

葛松涛, 寿泉洪, 韩文凤, 等. 响应面法优化鲜黄酒瓶内发酵工艺 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 278–284. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070247

GE Songtao, SHOU Quanhong, HAN Wenfeng, et al. Optimization of Bottling Fermentation Process of Draft Huangjiu by Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 278–284. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070247

· 工艺技术 ·

响应面法优化鲜黄酒瓶内发酵工艺

葛松涛^{1,2}, 寿泉洪^{1,2}, 韩文凤^{1,2}, 王 兰³, 沙如意^{2,4,*}, 王珍珍^{2,4}, 胡普信^{1,2}, 毛建卫^{1,2}

(1. 浙江工业职业技术学院黄酒学院, 浙江绍兴 312000;

2. 浙江省农产品化学与生物加工技术重点实验室, 浙江杭州 310023;

3. 国家黄酒工程技术研究中心, 浙江绍兴 312000;

4. 浙江科技学院, 浙江杭州 310023)

摘 要:为增加鲜黄酒的感官分数, 以国家评委和青年学生的感官评价为指标, 考察初始糖度、水浴灭菌时间、装液量、发酵温度、发酵时间、接种量因素对鲜黄酒感官评价的影响。采用 Plackett-Burman 试验筛选影响鲜黄酒感官指标的显著因素, 通过最陡爬坡试验、中心组合设计试验和响应面方差分析优化最佳工艺。结果表明, Plackett-Burman 试验显示初始糖度、发酵温度和发酵时间是影响感官评价的显著因素。通过中心组合设计和响应面分析得到, 鲜黄酒的最佳发酵工艺参数为糖度为 126 g/L, 发酵温度为 20.5 ℃, 发酵时间为 69.2 h, 装液量为 195 mL, 95℃ 水浴灭菌时间为 2.5 h, 接种量为 10 mL, 在此条件下所制得的低度鲜黄酒感官评价可达 96.6 分, 感官评价高于此前历次优化。

关键词:鲜黄酒, Plackett-Burman 试验, 最陡爬坡试验, 响应面法优化, 瓶内发酵, 工艺优化

中图分类号: TS275.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)02-0278-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070247



本文网刊:

Optimization of Bottling Fermentation Process of Draft Huangjiu by Response Surface Methodology

GE Songtao^{1,2}, SHOU Quanhong^{1,2}, HAN Wenfeng^{1,2}, WANG Lan³, SHA Ruyi^{2,4,*}, WANG Zhenzhen^{2,4}, HU Puxin^{1,2}, MAO Jianwei^{1,2}

(1. Huangjiu College, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China;

2. Zhejiang Provincial Key Lab for Chem & Bio Processing Technology of Farm Product, Hangzhou 310023, China;

3. National Engineering Research Center of Huangjiu, Shaoxing 312000, China;

4. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to increase the sensory evaluation score of bottling fermentation draft Huangjiu indicated by the national judges and young students, six factors of the fermentation (initial brix, water bath sterilization time, liquid filling amount, fermentation temperature, fermentation time, inoculation amount) were analyzed by Plackett-Burman tests in which three significant factors were screened as initial brix, fermentation temperature and time. Then the reasonable range of factors was determined by the steepest ascent method, and optimized by central composite design response surface test. The model was significant and therefore provided a good fit to the actual data and predicted responses. The results showed that the optimal initial brix, fermentation time, temperature, filling volume, 95 ℃ water bath and inoculum volume were 126 g/L, 20.5 ℃, 69.2 h, 195 mL, 2.5 h, 10 mL, respectively. Under the optimal conditions, the sensory evaluation score of bottling fermentation draft Huangjiu reached 96.6, which was better than that before tests.

收稿日期: 2022-07-22

基金项目: 2021 年浙江省教育厅一般科研项目 (Y202146443); 2020 年绍兴科技项目 (2020B32001)。

作者简介: 葛松涛 (1985-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 微生物发酵调控与黄酒新产品开发, E-mail: 1141253095@qq.com。

* 通信作者: 沙如意 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 生物发酵、食品生物技术, E-mail: kevinsha-0204@163.com。

Key words: draft Huangjiu; Plackett-Burman; the steepest ascent method; response surface method; bottling fermentation; optimization of technics

黄酒是世界三大发酵酒之一,是我国所独有的,以稻米、黍米、小米等为主要原料,经加麦曲等糖化发酵剂酿制而成的发酵酒^[1]。由于黄酒的原辅料和采用独特多菌种协同的双边发酵工艺,因此黄酒含有丰富的功能性成分,如多酚、多糖、多肽、 γ -氨基丁酸等,使黄酒具有一定的调节肠道菌群、降血压等保健功效^[2]。黄酒独特的原料和生产工艺,通过发酵过程中的微生物代谢、陈化储存过程的生化反应^[3],赋予黄酒酸、甜、苦、鲜、涩的口感^[4],丰富且复杂的风味^[5-6]。口感与风味对黄酒的质量和风格起到重要的作用,也是影响消费者偏好的重要因素^[1]。复杂的风味导致黄酒地域消费特征显著,主要市场向江浙沪集中,年龄向中老年集中^[7]。

通过引导消费的方式实现消费区域与年龄突破不现实^[7],因此,开发适合现代青年生活习惯及口感的黄酒成为首选方案。目前,黄酒的研究主要集中在原料的选择、酒曲微生物种类、功能性成分及黄酒风味等^[8-10]。而传统黄酒发酵结束后需经过澄清、灭菌等工序使其达到稳定,目前主流的灭菌工艺采用加热灭菌^[11],加热灭菌则会造成黄酒风味的损失,尤其使涩味的感官属性突出^[1]。鲜黄酒发酵后不经高温灭菌^[12],因此鲜酒较热法杀菌酒口感更新鲜^[13]。朱一松等^[14]通过超滤膜截留黄酒中的大分子物质,得到纯生黄酒,颜色变浅香味淡爽。胡普信^[12]采用先糖化后发酵,再经无菌过滤的工艺,生产得到较为爽口的纯生黄酒。但膜过滤法生产纯生黄酒,导致黄酒中蛋白质和氨基酸的含量下降,且对膜的要求较高,导致黄酒生产成本的上升。

瓶内发酵鲜黄酒是通过原料灭菌装瓶后,接入酵母发酵,发酵结束后不经灭菌直接进入消费终端,既能减少灭菌能耗又能保证产品的质量。由于发酵后的成品未被加热,成品呈多种复合香味且较为爽口^[12];同时发酵是在完全密闭的环境中进行,因此产生的二氧化碳会被溶解到黄酒中,赋予低度黄酒独特的风味^[15]。本研究通过调整配方、发酵时间和温度,在前期单因素实验的基础上,通过 Plackett-Burman 试验,最陡爬坡试验,中心组合试验(Central Composite Design, CCD)的方法优化低度鲜黄酒发酵工艺。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

糯米 市售;黄酒高活性干酵母 安琪酵母股

份有限公司;葡萄糖 国药集团化学试剂有限公司; α -淀粉酶(酶活 2000 U) 无锡杰能科酶制剂公司;糖化酶(酶活 50000 U) 张家港金源生物化工有限公司;矿泉水 华润怡宝饮料有限公司。

电子天平 瑞士 Mettler Toledo 公司;HH-4 数显恒温水浴锅 江苏金坛荣华仪器制造公司;BSP-250 生化培养箱 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 糖液制备与灭菌 按照吴殿辉^[16]的方法制备初始发酵糖液,稀释至试验所需糖度装瓶后 95 ℃ 水浴灭菌^[12,16],备用。

1.2.2 鲜黄酒发酵与耐压计算

1.2.2.1 鲜黄酒发酵工艺 称取 0.2% 安琪干酵母按参考文献 [17] 方法 35 ℃ 下活化,产生大量气泡后备用。按方法 1.2.1 制备的初始发酵糖液中接入已活化安琪酵母液,置于生化培养箱中按一定温度恒温培养,达到一定发酵时间后 4 ℃ 保存备用。

1.2.2.2 鲜黄酒耐压计算 按照参考文献 [12] 的方法测量初始糖度和发酵终了结束糖度。按照参考文献 [18] 的方法计算瓶内压力,酿造中 CO₂ 计算可简化为:

$$G = \frac{(\text{初始糖度} - \text{结束糖度}) \times 0.98 \times \text{酒液体积} \times 0.9565}{2.0655}$$

式中: G: 发酵液中 CO₂ 产生总量, %。

1.2.3 发酵工艺响应面试验

1.2.3.1 Plackett-Burman 设计筛选 采用 Plackett-Burman 设计法和 Design-expert 软件创建试验次数 N=12 的试验,对初始糖度(A, g/L)、装液量(C, mL)、水浴灭菌的时间(D, h)、接种量(F, mL)、发酵温度(G, ℃)、发酵时间(J, h), 6 个因素进行考察,另设 5 个虚拟因素(B、E、H、I、K)以考察试验误差^[19],如表 1 所示,以感官评价分为响应值考察各因素对口感影响的显著性^[20]。

1.2.3.2 最陡爬坡试验 析因实验的初步估计常常远离实际最优点,需要以响应值变化的梯度方向为爬坡方向设计爬坡试验,根据各显著因素效应值的大小确定变化步长,以期快速、经济地逼近最大响应区域。根据 Plackett-Burman 试验结果,设计最陡爬坡试验^[21]。

表 1 Plackett-Burman 设计因子水平及编码值
Table 1 Factors and levels of Plackett-Burman design

编码水平	A初始糖度(g/L)	C装液量(mL)	D水浴灭菌时间(h)	F接种量(mL)	G发酵温度(℃)	J发酵时间(h)	虚拟变量
低(-1)	100	180	2	10	20	72	(B, E, H, I, K)
高(+1)	130	210	3	15	26	120	

1.2.3.3 响应面试验 利用 Design-expert 软件在最陡爬坡试验的基础上进行 3 因素 3 水平的中心组合设计试验^[22-24], 如表 2 所示, 以得到最佳的发酵条件, 提高感官评价分数。

表 2 中心组合试验中变量及其水平
Table 2 Factors and levels of central composite design

因素	编码水平				
	-1.682	-1	0	1	1.682
A 糖度(g/L)	104.8	115	130	145	155.2
B 发酵温度(℃)	14.95	17	20	23	25.05
C 发酵时间(h)	31.64	48	72	96	112.36

1.2.4 鲜黄酒感官评价

1.2.4.1 感官品评人员 品评人员分为两组选拔后统一培训^[25-26]。一组由国家级黄酒评酒委员组成, 作为专家品评小组, 共 4 人, 其中男性 3 人, 女性 1 人; 另一组由 19~22 岁的浙江工业职业技术学院黄酒分院的青年学生组成, 作为鲜黄酒潜在的消费者, 共 9 人, 其中男性 3 人, 女性 6 人。

1.2.4.2 评价方法 品评共 3 轮重复, 样品随机组合; 分别将样品分轮次提供给品评员进行味觉和嗅觉的感官描述分析; 每轮品评之间间隔时间 15 min, 提供纯净水给品评员漱口; 品评员记录样品的味道和气味感官性质, 并根据表 3 进行评分^[26-28]。去掉一个最高分, 去掉一个最低分后取算术平均值作为最终得分。

表 3 成品黄酒评分标准(分)
Table 3 Sensory evaluation (scores)

项目	标准	最高分	扣分
色泽	橙黄、橙红或本类酒具有的色泽, 透明、有光泽	10	0
	色泽略差		1~2
	微浑、透明但光泽差		3~6
香气	浑浊、失光、缺乏黄酒应有的光泽		7~10
	有特有的香气, 醇香浓郁	25	0
	有应有的香气, 有醇香, 但不浓郁		1~3
	有应有的香气, 但醇香不明显		4~10
	缺乏应有的香气, 微有异味		11~25
口感	鲜美、醇香、柔和、爽口	50	0
	鲜美、醇和、爽口, 但不够柔和		1~5
	鲜美, 尚爽口, 酒味较淡薄		6~15
	酒体淡薄, 略带涩, 有熟味		16~25
	酒体味道淡薄, 苦涩, 爆辣		26~35
风格	淡而无味, 苦涩, 有醋感		35~40
	有酸败、异杂味		41~50
	具有本类酒特有的风格, 酒体成分协调	15	0
	具有本类酒的风格, 成分较为协调		1~3
	酒体成分尚协调, 但风味不明显		4~10
	酒体成分不协调, 有明显异味		11~15

1.3 数据处理

每位品评人员每组数据重复测定 2 次, 去掉每组评分最高分和最低分后取平均值; 采用 Design-

Expert.V 8.0.6 统计软件进行实验设计和数据分析统计, 响应面图采用 Design-Expert.V 8.0.6 导出。

2 结果与分析

2.1 瓶内发酵耐压安全性计算

将根据 Plackett-Burman 试验设计和爬坡试验设计发酵得到的低度鲜酒按照方法 1.2.2.2 检测糖度。

表 4 Plackett-Burman 试验鲜酒糖度
Table 4 The brix of Plackett-Burman design

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
初始(g/L)	130	130	100	100	100	130	100	100	130	130	130	100
结束(g/L)	83	71	67	88	57	51	74	67	58	53	64	48

表 5 最陡爬坡试验鲜酒糖度
Table 5 The brix of the steepest ascent method

实验号	1	2	3	4
初始(g/L)	115	130	145	160
结束(g/L)	46	64	73	84

如表 4、表 5 所示, 本试验中所采取的初始糖度最高为 160 g/L, 在实际操作中检测得到发酵结束糖度不低于 40 g/L, 根据实验方法 1.2.2.2 计算可得 CO₂ 含量<0.58%, 而成品啤酒按国家标准 CO₂ 含量在 0.40%~0.65% 之间, 因此本项目所产生的 CO₂ 含量符合耐压安全标准。

2.2 Plackett-Burman 设计筛选结果

根据前期单因素实验基础, 选用试验次数 N=12 的试验设计, 以感官评价为响应值。实验设计及结果如表 6 所示。

表 6 Plackett-Burman 试验设计与结果
Table 6 Design and results of Plackett-Burman test

实验号	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	感官评价R1(分)
1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	78.7
2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	66.3
3	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	68.2
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	70.2
5	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	49.7
6	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	66.3
7	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	79.7
8	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	63.0
9	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	74.2
10	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	75.2
11	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	65.3
12	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	30.5

对试验数据进行方差分析, Plackett-Burman 试验结果采用 Lenth 法识别显著效应^[22], 得到了因素标准化效应的半正态概率效应图(图 1)以及因素标准化效应的帕累托图(图 2)。由图 1 可看出, 因素 G、J、A 的标准化效应点离拟合线较远, 位于图右侧, 故其为显著影响因素($P<0.05$), 即影响感官评价的显著因素是发酵温度、发酵时间、初始糖度、接种量, 各因素对感官评价影响程度的大小顺序为: 发酵温度>发酵时间>初始糖度>接种量。装液量和灭菌时间

标准化效应点均较小,说明影响不显著。标准化效应的帕累托图(图 2)进一步确定了效应的量值和重要性,因素 G、J、A、F 均超过了 t 值,为显著因子。

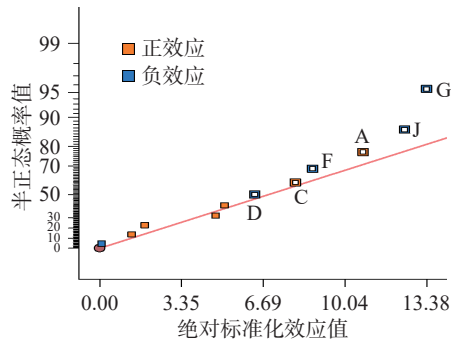


图 1 鲜黄酒感官评价半正态概率效应图($\alpha=0.05$)
Fig.1 Half-Normal plot of estimated main effects on sensory scores ($\alpha=0.05$)

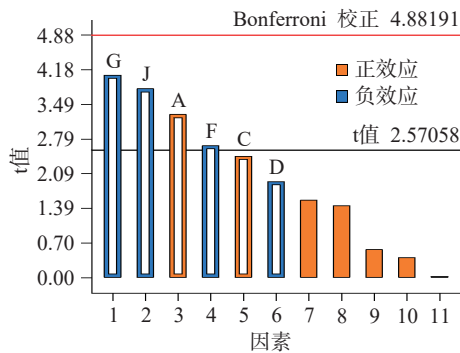


图 2 鲜黄酒感官评价的标准效应帕累托图($\alpha=0.05$)
Fig.2 Pareto chart of estimated main effects on sensory scores ($\alpha=0.05$)

由表 7 可知,模型的 P 值为 $0.0122 < 0.05$ 表明显著,故该模型可靠,即该模型在被研究的整个回归区域拟合很好;决定系数 $R^2=0.9214$,说明相关性较好;校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.8270$ 表明,82.7%的试验数据的变异性可用此回归模型来解释;通常情况下变异系数(CV)越低,实验的可信度和精确度越高,CV 值等于 8.67%,表示 PB 实验的可信度和精确度

表 7 Plackett-Burman 试验因素、水平及显著性分析

Table 7 Factors, levels and significance analysis of Plackett-Burman test

来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	6	1895.39	315.90	9.77	0.0122	显著
A-初始糖度(g/L)	1	348.84	348.84	10.79	0.0219	显著
C-装液量(mL)	1	192.80	192.80	5.96	0.0585	
D-灭菌时间(h)	1	120.97	120.97	3.74	0.1109	
F-接种量(mL)	1	227.94	227.94	7.05	0.0452	显著
G-发酵温度(℃)	1	537.34	537.34	16.61	0.0096	显著
J-发酵时间(h)	1	467.50	467.50	14.45	0.0126	显著
残差	5	161.72	32.34			
总和	11	2057.11				
R^2	0.9214			R^2_{Pred}	0.5472	
R^2_{Adj}	0.8270			Adeq Precisor	9.807	

较好;精密度是有效信号与噪声的比值(Adeq Precisor),大于 4.0 视为合理^[22],本试验精密度达 9.807。

通过对数据进行多元回归拟合,得到回归方程:
 $Y=65.61+5.39A+4.01C-3.17D-4.36F-6.69G-6.24J$ 。

2.3 最陡爬坡实验

由回归方程可知,因素 A 偏回归系数为 5.39,表明因素 A 对感官评价分数的影响为正效应,即随着 A 因素的增加,感官评分呈上升趋势,应增加。同时由回归方程 1 可见,F、G、J 因素为负效应,即对响应值的影响为负效应,应减小。但响应面试验时考察因素超过 3 个会使试验次数显著增加(3 个因素为 20 次处理,4 个因素为 31 次处理)。同时,因素 F 即接种量的效应在这 4 个因素中最小,因此舍弃对该因素的进一步优化^[29]。由于最显著的因素是 G,因此以 G 为爬坡单位。

A 步长 = $\frac{5.39 \times (130 - 100)}{6.69 \times 2} = 12$ (根据实际情况 A 步长取为 15 g/L)

G 步长 = $\frac{26 - 20}{2} = 3$ (后续试验 G 步长取 3 ℃)

J 步长 = $\frac{6.24 \times (120 - 72)}{6.69 \times 2} = 22.4$ (根据实际情况 J 步长取为 24 h)

爬坡实验从中心点开始出发^[30],一般而言减少接种量可降低成本,因此取低水平接种量 10 mL。综合考虑成品酒的气泡含量、灭菌效果与成本等因素,装液量固定取 195 mL,灭菌时间固定取 2.5 h。设计及结果如表 8 所示。

表 8 最陡爬坡实验设计及其结果
Table 8 The steepest ascent method results

处理	步长	糖度(g/L)	发酵温度(℃)	发酵时间(h)	感官评分(分)
1	0	115	23	96	75.3
2	0+1△	130	20	72	87.8
3	0+2△	145	17	48	83.7
4	0+3△	160	14	24	80.3

由表 8 可知,处理 2 的感官分数最高,因此以处理 2 为响应面试验的中心点。

2.4 CCD 结果与响应面分析

根据最陡爬坡试验,以处理 2 为中心点实行 CCD 试验^[31],以感官分数为响应值。因为有 3 个自变量,为使拟合响应方程具有旋转性和通用性,选择中心点实验数为 6,星号臂长 $\gamma=1.682$ 。实验方案及结果见表 9。

通过对数据进行二次多元回归拟合,得到二次多项式方程: $Y=95.67-2.25A+2.06B-2.62C-1.62AB-2.62AC-0.12BC-3.62A^2-6.80B^2-7.33C^2$ 。

响应面分析中对试验结果进行拟合的二次模型方差分析见表 10。 F 值为 768.85, $R^2=0.9986$, $R^2_{Adj}=0.9973$,说明模型对实际情况拟合较好; P 值为 <0.0001 ,表明该模型高度显著,可用来进行响应值预测。

利用回归模型对各发酵条件下鲜黄酒感官评价

表 9 中心组合试验设计结果

Table 9 Results of central composite design

实验号	A	B	C	Y: 感官评分(分)
1	0	0	0	96.2
2	0	-1.682	0	75.8
3	0	0	1.682	72.4
4	-1	-1	-1	78.5
5	-1.682	0	0	89.2
6	0	0	0	95.4
7	+1	-1	+1	71.8
8	1.682	0	0	81.4
9	+1	+1	-1	81.6
10	0	0	-1.682	80.7
11	0	0	0	96.3
12	0	1.682	0	81.7
13	+1	-1	-1	80.2
14	0	0	0	96.1
15	-1	+1	-1	83.7
16	+1	+1	+1	72.3
17	0	0	0	96.2
18	-1	-1	+1	77.8
19	-1	+1	+1	84.6
20	0	0	0	96.1

表 10 中心组合试验模型显著性分析

Table 10 The variance of central composite design

类型	自由度	平方和	均方	F值	P值	显著性
模型	9	1493.24	165.92	768.85	<0.0001	**
A	1	74.13	74.13	343.52	<0.0001	**
B	1	41.56	41.56	192.57	<0.0001	**
C	1	72.47	72.47	335.81	<0.0001	**
AB	1	12.75	12.75	59.09	<0.0001	**
AC	1	40.05	40.05	185.6	<0.0001	**
BC	1	0.061	0.061	0.28	0.6058	不显著
A ²	1	218.14	218.14	1010.86	<0.0001	**
B ²	1	555.11	555.11	2572.37	<0.0001	**
C ²	1	702.97	702.97	3257.54	<0.0001	**
残差	10	2.16	0.22			
失拟	5	1.62	0.32	3.03	0.1243	不显著
C.V. (%)	0.55	R ²	0.9986	Adj R ²	0.9973	

进行预测^[32], 为便于观察模型预测结果, 将模型预测值与实验值相关图绘于图 3, 图中可以发现样本点都处于 45° 对角线附近, 说明模型对各发酵条件下低度鲜黄酒预测值与实验值高度相关, 两者差别较小。模型预测误差分布图见图 4, 通常对于一个优良模型

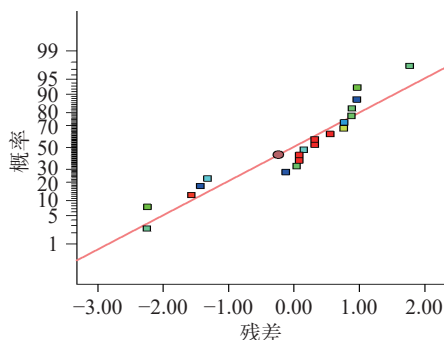


图 3 模型预测值与实验值相关图

Fig.3 Normal plot of residuals on sensory score

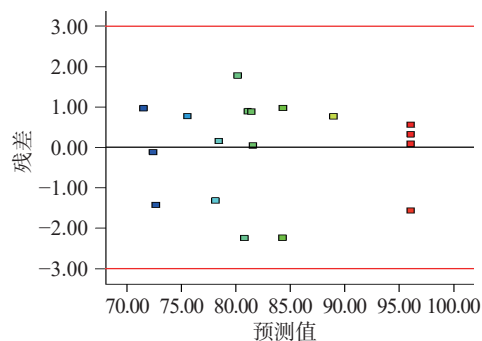


图 4 残差对模型预测散布图

Fig.4 Residuals versus predicted values on sensory score

要求大部分样本的预测误差不得超过 $\pm 2SD$ 。图 4 中可以看到全部样本点都落在模型的 $\pm 2SD$ 范围内, 没有异常点, 说明模型预测准确性高, 可以用于对低度鲜酒的发酵工艺进行分析^[33]。

依据回归方程, 利用 Design-expert 绘出响应面分析图, 结果见图 5、图 6、图 7。通过响应面 3D 图可以明显看到所做试验的范围包括最大值所在区域。

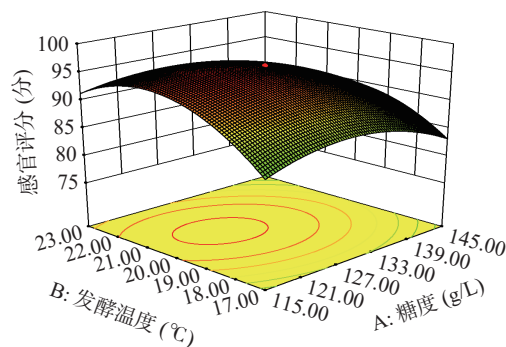


图 5 糖度和发酵温度交互作用对感官评价的影响

Fig.5 Effects of interactions between brix and fermentation temperature on sensory score

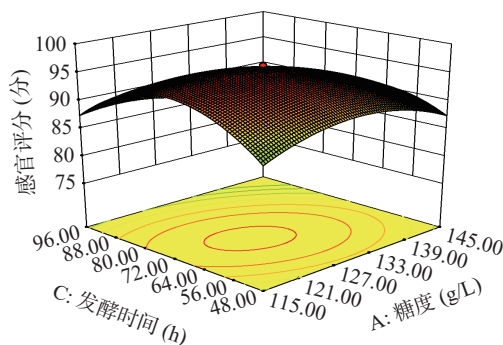


图 6 糖度和发酵时间交互作用对感官评价的影响

Fig.6 Effects of interactions between brix and fermentation time on sensory score

利用 Design-expert 对模型进行分析预测^[22], 得到糖度为 126 g/L, 发酵温度为 20.5 °C, 发酵时间为 69.2 h, 此时的响应值最大且值为 96.7 分。

2.5 验证性试验

在优化条件下进行验证试验, 感官分析的数据为 96.6 分, 试验值与理论预测值非常接近, 可见该模型可以较好的预测实际的发酵情况, 从而也证明响应

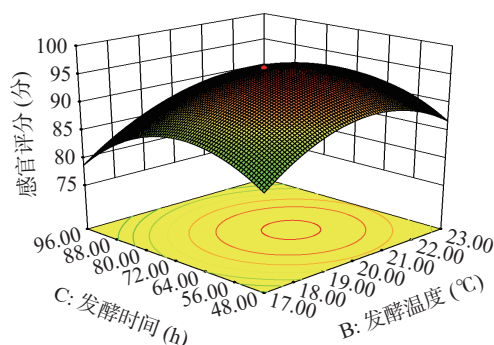


图 7 发酵时间和发酵温度交互作用对感官评价的影响

Fig.7 Effects of interactions between fermentation time and temperature on sensory score

面优化低度鲜黄酒发酵工艺的可行性。

3 结论

研究结果表明,利用 Design-expert 软件进行 Plackett-Burman 设计、最陡爬坡法与响应面相结合的试验设计方法能快速、有效地从众多影响低度鲜黄酒因素中筛选关键因素,并优化发酵工艺。经上述方法优化后,低度鲜黄酒的最佳发酵工艺为:糖度为 126 g/L,发酵温度为 20.5 °C,发酵时间为 69.2 h,装液量为 195 mL,灭菌时间为 2.5 h,接种量为 10 mL,此时低度鲜黄酒的感官评价分数最高。鲜酒与发酵后灭菌得到的样品相比较,具有复合果香、无苦涩味且明显更为爽口,因此响应面法能较好地对低度鲜黄酒的发酵条件进行优化,试验可为行业低度鲜黄酒的开发提供数据参考。

参考文献

[1] 李冬琴,杨萌,文笑雨,等.黄酒的挥发性风味成分研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(2):202-207. [LI D Q, YANG M, WEN X Y, et al. Research progress on volatile flavor components of huangjiu[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2): 202-207.]

[2] 胡超凡,阮晖,金建江,等.黄酒健康功效及相关生物活性物质研究进展[J].中国酿造,2021,40(7):7-11. [HU C F, RUAN H, JIN J J, et al. Research progress on healthy efficacy and related bioactive substances of Huangjiu[J]. China Brewing, 2021, 40(7): 7-11.]

[3] WANG J, YUAN C J, GAO X L, et al. Characterization of key aroma compounds in Huangjiu from northern China by sensory-directed flavor analysis[J]. Food Research International, 2020, 134: 109238:1-14.

[4] LIU S P, CHEN Q, ZOU H, et al. A metagenomic analysis of the relationship between microorganisms and flavor development in Shaoxing mechanized huangjiu fermentation mashes[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 303: 9-18.

[5] CHEN G M, HUANG Z R, WU L, et al. Microbial diversity and flavor of Chinese rice wine (Huangjiu): An overview of current research and future prospects[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 42: 37-50.

[6] WANG J, ZHANG B, WU Q, et al. Sensomics-assisted flavor decoding of coarse cereal Huangjiu[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 1

32296.

[7] 谢广发,许锡飏,陈伟峰,等.绍兴黄酒产业发展策略思考[J].中国酿造,2021,40(4):207-210. [XIE G F, XU X B, CHEN W F, et al. Considerations on the development strategies of Shaoxing Huangjiu industry[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 207-210.]

[8] 吴云霞,耿敬章,王志男,等.基于文献计量的黄酒研究现状分析[J].食品工业科技,2022,43(21):327-335. [WU Y X, GENG J Z, WANG Z N, et al. Analysis of domestic research status of Huangjiu based on literature measurement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 327-335.]

[9] YANG Y J, XIA Y J, HU W Y, et al. Soaking induced discrepancies in oenological properties, flavor profiles, microbial community and sensory characteristic of Huangjiu (Chinese rice wine)[J]. LWT Food Science and Technology, 2021, 139: 110575.

[10] YANG Y J, HU W Y, XIA Y J, et al. Flavor formation in Chinese rice wine (Huangjiu): Impacts of the flavor-active microorganisms, raw materials, and fermentation technology[J]. Sec. Food Microbiology, 2020, 11: 580247.

[11] 姬中伟,衡洋洋,周志磊,等.超高温瞬时杀菌对苏派黄酒风味物质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(10):16-21. [JI Z W, HENG Y Y, ZHOU Z L, et al. Effect of ultra-high temperature instantaneous sterilization on flavor substances in Supai Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 16-21.]

[12] 胡普信.纯生黄酒工艺的研究[J].食品与发酵工业,2010,36(8):93-96. [Hu P X. Research on draft Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(8): 93-96.]

[13] 朱晨昱.果味鲜啤酒的开发研究[D].杭州:浙江工业大学,2012. [ZHU C Y. Development of the fruit taste fresh beer[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.]

[14] 朱一松,赵光整,帅桂兰,等.纯生黄酒的酿造——超滤去酶技术的应用[J].食品与发酵工业,2003(11):46-50. [ZHU Y S, ZHAO G A, SHUAI G L, et al. Application of ultrafiltration enzyme removal technology in draft Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2003(11): 46-50.]

[15] 战雯丽,崔云前,曹静,等.二次发酵啤酒的研究概况[J].食品科技,2021,46(12):100-104. [ZHAN W L, CUI Y Q, CAO J, et al. Study on secondary fermentation beer[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(12): 100-104.]

[16] 吴殿辉.代谢工程改造黄酒酿造用酵母低产氨基甲酸乙酯的研究[D].无锡:江南大学,2016. [WU D H. Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* to reduce ethyl carbamate generation in Chinese rice wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]

[17] 姚立兵,邵红,张文.活性干酵母扩大培养的研究[J].酿酒,2002(5):47-48. [YAO L B, SHAO H, ZHANG W. Study on scale-up of bioactive dry yeast[J]. Liquor Making, 2002(5): 47-48.]

[18] 丰水平.啤酒厂二氧化碳回收与使用平衡技术的研究[J].中外酒业,2021(11):20-25. [Feng S P. Study on beer fermentation carbon dioxide recovery and reuse technology[J]. Global Alcinfo, 2021(11): 20-25.]

[19] EKPENYONG M G, ANTAI S P, ASITOK A D, et al. Plackett-Burman design and response surface optimization of medium

- trace nutrients for glycolipopeptide biosurfactant production[J]. *IBJ-Iranian Biomedical Journal*, 2017, 21(4): 249.
- [20] 张朝正, 李意, 赵华. 响应面法优化壳聚糖酶发酵培养基[J]. *中国酿造*, 2022, 41(1): 197-203. [ZHANG C Z, LI Y, ZHAO H. Optimization of chitosanase fermentation medium by response surface methodology[J]. *China Brewing*, 2022, 41(1): 197-203.]
- [21] 陈博文, 李贞蓉, 常明昌, 等. 香菇产 α -半乳糖苷酶的液体发酵工艺优化[J]. *食用菌学报*, 2018, 25(2): 79-89. [CHEN B W, LI Z R, CHANG M C, et al. Optimization of α -galactosidase production from *Lentinus edodes* by liquid fermentation processes[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2018, 25(2): 79-89.]
- [22] 张辉, 张娜娜, 马丽, 等. 响应面法优化大麦苗叶绿素提取工艺[J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 75-80. [ZHANG H, ZHANG N N, MA L, et al. Optimization of extraction process for chlorophyll from young barley grasses based on response surface methodology[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 75-80.]
- [23] SONG C N, ZHU L P, SHAO Y C, et al. Enhancement of GABA content in Hongqu wine by optimisation of fermentation conditions using response surface methodology[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2021, 39(4): 297-304.
- [24] KAZEMIAN M, GANDJALIKHAN N S, JAHANSHAH J. Comparative study of Box-Behnken and central composite designs to investigate the effective parameters of ammonia-water absorption refrigerant system[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(16): 3095-3108.
- [25] 蒋彰. 黍米黄酒关键风味物质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [JIANG Z. Study on the key aroma compounds of Millet wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [26] 刘明. 感官分析、风味化学与智能感官技术评价白酒香气的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [LIU M. Research on chinese liquors aroma by ensory analysis, flavor cheemistry and artificial intelligence sensory technology[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [27] 彭昌亚, 张建华, 帅桂兰, 等. 利用高温流化米酿制新型黄酒[J]. *酿酒*, 2002(2): 90-91. [PENG C Y, ZHANG J H, SHUAI G L, et al. Producing a new type rice wine with the rice fluidized in high temperature[J]. *Liquor Making*, 2002(2): 90-91.]
- [28] 朱一松. 超滤法纯生黄酒新工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2004. [ZHU Y S. Studies on the new technology of making draft rice wine by ultrafiltration[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2004.]
- [29] 郝学财, 余晓斌, 刘志钰, 等. 响应面方法在优化微生物培养基中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2006(1): 38-41. [HAO X C, YU X B, LIU Z Y, et al. The application of response surface methodology in optimization of microbial media[J]. *Food Research and Development*, 2006(1): 38-41.]
- [30] 罗玲, 蔡俊, 王常高, 等. 响应面法优化异硫链霉菌LMZM利用玉米芯粉产木聚糖酶发酵培养基的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(23): 266-271. [LUO L, CAI J, WANG C G, et al. Study on optimization of culture medium for xylanase production by *Streptomyces althoticus* LMZM using response surface methodology with corn cob[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(23): 266-271.]
- [31] BHAGAT A, ADHIKARI N B. Optimization of QoS key parameters in LTE network by using central composite design (CCD)[J]. *Research Journal of Engineering Sciences*, 2021, 10(1): 1-11.
- [32] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34(8): 41-45. [LI L, ZHANG S, HE Q, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2015, 34(8): 41-45.]
- [33] 彭传友, 廖立敏. 中心组合设计优化超声波提取枇杷叶多糖研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(12): 9-15. [PENG C Y, LIAO L M. Study on optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from loquat leaf by center combination design[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(12): 9-15.]