每个单因素试验中研究得出的最佳条件为后一个单因素试验的固定参数,仅改变目标因素研究陈酿温度时,多孔陶瓷球添加量为0,陈酿时间为30 d;研究多孔陶瓷球添加量时,陈酿时间为30 d。通过测定酒样的理化指标(如总酸、总酯、pH值、电导率等)、关键风味物质质量浓度(通过GC等方法定量分析)及感官评分,综合评价不同处理条件下基酒的陈酿效果,从而确定其最佳陈酿条件。

1.2.3 理化指标测定

(1) pH:采用自动电位滴定仪。

(2) 电导率:采用电导率仪。

(3) 总酸和总酯质量浓度:按GB/T 10345—2022《白酒分析方法》中自动电位滴定法执行,滴定终点由等电点确定。

1.2.4 风味成分测定

(1) 乙醇溶液(70%vol)配制:在室温条件下,量取70 mL乙醇溶液,在100 mL容量瓶中用超纯水定容,混匀后用酒精计校准。

(2) 23种挥发性风味标准溶液配制:参照文献[8],分别准确吸取0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 mL标准品溶液于10 mL容量瓶中,用70%乙醇溶液定容。

(3) 色谱条件:选用CP-Wax 57 CB柱(50 m×0.250 mm×0.2 μm);升温程序^[9]:40℃保持2 min,以4℃/min升至80℃保持1 min,以3℃/min升至100℃,以12℃/min升至124℃保持3 min,再以14℃/min升至200℃保持8 min;载气为氮气(N₂)(纯度>99.999%),流量1.0 mL/min;分流进样,进样量1 μL,分流比20:1。

1.2.5 多孔紫砂陶瓷球表征 用洁净压缩空气吹扫多孔紫砂陶瓷球表面以除尘,用液氮脆断方式制备其截面,采用场发射扫描电镜(SEM)分别在500倍和1 000倍的放大倍数下观察形貌。

为估算多孔紫砂陶瓷球的比表面积,将其简化为几何规则的球体模型,其内部均匀分布相同形状的微小球形孔隙。基于立体学原理,通过2D图像估算其3D孔隙数量,按式(1)~式(3)计算多孔紫砂陶瓷球比表面积。

$$S_A = \frac{S}{M}, \quad (1)$$

$$S = 4\pi R^2 + 4N\pi r^2, \quad (2)$$

$$N = \frac{2}{3} \times n \times \frac{D}{d}, \quad (3)$$

式中:

S_A ——多孔陶瓷球比表面积, m²/g;

S ——多孔陶瓷球总表面积, m²;

M ——多孔陶瓷球的质量, g;

R ——多孔陶瓷球半径, m;

N ——估算得出的微小球形孔隙个数;

r ——球形孔隙平均半径, m;

n ——从图片中计数得出截面的孔隙个数;

D ——球体的截面直径, m;

d ——孔隙平均直径, m。

为对比多孔紫砂陶瓷球与贮酒陶坛的表面积,将陶坛简化为规则圆柱体模型,其内表面积视为侧面积与底面积之和。若假设陶坛轮廓为标准椭圆曲线 $y=f(x)$,并于区间 $[a, b]$ 上绕 x 轴旋转一周形成,则其内表面积计算式为:

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \quad (4)$$

$$S = 2\pi \int_a^b y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx + 2\pi r^2, \quad (5)$$

式中:

x ——陶坛沿轴线方向的高度, m;

y ——陶坛在 x 高度处的半径, m;

S ——陶坛总表面积, m²;

r ——陶坛底部半径, m;

a ——陶坛底部所在区间横坐标;

b ——陶坛顶部所在区间横坐标。

1.2.6 香气活性值(OAV)计算 通过查询风味阈值^[10]利用风味物质的质量浓度与阈值比值计算得出各个物质的OAV值。OAV值>1则代表该物质对白酒风味有重要贡献,是关键风味物质。

1.2.7 感官评价 参考GB/T 10345—2022《白酒分析方法》和GB/T 33405—2016《白酒感官品评术语》制定感官评分标准,感官评分小组由5名省级及以上白酒评委组成白酒品评小组,将馥郁香型基酒感官标准术语分为5个方面,馥郁香型基酒感官评分标准见表1。

表1 感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	分数
陈香 (10分)	陈香明显,类似草木香	8~10
	陈香较明显,但层次感稍弱	5~7
	无陈香,香气单一,或有异杂味干扰	1~4
新酒气 (10分)	略有新酒气,醇香正,无刺鼻感,香气协调	8~10
	新酒气较明显,醇香较正,略刺鼻	5~7
	新酒气大,刺鼻不协调	1~4
异杂香 (10分)	无异杂香,香气纯净自然	8~10
	存在轻微异杂香(如轻微糠味、窖泥味)	5~7
	异杂香突出(如霉味、焦糊味、塑料味、腐败味等)	1~4
口感 (50分)	入口醇甜,口味醇净	34~50
	入口较醇甜,略有涩味苦味,口味较醇净	17~33
	口感较为刺激,有苦涩味	1~16
酒体风格 (20分)	馥郁香风格典型	15~20
	馥郁香风格较典型	8~14
	馥郁香风格明显	1~7

1.2.8 金属离子检测 依据GB 5009.268—2025,取3 mL酒样于烧杯中,低温加热去除乙醇后转移至消解内罐,加入10 mL硝酸,加盖放置1 h进行消解。冷却后开盖排气,冲洗内盖,于100℃电热板上加热30 min,定容至50 mL,混匀待测,同时制备空白样。使用电感耦合等离子体发射光谱仪测定空白及试样中Pb、Mn、Cd、Hg、As等元素含量,通过标准曲线计算其浓度,以评估陈酿后酒样中金属元素是否符合国家标准。

试样中待测元素的质量浓度计算式:

$$X = \frac{(\rho - \rho_0) \times V \times f}{m \times 1000}, \quad (6)$$

式中:

X ——试样中待测元素质量浓度, mg/L;

ρ ——试样溶液中被测元素质量浓度, μg/L;

ρ_0 ——试样空白液中被测元素质量浓度, μg/L;

V ——试样消化液定容体积, mL;

f ——试样稀释倍数；
 m ——试样移取体积，mL；
 1 000——换算系数。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2019 进行数据处理分析，采用 Origin 2025 b 对得到的数据进行作图，采用 SPSS Statistics 26 对正交试验数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 馥郁香型基酒理化性质与风味物质

2.1.1 理化性质 馥郁香型基酒理化指标检测结果

见表 2。

2.1.2 风味物质 采用气相色谱仪(GC)对 3 组同批次馥郁香型基酒 23 种主要风味物质定量检测，包括 9 种酯类物质，5 种酸类物质，9 种醇类物质，结果见表 3。

表 2 馥郁香型基酒理化性质检测结果

Table 2 Physicochemical property test results of Fuyuxiangxing crude Baijiu

pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	总酸/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	总酯/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
5.23±0.035	4.40±0.000	0.47±0.002	2.48±0.035

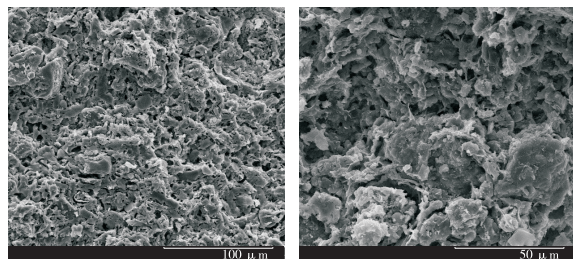
表 3 馥郁香型基酒风味物质定量检测结果

Table 3 Quantitative test results of flavor substances in crude Fuyuxiangxing Baijiu

风味物质	CAS 号	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	风味物质	CAS 号	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
甲酸乙酯	109-94-4	138.57±1.64	乙酸乙酯	141-78-6	3 911.94±4.16
丁酸乙酯	105-54-4	198.67±2.77	乙酸丁酯	123-86-4	15.77±0.31
戊酸乙酯	538-82-2	47.82±0.31	己酸乙酯	123-66-0	1 261.27±2.91
庚酸乙酯	106v30-9	6.13±0.08	辛酸乙酯	106-32-1	5.91±0.06
壬酸乙酯	123-29-5	11.64±0.06	乙酸	64-19-7	480.82±2.88
丙酸	79-09-4	14.67±0.52	正丁酸	107-92-6	44.18±0.89
正戊酸	109-52-4	8.74±0.15	正己酸	142-62-1	892.82±4.58
仲丁醇	78-92-2	12.18±0.41	正丙醇	71-23-8	343.16±1.32
异丁醇	78-83-1	134.62±1.28	正丁醇	71-36-3	274.33±0.14
2-甲基-1-丁醇	137-32-6	58.41±0.93	异戊醇	123-51-3	258.86±0.39
正戊醇	71-41-0	12.34±0.05	正己醇	111-27-3	57.88±0.62
2,3-丁二醇	123513-85-9	30.13±0.39			

2.2 多孔紫砂陶瓷球表征

2.2.1 电镜观察 采用 SEM 分别选取 500 倍与 1 000 倍的放大倍数对样品进行观测，如图 1 所示。多孔陶瓷球存在丰富且分布较为均匀的孔道结构，孔径主要集中在 5 μm 左右。



(a) 放大 500 倍 (b) 放大 1 000 倍

图 1 多孔陶瓷 SEM 图

Figure 1 SEM images of porous ceramics

2.2.2 比表面积 采用单位面积计数统计得到孔隙数量 n 为 120 个，代入式(3)求得多孔陶瓷球内部孔隙数量 N 约为 1.2×10^5 ；进一步结合式(2)与式(1)，计算得出该陶瓷球的比表面积约为 $0.03\text{ m}^2/\text{g}$ 。

经调研，工厂常用贮酒陶坛高度约 1.5 m，最大半径约 0.6 m，底部半径约 0.4 m，质量约 150 kg。将各值代入式(4)和式(5)计算得陶坛总表面积约 6.3 m^2 ，而相同质量下多孔陶瓷球表面积可达约 $4.5\times 10^3\text{ m}^2$ ，约为陶坛的 714 倍。虽然基于二维图像及立体学原理推算的三维孔隙数量存在估算误差。但相同质量下二者表面积量级差异显著。因此，仍可以认为同等质量下多孔陶瓷球的比表面积远大于陶坛，为其用于基酒催陈提供了可能。

2.3 陈酿温度对基酒酒体品质的影响

2.3.1 基酒理化性质 由图 2(a)可知，在 20~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围陈酿 1 个月后的馥郁香型基酒 pH 呈先下降后上升的趋势，说明在一定范围内，温度促进了酒体中酸类物质的增加，但随着温度升高酯化反应增强导致酸类物质减少，与 Huang 等^[11]等研究结果一致。由图 2(b)可知，馥郁香白酒基酒的电导率随着温度的升高呈先上升后下降趋势。这是因为高温促进了酒中的氧化与水解反应，促进离子生成，此外容器中金属离子缓慢迁移至酒体也是电导率升高的原因之一^[12]。由图 2(c)可知，馥郁香基酒的总酸质量浓度随着温度升高呈上升趋势，可能是因为温度抑制了酒体中的酯化反应；总酯质量浓度随着温度的升高

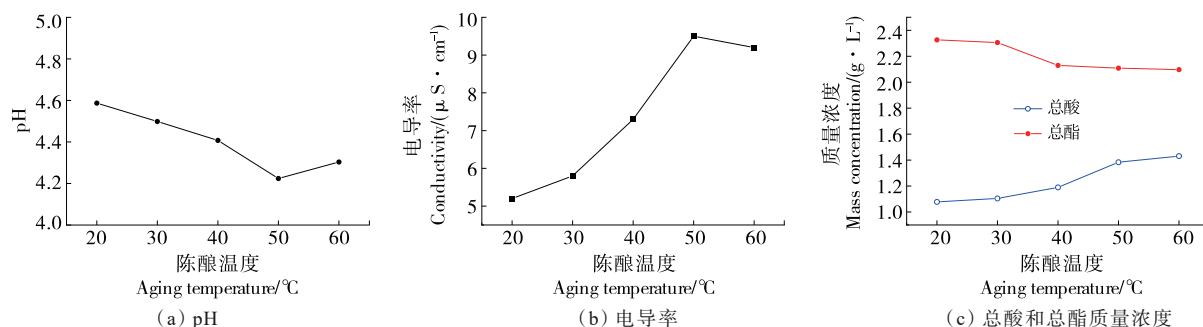


图2 不同陈酿温度下馥郁香型基酒pH、电导率、总酸和总酯质量浓度的变化

Figure 2 pH, conductivity, total acid, and total ester concentration changes of crude Fuyuxiangxing Baijiu under different aging temperatures

而减少,可能是因为温度促进了酒体中酯类物质的水解反应。这一现象与其他白酒在陈酿过程中呈现的“酸增酯减”规律一致^[13]。从理化性质可以看出,陈酿温度为50,60 °C时基酒品质较佳。

2.3.2 基酒OAV值 由图3(a)可知,己酸乙酯OAV值最大风味贡献最显著,与常宇桐等^[14]的研究结果相契合。陈酿期间,己酸乙酯质量浓度呈下降趋势,50 °C下陈酿30 d后质量浓度为863.36 mg/L,与自然条件下陈酿半年的样品(881.74 mg/L)接近。50 °C下,甲酸乙酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯整体下降,乙酸乙酯基本稳定,其OAV值在50 °C陈酿

30 d的样品与半年陈酿的样品中也较为接近。酸类物质中,正己酸与正丁酸总体上升。酸类物质作为白酒体系中的关键协调性化合物,在酒体风味平衡与口感调和方面发挥着重要作用,适量存在的酸性成分能够有效优化白酒的品质结构,提升其感官品质特征^[15]。由图3(b)可知,戊酸乙酯呈缓慢上升的趋势,可能是由基酒陈酿初期酯化反应导致的^[16]。由图3(c)可知,相对于酸类和酯类,醇类物质对于风味贡献相对较小,但醇类仍然是重要的风味物质,它们提供了基础的醇甜和助香作用,并支撑起其他更复杂风味(如果香味、花香味、青草香气)的呈现^[17]。

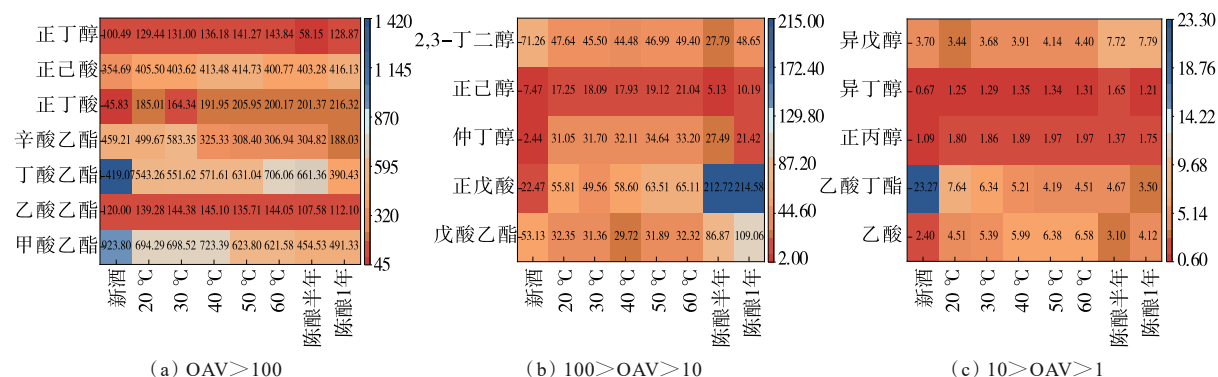


图3 不同陈酿温度下馥郁香型基酒OAV值的变化

Figure 3 OAV value changes of crude Fuyuxiangxing Baijiu under different aging temperatures

2.3.3 基酒感官品质 对不同温度下陈酿的馥郁香型基酒进行感官评价(图4),结果显示,50 °C陈酿酒样得分最高为48分,20 °C酒样得分最低为14分,整体得分随温度升高呈先升后降趋势。结合理化性质、风味物质及感官评价结果,并考虑实际生产成本,确定50 °C为最佳陈酿温度。

2.4 多孔陶瓷球用量对基酒酒体品质的影响

2.4.1 基酒理化性质 由图5(a)可知,多孔陶瓷球用量对馥郁香型基酒pH有一定影响,可能是因为陶瓷球多孔的特性携带微量的氧气进入,促进酒体中醇类物质的氧化,生成相应的酸,同时也影响酯的水解^[18]。其中,0.10%多孔陶瓷球用量的基酒酒样pH最小为4.30。由图5(b)可知,添加了多孔陶瓷球的酒样电导率均高于未添加的

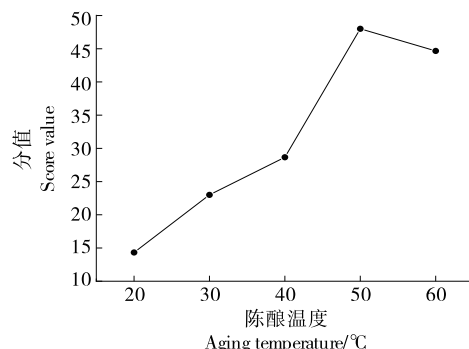


图4 陈酿温度对馥郁香基酒感官评分的影响

Figure 4 Effect of aging temperatures on the sensory scores of crude Fuyuxiangxing Baijiu

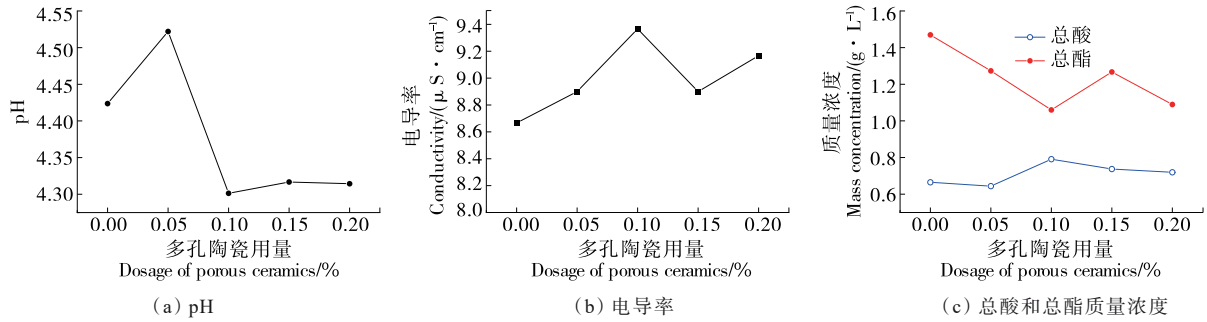


图 5 不同多孔陶瓷用量下馥郁香型基酒 pH、电导率、总酸和总酯质量浓度的变化

Figure 5 pH, conductivity, total acid, and total ester concentration changes of crude Fuyuxiangxing Baijiu with different addition amounts of porous ceramics

酒样,可能是因为多孔陶瓷球携带微量的氧气进入酒体,促进酒体中氧化反应生成有机酸阴离子与氢离子,或者陶瓷球中矿物质溶出增加了酒体中的金属阳离子^[19]。由图 5(c)可知,添加了多孔陶瓷球的馥郁香型基酒总酯质量浓度呈下降趋势而总酸质量浓度呈缓慢上升趋势,符合“酸增酯减”的规律。从理化性质得出 0.10% 多孔陶瓷

球用量最佳。

2.4.2 基酒 OAV 值 由图 6 可知,不同多孔陶瓷球用量的基酒之间 OAV 值差距不大,可能是因为短时间内相似陈酿条件下基酒的风味物质变化不明显^[20]。由此可以得知短期内增大与陶瓷接触面积对风味物质质量浓度变化影响不大,催化处理时间仍是关键参数。

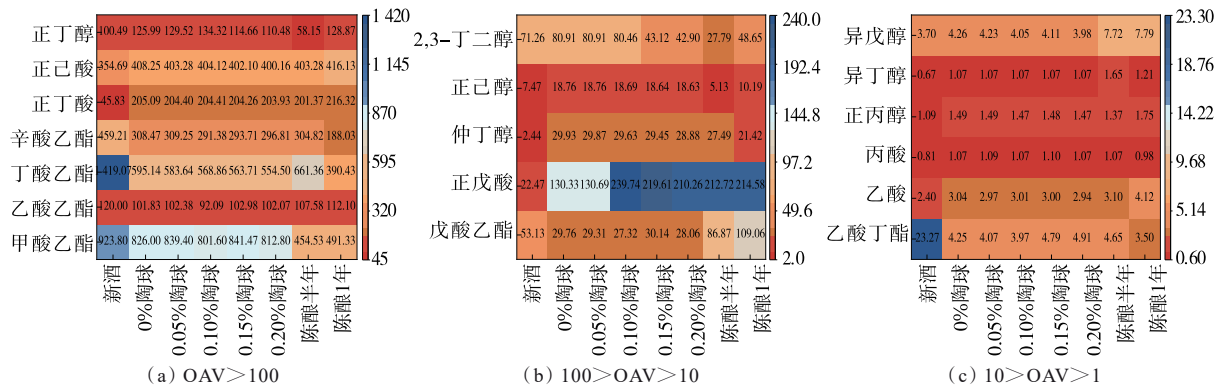


图 6 不同多孔陶瓷球用量下馥郁香型基酒 OAV 值的变化

Figure 6 OAV value changes of crude Fuyuxiangxing Baijiu with different addition amounts of porous ceramic balls

2.4.3 基酒感官品质 对不同用量多孔陶瓷球处理的馥郁香基酒进行感官评价(图 7)。结果显示,多孔陶瓷球的添加显著改善了酒样的风味与口感。当添加量为 0.10% 时,感官评分最高,品质最优;继续增至 0.15% 和 0.20% 时评分下降,可能是因为过多使用多孔陶瓷材料,酒液不断渗透到陶瓷微孔的深处,将其中的杂质迁移出来^[21]。可以看出添加了多孔陶瓷球的酒样评分均比对照组酒样评分高,多孔陶瓷球对基酒感官品质具有改善效果。综上,选取 0.10% 作为多孔陶瓷球的最佳添加量。

2.5 陈酿时间对基酒酒体品质的影响

2.5.1 基酒理化性质 由图 8(a)可知,pH 随着陈酿时间变化先降后升,其中处理 210 d 时 pH 为 3.51 此时 pH 最低。由图 8(b)可知,电导率随陈酿时间变化呈上升趋势,可能是因为多孔陶瓷球浸泡时间过长导致金属离子溶出

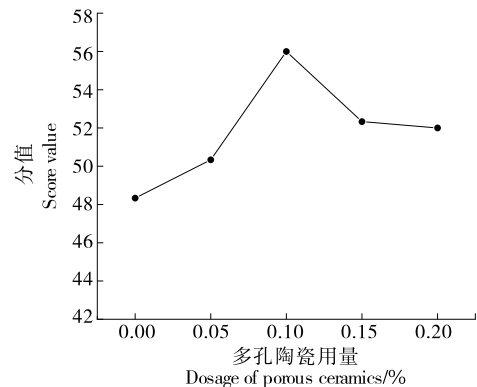


图 7 多孔陶瓷用量对馥郁香基酒感官评分的影响

Figure 7 Effect of different addition amounts of porous ceramics on sensory scores of crude Fuyuxiangxing Baijiu

增加从而使得电导率快速增长。由图8(c)可知,陈酿时间为30~210 d时总酸质量浓度由0.79 g/L上升至2.55 g/L,总酯质量浓度由1.06 g/L下降至0.75 g/L;陈酿时间为210~270 d时,总酸、总酯质量浓度变化不明显。

2.5.2 基酒 OAV 值 由图9可知,基酒主要风味物质呈规律性变化:酯类物质(如己酸乙酯、丁酸乙酯、甲酸乙酯)质量浓度逐渐降低;酸类物质(如正己酸、正戊酸、正

丁酸)质量浓度显著升高。醇类物质变化各异,其中仲丁醇等上升,2,3-丁二醇、正己醇等下降,整体波动平缓。酯类减少与酸类增加主要由酯类水解反应导致,该反应是酒体陈化的关键过程,促使风味从以酯类为主的突出果香与窖香,逐步转向以酸类为支撑的醇厚、绵甜与细腻口感。醇类物质变化的缓慢性与复杂性,可能是其同时作为前体物、中间产物及风味物质,处于动态平衡之中^[3]。

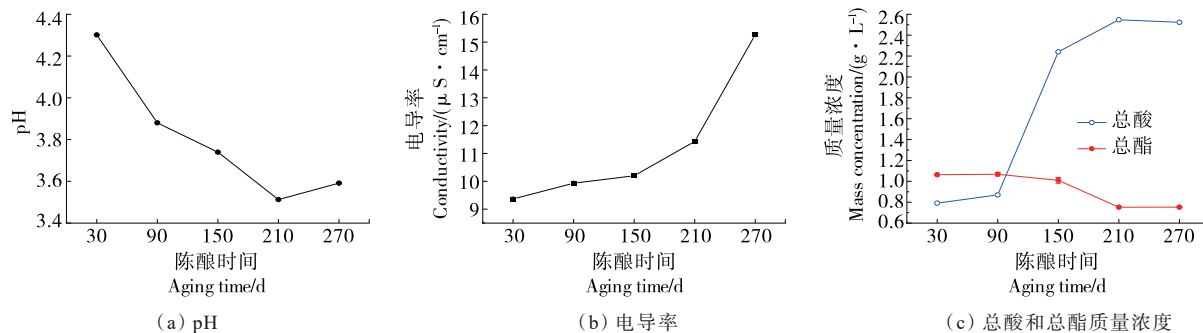


图8 不同陈酿时间下馥郁香型基酒 pH、电导率、总酸和总酯质量浓度的变化

Figure 8 pH, conductivity, total acid, and total ester concentration changes of crude Fuyuxiangxing Baijiu under different aging times

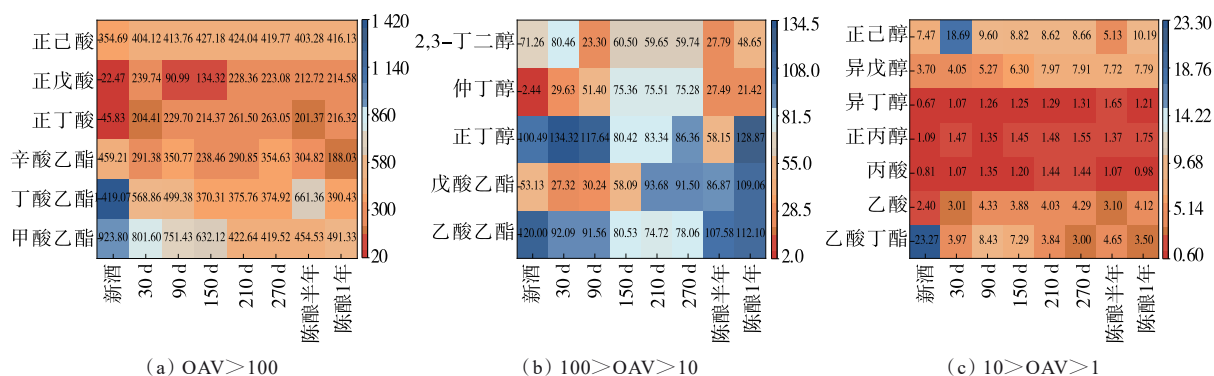


图9 不同陈酿时间下馥郁香型基酒 OAV 值的变化

Figure 9 OAV value changes of Fuyuxiangxing Baijiu with different aging times

2.5.3 基酒感官品质 分别对陈酿30,90,150,210,270 d的馥郁香型基酒进行感官评价(见图10)。结果表明,陈酿时间为210 d的馥郁香型基酒感官评分最高为94。陈酿时间为270 d时酒样出现泥腥味影响酒体风味。因此,选取210 d为最佳陈酿时间。

2.6 验证实验

为验证工艺稳定性,取3批同期基酒在上述条件下进行验证实验。结果显示,相较于自然陈酿1年,最佳工艺在理化指标与风味物质组成上均表现出优势。最佳工艺酒样具有更低的pH和更高的总酸质量浓度(见表4),呈现出更为显著的“酸增酯减”趋势,奠定了酒体醇厚绵柔的感官基础。风味物质分析进一步表明,馥郁香型白酒的典型风味物质乙酸乙酯与己酸乙酯质量浓度下降尤为

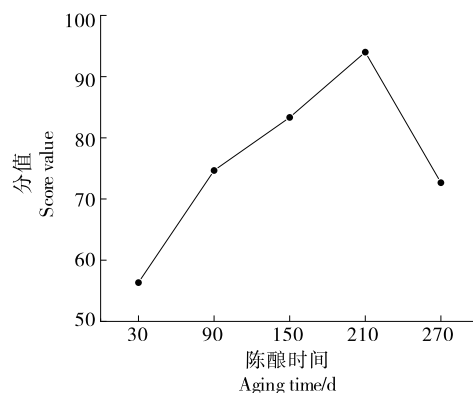


图10 陈酿时间对馥郁香型基酒感官评分的影响

Figure 10 Effect of different aging times on the sensory scores of crude Fuyuxiangxing Baijiu

明显,在维持主体酯类适度保留的同时,显著提升了仲丁醇与 2,3-丁二醇等甜感与果香贡献物质的质量浓度,并促使酸类、醇类与酯类整体分布更为协调(见表 5)。最佳工艺酒样感官评分为 93.67,高于自然陈酿 1 年酒样的(87.56),其酒体陈香突出、口感醇甜、无异杂味,馥郁香风格典型。结果表明,该工艺合理可行,且重复性良好。

2.7 金属离子检测

参照 GB 2762—2022,对最佳工艺处理的馥郁香型基

表 4 最佳工艺与自然陈酿 1 年酒样理化性质对比检测结果
Table 4 Comparison test results of the physicochemical properties of wine samples naturally stored for one year and by the optimal process

指标	pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	总酸质量浓 度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	总酯质量浓 度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
最佳工艺	3.53±0.045	11.20±0	2.58±0.003	0.78±0.008
自然陈酿 1 年	3.91±0.032	10.10±0	1.34±0.002	1.88±0.004

表 5 最佳工艺与自然陈酿 1 年酒样风味物质对比检测结果

Table 5 Comparison test results of flavor substances in wine samples naturally stored for one year and by the optimal process

风味物质	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		风味物质	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	最佳工艺	自然陈酿 1 年		最佳工艺	自然陈酿 1 年
甲酸乙酯	63.40±5.83	73.70±3.27	乙酸乙酯	2 435.94±20.55	3 654.32±14.21
丁酸乙酯	52.61±4.28	54.66±3.52	乙酸丁酯	4.94±0.52	2.37±0.03
戊酸乙酯	52.30±2.52	78.18±1.56	己酸乙酯	740.47±18.95	881.74±12.67
庚酸乙酯	18.63±0.43	13.51±0.98	辛酸乙酯	3.07±0.23	2.42±0.04
壬酸乙酯	4.71±0.65	5.32±0.18	乙酸	776.92±17.24	824.78±8.61
丙酸	21.80±4.23	17.83±0.35	正丁酸	206.64±8.97	208.53±4.16
正戊酸	52.25±2.13	83.47±1.89	正己酸	1 075.27±12.25	1 047.47±10.78
仲丁醇	376.82±12.24	107.12±0.89	正丙醇	454.66±6.68	548.34±3.56
异丁醇	249.90±3.33	242.67±4.15	正丁醇	219.55±5.34	351.81±3.37
2-甲基-1-丁醇	70.88±2.12	124.4±1.76	异戊醇	441.02±12.23	545.02±7.74
正戊醇	9.47±0.28	19.58±0.63	正己醇	68.34±3.45	78.96±1.11
2,3-丁二醇	25.58±0.43	20.57±0.31			

表 6 最佳工艺酒样金属离子检测结果†

Table 6 Test results of metal ions in the wine samples by the optimal process

金属元素	国标限量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	样品检测量/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Pb	≤0.5	3.80±0.230
Mn	≤2	ND
Cd	≤0.1	0.90±0.043
Hg	≤0.02	ND
As	≤0.5	ND

† ND 表示未检出。

酒中国标限量的 5 种金属元素检测结果见表 6,处理后的馥郁香型基酒金属元素质量浓度符合国家标准。

3 结论

研究提出并验证了一种基于多孔紫砂陶瓷材料辅助控温的陈酿新工艺,用于加速馥郁香型白酒基酒的陈化。构建多孔陶瓷球比表面积估算模型,模拟计算在同等质量下表面积为传统陶坛的 714 倍,增强了材料与酒体的界面作用效率。确定最佳工艺条件:陈酿温度(50℃)、陶瓷球添加量(0.10%)与处理时间(210 d)。在此条件下,馥郁

香基酒 pH 为 3.53,电导率为 11.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$,总酸质量浓度为 2.58 g/L,总酯质量浓度为 0.78 g/L,有害金属离子质量浓度符合国家标准。陈酿过程中,馥郁香型白酒基酒中的风味物质呈现“酸增酯减”、总醇微降的典型陈化趋势,证实该工艺有效促进了酯类水解与酸类生成等关键反应。研究还发现,材料接触面积与陈酿效果呈非线性关系,并存在临界阈值(多孔紫砂陶瓷球添加量为 0.10%),过量使用反而导致风味劣化。研究提出的陈酿新工艺融合了陶坛的催化微氧环境与不锈钢罐的控温优势,为传统基酒陈酿方式提供了一种创新性补充方案。由于试验过程中多孔紫砂陶瓷球比表面积基于几何简化模型估算,未来可进行精确三维表征,并对多孔紫砂陶瓷球的长期复用性及其对酒体微量成分的吸附/催化机制进行进一步探究。

参考文献

- [1] 叶力, 谌松强, 殷红, 等. 馥郁香型白酒风味与质量关系及其风味来源[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 1-6.
YE L, CHEN S Q, YIN H, et al. Relationship between flavor and quality of Fuyu flavor Baijiu and its flavor source[J]. China Brewing, 2023, 42(6): 1-6.
- [2] 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 X Z, XIONG Y Q, LIU J H, et al. Differences in sensory characteristics and aroma compounds between young and aged Qingxiangxing Baijiu[J]. *Food Science*, 2023, 44(14): 266-273.
- [3] 杨哲, 雷文韬, 姚彦, 等. 陶坛储酒工艺的优化与应用[J]. *酿酒科技*, 2024(1): 112-114, 139.
- YANG Z, LEI W T, YAO Y, et al. Optimization and application of storage process of Baijiu in pottery jars[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2024(1): 112-114, 139.
- [4] YANG H L, HU X J, TIAN J P, et al. Exploring the influence of pottery jar formula variables on flavor substances through feature ranking and machine learning: case study of maotai-flavored Baijiu[J]. *Foods*, 2025, 14(6): 1 063.
- [5] 白晶, 李仲佰, 黎煌, 等. 陶坛储存对酱香型白酒品质的影响[J]. *酿酒科技*, 2025(7): 54-58, 64.
- BAI J, LI Z B, LI H, et al. Influence of pottery jar storage on the quality of Jiangxiang Baijiu[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2025(7): 54-58, 64.
- [6] WEI L L, HU J F, PAN C K, et al. Effects of different storage containers on the flavor characteristics of Jiangxiangxing Baijiu[J]. *Food Research International*, 2023, 172: 113196.
- [7] 王泷, 纪元霞, 吴红刚, 等. 基于改进YOLOv5s的白酒摘酒酒度检测方法[J]. *食品与机械*, 2025, 41(7): 65-71.
- WANG L, JI Y X, WU H G, et al. Detection of alcohol content in liquor gathering based on improved YOLOv5s[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(7): 65-71.
- [8] 冯思雨, 田红云, 曹雯雯, 等. 白酒中甲醇、乙酸乙酯、乳酸乙酯、己酸乙酯和己酸的测定[J]. *酿酒科技*, 2025(5): 121-126.
- FENG S Y, TIAN H Y, CAO W W, et al. Determination of methanol, ethyl acetate, ethyl lactate, ethyl caproate and caproic acid in Baijiu[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2025 (5): 121-126.
- [9] XU M L, YU Y, RAMASWAMY H S, et al. Characterization of Chinese liquor aroma components during aging process and liquor age discrimination using gas chromatography combined with multivariable statistics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 39671.
- [10] 范文来, 徐岩. 白酒79个风味化合物嗅觉阈值测定[J]. *酿酒*, 2011, 38(4): 80-84.
- FAN W L, XU Y. Determination of odor thresholds of volatile aroma compounds in Baijiu by a forced-choice ascending concentration series method of limits[J]. *Liquor Making*, 2011, 38(4): 80-84.
- [11] HUANG Q, LIU Y, HE Z, et al. Environmental temperature variations drive the changes of microbial communities to affect Baijiu flavor quality: case study of Qingxiangxing Baijiu[J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104064.
- [12] 张晓翠, 段慧玲, 李佳惠, 等. 清香型白酒年份基酒的电导率
- 在生产中应用[J]. *酿酒*, 2024, 51(2): 93-95.
- ZHANG X C, DUAN H L, LI J H, et al. Application of the conductivity in production of aged Qing Xiang Xing crude Baijiu[J]. *Liquor Making*, 2024, 51(2): 93-95.
- [13] 祝云飞, 林培, 吴生文, 等. 特香型白酒基酒贮存期风味成分平衡过程的解析[J]. *中国酿造*, 2025, 44(1): 65-72.
- ZHU Y F, LIN P, WU S W, et al. Analysis of the equilibrium process of flavor components during the aging period of Te-flavor Baijiu base liquor[J]. *China Brewing*, 2025, 44(1): 65-72.
- [14] 常宇桐, 罗云敬, 钱承敬, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱法测定馥郁香型白酒中的挥发性香气成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(17): 4 618-4 627.
- CHANG Y T, LUO Y J, QIAN C J, et al. Determination of volatile aroma components in Fuyu flavor liquor by head space-solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(17): 4 618-4 627.
- [15] WU Y S, HOU Y X, CHEN H, et al. "Key Factor" for Baijiu quality: research progress on acid substances in Baijiu[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 2 529.
- [16] 丁力杰, 唐云, 赵亚雄, 等. 白酒中的重要酯类物质及主要来源研究现状[J]. *酿酒科技*, 2024(3): 91-100, 107.
- DING L J, TANG Y, ZHAO Y X, et al. Research status of important esters in Baijiu and their sources[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2024(3): 91-100, 107.
- [17] ZHOU Y, HUA J, HUANG Z. Effects of beer, wine, and Baijiu consumption on non-alcoholic fatty liver disease: potential implications of the flavor compounds in the alcoholic beverages[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9: 1022977.
- [18] LI M, FAN W L, XU Y. Volatile compounds sorption during the aging of Chinese liquor (Baijiu) using pottery powder[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128705.
- [19] 罗政, 代金凤, 文春平, 等. 不同贮藏容器对浓香型白酒品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(11): 118-122.
- LUO Z, DAI J F, WEN C P, et al. Effects of different storage containers on Luzhou-flavor liquor properties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(11): 118-122.
- [20] ALIYA, CAO Y F, ZHANG D N, et al. Identification of volatile differential markers in strong - aroma Baijiu based on gas chromatography - electronic nose combined with gas chromatography-time - of - flight mass spectrometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(1): 579-590.
- [21] 肖黎, 董占华. 陶瓷包装材料中铅和镉向白酒中迁移规律的研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(19): 145-150.
- XIAO L, DONG Z H. Migration of lead and cadmium from ceramic packaging materials into white spirits[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(19): 145-150.