王旨越, 王兰, 周志磊, 等. 超滤膜孔径对瓶装黄酒储藏稳定性和风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 72−83. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120217

WANG Zhiyue, WANG Lan, ZHOU Zhilei, et al. Effect of Ultra-filtration Membrane Aperture on Storage Stability and Flavor of Bottled Huangjiu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 72−83. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120217

·研究与探讨·

超滤膜孔径对瓶装黄酒储藏稳定性和风味的影响

王旨越[1,2], 王　兰[3,4], 周志磊[1,2,5], 姬中伟[1,2,5], 任青兮[1,2], 徐岳正[3,4], 毛　健[1,2,3,5,*]

（1.江南大学, 食品学院, 江苏 无锡 214122;
2.粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心（江南大学）, 江苏 无锡 214122;
3.国家黄酒工程技术研究中心, 浙江 绍兴 312000;
4.浙江古越龙山绍兴酒股份有限公司, 浙江 绍兴 312000;
5.江南大学（绍兴）产业技术研究院, 浙江 绍兴 312000）

摘　要: 瓶装黄酒在储存和销售时，常因非生物因素出现二次沉淀，影响消费者接受度。超滤是控制黄酒非生物稳定性的常用方法，但该处理对瓶装黄酒储藏稳定性和风味等的影响规律未知。本文采用 50、30、10、5 和 3 kDa 五种孔径的超滤膜处理瓶装黄酒，并在处理后储藏跟踪 1、150 和 270 d 时测定黄酒浊度、多酚浊度、离心沉淀率、粒径和 Zeta 电位等稳定性和胶体性质指标。测定储藏后期（270 d 时）黄酒易沉淀组分、抗氧化性、理化指标、挥发性和不挥发性物质含量，评价黄酒感官和色泽变化，确定最优超滤膜孔径。结果表明，超滤处理明显降低了黄酒的浊度、多酚浊度及离心沉淀率，黄酒储藏稳定性明显提高，50 kDa 及孔径更小的超滤膜均展现出了理想的处理效果。胶体性质分析显示，超滤可能去除了大分子蛋白质，使得黄酒胶体平均粒径降低、粒径分布更均匀和 Zeta 电位增大。超滤后黄酒的抗氧化性、挥发性和不挥发性成分保留效果随膜孔径减小而降低，50 kDa 膜处理对功能性成分、挥发性和不挥发性成分影响最小。储藏期间，50 kDa 超滤膜处理更好地保留了黄酒风味和色泽，而经 30 kDa 及孔径更小的超滤膜处理导致黄酒风味不同程度减弱、酒体颜色变浅。本研究揭示了超滤处理对瓶装黄酒储藏稳定性、易沉淀组分、功能性成分和感官特性等的影响，综合稳定性提升、风味保留及感官接受度，50 kDa 超滤膜在黄酒加工中展现出最佳应用潜力，为工业化解决黄酒沉淀问题提供科学依据。

关键词: 黄酒, 蛋白质胶体, 易沉淀组分, 超滤, 储藏稳定性

中图分类号: TS262.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0072−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120217

本文网刊:

Effect of Ultra-filtration Membrane Aperture on Storage Stability and Flavor of Bottled Huangjiu

WANG Zhiyue[1,2], WANG Lan[3,4], ZHOU Zhilei[1,2,5], JI Zhongwei[1,2,5], REN Qingxi[1,2], XU Yuezheng[3,4], MAO Jian[1,2,3,5,*]

（1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2.National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology (Jiangnan University), Wuxi 214122, China;
3.National Engineering Research Center for Huangjiu, Shaoxing 312000, China;
4.Zhejiang Guyue Longshan Shaoxing Rice Wine Co., Ltd., Shaoxing 312000, China;
5.Jiangnan University (Shaoxing) Industrial Technology Research Institute, Shaoxing 312000, China）

收稿日期: 2024−12−17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目（22138004）; 国家重点研发计划（2022YFD2101204）; 浙江省地协同项目（2024SDXT001-6）。

作者简介: 王旨越（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 625033403@qq.com。

*** 通信作者:** 毛健（1970−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: maojian@jiangnan.edu.cn。

Abstract: During the storage and sale of bottled huangjiu, precipitation caused by non-biological factors frequently compromises consumer acceptance. Ultrafiltration has been widely used to control huangjiu's non-biological stability, but this treatment's impact on the storage stability and flavor of huangjiu is unclear. In this study, bottled huangjiu was treated with ultrafiltration membranes featuring pore sizes of 50, 30, 10, 5, and 3 kDa, monitoring colloidal stability parameters (turbidity, polyphenol turbidity, centrifugal sedimentation rate, particle size, and Zeta potential) after 1, 150, and 270 days of storage. The precipitable components, antioxidant properties, physicochemical indices, and volatile and non-volatile substances of huangjiu in the later storage period (270 days) were determined, the sensory and color changes of huangjiu were evaluated, and the optimal pore size of ultrafiltration membrane was determined. Results demonstrated that ultrafiltration notably diminished turbidity, polyphenol-related turbidity, and centrifugal sedimentation rates in the huangjiu, significantly enhancing its storage stability. Both the 50 kDa membrane and smaller pore sizes yielded optimal treatment outcomes. Colloidal property assessments suggested that ultrafiltration might have eliminated large molecular proteins, resulting in a reduced mean particle size of the huangjiu colloid, a more uniform particle size distribution, and an elevated Zeta potential. Over the storage period, the 50 kDa ultrafiltration membrane more effectively preserved the flavor and color of the huangjiu, whereas membranes with 30 kDa and smaller pore sizes caused varying degrees of flavor weakening and color lightening. The retention of antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile constituents decreased with smaller membrane pore sizes. The 50 kDa membrane had the least impact on functional components, volatile compounds, and non-volatile constituents. This study elucidated the comprehensive effects of ultrafiltration on storage stability, precipitable components, functional constituents, and sensory properties in bottled huangjiu. Considering stability enhancement, flavor preservation, and sensory acceptance, the 50 kDa ultrafiltration membrane showed the best application potential in solving the precipitation problem in huangjiu processing, providing scientific guidance for quality optimization.

Key words: huangjiu; protein colloid; precipitable components; ultra-filtration; storage stability

黄酒是中国独有的传统发酵酒，是世界三大发酵酒之一，深受消费者喜爱。然而，市售瓶装黄酒在运输、储藏及销售环节中频繁出现由非生物因素引起的二次沉淀，影响了消费者的接受度与市场销售[1]。黄酒的非生物因素沉淀是由酒体中丰富的蛋白质、多糖、多酚和金属离子等物质相互作用所引起[2−4]。蛋白质作为黄酒的重要组成成分，为黄酒赋予了丰富的口感与营养价值。经鉴定瓶装黄酒中的蛋白质分子量分布主要在 13.3~32.4 kDa 范围内[5]，且在体系中通过电荷稳定作用形成胶体网络，但一旦受到外界条件（如温度、pH、光照等）的干扰，其平衡状态可能遭到破坏，导致胶体聚沉[6−8]。黄酒中的易沉淀组分以蛋白质、多糖及一些小分子化合物为代表，在体系中通过氢键、疏水相互作用及静电作用等发生聚集，从而破坏体系稳定性[9]。因此，解析黄酒浑浊形成机制并开发有效的稳定性控制技术，对提升产品品质、拓展消费市场具有迫切需求。

针对酒体稳定性问题，目前已有多种解决方法，其中膜过滤技术因其高效、环保、易于自动化控制等特性，在酒类生产中得到了广泛应用。罗惠波[10] 的研究表明，使用 0.22 μm 孔径的微滤膜对低度白酒进行过滤，能有效增强酒样的抗冷冻性和自然稳定性。谢广发等[11] 利用孔径为 0.18 μm 膜过滤黄酒，酒蛋白质下降 17.3%，黄酒非生物稳定性明显提高，且理化指标符合标准要求，保持了黄酒的传统风味。Hsieh 等[12] 则利用纳滤膜和超滤膜对米酒进行处理，提高了酒体的澄清度，同时减少了理化指标的变化。研究表明，超滤处理后，黄酒中的高分子蛋白质含量显著降低，而低分子蛋白质的相对含量增加，这有助于提高黄酒的非生物稳定性[13]。尽管膜过滤技术在黄酒生产中的应用已初见成效，文献报道孔径 350~100 kDa 的超滤膜处理可以有效澄清黄酒，更小孔径超滤膜仍能较好地保留黄酒独特的风味、降低杂醇油含量[14−15]，但针对不同孔径超滤膜提高瓶装黄酒储藏稳定性及去除易沉淀组分效果的研究仍显不足。此外，传统研究多基于经验性浊度指标，未能从胶体科学角度揭示超滤对酒体分散体系电荷特性、粒径分布等参数的影响规律。

本研究基于胶体理论探究了黄酒在储藏过程中的稳定性问题。选取了孔径分别为 50、30、10、5 及 3 kDa 的五种超滤膜，系统研究超滤处理对黄酒储藏稳定性、易沉淀组分以及风味、色泽等多方面特性的影响。具体而言，本研究通过测定浊度、粒径分布及 Zeta 电位等关键参数，表征了超滤处理对黄酒储藏稳定性的影响规律；同时，通过定量分析黄酒中易沉淀组分的含量变化，对比了超滤膜处理前后黄酒中易沉淀组分的去除效果。此外，本研究还综合运用了高效液相色谱、气相色谱-质谱联用（GC-MS）技术、感官评价及色泽对比等多种分析手段，全面评估了超滤处理对黄酒功能性成分、风味特征、色泽表现、挥发性及不挥发性成分等多种特性的综合影响。本研究旨在提高黄酒储藏稳定性的同时，保留黄酒基本特征，以期为超滤技术在黄酒实际生产中的应用提供充足的依据，为瓶装黄酒二次沉淀控制提供新的思路与方法。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

传统型三年陈半干瓶装黄酒　酒精度：16%vol、总糖：15.1~40.0 g/L、pH：4.03、氨基酸态氮：0.887±0.086 g/L、总酸：4.924±0.162 g/L、非糖固形物：

37.005±1.576 g/L, 符合国标 GB/T 13662-2018《黄酒》中对传统型半干黄酒的要求, 绍兴某黄酒公司生产; 无水乙醇、盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH)、过氧化氢、过硫酸钾、硫酸铜($CuSO_4·5H_2O$)、硫酸(H_2SO_4)、硫酸亚铁($FeSO_4$)、酒石酸钾钠($C_4H_4O_6KNa·4H_2O$)、氧化钙、甲醛、2-辛醇、磷酸、磷酸二氢钾、草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、乙酸、琥珀酸、柠檬酸 国药集团化学试剂有限公司; 牛血清蛋白标准物(BSA) 北京索莱宝科技有限公司; 没食子酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)、总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒 上海源叶生物科技有限公司。

Minimate™ EVO 切向流过滤系统 孔径/截留分子量(MWCO)为 50、30、10、5 和 3 kDa 的 Omega 聚醚砜滤膜 美国颇尔 PALL 有限公司; Waters e2695 高效液相色谱仪 美国 Waters 公司; S433D 全自动氨基酸分析仪 德国 Sykam 公司; Trace 1300 气相色谱-质谱联用仪 美国 Thermo Fisher 科技公司; Zetasizer nano ZS 纳米粒度及 Zeta 电位仪 英国马尔文仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黄酒超滤处理及储藏实验 黄酒超滤处理: 依次用 0.1~0.5 mol/L NaOH 溶液和纯水对孔径/截留分子量为 50、30、10、5 和 3 kDa 的超滤膜进行消毒清洗, 再用消毒清洗后的超滤膜处理黄酒样品, 收集不同孔径下的黄酒滤液。

储藏实验: 对上述酒样进行为期 9 个月的室温(20 ℃)储藏实验, 在储藏第 1、150 和 270 d 时取样测定各组样品的浊度、离心沉淀率、粒径分布、Zeta 电位等指标与未超滤的样品进行比较分析。

1.2.2 黄酒浊度测定 浊度[16]: 在 800 nm 波长下, 以蒸馏水为参比(蒸馏水浊度为零), 测定透光率 T, 以 1-T 作为黄酒的浊度。

$$A = -\lg T \quad \text{式(1)}$$

式中: A 是吸光度; T 是透光率。

多酚浊度[17]: 待测样品中加入 100 μL 儿茶素-乙醇溶液(5% w/v)。分别测定多酚溶液加入前后的浊度(儿茶素是黄酒中最常见的多酚)。

$$NTU = NTU_1 - NTU_2 \quad \text{式(2)}$$

式中: NTU_1 是黄酒浊度初始值; NTU_2 是黄酒加入多酚后浊度值。

1.2.3 离心沉淀率测定 参考文献 [18] 报道的方法进行, 准确量取 10 mL 黄酒于离心管中, 在 5000 r/min 下离心 15 min 分离沉淀和上清液。

$$R(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: R 为离心沉淀率(%); m_1 表示样品质量(g); m_2 表示沉淀质量(g)。

1.2.4 粒径和电位测定 为了探究超滤前后黄酒浊度和离心沉淀率变化的原因, 利用纳米粒度电位仪分析黄酒中蛋白质胶体颗粒的变化情况。分别取 1 mL 澄清透明的黄酒样品于粒径测定样品池和电位测定样品池中, 在纳米粒度电位仪 Zetasizer 软件中设定合适的参数, 测定黄酒粒径大小、粒径分布和 Zeta 电位。

具体测试参数参考文献 [19] 并结合样品实际情况设置: 分散剂名称: 酒精; 分散剂系数: 1.360; 待测物质系数: 1.330; 粘度: 1.1000; 待测物质吸收系数: 0.01; 探测器角度: 90.00; 颗粒折射率: 1.460; 分散剂折射率: 1.330。

1.2.5 黄酒中易沉淀组分含量测定 蛋白质、多酚、亚铁离子含量测定参考文献 [20] 报道的方法进行, 多糖含量测定参照国标进行。考马斯亮蓝法测定蛋白质含量: 分别取 0.1 mg/mL 的蛋白质标准溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL, 再依次加入 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0 mL 的蒸馏水, 得 6 个不同浓度梯度的蛋白质标准溶液, 各加入 5 mL 考马斯亮蓝溶液, 以 1.0 mL 蒸馏水作为空白对照, 在 595 nm 波长处测定吸光度。

福林酚法测定多酚含量: 分别取 1 mg/mL 没食子酸溶液 0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 mL, 均用蒸馏水稀释到 46 mL, 得 5 个不同浓度梯度的没食子酸标准溶液, 各加入 1 mL 福林-酚试剂, 3 min 后再加入 3 mL 2% Na_2CO_3 溶液, 避光室温放置 2 h, 其间适时超声振荡, 以 46 mL 蒸馏水加入 1 mL 福林-酚试剂和 3 mL 2% Na_2CO_3 作为空白对照, 在 760 nm 处测定吸光值。

邻菲罗啉法测定亚铁离子: 分别取 0.1 g/L 亚铁标准溶液 0、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mL 于 50 mL 容量瓶中, 各加入 10% 盐酸羟胺溶液 1 mL、邻菲罗啉溶液 2.5 mL 和醋酸钠溶液 5 mL, 用蒸馏水定容并摇匀。静置 10~15 min, 以蒸馏水作为空白对照, 在 510 nm 处测定吸光度。

多糖含量测定: 多糖含量为总糖与还原糖之差, 总糖参考国标 GB/T 13662-2018《黄酒》中的检测方法[21], 还原糖参考国家标准 GB 5009.7-2016《食品中还原糖的测定》中高锰酸钾滴定法测定[22]。

上述所有测定均以标准物质含量为横坐标, 吸光度为纵坐标绘制标准曲线, 计算回归方程见表 1。

1.2.6 黄酒抗氧化性检测

1.2.6.1 DPPH 自由基清除实验 参考文献 [23] 报道的方法并作适当修改。准确配制 0.1 mmol/L 的 DPPH·乙醇溶液, 50 μg/mL 和 100 μg/mL 的抗坏血酸(V_C)溶液, 在试管中分别加入 2 mL 的 0.1 mmol/L DPPH·乙醇溶液和 1.5 mL 不同待测样品, 混匀反应半小时, 在 517 nm 处测其吸光度值, 以

表 1　蛋白质、多糖、多酚和亚铁离子回归方程

Table 1　Regression equations of proteins, polysaccharides, polyphenols and ferrous ions

组分	回归方程	R^2
蛋白质	y=0.7517x+0.05114	0.9987
多糖	y=3.342x+0.08251	0.9976
多酚	y=0.4049x+0.08366	0.9922
亚铁离子	y=0.03864x0.02858	0.9914

抗坏血酸作为阳性对照。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\frac{A_0-(A_1-A_2)}{A_0}\times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中：A_0，DPPH 溶液+无水乙醇的吸光度值；A_1，样品+DPPH 溶液的吸光度值；A_2，样品+无水乙醇的吸光度值。

1.2.6.2　$ABTS^+$自由基清除实验　参考文献 [24] 报道的方法并作适当修改。准确配制 7.4 mmol/L ABTS 储备液，ABTS 溶液和 2.6 mmol/L 的过硫酸钾溶液等体积混合，用无水乙醇将 ABTS 储备液在 734 nm 的吸光度调为 0.70 左右，得到 ABTS 储备液，将 2 mL 的 ABTS 储备液与 0.20 mL 不同待测样品混合，室温反应 6 min 后测定 734 nm 处的吸光值，以抗坏血酸作为阳性对照。

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\frac{A_2-A_1}{A_2}\times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中：A_1，样品+ABTS 溶液的吸光度值；A_2，无水乙醇+ABTS 溶液的吸光度值。

1.2.6.3　总抗氧化能力的测定　用总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒测定总抗氧化能力。FRAP 工作液：FRAP 缓冲液、TPTZ 和氯化铁溶液分别按 10∶1∶1 的比例混合；制备 Fe^{2+}标准梯度溶液：用蒸馏水将 Fe^{2+}标准溶液(10 mmol/L)稀释至 0.05、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.2、1.5 mmol/L。将不同浓度 Fe^{2+}标准溶液和待测样品与 FRAP 工作液混合，37 ℃ 孵育 30 min，测定反应溶液在 593 nm 处吸光度值。建立标准曲线：y=1.7473x+0.1014，R^2=0.9982，结果以 Fe^{2+}的质量浓度(mg/L)表示。

1.2.7　黄酒理化指标测定　pH、酒精度、非糖固形物、总酸、氨基酸态氮和总糖测定，参考国标 GB/T 13662-2018《黄酒》中黄酒 pH、酒精度、非糖固形物、总酸、氨基酸态氮和总糖的检测方法[21]。

1.2.8　黄酒挥发性成分检测　HS-SPME 条件：参考文献 [25] 报道的方法进行，取 2 mL 酒样，加入 4 mL 超纯水和 2.5 g NaCl，置于 20 mL 顶空瓶中，加入 10 μL 内标(2-辛醇，100 mg/L)，迅速密封。在 50 ℃ 下平衡 5 min、以 300 r/min 转速吸附萃取 45 min，不分流进样，250 ℃ 下解吸 5 min 后进 GC-MS 分析。

GC 条件：进样口温度为 250 ℃；初始柱温 40 ℃ 保持 2 min；5 ℃/min 升温至 230 ℃ 并保持 10 min；载气为高纯氦气(>99.999%)，流速 1.0 mL/min。

MS 条件：电子电离(EI)源；电流 50 μA；电子能量 70 eV；传输线温度 240 ℃；离子源温度 280 ℃；扫描质量数范围 33~350 amu。

1.2.9　氨基酸和有机酸　氨基酸：参考国标 GB/T 30987-2020《植物种游离氨基酸的测定》全自动氨基酸分析仪[26]。

有机酸：参考文献 [27] 报道的方法进行。前处理：取 1 mL 黄酒样品于 4 mL 离心管中，随后向其中加入 0.2 mL 浓度为 300 g/L 的硫酸锌溶液和 0.2 mL 浓度为 106 g/L 的亚铁氰化钾溶液，补水至 4 mL；室温下静置沉淀 1 h，后在室温条件下 8000 r/min 离心 5 min。标品配制：分别配制浓度为 1.016、2.033、1.054、2.094、10.223、10.03、1.068、5.063 g/L 的草酸、酒石酸、丙酮酸、苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸单一有机酸标准样品液；再将上述 8 种酸单一标品混合并按浓度稀释 1、2、5、10、25、50、125 倍得混合标准溶液。检测条件：柱温 30 ℃；进样量 10 μL；流动相 0.01 mol/L 磷酸二氢钾(用磷酸调节 pH2.45)；流速 1 mL/min；检测波长 210 nm；洗脱方式为梯度洗脱；根据保留时间定性，峰面积外标法定量。以混合标准溶液浓度为横坐标，色谱峰面积为纵坐标绘制标准曲线，计算回归方程见表 2。

表 2　有机酸标品的回归方程

Table 2　Regression equations of organic acid standard products

有机酸	保留时间(min)	回归方程	R^2
草酸	4.057	$y=4\times10^6x+45773$	0.9998
酒石酸	4.779	y=754075x+2580.5	1
丙酮酸	5.777	$y=3\times10^6x-1311.6$	1
苹果酸	6.666	y=369290x−1102.7	1
乳酸	8.371	y=240060x−3276.7	0.9999
乙酸	9.184	y=251525x−45858	0.9921
柠檬酸	12.969	y=501160x+1042.9	0.999
琥珀酸	16.858	y=261816x+4820.7	0.9976

1.2.10　黄酒感官评价　感官评价参考文献 [28] 方法并适当修改，从本课题组挑选 5 男 5 女年龄在 22~25 岁经过专业培训的感官品评员，对黄酒的酸味、甜味、苦味、鲜味、涩味五个风味评价关键词和酸香、花香、坚果香、醇香、麦曲香、果香六个香气评价关键词进行感官评价，并进行强度打分，评分范围为 0(非常弱)到 10(非常强)，均以未经处理的黄酒为参照。按照表 3 配制黄酒典型感官属性参照样，每个参照样均设置中等偏弱(3~5 分)和中等偏强(6~10 分)两个标度。感官品评员在评价时先嗅闻或啜饮参照样以确定标品强度，再将酒样与参照样相比较打分，以未经处理的黄酒为对照。

表 3 黄酒典型感官属性及参照样配制

Table 3 Typical sensory properties of huangjiu and reference sample formulation

属性	参照样(0~10分标度)
酸味	柠檬酸水溶液1 g/L(8分), 0.4 g/L(4分)
甜味	蔗糖水溶液24 g/L(8分), 12 g/L(4分)
苦味	奎宁溶液0.1 g/L(8分), 0.05 g/L(4分)
鲜味	味精水溶液0.3 g/L (8分), 0.175 g/L(5分)
涩味	1 g/L单宁水溶液(8分), 0.5 g/L(4分)
酸香	乙酸10 mL/L(10分), 5 mL/L(5分)
花香	β-苯乙醇10 mg/L(10分), 5 mg/L(4分)
坚果香	2,6-二甲基吡嗪溶液20 mg/L(6分), 10 mg/L(3分)
醇香	30%乙醇(10分), 15%乙醇(5分)
麦曲香	生麦曲10 g/100 mL(8分), 5 g/100 mL(4分)
果香	己酸乙酯8 mg/L(6分), 4 mg/L(3分) 丁酸乙酯8 mg/L(6分), 4 mg/L(3分)

1.3 数据处理

本研究实验设置 3 个平行样品, 所有数据均表示为平均值±标准差, 采用单因素方差分析(ANOVA)计算 P 值, $P<0.05$ 被认为是显著, 实验数据用 Microsoft Excel 进行统计分析和表格制作; SPSS 22.0 软件进行显著性、相关性分析; Origin2024 软件绘制统计图和相关性分析热图。

2 结果与分析

2.1 超滤对瓶装黄酒储藏稳定性的影响

2.1.1 超滤对瓶装黄酒浊度和离心沉淀率的影响

浊度是测量胶体溶液中悬浮颗粒对光的散射程度, 若胶体稳定性良好, 浊度通常较低[29]。多酚浊度则基于酒中易沉淀蛋白质与多酚间的疏水相互作用理论, 用于评价体系中易沉淀蛋白含量; 若体系中易沉淀蛋白含量低, 多酚浊度通常较小[17]。离心沉淀率是通过胶体颗粒的沉降行为评估胶体稳定性, 若胶体颗粒高分散, 离心沉淀率通常较低[30−31]。

本节采用不同孔径超滤膜处理瓶装黄酒, 并跟踪各组酒样储藏期间稳定性, 在储藏 1、150 和 270 d 进行取样测定稳定性指标(浊度、多酚浊度和离心沉淀率)变化情况如图 1 所示。实验结果显示, 超滤显著降低了黄酒的浊度($P<0.05$), 且在储藏期间, 超滤实验组的浊度始终低于对照组, 表明超滤有效提升了黄酒的稳定性。从多酚浊度数据来看, 所有组别检测结果均为正值, 说明黄酒中存在易沉淀蛋白质; 使用孔径≤10 kDa 超滤膜的实验组, 其多酚浊度显著低于对照组及其他实验组($P<0.05$), 这表明该孔径范围下的超滤膜能更高效地去除易沉淀蛋白质。随着储藏时间增加, 对照组多酚浊度上升明显, 而实验组变化较小。离心沉淀率数据也支持了超滤的有效性, 实验组沉淀率显著低于对照组($P<0.05$)。超滤通过去除黄酒中的悬浮物和大颗粒物质, 减少了光线散射, 从而显著提升了黄酒的清澈度和稳定性。整体而言, 超滤处理在储藏期间持续稳定地降低了黄酒的浊度、多酚浊度和离心沉淀率, 使用孔径≤50 kDa 的超滤膜, 在提升黄酒储藏稳定性方面均有突出效果。

2.1.2 超滤对瓶装黄酒胶体性质的影响 平均粒径(Z-Ave nm)反映体系胶体颗粒大小, 颗粒越小, 体系越稳定, 不易聚集沉淀。粒径分布用于表征胶体颗粒分散情况, 颗粒分布越窄、体系越均一, 稳定性越好。Zeta 电位(mV)则反映蛋白质胶体颗粒带电情况, 数值大小代表带电量, 正负代表带电种类, 数值越接近零, 即越接近蛋白质等电点, 体系越易产生沉淀, 稳定性越差[32]。

本节跟踪测定了各组酒样储藏 1、150 和 270 d 的黄酒体系胶体性质(平均粒径、粒径分布和 Zeta 电位)变化情况如图 2 所示。超滤处理后, 胶体平均粒径减小, 表明大分子蛋白被超滤膜截留; 随着储藏时间延长, 各组平均粒径增大, 但实验组粒径增长较慢。除 5 kDa 实验组外, 储藏 270 d 后, 其平均粒径仍小于 1600 nm。对于粒径分布, 膜孔径越小, 粒径分布曲线越窄, 颗粒大小更一致, 分散性更好; 随着储藏时间延长, 未被截留的小分子蛋白质会通过静电力、范德华力等非共价作用重新聚集, 导致粒径分布变宽[32]。而 Zeta 电位由过滤前的正值转为负值, 意味着超滤前蛋白质颗粒表面带有正负电荷, 超滤膜主要截留带正电荷的蛋白质, 使得 Zeta 电位变为负

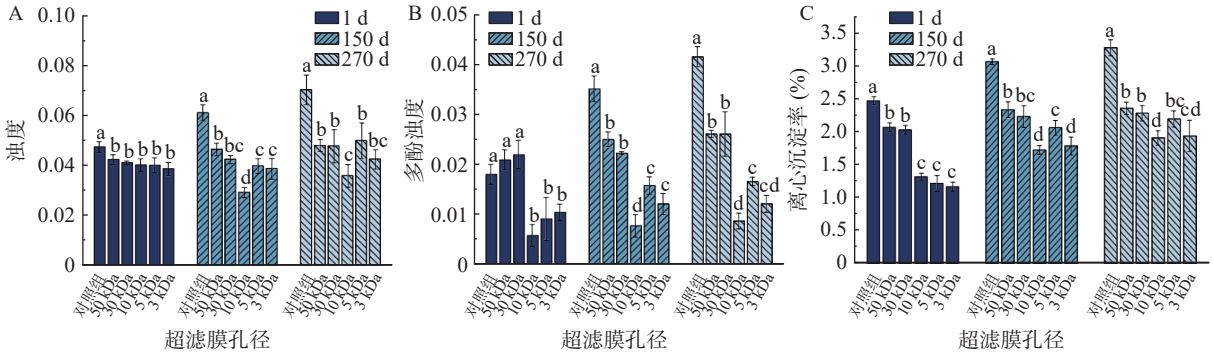


图 1 超滤前后瓶装黄酒浊度和离心沉淀率变化

Fig.1 Changes of turbidity and centrifugal precipitation rate of bottled huangjiu before and after ultra-filtration

注: A-超滤对瓶装黄酒浊度的影响; B-超滤对瓶装黄酒多酚浊度的影响; C-超滤对瓶装黄酒离心沉淀率的影响; 图中不同字母表示同一时间点下组间差异显著($P<0.05$), 图 2、图 3 同。

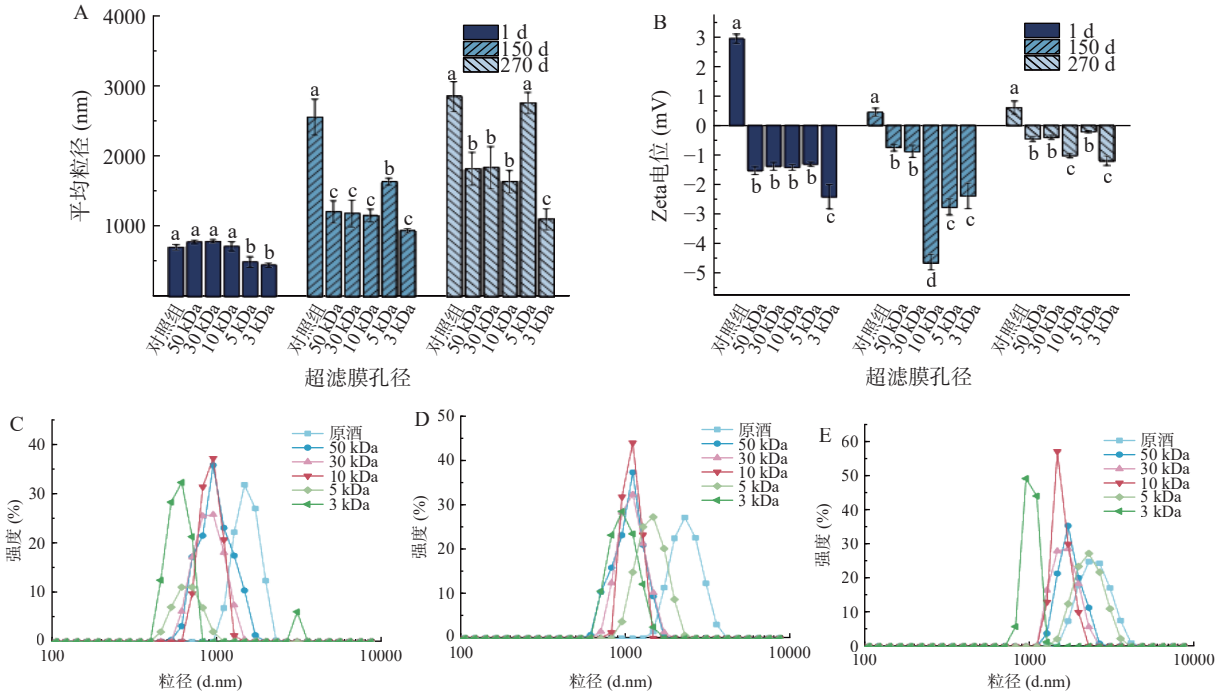


图 2　超滤前后瓶装黄酒胶体粒径和 Zeta 电位变化

Fig.2　Changes in the particle size and Zeta potential of bottled huangjiu protein colloid before and after ultra-filtration

注：A-超滤对瓶装黄酒粒径的影响；B-超滤对瓶装黄酒 Zeta 电位的影响；C-超滤 1 d 后瓶装黄酒胶体粒径分布；D-超滤 150 d 后瓶装黄酒胶体粒径分布；E-超滤 270 d 后瓶装黄酒胶体粒径分布。

值；储藏过程中超滤后酒样 Zeta 电位始终为负值，并呈现先远离后靠近0 mV 的变化趋势。5 kDa 超滤可能移除了部分带电小分子，导致体系 Zeta 电位显著下降，从而加速颗粒絮凝。超滤不仅去除了较大颗粒和悬浮物，还优化了胶体粒径结构。研究显示，胶体颗粒越小，其比表面积和表面电荷就越大，能增强颗粒间的排斥力，减缓颗粒相互吸引聚集；同时，Zeta 电位越高，静电排斥力就越强，这有助于维持颗粒的分散状态[16]。总而言之，尽管蛋白质颗粒在储藏过程中会自然聚集，但超滤处理明显减缓了这一趋势。它通过去除带正电的大分子蛋白质，使黄酒中的蛋白质颗粒更均匀，减少了聚集倾向，从而提升了黄酒的稳定性[32−33]。

2.2　超滤处理前后瓶装黄酒中易沉淀组分含量变化分析

黄酒中的易沉淀组分除了蛋白质外，还包括多糖、多酚和亚铁离子。蛋白质与多糖、多酚之间的相互作用可形成难溶复合物，导致沉淀；而亚铁离子的存在也可能促进易沉淀组分的形成[20]。通过对超滤后储藏 270 d 时的酒样的测定，根据表 1 易沉淀组分标准曲线，计算易沉淀组分的含量如图 3 所示。结果显示，随膜孔径减小，经孔径≤30 kDa 实验组蛋白质含量变化不大，但实验组与对照组差异显著（P<0.05），50 kDa 超滤膜已能去除大部分易沉淀蛋白。经孔径≤30 kDa 膜处理后，黄酒多糖含量显著下降（P<0.05），且去除比例随膜孔径减小而增加。而多酚和亚铁离子含量略有下降，部分实验组下降趋势不明显。蛋白质的去除能降低黄酒体系中蛋白质、多酚与多糖间的交联作用，防止复合物生成，进而提升黄酒稳定性。适量多糖有助于维持胶体分散性，但浓度过高会增强颗粒相互作用，导致聚集或絮凝，因此去除多糖对提高稳定性有积极作用[34]。超滤技术能有效去除过多蛋白质和多糖，提升胶体分散性和稳定性。结合图 1 和图 2 结果，发现膜孔径并非越小越好，10~50 kDa 膜处理在提高黄酒稳定性、去除易沉淀成分方面已有较理想效果。

对瓶装黄酒易沉淀组分和稳定性指标进行相关性分析见图 4。所有易沉淀组分与稳定性指标均呈正相关。具体而言，蛋白质与多酚浊度有相关性（P<0.05），与离心沉淀率有显著相关性（P<0.01）；多糖与多酚浊度和电位分别显著相关（P<0.01）和相关（P<0.05），与离心沉淀率和粒径呈极显著相关（P<0.001）；多酚与浊度相关（P<0.05），但与其他指标无相关性；亚铁离子则与离心沉淀率和电位具有相关性（P<0.05），与浊度和粒径显著相关（P<0.01）。

2.3　超滤前后瓶装黄酒抗氧化性变化情况

前文研究表明，采用 50 kDa 以下超滤膜处理对提升黄酒稳定性及去除易沉淀成分效果显著。为探究超滤处理对黄酒基本性质的影响，进一步确定最佳超滤膜孔径，本节分析了经 3~50 kDa 超滤膜处理后储藏 270 d 的黄酒抗氧化性。黄酒富含多酚、多肽、多糖及色素等抗氧化活性成分，其清除自由基能力突出。通过测定 DPPH、ABTS$^+$自由基清除率及总抗氧化性，分析超滤处理对黄酒功能性成分的影响，与未超滤黄酒及不同浓度的抗坏血酸溶液进行对比，结果如图 5 所示。

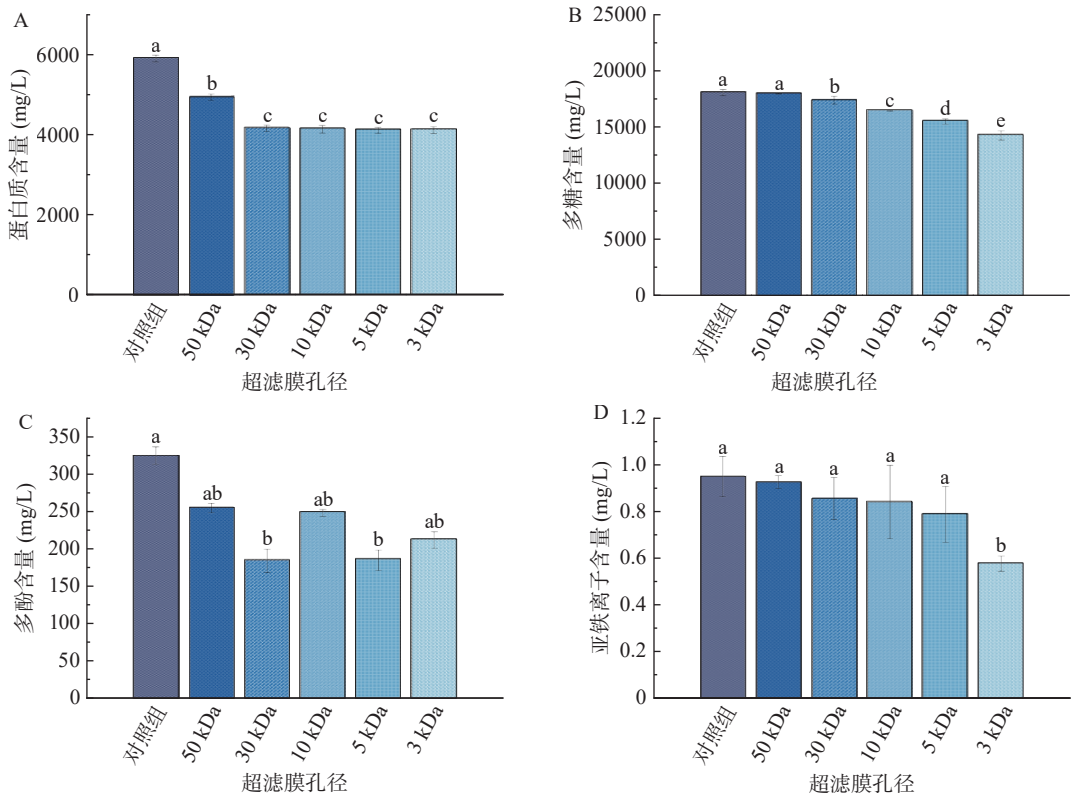


图 3 超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒易沉淀组分含量

Fig.3 Content of unstable components in bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

注: A-蛋白质含量; B-多糖含量; C-多酚含量; D-亚铁离子含量。

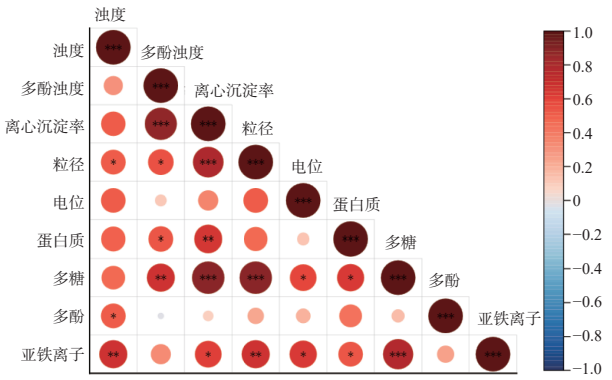


图 4 瓶装黄酒易沉淀组分与稳定性指标相关性热图

Fig.4 Heat map of correlation between precipitation components of huangjiu and colloidal stability index

注: 图中*表示 $P<0.05$ 有相关性, **表示 $P<0.01$ 有显著相关性, ***表示 $P<0.001$ 有极显著相关性。

在自由基清除率方面, 经孔径<10 kDa 超滤膜处理的瓶装黄酒, 其 DPPH 自由基清除率与对照组、其他实验组及两组 V_C 溶液相比, 均存在显著差异($P<0.05$)。而 50 kDa 与 30 kDa 组的 DPPH 自由基清除率与对照组相比则无明显变化。对于 $ABTS^+$自由基清除率, 孔径≤30 kDa 组与对照组和 50 kDa 组相比差异显著($P<0.05$), 清除率略有下降, 且四组间差异并不显著。在总抗氧化性方面, 50 kDa 组与对照组间无显著差异, 而其他实验组的总抗氧化性相较于对照组均有所降低。已有研究表明, 黄酒中的功能性多糖主要分布在 3~5 kDa 分子量范围内[24], 而功

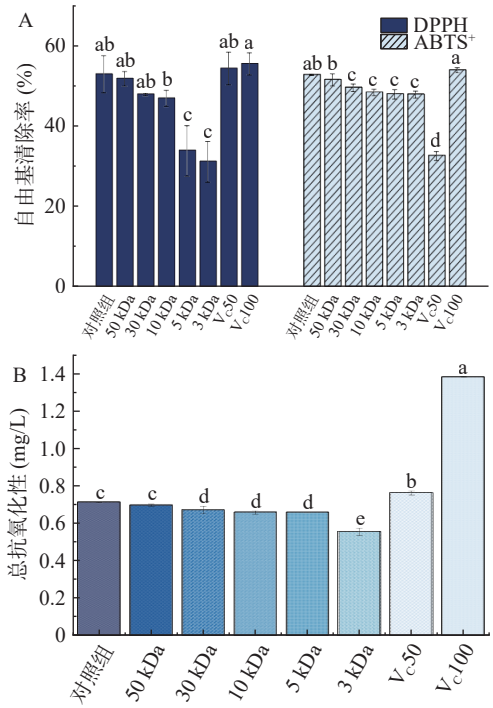


图 5 超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒抗氧化性

Fig.5 Antioxidative of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

注: A-DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率; B-总抗氧化性; 图中不同字母表示同一指标组间差异显著($P<0.05$), 图 6 同。

能性多肽、多酚的分子量则多小于 1 kDa。这与本实验中, 小孔径(5 kDa 以下)处理后黄酒自由基清除率和抗氧化性显著下降的结果相吻合。为兼顾黄酒稳

定性与功能性成分的保留，选择 50 kDa、30 kDa 和 10 kDa 孔径的实验组进行进一步评估，以确定最优超滤膜孔径。

2.4　瓶装黄酒主要理化指标测定结果分析

为评价超滤处理对黄酒基本理化性质的影响，综合分析不同孔径超滤膜处理效果，本节对经过 50、30、10 kDa 超滤膜处理储藏 270 d 时的黄酒主要理化指标进行分析，参考国标 GB/T 13662-2018《黄酒》中的要求，与对照组进行比较结果如表 4 所示。

表 4　超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒各理化指标变化

Table 4　Changes of the physicochemical indices of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

物质	GB/T 13662-2018	对照组	50 kDa	30 kDa	10 kDa
pH	3.5~4.6	4.03±0.03^{b}	4.19±0.06^{a}	4.18±0.05^{a}	4.18±0.03^{a}
酒精度(%vol)	≥8.0	16.0±0.25^{a}	15.8±0.6^{a}	15.7±0.4^{a}	15.7±0.25^{a}
氨基酸态氮(g/L)	≥0.30	0.887±0.008^{a}	0.829±0.098^{a}	0.737±0.18^{a}	0.683±0.09^{a}
总糖(g/L)	15.1~40.0	28.748±0.13^{a}	27.938±0.92^{ab}	27.561±0.54^{b}	26.347±0.32^{c}
还原糖(g/L)	/	16.450±0.2^{a}	15.833±0.52^{ab}	15.427±0.55^{ab}	15.040±0.81^{b}
总酸(g/L)	3.0~7.5	4.924±0.09^{a}	4.878±0.64^{a}	4.701±0.24^{a}	4.631±0.35^{a}
非糖固形物(g/L)	≥13.0	37.005±0.23^{a}	36.327±0.52^{ab}	35.593±0.33^{bc}	35.186±0.59^{c}

注：同行数据肩标不同字母表示差异显著(P<0.05)，表5~表8同。

与对照组相比，超滤处理提高黄酒 pH，但均符合国标(3.5~4.6)。对于酒精度、氨基酸态氮及总酸，各实验组与对照组相比并未表现出明显变化，整体指标保持相对稳定，符合超滤对黄酒酒精度、氨基酸态氮有较高保留率以及超滤膜对有机酸截留程度较低的相关报道[35]。糖类物质中，总糖在 30 kDa、10 kDa 组显著降低(P<0.05)，还原糖在 10 kDa 组显著减少(P<0.05)，表明小孔径膜可能截留了多糖或糖复合物。非糖固形物含量随孔径减小逐渐降低，10 kDa 组与对照组差异显著，说明小孔径膜超滤去除了部分大分子物质。综合来看，超滤对 pH、酒精度、氨基酸态氮和总酸影响较小，但对糖类和非糖固形物截留显著，小孔径膜对糖类及非糖固形物去除效果最明显，可能影响黄酒的风味复杂度。

2.5　超滤对瓶装黄酒挥发性和不挥发性物质的影响分析

2.5.1　黄酒挥发性成分 GC-MS 测定结果分析　根据超滤前后瓶装黄酒稳定性和感官评价的结果，测定孔径为 50 kDa、30 kDa 和 10 kDa 的实验组的挥发性物质，以未经过滤的黄酒为对照。通过 GC-MS 检测分析获得基础质谱数据，并对各峰所代表的挥发性成分的化学结构和名称进行了分析。参考质谱数据库检索结果，鉴定出 50 种主要挥发性成分总量见图 6，结合常见的评价瓶装黄酒特征香气的关键词，选择了 4 种酯类、4 种醛类、3 种醇类和 1 种酸共计 12 种关键挥发性成分并计算了其相对含量汇总为表 5[25,29]。经过 30 kDa 和 10 kDa 超滤膜处理的黄酒各类主要挥发性成分总量与对照组相比有显著性差异(P<0.05)，50 kDa 超滤组与对照组相比则无明显差异。

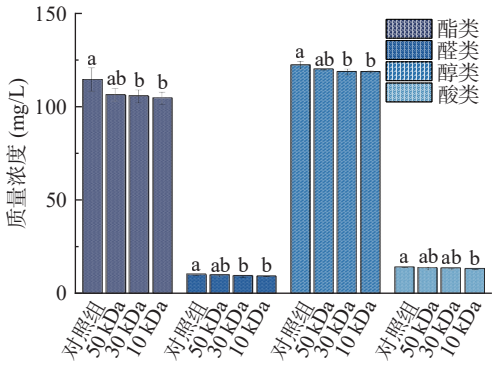


图 6　超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒挥发性风味物质总量变化

Fig.6　Changes in the total amount of volatile flavor substances in bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

表 5　超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒中 12 种关键挥发性成分变化情况

Table 5　Changes of 12 key volatile components in bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

种类	香气成分	含量(μg/L)			
		对照组	50 kDa	30 kDa	10 kDa
酯类	乳酸乙酯	19549.38±131.46^{a}	19318.17±314.00^{a}	18679.53±291.63^{b}	18592.23±409.26^{b}
	乙酸乙酯	16747.30±308.43^{a}	16536.92±333.79^{ab}	15960.18±521.95^{bc}	15738.89±165.99^{c}
	己酸乙酯	710.70±0.60^{a}	703.52±6.13^{a}	690.09±18.23^{a}	633.59±50.53^{b}
	亚油酸乙酯	311.48±1.21^{a}	300.09±9.55^{ab}	292.50±5.90^{bc}	285.69±8.27^{c}
醛类	香兰素	11.95±0.85^{a}	10.77±0.62^{ab}	11.03±0.10^{ab}	10.22±0.65^{b}
	苯乙醛	139.45±6.39^{a}	124.18±10.56^{b}	115.96±6.30^{b}	110.51±1.48^{b}
	苯甲醛	376.67±8.75^{a}	347.91±20.93^{a}	348.99±25.78^{a}	364.08±5.97^{a}
	糠醛	1270.07±126.16^{a}	1233.08±189.07^{ab}	1005.41±16.98^{b}	1008.70±22.34^{b}
醇类	苯乙醇	47867.81±351.32^{a}	46358.95±224.39^{b}	45248.89±629.79^{c}	43453.91±682.15^{d}
	异戊醇	8494.68±36.74^{a}	7897.56±76.35^{b}	7469.11±86.58^{c}	7423.03±22.30^{c}
	异丁醇	1688.96±53.03^{a}	1665.62±57.81^{a}	1650.92±35.74^{a}	15464.20±316.56^{b}
酸类	辛酸	180.58±8.32^{a}	167.86±3.20^{b}	160.84±2.65^{b}	149.78±4.42^{c}

对于 12 种关键挥发性成分，酯类物质中乙酸乙酯和己酸乙酯在 10 kDa 处理后与对照组有显著性差异（$P<0.05$），≤30 kDa 处理后乳酸乙酯与对照组有显著性差异（$P<0.05$），而 50 kDa 处理则对乳酸乙酯无明显影响，即较小孔径的膜可能对这三种酯类物质有一定的截留或吸附作用；对于亚油酸乙酯，与对照组相比 30 kDa 和 10 kDa 处理均显著降低其在黄酒中的含量（$P<0.05$），进一步说明了膜孔径大小对特定酯类物质含量的影响。对于醛类物质和醇类物质，10 kDa 膜处理显著降低了香兰素、苯乙醛和糠醛的含量（$P<0.05$），而 30 kDa 膜处理则显著降低了苯乙醇的含量（$P<0.05$）；此外，≤50 kDa 处理也降低了黄酒中的辛酸含量（$P<0.05$）。黄酒中的酯类物质，如乳酸乙酯、乙酸乙酯、己酸乙酯和亚油酸乙酯等，作为高级脂肪酸酯，不仅为黄酒带来了独特的花香和果香，还在降低胆固醇和血脂方面展现出一定的健康效益[36]。同时，黄酒中的酯类、醛类、醇类、酸类和多糖类物质等协同作用共同构成了黄酒独特的陈酒香和陈酒味特征[37]。大孔径（50 kDa）的超滤膜处理，未使酯类物质大量减少，很大程度上保留了黄酒的风味、香气以及功能性，这也与上文中理化指标、抗氧化性及感官评价的实验结果相一致，进一步验证了 50 kDa 超滤膜处理在黄酒加工中的潜在应用价值。

2.5.2 瓶装黄酒中不挥发性物质测定结果分析 有机酸和游离氨基酸作为黄酒中重要的不挥发性物质，对黄酒风味、色泽和营养有主要影响，根据超滤前后瓶装黄酒稳定性和感官、色泽和挥发性物质的检测结果，测定孔径为 50 kDa、30 kDa 和 10 kDa 的实验组的有机酸和游离氨基酸，以未经过滤的黄酒为对照。根据表 2 有机酸线性方程，计算了每组样品中各有机酸的含量，结果如表 6 所示。根据氨基酸色谱图采用外标法，精确计算出每组样品中氨基酸的含量，结果如表 7 所示。

表 6 超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒有机酸变化情况

Table 6 Changes of organic acids of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

有机酸	含量（mg/L）			
	对照组	50 kDa	30 kDa	10 kDa
草酸	2.73±0.42^{a}	2.61±0.46^{a}	1.77±0.23^{b}	1.62±0.32^{b}
酒石酸	94.93±5.61^{a}	78.20±6.08^{b}	52.87±6.06^{c}	51.32±6.07^{c}
丙酮酸	21.51±3.61^{a}	18.26±3.70^{a}	17.44±3.62^{a}	16.93±2.09^{a}
苹果酸	66.45±6.37^{a}	49.73±8.43^{b}	43.13±4.95^{b}	43.48±5.39^{b}
乳酸	1459.51±107.46^{a}	1231.02±124.49^{b}	1219.79±101.75^{b}	1216.98±69.38^{b}
乙酸	467.95±28.03^{a}	451.18±17.23^{a}	432.52±24.68^{a}	427.14±34.56^{a}
柠檬酸	889.22±65.46^{a}	654.82±42.93^{b}	622.88±58.48^{b}	615.25±73.88^{b}
琥珀酸	13.29±1.99^{a}	12.83±0.14^{a}	12.19±3.12^{a}	12.82±0.21^{a}

与对照组对比，有机酸方面，草酸、酒石酸、乳酸及柠檬酸等关键成分在超滤后降低，其中小孔径膜（30 kDa、10 kDa）的截留效果更明显，而 50 kDa 超滤膜处理对黄酒有机酸影响较小；丙酮酸、乙酸和琥珀酸等有机酸因分子量较小，超滤后含量无显著变化。游离氨基酸方面，总氨基酸含量在超滤后呈下降趋势但差异不显著。综合来看，50 kDa 膜对有机酸和氨基酸的保留效果更好，值得注意的是，与 30 kDa 组相比更小孔径的膜（10 kDa）处理，氨基酸含量反而有所回升。推测游离氨基酸含量先下降后回升的原因：使用 30 kDa 孔径膜时，虽然大部分氨基酸的分子量较小，能够通过超滤膜，但若氨基酸以

表 7 超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒 17 种氨基酸含量变化情况

Table 7 Changes of 17 amino acid contents of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

氨基酸	保留时间（min）	含量（μg/mL）			
		对照组	50 kDa	30 kDa	10 kDa
天冬氨酸（Asp）	3.033	193.33±11.99^{a}	191.66±7.55^{a}	175.8±11.83^{a}	187.69±11.93^{a}
谷氨酸（Glu）	3.427	321.67±20.33^{a}	291.37±40.95^{ab}	257.46±34.50^{b}	287.35±21.11^{ab}
丝氨酸（Ser）	6.400	54.33±4.99^{a}	53.20±5.71^{ab}	42.43±6.21^{b}	43.54±5.36^{ab}
组氨酸（His）	7.360	87.47±7.36^{a}	84.03±5.69^{ab}	69.18±9.55^{b}	81.55±6.17^{ab}
甘氨酸（Gly）	8.183	258.85±8.95^{a}	246.98±29.65^{a}	207.22±34.76^{a}	240.35±45.2^{a}
苏氨酸（Thr）	8.501	96.53±6.09^{a}	94.51±8.25^{a}	83.36±6.68^{a}	92.97±5.80^{a}
精氨酸（Arg）	10.105	370.33±21.78^{a}	366.78±23.43^{a}	332.36±55.75^{a}	365.14±42.97^{a}
丙氨酸（Ala）	10.691	458.07±30.9^{a}	454.37±42.04^{a}	386.86±41.15^{a}	436.61±40.78^{a}
酪氨酸（Tyr）	13.088	235.19±33.89^{a}	227.71±30.39^{a}	185.05±24.09^{a}	221.32±24.19^{a}
半胱氨酸（Cys-s）	16.049	7.73±0.18^{a}	6.51±0.48^{b}	5.37±0.63^{b}	6.18±0.78^{b}
缬氨酸（Val）	16.828	213.85±40.07^{a}	209.98±25.26^{a}	178.31±31.13^{a}	204.13±26.72^{a}
蛋氨酸（Met）	17.093	48.56±7.55^{a}	43.14±6.05^{a}	28.90±3.84^{b}	41.11±3.68^{a}
苯丙氨酸（Phe）	19.820	273.88±21.41^{a}	268.90±11.68^{a}	239.66±25.65^{a}	264.55±9.74^{a}
异亮氨酸（Ile）	20.168	113.35±20.14^{a}	110.79±14.86^{a}	95.07±3.63^{a}	109.51±20.05^{a}
亮氨酸（Leu）	21.471	350.16±22.05^{a}	347.67±42.30^{a}	304.56±42.53^{a}	341.94±36.52^{a}
赖氨酸（Lys）	22.270	203.02±12.01^{a}	201.84±33.10^{a}	165.37±34.96^{a}	194.51±13.31^{a}
脯氨酸（Pro）	28.962	369.96±19.44^{a}	351.64±23.30^{ab}	252.35±35.45^{c}	312.25±10.85^{b}
总氨基酸	/	3656.20±265.13^{a}	3551.11±348.88^{a}	3009.36±392.49^{a}	3430.70±300.56^{a}

与大分子复合的形式存在(如蛋白质水解后的肽段或氨基酸-金属离子络合物)，这些较大的复合物会被截留，导致氨基酸浓度下降。而在 10 kDa 超滤后，一些被截留的大分子(如蛋白质或肽段)可能会进一步分解或释放出氨基酸，这些释放的氨基酸再次出现在滤液中，导致氨基酸含量回升。此外，超滤过程中可能存在分子筛作用不完全的情况，导致部分大分子(如肽段)被破碎或解离，释放出氨基酸，从而提高滤液中的游离氨基酸含量。

2.6　感官评分和颜色变化

根据前文实验结果，本节对经过 50、30、10 kDa超滤膜处理储藏 270 d 时的黄酒进行感官评价和色泽比较，并以未经过滤的黄酒作为对照，结果如表 8 和图 7 所示。

表 8　超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒感官变化
Table 8　Sensory change of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration

属性	对照组	50 kDa	30 kDa	10 kDa
醋酸味	8.83±0.12^{a}	8.26±0.75^{a}	7.97±0.35^{a}	7.93±0.40^{a}
甜味	6.10±0.17^{a}	6.17±0.47^{a}	5.77±0.21^{a}	6.03±0.25^{a}
苦味	7.06±0.06^{a}	6.80±0.56^{a}	6.30±0.26^{a}	6.37±0.47^{a}
鲜味	6.57±0.12^{a}	6.07±0.31^{ab}	5.63±0.35^{b}	5.97±0.15^{b}
涩味	4.93±0.06^{a}	4.80±0.26^{a}	4.73±0.38^{a}	4.43±0.67^{a}
酸香	7.40±0.17^{a}	6.87±0.35^{ab}	6.90±0.10^{ab}	6.70±0.44^{b}
花香	6.57±0.23^{a}	6.47±0.50^{a}	6.30±0.30^{a}	6.30±0.79^{a}
坚果香	6.20±0.17^{a}	5.93±0.40^{a}	5.80±0.26^{a}	5.70±0.53^{a}
醇香	8.40±0.17^{a}	7.87±0.12^{ab}	7.70±0.82^{ab}	7.37±0.51^{b}
麦曲香	6.43±0.12^{a}	6.13±0.49^{a}	6.13±0.61^{a}	5.90±0.10^{a}
果香	5.83±0.12^{a}	5.70±0.30^{a}	5.73±0.25^{a}	5.70±0.30^{a}



图 7　超滤处理后储藏 270 d 的瓶装黄酒颜色变化
Fig.7　Color change of bottled huangjiu stored for 270 days after ultra-filtration
注：A-对照组；B-50 kDa；C-30 kDa；D-10 kDa。

不同孔径超滤膜处理后的酒样醋酸味、甜味、苦味、涩味、花香、坚果香、麦曲香和果香与对照组相比均无明显变化，而 30 kDa 和 10 kDa 膜孔径处理的酒样鲜味与对照组相比显著减弱(P<0.05)，10 kDa 膜孔径处理的酒样酸香和醇香则与对照组相比显著减弱(P<0.05)。醋酸味、苦味及涩味的减弱使得黄酒的口感更为清爽；鲜味、酸香、花香、坚果香、醇香及麦曲香等风味元素是构成黄酒独特韵味与辨识度的关键所在，这些感官特征的减弱会导致黄酒失去传统特色与辨识度。总体而言，30 kDa 和 10 kDa 膜处理在一定程度上降低了黄酒的整体口感与品质，而 50 kDa 膜处理对黄酒风味与香气的影响则较轻微，酒样总体上依然保持了较为鲜明的黄酒感官特征。

黄酒颜色主要源于美拉德反应生成的类黑精和外加的焦糖色。对比超滤处理前后瓶装黄酒的颜色变化，发现处理后黄酒颜色普遍变浅，特别是经 30 kDa 和 10 kDa 膜处理的酒样。这一现象与膜孔径大小密切相关，超滤膜孔径越小，处理后的黄酒颜色越浅。具体而言，使用 30 kDa 和 10 kDa 膜处理的黄酒色泽明显浅于对照组及 50 kDa 膜处理组。因此，30 kDa 和 10 kDa 膜处理虽提升了黄酒稳定性，但也显著改变了其外观颜色，可能不再符合消费者对传统黄酒色泽的期望。相比之下，50 kDa 膜处理的黄酒外观颜色特征未发生明显变化。

3　结论

本研究基于胶体理论，探究了超滤膜孔径对瓶装黄酒储藏稳定性及风味的影响规律。结果表明，超滤处理有效提升了黄酒储藏稳定性，通过截留大分子蛋白质和悬浮物，降低了储藏期间浊度、多酚浊度及离心沉淀率，提高瓶装黄酒储藏稳定性，50 kDa 及以下孔径膜均有理想效果。经过超滤的瓶装黄酒胶体的平均粒径显著减小，粒径分布均匀，调节 Zeta 电位至负值，增强颗粒间静电排斥，从而延缓聚集沉淀。30 kDa 及以下孔径膜处理虽能深度去除多糖和蛋白质，但显著降低了抗氧化性及挥发性风味物质，影响黄酒传统风味和色泽。50 kDa 膜处理后的瓶装黄酒理化指标符合国家标准，抗氧化性、挥发性成分、游离氨基酸和有机酸的含量无明显变化，更好地保留了黄酒原有的色泽和风味，从而更符合消费者感官需求。综上所述，本文通过对胶体性质的研究，为瓶装黄酒稳定性问题研究提供了新思路，并提出超滤技术作为有效的优化方案，50 kDa 超滤膜在黄酒沉淀控制、风味维持及色泽保留中表现最佳，兼具技术可行性与经济适用性，为黄酒品质提升提供高效解决方案，控制瓶装黄酒在运输、储藏、销售过程中二次沉淀的产生。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 任清, 徐嘉良, 刘俊含. 黄酒质量安全风险及其控制[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(3): 12−19. [REN Qing, XU Jialiang, LIU Junhan. Safety risk and its control of yellow rice wine[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(3): 12−19.]
[2] 白少勇. 黄酒中蛋白质的沉淀机理与处理方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. [BAI Shaoyong. Study on the precipitation

mechanism and treatment method of proteins in yellow rice wine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.]
[3] 李敏, 韩惠敏, 耿敬章, 等. 黄酒的混浊沉淀及其控制研究进展[J]. 酿酒, 2019, 46(2): 31−35. [LI Min, HAN Huimin, GENG Jingzhang, et al. Turbid precipitation of yellow wine and its control[J]. Liquor Making, 2019, 46(2): 31−35.]
[4] SCHULTE F, FLASCHEL E, NIEHAUS K. Proteome-based analysis of colloidal instability enables the detection of haze-active proteins in beer[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(35): 6752−6761.
[5] 齐小慧, 孙军勇, 谢广发, 等. 瓶装黄酒蛋白组成分析及其主要成分的分离纯化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(15): 227−232. [QI Xiaohui, SUN Junyong, XIE Guangfa, et al. Protein composition analysis and main components purification in bottled Chinese rice wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(15): 227−232.]
[6] 齐小慧, 孙军勇, 谢广发, 等. 蛋白质对黄酒品质影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 273−279. [QI Xiaohui, SUN Junyong, XIE Guangfa, et al. Effect of protein on quality of Chinese rice wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(3): 273−279.]
[7] XIE Guangfa, HAN Jiongping, HAN Xueyuan, et al. Identification of colloidal haze protein in Chinese rice wine (Shaoxing Huangjiu) mainly by matrix-assisted laser ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4027−4036.
[8] OZDAL T, CAPANOGLU E, ALTAY F. A review on protein–phenolic interactions and associated changes[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 954−970.
[9] 张曼, 王岸娜, 吴立根, 等. 蛋白质、多糖和多酚间相互作用及研究方法[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(4): 42−46. [ZHANG Man, WANG Anna, WU Ligen, et al. The interaction and research methods between protein, polysaccharide and polyphenol[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(4): 42−46.]
[10] 罗惠波. 膜过滤技术在白酒除浊中的应用研究[J]. 酿酒, 2004, 31(5): 38−40. [LUO Huibo. Study on application of membrane filter in removal of contamination[J]. Liquor-Making, 2004, 31(5): 38−40.]
[11] 谢广发, 周建弟, 孟中法, 等. 错流膜过滤提高黄酒非生物稳定性的研究[J]. 酿酒科技, 2003(4): 80−81. [XIE Guangfa, ZHOU Jiandi, MENG Zhongfa, et al. Study on filtration by cross-flow membrane to improve non-biological stab ility of yellow rice wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2003(4): 80−81.]
[12] HSIEH C W, HUANG Y H, LAI C H, et al. Develop a novel method for removing fusel alcohols from rice spirits using nanofiltration[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(2): N25−N29.
[13] 谭佩毅, 黄秀锦. 陶瓷膜技术在黄酒生产中的应用[J]. 中国酿造, 2006, 25(9): 45−48. [TAN Peiyi, HUANG Xiujin. Application of ceramic membrane technology in the rice wine production [J]. China Brewing, 2006, 25(9): 45−48.]
[14] 杨文芳. 不同分子量超滤膜在黄酒澄清中的应用研究[J]. 中国食品, 2024(16): 158−161. [YANG Wenfang. Study on application of ultrafiltration membranes with different molecular weights in clarification of yellow rice wine[J]. China Food, 2024(16): 158−161.]
[15] 陈丽花, 徐建芬, 程琳. 膜过滤对黄酒品质改良效果的研究[J]. 酿酒科技, 2011(2): 43−46. [CHEN Lihua, XU Jianfen, CHENG Lin. Research on membrane filtration to improve the quality of yellow rice wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2011(2): 43−46.]
[16] 刘雨辰, 周志磊, 毛健. 焦糖色对黄酒稳定性的影响[J]. 农产品加工, 2020(22): 21−28. [LIU Yuchen, ZHOU Zhilei, MAO Jian. Efect of caramel color on the stability of rice wine[J]. Farm Products Processing, 2020(22): 21−28.]
[17] CELOTTI E, OSORIO BARAHONA M S, BELLANTUONO E, et al. High-power ultrasound on the protein stability of white wines: Preliminary study of amplitude and sonication time[J]. LWT, 2021, 147: 111602.
[18] 衡洋洋. 黑果枸杞乳酸菌发酵饮料的稳定性及近红外光谱预测模型研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [HENG Yangyang. The stability and prediction model of near infrared spectroscopy for *Lycium ruthenicum* Murr beverage fermented with lactic acid bacteria[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
[19] 陈珊. 黄酒澄清新技术开发及非生物稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. [CHEN Shan. Development of new clarification technology and study on non-biological stability to Chinese rice wine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.]
[20] 马鹏程. 离子交换树脂澄清料酒新工艺的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021. [MA Pengcheng. Study on new technology of clarifying cooking wine with ion exchange resin[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021.]
[21] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 黄酒: GB/T 13662-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [Standardization Administration of the People's Republic of China. Huangjiu: GB/T 13662-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
[22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of reducing sugar in food in national food safety standard: GB 5009.7-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[23] 秦靖欣, 杨志伟. 杨桃多酚的提取工艺优化及其抗氧化活性评价[J/OL]. 食品工业科技, 2025: 1−18.(2025-03-31). https://link.cnki.net/doi/10.13386/j.issn1002-0306.2024120157. [QINJingxin, YANG Zhiwei. Optimization of extraction and purification technology, and antioxidant activity evaluation of polyphenols from *Averrhoa carambola* L[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2025: 1−18. (2025-03-31). https://link.cnki.net/doi/10.13386/j.issn1002-0306.2024120157.]
[24] YANG Qingyu, GU Chenqi, ZHANG Xiling, et al. The research on metabolomics mechanism of calcium ion-induced whole black bean polyphenols and biological activities[J]. LWT, 2024, 195: 115851.
[25] ZHOU Zhilei, JIAN Dongzhen, GONG Min, et al. Characterization of the key aroma compounds in aged Zhenjiang aromatic vinegar by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, quantitative measurements, aroma recombination and omission experiments[J]. Food Research International, 2020, 136: 109434.
[26] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 植物中游离氨基酸的测定: GB/T 30987-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of free amino acids in plant: GB/T 30987-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.]
[27] 高云超, 宫晓波, 杨春英, 等. 广东客家黄酒 10 种有机酸的 HPLC 分析[J]. 酿酒科技, 2021(4): 106−115. [GAO Yunchao, GONG Xiaobo, YANG Chunying, et al. Analysis of 10 organic acids in Guangdong Hakka Huangjiu by HPLC[J]. Liquor-Making

Science & Technology, 2021(4): 106−115.］
［28］ 曹旭珍, 周志磊, 姬中伟, 等. 活性炭和大孔树脂对糟烧酒风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(20): 18−26. ［CAO Xuzhen, ZHOU Zhilei, JI Zhongwei, et al. Study on the effect of activated carbon and macroporous resin on the flavor of ZaoShao Baijiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(20): 18−26.］
［29］ 施美霞. 水质分析中的浊度检测研究[J]. 化工管理, 2020(28): 175−176,179. ［SHI Meixia. Study on turbidity detection in water quality analysis[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(28): 175−176,179.］
［30］ 刘孝平, 刘路, 鲁炫池, 等. 不同高压均质条件对罗望子浊汁稳定性及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 125−130. ［LIU Xiaoping, LIU Lu, LU Xuanchi, et al. Effects of different high pressure homogenization conditions on stability and antioxidant activity of tamarind turbid juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(4): 125−130.］
［31］ 韩丽丽, 孙丰义, 陈朝青, 等. 基于粒子特性研究特殊医学用途配方食品全营养乳液的稳定性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 334−341,347. ［HAN Lili, SUN Fengyi, CHEN Zhaoqing, et al. Stability of total nutrient emulsion of food for special medical purpose by particle analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 334−341,347.］
［32］ INCE-COSKUN A E, OZDESTAN-OCAK O. Effects of salt ions and heating on the behaviour of whey protein particle dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105433.
［33］ 张凤杰, SIEBERT K J. . 综述和研究进展: pH 值对胶体稳定性和啤酒稳定的影响[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2018(21): 59−70. ［ZHANG F J, SIEBERT K J. The effect of beer pH on colloidal stability and stabilization: A review and recent findings[J]. China-Foreign Wine Industry·Beer Technology, 2018(21): 59−70.］
［34］ 张嘉颖, 林鑫, 樊威, 等. 复合凝聚法制备枸杞玉米黄质纳米胶囊及其性质研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 69−74,86. ［ZHANG Jiaying, LIN Xin, FAN Wei, et al. Preparation and characterization of nanocapsules of zeaxanthin extracted from *Lycium barbarum* L. by complex coacervation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 69−74,86.］
［35］ 陈晨, 谢海腾, 赖敏辉, 等. 基于膜分离-树脂吸附的黄酒降酸工艺及风味评价[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(2): 247−253. ［CHEN Chen, XIE Haiteng, LAI Minhui, et al. Acid reduction technology and flavor evaluation of Huangjiu based on membrane separation and resin adsorption[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(2): 247−253.］
［36］ 朱正军, 饶建军, 张娟, 等. 黄酒中健康因子的研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(5): 26−31. ［ZHZU Zhengjun, RAO Jianjun, ZHANG Juan, et al. Research progress of health factors in Huangjiu[J]. China Brewing, 2021, 40(5): 26−31.］
［37］ 阮凤喜, 莫梅清, 钱敏, 等. 黄酒中风味物质的研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(8): 24−27. ［RUAN Fengxi, MO Meiqing, QIAN Min, et al. Research progress of flavor compounds in Huangjiu[J]. China Brewing, 2021, 40(8): 24−27.］