响应面优化浓香型白酒配料工艺

李文进[1]，张宿义[1,2,*]，杨甲平[2]，贾俊杰[2]，杨　峰[2]，林　发[2]，陈峙霖[2]，宋　川[2]，文　悦[1]，
张正杰[1]，刘芮荻[2]，范相巍[2]，李晨阳[1]
（1.四川轻化工大学食品与酿酒工程学院，四川 宜宾　644005；
2.泸州老窖股份有限公司，国家固态酿造工程技术研究中心，四川 泸州　646000）

摘　要：考察粮糟比、稻壳用量及量水用量对入窖糟醅淀粉糊化度、水分质量分数、酸度及淀粉返生特性的影响。通过单因素及响应面试验优化配料工艺组合。结果表明，各因素对糊化效果的影响主次顺序为：稻壳用量＞量水用量＞粮糟比；最优工艺参数为粮糟比1∶4、稻壳用量25.7%、量水用量62.5%。在此条件下，淀粉糊化度显著提高至（69.28±1.06）%（P＜0.01），出酒率显著提高至（22.49±1.18）%（P＜0.05），总酸、总酯等关键风味指标略有提升，基酒质量符合浓香型白酒标准。研究结果可为浓香型白酒蒸煮糊化工序的参数标准化与生产提质增效提供一定工程参考。

关键词：浓香型白酒；糊化；配料工艺优化；响应面试验

Optimization of Ingredient Proportioning Process for Strong-Flavor Baijiu with Response Surface Methodology

LI Wenjin[1], ZHANG Suyi[1,2,*], YANG Jiaping[2], JIA Junjie[2], YANG Feng[2], LIN Fa[2], CHEN Zhilin[2], SONG Chuan[2],
WEN Yue[1], ZHANG Zhengjie[1], LIU Ruidi[2], FAN Xiangwei[2], LI Chenyang[1]
(1. School of Food and Liquor Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin　644005, China;
2. National Engineering Research Center of Solid-State Brewing, Luzhou Laojiao Co. Ltd., Luzhou　646000, China)

Abstract: The effects of grain to distillers' grains ratio, rice husk addition and water addition on starch gelatinization degree, moisture content, acidity and starch retrogradation characteristics of pit-loading fermented grains were investigated. Ingredient proportion parameters were optimized via single-factor and response surface methodologies. The results indicated that the influencing order of factors on gelatinization effect was rice husk addition > water addition > grain-to-distillers' grains ratio. The optimal parameters were determined as a grain-to-distillers' grains ratio of 1:4, rice husk addition of 25.7% and water addition of 62.5%. Under the condition, starch gelatinization degree significantly increased to (69.28 ± 1.06)% (P < 0.01), the liquor yield increased remarkably to (22.49 ± 1.18)% (P < 0.05), and key flavor indicators such as total acid and total ester were slightly enhanced, with the base liquor quality meeting the standards for strong-flavor Baijiu. This study provided engineering references for parameter standardization, quality improvement and efficiency promotion in cooking and gelatinization procedures of strong-flavor Baijiu production.

Keywords: strong-flavor Baijiu; gelatinization; ingredient proportioning process optimization; response surface methodology
DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.032
中图分类号：TS262.3　　文献标志码：A　　文章编号：0254-5071（2026）06-0252-07

收稿日期：2026-03-29
基金项目：泸州老窖-四川轻化工大学联合培养人才项目
第一作者简介：李文进（1998—）（ORCID: 0009-0009-8064-0924），男，硕士研究生，研究方向为酿酒技术生产。E-mail: 1591917378@qq.com
*通信作者简介：张宿义（1971—）（ORCID: 0000-0002-1898-3805），男，教授级高级工程师，博士，研究方向为酿酒微生物及应用。E-mail: zhangsy@lzlj.com

引文格式：
李文进, 张宿义, 杨甲平, 等. 响应面优化浓香型白酒配料工艺[J]. 中国酿造, 2026, 45(6): 252-258. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.032.　http://www.chinabrewing.net.cn
LI Wenjin, ZHANG Suyi, YANG Jiaping, et al. Optimization of ingredient proportioning process for strong-flavor Baijiu with response surface methodology[J]. China Brewing, 2026, 45(6): 252-258. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.06.032.　http://www.chinabrewing.net.cn

浓香型白酒作为中国白酒核心香型之一，泥窖固态发酵、续糟配料、混蒸混烧的酿造工艺是其区别于其他香型的核心特征。其工艺特点是出窖糟醅与粮食、稻壳等原辅料充分拌匀后，再通入蒸汽进行蒸馏，满足蒸酒与蒸粮同时进行的功能，蒸粮结束后打入量水，将糟醅摊晾至适宜温度后按比例拌入大曲，转入窖池进行新一轮的固态发酵流程。糟醅入窖状态决定后续整个发酵过程的节奏，合适的水分质量分数、酸度、淀粉糊化度是浓香型白酒酿造的核心条件，直接决定糟醅淀粉的可利用性。浓香型白酒的发酵过程为双边发酵，淀粉糊化度是连接原料处理与后续糖化发酵过程的关键纽带，对出酒率、酒体风味物质生成及发酵过程稳定性具有显著影响[1-3]。淀粉糊化是指原料淀粉在高温、高湿条件下吸水膨胀、结晶结构破坏的过程，不仅能使淀粉成为糖化酶与微生物可利用的底物，还可以为优质基酒的构建奠定物质基础[4-5]。返生是糊化的逆过程，是指经过蒸煮糊化后的淀粉，在冷却、静置过程中，原本吸水膨胀、结构松散的糊化淀粉分子，重新失去有序状态，慢慢恢复成类似生淀粉的致密结晶结构，分子间重新形成氢键，导致淀粉分子重新聚集、沉淀的现象，返生淀粉会重新变得坚硬、难溶于水，难以被大曲中的糖化酶分解利用[6]。深入探究配料工艺参数对糊化效果影响，对推动浓香型白酒酿造工艺标准化、智能化升级具有重要的理论与实践意义。

浓香型白酒入窖糟醅淀粉糊化度的影响因素包括粮食本身的特性及状态、母糟品质、润粮效果、蒸煮条件和配料工艺等[7-8]。目前对于白酒生产中蒸煮糊化相关研究已有初步成果，卢君等[9]对高粱粉碎度、润粮水温度、粮醅酸度、蒸煮压力、高粱硬度和返生时间进行研究，发现淀粉糊化度指标与各因素之间呈一定的相关关系，王从坤等[10]研究不同润粮水对出甑淀粉糊化度的影响，发现润粮水用量与淀粉糊化度呈正相关关系，商海林等[11]研究发现，不同蒸粮时间、蒸汽通量及稻壳用量对入窖糟醅淀粉糊化度具有不同的影响，并在单因素试验的基础上采用响应面法优化蒸粮工艺，通过与传统工艺对比，确定了浓香型白酒的新型蒸粮工艺，由此可见，不同的配料、润粮和蒸煮条件均会对白酒入窖糟醅的糊化状态和理化指标产生影响。从浓香型白酒酿造工艺特点出发，不同配料工艺下，改变粮糟比、稻壳用量、量水用量能够影响糟醅结构、水分质量分数、酸度环境，进而直接影响淀粉糊化的效率与糟醅的入窖状态，合适的粮、糟、糠和水的比例能够在保证良好的糟醅入窖条件下，兼顾出酒率与酒体品质[12-15]。现有研究多以淀粉糊化度为单一评价指标，未充分结合入窖水分、酸度、返生值等关键指标进行综合评价，缺乏对糊化效果持续性与发酵适配性的系统考量。

本研究在正常生产酿造前提下，以粮糟比、稻壳用量、量水用量为考察因素进行单因素试验，以淀粉糊化度作为评价指标，同时考查入窖糟醅的入窖水分质量分数、酸度、返生值变化规律，在单因素试验的基础上利用响应面试验优化入窖糟醅糊化工艺，对比工艺优化前后淀粉糊化度和出酒率差异，以期为浓香型白酒蒸煮糊化工艺的精准调控提供科学依据，在保证酒体品质的基础上提升出酒率。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

浓香型白酒母糟取自泸州某酒厂浓香型酿造班组整窖出窖后的混匀糟醅；高粱（品种为青壳洋）产地泸州。

次甲基蓝、五水硫酸铜、酒石酸钾钠（均为分析纯）　天津市致远化学试剂有限公司；氢氧化钠、无水葡萄糖（均为分析纯）　成都市科隆化学品有限公司；亚硫酸钠（分析纯）　天津市津东天正精细化学试剂厂；亚铁氰化钾（分析纯）　上海麦克林生化科技有限公司；糖化酶（50 000 U/g）　山东隆大生物工程有限公司。

1.2　仪器与设备

WB100-6型水浴锅　宁波市鄞州群安实验仪器有限公司；FA2004N型电子天平　上海菁海仪器有限公司；DL-1型万用电炉　北京中兴伟业仪器有限公司；85-2型磁力搅拌器　金坛区西城新瑞仪器厂；BG2-104型电热鼓风干燥箱　上海博迅实业有限公司医疗设备厂；GC-8860N气相色谱仪　美国Agilent公司；MPS2多功能自动进样系统　德国GERSTEL公司。

1.3 方法

1.3.1 浓香型白酒工艺流程与操作要点

浓香型白酒工艺流程如图1所示。



图1 浓香型白酒工艺流程

Fig. 1 Technological process of strong-flavor Baijiu

操作要点：采用浓香型白酒工艺进行酿造，先将高粱粉碎至过20目筛颗粒的占比10%，随后加入高粱质量50%的润粮水，充分拌匀润料1 h后，与稻壳、母糟拌和均匀，得到混合糟醅；将糟醅上甑进行蒸酒操作，待馏酒工序完成后，转为大火进行蒸粮；从蒸酒开始计时1 h停止蒸粮，蒸煮完毕后加入一定的量水，出甑摊晾至平地温度后，加入大曲混合均匀后入窖发酵，具体操作要点及工艺参数参见《泸型酒技艺大全》[16]。其中糟醅从上甑到入窖，生产过程中粮食用量、粮食粉碎度、用曲量均一致，润料工艺参数和蒸煮工艺参数保持一致，实验开展的班组为同一班组。

1.3.2 浓香型白酒糊化工艺优化单因素试验

以粮糟比、稻壳用量、量水用量分别为1∶3.6、26%、60%为基础条件，采用单因素轮换法，分别考察粮糟比（1∶3.0、1∶3.3、1∶3.6、1∶3.9、1∶4.2）、稻壳用量（22%、24%、26%、28%、30%）及量水用量（56%、58%、60%、62%、64%）对入窖糟醅淀粉糊化度、水分质量分数、酸度和返生值的影响。

1.3.3 浓香型白酒糊化工艺优化Box-Behnken响应面试验设计

在单因素试验的基础上，以粮糟比（*A*）、稻壳用量（*B*）和量水用量（*C*）为自变量，以入窖糟醅的淀粉糊化度（*Y*）为响应值，利用Design-Expert 13.0.5.0软件设计3因素3水平的Box-Behnken响应面试验，优化浓香型白酒糊化工艺的最佳条件，Box-Behnken试验因素与水平见表1。

表1 Box-Behnken试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken experimental design

水平	*A*粮糟比	*B*稻壳用量/%	*C*量水用量/%
−1	1∶3.6	24	60
0	1∶3.9	26	62
1	1∶4.2	28	64

1.3.4 优化后工艺与原工艺的比较

以最优粮糟比、稻壳用量、量水用量进行生产酿造，同时在优化前的粮糟比、稻壳用量、量水用量条件下进行生产酿造，比较2种生产工艺参数条件下的入窖糟醅淀粉糊化度、基酒出酒率。

1.3.5 理化指标与挥发性风味物质测定

水分质量分数：利用烘干法测定[8]。酸度：参照T/CBJ 004—2018《固态发酵酒醅通用分析方法》测定。淀粉糊化度：参考戴诗皎等[17]的方法测定。返生值：取入窖糟醅和室温放置2 h入窖糟醅检测糊化度，两者差值即为返生值[8]。糟醅入窖发酵60 d出酒率：采用称质量法测定原酒产量，换算为乙醇体积分数60%基酒，其与投粮比值即为出酒率[18]。基酒挥发性风味物质检测：参照《泸型酒技艺大全》[16]进行测定。

1.4 数据处理

所有实验均重复3次，结果用$\bar{x}\pm s$表示。采用SPSS 27.0和Origin 2024分析和处理数据。采用Design-Expert 13.0.5.0对响应面试验进行设计与分析。

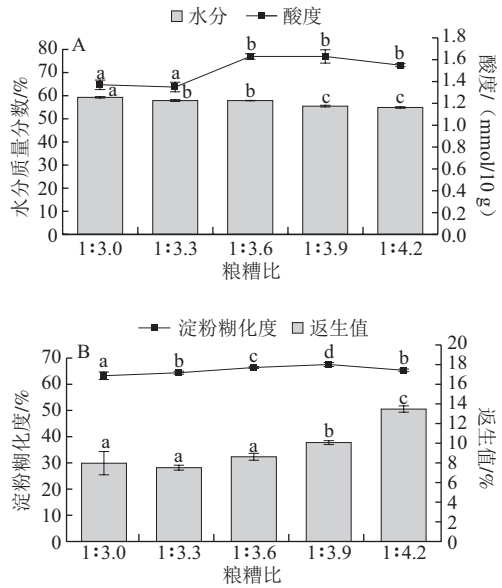
2 结果与分析

2.1 配料工艺优化单因素试验

2.1.1 粮糟比对入窖糟醅水分质量分数、酸度、淀粉糊化度及返生值的影响

由图2可知，随糟醅添加量的增加，入窖糟醅的水分质量分数呈现下降的趋势，酸度总体呈现先上升后降低的趋势，淀粉糊化度呈现先升高后降低的趋势，返生值总体呈现上升趋势。当粮糟比为1∶3.9时，入窖糟醅的淀粉糊化度最高，为（67.51±0.74）%，水分质量分数为（55.5±0.36）%，酸度为（1.63±0.06）mmol/10 g，返生值为（10.06±0.19）%，各项理化指标均符合浓香型白酒糟醅入窖条件。母糟主要由残余淀粉和发酵后稻壳组成，其质量分数约60%，具有较高的水分和酸度。发酵后的稻壳仍保持良好疏松性，拌料后结合酿酒师“轻撒匀铺”的上甑技艺，使糟醅结构疏松、上汽均匀。糊化度取决于淀粉颗粒的吸水膨胀与结晶结构破坏程度，而粮糟比的变化会通过影响糟醅水分、酸度和孔隙结构，调控蒸煮过程中淀粉所处的微环境[19]。适宜水分有助于淀粉充分吸水糊化，适宜酸度也起辅助作用。在固定投粮量条件下，糟醅添加量过低时，糟醅孔隙率和酸度不足，蒸汽渗透受阻，淀粉受热不均，糊化度较低；但较高水分和酸度有利于抑制返生。粮糟比为1∶3.9时，糊化度达到峰值。此时糟醅孔隙结构适中，蒸汽均匀渗透，酸度与水分协同促进糊化，同时有效抑制返生。粮糟比过高时，虽孔隙率提高、蒸汽透过增强，但水分蒸发加快，量水补充作用减弱，入窖水分下降，糊化度降低，返生加剧[20]。综上，随着糟醅添加量上升，疏松度提高，一定程度上利于糊化，但量水对水分的补充效果减弱，入窖水分降低会加剧返生。这与卢君等[9]提高糟醅酸度可提升淀粉糊化度的结论一致。因此，在粮糟比为

1∶3.9时，酸度、水分与孔隙度三者达到适宜平衡，糊化效果最优。返生值越高，糊化稳定性越差，后续发酵中可利用淀粉含量越低。



小写字母不同表示组间差异显著（$P<0.05$）。图3、4同。

图2　粮糟比对入窖糟醅水分含量与酸度（A）、淀粉糊化度与返生值（B）的影响

Fig. 2　Effects of grain to distillers' grains ratio on moisture content and acidity (A), starch gelatinization degree and retrogradation value (B) of pit-loading fermented grains

2.1.2　稻壳用量对入窖糟醅水分质量分数、酸度、淀粉糊化度及返生值的影响

由图3可知，入窖糟醅的水分质量分数随稻壳用量的增加呈现下降的趋势，酸度也呈现下降趋势，淀粉糊化度呈现先升高后降低的趋势，返生值呈现先上升后下降的趋势。当稻壳用量为26%时，入窖糟醅的淀粉糊化度最高，为（64.58±0.38）%，水分质量分数为（57.8±1.03）%，酸度为（1.46±0.05）mmol/10 g，返生值为（9.84±0.20）%，各项理化指标均符合浓香型白酒糟醅入窖条件。稻壳因结构疏松、吸水性较强，在与粮食和母糟混合后会吸附游离水分。稻壳用量增加会提升糟醅疏松度，使蒸汽穿透性增强，加速水分和酸类物质挥发，导致糟醅水分与酸度下降。当稻壳用量为26%时，糟醅糊化度达到最高。此时，糟醅孔隙率与蒸汽渗透效率均达到理想状态，水分与酸度虽略有降低，但仍能满足淀粉糊化的基本需求，二者在该用量下达到最佳平衡，糊化效果最优[9]。稻壳用量低于26%时，糟醅过于紧实，蒸汽渗透不足，淀粉受热不均，糊化度较低；而超过26%后，虽疏松度继续提高，但稻壳过度吸水导致淀粉颗粒含水量不足，同时酸度显著下降，对糊化的抑制作用超过孔隙率增加的正面效应，整体糊化效率下降，且水分不足还会加剧淀粉返生，因此返生值显著上升[21-23]。

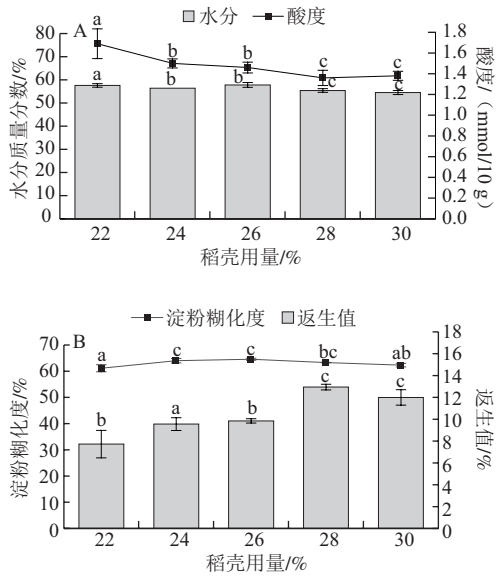


图3　稻壳用量对入窖糟醅水分含量与酸度（A）、淀粉糊化度与返生值（B）的影响

Fig. 3　Effects of rice husk addition on moisture content and acidity (A), starch gelatinization degree and retrogradation value (B) of pit-loading fermented grains

2.1.3　量水用量对入窖糟醅水分质量分数、酸度、淀粉糊化度及返生值的影响

由图4可知，随量水用量的增加，入窖糟醅的水分质量分数呈现上升的趋势，酸度呈现下降趋势，淀粉糊化度呈现先升高后平稳的趋势，返生值呈现降低趋势。当量水用量为62%时，入窖糟醅的淀粉糊化度最高，为（65.28±0.61）%，水分质量分数为（61.3±0.85）%，酸度为（1.31±0.07）mmol/10 g，返生值为（11.35±0.26）%，各项理化指标均符合浓香型白酒糟醅入窖条件。量水是糟醅水分的主要补充来源，直接影响摊晾前的水分质量分数。摊晾过程中水分蒸发和温度下降易诱发糊化淀粉短期老化回生，量水不足会加剧返生，过量则会稀释酸度，同样可能促进返生[24]。当量水用量为62%时，糊化度达到最高，此时糟醅水分充足[25]，淀粉充分吸水膨胀，糊化状态最佳。量水用量低于62%时，补充水分不足，无法满足淀粉吸水需求，糊化度较低[26]；随量水用量增加，水分得到补充，糊化度逐步提升。当量水用量超过62%后，虽水分持续增加，但部分淀粉因过度浸泡导致糊精类物质流失，糊化效率轻微下降，但仍维持在较高水平[25]。总体而言，适量增加量水可提高入窖水分、降低酸度，对淀粉返生有一定抑制作用；但用量过大时酸度过低，反而可能使返生略有增加。

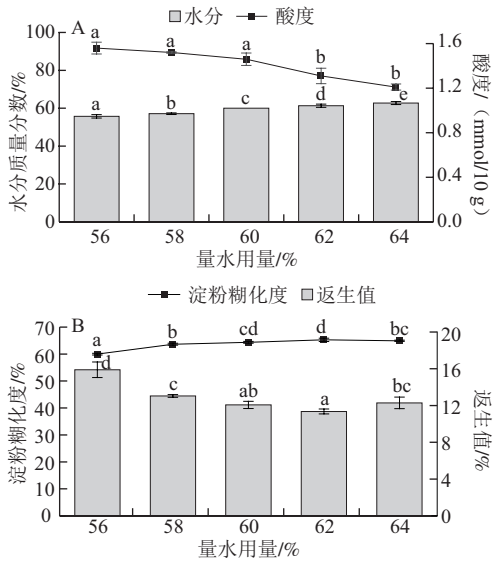


图4 量水用量对入窖糟醅水分含量与酸度（A）、淀粉糊化度与返生值（B）的影响

Fig. 4 Effects of water addition on moisture content and acidity (A), starch gelatinization degree and retrogradation (B) of pit-loading fermented grains

2.2 配料工艺优化响应面试验

2.2.1 配料工艺优化响应面试验结果与分析

在单因素试验的基础上，以粮糟比（*A*）、稻壳用量（*B*）和量水用量（*C*）为自变量，以淀粉糊化度（*Y*）为响应值，利用Design-Expert 13.0.5.0软件设计3因素3水平的Box-Behnken响应面试验，试验设计及结果见表2，方差分析见表3，回归模型的可信度分析见表4。

表2 配料工艺优化Box-Behnken试验结果

Table 2 Results of Box-Behnken test for ingredient proportioning process optimization

试验号	*A*粮糟比	*B*稻壳用量/%	*C*量水用量/%	淀粉糊化度/%
1	1∶3.9	26	62	68.74
2	1∶4.2	24	62	66.12
3	1∶3.9	26	62	69.52
4	1∶3.9	24	64	65.17
5	1∶3.6	24	62	60.35
6	1∶4.2	26	60	64.69
7	1∶3.9	24	60	63.93
8	1∶3.6	26	60	64.65
9	1∶3.6	28	62	63.43
10	1∶3.6	26	64	65.21
11	1∶4.2	28	62	60.83
12	1∶3.9	26	62	70.23
13	1∶4.2	26	64	67.37
14	1∶3.9	28	64	62.53
15	1∶3.9	26	62	69.69
16	1∶3.9	26	62	69.43
17	1∶3.9	28	60	59.69

应用Design Expert 13.0.5.0软件对所得响应面试验数据进行多元回归拟合，得到回归方程：$Y=69.52+0.67A-1.14B+0.92C-2.09AB+0.53AC+0.4BC-2.09A^2-4.74B^2-1.95C^2$。

表3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression model

系数来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	180.84	9	20.09	34.46	＜0.000 1	**
A	3.6	1	3.6	6.18	0.041 8	*
B	10.33	1	10.33	17.71	0.004 0	**
C	6.7	1	6.7	11.49	0.011 6	*
AB	17.51	1	17.51	30.04	0.000 9	**
AC	1.12	1	1.12	1.93	0.207 7	
BC	0.64	1	0.64	1.1	0.329 6	
A^2	18.48	1	18.48	31.69	0.000 8	**
B^2	94.79	1	94.79	162.57	＜0.000 1	**
C^2	15.97	1	15.97	27.38	0.001 2	**
残差	4.08	7	0.583 1			
失拟项	2.93	3	0.977 3	3.4	0.133 9	
误差项	1.15	4	0.287 4			
总离差	184.93	16				

注：*.显著（$P<0.05$），**.极显著（$P<0.01$）。

表4 回归模型可信度分析

Table 4 Reliability analysis of the regression model

项目	标准差	变异系数/%	R^2	R^2_{Adj}	信噪比
数值	0.76	1.17	0.977 9	0.949 6	16.045 7

由表3可知，模型$P<0.000\ 1$，失拟项$P=0.133\ 9>0.05$，不显著，说明模型拟合度好。从粮糟比（*A*）、稻壳用量（*B*）和量水用量（*C*）的*F*值看，各因素对入窖糟醅淀粉糊化度的影响由小到大依次为：*A*＜*C*＜*B*，即粮糟比＜量水用量＜稻壳用量。由表4可知，模型决定系数$R^2=0.977\ 9$，校正后决定系数$R^2_{Adj}=0.949\ 6$，变异系数为1.17%，表明模型拟合程度良好，实验误差小，操作稳定性与可靠性较高；信噪比为16.045 7，表明模型信号强度充足、噪声干扰小，拟合效果优异，可用于最佳工艺参数预测。其中，一次项*A*和*C*对结果影响显著（$P<0.05$），*B*对结果的影响极显著（$P<0.01$）；交互项*AB*对结果影响极显著（$P<0.01$），*BC*和*AC*对结果影响不显著（$P>0.05$），二次项A^2、B^2和C^2对结果影响极显著（$P<0.01$）。

2.2.2 响应面交互作用分析

响应面图能够反映各因素的最佳水平范围，坡面越陡反映该因素变化对响应值影响越大，坡面越缓则反之；等高线图能够反映交互作用强弱，当等高线图呈椭圆形表示交互作用显著，而圆形表示交互作用不显著。如图5所示，随着粮糟比（*A*）降低，以及稻壳用量（*B*）、量水用量（*C*）增加，入窖糟醅的淀粉糊化度均呈先上升后下降的趋势，这与单因素结果保持一

致；*AB*交互作用等高线图呈椭圆形，表示稻壳用量和粮糟比交互作用对糊化度影响较为显著，与方差分析结果一致。

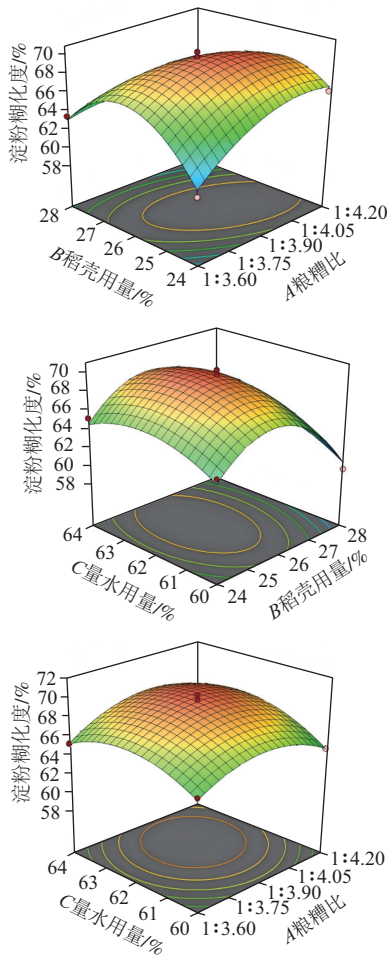


图5　各因素间交互作用对淀粉糊化度影响的响应面和等高线图
Fig. 5　Response surface and contour plots of interactive effects of various factors on starch gelatinization degree

2.3　优化工艺验证

利用Design-Expert 13.0.5.0软件对所得的回归方程进行逐步回归，确定最佳工艺参数为粮糟比1∶3.98、稻壳用量25.65%、量水用量62.51%，此时淀粉糊化度预测值为69.83%。考虑到实际生产的方便性，优化工艺参数选择粮糟比1∶4、稻壳用量25.7%、量水用量62.5%，在此最优条件下做3组平行实验，测得淀粉糊化度为（69.28±1.06）%，与模型预测值接近，表明模型可靠、具有一定的实际应用价值。

2.4　工艺参数优化前后糊化度、出酒率及基酒挥发性风味物质对比

由图6可知，在最优配料工艺参数下入窖糟醅淀粉糊化度为（69.28±1.06）%、出酒率为（22.49±1.18）%，原工艺参数条件下入窖糟醅淀粉糊化度为（64.53±0.60）%、出酒率为（19.92±0.94）%，淀粉糊化度极显著提高（P=0.002<0.01），基酒出酒率显著提高（P=0.039<0.05）。

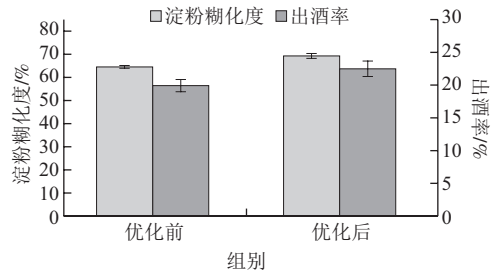


图6　工艺优化前后淀粉糊化度和出酒率
Fig. 6　Starch gelatinization degree and liquor yield before and after process optimization

由表5可知，工艺优化后基酒的总酸、总酯、己酸乙酯、乳酸乙酯和有机酸（己酸、丁酸）含量略高于优化前，均符合浓香型白酒质量要求GB/T 10781.1—2021《白酒质量要求 第1部分：浓香型白酒》[27]中高度酒理化要求。优化前后基酒均呈现浓香型白酒典型风格，窖香较浓郁、主体香明显、粮香浓郁、入口较绵甜醇厚、爽净的特点。

表5　基酒酸类与酯类物质含量对比
Table 5　Comparison of acid and ester contents in base liquor

g/L

项目	工艺优化前	工艺优化后
总酸	0.76±0.02^{A}	0.79±0.02^{A}
总酯	3.29±0.05^{A}	4.09±0.05^{B}
己酸乙酯	2.10±0.00^{A}	2.35±0.00^{B}
乙酸乙酯	1.85±0.00^{A}	1.65±0.02^{B}
乳酸乙酯	1.45±0.00^{A}	1.60±0.00^{B}
丁酸乙酯	0.07±0.01^{A}	0.08±0.00^{B}
己酸	0.22±0.01^{A}	0.28±0.00^{B}
乙酸	0.75±0.01^{A}	0.58±0.00^{B}
丁酸	0.07±0.00^{A}	0.08±0.00^{B}

注：同行大写字母不同表示组间差异显著（P<0.05）。

基酒产量和基酒进行风味物质的提升可能是由于糊化度提高有利于促进糖化速率[28]，糖类的充分供应构成了酸酯生成的“原料基础”，在葡萄糖经糖酵解途径生成丙酮酸后，分流至有机酸合成通路，而有机酸正是酯类物质的直接前体。同时淀粉糊化度提升所带来的糖分富集并非均匀地被所有微生物利用，而是定向筛选特定功能菌群。充足的碳源支撑酵母的乙醇发酵，同时为细菌的产酸代谢提供富余底物。研究证实，在乙醇含量相同的条件下，总酸含量越高，酯化促进效果越显著，说明酸是酯合成的“限速前体”。因此，适度糊化可促进底物充分糖化，为微生物代谢产酸提供充足碳源，利于有机酸大量积累，进而推动酯化反应平衡正向移动[29-30]。此外，工艺优化后淀粉糊化度提升还能减少“抗性淀

粉”即返生淀粉的生成量。抗性淀粉无法被糖化酶分解利用，降低碳源有效供给；而优化糊化工艺后，抗性淀粉生成受到抑制，更多碳流进入酸酯代谢途径。

3 结 论

本研究系统考察了粮糟比、稻壳用量及量水用量对浓香型白酒入窖糟醅淀粉糊化度的调控规律，发现3个因素均呈现“先升后降”的非线性影响，其中水分质量分数是抑制淀粉短期老化回生的关键因子。通过响应面法优化确定最优配料工艺为粮糟比1∶4、稻壳用量25.7%、量水用量62.5%，在此条件下淀粉糊化度显著提高为（69.28±1.06）%（$P<0.01$），各因素影响主次顺序为稻壳用量＞量水用量＞粮糟比。发酵验证表明，优化工艺使基酒出酒率显著提升（$P<0.05$），总酯、己酸乙酯等关键风味物质含量同步提高。淀粉糊化度提升可能通过增加可发酵糖供给、促进微生物产酸代谢及抑制抗性淀粉生成3条路径协同推动酸酯合成。本研究从配料工艺源头出发，为浓香型白酒蒸煮糊化工序的参数标准化与提质增效提供了可量化的工程依据。

参考文献：

[1] 沈怡方. 白酒生产技术全书[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 125-130.

[2] 熊飞龙, 曾芳, 王冬梅, 等. 糊化度研究进展及在高粱品控上迁移应用研究[J]. 酿酒科技, 2023(10): 106-110. DOI:10.13746/j.njkj.2022288.

[3] 李晨阳, 杨平, 秦辉, 等. 清蒸高粱糊化度检测及其蒸粮效果评价方法研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 150-158. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041171.

[4] 边名鸿, 吴轩, 方裕理, 等. 三种酿酒高粱原料及淀粉特性的比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(7): 114-122. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043606.

[5] 孙美红, 赵雅, 高振峰, 等. 山西不同中晚熟粳糯高粱淀粉结构及糊化特性差异分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 116-128. DOI:10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202406019.

[6] 任飞, 韩珍琼. 白酒生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022: 51-54.

[7] 赵荣寿, 赵江华, 高占争, 等. 淀粉糊化度检测方法及在白酒应用中研究进展[J]. 酿酒, 2024, 51(2): 24-29. DOI:10.3969/j.issn.1002-8110.2024.02.008.

[8] 刘涵, 敖宗华, 王明, 等. 酿酒高粱的研究进展[J]. 酿酒科技, 2016(6): 105-107. DOI:10.13746/j.njkj.2015490.

[9] 卢君, 唐平, 山其木格, 等. 一种评价酱香型白酒酿造过程高粱蒸煮程度的技术研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(3): 73-78. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2021.03.013.

[10] 王从坤, 邓俊, 赵红平, 等. 不同润粮用水对酱香型白酒生产的影响研究[J]. 酿酒科技, 2025(12): 74-77.

[11] 商海林, 邢宪卿, 吕志远, 等. 响应面法优化浓香型白酒扣盖蒸料工艺[J]. 中国酿造, 2024, 43(6): 233-238. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2024.06.036.

[12] 许德富, 张宿义, 杨平, 等. 基于续糟发酵的浓香型白酒转排配料措施协同调控研究[J]. 酿酒, 2026, 53(1): 100-103. DOI:10.3969/j.issn.1002-8110.2026.01.024.

[13] 赖登燡, 丁志贤. 入窖七因素的变化规律及相互关系的研究(七): 入窖糟醅[J]. 酿酒科技, 2013(5): 1-3.

[14] 王启, 马辉峰, 蔡建波, 等. 近红外光谱技术在北方浓香型白酒酿造糟醅理化指标快速检测中的应用[J]. 中国酿造, 2023, 42(12): 161-164. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2023.12.025.

[15] 常勇勇, 林一心, 尉军强, 等. 浓香型白酒糟醅质构及微生物菌群研究进展[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 6-12. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2024.10.002.

[16] 泸州老窖集团有限责任公司. 泸型酒技艺大全[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 387-392.

[17] 戴诗皎, 王晓慧, 赵琦, 等. 浓香型白酒酿造过程粮食蒸煮效果评价方法研究[J]. 酿酒科技, 2022(6): 82-85. DOI:10.13746/j.njkj.2021309.

[18] 杨贵. 泸型酒酿造时空特性及配料研究[D]. 宜宾: 四川轻化工大学, 2022.

[19] 陈仕江, 苏建, 张富勇, 等. 浓香型白酒糟醅质构的研究进展[J]. 酿酒科技, 2022(2): 99-102. DOI:10.13746/j.njkj.2021156.

[20] 杨明永, 周帅, 范宏筠, 等. 不同粮糟配料比对浓香型白酒秋季转排生产糟醅发酵的影响分析[J]. 酿酒科技, 2025(11): 94-100. DOI:10.13746/j.njkj.2025024.

[21] 刘明. 浓香型白酒酿造蒸粮糊化过程的影响因素研究进展[J]. 酿酒科技, 2023(8): 81-84. DOI:10.13746/j.njkj.2023095.

[22] 周蔺, 王瑜, 雍霖宣, 等. 白酒生产用稻壳研究进展[J]. 酿酒科技, 2025(10): 121-125. DOI:10.13746/j.njkj.2024291.

[23] 唐贤华, 张崇军, 隋明, 等. 不同糠壳用量糟醅的质构特性与理化指标的相关性研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(9): 138-142. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2019.09.027.

[24] 贾军全, 潘天全, 薛锡佳, 等. 一种酿酒用稻壳提升装置的设计与应用[J]. 酿酒, 2024, 51(4): 131-134. DOI:10.3969/j.issn.1002-8110.2024.04.034.

[25] 刘丽军. 白酒加工工艺中投水量对淀粉糊化度的影响[J]. 中外企业家, 2014(6): 218-218; 257. DOI:10.3969/j.issn.1000-8772.2014.06.159.

[26] 雷磊. 基于智能酿造浓香型白酒入窖水分调控方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.

[27] 国家标准化管理委员会, 国家市场监督管理总局. 白酒质量要求第1部分: 浓香型白酒: GB/T 10781.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[28] 周平, 王庆宇, 王贵军, 等. 一种酱香型白酒出甑糟醅蒸煮状态的评价方法及生产应用: CN202211267393.3[P]. 2025-07-22.

[29] 范文强, 赵亚雄, 郇丹, 等. 白酒中酸类物质的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(3): 77-83.

[30] 文悦, 张宿义, 宋攀, 等. 浓香型白酒不同配糟量对酒醅发酵过程中微生物群落结构及代谢的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(21): 146-158. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250505-010.