

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80269

# 苹果树莓复合果醋发酵工艺优化及贮藏期酚类物质变化

张蕙铭 金铁岩 李佳俊

(延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

**摘要:** [目的] 分析贮藏期间复合果醋中营养组分的动态迁移规律, 以揭示贮藏条件对发酵体系品质稳定性的影响机制。[方法] 采用单因素试验结合响应面法, 以总酸质量浓度为响应值, 优化苹果树莓复合果醋发酵工艺参数, 并对优化工艺制备的复合果醋开展 60 d 常温避光贮藏试验。[结果] 苹果树莓复合果醋最优酿造工艺为树莓添加量 20 g/100 g、醋酸菌接种量 10 mL/100 mL、发酵温度 32 °C。苹果树莓复合果醋中 10 种酚类物质总量随贮藏时间延长呈增长趋势。[结论] 贮藏陈化可以有效促进苹果树莓复合果醋中酚类物质的积累。

**关键词:** 苹果; 树莓; 复合果醋; 发酵工艺优化; 酚类物质; 贮藏陈化

## Process optimization and phenolic compound variation of apple-raspberry composite fruit vinegar during storage

ZHANG Huiming JIN Tieyan LI Jiajun

(Agriculture College, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the dynamic migration patterns of nutritional components in composite fruit vinegar during storage and thereby reveal the mechanism of storage conditions affecting the quality stability of the fermentation system. [Methods] Single-factor experiments combined with the surface methodology are adopted to optimize the fermentation parameters of apple-raspberry composite fruit vinegar, with the total acid mass concentration employed as the response value. Meanwhile, the composite fruit vinegar prepared by the optimized process is subjected to a 60-day storage test at ambient temperature in the dark. [Results] The optimal brewing parameters for apple-raspberry composite fruit vinegar are as follows: raspberry addition of 20 g/100 g, acetic acid bacterium inoculation of 10 mL/100 mL, and fermentation temperature of 32 °C. The total content of the ten detected phenolic compounds in apple-raspberry composite fruit vinegar shows a trend of increasing with prolonged storage time. [Conclusion] Storage aging can effectively promote the accumulation of phenolic compounds in apple-raspberry composite fruit vinegar.

**Keywords:** apple; raspberry; composite fruit vinegar; fermentation process optimization; phenolic compound; storage aging

树莓 (*Rubus* spp.) 果实形态呈近球形, 外果皮呈靛蓝色或紫罗兰色, 表面附着天然蜡质层<sup>[1]</sup>。其呈味特性表现为甜酸比协调。树莓浆果富含植物化学活性物质, 包括花色苷、抗坏血酸、生育酚及视黄醇等<sup>[2]</sup>, 同时含有钾、铁、锰等必需矿物质元素。其花色苷具有视觉保护和缓解疲劳的功效, 而多酚与维生素协同体系展现出显著的抗氧化应激与抗炎活性<sup>[3]</sup>。果醋中的酚类物质主要来源于原料

水果的果皮、果肉和种子, 其含量和种类与水果品种密切相关, 如苹果醋中富含绿原酸、槲皮素、儿茶素等, 莓果醋中富含花青素、鞣花酸等<sup>[4]</sup>; 酚类物质作为果醋中重要的功能性成分, 其含量和组成不仅影响果醋的抗氧化活性、色泽、风味, 还与原料种类、加工工艺密切相关<sup>[5]</sup>。目前, 对于果醋品质方面的研究较多, 如武林芝等<sup>[6]</sup>对树莓果醋的制作工艺及香气成分进行了研究, 结果表明, 树莓果醋

通信作者: 金铁岩 (1968—), 男, 延边大学副教授, 博士。E-mail: jintieyan@ybu.edu.cn

收稿日期: 2025-03-24 改回日期: 2026-01-04

引用格式: 张蕙铭, 金铁岩, 李佳俊. 苹果树莓复合果醋发酵工艺优化及贮藏期酚类物质变化[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 97-104.

Citation: ZHANG Huiming, JIN Tieyan, LI Jiajun. Process optimization and phenolic compound variation of apple-raspberry composite fruit vinegar during storage[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 97-104.

中含有 37 种香气成分。但有关苹果树莓复合果醋贮藏陈化过程中单一酚类物质的变化规律研究鲜见<sup>[7]</sup>。

苹果汁糖酸比适中、可提供稳定的可发酵底物和基础香气；树莓富含花色苷与多酚，可显著提升果醋色泽、香气与功能性<sup>[8]</sup>。二者复配既有利于醋酸发酵，又可改善复合果醋的风味与营养品质。研究拟制备苹果树莓复合果醋，以总酸质量浓度为响应值，采用单因素试验结合响应面法对树莓添加量、醋酸菌接种量及发酵温度进行优化，并对苹果树莓复合果醋贮藏期间的酚类物质变化进行研究，以为苹果树莓复合果醋的工业化生产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

苹果、树莓、白砂糖：市售；

酿酒酵母菌：安琪酵母股份有限公司；

沪酿 1.01 醋酸菌：上海佳民酿造食品有限公司酿造一厂；

食用酒精：隆胜生物科技有限公司；

圆底立式厌氧培养袋：青岛海博生物科技有限公司；

果胶酶：广西佳禾食品有限责任公司。

### 1.2 仪器与设备

分析天平：BSA124S-CW 型，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；

电热恒温水浴锅：HH.S 型，江苏省医疗器械工业公司；

电热恒温培养箱：DHP-9162B 型，上海一恒科学仪器有限公司；

立式压力蒸汽锅：YHQ-LS-50S II 型，上海博迅实业有限公司医疗设备厂；

手持折光仪：WZS 型，上海华光仪器仪表厂有限公司；

多功能搅拌机：HMF-3500TG 型，韩国韩一电子株式会社；

高效液相色谱仪：LC-2030 型，日本岛津仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 苹果树莓复合果醋制备工艺

苹果、树莓挑选清洗→破碎榨汁→果胶酶酶解(0.05 g/100 g, 2 h)→调糖(用白砂糖调至 14 °Bx)→酒精发酵(酵母菌活化：无菌蒸馏水中加入 10 g/100 mL 干酵母、0.2 g/100 mL 白砂糖，充分搅拌至完全溶解，35 °C 水浴活化 20~30 min；35 °C 下接种活化酵母，发酵至酒精精度稳定)→离心/过滤得果酒→醋酸菌液制备(32 °C 培养至总酸 1.5~1.8 g/100 mL)→醋酸发酵(醋酸菌液添加量为

10 mL/100 mL；发酵至总酸稳定)→巴氏杀菌(75 °C, 30 min)→无菌灌装→常温避光贮藏陈化(60 d)

#### 1.3.2 单因素试验

(1) 树莓添加量：在醋酸菌接种量 10 mL/100 mL、发酵周期 4 d、发酵温度 32 °C 的工艺条件下，考察树莓添加量(以混合果汁总质量为基准，添加量分别为 10, 20, 30, 40, 50 g/100 g)对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响。

(2) 醋酸菌接种量：在树莓添加量 20 g/100 g、发酵周期 4 d、发酵温度 32 °C 的工艺条件下，考察醋酸菌接种量(4, 6, 8, 10, 12 mL/100 mL)对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响。

(3) 发酵温度：在树莓添加量 20 g/100 g、发酵周期 4 d、醋酸菌接种量 10 mL/100 mL 的工艺条件下，考察发酵温度(28, 30, 32, 34, 36 °C)对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响。

1.3.3 Box-Behnken 试验设计 对比单因素试验结果，分别以树莓添加量、醋酸菌接种量、发酵温度为自变量，总酸质量浓度为响应值，采用 Box-Behnken 试验设计原理构建三因素三水平交互作用模型，探究多变量协同作用对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响。

1.3.4 苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的测定 按 GB/T 5009.41—2003《食醋卫生标准的分析方法》执行。

1.3.5 苹果树莓复合果醋中酚类物质测定 根据孙翔宇等<sup>[9]</sup>的方法，修改如下：选用 C<sub>18</sub> 色谱柱；流动相 A 为乙腈—冰乙酸( $V_{\text{乙腈}}:V_{\text{冰乙酸}}=98:2$ )，流动相 B 为水—冰乙酸( $V_{\text{水}}:V_{\text{冰乙酸}}=98:2$ )，流量 1 mL/min。梯度洗脱程序为 0~60 min, 5%~15% A；60~65 min, 15% A；65~66 min, 15%~20% A；66~73 min, 20% A；73~74 min, 20%~30% A；74~80 min, 30% A；80~81 min, 30%~40% A；81~93 min, 40% A；93~98 min, 40%~5% A；98~103 min, 5% A。

### 1.4 数据处理

使用 Microsoft Office Excel 2024、GraphPad Prism 10.0、Origin 2018、SPSS Statistics 和 Design-Expert 13 进行数据处理、图表制作及数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

2.1.1 树莓添加量对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响 由图 1 可知，当树莓添加量达 20 g/100 g 时，复合果醋总酸质量浓度达到极值。树莓添加量在 10~20 g/100 g 添加梯度范围内，总酸质量浓度显著升高( $P<0.05$ )，但树莓添加量超过 20 g/100 g 后出现负增长趋势。当树莓添加量超过 20 g/100 g 时，总酸质量浓度呈下降趋势。这可能与树莓原料本身总酸含量较高有关，过量添加会导致

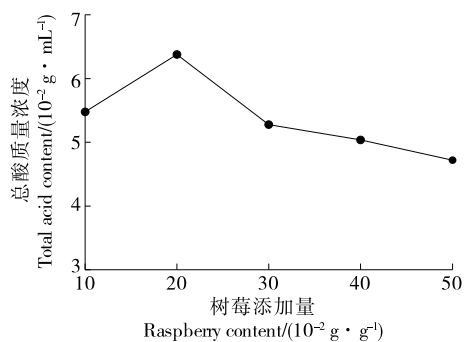


图1 树莓添加量对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响

Figure 1 Effect of raspberry addition on total acid mass concentration of apple-raspberry composite fruit vinegar

发酵体系初始 pH 显著降低、酸负荷增加,从而对醋酸菌的生长和代谢产生抑制作用,最终不利于醋酸的进一步生成<sup>[10-11]</sup>。因此,树莓添加量以 10, 20, 30 g/100 g 作为响应面因素水平。

2.1.2 醋酸菌接种量对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响 由图 2 可知,醋酸菌接种量为 4~8 mL/100 mL 时,总酸质量浓度与醋酸菌接种量呈正相关;醋酸菌接种量为 10 mL/100 mL 时,复合果醋总酸质量浓度呈现峰值,为 6.34 g/100 mL;醋酸菌接种量增至 12 mL/100 mL 时,总酸质量浓度下降。这是由于醋酸菌接种量不足时,发酵液中乙醇含量较高致使醋酸菌发酵不完全<sup>[12]</sup>,发酵液中的营养物质被醋酸菌过度利用,变成二氧化碳和水<sup>[13]</sup>。当醋酸菌接种量超过 10 mL/100 mL 时,过高的接种量造成菌体竞争加剧、营养消耗过快从而导致发酵效率降低,总酸质量浓度显著下降。因此,醋酸菌接种量以 8, 10, 12 mL/100 mL 作为响应面因素水平。

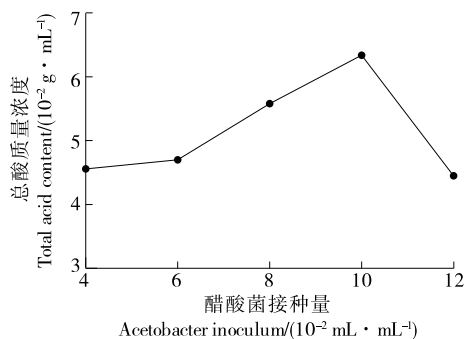


图2 醋酸菌接种量对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响

Figure 2 Effect of acetic acid bacterium inoculation on total acid mass concentration of apple-raspberry composite fruit vinegar

2.1.3 发酵温度对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响 由图 3 可知,发酵温度为 28~32 °C 时,总酸质量浓度与温度呈正相关;发酵温度提升至 32 °C 时,复合果醋总酸质量浓度达到峰值,为 6.46 g/100 mL;发酵温度超过 32 °C 后,总酸质量浓度骤降。说明较高温度有利于醋酸菌增殖及乙醇氧化,但超过最适温度后,随着温度的提高,加快了酒精的挥发速度,使得醋酸菌老化,产酸量降低<sup>[14]</sup>。因此,发酵温度以 30, 32, 34 °C 作为响应面因素水平。

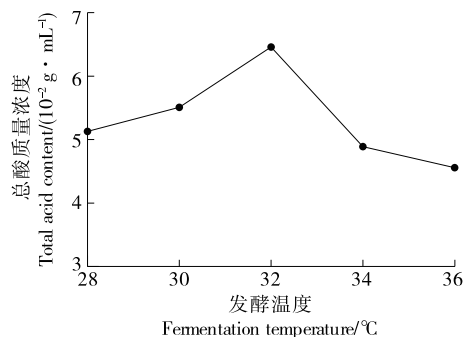


图3 发酵温度对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度的影响  
Figure 3 Effect of fermentation temperature on total acid mass concentration of apple-raspberry composite fruit vinegar

## 2.2 响应面实验

2.2.1 模型建立 通过单因素试验可知,3种因素对苹果树莓复合果醋总酸质量浓度均有影响。响应面因素水平设计见表 1,试验方案与结果见表 2,方差分析见表 3。

表1 响应面因素水平设计

Table 1 Factor and level design of response surface test

水平	A 树莓添加量/ (10 <sup>-2</sup> g · g <sup>-1</sup> )	B 醋酸菌接种量/ (10 <sup>-2</sup> mL · mL <sup>-1</sup> )	C 发酵温 度/°C
-1	10	8	30
0	20	10	32
1	30	12	34

通过 Box-Behnken 设计建立二次多项式回归模型得到总酸质量浓度 ( $Y$ ) 的回归方程为:

$$Y = 6.79 + 0.075 8A + 0.114 1B - 0.748 2C - 0.290 1AB - 0.081 1AC - 0.242 5BC - 0.829 8A^2 - 0.718 4B^2 - 2.22C^2. \quad (1)$$

由表 3 可知,总酸质量浓度 ( $Y$ ) 的二次多项式回归模型的  $P < 0.000 1$ ,表明该响应面回归模型极显著。失拟项的  $P$  值为  $0.223 6 > 0.05$ ,即失拟性检验结果不显著<sup>[15]</sup>;

表 2 响应面设计方案与结果

Table 2 Response surface design schemes and results

试验号	A	B	C	总酸质量浓度/ (10 <sup>-2</sup> g·mL <sup>-1</sup> )
1	-1	-1	0	4.73
2	1	-1	0	5.41
3	-1	1	0	5.48
4	1	1	0	5.01
5	-1	0	-1	4.18
6	1	0	-1	4.56
7	-1	0	1	3.09
8	1	0	1	3.12
9	0	-1	-1	4.27
10	0	1	-1	5.07
11	0	-1	1	3.08
12	0	1	1	2.93
13	0	0	0	6.64
14	0	0	0	6.78
15	0	0	0	6.59
16	0	0	0	6.75
17	0	0	0	6.57

表 3 总酸质量浓度方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance for total acid mass concentration

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	31.990 0	9	3.550 0	155.74	<0.000 1	**
A	0.045 3	1	0.045 3	2.01	0.196 5	
B	0.102 8	1	0.102 8	4.49	0.070 7	
C	4.470 0	1	4.470 0	195.91	<0.000 1	**
AB	0.330 6	1	0.330 6	14.52	0.006 7	**
AC	0.025 6	1	0.025 6	1.09	0.324 7	
BC	0.240 1	1	0.240 1	10.57	0.014 2	*
A <sup>2</sup>	2.880 0	1	2.880 0	126.28	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	2.170 0	1	2.170 0	94.91	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	19.730 0	1	19.730 0	864.56	<0.000 1	**
残值	0.159 8	7	0.022 8			
失拟项	0.100 5	3	0.033 5	2.26	0.223 6	
纯误差	0.059 3	4	0.014 8			
综合	32.150 0	16				

† \*\*表示差异极显著( $P < 0.01$ ); \*表示差异显著( $P < 0.05$ ); 决定系数( $R^2$ )为 0.994 7; 调整决定系数( $R^2_{Adj}$ )为 0.987 9; 预测决定系数( $R^2_{Pre}$ )为 0.945 9; 信噪比 33.107 4。

$R^2=0.994 7, R^2_{Adj}=0.987 9$ 。说明回归模型拟合程度高,可用于试验数据的分析与预测<sup>[16]</sup>。

C、A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>、AB、BC 对总酸质量浓度的影响极显著( $P < 0.01$ ); BC 对总酸质量浓度的影响显著( $P < 0.05$ ); A、B、AC 对总酸质量浓度的影响不显著( $P > 0.05$ )。

3 个因素影响总酸质量浓度的大小顺序为发酵温度 > 醋酸菌接种量 > 树莓添加量。

2.2.2 响应面模型分析 由图 4~图 6 可知,不同因素之间的交互作用对总酸质量浓度的影响存在差异。结合表 3 的方差分析结果,醋酸菌接种量与发酵温度(BC)之间的交互作用显著( $P < 0.05$ ),而树莓添加量与醋酸菌接种量(AB)之间的交互作用亦达到显著水平( $P < 0.01$ ),表明两组因素的协同变化会对总酸质量浓度产生明显影响。从响应面及等高线图可以看出,在一定范围内,随着醋酸菌接种量和发酵温度的同时变化,总酸质量浓度呈现明显的升高或降低趋势,等高线呈椭圆形分布,进一步说明二者之间存在显著交互作用。相比之下,树莓添加量与发酵温度(AC)之间的交互作用不显著( $P > 0.05$ ),其等高线趋近于圆形,表明二者对总酸质量浓度的协同影响相对较弱。

2.2.3 验证实验 基于响应面法建立的二次多项式回归模型经参数优化解析显示,最佳发酵工艺参数为树莓添加量 20.363 4 g/100 g、醋酸菌接种量 10.204 2 mL/100 mL、发酵温度 31.641 8 °C,理论预测总酸质量浓度为 6.831 g/100 mL。基于实际生产可行性,将工艺参数整定为树莓添加量 20 g/100 g、醋酸菌接种量 10 mL/100 mL、发酵温度 32 °C,该条件下总酸质量浓度实测值为 6.80 g/100 mL,与模型预测值接近,相对误差为 0.45%,说明该模型可以较好地模拟和预测苹果树莓复合果醋发酵工艺参数。

### 2.3 贮藏过程中苹果树莓复合果醋酚类物质的变化

2.3.1 苹果树莓复合果醋在贮藏过程中酚类物质变化分析 苹果树莓复合果醋酚类物质高效液相色谱图见图 7。

由表 4 可知,10 种酚类化合物的线性方程均呈现出优异的线性关系( $R^2 \geq 0.995$ ),证实高效液相色谱检测系统的定量可靠性<sup>[17-18]</sup>。

由表 5 可知,10 种目标酚类组分在整个贮藏周期内均稳定检出。其质量浓度分布呈现出显著差异性,各酚类化合物的平均含量水平呈现出明显的高低分布特征,具体表现为:槲皮素 > 儿茶素 > 绿原酸 > 表儿茶素 > 咖啡酸 > 阿魏酸 > 芦丁 > 没食子酸 > 白藜芦醇 > 对香豆酸,表明苹果树莓复合果醋的酚类中槲皮素占主要地位。上述酚类化合物在样品中的含量水平呈现明显的梯度分布,该差异可能与各化合物极性和糖苷化程度密切相关,酚类化合物的极性、糖苷化程度以及分子结构稳定性会影响其在发酵及贮藏体系中的溶解性与稳定性,从而导

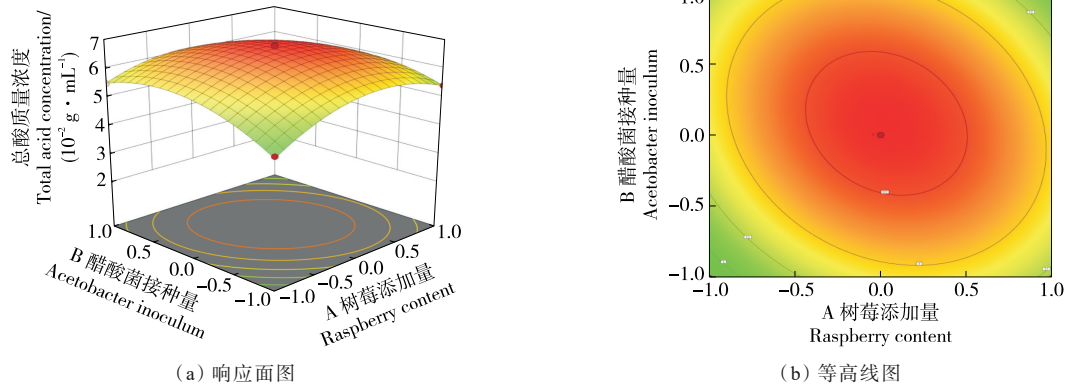


图4 树莓添加量和醋酸接种量对总酸质量浓度影响的响应面和等高线图

Figure 4 Response surface and contour map of effect of raspberry addition and acetic acid bacterium inoculation on total acid mass concentration

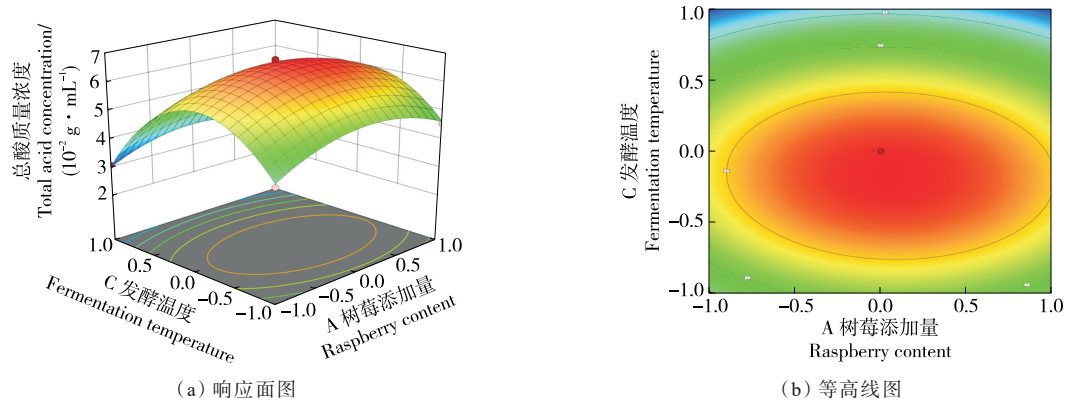


图5 树莓添加量和发酵温度对总酸质量浓度影响的响应面和等高线图

Figure 5 Response surface and contour map of effect of raspberry addition and fermentation temperature on total acid mass concentration

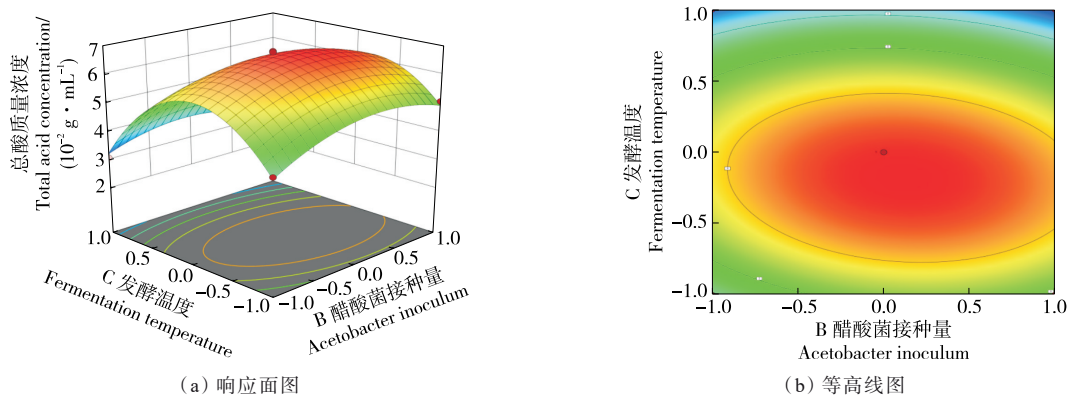
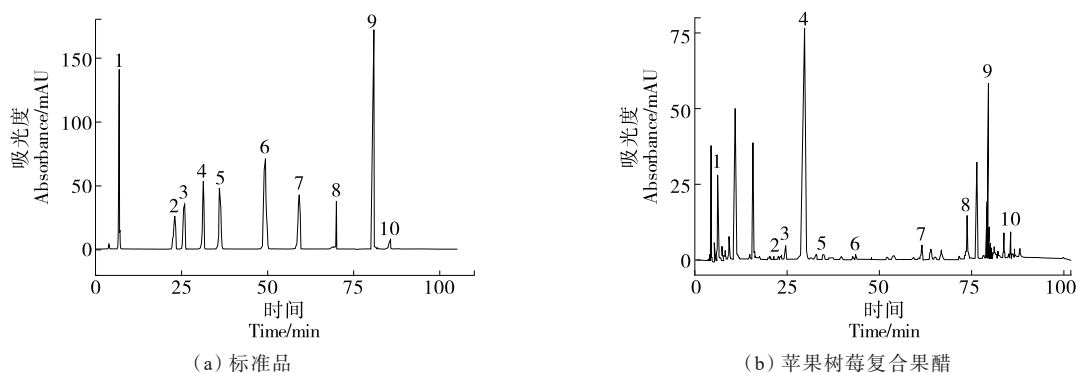


图6 醋酸菌接种量和发酵温度对总酸质量浓度影响的响应面和等高线图

Figure 6 Response surface and contour map of effect of acetic acid bacterium inoculation and fermentation temperature on total acid mass concentration

致其在最终产品中的相对含量存在差异<sup>[19-20]</sup>。其中槲皮素的高稳定性可能源于其邻苯二酚结构对自由基攻击的抵抗能力<sup>[21]</sup>；绿原酸是饮食中含量最丰富、功能最强的多

酚类化合物之一<sup>[22]</sup>；咖啡酸、表儿茶素具有多种生物活性，也是天然的抗氧化剂，常被作为食品添加剂应用于食品领域中<sup>[23]</sup>；表儿茶素稳定性较弱<sup>[24]</sup>。



1. 没食子酸 2. 儿茶素 3. 绿原酸 4. 咖啡酸 5. 表儿茶素 6. 对香豆酸 7. 阿魏酸 8. 芦丁 9. 白藜芦醇 10. 槲皮素

图 7 苹果树莓复合果醋酚类物质高效液相色谱图

Figure 7 High-performance liquid chromatography of phenolic compounds of apple-raspberry composite fruit vinegar

表 4 酚类物质的线性范围、线性方程及相关系数

Table 4 Linear range, regression equations, and correlation coefficients of phenolic compounds

化合物	出峰时间/min	质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	线性方程	相关系数 R <sup>2</sup>
没食子酸	6.885	10~300	y=41 647x-14 387	0.999
绿原酸	25.901	10~300	y=23 709x-108 569	0.997
表儿茶素	35.995	10~300	y=14 544x-47 075	0.998
对香豆酸	49.392	10~300	y=63 692x-176 493	0.999
白藜芦醇	80.887	10~300	y=59 791x-144 765	0.995
槲皮素	85.730	10~300	y=10 872x+377 317	0.995
阿魏酸	59.184	10~300	y=34 221x-191 072	0.997
咖啡酸	31.327	10~300	y=41 716x-153 018	0.998
儿茶素	23.014	10~300	y=9 329.6x-25 940	0.998
芦丁	70.103	10~300	y=19 148x-11 322	0.999

表 5 贮藏过程中苹果树莓复合果醋酚类物质质量浓度的变化<sup>†</sup>

Table 5 Mass concentration changes in phenolic compounds of apple-raspberry composite fruit vinegar during storage (n=3) mg/mL

名称	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d	60 d
没食子酸	0.70±0.02 <sup>g</sup>	0.77±0.02 <sup>f</sup>	0.85±0.01 <sup>e</sup>	0.91±0.03 <sup>d</sup>	1.19±0.11 <sup>c</sup>	1.21±0.08 <sup>b</sup>	1.26±0.06 <sup>a</sup>
儿茶素	2.81±0.09 <sup>g</sup>	2.66±0.04 <sup>f</sup>	2.73±0.02 <sup>e</sup>	2.78±0.02 <sup>d</sup>	2.87±0.02 <sup>c</sup>	2.93±0.05 <sup>b</sup>	2.95±0.05 <sup>a</sup>
绿原酸	4.60±0.03 <sup>g</sup>	4.63±0.02 <sup>f</sup>	4.72±0.02 <sup>e</sup>	4.79±0.02 <sup>d</sup>	4.87±0.03 <sup>c</sup>	4.93±0.13 <sup>b</sup>	5.15±0.06 <sup>a</sup>
咖啡酸	1.80±0.03 <sup>g</sup>	1.96±0.03 <sup>f</sup>	1.96±0.03 <sup>e</sup>	2.16±0.01 <sup>d</sup>	2.57±0.03 <sup>c</sup>	2.84±0.09 <sup>b</sup>	2.95±0.03 <sup>a</sup>
表儿茶素	2.18±0.02 <sup>g</sup>	2.23±0.04 <sup>f</sup>	2.57±0.02 <sup>e</sup>	2.87±0.04 <sup>d</sup>	3.56±0.02 <sup>a</sup>	3.48±0.05 <sup>b</sup>	3.34±0.06 <sup>c</sup>
对香豆酸	0.47±0.05 <sup>f</sup>	0.46±0.11 <sup>g</sup>	0.54±0.05 <sup>b</sup>	0.59±0.05 <sup>a</sup>	0.53±0.05 <sup>c</sup>	0.48±0.04 <sup>e</sup>	0.51±0.04 <sup>d</sup>
阿魏酸	1.22±0.04 <sup>g</sup>	1.27±0.06 <sup>f</sup>	1.32±0.08 <sup>e</sup>	1.42±0.03 <sup>d</sup>	1.49±0.08 <sup>c</sup>	1.51±0.03 <sup>a</sup>	1.50±0.02 <sup>b</sup>
芦丁	1.06±0.02 <sup>f</sup>	1.12±0.04 <sup>e</sup>	1.32±0.03 <sup>b</sup>	1.29±0.02 <sup>d</sup>	1.31±0.05 <sup>c</sup>	1.33±0.02 <sup>a</sup>	1.31±0.04 <sup>c</sup>
白藜芦醇	0.65±0.12 <sup>d</sup>	0.72±0.05 <sup>a</sup>	0.66±0.04 <sup>c</sup>	0.66±0.05 <sup>c</sup>	0.68±0.04 <sup>b</sup>	0.65±0.02 <sup>d</sup>	0.56±0.01 <sup>e</sup>
槲皮素	6.35±0.03 <sup>g</sup>	6.36±0.02 <sup>f</sup>	6.47±0.02 <sup>e</sup>	6.51±0.03 <sup>d</sup>	6.65±0.03 <sup>c</sup>	6.76±0.05 <sup>a</sup>	6.75±0.12 <sup>b</sup>
总量	21.86±0.42 <sup>g</sup>	22.18±0.48 <sup>f</sup>	23.18±0.32 <sup>e</sup>	23.98±0.30 <sup>d</sup>	25.72±0.46 <sup>c</sup>	26.12±0.56 <sup>b</sup>	26.29±0.49 <sup>a</sup>

<sup>†</sup> 同行小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.3.2 苹果树莓复合果醋贮藏期间酚类物质的变化 在贮藏过程中,10种酚类化合物的质量浓度随贮藏时间延长呈现不同的变化规律:没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸和槲皮素整体呈逐渐升高趋势,儿茶素、表儿茶素、对香豆酸和芦丁含量在贮藏过程中出现一定程度的波动,但总体表现为升高趋势,白藜芦醇含量随贮藏时间延长呈下降趋势。上述结果表明,苹果树莓复合果醋在贮藏过程中酚类物质的变化具有明显的物质差异性,这种差异可能与各酚类化合物的分子结构特征及其在酸性体系中的稳定性有关,与郭敏<sup>[25]</sup>的研究结果一致。

### 3 结论

该研究通过单因素试验与响应面试验对苹果树莓复合果醋的发酵工艺进行优化,并对贮藏过程中苹果树莓复合果醋酚类物质的变化进行探究。结果表明,苹果树莓复合果醋的最佳工艺参数为树莓添加量 20 g/100 g,醋酸接种量 10 mL/100 mL、发酵温度 32 ℃;贮藏过程中,10种酚类物质总量随贮藏时间呈持续增长态势,证实贮藏过程可有效促进酚类物质积累,其中没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸及槲皮素保持稳定上升趋势,儿茶素、表儿茶素、对香豆酸及芦丁呈现波动性增长特征,而白藜芦醇含量则随贮藏时间延长逐渐降低。后续研究将进一步关注不同酚类物质在贮藏过程中的转化机理,以及酚类物质之间及其与其他活性成分之间的相互作用关系,为苹果树莓复合果醋品质调控及功能评价提供理论依据。

#### 参考文献

- [1] 吴少平,梁靖,刘付海玲,等.不同蓝莓品种果实品质分析[J].种子科技,2024,42(22):22-25.  
WU S P, LIANG J, LIU F H L, et al. Analysis of fruit quality in different raspberry varieties[J]. Seed Science & Technology, 2024, 42(22): 22-25.
- [2] 胡雅馨,李京,惠伯棣.蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究[J].食品科学,2006(10):600-603.  
HU Y X, LI J, HUI B D. Study on major nutrition and anthocyanins of blueberry[J]. Food Science, 2006(10): 600-603.
- [3] WANG Y, ZHANG Q, CUI M Y, et al. Aroma enhancement of blueberry wine by postharvest partial dehydration of blueberries [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136593.
- [4] CAO M, NIU W T, WANG S H. Study on flavor substances of jujube fruit vinegar[J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2020, 126: 112.
- [5] HU Q, QI Y, LIU C H, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* cofermentation on the flavor and taste characteristics of mango vinegar[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(5): 3744-3756.
- [6] 武林芝,郝秀萍.红树莓果醋的制作工艺及香气成分分析[J].中国调味品,2021,46(10):129-132.  
WU L Z, HAO X P. Production process of red raspberry fruit vinegar and analysis of aroma components[J]. China Condiment, 2021, 46(10): 129-132.
- [7] 韦璐,孙钦菊,杨昌鹏,等.香蕉果醋连续固定化发酵过程中挥发性香气成分含量变化[J].食品与机械,2021,37(3):22-28,35.  
WEI L, SUN Q J, YANG C P, et al. The change of volatile flavor substances in the processing of continuous immobilization of banana vinegar[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 22-28, 35.
- [8] 郭志君,杨磊,骆红霞,等.苹果酸-乳酸发酵对刺梨酒香气的影响[J].食品与机械,2022,38(3):197-204,233.  
GUO Z J, YANG L, LUO H X, et al. Effect of malolactic fermentation on volatile compounds of *Rosa roxburghii* Tratt wine[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 197-204, 233.
- [9] 孙翔宇,杜国荣,马婷婷,等.RP-HPLC法同时测定葡萄酒、果酒、果醋中16种单体酚的含量[J].现代食品科技,2014,30(12):201-209.  
SUN X Y, DU G R, MA T T, et al. Simultaneous determination of the contents of 16 types of monophenols in wine, fruit wine, and fruit vinegar by RP-HPLC[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 201-209.
- [10] SHIGERU N, MASAHIRO F. Analysis of proteins responsive to acetic acid in acetobacter: molecular mechanisms conferring acetic acid resistance in acetic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 125(1): 54-59.
- [11] WANG B, SHAO Y C, CHEN T, et al. Global insights into acetic acid resistance mechanisms and genetic stability of acetobacter pasteurianus strains by comparative genomics[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 18330.
- [12] 李少鹏.枸杞果醋醋酸发酵工艺优化及主要成分研究[D].天津:天津科技大学,2022:25-26.  
LI S P. Optimization of acetic acid fermentation process and research on main ingredients of lycium barbarum vinegar[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022: 25-26.
- [13] 杨昀松,姜明超,韩冬,等.醋酸菌在食醋发酵中产乙酸的影响因素研究进展[J].食品科学,2025,46(9):351-363.  
YANG Y S, JIANG M C, HAN D, et al. Research progress on the factors influencing acetic acid production by acetic acid bacteria in vinegar fermentation[J]. Food Science, 2025, 46(9): 351-363.
- [14] 李南薇,刘建,麦苇祥,等.无核黄皮果醋醋酸发酵工艺优化[J].中国酿造,2023,42(4):215-220.

- LI N W, LIU J, MAI W X, et al. Optimization of acetic acid fermentation technology of seedless wampee fruit vinegar[J]. *China Brewing*, 2023, 42(4): 215-220.
- [15] 朱小小, 邓宇亮, 曹瑜, 等. 响应面法优化香菇头酱加工工艺[J]. *农产品加工*, 2024(3): 43-47.
- ZHU X X, DENG Y L, CAO Y, et al. Optimization of processing technology of *Mushroom* and *Allium chinense* sauce by response surface methodology[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2024(3): 43-47.
- [16] 张文艳, 李俊杰, 杨一甜, 等. 响应面法优化苹果黑枸杞复合酸奶工艺及抗氧化活性研究[J]. *农产品加工*, 2023(17): 30-34.
- ZHANG W Y, LI J J, YANG Y T, et al. The optimizing technology of apple and black medlar yogurt by response surface methodology and its antioxidant activity research[J]. *Farm Products Processing*, 2023(17): 30-34.
- [17] 俞萍, 岳煜贤, 张宇, 等. 响应面法优化人参糖蛋白制备工艺[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 194-199.
- YU P, YUE Y X, ZHANG Y, et al. Optimization of preparation of ginseng glycoprotein by response surface methodology[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 194-199.
- [18] 田怀香, 李凤华, 马霞. 天然奶味香精的酶解工艺优化[J]. *食品与机械*, 2013, 29(3): 120-124.
- TIAN H X, LI F H, MA X. Optimization of enzymatic hydrolysis of natural milk flavor[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(3): 120-124.
- [19] FERNANDA M M, PAULINA T, XANEL V, et al. Polyphenols and their potential role to fight viral diseases: an overview[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 801: 149719.
- [20] 郑慧, 杨勇, 曾艺琼, 等. 不同方法提取荷花蜂花粉可溶性膳食纤维的多酚含量及对微生物生长的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(1): 159-163, 236.
- ZHENG H, YANG Y, ZENG Y Q, et al. Determination of the polyphenols contents in Lotus bee pollen soluble dietary fiber by different methods and study on its effects on growth of microorganism[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(1): 159-163, 236.
- [21] 王静芳, 李珂, 刘金海, 等. 天然抗氧化剂——槲皮素[J]. *化学与粘合*, 2024, 46(6): 611-615, 630.
- WANG J F, LI K, LIU J H, et al. Natural antioxidant: quercetin[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2024, 46(6): 611-615, 630.
- [22] 和润莹, 杨慧珍, 崔瑶, 等. 绿原酸的生物活性及其作为食品添加剂的应用潜力探讨[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(11): 225-232.
- HE R Y, YANG H Z, CUI Y, et al. The biological activity of chlorogenic acid and its potential application as a food additive[J]. *China Food Additives*, 2022, 33(11): 225-232.
- [23] 侯笑林, 项立譔, 李明珠, 等. 响应面优化超声辅助法提取奇亚籽中咖啡酸及其抗氧化性测定[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(6): 906-912.
- HOU X L, XIANG L X, LI M Z, et al. Caffeic acid extracted from chia seeds by the response surface method optimized with ultrasonic-assisted and its antioxidant activity[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(6): 906-912.
- [24] 张蓉, 陈光吉, 尚以顺, 等. 81 份金荞麦收集系表儿茶素含量的分析评价[J]. *特种经济动植物*, 2023, 26(2): 31-34.
- ZHANG R, CHEN G J, SHANG Y S, et al. Analysis and evaluation of epicatechin content in 81 fagopyrum dibotrys collections[J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2023, 26(2): 31-34.
- [25] 郭敏. 酚类物质在柿醋发酵过程中变化规律研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009: 44-45.
- GUO M. Study on the change regular of phenolic compounds during the persimmon vinegar fermentation[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2009: 44-45.