

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

田欢, 裴龙英, 布海丽且姆 阿卜杜热合曼, 房丹丹, 姜露熙, 李倩, 张坤, 彭静, 申雪

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

TIAN Huan, PEI Longying, BUHAILIQIEMU · Abdureheman, FANG Dandan, JIANG Luxi, LI Qian, ZHANG Kun, PENG Jing, and SHEN Xue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030084>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合乳酸菌发酵枸杞汁的工艺优化

Optimization of Fermentation Technology of *Lycium barbarum* Juice by Compound Lactic Acid Bacteria

食品工业科技. 2019, 40(8): 177-183 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.030>

自然发酵泡菜中高体外抗氧化活性乳酸菌的筛选及其对模拟胃肠道环境的耐受性

Screening of High Antioxidant Activity Lactic Acid Bacteria in Traditional Fermented Pickles and Its Tolerance to Simulated Gastrointestinal Environments

食品工业科技. 2019, 40(22): 93-97,103 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.017>

桑葚汁多菌种发酵过程主要成分及抗氧化性的变化

The change of index and antioxidant activity in mulberry juice fermentation process

食品工业科技. 2017(19): 131-135 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.025>

乳酸菌发酵枸杞过程中理化指标及风味物质的变化

Changes of Physicochemical Indexes and Flavor Components in the Fermentation Process of *Lycium barbarum* by Lactic Acid Bacteria

食品工业科技. 2019, 40(9): 6-12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.002>

中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响

Effects of Short- and Medium-wave Infrared Radiation Drying on Drying Characteristics, Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Mulberry

食品工业科技. 2021, 42(12): 39-45 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090209>

米根霉和乳酸菌混合固态发酵大麦仁工艺优化及其抗氧化活性

Optimization of Mixed Solid-state Fermentation Process of Dehusked Barley with *Rhizopus oryzae* and *Lactobacillus* and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2018, 39(22): 169-174 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.22.030>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

田欢, 裴龙英, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 等. 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 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 90-100. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030084

TIAN Huan, PEI Longying, BUHAILIQIEMU · Abdureheman, et al. Optimization of the Fermentation Process of Mulberry Juice by Lactic Acid Bacteria and Changes in Functional Components and Antioxidant Activity during Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 90-100. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030084

· 研究与探讨 ·

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

田欢^{1,2}, 裴龙英^{1,2}, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼^{1,2}, 房丹丹^{1,2}, 姜露熙^{1,2}, 李倩^{1,2},
张坤^{1,2}, 彭静^{1,2}, 申雪^{1,2,*}

(1. 新疆理工学院食品科学与工程学院, 新疆阿克苏 843000;
2. 新疆黑木耳工程技术研究中心, 新疆阿克苏 843000)

摘要:以桑葚为原材料, 采用植物乳杆菌、长双歧杆菌对桑葚汁进行单菌株和混合菌株发酵, 利用单因素实验和响应面试验探究发酵桑葚汁的最佳发酵工艺, 并测定分析桑葚汁在发酵过程中的功能性成分(总黄酮、总花青素、总酚)和抗氧化活性(ABTS⁺自由基清除率、DPPH 自由基清除率、羟自由基清除率、总抗氧化能力)等。结果表明, 发酵桑葚汁最佳发酵工艺为菌种添加量 0.06%, 初始 pH6.1, 发酵温度 37 ℃, 低聚果糖添加量 0.09%。乳酸菌发酵提高了发酵桑葚汁的功能性成分和抗氧化活性; 单菌株和混合菌株相比, 混合菌株发酵可显著提高 ($P<0.05$) 桑葚汁功能性化合物含量, 且未发酵桑葚汁和混合菌株发酵 48 h 后含量分别为总黄酮 4.18~6.36 mg/mL, 总花青素 0.67~1.95 mg/mL, 总酚 12.62~18.65 mg/mL; 混合菌株发酵 48 h 桑葚汁的抗氧化活性得到明显提升, ABTS⁺自由基清除率 61.81%~88.17%, DPPH 自由基清除率 52.78%~81.64%, 羟自由基清除率 37.38%~86.07%, 总抗氧化能力 17.85~29.49 mmol/L。植物乳杆菌、长双歧杆菌混合菌株发酵具有更好的感官特性。研究可为桑葚精深加工提供理论参考。

关键词:桑葚, 乳酸菌, 发酵工艺, 功能性, 抗氧化活性

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)23-0090-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030084



本文网刊:

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

TIAN Huan^{1,2}, PEI Longying^{1,2}, BUHAILIQIEMU · Abdureheman^{1,2}, FANG Dandan^{1,2}, JIANG Luxi^{1,2},
LI Qian^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, PENG Jing^{1,2}, SHEN Xue^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843000, China;
2. Xinjiang Black Fungus Engineering Technology Research Center, Aksu 843000, China)

Abstract: Using mulberry as raw material, single and mixed strains of *Lactobacillus plantarum* and *Bifidobacterium longum* were used to ferment mulberry juice, and single-factor and response surface tests were used to investigate the optimal fermentation process of fermented mulberry juice, and to determine and analyze the functional components (total flavonoids, total anthocyanins, total phenols) and antioxidant activities (ABTS⁺ free radical scavenging rate, DPPH free radical scavenging rate, hydroxyl radical scavenging rate, total antioxidant capacity), etc. The results showed that the

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 2022 年新疆维吾尔自治区大学生创新创业训练计划项目 (S202213558002); 新疆理工学院校级重点科研项目 (ZZ202203); 新疆理工学院校级一般科研项目 (ZY202204)。

作者简介: 田欢 (1995-), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 果蔬加工与贮藏, E-mail: tianhuan69@163.com。

* 通信作者: 申雪 (1995-), 女, 硕士, 助教, 研究方向: 农产品加工与安全, E-mail: 741462129@qq.com。

optimal fermentation process for fermented mulberry juice was 0.06% strain addition, initial pH6.1, fermentation temperature 37 °C, and 0.09% oligofructose addition. The fermentation of lactic acid bacteria improved the functional components and antioxidant activity of fermented mulberry juice. Compared with single strain and mixed strain, the fermentation of mixed strain significantly increased ($P<0.05$) the content of functional compounds in mulberry juice, and the contents of unfermented mulberry juice and mixed strain after 48 h fermentation were 4.18~6.36 mg/mL of total flavonoids, 0.67~1.95 mg/mL of total anthocyanins, 12.62~18.65 mg/mL of total phenols. And 48 h fermentation of the mixed strains significantly improved the antioxidant activity of mulberry juice, with ABTS⁺ free radical scavenging rate 61.81%~88.17%, DPPH free radical scavenging rate 52.78%~81.64%, hydroxyl radical scavenging rate 37.38%~86.07%, total antioxidant capacity 17.85~29.49 mmol/L. The fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Bifidobacterium longum* mixed strains had better organoleptic properties. The study can provide a theoretical reference for the deep processing of mulberry.

Key words: mulberry; lactic acid bacteria; fermentation process; functionality; antioxidant activity

桑葚(*Fructus mori*), 又名桑葚子、桑果等, 为桑科植物桑树的果实^[1]。桑葚中含有丰富的活性蛋白、维生素、氨基酸、胡萝卜素和矿物质等营养成分^[2-3], 营养价值非常高, 享有“民间圣果”的美誉。桑葚还具有延缓衰老、保护血管、保护视力、提高免疫力、促进消化和预防便秘的功效^[4-6]。但桑葚采收期短, 不易贮藏, 每年有大量的桑葚腐烂在田地, 因此将桑葚加工为果酒和饮料等产品可有效解决桑葚采收期的困难, 同时能提高桑葚的商业价值, 满足人们对桑葚的需求。尹俊涛等^[7]以蔓越莓与桑葚为原料研究蔓越莓桑葚复合饮料工艺; 孙百虎^[8]通过不同乳酸菌发酵桑葚汁, 其活菌数均超过 11 lg(CFU/mL), 且乳酸菌发酵能有效提高总酚和总黄酮含量。

乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB), 是能将碳水化合物发酵产生大量乳酸的一类无芽孢、革兰氏染色阳性细菌的统称^[9]; 乳酸菌能改善动物机体的肠道菌群结构, 维持肠道菌群平衡^[10-11]; 乳酸菌发酵产生的各种消化酶可以将大分子物质分解为小肽、葡萄糖等更易被消化吸收的小分子颗粒状物质, 有助于机体的吸收, 提高机体的免疫功能^[12-14]; 乳酸菌发酵可提高产品的营养价值, 改善产品风味^[15-17]。长双歧杆菌具有调节人体肠道, 改善健康的功效作用, 可适用于乳酸菌食品的加工过程。植物乳杆菌广泛应用于水果、蔬菜、牛羊乳和酒类等各类食品, 用来制作各类乳酸菌加工制品。虽然关于乳酸菌发酵桑葚汁的相关研究较多, 但对单菌株和混合菌株发酵桑葚汁工艺优化及单菌株和混合菌株发酵之间的功能性成分和抗氧化活性的区别研究较少。因此本研究采用植物乳杆菌、长双歧杆菌对桑葚汁进行单菌株和混合菌株发酵实验, 利用单因素和响应面试验优化桑葚汁发酵工艺, 并测定单菌株和混合菌株发酵桑葚汁的 pH、可溶性固形物、乳酸菌活菌数、总糖、总酸、功能性成分和抗氧化活性, 对比分析不同乳酸菌发酵桑葚汁的区别, 研究可为桑葚的深加工利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

桑葚 采摘自新疆阿克苏; 长双歧杆菌(*Bifido-*

bacterium longum 18, BL)、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* 56, LP) 西安米先尔生物科技有限公司; 碳酸钠、柠檬酸、果胶酶(酶活 30000 U/g) 均为食品级, 购自江苏佰叶生物科技有限公司; 低聚果糖(食品级)、葡萄糖(食品级)、盐酸、三氯乙酸、三氯化铁、亚硝酸钠、过硫酸钾、水杨酸、铁氰化钾均为分析纯, 购自天津运盛化学品有限公司; MRS 培养基 购自天津市盛奥化学试剂有限公司; DPPH、ABTS、芦丁、没食子酸 购自成都市科龙化工试剂厂; 无水乙酸钠、氢氧化钠、硫酸亚铁、30% 过氧化氢、硝酸铝、硫酸铜 分析纯, 购自武汉荆隆化工有限公司; 磷酸二氢钠、磷酸氢二钠 均为分析纯, 购自福晨化学试剂厂; 酚酞、3,5 二硝基水杨酸(DNS)、碘、碘化钾 购自天津市盛放化学试剂; 福林酚 分析纯, 购自上海麦克林生化科技有限公司; 总抗氧化试剂盒 购自北京索宝莱科技有限公司。

HWS-24 恒温水浴锅 上海精密仪器仪表有限公司; BM04 高精度数显糖度计 惠州市优普森仪器有限公司; pHS-3C 型 pH 计 上海蚁霖科学仪器有限公司; FA1004 型电子天平 上海佑科仪器仪表有限公司; L18-Y912C 九阳破壁机 九阳泰盛有限公司; 330-5B 型恒温培养箱 玖蓝科学仪器; XFS-280CB 型高压灭菌锅 尚城仪器经营部; SW-CJ-2FD 型超净工作台 鸿运实验仪器; UV759 紫外可见分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司; DNM-9602G 酶标分析仪 北京普朗新技术有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 桑葚汁发酵工艺流程 桑葚挑选→榨汁过滤→果胶酶浸提→调配发酵液→高温杀菌→接种乳酸菌发酵→发酵桑葚汁成品

1.2.2 桑葚汁发酵工艺操作要点 桑葚挑选: 挑选无虫害、无霉病的桑葚, 用蒸馏水将桑葚表面的污垢进行清洗, 清洗完成后沥干表面水分。

榨汁过滤: 将沥干水分的桑葚进行榨汁, 随后用 8 层无菌纱布进行过滤, 得到桑葚汁。

果胶酶浸提: 称取 0.03% 果胶酶(30000 U/g) 加入过滤得到的桑葚汁中, 随后放入 45 °C 恒温水浴锅中酶解 2 h。

调配发酵液:向发酵液中添加低聚果糖,随后使用碳酸钠调节酶解后发酵液的初始 pH,使用数显糖度计测定发酵液的可溶性固形物为 16.43°Brix。

高温杀菌:将调配好的发酵液放入水浴锅中进行高温杀菌(95 °C 灭菌 30 min),灭菌完成后自然冷却至室温。

接种乳酸菌发酵:向冷却好的发酵液中加入活化菌株(10 mL 葡萄糖水溶液活化 20 min,活化后的菌种浓度为 6.0 lg(CFU/mL),将活化好的菌株按一定比例接种至发酵液中,随后放入恒温培养箱中进行厌氧发酵 48 h,发酵完成后得到成品。

1.2.3 桑葚汁发酵工艺单因素实验

1.2.3.1 菌种类型对感官评分和活菌数的影响 设置菌种类型为 LP、BL、LP&BL(1:1),按照 1.2.1 中的工艺流程进行样品处理,固定初始 pH 为 6.0,低聚果糖添加量 0.09%,菌种添加量 0.06%,发酵温度 37 °C,以发酵后的感官评分和活菌数为评价指标,确定最佳发酵菌种类型。

1.2.3.2 初始 pH 对感官评分和活菌数的影响 设置初始 pH 为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0,按照 1.2.1 中的工艺流程进行样品处理,固定菌种类型为 LP&BL(1:1),低聚果糖添加量 0.09%,菌种添加量 0.06%,发酵温度 37 °C,以发酵后的感官评分和活菌数为评价指标,确定最佳初始 pH。

1.2.3.3 低聚果糖添加量对感官评分和活菌数的影响 设置低聚果糖添加量为 0.03%、0.06%、0.09%、0.12%、0.15%,按照 1.2.1 中的工艺流程进行样品处理,固定菌种类型为 LP&BL(1:1),初始 pH 为 6.0,菌种添加量 0.06%,发酵温度 37 °C,以发酵后的感官评分和活菌数为评价指标,确定最佳低聚果糖添加量。

1.2.3.4 菌种添加量对感官评分和活菌数的影响 设置菌种添加量为 0.02%、0.04%、0.06%、0.08%、0.10%,按照 1.2.1 中的工艺流程进行样品处理,固定菌种类型为 LP&BL(1:1),初始 pH 为 6.0,低聚果糖添加量 0.09%,发酵温度 37 °C,以发酵后的感官评分和活菌数为评价指标,确定最佳菌种添加量。

1.2.3.5 发酵温度对感官评分和活菌数的影响 设置发酵温度为 33、35、37、39、41 °C,按照 1.2.1 中的工艺流程进行样品处理,固定菌种类型为 LP&BL(1:1),初始 pH 为 6.0,低聚果糖添加量 0.09%,菌种添加量 0.06%,以发酵后的感官评分和活菌数为评价指标,确定最佳发酵温度。

1.2.4 桑葚汁发酵工艺响应面试验 以单因素实验结果为基础,选择菌种添加量、初始 pH、发酵温度和低聚果糖添加量为影响因素,以感官评分和活菌数为响应值进行响应面试验,响应面试验因素与水平见表 1。

1.2.5 感官评价 参照盛洁等^[18]方法稍作修改,制

表 1 响应面试验因素与水平

Table 1 Response surface test factors and levels

因素	水平		
	-1	0	1
A菌种添加量(%)	0.04	0.06	0.08
B初始pH	5.5	6.0	6.5
C发酵温度(°C)	35	37	39
D低聚果糖添加量(%)	0.06	0.09	0.12

定发酵桑葚汁的感官评价标准;感官评价选取 15 名身体健康且经过感官评价培训的人员,按照感官评分表对发酵桑葚汁进行感官评定,最终评价结果取平均值,感官评分表见表 2。

表 2 发酵桑葚汁感官评分表

Table 2 Sensory score table of fermented mulberry juice

评分项目	评分标准	分值(分)
色泽(20分)	能呈现桑葚汁的深红色,色泽均匀	15~20
	较能呈现桑葚汁的深红色,色泽较均匀	6~14
	不能呈现桑葚汁的深红色,色泽不均匀,有杂色	<6
口感(40分)	口感协调,酸甜适中	30~40
	口感较协调,但稍酸或稍甜	20~29
	口感略协调,但过酸或过甜	10~19
	口感不协调	<10
气味(20分)	气味协调,桑葚气味浓郁,无杂味	15~20
	气味适中,桑葚气味较淡,稍有杂味	8~14
	气味不协调,有杂味	<8
形态(20分)	组织形态均匀,无沉淀	15~20
	组织形态较均匀,略有沉淀	7~14
	组织形态不均匀,有沉淀	<7

1.2.6 理化指标检测方法 采用 pH 计测定 pH;可溶性固形物采用数显糖度计进行测定;乳酸菌活菌数测定参照 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》^[19],总糖测定采用 3,5 二硝基水杨酸法^[20];总酸测定参照 GB 123456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》^[21]。

1.2.7 功能性成分检测方法

1.2.7.1 总酚含量测定 参照 Kwaw 等^[22]方法稍作修改;取 2 mL 成品样品,加入 13 mL 蒸馏水、1.5 mL 福林酚,室温避光放置 5 min,加入 3 mL 12% 碳酸钠溶液,蒸馏水定容 25 mL。室温避光放置 90 min,于 765 nm 波长测定吸光度,使用没食子酸为标准品制作标准曲线 $y=0.1125x+0.046$, $R^2=0.9958$,总酚含量以没食子酸含量计。

1.2.7.2 总黄酮含量测定 参照 Gao 等^[23]方法稍作修改;取 2 mL 成品样品加入 0.6 mL 5% 亚硝酸钠溶液,放置 6 min;加入 0.6 mL 10% 硝酸铝溶液,放置 6 min;再加 8 mL 4% 氢氧化钠溶液;用蒸馏水定容至 15 mL,充分摇晃 3 min。于 508 nm 波长测定吸光度,使用芦丁为标准品制作标准曲线 $y=0.0539x+0.0158$, $R^2=0.9979$,总黄酮含量以芦丁含量计。

1.2.7.3 总花青素含量测定 采用 pH 示差法; 取 10 mL 成品样品, 用氯化钾-盐酸缓冲液(pH1.0)和乙酸钠-盐酸缓冲液(pH4.5)定容至 20 mL; 避光放置 90 min, 于 525 nm 和 700 nm 波长测定吸光度。

$$A = \text{pH}1(A_{525} - A_{700}) - \text{pH}4.5(A_{525} - A_{700})$$

$$\text{总花色苷含量}(\text{mg/mL}) = \frac{A \times M_w}{\epsilon \times I} \times \text{DF} \times 1000$$

式中: M_w 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷分子量 449.2; ϵ 为矢车菊素-3-葡萄糖苷摩尔消光系数 26900; I 为比色皿光程 1 cm; DF 为稀释因子 10。

1.2.8 抗氧化指标检测方法

1.2.8.1 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率和总抗氧化能力测定 参照 Chen 等^[24]方法; DPPH 自由基清除率和 ABTS⁺自由基清除率按下式计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = 1 - \left(\frac{A_1 - A_2}{A_3} \right) \times 100$$

式中: A_1 为样品吸光值, A_2 为对照组吸光值, A_3 为空白组吸光值。

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

式中: A_1 为空白组吸光值, A_2 为样品吸光值。

总抗氧化能力中以硫酸亚铁为标准品制作标准曲线 $y=0.0995x+0.1209$, $R^2=0.9936$, 总抗氧化能力以硫酸亚铁含量表示。

1.2.8.2 ·OH 清除率测定 参照李佩佩等^[25]方法; ·OH 清除率按下式计算:

$$\cdot\text{OH 清除率}(\%) = 1 - \left(\frac{A_1 - A_2}{A_3} \right) \times 100$$

式中: A_1 为样品吸光值, A_2 为对照组吸光值, A_3 为空白组吸光值。

1.3 数据处理

每组实验平行测定 3 次, 对得到的数据采用 Design-ExpertV8.0.6 和 SPSS 25.0 分析处理实验数据, origin8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 菌种对桑葚汁感官评分和活菌数的影响 由图 1 可知, 不同乳酸菌发酵的感官评分和活菌数各不相同, 植物乳杆菌发酵的活菌数比长双歧杆菌高, 呈显著性差异($P<0.05$), 可能是植物乳杆菌适应生长能力较强, 在桑葚汁发酵液中的生长代谢较好; 在菌种发酵方式方面, 植物乳杆菌和长双歧杆菌均匀混合配比发酵桑葚汁的感官评分和活菌数最高, 可能是由于混合菌种发酵时不同种类菌种发酵特性的协同作用, 丰富了产品的口感, 同时提高活菌数。综合考虑感官评分和活菌数的变化, 选择植物乳杆菌和长双歧杆菌均匀混合配比进行发酵。

2.1.2 初始 pH 对桑葚汁感官评分和活菌数的影响

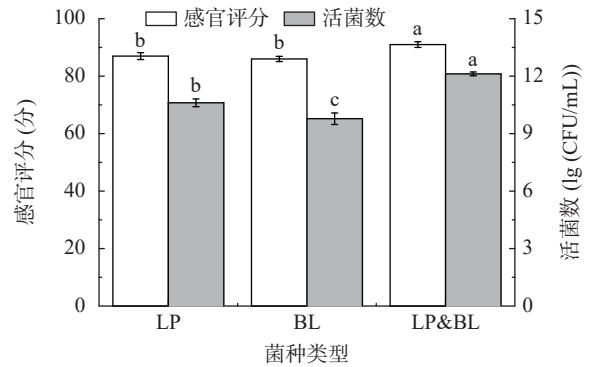


图 1 菌种类型对桑葚汁感官评分和活菌数的影响

Fig.1 Effects of culture model on sensory score and viable bacteria count of mulberry juice

注: LP 代表植物乳杆菌; BL 代表长双歧杆菌; LP&BL 代表植物乳杆菌和长双歧杆菌(1:1)均匀混合配比发酵; 图中不同小写字母表示同一评价指标下不同因素间存在显著差异($P<0.05$), 图 2~图 5 同。

不同初始 pH 对发酵产品的感官评分和活菌数均有影响; 由图 2 可知, 感官评分和活菌数随 pH 的升高呈先增大后降低的变化趋势, 当桑葚汁初始 pH 为 6.0 时其感官评分和活菌数最高。感官评分的变化可能是在初始 pH 较小时发酵液环境适宜乳酸菌的繁殖, 乳酸菌发酵可增加发酵液中的有机酸类和低浓度乙醛等芳香物质, 且乳酸菌发酵可使发酵液中的物质更细腻^[26], 提升产品口感; 初始 pH 为 6.0 时达到乳酸菌发酵最适生长环境, 感官评分最高。随着初始 pH 升高, 碳酸钠加入量过多使得产品风味变差, 感官评分降低。活菌数变化趋势可能是由于乳酸菌的生长繁殖条件所影响, 在初始 pH 较低的环境下会增加乳酸菌的发酵延滞期, 乳酸菌的生长繁殖会减缓^[27]; 初始 pH 升高会使发酵液中的离子平衡发生移动, 降低发酵液中的有效营养成分, 限制了乳酸菌的生长繁殖。综合考虑感官评分和活菌数的变化, 故选择初始 pH 为 5.5、6.0 和 6.5 进行响应面试验。

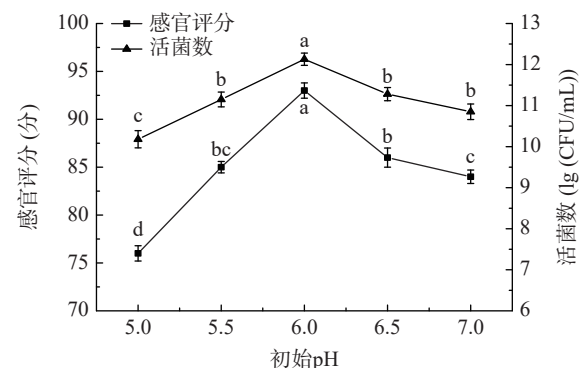


图 2 初始 pH 对桑葚汁感官评分和活菌数的影响

Fig.2 Effects of initial pH on sensory score and viable bacteria count of mulberry juice

2.1.3 低聚果糖添加量对桑葚汁感官评分和活菌数的影响 低聚果糖由植物的果糖短链组成, 是一种水溶性膳食纤维, 同时也被作为益生元应用于益生菌生长研究中^[28]。由图 3 可知, 随着低聚果糖添加量的

增大,感官评分和活菌数均呈现先升高后下降的趋势。在低聚果糖添加量为 0.09% 时,感官评分最高为 93 分,活菌数达到最大值为 12.31 lg(CFU/mL),这可能是由于低聚果糖具有促进益生菌生长的功能^[29-30];当添加适量低聚果糖时,可有效促进桑葚汁中乳酸菌的生长繁殖,低聚果糖添加量过多时,加快了乳酸菌的生长速度,其代谢产物乳酸等酸类化合物产量增大,影响了发酵液中乳酸菌的活菌数量,同时使产品口感受到影响。综合考虑,故选择低聚果糖添加量 0.06%、0.09%、0.12% 进行响应面试验。

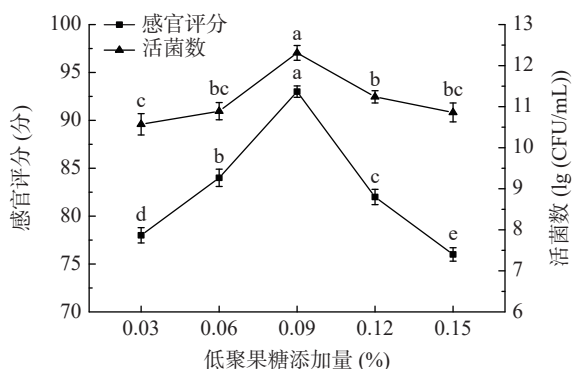


图3 低聚果糖添加量对桑葚汁感官评分和活菌数的影响
Fig.3 Effects of fructooligosaccharide addition on sensory score and viable bacteria count of mulberry juice

2.1.4 菌种添加量对桑葚汁感官评分和活菌数的影响 由图4可知,菌种添加量在 0.02%~0.06% 范围内感官评分和活菌数均呈上升趋势,且上升幅度较大,当菌种添加量为 0.06% 时,感官评分和活菌数达到最大,分别为 90 分和 12.16 lg(CFU/mL);菌种添加量大于 0.06% 时,感官评分和活菌数均下降,感官评分下降幅度较大。可能是由于菌种添加量过高时,发酵液内的营养成分无法满足过量乳酸菌的生长代谢需求,影响乳酸菌的生长繁殖,进而降低活菌数量^[31];同时过量乳酸菌在发酵时会产生大量酸类化合物,使桑葚汁感官评分降低。综合考虑选择菌种添加量 0.04%、0.06% 和 0.08% 进行响应面试验。

2.1.5 发酵温度对桑葚汁感官评分和活菌数的影响

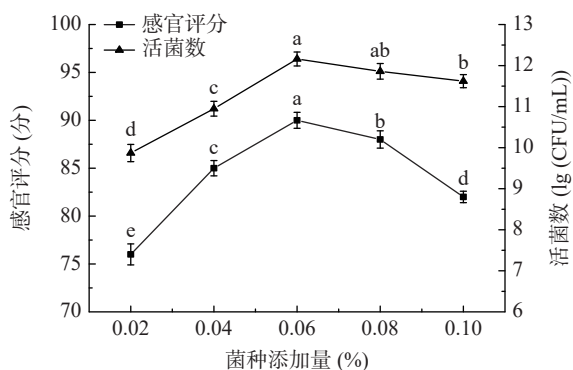


图4 菌种添加量对桑葚汁感官评分和活菌数的影响
Fig.4 Effects of bacterial strains addition on sensory score and viable bacteria count of mulberry juice

由图5可知,活菌数随着发酵温度上升呈先增大后减小的趋势,发酵温度在 37 °C 时活菌数达到最大;这可能是由于乳酸菌的最适生长温度所致,当温度过高时会使乳酸菌失去活性,影响乳酸菌的活菌数^[32]。发酵温度为 37 °C 时感官评分最大为 90 分,发酵温度高于 37 °C 感官评分降低,可能是由于温度过高影响了桑葚汁中香味成分,破坏桑葚汁中的呈味物质,同时乳酸菌发酵也对感官评分有所影响。综合考虑感官评分和活菌数的变化,选择发酵温度 35、37 和 39 °C 进行响应面试验。

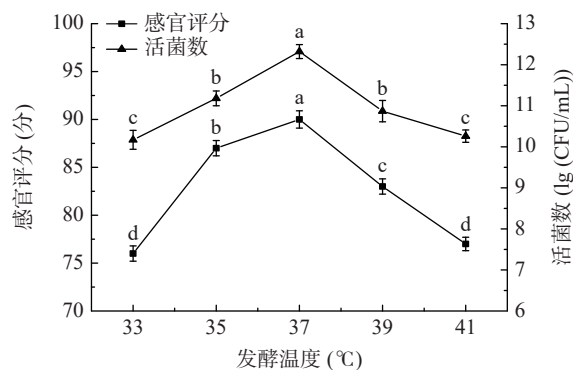


图5 发酵温度对桑葚汁感官评分和活菌数的影响
Fig.5 Effects of fermentation temperature on sensory score and viable bacteria count of mulberry juice

2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 试验设计方案与结果 根据单因素实验结果,选取菌种添加量(0.04%、0.06%、0.08%)、初始 pH(5.5、6.0、6.5)、发酵温度(35、37 和 39 °C)和低聚果糖添加量(0.06%、0.09%、0.12%)为影响因素,以感官评分和活菌数为响应值进行响应面试验,试验设计方案与结果见表3。

2.2.2 回归模型与方差分析 利用响应面处理软件进行数据整理拟合,得到桑葚汁发酵工艺感官评分(Y)和活菌数(M)的多元二次回归方程:

$$Y=90.78+1.80A+4.50B+2.81C+2.51D+0.65AB+0.48AC-0.27AD+1.32BC-1.02BD+1.72CD-3.51A^2-5.09B^2-5.10C^2-3.67D^2$$

$$M=12.26+0.27A+0.22B+0.31C+0.17D-0.20AB-0.075AC-0.15AD+0.025BC-0.025BD+0.025CD-0.80A^2-0.59B^2-0.53C^2-0.44D^2$$

对拟合的模型进行方差分析,结果见表4,感官评分(Y)和活菌数(M)的模型为差异极显著($P<0.01$),失拟项结果显示不显著($P>0.05$),且感官评分(Y)和活菌数(M)模型的相关系数分别为 $R^2(Y)=96.52%$ 、 $R^2(M)=97.07%$,校正系数分别为 $R^2_{Adj}(Y)=93.04%$ 、 $R^2_{Adj}(M)=94.13%$,综上可知感官评分(Y)和活菌数(M)的模型拟合度较好,模型可用于桑葚汁发酵工艺的结果预测。

由表4可知,感官评分(Y)模型中一次项 A、B、C、D 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对感官评分结果呈差异极显著($P<0.01$),交互项 CD 呈差异显著($P<0.05$),

表 3 响应面试验设计方案与结果

Table 3 Response surface experimental design and results

实验号	A菌种 添加量	B初始 pH	C发酵 温度	D低聚果糖 添加量	Y感官 评分(分)	M活菌数(lg (CFU/mL))
1	-1	0	-1	0	78.2	10.3
2	1	0	0	1	85.7	11.2
3	0	0	1	1	89.8	11.8
4	0	0	0	0	91.3	12.2
5	-1	0	1	0	83.5	11.3
6	0	0	0	0	90.1	12.3
7	0	1	1	0	89.6	11.6
8	1	0	1	0	88.3	11.5
9	0	1	-1	0	81.5	11.1
10	1	0	-1	0	81.1	10.8
11	-1	0	0	-1	80.5	10.5
12	0	0	0	0	90.3	12.2
13	0	0	-1	1	81.2	11.2
14	0	-1	0	1	82.5	11.3
15	0	1	0	1	87.3	11.7
16	1	-1	0	0	78.5	11.2
17	0	-1	0	-1	75.9	10.8
18	0	-1	1	0	76.6	11.1
19	0	1	0	-1	84.8	11.3
20	0	0	0	0	91.7	12.4
21	-1	1	0	0	83.8	10.9
22	0	0	1	-1	78.6	11.3
23	-1	0	0	1	83.8	10.9
24	1	0	0	-1	83.5	11.4
25	0	-1	-1	0	73.8	10.7
26	0	0	-1	-1	76.9	10.8
27	-1	-1	0	0	75.3	10.1
28	1	1	0	0	89.6	11.2
29	0	0	0	0	90.5	12.2

其余为不显著($P>0.05$);活菌数(M)模型中一次项 A、B、C、D 和二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对活菌数结果呈差异极显著($P<0.01$),交互项 AB 呈差异显著($P<0.05$),其余为不显著($P>0.05$);同时 F 值能反映出响

应面因素对响应值的影响大小,响应面因素对感官评分(Y)的影响顺序为初始 pH>发酵温度>低聚果糖添加量>菌种添加量,对活菌数(M)的影响顺序为发酵温度>菌种添加量>初始 pH>低聚果糖添加量。

2.2.3 响应面因素交互作用 响应面三维立体图是由响应面因素与响应值构成,可通过响应面三维立体图的曲面弯曲坡度反映两个响应面因素之间的交互作用强弱,曲面弯曲坡度越大,交互作用越强,对响应值的影响越大;同时响应面三维立体图中的等高线图反映出两个响应面因素间的交互作用显著性,等高线图越接近椭圆的说明两个响应面因素间的交互作用越明显,呈显著性差异^[33-34]。

由图 6 可知,感官评分(Y)和活菌数(M)与四个响应面因素间形成的响应面图曲面弯曲坡度均较大,且坡面较陡,说明四个响应面一次项和二次项因素对感官评分(Y)和活菌数(M)的影响均为差异极显著;发酵温度(C)和低聚果糖(D)形成的响应面图坡度较小,说明二者交互作用对感官评分(Y)的影响为差异显著;同时菌种添加量(A)和初始 pH(B)的交互作用对活菌数(M)的影响为差异显著。

2.2.4 模型验证实验 通过响应面软件模拟分析得到响应面因素对感官评分影响的发酵桑葚汁工艺参数为菌种添加量 0.066%,初始 pH6.24,发酵温度 37.48 °C,低聚果糖 0.101%,此时感官评分最高为 93.175 分。响应面因素对活菌数影响的发酵桑葚汁工艺参数为菌种添加量 0.062%,初始 pH6.083,发酵温度 37.41 °C,低聚果糖 0.094%,此时活菌数最高为 12.354 lg (CFU/mL)。发酵桑葚汁工艺以活菌数为第一评价指标,感官评分为第二评价指标,在活菌数最高的条件下,感官评分为 92.885 分,与感官评分最

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Variance analysis of regression models

方差来源	平方和(Y/M)	自由度	均方(Y/M)	F值(Y/M)	P值(Y/M)	显著性(Y/M)
模型	808.21/9.53	14/14	57.73/0.68	27.75/33.1	<0.0001/<0.0001	**/**
A	38.88/0.91	1/1	38.88/0.91	18.69/44.14	0.0007/<0.0001	**/**
B	243/0.56	1/1	243/0.56	116.8/27.4	<0.0001/0.0001	**/**
C	94.64/1.14	1/1	94.64/1.14	45.49/55.49	<0.0001/0.0001	**/**
D	75.5/0.33	1/1	75.5/0.33	36.29/16.21	<0.0001/0.0012	**/**
AB	1.69/0.16	1/1	1.69/0.16	0.81/7.78	0.3827/0.0145	/*
AC	0.9/0.022	1/1	0.9/0.022	0.43/1.09	0.5208/0.3132	/
AD	0.3/0.09	1/1	0.3/0.09	0.15/4.38	0.7087/0.0551	/
BC	7.02/2.50E-03	1/1	7.02/2.50E-03	3.38/0.12	0.0875/0.7325	/
BD	4.2/2.50E-03	1/1	4.2/2.50E-03	2.02/0.12	0.1771/0.7325	/
CD	11.9/2.50E-03	1/1	11.9/2.50E-03	5.72/0.12	0.0314/0.7325	*/
A^2	79.95/4.16	1/1	79.95/4.16	38.43/202.34	<0.0001<0.0001	**/**
B^2	167.78/2.25	1/1	167.78/2.25	80.64/109.21	<0.0001<0.0001	**/**
C^2	168.6/1.79	1/1	168.6/1.79	81.04/87.24	<0.0001<0.0001	**/**
D^2	87.52/1.25	1/1	87.52/1.25	42.07/60.62	<0.0001<0.0001	**/**
残差	29.13/0.29	14/14	2.08/0.021			
失拟	27.24/0.26	10/10	2.72/0.026	5.77/3.2	0.0529/0.1369	/
纯误差	1.89/0.032	4/4	0.47/8.00E-03			
总和	837.34/9.81	28/28				

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

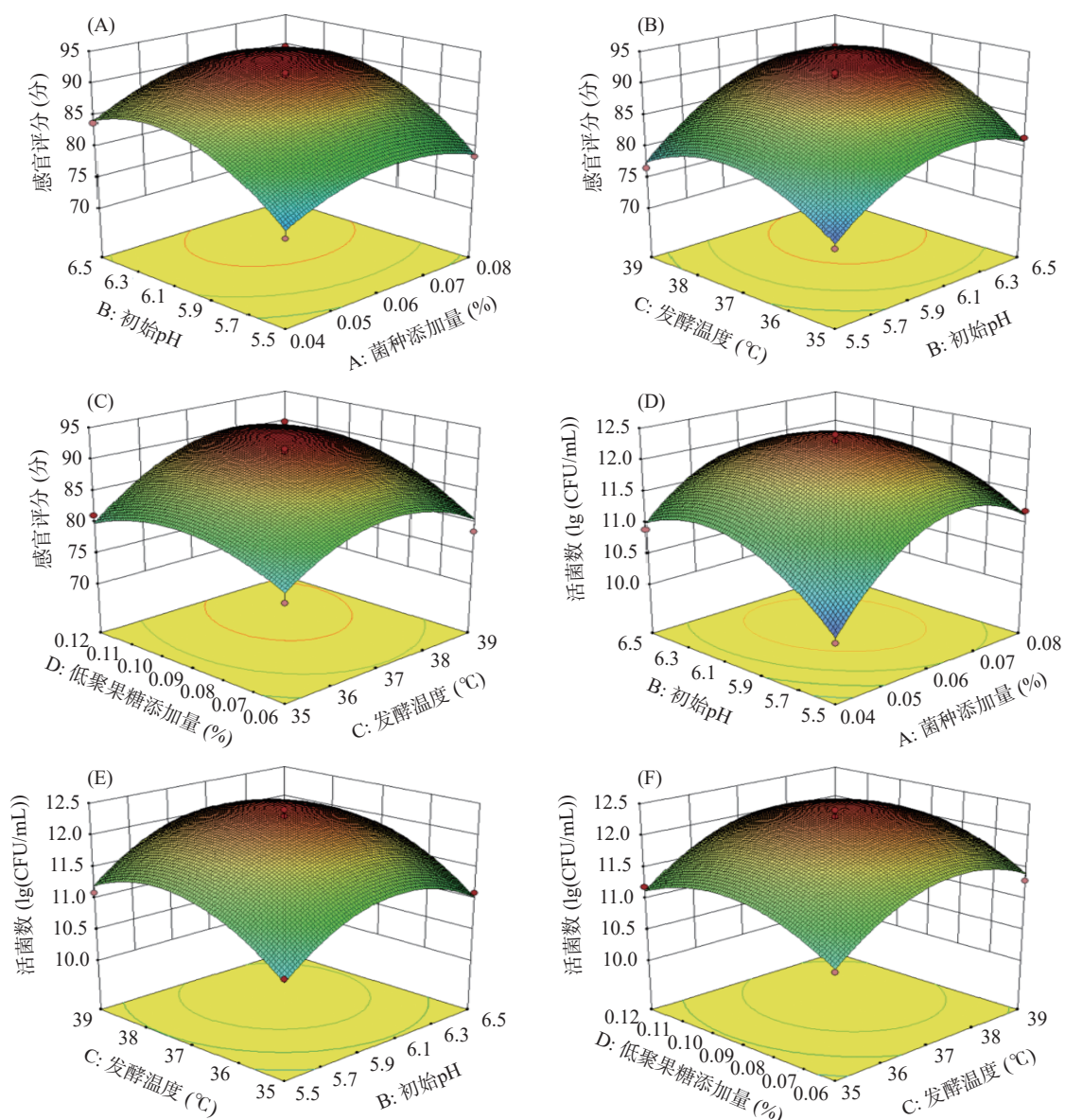


图6 响应面因素对发酵桑葚汁感官评分和活菌数影响的响应面图

Fig.6 Response surface diagram of the effect of response surface factors on sensory score and viable bacteria count of fermented mulberry juice

优条件下的差别较小。故综合考虑发酵桑葚汁工艺参数为菌种添加量 0.062%，初始 pH6.083，发酵温度 37.41℃，低聚果糖 0.094%，便于实际生产操作，根据实际情况将工艺参数微调为菌种添加量 0.06%，初始 pH6.1，发酵温度 37℃，低聚果糖 0.09%，对此工艺参数进行实际验证实验，得到感官评分为 93 分，活菌数为 12.32 lg(CFU/mL)，与模型拟合预测值基本一致，说明此模型较切合实际情况。

2.3 乳酸菌对发酵桑葚汁理化指标的影响

由表 5 可知，在乳酸菌发酵过程中，随着发酵的深入，BL、LP 和 LP&BL 的 TSS 均呈现逐渐降低的趋势，降低幅度较小；且在 LP&BL 发酵中，TS 由未发酵时的 68.49 mg/mL 降低为发酵 48 h 的 57.44 mg/mL，呈现显著性($P<0.05$)降低，这可以归因于乳酸菌菌株利用其进行生长代谢和生物转化为乳酸；TS 含量变化可以被认为是发酵过程中消耗糖类化合物和

表 5 桑葚汁发酵过程中理化指标变化

Table 5 Changes of physical and chemical indexes during fermentation of mulberry juice

	CON	BL-24 h	LP-24 h	LP&BL-24 h	BL-48 h	LP-48 h	LP&BL-48 h
pH	6.04±0.10 ^a	5.07±0.06 ^b	5.16±0.07 ^b	5.10±0.15 ^b	4.11±0.08 ^c	4.12±0.07 ^c	4.01±0.05 ^c
TSS (°Brix)	16.43±0.02 ^a	15.45±0.04 ^c	15.63±0.05 ^b	15.53±0.05 ^c	15.32±0.06 ^{de}	15.36±0.03 ^d	15.24±0.01 ^e
TS (mg/mL)	68.49±1.16 ^a	55.76±0.43 ^d	61.99±0.78 ^b	58.56±0.79 ^c	57.81±0.98 ^c	58.67±1.05 ^c	57.44±0.67 ^{cd}
TA (g/L)	2.99±0.19 ^c	3.64±0.12 ^d	3.58±0.06 ^d	4.38±0.21 ^c	4.79±0.03 ^b	4.59±0.04 ^{bc}	5.07±0.05 ^a

注: TSS代表可溶性固形物, TS代表总糖, TA代表总酸, 不同小写字母表示同一指标各数据之间呈显著差异($P<0.05$)。

产生有机酸之间的平衡作用^[35]。同理,发酵桑葚汁 pH 呈下降趋势,TA 呈上升趋势;TA 含量变化表明乳酸菌菌株在发酵过程中产生了酸性化合物。与单菌株发酵相比,混合菌株随着发酵时间的延长 TA 含量显著升高($P<0.05$)。混合菌株发酵能显著提高发酵桑葚汁的总酸含量,降低总糖含量,促进乳酸菌的生长繁殖。

2.4 乳酸菌对发酵桑葚汁功能性成分影响

由图 7 可知,总酚(TPC)、总黄酮(TFC)和总花青素(TAC)的含量在发酵各阶段间均有不同的变化趋势,发酵桑葚汁与未发酵桑葚汁相比,乳酸菌发酵能有效提高发酵桑葚汁的功能性化合物含量;这可能是因为发酵过程中乳酸菌会产生一些特定的水解酶,而这些特定的水解酶将发酵液中复杂的酚类化合

物去糖基化,使其分解成分子量较小、结构组成较简单的酚类化合物^[36],这与 Gan 等^[37]研究结果一致,其利用乳酸菌发酵豆奶,发现乳酸菌发酵可有效提高总酚含量。发酵桑葚汁间的化合物浓度差异可能是由于不同乳酸菌自身的生理特性以及在发酵时所分泌的产物不同所致。

TPC 含量如图 7(A),在单菌株发酵方式中,随着发酵时间的延长,TPC 含量呈逐渐增大的变化趋势;其中发酵 48 h 的 TPC 含量最高;同时在发酵后 24 h 中混合菌株发酵 TPC 含量趋于平稳($P>0.05$);产生这种趋势变化可能是发酵过程中乳酸菌生长代谢所引起的,乳酸菌代谢过程中产生的物质将复杂的酚类化合物分解为结构简单的化合物,分子量变小^[38],提高了 TPC 含量;随着发酵时间的延长,乳酸菌生长降低 pH,致使乳酸菌生长繁殖受到限制,代谢产物分泌受阻,生长速度减缓;TPC 含量趋于稳定。

TFC 含量如图 7(B),TFC 含量变化中单菌株发酵与混合菌株发酵相比,混合菌株发酵方式的 TFC 含量较高,这可能是由乳酸菌发酵产生的酶类物质将复杂的多酚分解为小分子的黄酮醇物质^[39]。在发酵前 24 h 中,TFC 含量升高趋势较大,呈显著差异($P<0.05$);发酵时间 36 h 至 48 h 中,TFC 含量变化趋于稳定($P>0.05$),可能是由于发酵初期发酵液环境适宜乳酸菌生长繁殖,其生长速度较快,代谢产物较多,对多酚物质分解为黄酮醇物质加快,发酵后期随着乳酸菌含量增多,发酵液 pH 降低,致使乳酸菌生长速度减缓。

TAC 含量变化如图 7(C),发酵前 24 h 中植物乳杆菌发酵和混合菌株发酵的 TAC 含量呈显著上升趋势($P<0.05$),发酵 24 h 至 48 h 中中长双歧杆菌和植物乳杆菌的单菌株 TAC 含量呈下降趋势,混合菌株发酵的 TAC 含量趋于稳定($P>0.05$),在发酵开始至发酵结束中混合菌株发酵的 TAC 含量高于长双歧杆菌和植物乳杆菌的单菌株发酵;混合菌株发酵的 TAC 含量由未发酵时 0.67 mg/mL 增加为发酵 48 h 后的 1.95 mg/mL;这可能是由于发酵初期乳酸菌生长繁殖使得花青素中结合态转变为游离态,增加了其含量;发酵后期单菌株发酵的花青素含量下降可能是由于花青素不太稳定的原因所致,发酵后期混合菌株发酵的花青素含量趋于稳定($P>0.05$)可能是由于乳酸菌菌株间的协同作用,混合菌株发酵更深层次影响 TAC 的含量。混合菌株发酵能提高 TAC 含量可能与 TAC 易受外界环境条件(光照、温度和发酵类型等)的影响有关^[40]。

综上所述,植物乳杆菌和长双歧杆菌均匀混合配比的混合菌株发酵可有效提高发酵桑葚汁中的 TPC、TFC 和 TAC 含量。

2.5 乳酸菌对发酵桑葚汁抗氧化活性影响

由表 6 可知,与未发酵样品相比,发酵样品拥有较高的抗氧化活性,呈显著性差异($P<0.05$),说明乳

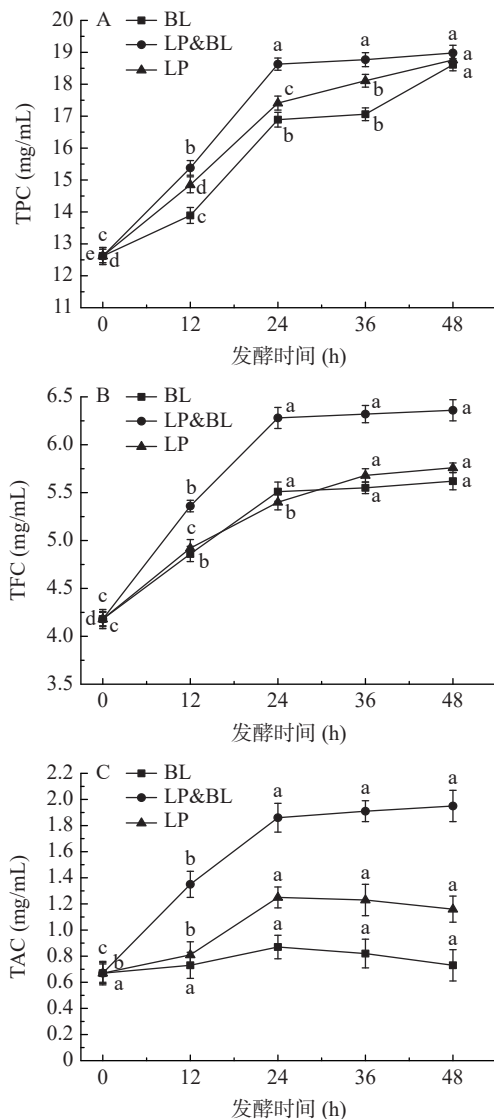


图 7 桑葚汁发酵过程中功能性成分含量变化

Fig.7 Changes in content of functional components during fermentation of mulberry juice

注: BL 代表长双歧杆菌;LP&BL 代表植物乳杆菌和长双歧杆菌均匀混合配比;LP 代表植物乳杆菌;TPC 代表总酚;TFC 代表总黄酮;TAC 代表总花青素;图中不同小写字母表示同一菌株不同发酵时间下存在显著差异($P<0.05$)。

表6 桑葚汁发酵过程中抗氧化活性变化
Table 6 Changes in antioxidant activity during fermentation of mulberry juice

指标	CON	BL-24 h	LP-24 h	LP&BL-24 h	BL-48 h	LP-48 h	LP&BL-48 h
DPPH自由基清除率(%)	52.78±0.67 ^f	58.13±0.36 ^e	64.46±0.17 ^d	73.34±1.20 ^b	67.17±0.82 ^c	68.36±1.14 ^c	81.64±0.59 ^a
ABTS ⁺ 自由基清除率(%)	61.81±0.56 ^f	72.68±0.41 ^e	76.20±1.34 ^d	82.50±0.57 ^c	77.37±0.85 ^d	83.81±0.71 ^b	88.17±0.57 ^a
T-AOC (mmol/L)	17.85±0.70 ^d	18.54±0.94 ^d	18.81±0.37 ^d	21.42±1.09 ^e	22.23±0.65 ^{bc}	23.29±0.79 ^b	29.49±0.71 ^a
·OH清除率(%)	37.38±1.21 ^e	45.19±1.04 ^f	59.74±0.80 ^d	74.48±0.65 ^b	57.40±1.21 ^e	65.20±0.94 ^c	86.07±0.89 ^a

注: T-AOC代表总抗氧化能力,不同小写字母表示同一指标各数据之间呈显著差异($P<0.05$)。

酸发酵对抗氧化活性的提高具有积极的影响,乳酸菌在发酵时可以增加发酵液中的总酚等化合物的含量,同时增加具有给质子特性化合物的可用性,这些化合物有效地提高了DPPH自由基清除率和ABTS⁺自由基清除率抗氧化反应中阳离子还原率^[41],从而提高抗氧化活性;混合菌株发酵桑葚汁的抗氧化活性要优于单菌株发酵。混合菌株发酵48 h时的抗氧化活性显著($P<0.05$)高于单菌株发酵。

3 结论

本研究以植物乳杆菌和长双歧杆菌为发酵菌株,分别进行单菌株发酵和混合菌株发酵,优化桑葚汁发酵工艺及探讨桑葚汁发酵时的功能品质。研究结果表明,在优化发酵工艺方面,混合菌株发酵桑葚汁的感官评分和活菌数最高,在此基础上利用响应面试验得到最佳发酵工艺参数为菌种添加量0.06%,初始pH6.1,发酵温度37℃,低聚果糖添加量0.09%,此时感官评分最高为93分,活菌数为12.32 lg(CFU/mL);在发酵桑葚汁的功能品质方面,混合菌株发酵可以提高乳酸菌活菌数量、功能性化合物含量和抗氧化活性。在桑葚汁发酵过程中,混合菌株发酵具有较好的生物活性和化合物特性,总黄酮含量由4.18 mg/mL增加为6.36 mg/mL,总花青素由0.67 mg/mL增加为1.95 mg/mL,总酚含量由12.62 mg/mL增加为18.65 mg/mL;同时ABTS⁺自由基清除率、DPPH自由基清除率、羟自由基清除率和总抗氧化能力均得到有效提高。因此,植物乳杆菌和长双歧杆菌混合发酵可有效提高发酵桑葚汁的感官体验和功能特性,可为桑葚深加工提供一种新的高附加值产品。

参考文献

[1] 乔健,李国鹏,杜丽清,等.桑葚果实不同发育期品质测定及其相关性分析[J].食品工业科技,2021,42(17):24-29. [QIAO Jian, LI Guopeng, DU Liqing, et al. Quality determination and correlation analysis of mulberry fruit at different stages of development[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 24-29.]

[2] 魏雪琴,陈美钰,游赵微,等.响应面法优化桑葚酵素食用凝胶的制备工艺[J].食品工业科技,2021,42(19):247-254. [WEI Xueqin, CHEN Meiyu, YOU Zhaowei, et al. Optimization of preparation process of gel for vegetarian fermentation of mulberry fermentation by response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 247-254.]

[3] CHEN X B, SOHOULI M H, NATEGHI M, et al. Impact of mulberry consumption on cardiometabolic risk factors: A systematic review and meta-analysis of randomized-controlled trials[J]. *Jour-*

nal of Clinical Pharmacy and Therapeutics, 2022, 47(12): 1982-1993.

[4] GAO T Q, CHEN J L, XU F, et al. Mixed mulberry fruit and mulberry leaf fermented alcoholic beverages: Assessment of chemical composition, antioxidant capacity *in vitro* and sensory evaluation[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3125.

[5] 夏川林,殷浩,王香君,等.桑葚功能性成分研究现状与综合利用[J].四川蚕业,2021,49(3):42-45. [XIA Chuanlin, YIN Hao, WANG Xiangjun, et al. Research status and comprehensive utilization of functional components of mulberry[J]. *Sichuan Sericulture*, 2021, 49(3): 42-45.]

[6] ZHANG S R, XING X, CHU Q, et al. Impact of co-culture of *Lactobacillus plantarum* and *Oenococcus oeni* at different ratios on malolactic fermentation, volatile and sensory characteristics of mulberry wine[J]. *LWT*, 2022, 169: 113995.

[7] 尹俊涛,刘艳怀,雷勇,等.蔓越莓桑葚复合饮料工艺优化及配方研究[J].食品工业,2022,43(7):48-52. [YIN Juntao, LIU Yanhuai, LEI Yong, et al. Process optimization and formulation study of cranberry mulberry compound beverage[J]. *Food Industry*, 2022, 43(7): 48-52.]

[8] 孙百虎.不同乳酸菌对发酵桑葚汁酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J].中国酿造,2022,41(1):92-97. [SUN Baihu. Effects of different lactic acid bacteria on phenolic content and antioxidant capacity of fermented mulberry juice[J]. *China Brewing*, 2022, 41(1): 92-97.]

[9] QU L Y, JIN C Y, GAO Q S, et al. Effects of selenium-enriched *Lactobacillus* fermented corn stalks on cattle rumen fermentation[J]. *Computer Informatization and Mechanical System*, 2022, 5(4): 74-80.

[10] LIU J, XIE H P, GAO Y, et al. Soybean protein isolate treated with transglutaminase (TGase) enhances the heat tolerance of selected lactic acid bacteria strains to spray drying[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404(PB): 134676.

[11] 吕蕾,杨晓萍,王阿利,等.酱油渣中具有抑菌活性的乳酸菌的筛选及其抑菌特性[J].食品工业科技,2022,43(18):137-144. [LÜ Lei, YANG Xiaoping, WANG Ali, et al. Screening of lactic acid bacteria with bacteriostatic activity in soy sauce residue and their bacteriostatic properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 137-144.]

[12] SARA R S, MARIA R I, MARIA R P, et al. Lactic acid bacteria as biocontrol agents to reduce *Staphylococcus aureus* growth, enterotoxin production and virulence gene expression[J]. *LWT*, 2022, 170: 114025.

[13] HE Z S, ZHANG H, WANG T, et al. Effects of five different lactic acid bacteria on bioactive components and volatile compounds of oat[J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3230.

[14] 冯丹丹,胡萍,许浩翔,等.乳酸菌发酵刺梨汁体外降血糖、

- 降血脂活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 212-219. [FENG Dandan, HU Ping, XU Haoxiang, et al. Study on hypoglycemic and lipid-lowering activity of lactic acid bacteria fermented prickly pear juice *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(8): 212-219.]
- [15] 梁红敏, 郭亚芸, 史红梅. 不同乳酸菌发酵葡萄糖素过程中代谢产物及其抗氧化特性分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(24): 170-176. [LIANG Hongmin, GUO Yayun, SHI Hongmei. Analysis of metabolites and antioxidant characteristics of grape enzymes fermented by different lactic acid bacteria[J]. Food Research and Development, 2021, 42(24): 170-176.]
- [16] FERNANDA B T, BORGHI V L, SOARES J N, et al. Fruit bioactive compounds: Effect on lactic acid bacteria and on intestinal microbiota[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111809.
- [17] 扈莹红, 陈晓慧, 常学东, 等. 酒曲中乳酸菌的筛选及其在板栗糯米饮料发酵中的应用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 138-146. [HU Yinghong, CHEN Xiaohui, CHANG Xuedong, et al. Screening of lactic acid bacteria in koji and its application in fermentation of chestnut glutinous rice beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 138-146.]
- [18] 盛洁, 田欢, 刘原野, 等. 响应面法优化红枣益生菌发酵饮料工艺[J]. 中国酿造, 2021, 40(2): 203-208. [SHENG Jie, TIAN Huan, LIU Yuanye, et al. Optimization of probiotic fermented beverage process of red jujube by response surface method[J]. China Brewing, 2021, 40(2): 203-208.]
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 4789.35-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-8. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 4789.35-2016 National food safety standard-Food microbiology test-Lactic acid bacteria test[S] Beijing: China Standards Press, 2016: 1-8.]
- [20] 刘彩华, 曾嘉童, 包竹君, 等. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定芒果的可溶性糖含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2892-2900. [LIU Caihua, ZENG Jiatong, BAO Zhujun, et al. Determination of soluble sugar content of mango by 3,5-dinitrosalicylic acid colorimetric method[J]. Journal of Food Safety and Quality Detection, 2022, 13(9): 2892-2900.]
- [21] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GB 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6. [National Health Commission of the People's Republic of China. GB 12456-2021 National food safety standard-Determination of total acid in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2008: 1-6.]
- [22] KAWA E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice[J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 148-154.
- [23] GAO H, WEN J J, HU J L, et al. Momordica charantia juice with *Lactobacillus plantarum* fermentation: Chemical composition, antioxidant properties and aroma profile[J]. *Food Bioscience*, 2019, 29: 62-72.
- [24] CHEN Y, PAN H L, HAO S X, et al. Evaluation of phenolic composition and antioxidant properties of different varieties of Chinese citrus[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130413.
- [25] 李佩佩, 顿向红, 王聪, 等. 不同发酵方式下枸杞饮料主要成分及其抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 90-97. [LI Peipei, JIE Xianghong, WANG Cong, et al. Main components and antioxidant activity of goji berry beverages under different fermentation methods[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(24): 90-97.]
- [26] 沈燕飞. 乳酸菌发酵苹果原浆过程中的基本组分与抗氧化活性变化[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 10-13. [SHEN Y F. The basic components and antioxidant activity of lactic acid bacteria fermented apple slurry process[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 10-13.]
- [27] CAI W C, TANG F X, ZHAO X X, et al. Different lactic acid bacteria strains affecting the flavor profile of fermented jujube juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(2): 14095.
- [28] NIU Z H, ZOU M J, BEI T T, et al. Effect of fructooligosaccharides on the colonization of *Lactobacillus rhamnosus* AS 1.2466T in the gut of mice[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(2): 607-613.
- [29] DOU Y Q, YU X, LUO Y L, et al. Effect of fructooligosaccharides supplementation on the gut microbiota in human: A systematic review and meta-analysis[J]. *Nutrients*, 2022, 14(16): 3298-3298.
- [30] CUI S M, GUO W L, CHEN C L, et al. Metagenomic analysis of the effects of *Lactiplantibacillus plantarum* and fructooligosaccharides (FOS) on the fecal microbiota structure in mice[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1187-1187.
- [31] CHEN C, LU Y Q, YU H Y, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice[J]. *Food Bioscience*, 2019, 27: 30-36.
- [32] PENG W, MENG D, YUE T, et al. Effect of the apple cultivar on cloudy apple juice fermented by a mixture of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, and *Lactobacillus fermentum* [J]. *Food Chemistry*, 2021, 340: 127922.
- [33] 赵欢, 贺晓龙, 王晓润, 等. 基于响应面法优化北虫草蛋卷工艺及其品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 185-192 [ZHAO Huan, HE Xiaolong, WANG Xiaojian, et al. Optimization of cordyceps egg roll process and quality analysis based on response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 185-192.]
- [34] 罗蓉, 蔡旭, 薛宏坤, 等. 响应面法优化超声辅助低共熔溶剂提取山楂总黄酮工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 229-237. [LUO Rong, CAI Xu, XUE Hongkun, et al. Optimization of ultrasound-assisted low eutectic solvent extraction process of hawthorn total flavonoids by response surface method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(22): 229-237.]
- [35] BAI X, HAN M Z, YUE T L, et al. Control of post-acidification and shelf-life prediction of apple juice fermented by lactobacillus[J]. *Food Control*, 2022, 139: 109076.
- [36] WU Y, LI S, TAO Y, et al. Fermentation of blueberry and blackberry juices using *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus thermophilus* and *Bifidobacterium bifidum*: Growth of probiotics, metabolism of phenolics, antioxidant capacity *in vitro* and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 328: 129083.
- [37] GAN R Y, SHAH N P, WANG M F, et al. *Lactobacillus plantarum* WCFS1 fermentation differentially affects antioxidant capacity and polyphenol content in mung bean (*Vigna radiata*) and soya bean (*Glycine max*) milks[J]. *Journal of Food processing and*

Preservation, 2016, 41(1): e12944.

[38] WU C Y, LI T L, QI J, et al. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice[J]. *LWT*, 2020, 122: 109064.

[39] LIU Y Y, SHENG J, LI J J, et al. Influence of lactic acid bacteria on physicochemical indexes, sensory and flavor characteristics of fermented sea buckthorn juice[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101519.

[40] SHENG J, SHAN C H, LIU Y Y, et al. Comparative evaluation of the quality of red globe grape juice fermented by *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus plantarum*[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57: 2235–2248.

[41] EIDI F, POOR-REZA G F, OATADRAHIMI A, et al. Effect of *Lactobacillus Rhamnosus* on serum uremic toxins (phenol and P-cresol) in hemodialysis patients: A double blind randomized clinical trial[J]. *Clinical Nutrition ESPEN*, 2018, 28: 1–7.