

脉冲电场协同麦饭石处理对清香型白酒品质的影响

汪江波¹, 毛春奎¹, 金维君¹, 房俊怡¹, 张全胜², 何超³, 蔡凤娇¹, 张瑞景¹, 金硕^{2*}, 徐健^{1*}

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 发酵工程教育部重点实验室, 工业发酵省部共建协同创新中心, 湖北武汉 430068)(2. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北武汉 430068)
(3. 湖北毕圣泉酒业有限公司, 湖北黄冈 438700)

摘要: 为改善白酒风味口感、提升产品品质, 以清香型白酒为研究对象, 使用脉冲电场协同麦饭石进行处理来探究对其品质变化的影响。以感官评分为评价指标, 基于单因素试验和中心组合试验(BBD 试验)以及人工神经网络(ANN)分析结合遗传算法(GA)对其工艺进行优化, 同时采用顶空固相微萃取(HS-SPME)和气质联用(GC-MS)法对优化前后酒样的挥发性成分进行测定和对比。结果表明, 最佳工艺条件为麦饭石助剂添加量 1.7 wt.%、处理时间 22 min、脉冲电压 12 kV。在此优化条件下, 清香型白酒的感官评分为 86.70 分, 与原酒相比提高了 16.53%, 感官品质发生了显著改善。通过 HS-SPME-GC-MS 联用的方法共从原酒和优化后酒样中检测后筛选得出 65 种主要成分, 主要包括醇类(8 种)、酸类(10 种)、酯类(34 种)以及醛酮类(8 种)和其他类(5 种)。最终优化酒样相对含量与原酒相比, 醇类和酯类分别下降 1.41% 和 2.24%, 酸类增加 1.17%, 进一步证明脉冲电场协同麦饭石处理可以促进物质间相互转化, 从而有效助推酒样品质提升, 为白酒高质量发展开辟新的视野。

关键词: 脉冲电场; 麦饭石; 清香型白酒; 品质提升; 模糊数学感官评价

文章编号: 1673-9078(2026)3-200-210

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1950

Effects of Pulsed Electric Field Combined with Medical Stone Treatment on the Quality of Light-aroma Baijiu

WANG Jiangbo¹, MAO Chunkui¹, JIN Weijun¹, FANG Junyi¹, ZHANG Quansheng², HE Chao³,
CAI Fengjiao¹, ZHANG Ruijing¹, JIN Shuo^{2*}, XU Jian^{1*}

(1.School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Key Laboratory of Fermentation Engineering of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Industrial Fermentation Province, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)(2.Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)
(3.Bishengquan Liquor Industry Co. Ltd., Huanggang 438700, China)

Abstract: To enhance the flavor and texture of Baijiu and improve product quality, we employed pulsed electric fields in conjunction with medical stone treatment to investigate their effects on the quality of light-aroma Baijiu. The process was optimized
引文格式:

汪江波,毛春奎,金维君,等.脉冲电场协同麦饭石处理对清香型白酒品质的影响[J].现代食品科技,2026,42(3):200-210.

WANG Jiangbo, MAO Chunkui, JIN Weijun, et al. Effects of pulsed electric field combined with medical stone treatment on the quality of light-aroma Baijiu [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 200-210.

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-03-24; 接受日期: 2025-03-26

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2021BGD016); 湖北省区域科技创新计划项目(2023EGA122)

作者简介: 汪江波(1962-), 男, 教授, 研究方向: 传统酿造的现代化改造, E-mail: 675166193@qq.com;

通讯作者: 徐健(1991-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 发酵工业废弃物的资源化处理 and 综合利用, E-mail: xujian0218@126.com; 共同通

讯作者: 金硕(1988-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 高压脉冲功率技术在生物领域的应用和电工装备多物理场数值仿真及状态评估, E-mail: jinshuo@hbut.edu.cn

through a combination of single-factor tests, response surface methodology, and artificial neural network analysis integrated with genetic algorithms, with sensory scores used as evaluation metrics. Furthermore, volatile components in the Baijiu samples were evaluated and compared before and after optimization through headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Results demonstrated that the optimal process conditions were the addition of 1.7 wt% medical stones, treatment time of 22 min, and a pulse voltage of 12 kV. Under these optimized conditions, the sensory score of the light-aroma Baijiu was 86.70, which was 16.53% higher than that of the untreated sample, demonstrating a significant improvement in sensory quality. In total, 65 major components were identified in the untreated and optimized Baijiu samples through the use of HS-SPME and GC-MS, including eight alcohols, ten acids, 34 esters, eight aldehydes and ketones, and a miscellany of other compounds (five in total). Compared with the untreated Baijiu, the relative content of the final optimized samples showed a decrease of 1.41% and 2.24% in alcohol and ester content, respectively, and an increase of 1.17% in acid content. The pulsed electric field combined with medical stone treatment was further shown to promote the mutual transformation of volatile compounds in Baijiu, thus effectively boosting its quality and providing new insights into the high-quality development of Baijiu.

Key words: pulsed electric fields; medical stone; light-aroma Baijiu; quality enhancement; fuzzy mathematical sensory evaluation

白酒, 极具中国特色的世界六大蒸馏酒之一, 具有丰富的历史底蕴和文化内涵, 因其独特的酿造工艺和丰富的口感在酒类产品中独树一帜, 深得消费者喜爱^[1]。然而新酿白酒含有较多的低沸点刺激物、醛类和杂醇类等有害物质, 极度影响酒体口感, 甚至直接饮用会对人体造成损伤^[2]。“酒是陈酿香”这一观念深入人心, 说明了陈酿过程对于提升白酒品质的重要性。通过长时间的陈放, 酒中的有害物质能够逐渐挥发或转化, 同时酒体中的香气成分得以充分融合和升华, 使得白酒的口感更加醇厚、香气更加浓郁^[3-5]。然而, 传统的陈酿方式确实存在耗时过长、资金占用大、场地需求高等问题, 难以满足现代市场快速变化的需求。因此, 人工催陈新技术应运而生^[6,7]。

人工催陈技术是指人为地施加外部能量促进酒的陈化, 来快速提升白酒品质, 该技术主要包括物理催陈法、化学催陈法、生物催陈法和综合催陈法^[8]。单一的方法往往具有一定局限性, 可能会使酒体出现风味单薄、品质不稳定等问题, 为了达到更好的催陈效果, 使用综合催陈法是一种可靠的选择^[9]。邱重晏等^[10]使用微波和陶瓷粒联合催陈清香型白酒, 发现与单一处理相比能够明显促进酒体的老熟和风味口感的提升。脉冲电场作为目前一种常用的物理催陈方法, 因其具有反应快和操作简单等优点备受研究者青睐^[11]。殷勇光等^[12]利用脉冲电场对白酒进行了催陈, 证明了电场可以促使酒体中的各类分子排列更加有序, 加快激活酒体中酯类物质的形成。麦饭石是一种天然无毒的无机矿物质, 具有较强吸附能力, 可以有效改善酒体杂味^[13,14]。孙守业等^[15]利用麦饭石处理原酒, 发现麦饭石处理不仅可以减轻新酒味, 而且还可以使酒体更加纯净透明和增加营养特性。

本研究利用脉冲电场-麦饭石联合处理清香型白酒原酒, 通过单因素法和 BBD 法以及 ANN-GA 对其品质感官进行优化, 并采用 HS-SPME 和 GC-MS 法联用对优化前后酒样的挥发性成分进行测定和对比分析^[16], 找到提高原酒风味口感的最优处理参数, 为开发品质提升技术提供新的理论支撑, 以期促进低品质白酒质量的高水平发展与重大变革。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

清香型白酒(原浆新酒), 由湖北工业大学酿酒中试基地提供; 麦饭石, 购自淘宝网平台; 酚酞、氯化钠、氢氧化钠、硫酸、邻苯二甲酸氢钾(均为分析纯), 国药集团上海有限公司; 乙酸戊酯、叔戊醇、2-乙基丁酸、乙醇(均为色谱纯), 阿拉丁试剂(上海)有限公司。其他所用试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

脉冲电场装置(自制设备), 由湖北工业大学绝缘与监测实验室提供; HTY-800g 电动食品加工机(切药机), 浙江省永康市红太阳机电有限公司; DMA 35 型便携式密度计, 安东帕(上海)商贸有限公司; DDS-320 型电导率仪, 上海仪电科技有限公司; PHS-3C 型酸度计, 上海仪电科技有限公司; NDJ-8S 数显粘度计, 上海力辰仪器科技有限公司; 7980 型气相色谱仪(GC), 上海天美科学仪器有限公司; 5977B-7890B 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS), 美国安捷伦科技有限公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取纤维, 上海安谱实验科技股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

以酿酒基地清香型白酒（原浆新酒）为处理对象，选用麦饭石作为催陈助剂协同脉冲电场分别进行处理，一次性单一处理量为 200 mL 酒样，电场频率固定为 10 kHz，极板间距固定为 1.5 cm 左右，为防止样品处理室升温产热和空气击穿电压电流产热，采用油浴控温。制备完成的样品经过滤后装瓶于常温下避光贮存，放置一周后用于检测分析。

1.3.2 最佳助剂材料的选择试验

在进行单因素试验之前，选择几种无毒无害的且具有一定吸附催化能力的材料作为催陈助剂，通过与脉冲电场单一处理酒样相比，以模糊数学感官评分为主要依据，选择一种能够提高较大提升酒样品质的材料作为最佳助剂。

1.3.3 单因素试验

1.3.3.1 助剂添加量对清香型白酒品质变化的影响

在电压为 11 kV，处理时间为 15 min，助剂添加量为 0.5 wt.%、1.0 wt.%、1.5 wt.%、2.0 wt.%、2.5 wt.% 的条件下，以感官评分为指标探究助剂添加量对清香型白酒品质变化的影响。

1.3.3.2 处理时间对清香型白酒品质变化的影响

在电压为 11 kV，助剂添加量为 1.0 wt.%，处理时间为 10、15、20、25、30 min 的条件下，以感官评分为指标探究处理时间对清香型白酒品质变化的影响。

1.3.3.3 脉冲电压对清香型白酒品质变化的影响

在处理时间为 15 min，助剂添加量为 1.0 wt.%，电压为 7、9、11、13、15 kV 的条件下，以感官评分为指标探究电压对清香型白酒品质变化的影响。

1.3.4 中心组合试验设计

在单因素试验的基础上，为使处理效果发挥最大效能，根据 Box-Behnken 试验设计原理，以助剂添加量（A）、处理时间（B）、脉冲电压（C）为影响因素，以感官评分（Y）为响应值，进行设计优化试验，试验设计因素与水平见表 1。

1.3.5 人工神经网络结合遗传算法优化

在响应面的基础上，通过 MatlabR2024a 软件建立神经网络模型。所创建的神经网络包含 1 个输入层、1 个隐藏层和 1 个输出层，其中分别包括 3、11、1 个神经元，最大迭代次数为 10 000，误差为 10^{-3} 。神经网络

构建完成后，输入数据迭代至最终误差小于设置误差，表明神经网络学习完成。最后通过结合遗传算法进一步优化响应面中得到的数据，以获得更高的品质提升^[17,18]。

表 1 试验设计因素与水平
Table 1 Factors and levels of design tests

因素	助剂添加量/(wt.%)	时间/min	电压/kV
-1	0.5	10	9
0	1	15	11
1	1.5	20	13

1.3.6 测定分析

酒精度、总酸、总酯含量的测定参考 GB/T 10345-2007《白酒分析方法》进行测定；电导率采用电导率仪进行测定；pH 值采用 pH 计进行测定；粘度采用数显粘度计进行测定。

挥发性风味成分乙酸乙酯和正丙醇等部分物质的定量分析采用 GC 法测定，具体条件参考汪江波等^[19]的方法。

其他低于 GC 法检测限的挥发性风味成分定性和半定量分析采用 HS-SPME-GC-MS 法测定，具体条件参考袁琦等^[20]的方法。

1.3.7 模糊数学感官评价

感官评价标准：参照 GB/T10781.2-2022《白酒质量要求》中清香型白酒部分的感官要求进行制定，结合清香型白酒品质特征，从色泽、香气、口感、风格 4 个方面进行品评，按照样品差异将其分为优、良、中、差 4 个等级，感官评价标准见表 2。感官评价小组由经过培训且具有一定资质的 20 名专业评酒委员（10 男 10 女，其中国家级和省级评酒委员 5 名、酿酒专业研究生 15 名）组成。感官评价实验在标准化感官评价实验室内进行，小组成员提前对清香型白酒新酒和传统陶坛陈酿酒进行品评训练，熟悉新酒和传统陈酒的风味特征，以便对脉冲电场-麦饭石处理的酒样进行品评打分^[16]。

1.3.8 模糊数学评价模型的建立

（1）确定因素集和评语集：参考贾庆超等^[21-23]模糊数学评价模型建立方法，以色泽（ U_1 ）、香气（ U_2 ）、口感（ U_3 ）和风格（ U_4 ）4 个感官评价指标组成清香型白酒的品质提升评价因素集，即 $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ ；以优（ V_1 ）、良（ V_2 ）、中（ V_3 ）、差（ V_4 ）组成对清香型白酒的品质提升评价中每个因素的评语集，即 $V=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 。

表 2 清香型白酒感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation standards for Qingxiang Baijiu

因素	评价等级 (分值/分)			
	优 (V ₁)90<X≤100	良 (V ₂)80<X≤90	中 (V ₃)70<X≤80	差 (V ₄)60<X≤70
色泽 (0.1)	无色或微黄, 清亮透明, 无悬浮物, 无沉淀	色泽较为清亮透明, 无明显悬浮物, 无沉淀	有少许悬浮物, 无沉淀	色泽较为浑浊, 有悬浮物, 有沉淀
香气 (0.3)	清香纯正, 香气优雅	清香较纯正, 香气较优雅	清香正, 无刺激性异味	香气较刺鼻, 有不愉快气味
口感 (0.4)	醇厚绵甜, 协调爽净, 回味绵延悠长	醇厚绵甜, 协调爽净, 回味悠长	醇厚柔甜, 协调爽净, 回味长	口感不协调, 有辛辣感, 有少许苦涩味
风格 (0.2)	典型完美, 风格独特	典型明确, 风格良好	典型不太明确, 风格不太好	典型不明确, 风格不好

(2) 确定隶属度: 邀请 10 位经过培训且具有一定资质的专业品酒师 (6 男 4 女, 其中国家级和省级评酒委员各 5 名) 对影响清香型白酒品质提升的因素项目重要性进行投票, 通过影响因素的两两比较, 认为重要的得 1 票, 次要的得 0 票, 自身对比得 1 票, 1 票即为 1 分, 各项指标的得票数占各指标的总票数的比率即为各指标所占的权重, 各因素的权重分布见表。(由各指标权重值得出权重矩阵 $A=(a_1, a_2, a_3, a_4)$, 其中 $a_1, a_2, a_3, a_4[a_i \in (0,1)]$ 是各评价指标相应的隶属度, 且满足条件 $a_1+a_2+a_3+a_4=1$)。

表 3 清香型白酒感官评价指标权重集
Table 3 Sensory evaluation index weight set for Qingxiang Baijiu

评价指标	评价等级 (分值/分)					
	色泽	香气	口味	风格	总计	权重
色泽	10	0	0	0	10	0.1
香气	8	10	7	5	30	0.3
口味	10	10	10	10	40	0.4
风格	5	5	0	10	20	0.2

(3) 构建模糊综合评价矩阵: 评判小组对每个因素逐个进行评判, 统计每个因素的各个评语的人次, 然后对每个因素的每个评语的人次进行归一化处理, 得单因素评价矩阵, 则每一因素都对应一个模糊评价 $r_i=\{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}\}$ 。将单因素评价矩阵合一起得综

合评价矩阵 $R= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix}$

(4) 线性转换综合评价经过模糊线性转换, 得到模糊综合评判矩阵: $B=A \times R=(b_1, b_2, b_3, b_4)$

(5) 模糊综合总评分: 为了直接对各组样品进行评价, 将模糊评价结果与评分均值相乘, 得出感官综合评价分值。故样品的模糊综合评判总分为:

$T=B \times V=b_1 \times 95+b_2 \times 85+b_3 \times 75+b_4 \times 65$

式中:
 T ——样品的模糊综合评判总分 (分);
 B ——模糊综合评判矩阵;
 V ——感官评价中每个因素评语集的分值中值 (分)。

1.3.9 数据处理

数据统计分析使用 Microsoft Excel 2019 和 Axmath 软件, 数据绘图采用 Origin 2024 软件绘制, 显著性分析采用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件, RSM 分析和 ANN 分析采用 Design Expert 13 和 Matlab R2024a 软件。

2 结果与分析

2.1 最佳助剂选择试验结果

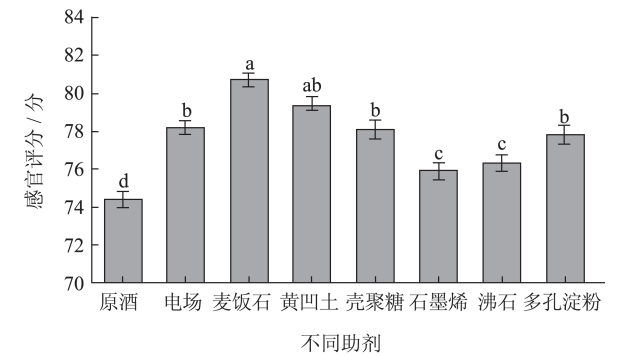


图 1 不同助剂对清香型白酒品质的影响
Fig.1 Influence of different additives on the quality of Qingxiang Baijiu

注: 图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。
不同助剂对清香型白酒品质提升的影响结果如图 1 所示。以酿酒基地清香型白酒为基酒, 分别进行处理, 电场处理样品是指在未添加其他助剂材料情况下用电场单独处理, 参数设置为电压 14 kV 时间 10 min, 其他处理样品为在添加 1.0 wt.% 的对应催陈助剂同时复合电场分别处理 (电场参数与单独处理相同)^[24]。由图可知, 经过添加不同催陈助剂处理的样品与原酒和电场单独处理的样品相比, 复合处理的样

品感官评分普遍高于原酒和电场单独处理的酒样,尤其是添加麦饭石作为助剂时,感官评分高达 80.70 分,显著高于其他助剂和电场单独处理样品,说明选择麦饭石作为最佳助剂与电场联合处理,是一种可以有效提升清香型白酒品质的处理方法。

2.2 单因素试验结果

2.2.1 麦饭石助剂添加量对清香型白酒品质的影响结果

不同麦饭石助剂添加量对清香型白酒品质的影响结果如图 2 所示。由图可知,随着麦饭石添加量的增加,感官评分呈现先增加后降低的趋势,酒精度总体呈现略微下降的趋势。当助剂添加量小于 1.0 wt.% 时,随着助剂添加量的增多,感官评分呈上升趋势;在添加量为 1.0 wt.% 时,感官评分达到最大,之后再增加麦饭石添加量,感官评分反而降低,这可能是因为麦饭石本身过多造成了过度吸附,影响了酒体原有风味,破坏了各种香味成分。Li 等^[25]在利用陶粉和陶片处理白酒样品时,也证实了过量加入造成的吸附过度会破坏酒体本身。酒精度整体下降可能是因为处理过程中酒精部分挥发和酯化反应的发生,这也使得酒样辛辣感得到一定的缓和,从而促进风味改善。何庆等^[9]在对比不同催陈方法处理白酒时的陈化机理后,发现催陈后的酒样与原酒相比酒精度均有一定程度下降,他利用“酯化说”对此做出了解释。因此,麦饭石助剂添加量选择 1.0 wt.% 作为提升清香型白酒品质的最佳添加量。

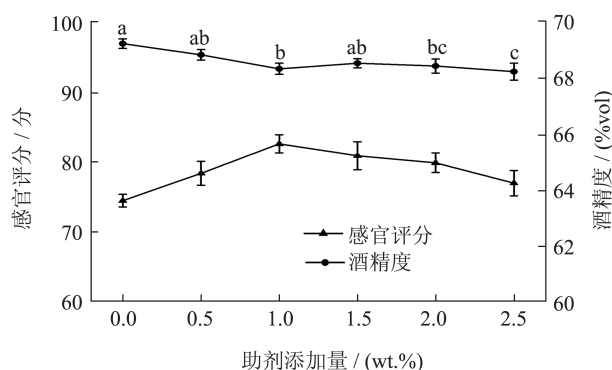


图 2 麦饭石助剂添加量对清香型白酒品质的影响

Fig.2 Influence of medical stone additives on the quality of Qingxiang Baijiu

2.2.2 处理时间对清香型白酒品质的影响结果

不同处理时间对清香型白酒品质的影响结果如图 3 所示。由图可知,随着处理时间的延长,感官评分呈现先增加后降低的趋势,酒精度总体呈现先下降

后增加的趋势。当处理时间低于 15 min 时,感官评分呈上升趋势,酒精度呈下降趋势,可能是因为随处理时间延长,脉冲电场促进了各种物质的缔合和酯化反应的发生,麦饭石对酒中不愉快物质进行了大量吸附;在处理时间为 15 min 时,感官评分达到最大,之后再延长处理时间,感官评分反而降低,酒精度上升,这可能是因为脉冲电场和助剂本身过度促进了反应,使氧化反应和酯化反应变化不协调,从而影响了酒体成分结构。殷涌光等^[12]在利用脉冲电场处理酒样时,分析得到长时间的脉冲电场处理可能会使过多的氢键断裂,破坏原本的酒体结构,导致酒的口感变得粗糙、不协调。这与本试验中随处理时间延长,感官评分反而降低的现象一致。麦饭石含有多种对白酒催陈有益的矿物质和微量元素,在催陈过程中会缓慢释放到酒中,时间过长可能会使矿物质释放量过多或比例失衡,打破酒中原本的成分平衡,从而对酒的品质产生负面影响^[26]。因此,选择处理时间 15 min 时作为提升清香型白酒品质的最佳处理时间。

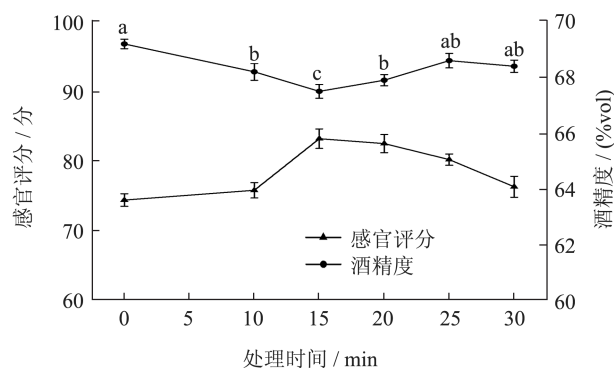


图 3 处理时间对清香型白酒品质的影响

Fig.3 Influence of treatment time on the quality of Qingxiang Baijiu

2.2.3 脉冲电压对清香型白酒品质的影响结果

不同脉冲电压对清香型白酒品质的影响结果如图 4 所示。由图可知,随着脉冲电压的升高,感官评分呈现先增加后降低再增加的趋势,酒精度总体呈现下降的趋势。这可能是因为脉冲电场作为一种逐渐增强的外界能量刺激,促进了各种物质的缔合和酯化反应的发生,反应过大或过小都会影响分子重排,从而影响酒体口感协调^[27,28];唐丹丽^[11]在探究利用电场辅助处理提升青梅酒品质时,也发现电压并非越高酒样品质越好。本试验中当脉冲电压为 11 kV 时,感官评分达到最大,因此,选择脉冲电压为 11 kV 作为提升清香型白酒品质的最佳处理电压。

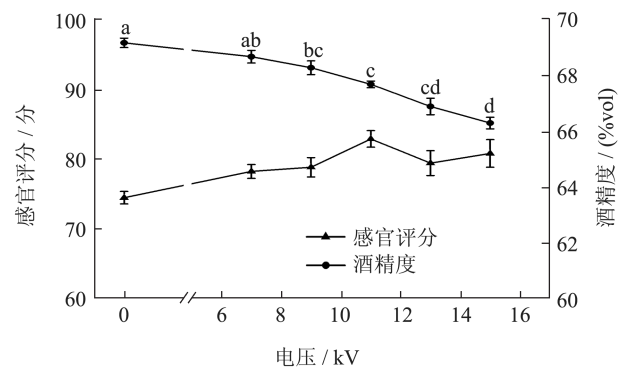


图 4 脉冲电压对清香型白酒品质的影响

Fig.4 Influence of pulse voltage on the quality of Qingxiang Baijiu

2.3 人工神经网络结合遗传算法优化（ANN-GA）结果分析

以单因素试验结果为基础，通过 Design Expert 13 进行 BBD 试验设计，以感官评分（Y）作为评价指标，考察助剂添加量（A）、处理时间（B）、脉冲电压（C）为自变量 3 个因素对清香型白酒感官评分的影响。试验结果见表 4。

表 4 中心组合试验设计及结果

Table 4 Design and results of center combination tests

序号	A 麦饭石助剂添加量/(wt.%)	B 时间/min	C 电压/kV	感官评分/分
1	1.5	15	13	81.10 ± 2.30
2	1	20	13	80.70 ± 0.80
3	1	15	11	81.00 ± 0.50
4	1	20	9	77.80 ± 1.20
5	1.5	15	9	80.30 ± 0.60
6	0.5	10	11	76.10 ± 2.10
7	0.5	15	9	77.90 ± 1.10
8	1	15	11	80.50 ± 2.20
9	1.5	10	11	79.70 ± 1.10
10	0.5	15	13	79.30 ± 0.90
11	1	15	11	79.90 ± 0.40
12	1.5	20	11	81.20 ± 1.50
13	1	10	9	76.40 ± 0.70
14	1	10	13	76.20 ± 1.80
15	1	15	11	80.00 ± 0.60
16	0.5	20	11	80.10 ± 0.40
17	1	15	11	80.90 ± 1.30

ANN 能够普遍逼近所有阶的非线性函数，在数据拟合、预测和优化方面显示出高的灵活性和能力，常与 GA 结合使用来获得最优解。目前，ANN-GA 法已被应用于葡萄酒、青稞酒以及果汁等食品品质的优化和预测上，其结果往往更能达到全局最优组合设计的目标，是一种具有广阔应用前景的优化方法^[29]。

基于前面所开展的试验，进一步地利用 Matlab 数据软件来进行处理，将基于 BBD 试验所获取的 17 组结果设定为训练组，同时把单因素试验得到的 5 组结果作为测试组。采用“3-11-1”的拓扑结构进行神经网络训练，由图 5 可知，训练过程进行 340 轮时，预测值与实际值输出结果之间的均方误差小于 10⁻³。此时样本点集中分布在 Y=X 直线附近，R=0.998 88，说明训练值与预测值接近，且具有较好的线性关系，神经网络训练结果良好，可以用于预测^[30]。通过对神经网络训练模型进行优化，再结合遗传算法，最终得到一个催陈工艺的最佳条件参数：麦饭石添加量 1.71 wt.%、时间 21.90 min、电压 11.84 kV，该条件下得到的感官评分预测值为 87.10 分。

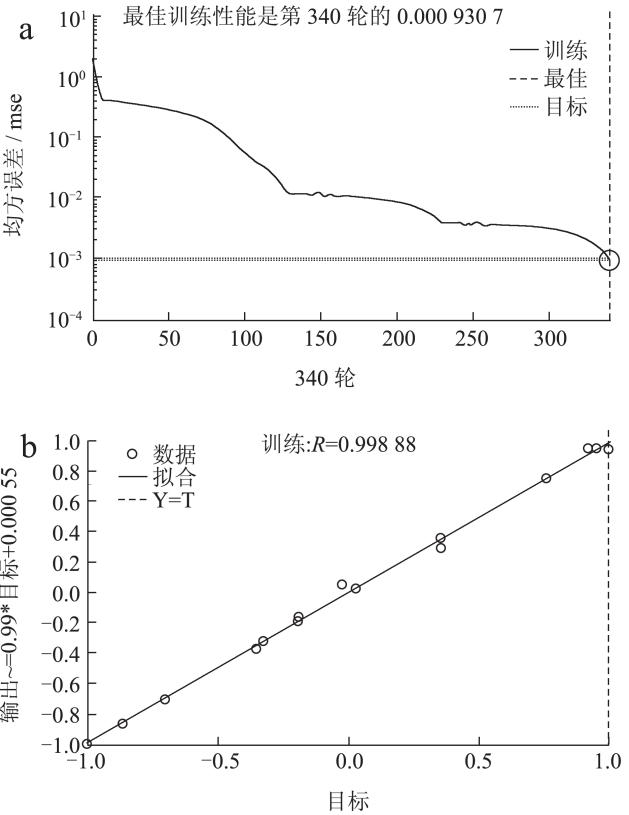


图 5 神经网络训练过程效果分析图

Fig.5 Analysis chart of effect of neural network training process

注：a 为预测值与实际值的均方误差随训练次数的变化情况；b 为预测值与实际值的相关性。

为验证神经网络训练模型结合遗传算法优化催陈工艺的可行性,采用预测的最佳工艺条件对清香型白酒进行处理,结合实际操作条件和工艺参数可设置性,以麦饭石添加量 1.70 wt.%、时间 22 min、电压 12 kV 为工艺参数进行 3 次实验,该条件下得到的感官评分为 86.70 分,与预测值差异较小,说明该模型可靠,具有一定参考意义和适用价值,可以用于清香型白酒品质提升工艺优化中。

2.4 优化处理前后对酒样理化指标的影响结果

清香型白酒优化前后的理化指标检测结果见表 5。由表 5 可知,优化后酒样与原酒相比,其总

酸(0.46 g·L⁻¹)增加 4.55%、总酯(0.73 g·L⁻¹)下降 19.78%、酒精度(67.80% vol)下降 2.02%、乙酸乙酯(1.14 g·L⁻¹)下降 3.39%,因为在优化过程中酯类物质会发生水解和醇醛氧化,使得乙酸增加和乙酸乙酯减少,或者有部分物质发生了挥发,这些反应共同作用引起总酸增加、总酯和乙酸乙酯下降以及酒精度的下降,从而使酒体口感更加柔和、风味更加协调^[31]。根据 GB/T 10781.2-2022《白酒质量要求》中清香型白酒部分的理化要求,以上理化指标基本符合一级酒的要求,甚至部分符合优级酒要求,说明经过优化后的酒样品质标准确实得到了一定提升,进一步证明优化处理方法有效。

表 5 优化前后酒样的理化指标分析对比

Table 5 Comparison and analysis of physicochemical indexes between the optimized sample and the original wine sample							
酒样类型	pH 值	电导率/(μS/cm)	粘度/(mPa.s)	总酸/(g·L ⁻¹)	总酯/(g·L ⁻¹)	酒精度/(%vol)	乙酸乙酯/(g·L ⁻¹)
原酒酒样	5.02 ± 0.16 ^a	8.90 ± 0.30 ^b	2.08 ± 0.04 ^b	0.44 ± 0.02 ^a	0.91 ± 0.04 ^b	69.2 ± 0.17 ^a	1.18 ± 0.16 ^a
优化后酒样	4.65 ± 0.20 ^b	18.90 ± 0.14 ^a	2.12 ± 0.02 ^a	0.46 ± 0.03 ^b	0.73 ± 0.03 ^a	67.8 ± 0.24 ^b	1.14 ± 0.12 ^b

注:不同上标小写字母表示行间差异显著(P<0.05)。

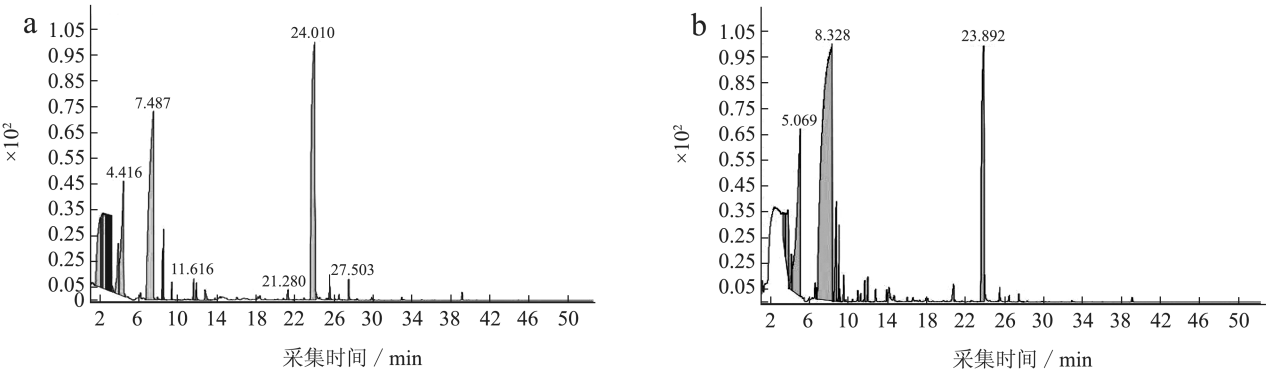


图 6 酒样的气相色谱 – 质谱总离子流图
Fig.6 GC-MS total ion flow diagram of the original wine sample

注: a 为原酒酒样; b 为优化酒样。

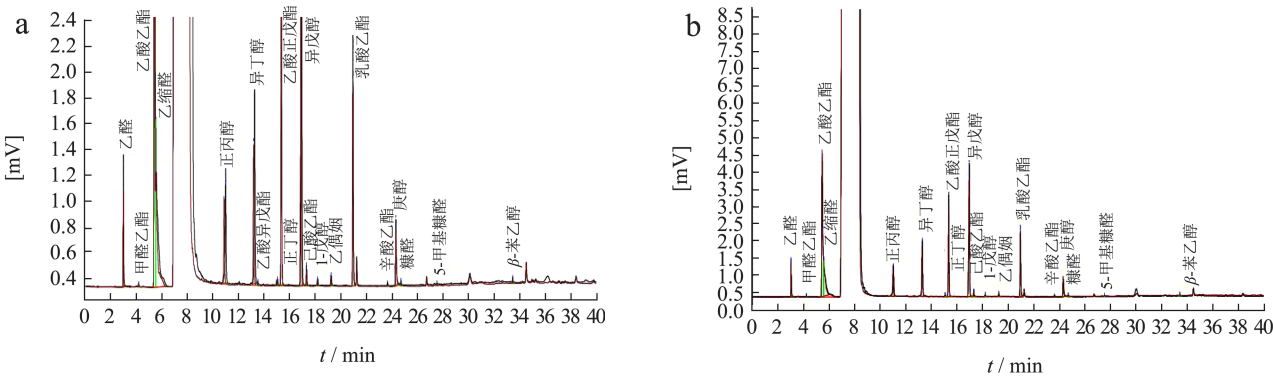


图 7 酒样的气相色谱总离子流
Fig.7 GC total ion flow diagram of the original wine sample

注: a 为原酒酒样; b 为优化酒样。

2.5 酒样挥发性物质成分的测定结果

由图 6 和图 7 可知，挥发性风味成分乙酸乙酯和正丙醇等部分物质的定量分析采用 GC 法测定，其他低于 GC 法检测限的挥发性风味成分定性和半定量分析采用 HS-SPME-GC-MS 法测定，通过二者结合共计从原酒与优化酒样中检测出 102 种物质，按照所需挥发性成分，删减掉未知与其他相对含量极少的化合物，从中筛选出 65 种香气成分^[32]，结果见表 6。由表 6 可知，挥发性香气成分的种类有酸类、醇类、酯类、醛酮类和其他类等特征性香气成分，原酒与优化酒样的酸类、醇类、酯类、醛酮类和其他类等特征性香气的相对含量依次为 6.37% 和 7.54%、31.65% 和 30.24%、61.12% 和 58.88%、0.72% 和 0.60%、0.14% 和 0.05%^[33]。

由表 6 和图 8 可知，通过 GC-MS 对清香型白酒原酒酒样和最终优化酒样的挥发性物质成分进行对比分析，发现经过 ANN-GA 法优化处理的最终酒样确

实各类物质成分和含量都发生了明显变化。最终优化酒样的各物质类别相对含量与原酒相比，醇类物质下降 1.41%，这可能是酒中的分子氧被激活，醇的氧化作用突出，进而使高级醇含量下降；酸类物质增加 1.17%，这可能是酯类物质水解和醇醛氧化共同作用的结果^[34]；酯类物质降低 2.24%，这可能主要是其本身发生水解反应造成的，或者同时有部分物质随处理时间延长而挥发；醛酮类和其他类物质因氧化反应造成的相对含量分别下降 0.12%、0.09%，从而使酒样刺激性口感降低^[35]。Xu 等^[36]在探究白酒催陈机理变化时，指出酸酯醇酯四大类物质间的相互转化是造成酒样风味物质含量变化的关键原因，合适恰当的物质含量和比例是改善酒样品质的主要途径。本试验中优化后整体风味物质除相对含量有些许变化，物质类别并无太大变化。说明优化处理并不会根本性地改造酒体本身，进而颠覆其原有风味，而是精妙地在保留酒体原有特质的基础上，对风味与口感进行了优雅的提升。

表 6 挥发性风味成分含量GC-MS分析结果
Table 6 GC-MS analysis results of volatile flavor components

序号	保留时间/min	风味化合物	芳香化合物	酒样类型/(mg/100 mL)	
				原酒酒样	优化后酒样
		醇类	Alcohols	87.34	83.44
1	10.96	正丙醇 *	n-Propanol*	13.75	12.26
2	13.24	异丁醇 *	Isobutanol*	19.27	18.31
3	15.02	正丁醇 *	n-Butanol*	0.51	0.50
4	15.96	2- 乙烯氧基乙醇	2-Vinyloxyethanol	0.11	ND
5	16.93	异戊醇 *	Isoamyl alcohol*	41.59	38.83
6	24.30	庚醇 *	Heptanol*	6.66	5.81
7	25.20	唛叭茶醇	Ledol	ND	2.34
8	33.42	苯乙醇 *	Phenylethyl alcohol*	5.45	5.39
		酸类	Acids	17.59	20.81
9	14.40	乙酸	Acetic acid	15.65	16.93
10	19.60	正丁酸	n-Butyric acid	0.39	0.66
11	24.01	草莓酸	3-Methylvaleric acid	ND	0.78
12	28.09	4- 甲基-2- 戊烯酸	4-Methyl-2-pentenoic acid	ND	0.88
13	29.81	2- 乙基己酸	2-Ethylhexanoic acid	ND	0.56
14	33.24	辛酸	Octanoic acid	0.17	0.28
15	36.50	壬酸	Nonanoic acid	0.37	0.42
16	39.62	正癸酸	n-Decanoic acid	0.58	0.09
17	43.67	苯甲酸	Benzoic acid	0.34	0.21
18	49.22	肉豆蔻酸	Myristic acid	0.09	ND
		酯类	Acetates	168.67	162.50
19	5.46	乙酸乙酯 *	Ethyl acetate*	118.13	114.32
20	8.28	2- 甲基戊基醋酸酯	2-Methylpentyl acetate	0.96	ND
21	8.86	丙酸戊酯	Pentyl propionate	0.88	1.27
22	9.90	乙酸正己酯	n-Hexyl acetate	ND	0.16
23	10.01	硫代苯甲酸甲酯	Methyl thiobenzoate	0.24	ND

续表6

序号	保留时间/min	风味化合物	芳香化合物	酒样类型/(mg/100 mL)	
				原酒酒样	优化后酒样
24	10.37	3-乙氧基丙烯酸乙酯	Ethyl 3-ethoxyacrylate	0.14	ND
25	10.62	丁酸戊酯	Pentyl butyrate	0.06	ND
26	10.75	2-甲基丙基 2-乙基丁酸酯	2-Methylpropyl 2-ethylbutyrate	0.49	0.68
27	11.12	庚酸乙酯	Ethyl heptanoate	0.61	0.71
28	11.44	丁酸乙酯	Ethyl butyrate	0.29	ND
29	13.22	己酸丁酯	Butyl hexanoate	0.36	0.19
30	13.52	乙酸异戊酯 *	Isoamyl acetate*	0.52	0.81
31	14.56	2-乙基丁酸丁酯	Butyl 2-ethylbutyrate	0.45	0.80
32	17.34	己酸乙酯 *	Ethyl hexanoate*	0.21	0.49
33	17.51	壬酸乙酯	Ethyl nonanoate	0.67	0.51
34	17.90	乳酸异戊酯	Isoamyl lactate	0.18	0.52
35	20.70	苯甲酸乙酯	Ethyl benzoate	ND	0.53
36	20.95	乳酸乙酯 *	Ethyl lactate*	41.64	38.51
37	21.11	丁二酸二乙酯	Diethyl succinate	ND	0.08
38	21.95	异丁酸 2-苯乙酯	2-Phenylethyl isobutyrate	ND	0.08
39	22.10	2-苯基乙酸乙酯	Ethyl 2-phenylacetate	ND	0.14
40	23.66	辛酸乙酯 *	Ethyl octanoate*	0.96	0.59
41	26.51	月桂酸乙酯	Ethyl laurate	0.12	0.06
42	28.26	异戊基琥珀酸乙酯	Isoamyl ethyl succinate	0.17	ND
43	29.62	癸酸乙酯	Ethyl decanoate	0.41	0.45
44	29.73	十三酸乙酯	Ethyl tridecanoate	ND	0.09
45	31.40	十一酸乙酯	Ethyl undecanoate	0.17	0.09
46	35.02	十三甲基十四烯酸乙酯	Ethyl 13-methyltetradecenoate	0.03	0.02
47	36.70	9-十五烯酸乙酯	Ethyl 9-pentadecenoate	0.37	0.20
48	41.49	间苯二甲酸二乙酯	Diethyl isophthalate	0.11	ND
49	44.45	硬脂酸乙酯	Ethyl stearate	0.06	0.1
50	44.85	油酸乙酯	Ethyl oleate	0.4	0.44
51	45.80	反油酸乙酯	Ethyl elaidate	ND	0.59
52	45.85	亚油酸乙酯	Ethyl linoleate	0.04	0.07
		醛酮类	Aldehydes and ketones	2.00	1.65
53	9.92	5-甲基-2-庚酮	5-Methyl-2-heptanone	0.28	ND
54	16.30	苯甲醛	Benzaldehyde	0.01	0.08
55	19.96	苯乙醛	Phenylacetaldehyde	ND	0.21
56	24.70	糠醛 *	Furfural*	1.66	1.23
57	25.26	3,4-二甲基苯甲醛	3,4-Dimethylbenzaldehyde	0.03	0.02
58	26.75	香叶基丙酮	Geranylacetone	0.02	0.04
59	28.70	4-(羟基甲基)苯乙酮	4-(Hydroxymethyl) acetophenone	ND	0.01
60	29.60	反式苯亚甲基丙酮	Trans-Benzalacetone	ND	0.06
		其他类	Other categories	0.37	0.15
61	6.46	正戊醚	n-Amyl ether	0.05	0.08
62	8.19	4-乙基苯甲酰胺	4-Ethylbenzamide	0.08	ND
63	9.15	苯乙烯	Styren	0.15	ND
64	12.82	甲氧基苯甲醛肟	Methoxybenzaldehyde oxime	0.06	0.02
65	21.59	1-十六烯	1-Hexadecene	0.03	0.05

注：“ND”表明物质未检出，低于方法检出限；标注“*”表明由GC法定量检出。

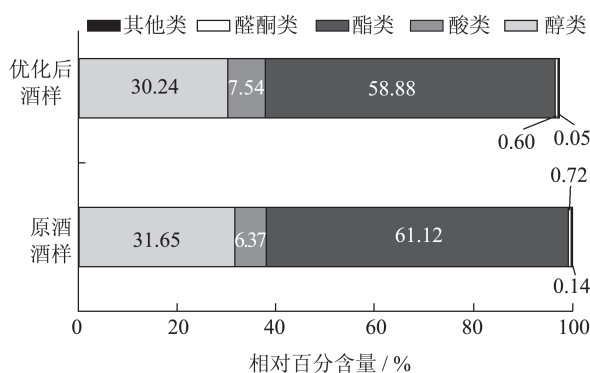


图8 挥发性风味成分相对含量百分比分析结果

Fig.8 Results of the analysis of the relative percentage content of volatile flavor components

注：以未处理的原酒酒样中的化合物含量设为 100%。

3 结论

本研究以清香型白酒为原酒，通过单因素试验和中心组合试验（BBD 试验）以及人工神经网络（ANN）分析结合遗传算法（GA）对品质提升改善进行工艺优化。结果表明，最佳工艺条件为麦饭石添加量 1.70 wt.%、时间 22 min、电压 12 kV，该工艺条件下得到的感官评分为 86.70 分、总酯为 0.73 g·L⁻¹，与原酒相比分别提高 16.53%、下降 19.78%。较原酒相比，总酸增加和酒精度略有下降，使得优化后酒样口感柔和、刺激性降低，同时又巧妙维持了酒体本身独特风格，确保其原有风味不有过度减损。与王鸣山等^[37]在单独利用不同电场条件处理白酒时相比，本研究使用脉冲电场协同麦饭石联合处理，不仅显著提升了效率，同时还确保了酒质的稳定性。通过 HS-SPME-GC-MS 联用的方法共检测出 102 种主要挥发性成分，从原酒和优化后酒样中共筛选得出 65 种主要成分，主要包括醇类（8 种）、酸类（10 种）、酯类（34 种）以及醛酮类（8 种）和其他类（5 种），经复合处理后的最终优化酒样最终优化酒样相对含量与原酒相比，醇类和酯类分别下降 1.41% 和 2.24%，酸类增加 1.17%，进一步证明该法处理后会促进酒样物质间相互转化，从而使原酒风味更为协调、口感更加柔和，为提高白酒风味口感探索了新的研究方向。

参考文献

- [1] QIAO L A, WANG J, WANG R F, et al. A review on flavor of Baijiu and other world-renowned distilled liquors [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20(24): 100870.
- [2] KONTOUDAKIS N L, GUO A Q, SCOLLARY G R, et al. The impact of aging wine in high and low oxygen conditions on the fractionation of Cu and Fe in Chardonnay wine [J]. Food Chemistry, 2017, 229(16):

319-328.

- [3] 吴慧珠,耿晓杰,朱琳,等.3种贮存方式下老白干原酒挥发性风味成分变化规律研究[J].食品科学技术学报,2023,41(5):85-99.
- [4] MUÑOZ-GARCÍA R, DÍAZ-MAROTO M C, ARÉVALO VILLENA M, et al. Ultrasound and microwave techniques as physical methods to accelerate oak wood aged aroma in red wines [J]. LWT, 2023, 179(4): 114597.
- [5] 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(10): 128705.
- [6] 唐丽云,朱孟江,王玉彬,等.传统白酒生产的现代化改造及新技术探究[J].中国食品工业,2022,37(5):124-127.
- [7] FENG Y X, YANG T, ZHANG Y N, et al. Potential applications of pulsed electric field in the fermented wine industry [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9(11): 1585.
- [8] 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.
- [9] 何庆,唐克纯,韩秋月,等.白酒陈化机理及陈化方法研究进展[J].中国酿造,2023,42(7):7-12.
- [10] 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.
- [11] 唐丹丽.脉冲电场辅助浸泡型青梅酒生产的工艺及储存品质变化研究[D].广州:华南理工大学,2023.
- [12] 殷涌光,赫桂丹,石晶,等.高电压脉冲电场催陈白酒的试验研究[J].酿酒科技,2005,27(12):47-50.
- [13] 王毓,夏卉芳,李自丽,等.麦饭石负载PVAm复合物的制备及其对梨汁的澄清作用[J].材料导报,2015,28(14):31-35.
- [14] 李增新,高华,杨波,等.壳聚糖-麦饭石对梨果汁的澄清作用[J].食品科学,2007,28(9):180-182.
- [15] 孙守业,曹淑标.白酒生产中添加麦饭石催化原酒陈酿的方法:中国,CN 102212455A[P].2011-05-24.
- [16] 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.
- [17] XUE T, ZHANG Q, LI Y, et al. Modeling and optimization of photo-fermentation biohydrogen production from co-substrates basing on response surface methodology and artificial neural network integrated genetic algorithm [J]. Bioresource Technology, 2023, 374(4): 128789.
- [18] CHI H, FU Z Y, WANG P, et al. Process optimization for antarctic krill (*Euphausia superba*) sauce based on back propagation neural network combined with genetic algorithm [J]. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7337.
- [19] 汪江波,陈家豪,夏啸,等.不同陈酿方式对白葡萄酒品质的影响[J].中国酿造,2024,43(3):194-200.
- [20] 袁琦,王家胜,毛豪,等.稻花香糯香型白酒风味特征分析[J].中国酿造,2022,41(2):53-59.
- [21] 陈希,李汴生,梅灿辉,等.模糊综合评判在催陈黄酒感官分析的应用[J].现代食品科技,2009,25(4):394-397.
- [22] LIU Y, QIAO Z, ZHAO Z, et al. Comprehensive evaluation of Luzhou-flavor liquor quality based on fuzzy mathematics and principal component analysis [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(6): 1780-1788.
- [23] XIN G, WANG H, ZHI Y, et al. Screening of fermentation resources of Actinidia arguta wine based on principal component analysis combined

- with a fuzzy mathematical sensory evaluation method [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 61(9): 1-10.
- [24] WANG L L, WU L, XIANG D H, et al. Characterization of key aroma compounds in aged Qingxiangxing baijiu by comparative aroma extract dilution analysis, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies [J]. Food Chemistry, 2023, 419(9): 136027.
- [25] LI M, FAN W, XU Y. Volatile compounds sorption during the aging of Chinese Liquor (Baijiu) using Pottery Powder [J]. Food Chemistry, 2021, 345(10): 128705.
- [26] ZHANG W, XIAO Y, DENG R, et al. An electric-field instrument for accelerated aging to improve flavor of Chinese Baijiu [J]. LWT, 2023, 17(4): 114446.
- [27] 刘新雨.脉冲电场对乳酸乙醇酯化反应的影响[D].广州:华南理工大学,2012.
- [28] ZHANG B, ZENG X A, SUN D, et al. Effect of electric field treatments on brandy aging in oak barrels [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 1635-1643.
- [29] 孙钦菊,韦璐,成显波,等.基于线性功效系数法及响应面法优化香蕉桃金娘酒发酵工艺及其营养、风味成分分析[J].现代食品科技,2025,41(10):338-351.
- [30] GÜRGEN A, SEVINDIK M, KRUPODOROVA T, et al. Biological activities of Hypericum spectabile extract optimized using artificial neural network combined with genetic algorithm application [J]. BMC Biotechnology, 2024, 24(1): 83.
- [31] JIA W, MA R T, HU L B, et al. Synergy of physicochemical reactions occurred during aging for harmonizing and improving flavor [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17(6): 100554.
- [32] REN J M, LI Z J, JIA W. Key Aroma differences in volatile compounds of aged Feng-Flavored Baijiu determined using sensory descriptive analysis and GC×GC-TOFMS [J]. Foods, 2024, 13(10): 1504.
- [33] JIA W, FAN Z B, DU A, et al. Molecular mechanism of high pressure shear grinding on Feng-flavor Chinese Baijiu ageing [J]. Food Research International, 2022, 153(3): 110957.
- [34] JIA W, LI Y, 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(5): 126308.
- [35] DENG Y, XIONG A, ZHAO K, et al. Mechanisms of the regulation of ester balance between oxidation and esterification in aged Baijiu [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17169.
- [36] XU Y, ZHAO J, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented Baijiu: The great contribution of ester compounds [J]. Food Chemistry, 2022, 369(3): 130920.
- [37] 王鸣山,王胜男.酒的变频电场催陈机理研究[J].农产品加工, 2021,48(7):16-22.