

## 芸豆-蓝靛果复合发酵液制备工艺优化及其抗氧化活性

王佳, 丁方莉, 安宇, 曾雪莹, 张智慧, 李思楠, 徐开媛, 周芳, 王颖, 张璐, 徐炳政, 孙泽堃

### Optimization of Preparation Process and Antioxidant Activity of Kidney Bean-Haskap Composite Fermentation Liquid

WANG Jia, DING Fangli, AN Yu, ZENG Xueying, ZHANG Zhihui, LI Sinan, XU Kaiyuan, ZHOU Fang, WANG Ying, ZHANG Lu, XU Bingzheng, and SUN Zekun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010305>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 芸豆酵素发酵过程中组分及抗氧化功能研究

Components and Antioxidant Activity during the Fermentation Process of Kidney Bean Jiaosu

食品工业科技. 2021, 42(18): 18-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120042>

#### 乳酸菌发酵桑葚汁工艺优化及发酵过程中功能性成分及抗氧化活性的变化

Optimization of the Fermentation Process of Mulberry Juice by Lactic Acid Bacteria and Changes in Functional Components and Antioxidant Activity during Fermentation

食品工业科技. 2023, 44(23): 90-100 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030084>

#### 响应面优化微波辅助提取蓝靛果花色苷工艺及其抗氧化活性

Optimization of Microwave-assisted Extraction of Anthocyanins from *Lonicera edulis* and Its Antioxidant Activity by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2019, 40(2): 195-200,214 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.02.034>

#### 乳酸菌发酵天麻口服液工艺优化

Optimization of Fermentation Processing of *Gastrodia elata* Oral Liquid with Lactic Acid Bacteria

食品工业科技. 2023, 44(15): 193-202 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090033>

#### 乳酸菌与酵母菌混合发酵羊奶酒的理化特性、抗氧化活性及香气分析

Physicochemical Characterization, Antioxidant Activity and Aroma Analysis of Goat's Milk Wine Fermented with Mixed Lactic Acid Bacteria and Yeasts

食品工业科技. 2024, 45(23): 140-150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020214>

#### 高抗性淀粉奶白花芸豆的压热法制备工艺研究

Research on the Preparation of Light Speckled Kidney Bean with High Resistance Starch by Autoclaving Processing

食品工业科技. 2023, 44(18): 1-9 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110228>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王佳, 丁方莉, 安宇, 等. 芸豆-蓝靛果复合发酵液制备工艺优化及其抗氧化活性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 222-231. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010305

WANG Jia, DING Fangli, AN Yu, et al. Optimization of Preparation Process and Antioxidant Activity of Kidney Bean-Haskap Composite Fermentation Liquid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 222-231. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010305

· 工艺技术 ·

# 芸豆-蓝靛果复合发酵液制备工艺优化 及其抗氧化活性

王佳<sup>1</sup>, 丁方莉<sup>2</sup>, 安宇<sup>1</sup>, 曾雪莹<sup>2</sup>, 张智慧<sup>1</sup>, 李思楠<sup>1</sup>, 徐开媛<sup>1</sup>, 周芳<sup>2</sup>, 王颖<sup>1,3,\*</sup>,  
张璐<sup>2,\*</sup>, 徐炳政<sup>4</sup>, 孙泽堃<sup>5</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 功能主食创制与慢病营养干预北京市  
重点实验室, 北京 100015;

3. 国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319;

4. 青岛琅琊台集团股份有限公司, 山东青岛 266400;

5. 天津华测检测认证有限公司, 天津 300300)

**摘要:** 为提高杂粮与小浆果的利用度, 研究复配乳酸菌发酵芸豆-蓝靛果复合汁制备发酵液并优化其工艺参数。选取四种乳酸菌对芸豆-蓝靛果复合汁接种发酵, 以活菌数为指标筛选复配乳酸菌后, 进行单因素实验及响应面优化试验确定复合发酵液的工艺参数, 并对其理化性质、生物活性及抗氧化能力进行检测。结果表明, 筛选得到复配乳酸菌 L1:L2 等比例复配接种芸豆-蓝靛果复合汁, 优化得到的复合发酵液的最优工艺参数为原料复配比例 1:1、初始 pH5.0、接种量 2%、发酵温度 34 °C, 此条件下复合发酵液的活菌数为 9.89 lg CFU/mL。经检测, 复合发酵液中总酚及黄酮含量均在 16 h 达到最高, 分别为 2204.96 μg/mL 和 701.09 μg/mL。抗氧化实验表明, 在发酵过程中芸豆-蓝靛果复合汁的 DPPH 自由基清除率及 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率呈现先上升后缓慢下降的趋势, 最高清除值为 98.23% 和 93.77%, 最优条件制备的芸豆-蓝靛果复合发酵液抗氧化能力较强。

**关键词:** 芸豆, 蓝靛果, 乳酸菌, 工艺优化, 抗氧化活性

中图分类号: TS255.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)03-0222-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010305



本文网刊:

## Optimization of Preparation Process and Antioxidant Activity of Kidney Bean-Haskap Composite Fermentation Liquid

WANG Jia<sup>1</sup>, DING Fangli<sup>2</sup>, AN Yu<sup>1</sup>, ZENG Xueying<sup>2</sup>, ZHANG Zhihui<sup>1</sup>, LI Sinan<sup>1</sup>, XU Kaiyuan<sup>1</sup>,  
ZHOU Fang<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>1,3,\*</sup>, ZHANG Lu<sup>2,\*</sup>, XU Bingzheng<sup>4</sup>, SUN Zekun<sup>5</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. China National Research Institute of Food and Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing Key Laboratory of  
the Innovative Development of Functional Staple and the Nutritional Intervention for Chronic Disease,  
Beijing 100015, China;

3. National Coarse Cereals Engineering Center, Daqing 163319, China;

4. Qingdao Langyatai Co., Ltd., Qingdao 266400, China;

收稿日期: 2024-01-29

**基金项目:** 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目“杂粮主食化食品生产关键技术与高附加值产品开发”(ZDZX202106); 黑龙江省“杂粮生产与加工”优势特色学科资助项目(黑教联[2018]4号)。

**作者简介:** 王佳(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: jiw990126@163.com。

\* **通信作者:** 王颖(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程及食品质量安全, E-mail: wychen156@163.com。

张璐(1987-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 功能食品开发与精准营养及功效评价, E-mail: zhanglu8078@126.com。

5.Tianjin Hua Testing International Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization value of grains and small berries, the fermentation liquid of kidney bean and haskap was prepared by compound lactic acid bacteria and the fermentation parameters were optimized. Specifically, four kinds of lactic acid bacteria were selected to inoculate and ferment the composition liquid of kidney bean and haskap. After screening the compound lactic acid bacteria based on the number of live bacterial count as the index, the process parameters of the composite fermentation liquid were determined using single factor test and response surface optimization test, as well as its physical and chemical properties, biological activity and antioxidant capacity were evaluated. The compound lactic acid bacteria L1:L2 was selected and inoculated in the composition liquid of kidney bean and haskap. The optimal process parameters of the composite fermentation liquid were a compounding ratio of 1:1, an initial pH of 5.0, an inoculation amount of 2%, and a fermentation temperature at 34 °C. Under these conditions, the live bacterial count in the composite fermentation liquid was 9.89 lg CFU/mL. The maximum values of total phenol and flavonoid reached at 16 h during fermentation, which were 2204.96 µg/mL and 701.09 µg/mL, respectively. The antioxidant experiments showed that the DPPH and ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rates of composite fermentation liquid initially increased and then decreased slowly, with the highest scavenging values of 98.23% and 93.77%, respectively. The optimal process parameters resulted in a strong antioxidant capacity in the composite fermentation liquid of kidney bean and haskap.

**Key words:** kidney bean; haskap; lactic acid bacteria; process optimization; antioxidant activity

植物发酵液是以一种或多种新鲜果蔬、豆谷类等为原料,经多种益生菌发酵制得的富含生物酶、益生菌、维生素、矿物质和次生代谢产物等营养成分的功能性微生物发酵产品<sup>[1]</sup>。植物基质中含有多种矿物质、膳食纤维以及维生素等营养成分,可以作为益生菌发酵的良好原料。Xie 等<sup>[2]</sup>基于 LC-MS/MS 研究发现植物乳杆菌发酵可改变枸杞汁的代谢物谱,提高总酚、黄酮等多种生物活性物质的水平。周瑶等<sup>[3]</sup>通过利用多种乳酸菌单一或复合发酵番木瓜汁,开发出一种具有改善功能和促进健康特性的番木瓜益生菌发酵饮料。因此,植物经过生物发酵后,发酵液中的各种功效酶、多酚类化合物、黄酮类化合物、有机酸类化合物以及芳香类化合物含量激增,可发挥多种功能活性,如抗氧化、调节肠道功能、减轻肥胖症及抑菌消炎等<sup>[4]</sup>。

芸豆(*Phaseolus vulgaris* L.),是全球第二大产量的豆科作物之一<sup>[5]</sup>。芸豆的蛋白质含量丰富,且含有人体必需氨基酸、维生素 B 族和矿物质等基本营养物质,不仅属于高钾镁低钠食物<sup>[6]</sup>,还是一种典型的低升糖指数(Glycemic Index)食物<sup>[7]</sup>。芸豆含有多酚类化合物、黄酮类化合物和有机酸等生物活性成分<sup>[8]</sup>,具有显著的清除自由基、提高机体抗氧化能力的功效<sup>[9]</sup>。蓝靛果(*Lonicera caerulea*),忍冬科忍冬属落叶灌木植物,是一种高度抗寒的野生小浆果<sup>[10]</sup>。因其休眠期较短不适宜在温暖的地区栽种,故主要种植在我国东北、西北等地区<sup>[11]</sup>。蓝靛果除富含糖类、多种维生素<sup>[12]</sup>、矿物质等营养物质外,还含有黄酮、花青素<sup>[13]</sup>、多酚等多种活性物质。其中花青素含量与蔓越莓、黑莓和蓝莓等浆果相比相对较高<sup>[14]</sup>,这与蓝靛果的高抗氧化能力密切相关<sup>[15]</sup>。有研究表明,豆类植物饮料在发酵过程中产生的有机酸能够通过可溶性配体增加铁、锌的吸收<sup>[16]</sup>。张秀玲等<sup>[17]</sup>以蓝靛果熟汁发酵制备蓝靛果酒,结果表明,熟汁发酵的蓝

靛果酒含有较高浓度的总酚并表现出较强的 DPPH 自由基清除能力。包怡红等<sup>[18]</sup>以蓝靛果和米糠为原料制备一种新型复合酵素,发酵后与发酵前的黄酮含量、总酚含量以及 DPPH 自由基清除率等抗氧化指标相比均显著升高且各指标之间呈显著相关性( $P < 0.05$ )。单一植物原料或复合植物原料经发酵后可提升其生物活性成分含量并增加抗氧化等功能性。

目前有关植物发酵液的研究多集中在果蔬复配上,鲜少有关于豆类与小浆果复配的研究。在本课题组前期以芸豆及大豆为原料所制备的芸豆/大豆复合发酵液可显著增强杂粮抗氧化性能<sup>[19]</sup>研究的基础上,本文以杂粮和东北野生小浆果为原料,通过单因素及响应面优化试验,接种复合乳酸菌发酵制备一种具有抗氧化性的芸豆-蓝靛果复合发酵液,探究其理化性质、生物活性及抗氧化能力。本研究拓展了芸豆及蓝靛果深加工和高值化利用的新思路,并为杂粮与小浆果复配发酵产品的开发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

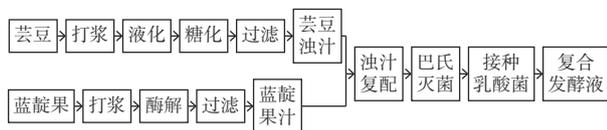
芸豆、白糖 市售;FR-3 蓝靛果 峰然蓝靛果苗木研发基地;耐高温  $\alpha$ -淀粉酶(20000 U/mL)、糖化酶(10000 U/mL)、果胶酶(500 U/g)、没食子酸标准品、黄酮标准品、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS) 上海源叶生物科技有限公司;超氧化物歧化酶(SOD)测试盒 南京建成生物工程研究所;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP) 东北农业大学菌库;鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*, LR)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*, LA)、嗜热链球菌(*Sterptococcus thermophilus*, S) 中国微生物菌种保藏中心。

本研究成果进行专利申请中,故对实验中所用菌株进行随机编号,分别为 L1, L2, L3, L4。

BS224S 电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司; HCP-A7 多功能料理机 海蒂诗国际集团; pHS-3C 型 pH 计 力辰仪器专营店; Victor Nivo 酶标仪 美国 PerkinElmer 公司; HH-6 电热恒温水浴锅 常州荣华仪器制造有限公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 芸豆-蓝靛果复合发酵液制备工艺流程



芸豆打浆后加入高温  $\alpha$ -淀粉酶(200  $\mu$ L/100 mL), 水浴 97  $^{\circ}$ C, 液化 20 min; 放凉后调节芸豆汁 pH 为 4.5, 加入糖化酶(200  $\mu$ L/100 mL), 水浴 60  $^{\circ}$ C, 糖化 30 min; 蓝靛果添加 40% 蒸馏水, 打浆后添加 2.5% 果胶酶, 室温酶解 30 min。

1.2.2 菌种的活化 接种乳酸菌菌液至 MRS 液体培养基 37  $^{\circ}$ C 培养 24 h, 平板划线接种至 MRS 固体培养基 37  $^{\circ}$ C 培养 48 h, 挑取单菌落接种至 MRS 液体培养基中 37  $^{\circ}$ C 培养 24 h, 连续接种三代活化菌液待用。

### 1.2.3 复合乳酸菌发酵菌种及发酵条件筛选

1.2.3.1 发酵菌种及时间选择 以芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数为指标, 在初始 pH5.0、发酵温度 37  $^{\circ}$ C、原料复配比例(芸豆汁:蓝靛果汁)为 1:1 的条件下, 接种量为 3% 的四种乳酸菌(L1、L2、L3、L4)于芸豆-蓝靛果复合汁中, 培养 0、8、16、24、32、40、48 h。

1.2.3.2 接种量选择 以芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数为指标, 在初始 pH5.0、发酵温度 37  $^{\circ}$ C、原料复配比例为 1:1 的条件下, 分别接种四种乳酸菌(L1、L2、L3、L4), 接种量为 1%、2%、3%、4%、5%, 发酵时间为上述试验所得到的各菌种最佳发酵时间。

1.2.3.3 发酵菌种复配比例选择 以芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数为指标, 在初始 pH5.0、发酵温度 37  $^{\circ}$ C、原料复配比例为 1:1 的条件下, 将上述两种最优乳酸菌按 1:3、1:2、1:1、2:1、3:1 比例接种, 发酵时间分别为 16、24、40 h。

1.2.4 单因素实验设计 芸豆-蓝靛果复合汁初始 pH5.0、原料复配比例 1:1、复配乳酸菌接种量 3%、37  $^{\circ}$ C 发酵 16 h。固定其他条件, 分别考察初始 pH (4.0、4.5、5.0、5.5、6.0)、原料复配比例(1:5、1:3、1:1、3:1、5:1)、接种量(1%、2%、3%、4%、5%)、发酵温度(31、33、35、37、39  $^{\circ}$ C)对芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数的影响。

1.2.5 响应面试验设计 用 Design-Expert 10 软件中 Box-Behnken 模型, 以芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数为响应值, 进行初始 pH、接种量、发酵温度 3 个单因素对芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数的响应面分

析, 优化发酵工艺参数。试验因素水平如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素及水平  
Table 1 Factors and levels used in Box-Behnken experimental design

水平	因素		
	A初始pH	B接种量(%)	C发酵温度( $^{\circ}$ C)
-1	4.5	2	33
0	5.0	3	35
1	5.5	4	37

1.2.6 活菌数的测定 采用平板法计数, 以微生物总数的对数( $\lg$  CFU/mL)来进行计数。

1.2.7 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中理化性质检测 利用 pH 计对发酵过程中的 pH 进行测定; 参考 GB/T 12456-2008《食品中总酸的测定方法》测定发酵过程中总酸含量; 利用手持折光仪测定发酵过程中可溶性固形物; 利用 3,5-二硝基水杨酸法<sup>[20]</sup>对发酵过程中还原糖含量进行测定, 线性回归方程为  $y=0.1218x-0.1523$ ,  $R^2=0.9952$ 。

1.2.8 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中生物活性成分检测

1.2.8.1 总酚测定 采用 Folin-Ciocalteus 法测定<sup>[21]</sup>。取 500  $\mu$ L 复合发酵液, 加入 10% 福林酚溶液 2.5 mL, 混匀静置 4 min 后, 加入 7.5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液 2 mL, 避光反应 40 min 后, 在 765 nm 处测定吸光值。没食子酸标准溶液的线性回归方程为  $y=0.0084x+0.0179$ ,  $R^2=0.999$ 。

1.2.8.2 黄酮测定 采用  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  比色法测定<sup>[22]</sup>。取 500  $\mu$ L 复合发酵液, 加入 5%  $\text{NaNO}_2$  溶液 250  $\mu$ L, 混匀静置 6 min 后, 加入 10%  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  溶液 250  $\mu$ L, 混匀静置 6 min 后, 加入 4%  $\text{NaOH}$  溶液 2 mL, 蒸馏水定容, 混匀静置 15 min, 在 510 nm 处测定吸光值。黄酮标准溶液的线性回归方程为  $y=0.0413x+0.0349$ ,  $R^2=0.9994$ 。

1.2.9 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中抗氧化能力测定

1.2.9.1 SOD 活力测定 使用超氧化物歧化酶(SOD, U/mL)测试盒测定。

1.2.9.2 DPPH 自由基清除率测定 用无水乙醇配制 DPPH 溶液 0.2 mmol/L, 避光保存。取 2 mL 不同发酵时间(0、8、16、24、32、40、48 h)复合发酵液于试管中, 加入 2 mL 的 DPPH 溶液并摇匀, 在室温避光反应 30 min, 在 517 nm 波长下测其吸光度为  $A_1$ , 用 2 mL 无水乙醇代替 DPPH 溶液, 测其吸光度为  $A_2$ , 用 2 mL 蒸馏水代替样液, 测其吸光度为  $A_0$ 。DPPH 自由基清除率计算公式如下:

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中:  $A_0$ : 表示空白组的吸光值;  $A_1$ : 表示发酵液

的吸光值;  $A_2$ : 表示对照组的吸光值。

1.2.9.3 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力测定 将配制好的 140 mmol/L 过硫酸钾 440  $\mu$ L 加入到 25 mL 7 mmol/L 的 ABTS 溶液中, 得到 ABTS<sup>+</sup> 自由基工作液, 避光反应 12~16 h。使用时, 用 95% 的乙醇稀释, 使其吸光度在 0.7 $\pm$ 0.02。1.5 mL 不同发酵时间(0、8、16、24、32、40、48 h)复合发酵液中加入 1.5 mL ABTS 溶液, 室温避光放置 6 min, 734 nm 测定其吸光度  $A_1$ , 用 1.5 mL 蒸馏水代替 ABTS 溶液, 测其吸光度为  $A_2$ , 用 1.5 mL 蒸馏水代替发酵液原液, 测其吸光度为  $A_0$ , ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中:  $A_0$ : 表示空白组的吸光值;  $A_1$ : 表示发酵液的吸光值;  $A_2$ : 表示对照组的吸光值。

### 1.3 数据处理

上述实验均重复 3 次, 采用 SPSS 25 进行单因素方差分析(ANOVA)及相关性分析。采用 Design Expert 10 中 Box-Behnken 模型进行响应面试验设计及分析, Graph Pad Prism 10 软件作图。  $P < 0.05$  确定为具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合乳酸菌发酵菌种筛选

2.1.1 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵菌种、发酵时间及接种量的选择 植物原料在发酵过程中产生的葡萄糖等碳水化合物可为细菌菌株生长提供合适的碳源<sup>[22]</sup>。图 1 为芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中不同乳酸菌的生长趋势变化。在芸豆-蓝靛果复合发酵液中, 接种 L1 与 L2 菌株的最大活菌数整体高于 L3 与 L4 菌株。接种 L1 和 L3 菌株在发酵 16 h 活菌数达到最大, 菌株 L2 在发酵 24 h 时活菌数最大, 菌株 L4 在发酵 40 h 时活菌数达到最大。因此, 接种菌株 L1 和 L3 的最佳发酵时间为 16 h, 接种菌株 L2 的最佳发酵时间为 24 h, 接种菌株 L4 的最佳发酵时间为 40 h。

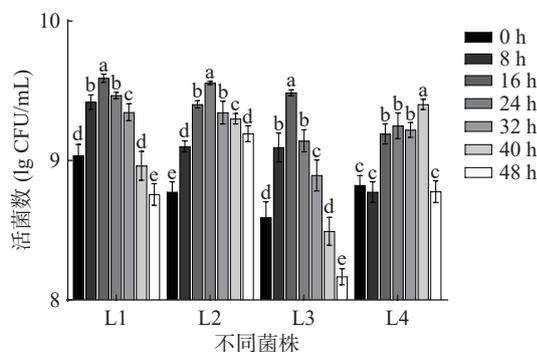


图 1 不同乳酸菌发酵过程中活菌数的变化

Fig.1 Changes of viable bacteria number during fermentation of different lactic acid bacteria

注: 不同小写字母表示不同发酵时间的差异显著性,  $P < 0.05$ 。

乳酸菌发酵有利于植物生物活性物质代谢和产

生, 接种量的大小直接影响菌种的生长速度和发酵效率。在上述实验得到的各乳酸菌最佳发酵时间的基础上进行接种量的优化, 图 2 为不同乳酸菌接种量对芸豆-蓝靛果复合发酵液的活菌数的影响。如图 2 所示, L4 在接种量为 2% 时活菌数最大, 达到 9.30 lg CFU/mL, L1、L2 和 L3 在接种量为 3% 时活菌数最大, 分别为 9.38、9.41 和 9.14 lg CFU/mL。因此, 接种 L4 的复合发酵液的最佳接种量为 2%, L1、L2 和 L3 的最佳接种量为 3%。

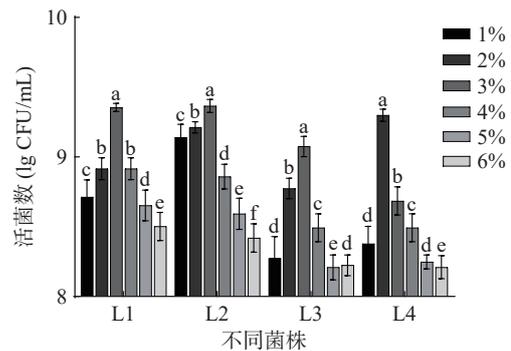


图 2 不同乳酸菌接种量对活菌数的影响

Fig.2 Effect of different inoculum amount of lactic acid bacteria on the number of viable bacteria

注: 不同小写字母表示不同接种量的差异显著性,  $P < 0.05$ 。

### 2.1.2 芸豆-蓝靛果复合发酵液菌种复配比例的选择

上述实验结果表明芸豆-蓝靛果复合汁中, 分别接种 L1 与 L2 菌株的最大活菌数整体高于 L3 与 L4 菌株。因此选择 L1 与 L2 菌株复配发酵 16、24、40 h, 接种量 3% 进行菌株复配比例的筛选。由图 3 可知, 活菌数随着乳酸菌复配比例的变化呈先上升后下降的趋势, L1 与 L2 复配比例为 1:1, 发酵时间为 16 h 时, 其活菌数值达到最大, 为 10.55 lg CFU/mL。分析此发酵环境, 两种乳酸菌存在一定的协同生长作用, 活菌数较单一菌种发酵明显增加, 但 L1 菌种含量的增多导致活菌数的下降, 可能是由于 L1 菌种进入生长衰退期所导致的, 应选择适宜比例进行发酵, 因此选择 L1 与 L2 复配比例为 1:1, 发酵

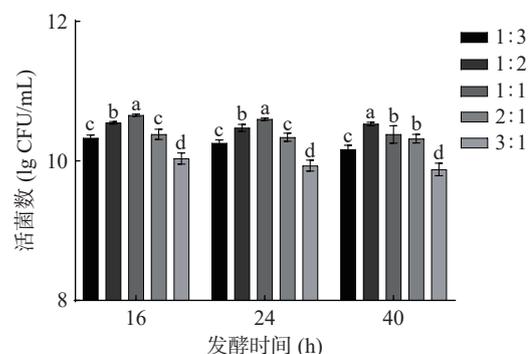


图 3 乳酸菌复配比例对活菌数的影响

Fig.3 Effect of lactic acid bacteria combination ratio on the number of viable bacteria

注: 不同小写字母表示相同发酵时间不同乳酸菌复配比例差异显著性,  $P < 0.05$ 。

时间 16 h 进行发酵工艺参数(初始 pH、原料比例、接种量和发酵温度)的单因素实验。

### 2.2 单因素实验分析

由图 4A 可知,随初始 pH 增加复合发酵液的活菌数呈现先上升后下降的趋势,当 pH 为 5.5 时,活菌数达到最大值。芸豆及蓝靛果经过乳酸菌发酵产生酸性代谢产物,进而导致发酵液 pH 降低。发酵液 pH 过低会导致菌株失活,不利于乳酸菌在复合发

酵液中的生长,过高也会抑制乳酸菌的生长,影响复合乳酸菌的生长繁殖以及代谢情况。考虑到乳酸菌的适宜 pH,因此选择 pH4.5~5.5 进行响应面试验。

由图 4B 可知,随蓝靛果汁比例的减少活菌数开始上升,在原料比例为 1:1 时芸豆-蓝靛果复合发酵液的活菌数达到最高值,为 10.23 lg CFU/mL。适宜的原料比例更有利于菌种生长,二者 1:1 混合更有利于乳酸菌的繁殖,促进复合乳酸菌在发酵液中产生多种次生代谢产物。因此选择复配比例 1:1 进行后续试验。

由图 4C 可知,芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数随复合乳酸菌接种量的增长先上升后下降,在接种量为 3% 时活菌数达到峰值,为 10.25 lg CFU/mL。接种量的高低会影响发酵初期复合乳酸菌的生长速度,当接种量超过复合乳酸菌的适宜接种量时,可能会缩短菌株的延滞期导致其快速到达对数生长期,发酵体系内的营养物质被迅速消耗掉<sup>[23]</sup>,不利于菌株后续生长而导致其活菌数下降。因此选择接种量 2%、3%、4% 进行响应面优化试验。

由图 4D 可知,随着发酵温度的升高,复合发酵液的活菌数呈现先上升后下降的趋势,在发酵温度为 35 °C 时其活菌数达到最大,为 10.17 lg CFU/mL。发酵温度会对微生物的生长造成影响,温度过高或过低均不利于乳酸菌的生长进而影响发酵,因此选择发酵温度为 33、35、37 °C 进行响应面优化试验。

### 2.3 响应面试验结果与分析

2.3.1 响应面结果分析 活菌数是反映乳酸菌生长的重要依据,可以判断乳酸菌在芸豆-蓝靛果复合发酵液中的生长状况。本次研究依据 Box-Behnken 试验设计原则,以初始 pH(A)、接种量(B)、发酵温度(C)3 个因素作为主要影响因素,以活菌数为响应值,设计 3 因素 3 水平试验模型。设计方案及试验结果见表 2。经过拟合得到回归方程为:  $Y=10.16-$

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design and results

试验号	A初始pH	B接种量	C发酵温度	活菌数(lg CFU/mL)
1	-1	0	-1	9.90
2	0	0	0	10.16
3	0	0	0	10.20
4	0	0	0	10.18
5	0	1	-1	9.79
6	0	-1	-1	10.07
7	0	0	0	10.14
8	1	0	-1	9.94
9	1	-1	0	10.10
10	-1	-1	0	10.11
11	-1	0	1	10.06
12	0	1	1	10.03
13	0	0	0	10.12
14	-1	1	0	10.13
15	1	1	0	9.85
16	1	0	1	9.76
17	0	-1	1	9.93

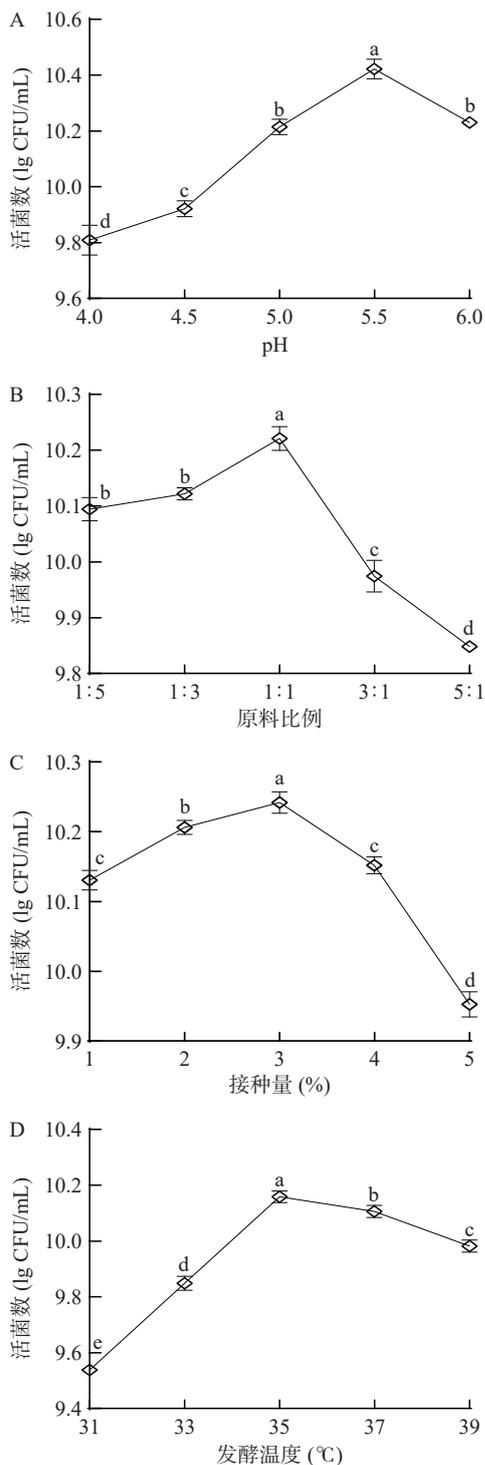


图 4 单因素实验结果

Fig.4 Single factor experiment results

注: A-pH; B-原料比例(芸豆汁:蓝靛果汁); C-接种量; D-发酵温度; 不同小写字母表示不同单因素差异显著,  $P < 0.05$ 。

$$0.070A-0.052B+0.011C-0.068AB-0.084AC+0.093BC-0.076A^2-0.037B^2-0.17C^2。$$

由表 3 可知,所选回归方程模型  $P<0.0001$ ,说明该二次多项回归方程模型极显著;失拟项不显著 ( $P=0.5225>0.05$ ),表明未知因素对实验结果干扰小,模型选择恰当。模型回归系数  $R^2$  为 0.9784,表明实验结果拟合情况较好,因此可以用此模型预测和分析芸豆-蓝靛果复合发酵液的发酵工艺参数。

表 3 响应面回归模型及方差分析结果

Table 3 Response surface regression model and variance analysis results

方差来源	离差平方和	自由度	均方和	F值	P值	显著性
模型	0.30	9	0.033	35.20	<0.0001	***
初始pH(A)	0.039	1	0.039	40.80	0.0004	**
接种量(B)	0.022	1	0.022	23.09	0.0020	**
发酵温度(C)	9.136E-004	1	9.136E-004	0.96	0.3598	
AB	0.018	1	0.018	19.40	0.0031	**
AC	0.028	1	0.028	29.56	0.0010	**
BC	0.035	1	0.035	36.69	0.0005	**
A <sup>2</sup>	0.024	1	0.024	25.43	0.0015	**
B <sup>2</sup>	5.650E-003	1	5.650E-003	5.94	0.0450	*
C <sup>2</sup>	0.12	1	0.12	123.35	<0.0001	***
残差	6.660E-003	7	9.514E-004			
失拟项	2.649E-003	3	8.830E-004	0.88	0.5225	
误差项	4.011E-003	4	1.003E-003			
总和	0.31	16				

注: \*表示差异显著,  $P<0.05$ ; \*\*表示差异高度显著,  $P<0.01$ ; \*\*\*表示差异极显著,  $P<0.0001$ 。

方程一次项中 A 项、B 项对复合发酵液的活菌数影响达到高度显著水平 ( $P<0.01$ ), 交互项 AB、AC、BC 对活菌数影响高度显著 ( $P<0.01$ )。各因素对复合发酵液活菌数影响顺序依次为初始 pH>接种

量>发酵温度。

2.3.2 交互结果分析及验证实验结果 图 5 为各因素交互作用对活菌数的影响,通过三维响应面和二维等高线图分析,初始 pH、接种量响应面曲面弯曲程度较大,表明对复合发酵液活菌数影响显著 ( $P<0.05$ )。各因素交互作用等高线图呈椭圆形,说明交互作用显著。这与方差分析结果相一致。由图 5 可知,对活菌数影响显著的有交互项初始 pH 和接种量、交互项初始 pH 和发酵温度以及交互项接种量与发酵温度。

根据模型通过 Design Expert 软件分析可得最优条件为: 初始 pH5.07、接种量 2%、发酵温度 34.43 °C, 活菌数预测值为 10.19 lg CFU/mL。结合实际应用,考虑到成本因素影响,将实验条件调整为: 初始 pH5.0、接种量 2%、发酵温度 34 °C, 根据上述条件进行验证,芸豆-蓝靛果复合发酵液活菌数的实际值为 9.89 lg CFU/mL, 与预测值相近,可以进行后续理化性质和抗氧化评估实验。

### 2.4 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中理化性质的变化

图 6A 为复合发酵液在发酵过程中的 pH 和总酸的动态变化。随发酵时间的增加, pH 呈现下降的趋势, 自发酵 0 h 至发酵 16 h 复合发酵液的 pH 急速下降至 3.64, 后下降平缓直至发酵 48 h 下降至 3.42; 总酸呈现上升的趋势, 0 h 为 0.05 mg/mL, 发酵 16 h 为 0.27 mg/mL。pH 及总酸的变化可能是由于微生物在发酵过程中大量增殖, 消耗糖原代谢产生有机酸等代谢产物, 从而导致 pH 降低并且总酸含量增长。de la Fuente 等<sup>[24]</sup> 利用植物乳杆菌 TR-71 发酵橙子牛奶饮料使其总酸含量上升。

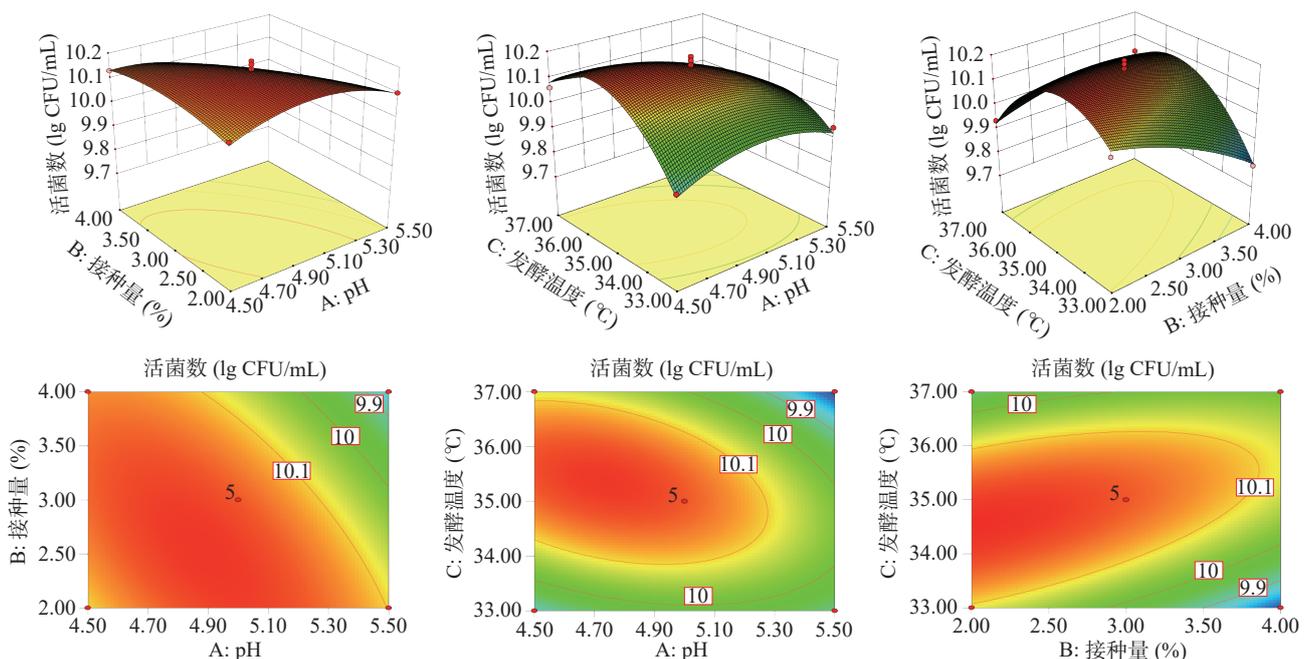


图 5 各因素交互作用对活菌数的影响

Fig.5 Influence of interaction of various factors on the number of viable bacteria

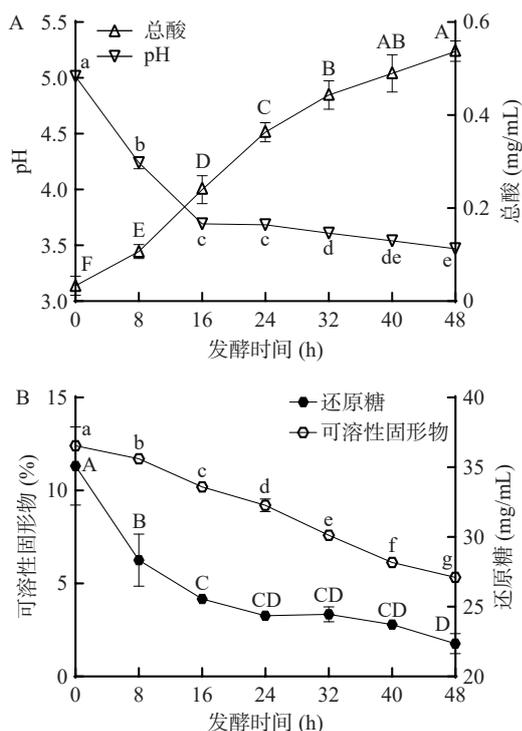


图6 发酵过程中复合发酵液理化性质的变化

Fig.6 Changes of physical and chemical properties of composite fermentation liquid during fermentation

注: A-总酸和pH; B-还原糖和可溶性固形物; 不同大写字母表示不同发酵时间总酸及还原糖含量的差异显著, 不同小写字母表示不同发酵时间 pH 及可溶性固形物的差异显著,  $P < 0.05$ 。

图 6B 为复合发酵液发酵过程中可溶性固形物和还原糖含量的变化。可溶性固形物含量可直观反映发酵液品质, 芸豆-蓝靛果复合发酵过程中的可溶性固形物呈现下降趋势, 由 12.4% 下降至 5.3%。还原糖是微生物生长的主要碳源<sup>[25]</sup>, 结果表明, 还原糖在发酵前 16 h 迅速下降, 由 35.10 mg/mL 下降至 25.22 mg/mL, 表明乳酸菌菌株在发酵前期快速消耗还原糖, 在发酵 24~48 h 呈现缓慢下降的趋势; 可溶性固形物与还原糖的减少可能是因为乳酸菌菌株在发酵过程中将大分子物质转化为有机酸等小分子物质。

## 2.5 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中总酚及黄酮含量变化

微生物发酵可提高植物中总酚、黄酮等生物活性物质含量<sup>[26]</sup>。芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中总酚含量变化如图 7A 所示。总酚含量在发酵过程中呈现先上升后小幅下降后趋于平缓的趋势。在发酵 16 h 总酚含量达到最高, 为 2204.96  $\mu\text{g/mL}$ , 较 0 h 的 1318.06  $\mu\text{g/mL}$  显著升高了 886.90  $\mu\text{g/mL}$ , 升高了 0.40 倍 ( $P < 0.05$ ), 推测由于植物原料经过乳酸菌生长代谢产生次生代谢产物, 使发酵液中总酚含量升高<sup>[27]</sup>。Zhu 等<sup>[28]</sup> 利用乳酸菌发酵杨梅果渣后显著提高了总多酚的含量。发酵 24 h 开始总酚含量小幅下降后趋于平缓, 可能是由于发酵后期一些酚类物质

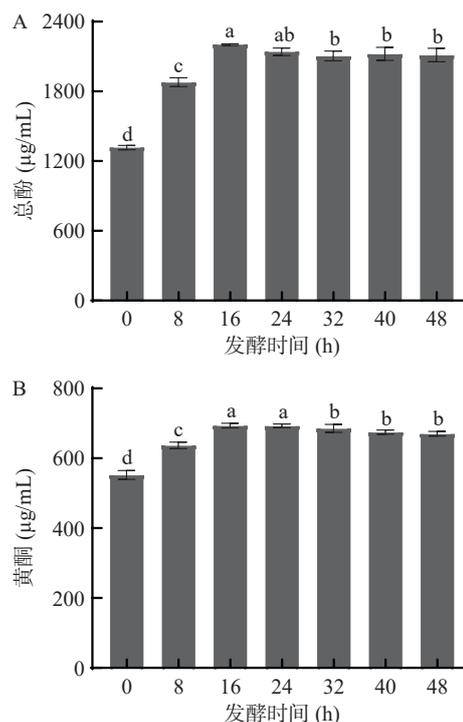


图7 发酵过程中复合发酵液总酚及黄酮含量的变化

Fig.7 Changes of total phenol and flavonoid contents of composite fermentation liquid during fermentation

注: A-总酚; B-黄酮; 不同小写字母表示不同发酵时间总酚及黄酮含量的差异显著,  $P < 0.05$ 。

发生了非酶促反应聚合, 致使总酚含量下降<sup>[29]</sup>。

由图 7B 可知, 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中黄酮含量呈先上升后缓慢下降的趋势。黄酮含量在发酵 16 h 达到最大值 701.09  $\mu\text{g/mL}$ , 较 0 h 升高了 138.01  $\mu\text{g/mL}$ 。推测乳酸菌发酵过程中, 芸豆-蓝靛果复合发酵液中与不溶性纤维结合的黄酮类化合物被释放, 导致黄酮含量上升<sup>[30]</sup>。发酵 24 h 后, 黄酮含量开始有小幅下降, 可能是由于发酵后期成分发生生物转化及结构变化导致其含量变少, 这与 Shi 等<sup>[31]</sup> 通过植物乳杆菌 JHT78 发酵西瓜汁结果一致。有研究表明, 酚类化合物、类黄酮和抗坏血酸等天然抗氧化剂与植物的抗氧化特性有关<sup>[32]</sup>。王思溥等<sup>[33]</sup> 发现 DPPH 自由基清除能力和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力与高浓度酚类物质等存在正相关性。

## 2.6 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中抗氧化活性变化

SOD 是生物体内重要的自由基清除剂, 可用于评估抗氧化活性。图 8A 为发酵过程中 SOD 活力的变化, 随发酵时间的增加 SOD 活力值先上升后下降, 并在发酵 16 h 时达到最高值为 435.69 U/mL。这与筛选得到的最佳工艺参数相符。发酵后期 SOD 活力显著下降 ( $P < 0.05$ ), 可能是由于在发酵过程后期碳水化合物减少, 导致复合乳酸菌发酵可利用能量的减少, 致使发酵速度降低, 导致 SOD 活力下降<sup>[34]</sup>。

如图 8B 为芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中

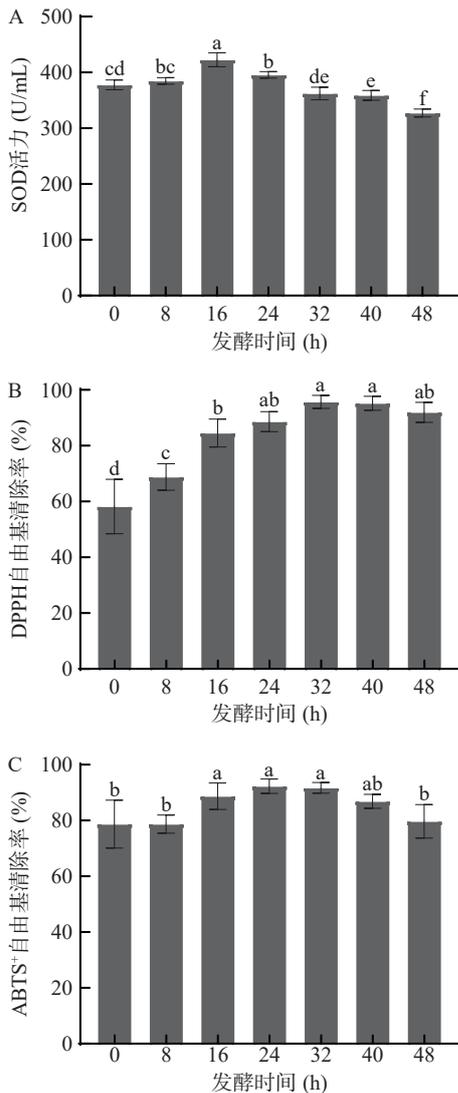


图 8 发酵过程中复合发酵液 SOD 活力、DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>自由基清除率的变化

Fig.8 Changes in SOD activity, DPPH free radical scavenging rate, and ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rate of composite fermentation liquid during fermentation

注: A-SOD 活力; B-DPPH 自由基清除率; C-ABTS<sup>+</sup>自由基清除率; 不同小写字母表示不同发酵时间抗氧化活性的差异显著,  $P < 0.05$ 。

DPPH 自由基清除率变化。随着发酵时间的增加, DPPH 自由基清除率呈先上升后平缓的趋势, 整个发酵过程中复合发酵液均对 DPPH 自由基具有清除能力, 在发酵 16 h 时为 84.31%, 较发酵 0 h 显著提升了 0.31 倍 ( $P < 0.05$ ), 后在发酵 32 h 达到最大值为 98.23%, 说明发酵时间的增长有利于 DPPH 自由基清除能力的提升。推测可能是由于乳酸菌发酵产生酚类物质等代谢产物<sup>[25]</sup> 以及 SOD 等功效酶协同作用, 使 DPPH 自由基清除率有所提升。Wang 等<sup>[35]</sup> 通过乳酸菌发酵黑苦莓汁探究其酚类物质与抗氧化活性变化, 结果表明, 发酵黑苦莓汁中的酚酸、类黄酮的转化有助于增强黑苦莓汁的 DPPH 自由基清除能力。

ABTS<sup>+</sup>自由基是一种存在较为稳定的自由基,

与抗氧化物质发生反应时可使体系褪色, 测定其吸光值可计算出样品的 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率<sup>[36]</sup>。图 8C 为芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的变化, 随发酵时间的延长 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力先上升后下降。在发酵 16 h 清除率为 88.11%, 较发酵初始显著提升了 0.21 倍 ( $P < 0.05$ )。Floegel 等<sup>[37]</sup> 研究发现酚类化合物与 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率存在密切关系。经过复合乳酸菌发酵后使芸豆-蓝靛果复合发酵液总酚及黄酮含量显著升高, 这可能是导致芸豆-蓝靛果复合发酵液具有高抗氧化活性的原因。

### 2.7 芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中各指标相关性分析

表 4 为芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中总酚、黄酮、SOD 活力、DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率的相关性分析, 结果表明芸豆-蓝靛果复合发酵液中总酚和黄酮分别与抗氧化性具有良好的正相关性。由表 4 可知, 总酚及黄酮与 DPPH 自由基清除率呈现极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。乳酸菌发酵可改变酚类物质增强抗氧化能力。Wang 等<sup>[38]</sup> 探究了三株乳酸菌在发酵过程中对紫甘薯汁酚类物质和抗氧化能力的影响, 皮尔森相关分析显示 DPPH 自由基清除能力与咖啡酸和香草酸等酚酸类化合物含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。唐双庆等<sup>[39]</sup> 进行了发酵豆类中酚类物质与抗氧化活性的相关性分析, 发现总酚含量与 DPPH 自由基清除活性呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 这与本研究结果一致。

表 4 发酵过程中复合发酵液各参数相关性

Table 4 Correlation of parameters of composite fermentation liquid in fermentation process

指标	总酚	黄酮	SOD 活力	DPPH 自由基清除率	ABTS <sup>+</sup> 自由基清除率
总酚	1	0.991**	0.038	0.882**	0.638
黄酮	/	1	0.095	0.879**	0.725
SOD 活力	/	/	1	-0.305	0.328
DPPH 自由基清除率	/	/	/	1	0.672
ABTS <sup>+</sup> 自由基清除率	/	/	/	/	1

注: \*表示差异显著,  $P < 0.05$ ; \*\*表示差异极显著,  $P < 0.01$ 。

### 3 结论

利用 L1:L2 等比例复配发酵芸豆-蓝靛果复合汁, 发酵时间为 16 h、原料复配比例 1:1, 通过响应面优化得到最优工艺参数(初始 pH5.0、接种量 2%、发酵温度 34 ℃), 在此基础上对芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中的理化性质、生物活性成分与抗氧化能力进行检测。其中, 发酵 16 h 的总酚含量较发酵前提升了 886.90 μg/mL, 黄酮含量较发酵前提升了 138.01 μg/mL, DPPH 自由基清除率较发酵 0 h 提升了 0.31 倍。芸豆-蓝靛果复合发酵液发酵过程中总酚及黄酮含量与 DPPH 自由基清除率呈极显著正相关性 ( $P < 0.01$ )。因此, 复合乳酸菌发酵有利于芸

豆-蓝靛果中的活性物质含量提升,并可有效增强复合发酵液的抗氧化能力。未来,芸豆-蓝靛果复合发酵液抗氧化活性的物质基础仍需挖掘,其它功能活性还需进一步研究。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 蔡丽琴,王伟军,李延华,等.食用酵素发酵代谢及功能特性研究进展[J].食品工业科技,2021,42(20):408-414. [CAI L Q, WANG W J, LI Y H, et al. Research progress on fermentation metabolism and functional characteristics of edible fermented extract[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 408-414.]
- [2] XIE H, GAO P, LU Z, et al. Changes in physicochemical characteristics and metabolites in the fermentation of goji juice by *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. *Food Bioscience*, 2023, 54: 102881.
- [3] 周瑶,李娟,贾凤霞,等.单一及混合乳酸菌发酵对番木瓜汁品质的影响[J].食品与机械,2024,40(1):175-182. [ZHOU Y, LI J, JIA F X, et al. Lactic acid fermentation of papaya juice using single and mixed lactic acid bacteria[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 175-182.]
- [4] 尹欢,方伟.药食两用植物酵素活性成分及发酵机理研究进展[J].农产品加工,2020(3):89-91. [YIN H, FANG W. Research progress on active components and fermentation mechanism of medicinal and edible plants ferment[J]. *Farm Products Processing*, 2020(3): 89-91.]
- [5] AYDAR E F, MERTDİNÇ Z, DEMIRCAN E, et al. Kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) milk substitute as a novel plant-based drink; Fatty acid profile, antioxidant activity, *in-vitro* phenolic bioaccessibility and sensory characteristics[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 83: 103254.
- [6] 周欣雨,佐兆杭,王颖,等.超声处理对芸豆蛋白理化性质及抗氧化能力的影响[J].食品工业科技,2022,43(20):107-112. [ZHOU X Y, ZUO Z H, WANG Y, et al. Effects of ultrasonic treatment on physicochemical properties and antioxidant ability of kidney bean protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(20): 107-112.]
- [7] BAI Z, HUANG X, WU G, et al. Polysaccharides from red kidney bean alleviating hyperglycemia and hyperlipidemia in type 2 diabetic rats via gut microbiota and lipid metabolic modulation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134598.
- [8] 王何柱,朱勇,朱怡,等.7种芸豆中酚类化合物组成及其抗氧化活性[J].中国粮油学报,2020,35(9):28-33. [WANG H Z, ZHU Y, ZHU Y, et al. Composition and antioxidant activity of phenolic compounds in 7 kinds of kidney beans[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(9): 28-33.]
- [9] LOPES C, AKEL F C, de ALBUQUERQUE S A, et al. Effects of processing technologies on the antioxidant properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and lentil (*Lens culinaris*) proteins and their hydrolysates[J]. *Food Res Int*, 2023, 172: 113190.
- [10] 李凤凤.蓝靛果花色苷提取、抗氧化性研究及饮料研制[D].哈尔滨:东北农业大学,2019. [LI F F. Extraction and antioxidant of anthocyanin from blue honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* L.) and development of beverage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.]
- [11] 王鑫,毕海鑫,修伟业,等.发酵蓝靛果果汁的工艺优化及香气成分分析[J].食品工业科技,2023,44(13):176-185. [WANG X, BI H X, XIU W Y, et al. Process optimization and aroma composition analysis of fermented *Lonicera edulis* juice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(13): 176-185.]
- [12] 李山,张彦龙,曾伟民,等.蓝靛果果渣花色苷胶束的制备及其稳定性研究[J].食品工业科技,2024,45(2):21-29. [LI S, ZHANG Y L, ZENG W M, et al. Study on preparation and stability of anthocyanin micelles from *Lonicera edulis* pomace[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(2): 21-29.]
- [13] LI J, LI Z, MA Q, et al. Enhancement of anthocyanins extraction from haskap by cold plasma pretreatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023, 84: 103294.
- [14] SENICA M, STAMPAR F, MIKULIC-PETKOVSEK M. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L. subs. *edulis*) berry; A rich source of some nutrients and their differences among four different cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 238: 215-221.
- [15] SAINZ MARTINEZ A, KORNPOINTNER C, HASELMAIR-GOSCH C, et al. Dynamic streamlined extraction of iridoids, anthocyanins and lipids from haskap berries[J]. *LWT*, 2021, 138: 110633.
- [16] AKEEM S A, KOLAWOLE F L, JOSEPH J K, et al. Traditional food processing techniques and micronutrients bioavailability of plant and plant-based foods: A review[J]. *Annals Food Science and Technology*, 2019, 20: 30-41.
- [17] 张秀玲,汲润,李凤凤,等.发酵工艺对蓝靛果酒功能性及香气成分的影响[J].食品科学,2022,43(10):189-198. [ZHANG X L, JI R, LI F F, et al. Effects of fermentation processes on the functional and aroma components of *Lonicera edulis* wine[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 189-198.]
- [18] 包怡红,赵鑫磊,唐妍,等.蓝靛果米糠酵素发酵工艺优化及其代谢产物变化分析[J].中南林业科技大学学报,2022,42(2):147-158. [BAO Y H, ZHAO X L, TANG Y, et al. The optimization of fermentation technology and the changes of metabolites of *Lonicera caerulea* rice bran enzyme[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(2): 147-158.]
- [19] 李志芳,张裕,王颖,等.芸豆/大豆复合发酵液工艺优化及抗氧化活性研究[J].中国粮油学报,2022,37(1):164-169. [LI Z F, ZHANG Y, WANG Y, et al. Optimization and antioxidation of compound fermentation liquor of kidney bean and soybean[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(1): 164-169.]
- [20] 唐思煜,翁云丹,毛舸,等.添加蔗糖对裸燕麦酵素发酵过程中理化指标与活性成分变化的影响[J].食品工业科技,2019,40(15):78-83. [TANG S Y, WENG Y D, MAO K, et al. Effects of sucrose addition on the changes of physicochemical indexes and active components during oat *Jiaosu* fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(15): 78-83.]
- [21] 杜晓仪,杨继国,徐玉娟,等.不同益生菌对三华李发酵果汁品质及其体外消化特性的影响[J].食品工业科技,2024,45(2):143-151. [DU X Y, YANG J G, XU Y J, et al. Effects of different probiotics on the quality and *in vitro* digestion characteristics of fermented Sanhua plum juice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(2): 143-151.]
- [22] 边名鸿,袁天萌,杨南,等.乳杆菌强化发酵对苦荞酵素抗氧化特性及风味的影响[J].食品工业科技,2024,45(2):118-125. [BIAN M H, YUAN T M, YANG N, et al. Effects of lactobacillus enhanced fermentation on the antioxidant characteristics and flavor of tartary buckwheat *Jiaosu*[J]. *Science and Technology of Food In-*

- dustry, 2024, 45(2): 118–125. ]
- [ 23 ] 罗心欣, 成雨阳, 王周利, 等. 益生菌发酵猕猴桃汁工艺优化及香气成分动态解析[J]. *食品科学*, 2019, 40(12): 168–175. [ LUO X X, CHENG Y Y, WANG Z L, et al. Process optimization the development of fermented kiwifruit juice with probiotics and dynamic analysis of aroma composition[J]. *Food Science*, 2019, 40(12): 168–175. ]
- [ 24 ] de la FUENTE B, LUZ C, PUCHOL C, et al. Evaluation of fermentation assisted by *Lactobacillus brevis* POM, and *Lactobacillus plantarum* (TR-7, TR-71, TR-14) on antioxidant compounds and organic acids of an orange juice-milk based beverage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343: 128414.
- [ 25 ] MARKKINEN N, LAAKSONEN O, NAHKU R, et al. Impact of lactic acid fermentation on acids, sugars, and phenolic compounds in black chokeberry and sea buckthorn juices[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 204–215.
- [ 26 ] HUYNH N T, Van CAMP J, SMAGGHE G, et al. Improved release and metabolism of flavonoids by steered fermentation processes: A review[J]. *Int J Mol Sci*, 2014, 15(11): 19369–19388.
- [ 27 ] 王迪, 王颖, 张艳莉, 等. 芸豆酵素发酵过程中组分及抗氧化功能研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 18–24. [ WANG D, WANG Y, ZHANG Y L, et al. Components and antioxidant activity during the fermentation process of kidney bean Jiaosu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 18–24. ]
- [ 28 ] ZHU Y, JIANG J, YUE Y, et al. Influence of mixed probiotics on the bioactive composition, antioxidant activity and appearance of fermented red bayberry pomace[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 133: 110076.
- [ 29 ] 周佳悦, 夏晓雨, 侯艳丽, 等. 不同发酵方式蓝莓果酒发酵过程中理化指标和抗氧化能力的动态变化[J]. *中国酿造*, 2023, 42(5): 132–138. [ ZHOU J Y, XIA X Y, HOU Y L, et al. Dynamic changes of physicochemical indexes and antioxidant capacity of blueberry wine during fermentation with different fermentation methods[J]. *China Brewing*, 2023, 42(5): 132–138. ]
- [ 30 ] 李紫微, 曹庸, 苗建银. 大豆异黄酮及其苷元的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(20): 348–355. [ LI Z W, CAO Y, MIAO J Y. Research progress of soybean isoflavones and their aglycones[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(20): 348–355. ]
- [ 31 ] SHI F, WANG L, LI S. Enhancement in the physicochemical properties, antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile compounds of watermelon juices through *Lactobacillus plantarum* JHT78 fermentation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 420: 136146.
- [ 32 ] VERON H E, GAUFFIN C P, FABERSANI E, et al. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice fermented with autochthonous *Lactobacillus plantarum* S-811[J]. *Food Function*, 2019, 10(2): 1085–1097.
- [ 33 ] 王思溥, 朱丹, 牛广财, 等. 黑果腺肋花楸酵素自然发酵过程中主要成分与抗氧化活性变化[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(15): 93–100. [ WANG S B, ZHU D, NIU G C, et al. Changes of main components and antioxidant activity of black chokeberry Jiaosu in natural fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(15): 93–100. ]
- [ 34 ] 刘秀娟, 李庆鹏, 崔龙, 等. 混菌发酵苹果酵素工艺研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1): 190–198. [ LIU X J, LI Q P, CUI L, et al. Study on the process of mixed fermented apple Jiaosu[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(1): 190–198. ]
- [ 35 ] WANG J, WEI B, XU J, et al. Influence of lactic acid fermentation on the phenolic profile, antioxidant activities, and volatile compounds of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) juice[J]. *J Food Sci*, 2024, 89(2): 834–850.
- [ 36 ] 陈惠敏, 吴晓平, 汪少芸. 黑豆粕饮料发酵工艺的优化及其抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(5): 129–138. [ CHEN H M, WU X P, WANG S Y. Optimization of fermentation technology and evaluation of antioxidant activity of black soybean meal beverage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(5): 129–138. ]
- [ 37 ] FLOEGEL A, KIM D, CHUNG S, et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(7): 1043–1048.
- [ 38 ] WANG Z, TONG Y, TONG Q, et al. Effects of different lactic acid bacteria on phenolic profiles, antioxidant capacities, and volatile compounds in purple sweet potato juice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2024, 61(9): 1800–1810.
- [ 39 ] 唐双庆, 鲁慧琪, 李秀丽, 等. 枯草芽孢杆菌发酵对豆类中酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(1): 291–300. [ TANG S Q, LU H Q, LI X L, et al. Effects of *Bacillus subtilis* fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity in legumes[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(1): 291–300. ]