

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250319006

引用格式: 王彦花, 韩亚飞, 李昭霏. 熵权逼近理想解排序法结合响应面设计优选松花粉米酒发酵工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 35-42.

WANG YH, HAN YF, LI ZF. Optimization of the fermentation process of pine pollen rice wine based on entropy weight technique for order preference by similarity to an ideal solution method and response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 35-42. (in Chinese with English abstract).

熵权逼近理想解排序法结合响应面设计优选 松花粉米酒发酵工艺

王彦花^{1,2*}, 韩亚飞¹, 李昭霏¹

(1. 郑州科技学院食品科学与工程学院, 郑州 450064; 2. 郑州市食品安全快速检测重点实验室, 郑州 450064)

摘要: **目的** 利用 Box-Behnken 响应面设计法结合熵权逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法优选松花粉米酒发酵工艺。**方法** 以松花粉和糯米为主要原料, 以感官评分、酒精度和抗氧化性为评价指标, 在单因素试验的基础上, 以松花粉添加量、酒曲添加量、发酵时间为考察因素, 依据 Box-Behnken 中心组合试验原理, 设计 3 因素 3 水平响应面试验, 结合熵权 TOPSIS 法优选松花粉米酒发酵工艺。**结果** 松花粉米酒的最佳发酵工艺为松花粉添加量 8%、酒曲添加量 0.8%、发酵时间 72 h。在此条件下, 松花粉米酒质地均一、口感柔和、呈现浅棕黄色。经过 3 批工艺验证试验测得米酒的感官评分为 89.5 分, 酒精度为 17.2%vol, 1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除率为 87.43%。**结论** 熵权 TOPSIS 法结合响应面设计优选松花粉米酒发酵工艺方法稳定, 预测性较好, 为生产高质量的松花粉米酒奠定了理论基础。

关键词: 松花粉; 米酒; 发酵工艺; Box-Behnken 响应面设计法; 熵权逼近理想解排序法; 自由基清除率

Optimization of the fermentation process of pine pollen rice wine based on entropy weight technique for order preference by similarity to an ideal solution method and response surface methodology

WANG Yan-Hua^{1,2*}, HAN Ya-Fei¹, LI Zhao-Fei¹

(1. College of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China; 2. Zhengzhou City Food Safety Rapid Test Key Laboratory, Zhengzhou 450064, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the fermentation process of pine pollen rice wine by Box-Behnken response surface design and entropy weight technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method.

Methods With pine pollen and glutinous rice as the main raw materials, sensory score, alcohol content and antioxidant capacity as evaluation indexes, a 3-factor and 3-level response surface test was designed based on the single factor test, and the addition of pine pollen, koji and fermentation time as investigation factors, according to the

收稿日期: 2025-03-19

第一作者/*通信作者: 王彦花(1985—), 女, 讲师, 主要研究方向为食品安全检测与控制技术研究。E-mail: 422359049@qq.com

Box-Behnken central combination test principle. The fermentation process of pine pollen rice wine was optimized by entropy weight TOPSIS method. **Results** The optimum fermentation process of pine pollen rice wine addition was 8%, koji addition 0.8% and fermentation time 72 h. Under these conditions, the texture of pine pollen rice wine was uniform, the taste was soft, and the color was light brown and yellow. After 3 batches of process verification experiments, the sensory score of rice wine was 89.5 points, the alcohol content was 17.2%vol, and the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical clearance rate was 87.43%. **Conclusion** The method of entropy weight TOPSIS combined with response surface design to optimize the fermentation process of pine pollen rice wine is stable and predictable, which lays a theoretical foundation for the production of high quality pine pollen rice wine.

KEY WORDS: pine pollen; rice wine; fermentation process; Box-Behnken response surface methodology; entropy weight technique for order preference by similarity to an ideal solution method; free radical clearance rate

0 引言

松花粉是传统的食药同源材料,被称为“天然微量营养库”^[1],不仅富含蛋白质、氨基酸、维生素、矿物质等营养成分,还含有多糖、多酚、黄酮等多种活性成分^[2-3]。松花粉及其提取物已被证明具有良好的抗氧化活性,并具有抗炎活性、免疫调节活性、抗肿瘤等多种健康益处^[4-8]。我国松树种植面积广,松花粉在我国食药兼用的历史有千年之久。近年来,松花粉因其资源丰富、成分稳定、功能性强、营养价值高等优点,日益被食品和医药行业关注。但是目前国内松花粉产品种类较少,除去部分松花粉饮料^[9]、功能性酒^[10]、醋^[11]等复合产品,市场中销售的仍是以松花粉原粉为主的制剂及保健品^[12-13]。

米酒作为中国的传统风味饮品,集风味、保健、美容为一体,具有和血、行气、壮筋骨、祛风除湿等诸多保健功能^[14]。除直接饮用外,米酒还可与其他中药材、果蔬相辅来提升营养和保健价值^[15]。以松花粉为原料发酵米酒,可推动松花粉的深加工利用,助力我国食药两用植物资源的高效利用,也符合我国酒类消费从粮食类酒向营养型酒转变的趋势。

熵权逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法是一种基于多目标决策和多属性评价的客观赋权法,其基本原理是通过检测评价对象与最优解、最劣解的距离来进行排序,进而根据备选方案与最优解的相对接近程度的大小来评价备选方案的优劣^[16-17]。熵权TOPSIS法利用原始数据矩阵之间的关系来客观确定权重,不依赖人的主观判断,提高了评价结果的客观性和科学性,更能准确地反映数据本身的规律,具有处理复杂多量数据的分析优势^[18-19]。米酒品质多角度评价思路与熵权TOPSIS法的多属性决策思路相符。

本研究以松花粉米酒感官品质、酒精度及抗氧化活性为评价指标,结合熵权TOPSIS法,通过单因素试验及响应

面设计对松花粉米酒发酵工艺进行优选,以期对松花粉米酒的生产进行规范化的理论指导,助力松花粉资源的规模化、产业化利用。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

松花粉(吉林省坤元春贸易有限公司);酒曲(安琪酵母股份有限公司);糯米(市售,郑州市二七区马寨好又多超市)。

无水乙醇(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);2,2-联苯基-1-苦基胍基(上海麦克林生化科技股份有限公司)。

1.2 仪器与amp;设备

SN-DH-25A 电热恒温培养箱(上海尚普仪器设备有限公司);C22-RT22E01 电磁炉(浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司);UV-4802H 紫外可见分光光度计[尼科(上海)仪器有限公司];ZX-37 酒精测量计(上海京度电子科技有限公司);ES1200-4 百分之一电子天平(沈阳龙腾电子有限公司)。

1.3 发酵工艺流程及amp;操作要点

1.3.1 工艺流程

糯米筛选→清洗浸泡→蒸煮冷却→加松花粉、无菌水→拌曲→发酵→过滤取汁→灭菌→松花粉米酒。

1.3.2 操作要点

清洗浸泡:选取优质糯米,去除杂质,清洗3次后浸泡3 h。

蒸米:将浸泡好的糯米使用蒸锅常压蒸40 min。

拌曲、发酵:在原料米中加入松花粉和酒曲,混合均匀后压屏表白,然后在中间戳一个直径约1 cm的洞,盖上盖子密封,放入30℃恒温培养箱中发酵^[20]。

灭菌:发酵结束后,在60℃条件下灭菌20 min。

1.4 发酵工艺优化

1.4.1 单因素试验设计

以松花粉添加量6%,酒曲添加量1.0%,发酵时间72 h,

料液比 1:1 (g:mL, 下同)为基础发酵条件, 以松花粉添加量 2%、4%、6%、8%、10%、酒曲添加量 0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4%, 发酵时间 24、48、72、96、120 h, 料液比 1:0.5、1:0.75、1:1、1:1.25、1:1.5 为变量进行单因素试验, 考察各因素对松花粉米酒品质的影响。

1.4.2 响应面设计

在单因素试验的基础上, 依据 Box-Benhnken 中心组合试验原理设计各因素和水平^[21], 以松花粉添加量(A)、酒曲添加量(B)、发酵时间(C)为变量, 设计 3 因素 3 水平响应面试验, 试验因素与水平见表 1。

表 1 响应面试验设计因素与水平
Table 1 Factors and levels of response surface test design

水平	A/%	B/%	C/h
-1	6	0.6	48
0	8	0.8	72
1	10	1.0	96

1.4.3 熵权 TOPSIS 模型构建

(1)建立初始决策矩阵

按照文献[22]的熵权 TOPSIS 分析步骤, 以公式(1)建立初始决策矩阵。

$$V = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: V 为初始决策矩阵; X_{ij} 为各样本(1, 2, 3, …, m) 在各指标(1, 2, 3, …, n)下的测量值。

(2)建立标准化决策矩阵

松花粉米酒各项指标存在量纲不一致的问题, 因此需要对原始数据进行归一化处理, 建立标准化决策矩阵。高优型指标按公式(2)进行归一化处理, 低优型指标按公式(3)进行归一化处理。

$$R_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, \dots, X_{mj})}{\left[\max(X_{1j}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) \right]} \quad (2)$$

$$R_{ij} = \left[\frac{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) - X_{ij}}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})} \right] \quad (3)$$

式中: R_{ij} 为 X_{ij} 的标准化值。

(3)各指标成分权重确定

熵值法计算指标权重可排除主观因素影响, 客观反映评价指标的重要性。熵值和权重按公式(4)、(5)计算。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m R_{ij} \ln R_{ij} \left(k = \frac{1}{\ln m}, \text{当 } R_{ij} = 0 \text{ 时, } R_{ij} \ln R_{ij} = 0 \right) \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \left(\sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \right) \quad (5)$$

式中: E_j 为第 j 项指标的熵值; ω_j 为第 j 项指标的权重。

(4)建立加权决策矩阵

将标准化决策矩阵同向化归一处理后的数据与各指标的 ω_j 相乘即得加权决策矩阵 Z , 按公式(6)计算。最优向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- , 按公式(7)、(8)计算。

$$Z_{ij} = R_{ij} \times \omega_j \quad (6)$$

$$Z_j^+ = \max(Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{mj}) \quad (7)$$

$$Z_j^- = \min(Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{mj}) \quad (8)$$

(5)贴近度的计算及评价

根据最优方案和最劣方案, 按公式(9)计算米酒样品与最优向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- 的距离 D 。按公式(10)计算每个评价对象与最优方案的接近程度 C_i , 并根据 C_i 对评价对象进行排序。 C_i 值越大表示该评价对象越接近最优水平, 值越小表示该评价对象越接近最劣水平。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (9)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

1.5 感官评价

参考田梦银等^[23]的方法, 选取 10 名食品专业学生, 基于米酒的色泽、香气、口味和风格 4 个维度进行评价, 评分标准见表 2。

表 2 松花粉米酒感官评分标准
Table 2 Sensory evaluation criteria of pine pollen rice wine

项目	指标	得分/分
色泽(10分)	色泽均匀、颜色呈棕黄色	9~10
	色泽均匀、颜色呈浅黄色	6~8
	色泽不均匀	<6
香气(30分)	有松香粉香味、各香味和谐纯正	26~30
	米酒香纯正、但不浓郁	20~25
口味(40分)	香气混杂、产生其他异味	<20
	口感醇厚、酸甜适中	31~40
风格(20分)	口感较淡、偏酸或偏甜	20~30
	酒味寡淡、整体不协调	<20
	具有发酵型米酒风格、酒体组分协调	16~20
	风格明显、酒体组分较协调	10~15
	风格不明显、酒体组分略协调	<10

1.6 酒精度及抗氧化指标测定

酒精度的测定参照 GB 5009.225—2023《食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定》的酒精计法。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除率的测定参考邓成林等^[24]的方法, 计算公式如公式(11)所示。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = (1 - \frac{A_{\text{样}}}{A_0}) \times 100\% \quad (11)$$

式中: $A_{\text{样}}$ 为 1 mL 样品+1 mL DPPH 乙醇溶液的吸光度; A_0 为加样品液的 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液的吸光度。

1.7 数据处理

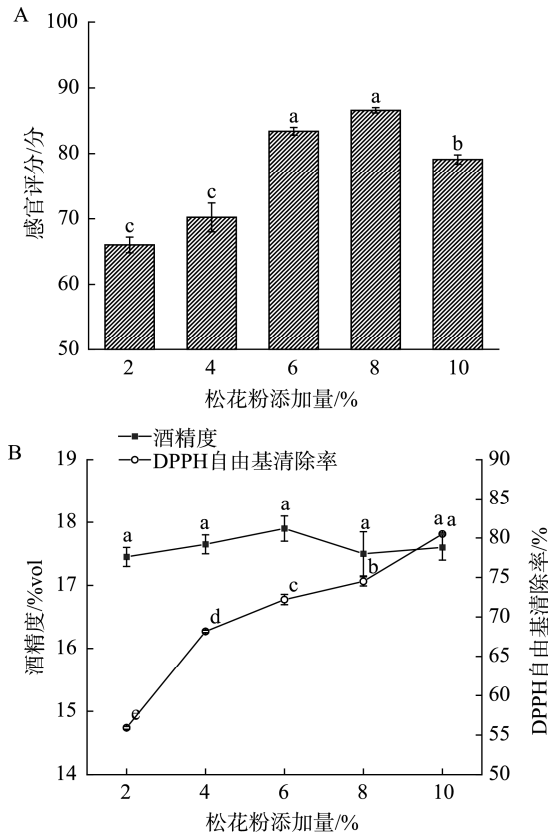
利用 Origin 2021 进行单因素绘图, 利用 Design-Expert 8.0.6 进行响应面试验设计, 利用 SPSS PRO 软件的熵权 TOPSIS 法进行试验数据分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 松花粉添加量对米酒品质的影响

松花粉添加量对米酒感官评分、酒精度和 DPPH 自由基清除率的影响见图 1。



注: 不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$), 下同。

图 1 松花粉添加量对米酒品质的影响
Fig.1 Effects of pine pollen addition on the quality of rice wine

由图 1 可知, 随着松花粉的添加量的增加, 米酒的感官评分呈先升高后下降的趋势($P < 0.05$), 当松花粉的添加量为 8% 时, 感官评分最高, 为 86.6 分。随着松花粉的添加量的增加, 米酒的酒精度无显著性变化($P > 0.05$), 而抗氧化性呈上升趋势($P < 0.05$)。松花粉经过发酵后还原糖类及氨基酸产生, 黄酮类活性物质增多, 其抗氧化性也随之增长^[25]。

以感官评分和 DPPH 自由基清除率为高优型指标, 以酒精度为低优型指标, 构建熵权 TOPSIS 模型, 并进行贴近度的计算, 最终确定不同松花粉添加量的米酒品质综合排序, 结果见表 3。

表 3 不同松花粉添加量的质量评价排序

松花粉添加量/%	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
2	0.840	0.543	0.393	5
4	0.624	0.427	0.406	4
6	0.582	0.648	0.527	3
8	0.147	0.900	0.860	1
10	0.294	0.772	0.724	2

由表 3 可知, 松花粉添加量 8% 时, 综合评分最好, 选用 6%、8%、10% 进一步优化。

2.1.2 酒曲添加量对米酒品质的影响

酒曲添加量对米酒感官评分、酒精度和 DPPH 自由基清除率的影响见图 2。

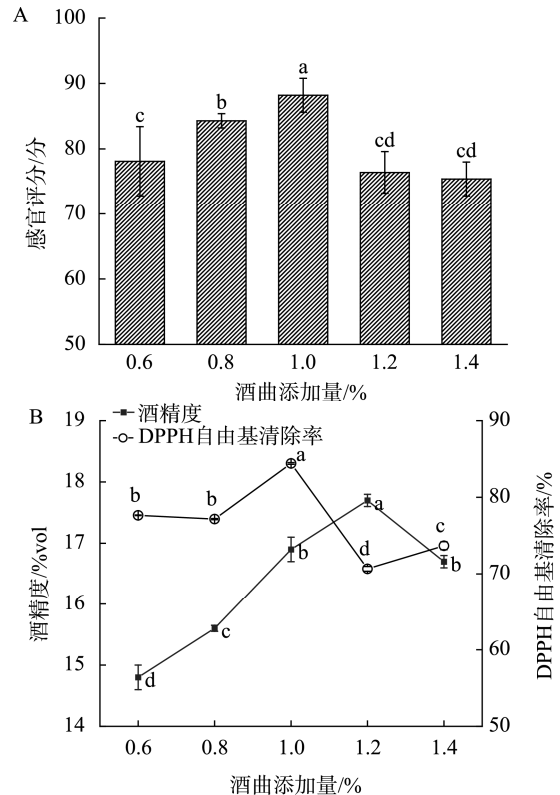


图 2 酒曲添加量对米酒品质的影响
Fig.2 Effects of koji addition on the quality of rice wine

由图 2 可知, 随着酒曲添加量的增加, 米酒的感官评分、酒精度及 DPPH 自由基清除率均呈先上升后下降的趋势($P<0.05$), 当酒曲添加量为 1.0% 时, 感官评分最高, 为 88.2 分; DPPH 自由基清除率最高, 为 84.4%。当酒曲添加量为 1.2% 时, 酒精度最高, 为 17.7%vol。酒曲通过不断地将糖分转化为酒精和二氧化碳来影响酒精度, 酒曲接种量的多少决定着酒曲的生长速率、发酵速率和呼吸产能等变量的大小^[26]。酒曲添加量对米酒的抗氧化性有显著影响, 当酒曲添加量较少时, 糖化速度慢, 酵母生长受限, 抗氧化性较低; 当酒曲添加量过多时, 发酵剧烈, 产生大量二氧化碳和热量, 副产物增多, 抗氧化性反而降低^[27-28]。

以感官评分和 DPPH 自由基清除率为高优型指标, 以酒精度为低优型指标, 构建熵权 TOPSIS 模型, 并进行贴近度的计算, 最终确定不同酒曲添加量的米酒品质综合排序, 结果见表 4。

表 4 不同酒曲添加量的质量评价排序

酒曲添加量/%	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
0.6	0.581	0.614	0.514	3
0.8	0.376	0.649	0.633	2
1.0	0.386	0.859	0.690	1
1.2	0.967	0.051	0.050	5
1.4	0.852	0.218	0.203	4

由表 4 可知, 酒曲添加量 1.0% 时, 综合评分最好, 选用 0.6%、0.8%、1.0% 进一步优化。

2.1.3 发酵时间对米酒品质的影响

发酵时间对米酒感官评分、酒精度和 DPPH 自由基清除率的影响见图 3。

由图 3 可知, 随着发酵时间的增加, 米酒的感官评分及酒精度均呈先上升后下降的趋势($P<0.05$), 当发酵时间为 48 h 时, 感官评分最高, 为 86.6 分; 酒精度最高, 为 18.15%vol。随着发酵时间的增加, 米酒的抗氧化性呈上升趋势($P<0.05$)。在发酵过程中, 松花粉中的抗氧化成分(如酚类、黄酮类等)得到释放和转化, 或者发酵过程中产生了新的多酚等抗氧化物质^[29]。

以感官评分和 DPPH 自由基清除率为高优型指标, 以酒精度为低优型指标, 构建熵权 TOPSIS 模型, 并进行贴近度的计算, 最终确定不同发酵时间的米酒品质综合排序, 结果见表 5。

由表 5 可知, 发酵时间 72 h 时, 综合评分最好, 选用 48、72、96 h 进一步优化。

2.1.4 料液比对米酒品质的影响

料液比对米酒感官评分、酒精度和 DPPH 自由基清除率的影响见图 4。

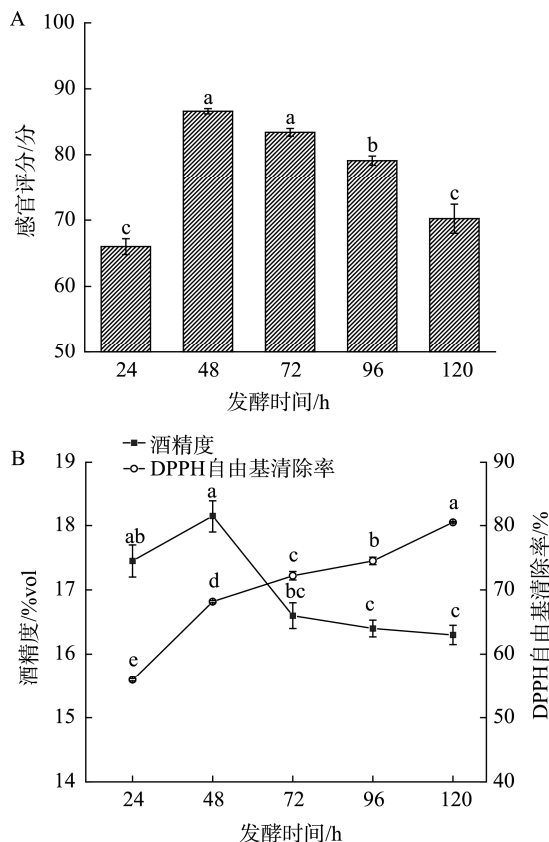


图 3 发酵时间对米酒品质的影响

Fig.3 Effects of fermentation time on the quality of rice wine

表 5 不同发酵时间的质量评价排序

Table 5 Quality evaluation ranking of different fermentation time

发酵时间/h	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
24	0.897	0.214	0.192	5
48	0.626	0.680	0.521	4
72	0.226	0.794	0.779	1
96	0.265	0.781	0.747	2
120	0.497	0.791	0.614	3

由图 4 可知, 随着料液比的变化, 米酒的感官评分、酒精度及 DPPH 自由基清除率均呈先上升后下降的趋势($P<0.05$), 当料液比为 1:1 (g:mL) 时, 感官评分最高, 为 87.0 分; DPPH 自由基清除率最高, 为 84.2%。当料液比为 1:0.75 (g:mL) 时, 酒精度最高, 为 18.5%vol。当料液比为 1:1 (g:mL) 时, 感官评分及 DPPH 自由基清除率最高, 酒精度适宜(17.60%vol), 因此确定最佳料液比为 1:1 (g:mL)。

2.2 响应面设计结合熵权 TOPSIS 分析

根据因素水平表, 采用 Box-Behnken 响应面设计 3 因素 3 水平试验, 以感官评分(Y_1)、酒精度(Y_2)和 DPPH 自由基清除率(Y_3)为因变量, 采用熵权 TOPSIS 法综合评分优选松花粉米酒发酵工艺。

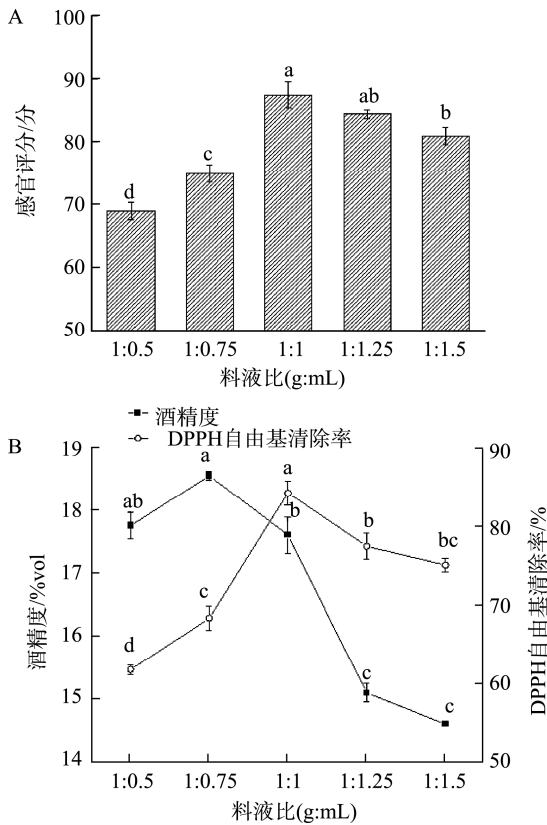


图 4 料液比对米酒品质的影响

Fig.4 Effects of solid-liquid ratio on the quality of rice wine

2.2.1 初始化决策矩阵的建立

测定不同发酵工艺所得样品的感官评分、酒精度和 DPPH 自由基清除率, 建立评价松花粉米酒品质熵权 TOPSIS 模型的初始化决策矩阵, 结果见表 6。

表 6 TOPSIS 初始化决策矩阵

Table 6 Initialization decision matrix of TOPSIS

编号	A	B	C	Y_1	Y_2	Y_3
1	-1	-1	0	74.5	16.8	68.53
2	1	-1	0	73.0	17.1	70.21
3	-1	1	0	77.2	14.7	75.75
4	1	1	0	78.3	16.0	71.21
5	-1	0	-1	82.5	16.9	70.51
6	1	0	-1	82.5	16.0	68.53
7	-1	0	1	79.6	16.1	70.45
8	1	0	1	88.0	15.9	69.52
9	0	-1	-1	75.3	15.9	77.10
10	0	1	-1	83.5	17.4	84.26
11	0	-1	1	91.2	17.8	84.50
12	0	1	1	89.5	17.4	87.50
13	0	0	0	88.5	16.5	85.53
14	0	0	0	92.1	17.3	87.11
15	0	0	0	87.2	16.8	88.57

2.2.2 归一化决策矩阵的建立

以 Y_1 、 Y_3 为高优型指标, 以 Y_2 为低优型指标, 按公式 (2)~(3) 进行归一化处理, 结果见表 7。

表 7 TOPSIS 标准化决策矩阵
Table 7 Standardized decision matrix of TOPSIS

编号	A	B	C	Y_1	Y_2	Y_3
1	-1	-1	0	0.079	0.323	0.000
2	1	-1	0	0.000	0.226	0.084
3	-1	1	0	0.220	1.000	0.360
4	1	1	0	0.277	0.581	0.134
5	-1	0	-1	0.497	0.290	0.099
6	1	0	-1	0.497	0.581	0.000
7	-1	0	1	0.346	0.548	0.096
8	1	0	1	0.785	0.613	0.049
9	0	-1	-1	0.120	0.613	0.428
10	0	1	-1	0.550	0.129	0.785
11	0	-1	1	0.953	0.000	0.797
12	0	1	1	0.864	0.129	0.947
13	0	0	0	0.812	0.419	0.848
14	0	0	0	1.000	0.161	0.927
15	0	0	0	0.743	0.323	1.000

2.2.3 各指标成分权重确定

按公式(4)计算熵值 E_j , 按公式(5)计算熵权 ω_j , 结果见表 8。由表 8 可知, 米酒的酒精度、抗氧化性及感官品质的权重(ω)分别为 25.846%、49.701%、24.454%。

表 8 各指标熵值及权重系数
Table 8 Entropy and weight coefficient of each index

指标	E_j	$\omega_j/\%$
酒精度	0.913	25.846
DPPH 自由基清除率	0.832	49.701
感官评价	0.917	24.454

2.2.4 贴近度的计算及评价

根据各指标权重, 按公式(7)、(8)计算最优向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- , 根据公式(9)计算米酒样品与最优向量的距离 D^+ 和最劣向量的距离 D^- , 按公式(10)计算贴近度 C_i , 最终确定不同发酵工艺松花粉米酒品质的综合排序, 结果见表 9。由表 9 可知, 当松花粉添加量 8%、酒曲添加量 0.8%、发酵时间 72 h, 米酒的综合得分最高。

2.3 优选的发酵工艺验证

按照优选出的松花粉米酒发酵工艺参数进行 3 批验证试验, 测定米酒的感官评分、酒精度及 DPPH 自由基清除率, 验证试验结果的可靠性, 结果见表 10。

表 9 提取工艺最佳条件排序结果
Table 9 Sorting results of optimal extraction conditions

编号	A	B	C	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
1	-1	-1	0	0.910	0.164	0.153	14
2	1	-1	0	0.907	0.126	0.122	15
3	-1	1	0	0.601	0.567	0.486	7
4	1	1	0	0.742	0.334	0.310	11
5	-1	0	-1	0.769	0.299	0.280	13
6	1	0	-1	0.778	0.383	0.330	10
7	-1	0	1	0.753	0.330	0.305	12
8	1	0	1	0.705	0.502	0.416	8
9	0	-1	-1	0.632	0.432	0.406	9
10	0	1	-1	0.511	0.623	0.550	6
11	0	-1	1	0.515	0.742	0.590	5
12	0	1	1	0.438	0.801	0.647	4
13	0	0	0	0.321	0.756	0.702	1
14	0	0	0	0.418	0.832	0.666	3
15	0	0	0	0.359	0.816	0.694	2

表 10 松花粉米酒发酵工艺验证结果
Table 10 Verification results of fermentation technology of pine pollen rice wine

验证	感官评分/分	酒精度/%vol	DPPH 自由基清除率/%
1	92.5	17.6	88.23
2	88.7	16.9	86.03
3	87.2	17.1	88.02
平均值	89.5	17.2	87.43
RSDs/%	2.49	1.71	1.13

注: 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

由表 10 可知, 经过 3 批工艺验证试验测得米酒的感官评分为 89.5 分, 酒精度为 17.2%vol, DPPH 自由基清除率为 87.43%。松花粉米酒质地均一、口感柔和、呈现浅棕黄色。各质量指标的 RSDs 均小于 5%, 说明优选的松花粉米酒发酵工艺稳定可行。

3 结论与讨论

本研究结合 Box-Behnken 响应面设计和熵权 TOPSIS 法, 以感官评分、酒精度及 DPPH 自由基清除率为考察指标, 优选松花粉米酒的最佳发酵工艺为松花粉添加量 8%、酒曲添加量 0.8%、发酵时间 72 h, 并经过 3 批工艺验证试验证明, 优选的松花粉米酒发酵工艺科学合理、稳定可行。

松花粉米酒作为具有良好抗氧化性的多组分复杂体系, 以单一的感官评分作为评价指标优化发酵工艺存在一定的片面性。而采用多指标成分进行综合评价时, 各指标的权重系数直接影响最终的评价结果^[30]。熵权 TOPSIS 是一种客观赋权法, 根据原始数据矩阵之间的关系来确定权

重, 不依赖于人的主观判断, 决策或评价结果具有较强的数学理论依据, 具有处理复杂多量数据的分析优势^[24]。采用熵权 TOPSIS 法结合 Box-Behnken 响应面设计对松花粉米酒的发酵工艺进行优选, 在排除了主观赋权所带来的误差的基础上, 不仅兼顾了各指标间的协同效应, 区分了不同发酵工艺间的综合差异, 也能够较少的试验次数下更加全面地考察各个指标对发酵工艺的综合影响, 减少了主观因素导致的松花粉米酒品质评价差异性, 使结果更加科学、准确可靠。

参考文献

- [1] CHENG Y, WANG Z, QUAN W, *et al.* Pine pollen: A review of its chemical composition, health effects, processing, and food applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 599–614.
- [2] 朱巧莎, 侯占群, 段盛林, 等. 松花粉的主要活性成分及其功能的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(9): 194–198.
ZHU QS, HOU ZQ, DUAN SL, *et al.* Research progress on the main active components and functions of pine pollen [J]. Food Research and Development, 2019, 40(9): 194–198.
- [3] 戴承恩, 何小平, 郑芬芬, 等. 松花粉主要活性成分及保健作用的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(8): 212–219.
DAI CEN, HE XP, ZHENG FF, *et al.* Research progress on the main active components and health effects of pine pollen [J]. Food Research and Development, 2019, 40(8): 212–219.
- [4] 胡璐曼, 乔强, 杨长军, 等. 不同酵母菌发酵对松花粉抗氧化活性及其酚类组成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(19): 72–80.
HU LM, QIAO Q, YANG CJ, *et al.* Effect of different yeast fermentation on the antioxidant activity and phenolic composition of pine pollen [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(19): 72–80.
- [5] HU Z, CHEN S, SHI T, *et al.* Masson pine pollen aqueous extract ameliorates cadmium-induced kidney damage in rats [J]. Frontiers in Molecular Biosciences, 2023, 10: 1249744.
- [6] 刘其尊, 陈阳, 杨长军, 等. 不同松花粉提取物对环磷酰胺诱导大鼠卵巢损伤的保护作用[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 105–112.
LIU QS, CHEN Y, YANG CJ, *et al.* Protective effect of different pine pollen extracts on cyclophosphamide-induced ovarian damage in rats [J]. Food Science, 2024, 45(6): 105–112.
- [7] CHENG Y, QUAN W, QU T, *et al.* Effects of ⁶⁰Co-irradiation and superfine grinding wall disruption pretreatment on phenolic compounds in pine (*Pinus yunnanensis*) pollen and its antioxidant and α -glucosidase-inhibiting activities [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128808.
- [8] 王言之, 张静姝, 顾晨曦, 等. 不破壁松花粉对小鼠免疫功能的调节作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(20): 7449–7454.
WANG YZ, ZHANG JS, GU CX, *et al.* Regulation effect of unbroken pine pollen on immunological functioning in mice [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(20): 7449–7454.
- [9] 刘敏, 谭书明. 刺梨-松花粉复合饮料的稳定性研究[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(4): 43–48.
LIU M, TAN SM. Study on the stability of prickly pear and pine pollen composite beverage [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2017, 36(4): 43–48.
- [10] 宋雨阳. 松花粉酒成分分析及其生理活性的研究[D]. 延吉: 延边大学, 2020.
SONG YY. Component analysis and physiological activity study of pine pollen wine [D]. Yanji: Yanbian University, 2020.

- [11] 白绍赐, 杨明源, 张群芳, 等. 松花粉醋发酵过程中风味品质差异性分析[J]. 食品科学, 2024, 45(17): 154–164.
BAI SC, YANG MY, ZHANG QF, *et al.* Analysis of flavor quality differences during the fermentation of pine pollen vinegar [J]. Food Science, 2024, 45(17): 154–164.
- [12] 刘其耸, 李菲, 李全宏. 基于冷冻-研磨破壁技术制备松花粉[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 74–77.
LIU QS, LI F, LI QH. Preparation of pine pollen based on freeze-milling technology [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(1): 74–77.
- [13] 李荣胜, 付庆帅, 郭俊红, 等. 中药松花粉的化学成分及现代应用研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2024, 41(10): 1275–1286, 1297.
LI RS, FU QS, GUO JH, *et al.* Research progress on the chemical components and modern applications of traditional Chinese medicine pine pollen [J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2024, 41(10): 1275–1286, 1297.
- [14] 魏浩宇, 毕陆祥, 郭舒怡, 等. 基于VOSviewer的米酒研究进展及热点可视化分析[J]. 现代农业研究, 2024, 30(8): 97–103.
WEI HY, BI LX, GUO SY, *et al.* VOSviewer-based visual analysis of research progress and hotspots in rice wine [J]. Modern Agriculture Research, 2024, 30(8): 97–103.
- [15] 张祥瑞, 陈安利, 李学琴, 等. 米酒研究进展[J]. 酿酒, 2024, 51(4): 43–47.
ZHANG XR, CHEN ANL, LI XQ, *et al.* Research progress on rice wine [J]. Liquor Making, 2024, 51(4): 43–47.
- [16] 季文莹, 王睿, 李季文, 等. 熵权 TOPSIS 法结合正交试验优选双活风湿凝胶贴膏提取工艺[J]. 中兽医医药杂志, 2023, 42(1): 18–25.
JI WY, WANG R, LI JW, *et al.* Optimization of extraction process for dual-functional dampness-relieving gel patches based on entropy weight TOPSIS method combined with orthogonal experiment [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2023, 42(1): 18–25.
- [17] 郭晶晶, 史彦蕾, 李硕, 等. 基于正交设计和熵权 TOPSIS 法优化酒炙甘草炮制工艺[J]. 时珍国医国药, 2024, 35(7): 1639–1642.
GUO JJ, SHI YL, LI S, *et al.* Process optimization of stir-frying with yellow wine for *Glycyrrhiza* based on orthogonal design and entropy weight combined with TOPSIS method [J]. Journal of Li-shizhen Traditional Chinese Medicine, 2024, 35(7): 1639–1642.
- [18] 黄瑶, 徐杰, 刘佩仪, 等. 正交试验结合熵权 TOPSIS 优选麻黄-桂枝药对水提工艺[J]. 中国现代中药, 2022, 24(7): 1341–1346.
HUANG Y, XU J, LIU PY, *et al.* Optimization of water extraction process for Ephedra-Ginger decoction based on orthogonal experiment combined with entropy weight TOPSIS method [J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(7): 1341–1346.
- [19] 崔志颖, 贾哲, 王双节, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的桑白皮咬咀饮片工艺优化及其与传统饮片的质量对比研究[J/OL]. 中国药学杂志, 1-18. [2025-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2162.R.20250327.1331.010.html>
CUI ZY, JIA Z, WANG SJ, *et al.* Study on process optimization of *Mulberry* bark slices and quality comparison with traditional slices based on entropy weight TOPSIS method [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 1-18. [2025-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2162.R.20250327.1331.010.html>
- [20] 彭春芳, 袁松林, 刘琨毅, 等. 响应面法优化玫瑰红豆复合米酒发酵工艺[J]. 中国酿造, 2021, 40(11): 203–208.
PENG CF, YUAN SL, LIU KY, *et al.* Optimization of fermentation process of rose and red bean compound rice wine by response surface methodology [J]. China Brewing, 2021, 40(11): 203–208.
- [21] 艾晓莉, 林佳丽, 刘达玉, 等. 低醇复合米酒发酵工艺优化[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 219–224.
AI XL, LIN JL, LIU DY, *et al.* Optimization of fermentation process of low-alcohol compound rice wine [J]. China Brewing, 2020, 39(6): 219–224.
- [22] 程钰洁, 文珊, 邓怡芳, 等. 正交试验设计结合熵权 TOPSIS 优选阿胶珠炮制工艺[J]. 中国现代中药, 2023, 25(2): 361–368.
CHENG YJ, WEN S, DENG YF, *et al.* Optimization of Aijiao pearl processing technology based on orthogonal experiment design combined with entropy weight TOPSIS [J]. Modern Chinese Medicine, 2023, 25(2): 361–368.
- [23] 田梦银, 王青青, 严丹雨, 等. 响应面法优化改良米酒工艺研究[J]. 酿酒科技, 2022(12): 17–23.
TIAN MY, WANG QQ, YAN DY, *et al.* Optimization of rice wine brewing process using response surface methodology [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(12): 17–23.
- [24] 邓成林, 王芙苒, 周金萍, 等. 发酵绿茶饮料工艺优化、抗氧化活性及贮藏品质研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(19): 134–142.
DENG CL, WANG FY, ZHOU JP, *et al.* Optimization of fermentation process for green tea beverage and study on its antioxidant activity and storage quality [J]. Food Research and Development, 2022, 43(19): 134–142.
- [25] 林春寅, 李雅丽, 杜传来, 等. 滁菊米酒发酵工艺优化[J]. 安徽科技学院学报, 2024, 38(2): 70–78.
LIN CY, LI YL, DU CL, *et al.* Fermentation process optimization of Chuju rice wine [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2024, 38(2): 70–78.
- [26] 黄瑶雁, 叶婉琳, 林继辉, 等. 艾草对米酒品质的影响研究和艾草米酒发酵工艺优化[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 50–55.
HUANG YY, YE WL, LIN JH, *et al.* Study on the effect of mugwort on rice wine quality and fermentation process optimization of mugwort rice wine [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2024, 33(1): 50–55.
- [27] 齐琦. 黑糯米保健酒的工艺及品质研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
QI Q. Study on the process and quality of black glutinous rice health wine [D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [28] 李昱鼎. 竹茶酒发酵工艺优化及抗氧化特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
LI YD. Research on the optimization of bamboo tea wine fermentation process and its antioxidant properties [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.
- [29] 张厅, 陈思奇, 丁筑红, 等. TOPSIS 法综合评价不同助剂对刺梨汁喷雾干燥粉品质的影响[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(5): 1–7.
ZHANG T, CHEN SQ, DING ZH, *et al.* Comprehensive evaluation of the effects of different drying aids on the quality of spray-dried prickly pear juice using the TOPSIS method [J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(5): 1–7.
- [30] 石畅, 高畅, 郭晓瑞, 等. 层次分析-熵权法结合响应面法优化五味子藤茎脂素超声提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 293–302.
SHI C, GAO C, GUO XR, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction process of lignans from *Schisandra chinensis* vine stem by analytic hierarchy process-entropy weight method combined with response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 293–302.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)