DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260225001
引用格式: 黎恩琳, 刁成凤, 林珊珊, 等. 纳豆芽孢杆菌发酵紫薯清汁的工艺优化及其风味研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 100–110.
Li Enlin, Diao Chengfeng, Lin Shanshan, et al. Process optimization and flavor research of purple sweet potato clear juice fermented by *Bacillus natto* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 100–110. (in Chinese with English abstract).

纳豆芽孢杆菌发酵紫薯清汁的工艺优化及其风味研究

黎恩琳[1,2], 刁成凤[1,2], 林珊珊[1,2], 何梓雯[1,2], 邓　旗[1,2*]

(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省海洋生物制品工程实验室, 水产品深加工广东普通高等学校重点实验室, 湛江　524088; 2. 大连工业大学, 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连　116034)

摘　要: 目的　开发纳豆芽孢杆菌发酵紫薯清汁。**方法**　采用单因素试验和正交试验研究料液比、低聚异麦芽糖添加量比例、接种量、发酵温度和发酵时间对纳豆芽孢杆菌液体发酵 pH、可溶固形物含量和感官评分的影响。**结果**　得到发酵的最优条件为: 料液比 1:4 (g:mL)、低聚异麦芽糖添加比例 10%、接种量 4%、发酵温度 39 ℃和发酵时间 8 h。在此条件下, 紫薯清汁的风味与发酵风味融合较好, 呈现以氮氨化合物和硫化物为主的气味成分。**结论**　本研究所研制的饮品可增强紫薯在人体肠道中的可吸收化及具有多层次保健功能, 且研制过程中最大程度减少食品添加剂的加入, 符合人们对于健康保健食品的要求, 并且为提高紫薯附加值及丰富益生菌植物饮品提供参考。

关键词: 纳豆芽孢杆菌; 紫薯; 发酵; 清汁
中图分类号: TS275.4　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)16–0100–11

Process optimization and flavor research of purple sweet potato clear juice fermented by *Bacillus natto*

LI En-Lin[1,2], DIAO Cheng-Feng[1,2], LIN Shan-Shan[1,2], HE Zi-Wen[1,2], DENG Qi[1,2*]

(1. *College of Food Science and Technology*, *Guangdong Ocean University*, *Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety*, *Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood*, *Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products*, *Key Laboratory of Advanced Processing of Aquatic Product of Guangdong Higher Education Institution*, *Zhanjiang* 524088, *China*; 2. *Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing*, *Dalian Polytechnic University*, *Dalian* 116034, *China*)

ABSTRACT: Objective　To develop fermented purple sweet potato clear juice using *Bacillus natto*. **Methods** Single-factor experiments and orthogonal tests were conducted to investigate the effects of solid-liquid ratio, isomalt-oligosaccharide addition, inoculation amount, fermentation temperature and fermentation time on the pH,

收稿日期: 2026-02-25
基金项目: 广东省“百千万工程”农村科技特派员重点项目(KTP20240554)
第一作者: 黎恩琳(2004—), 女, 主要研究方向为农产品加工与安全。E-mail: 15914524216@163.com
***通信作者:** 邓旗(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: dengqi1024@163.com

soluble solid content and sensory score of the fermented product. **Results** The optimal fermentation conditions were determined as follows: solid-liquid ratio of 1:4 (g:mL), isomalt-oligosaccharide addition of 10%, inoculation amount of 4%, fermentation temperature of 39 ℃, and fermentation time of 8 h. Under these conditions, the flavor of purple sweet potato clear juice was well integrated with the fermentation flavor, with the main odor components being nitrogen-containing compounds and sulfides. **Conclusion** The beverage developed in this study can enhance the absorption of purple sweet potato nutrients in the human intestine and has multi-level health benefits. The production process minimizes the use of food additives, meeting consumer demand for healthy functional foods. This study also provides a reference for improving the added value of purple sweet potatoes and enriching the variety of probiotic plant-based beverages.

KEY WORDS: *Bacillus natto*; purple sweet potato; fermentation; clear juice

0　引　言

纳豆芽孢杆菌是一种潜在的益生菌, 可以将淀粉和蛋白质转化为氨基酸、维生素和纳豆激酶[1], 具有良好的保健作用[2]。其中, 纳豆激酶作为其关键的发酵产物, 可高效溶解纤维蛋白, 通过降解纤维蛋白及可溶性纤维蛋白改善血液循环, 对心血管疾病具有良好的预防作用[3]。此外, 发酵过程中产生的部分生物活性物质如多酚、生物活性肽等还具有降血糖功效, 相关研究表明, 含此类活性物质的食品可以有效降低糖尿病的发病率[4−6]。在利用纳豆芽孢杆菌研制功能性食品方面, 现可见其发酵大豆[7]、紫菜[8]、小米糠[9]、板栗[10]、银杏种子[11]及牡蛎[12]等, 均是利用其提高或转化发酵基质的活性成分和性状。目前纳豆芽孢杆菌在发酵饮品中的应用已有少量报道, 如葛英亮等[13]利用其作为发酵菌种发酵大豆乳、王继伟等[14]用其发酵玉米浆、杨柳[15]用其发酵米糠和黑豆汁[16], 但仍存在较大的发展空间。

而紫薯作为许多国家的重要粮食产物, 营养丰富, 含有花青素等活性物质[17−18], 广泛用于果汁和面粉的生产[19], 其营养成分普遍高于普通甘薯[20]。紫薯中的花青素具有抗氧化、护肝、降血糖和降血脂等功能[21−25], 在食品[26]、药品[27]领域具有较好的应用前景。

为解决紫薯产业链存在综合利用程度低、加工产品形式单一、附加值低的问题, 丰富纳豆芽孢杆菌在果蔬汁发酵方面的研究, 顺应保健、融合创新等新型食品的开发趋势, 本研究以紫薯作为纳豆芽孢杆菌发酵基质, 研究料液比、低聚异麦芽糖添加比例、接种量、发酵温度和发酵时间对紫薯清汁发酵效果的影响, 通过单因素试验和正交试验优化发酵工艺, 从而确定紫薯清汁的最优发酵工艺[28−30], 为创新食品加工行业发展提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

紫薯(市售); 柠檬酸(晟发生物科技有限公司); 低聚异麦芽糖(睢县甘淳商贸有限公司); 营养琼脂、营养肉汤、平板计数琼脂(北京陆桥技术股份有限公司)。

1.2　仪器与设备

LDZX-50KBS 立式高压蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); H2050R 高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); HZQ-F160 振荡培养箱(哈尔滨市东联电子技术开发有限公司); SPX-250B-Z 生化培养箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); XW-80A 漩涡混匀器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司); PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); VAPODEST 50S 凯氏定氮仪(德国格哈特分析仪器有限公司); PEN3 电子鼻(北京华仪通泰环保科技有限公司); GZX-92400MB 电热鼓风干燥箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); UV-756MC 紫外分光光度计(日本岛津公司); MDP-382E(CN)超低温冰箱[松下电器(中国)有限公司]; WYT 型手持糖度计(成都豪创光电仪器有限公司)。

1.3　方　法

1.3.1　纳豆芽孢杆菌的活化及保藏

将分离纯化得到的纳豆芽孢杆菌从–80 ℃冰箱中取出置于室温下回温, 再用接种针蘸取少量菌液于营养琼脂平板上划线, 置于 36 ℃生化培养箱中培养 24 h。划线得到单菌落后, 用接种环挑取一个接于 100 mL 营养肉汤中, 36 ℃、122 r/min 摇床培养 24 h, 连续传 2~3 代。

挑取单菌落于 100 mL 营养肉汤中, 36 ℃、122 r/min 摇床培养至对数期末期, 再移取菌液于 50%的无菌甘油中, 放置于–80 ℃冰箱中保藏。

1.3.2　纳豆芽孢杆菌发酵紫薯清汁工艺流程

挑选原料→清洗、去皮→切片→护色→蒸煮→加水研浆→过滤→调配灌装→杀菌灭酶→冷却→接种发酵→无菌灌装→感官、理化、卫生检测→储藏

1.3.3　纳豆芽孢杆菌紫薯清汁工艺条件

(1)发酵基质的制备

挑选原料: 要求选购新鲜完好、成熟度适中、表皮光滑、无大面积黑斑的紫薯。

清洗、去皮: 用干净流水搓洗紫薯表皮, 洗去泥沙后, 用双面刀刮去表皮, 再次用干净流水搓洗果肉表面, 沥干水分。

切片: 要求快速将清洗去皮完成的紫薯切片, 厚度约为 2 cm。

护色: 紫薯经切片后应该立即放入含 0.6%食用柠檬酸的常温净水中浸泡 15 min 进行护色处理, 浸泡用水应没过紫薯。

蒸煮: 待蒸锅中的水沸腾后, 将护色后的紫薯置于蒸锅中, 以蒸汽加热的方式蒸煮 12 min。

加水研浆: 熟紫薯称量后放入料理机, 再加入一定比例的饮用水, 选用料理机工作最高档次下研浆 1.5 min。

过滤: 紫薯浆经 400 目滤网过滤后置于干净容器中, 撇去研浆造成的浮沫, 得到紫薯清汁。

调配灌装: 将紫薯清汁分装于干净的玻璃瓶中, 每瓶 100 mL, 再加入一定比例的低聚异麦芽糖, 混合均匀, 密封瓶口。

杀菌灭酶: 将调配灌装好的紫薯清汁置于高压灭菌锅中, 121 ℃下灭菌 15 min。

冷却: 发酵基质灭菌完成后应尽快取出, 使温度降至室温, 得到发酵基质。

(2)发酵工作液的制备

用接种环从已继代 2~3 次的平板上挑取一个单菌落, 接种于 100 mL 营养肉汤中, 36 ℃, 122 r/min 摇床扩增培养 24 h。增殖培养结束后, 将菌液分装于两个 50 mL 的无菌离心管中, 在 4000 r/min 条件下离心 10 min, 使菌体沉淀, 弃去肉汤, 并以灭菌饮用水等体积替代, 用涡旋仪振荡 2 min, 初步得到均一的发酵液。再以相同离心条件, 继续以上操作 2 次, 最后得到发酵工作液。所有操作均需在超净工作台中完成。每次发酵工作液制备完成后, 均需测定其菌液密度。

(3)接种发酵

在超净工作台中, 用移液枪准确吸取一定比例的发酵工作液接种于发酵基质中, 混合均匀, 密封瓶口。在置于一定温度条件的 12 r/min 摇床下发酵, 控制一定的发酵时间。

(4)无菌灌装

发酵结束后, 得到试样产品, 在无菌环境下, 分装于已灭菌的产品玻璃瓶中, 密封瓶口, 以方便感官评价和完成保藏试验。

(5)贮藏

将分装好的试样产品放置于 4 ℃冰箱保存。

1.3.4 感官评分标准

本研究采用评分测验法, 每次选择 10 人为评分小组进行感官评分, 以下表 1 为产品感官评分标准。产品感官评分标准分为 4 项指标, 分别为色泽、香气、口感和组织状态, 各占 25 分。

试验要求每位感官评价人员对各试验产品进行单独评价, 感官综合评分满分为 100 分, 综合得分为 4 项指标评分之和, 即产品感官总分满分(100 分)=色泽(25 分)+香气(25 分)+口感(25 分)+组织状态(25 分)。试验后收集感官评分表, 统计得分后进行分析。

1.3.5 理化指标测定

(1) pH。在室温环境下, 采用 PHS-3C 型酸度计测定产品的 pH, 并做好结果记录, 以 3 组平行试验的产品数据平均值为准。

表 1 产品感官评分标准

Table 1 Product sensory evaluation standards

指标	评分标准	评分/分
色泽	鲜紫色或紫红色	21~25
	呈紫色或紫红色但颜色微微发灰	14~20
	发灰明显	7~13
	发灰严重	0~6
香气	有紫薯的香气、发酵气味协调、风味鲜明	21~25
	有紫薯的香气、发酵气味较协调	14~20
	紫薯气味不足、发酵气味协调性欠佳但可接受	7~13
	无紫薯香气、只有发酵气味、不可接受	0~6
口感	甜度适中微酸、滋味纯正、口感细腻	21~25
	酸甜比略欠佳、略有粗糙、适口性一般	14~20
	酸甜比欠协调、味感不柔和但仍可接受	7~13
	过酸或过甜、粗糙、纳豆味严重、接受性差	0~6
组织状态	组织细腻、均匀、无沉淀凝聚	21~25
	组织较细腻、无分层、有些许沉淀凝聚	14~20
	有分层、有少量膜状或絮状物质	7~13
	分层现象严重、存在大量膜状或絮状凝聚	0~6

(2)可溶性固形物含量的测定。在室温环境下, 采用 WYT 型手持糖度计测定产品的可溶性固形物含量, 并做好结果记录, 以 3 组平行试验的产品数据平均值为准。

(3)脂肪含量的测定。参考 GB 5009.6—2025《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中酸水解法, 可测定产品中游离态和结合态脂肪的总含量。

(4)蛋白质含量的测定。参考 GB 5009.5—2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法。

1.3.6 卫生指标测定

为保证发酵紫薯清汁的食用安全性, 本研究参考 GB 7101—2022《食品安全国家标准 饮料》对其卫生指标进行测定。具体测定项目及其方法如下: 大肠杆菌的计数参考 GB 4789.3—2025《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》。霉菌和酵母菌的计数参考 GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验

霉菌和酵母计数》。活菌计数参考 GB 4789.25—2024《食品安全国家标准 食品微生物学检验 酒类、饮料、冷冻饮品采样和检样处理》。

1.3.7　发酵前后气味变化的测定

本研究用电子鼻检测产品中的风味物质。以不接种不加糖的紫薯浆为空白对照组, 对加糖不接种的紫薯浆和采用最优工艺参数发酵后的产品进行测定, 空白组和试验组各有 3 组平行, 单个样品体积规格为 100 mL, 均以保鲜膜封口, 放置于 4 ℃下静置 20 min 后上机检测。参数分别为检测时间 150 s、预采样时间 5 s、自动清洗刷新时间 100 s、腔室流量 250 mL/min。

1.4　产品工艺优化研究

1.4.1　空白试验优化发酵工艺

制备 12 瓶 100 mL 的发酵基质, 分成 4 组试验(每组做 3 次平行试验)。试验①组(加糖 6%、不接种)置于室温静置 10 h, 试验②组(加糖 6%、不接种), 试验③组(不加糖、不接种)和试验④组(不加糖、接种量为 5%) 37 ℃, 122 r/min 摇床发酵 10 h。分别测定其 pH 和可溶性固形物含量, 指标的最后测定数值以 3 次平行试验的平均值为准。

1.4.2　单因素试验优化发酵工艺

紫薯预处理后蒸熟, 将蒸熟后的紫薯研浆, 过滤得到紫薯清汁, 加入 6% (*m*:*V*)低聚异麦芽糖, 混合均匀后高压灭菌。冷却后即得到发酵基质, 将纳豆芽孢杆菌发酵工作液接种于发酵基质中, 固定料液比为 1:3 (g:mL), 接种量为 5% (*m*:*V*), 发酵温度为 37 ℃, 发酵时间为 10 h。发酵后, 在无菌环境下灌装于 20 mL 容量瓶中, 于 4 ℃冰箱放置 1 h, 而后测定产品的 pH、可溶性固形物含量, 对其进行感官评价。分别研究紫薯清汁发酵培养基中熟紫薯与饮用水体积之比(料液比, *m*:*V*) (1:3、1:4、1:5、1:6)、低聚异麦芽糖添加比例[4%、6%、8%、10% (*m*:*V*)]、纳豆芽孢杆菌接种量[3%、4%、5%、6% (*m*:*V*)]、发酵温度(35、37、39、41 ℃)、发酵时间(6、10、14、18 h)对紫薯发酵培养基的发酵效果影响。

1.4.3　正交试验优化发酵工艺

根据单因素试验结果, 选择 *A*(低聚异麦芽糖添加比例)、*B*(纳豆芽孢杆菌接种量)、*C*(发酵温度)和 *D*(发酵时间)4 个主要因素, 各选择 3 个水平进行正交试验, 以感官评分为评价标准。试验因素水平如表 2 所示。试验结果为 3 次独立重复试验的平均值。

1.5　数据处理

每组试验设计 3 个平行组, 运用 Excel 2021、Origin 2018、SPSS 26.0 等相关软件进行绘图以及数据处理分析。

2　结果与分析

2.1　空白试验结果

为探究发酵方式、低聚异麦芽糖添加比例及纳豆芽孢杆菌接种量对紫薯清汁 pH 与可溶性固形物的影响, 进行了 4 组空白试验, 结果如表 3。

表 2　纳豆芽孢杆菌发酵紫薯清汁正交试验因素水平表

Table 2　Orthogonal test factor level table for purple potato clear juice fermented by *Bacillus natto*

水平	因素			
	A(低聚异麦芽糖添加比例)/%	*B*(纳豆芽孢杆菌接种量)/%	*C*(发酵温度)/℃	*D*(发酵时间)/h
1	6	4	35	8
2	8	5	37	10
3	10	6	39	12

表 3　空白试验结果

Table 3　Results of blank test

指标	试验①组	试验②组	试验③组	试验④组
发酵前 pH	5.43±0.06	5.43±0.12	5.98±0.07	5.98±0.09
发酵后 pH	5.41±0.08	5.40±0.10	5.96±0.15	5.72±0.02
发酵前可溶性固形物含量	7.00±0.08	7.00±0.05	1.00±0.05	1.00±0.10
发酵后可溶性固形物含量	7.00±0.12	7.00±0.10	1.00±0.15	0.20±0.20

由表 3 中①组和②组数据可见, 两组试验发酵前后的 pH 和可溶性固形物含量基本无变化(P>0.05, 不具有显著性差异), ②组 pH 稍下降是由于放置 10 h 后发酵基质中一些物质少量分解转化成酸性物质。故本研究采用摇床的方式对发酵基质的 pH 和可溶性固形物含量无明显影响。

由②组和③组数据可见, 两组试验前后的 pH 和可溶性固形物含量无明显变化(P>0.05, 不具有显著性差异), 但试验组间数据相差较大, ②组 pH 比③组低, 这是由于低聚异麦芽糖使得料液带一定酸性, 其对感官方面的影响需完成相关单因素试验方可探究。

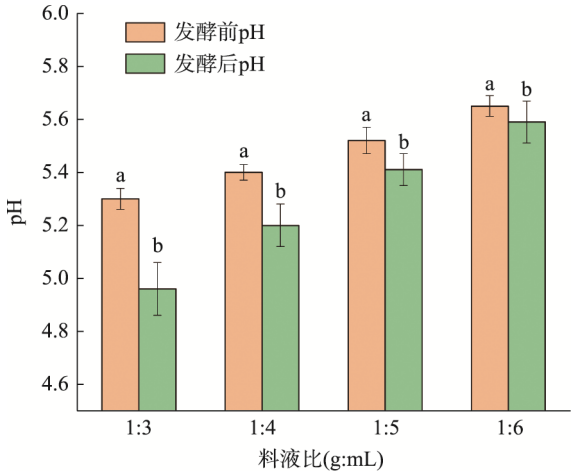
由③组和④组数据可见, 试验④组发酵后的 pH 和可溶性固形物含量均比③组低。这是由于纳豆芽孢杆菌在生长繁殖过程中产酸[13], 此过程需要利用碳水化合物, 因此 pH 和可溶性固形物含量均会下降[31]。

2.2　单因素试验结果

2.2.1　料液比的确定

由图 1 可知, 发酵后的 pH 较于发酵前均降低, 但随比例增大其 pH 的差值在逐渐缩小。这是由于纳豆芽孢杆菌在发酵过程中产酸, 随着料液比的增大, 营养物质被稀释, 可利用的营养物质减少, 菌株的生长繁殖及产酸能力受到抑制, 所产生酸性物质的浓度也随之被稀释。由图 2 可见, 随着料液比的增大, 发酵前后的可溶性固形物含量均显著降低(P<0.05), 且发酵后更为明显。同一料液比下发酵后的可溶性固形物含量更低, 是由于发酵菌利用其中的

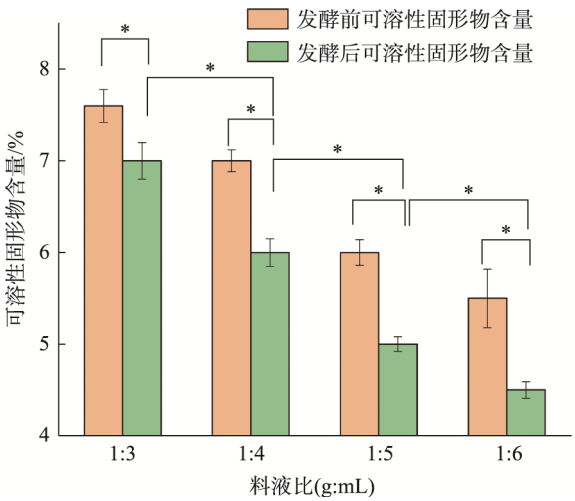
碳水化合物进行生长繁殖[32]。发酵后下降更为显著是由于在糖添加比例一定的情况下，碳水化合物被稀释且被消耗利用。由图 3 可见，当料液比为 1:3 (g:mL)时感官评分较低，是由于紫薯占比较大，产品口感厚重且组织较浑浊，同时在此比例下纳豆芽孢杆菌生长繁殖可利用的碳水化合物较多使得产品发酵较适宜，产生较多酸性物质，口感偏酸。料液比为 1:4 (g:mL)时感官评分最高，此比例下可使发酵菌适度地生长繁殖，紫薯香气与发酵气味交互融合效果较好，试验产品口感清爽，组织状态较好。而料液比大于 1:4 (g:mL)时，由于研浆过程中水占比较大，使得产品色泽偏浅、口感寡淡，发酵菌的生长代谢也因基质中营养物质较少而受到抑制。故最终确定最佳料液比为 1:4 (g:mL)。



注：不同小写字母表示发酵前后指标存在显著性差异，$P<0.05$。图 8、11、14 同。

图 1 料液比对发酵前后 pH 的影响

Fig.1 Effects of solid-to-liquid ratio on pH before and after fermentation



注：*表示两者之间存在显著性差异，$P<0.05$。图 5、7、10、13 同。

图 2 料液比对发酵前后可溶性固形物含量的影响

Fig.2 Effects of solid-to-liquid ratio on soluble solids content before and after fermentation

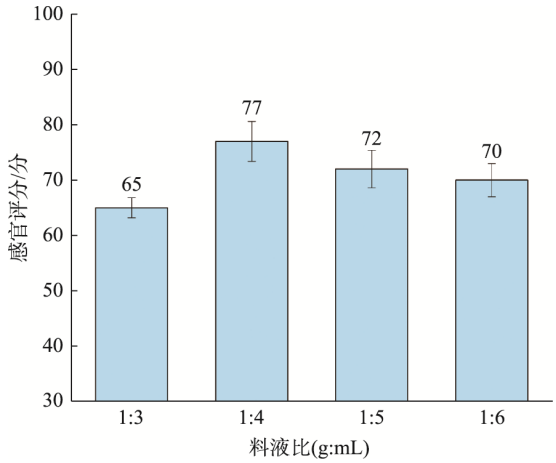
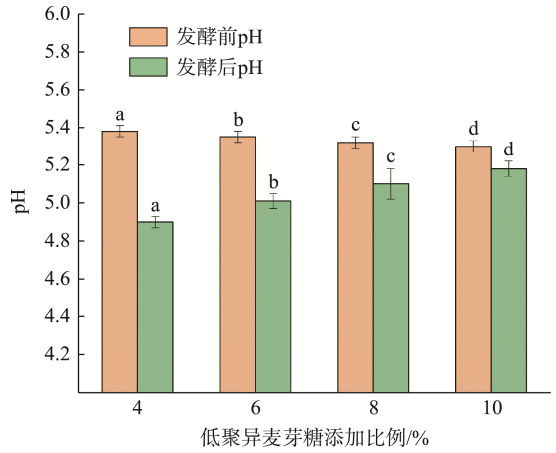


图 3 料液比对感官评分的影响

Fig.3 Effects of solid-to-liquid ratio on sensory scores

2.2.2 低聚异麦芽糖添加比例的确定

由图 4 可见，随低聚异麦芽糖添加比例增大，导致基质的酸性增加，因此发酵前 pH 呈下降趋势。发酵后的 pH 较于发酵前均有所下降且差值逐渐减小，同时 pH 也随着低聚异麦芽糖添加比例的增大而上升。同时，可溶性固形物含量增加，发酵体系渗透压升高易破坏发酵菌细胞壁及细胞膜特性[32]，影响发酵菌生长繁殖，因此随添加量的增大，菌株的生长繁殖抑制作用增大，其产酸能力便随之减弱，使得发酵后的 pH 上升。由图 5 可见，随低聚异麦芽糖添加比例增大，发酵前后可溶性固形物含量均上升，且较于发酵前降低程度不超过 1%，而空白试验中料液比为 1:4 (g:mL)、不加糖的紫薯清汁中可溶性固形物含量也为 1%，以上变化是由于低聚异麦芽糖为不发酵性糖，不被一般细菌、酵母菌及乳酸菌利用，因此低聚异麦芽糖具有较稳定、不易被利用的特点，赋予产品甜味及保留其生理功能。由图 6 可见，当低聚异麦芽糖添加比例为 8%时，感官评分结果，比例低于或高于 8%时，感官评分均下降。故确定最佳低聚异麦芽糖添加比例为 8%。



注：不同小写字母表示同一发酵状态下，不同低聚异麦芽糖添加比例存在显著性差异，$P<0.05$。

图 4 低聚异麦芽糖添加比例对发酵前后 pH 的影响

Fig.4 Effects of sugar addition ratio of isomaltooligosaccharides on pH before and after fermentation

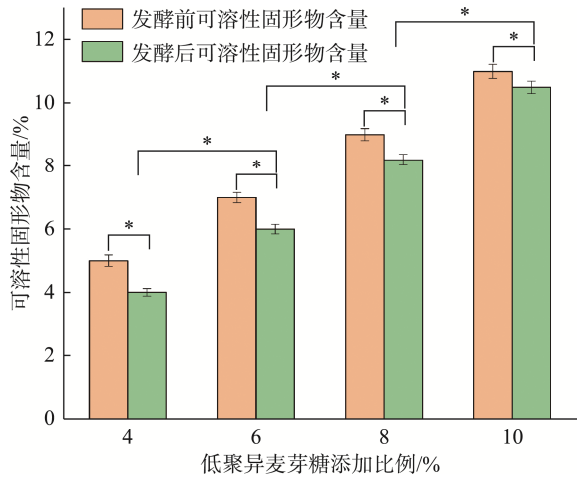


图 5　低聚异麦芽糖添加比例对发酵前后可溶性固形物含量的影响

Fig.5　Effects of sugar addition ratio of isomaltooligosaccharides on soluble solids content before and after fermentation

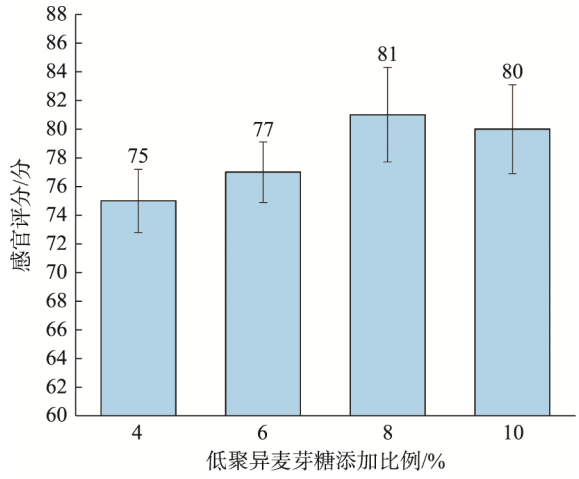


图 6　低聚异麦芽糖添加比例对感官评分的影响

Fig.6　Effects of sugar addition ratio of isomaltooligosaccharides on sensory scores

2.2.3　接种量的确定

由图 7 可见，随接种量增大，发酵后 pH 逐渐下降，这是由于随着菌体的增多，产生的酸性物质也随之增多。在微生物竞争作用下，纳豆芽孢杆菌的生长受到抑制，其代谢产生的酸性物质未能持续累积。由图 8 可见，发酵后的可溶性固形物含量显著下降(P<0.05)，且当接种量大于等于 4%时，可溶固形物含量显著减少约 1%，随接种量的增大，无显著变化(P>0.05)，是由于低聚异麦芽糖不被一般细菌利用。当接种量为 3%时，发酵液的可溶性固形物的含量相对其他 3 组略高，其主要原因是接种的菌数较少，对基质碳水化合物的消耗较少。由图 9 可见，感官评分随接种量比例的增大呈现波动变化。接种量为 5%时，感官评分最高。此时纳豆芽孢杆菌适度生长繁殖，产生的发酵气味与紫薯自然香气交互融合效果最好，形成了良好的特殊发酵风味。而 3%的感官评分比 4%高，是由于此时菌体数量较少，紫薯自然香气占主导，发酵气味还未明显，评分偏高但不符合研发目的。接种量为 6%时，由于菌体增加使得营养物质加快减少[32]，微生物衰老并死亡，所产生的发酵气味相对偏少。因此确定最佳纳豆芽孢杆菌接种量为 5% (m:V)。

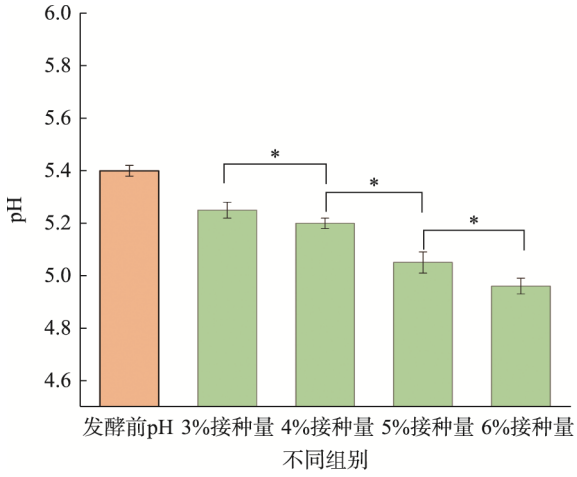


图 7　纳豆芽孢杆菌接种量对发酵前后 pH 的影响

Fig.7　Effects of the inoculation amount of *Bacillus natto* on pH before and after fermentation

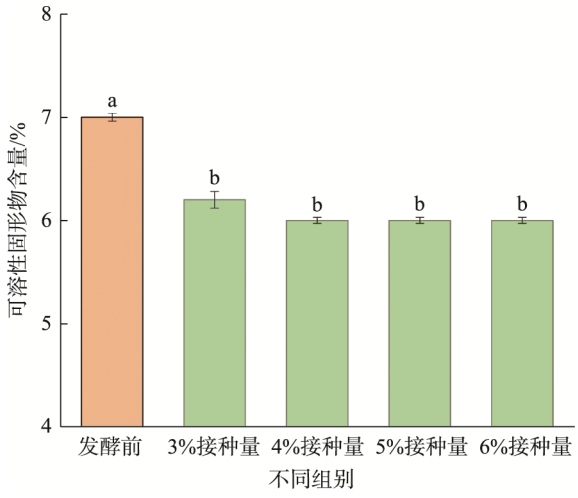


图 8　纳豆芽孢杆菌接种量对发酵前后可溶性固形物含量的影响

Fig.8　Effects of the inoculation amount of *Bacillus natto* on soluble solids content before and after fermentation

2.2.4　发酵温度的确定

由图 10 可见，随发酵温度升高，发酵后的 pH 逐渐降低，是由于温度升高，酶促反应加快，纳豆芽孢杆菌的新陈代谢加快而生成更多的酸性物质。但温度过高会使酶失活，所以发酵后的 pH 没有明显持续大幅度下降。由图 11 可见，4 种温度下发酵后的可溶性固形物含量均维持一定值，且较于发酵前均显著减少了约 1% (P<0.05)。与图 6 的试验分析结果相佐证，也表明了一定发酵温度及条件下，发酵温度对纳豆芽孢杆菌利用低聚异麦芽糖无影响。由图 12 可见，随发酵温度的升高，在 37 ℃时感官评分最高。此时基质得到适度发酵，

发酵气味与紫薯香气融合较好。当温度高于 37 ℃时，菌体生长繁殖加快，产生的酸性物质增多，产品发酸，影响口感。35 ℃时，温度相对较低，不适于纳豆芽孢杆菌的生长，发酵不充分，风味物质较少。故确定最佳发酵温度为 37 ℃。

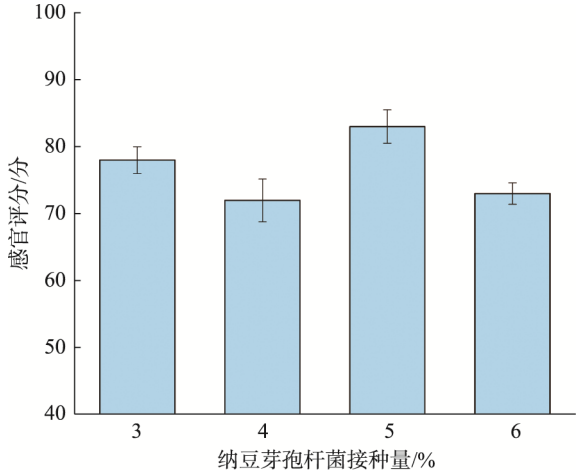


图 9 纳豆芽孢杆菌接种量对感官评分的影响

Fig.9 Effects of the inoculation amount of *Bacillus natto* on sensory scores

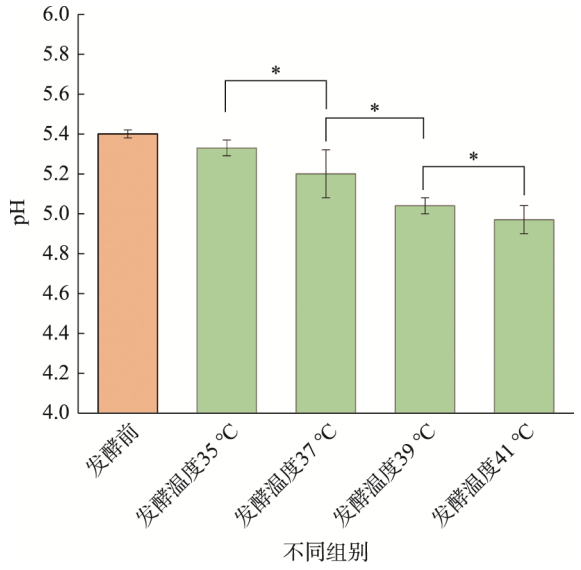


图 10 发酵温度对发酵前后 pH 的影响

Fig.10 Effects of fermentation temperature on pH before and after fermentation

2.2.5 发酵时间的确定

由图 13 可见，在一定发酵条件下，微生物发酵产酸，随时间增加，产酸量逐渐增多，但受到营养基质的限制，产酸速度逐渐平缓。因此随时间增加，发酵后的 pH 逐渐下降且趋于平缓。由图 14 可见，4 种发酵时间水平下发酵后的可溶性固形物含量较于发酵前均显著减少了约 1%，但随温度水平的升高，水平间无显著变化。与图 6 的试验分析结果相佐证，也表明了一定程度及发酵时间条件下，发酵时间的延长对纳豆芽孢杆菌利用低聚异麦芽糖无影响。

由图 15 可见，发酵时间为 10 h 时，感官评分最高。随发酵时间的延长，酸性物质增多，产品发酸，时间延长也会使得发酵菌进入衰亡期而产生了次级代谢产物[32–34]，出现不良发酵气味。发酵时间为 10 h 时，紫薯清汁发酵适当，气味适中，香气融合较好。故确定最佳发酵时间为 10 h。

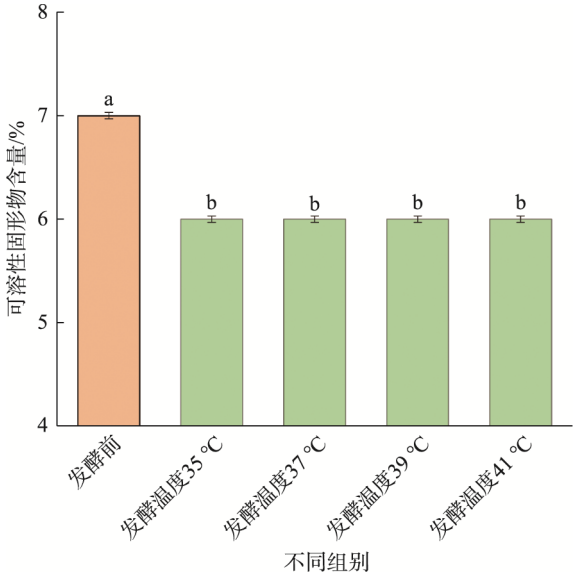


图 11 发酵温度对发酵前后可溶性固形物含量的影响

Fig.11 Effects of fermentation temperature on soluble solids content before and after fermentation

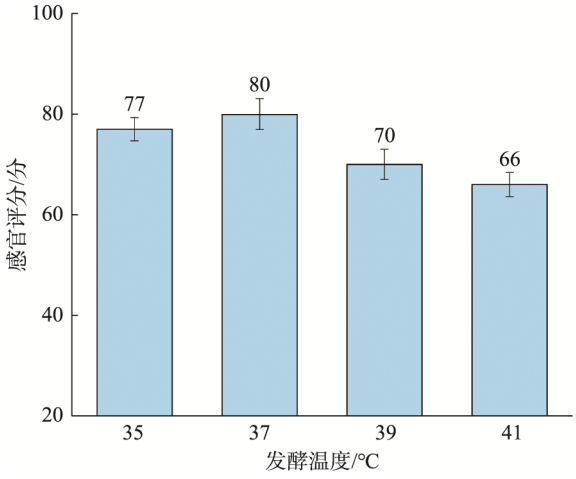


图 12 发酵温度对感官评分的影响

Fig.12 Effects of fermentation temperature on sensory scores

2.3 正交试验结果

根据 2.2 单因素试验结果，研究发现料液比对实验无显著性影响，故在料液比 1:4 (g:mL)的条件下，选择 *A*(低聚异麦芽糖添加比例)、*B*(纳豆芽孢杆菌接种量)、*C*(发酵温度)和 *D*(发酵时间)4 个主要因素，各选择 3 个水平建立 $L_9(3^4)$正交表，以下表 4 为正交试验结果。

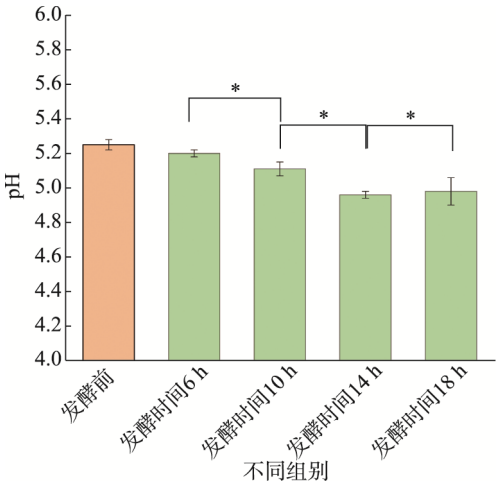


图 13　发酵时间对发酵前后 pH 的影响

Fig.13　Effects of fermentation time on pH before and after fermentation

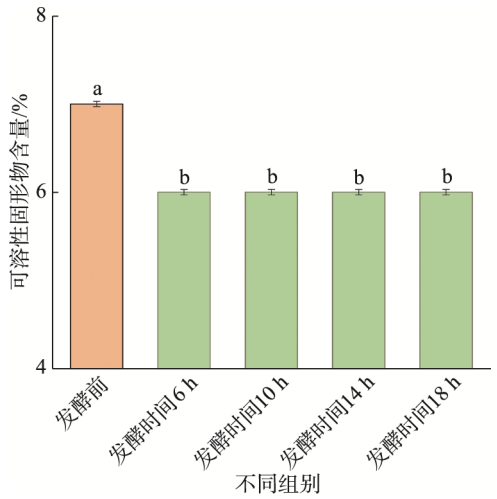


图 14　发酵时间对发酵前后可溶性固形物含量的影响

Fig.14　Effects of fermentation time on soluble solids content before and after fermentation

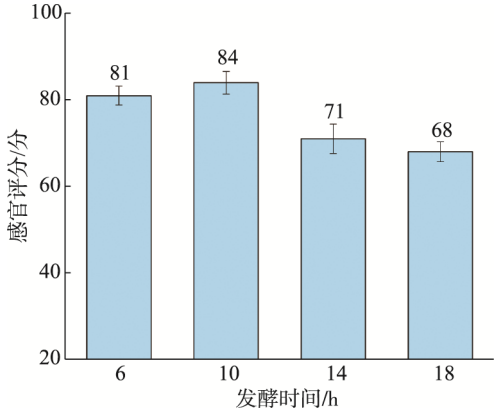


图 15　发酵时间对感官评分的影响

Fig.15　Effects of fermentation time on sensory scores

表 4　优化紫薯清汁发酵工艺正交试验结果

Table 4　Results of the orthogonal experiment for optimizing the fermentation process of purple sweet potato clear juice

试验号	因素				感官评分
	A	*B*	*C*	*D*	
1	1	1	1	1	80
2	1	2	2	2	69
3	1	3	3	3	78
4	2	1	2	3	72
5	2	2	3	1	76
6	2	3	1	2	76
7	3	1	3	2	82
8	3	2	1	3	72
9	3	3	2	1	80
K_1	227	234	228	236	
K_2	224	217	221	227	
K_3	234	234	236	222	
k_1	75.67	78.00	76.00	78.67	
k_2	74.67	72.33	73.67	75.67	
k_3	78.00	78.00	78.67	74.00	
极差 R	3.33	5.67	5.00	4.67	
最优方案	$A_3B_1C_3D_1$ 或 $A_3B_3C_3D_1$				

由表 4 可得, 极差 R_B>R_C>R_D>R_A, 因此 4 种条件的重要性排序为: 纳豆芽孢杆菌接种量>发酵温度>发酵时间>低聚异麦芽糖添加比例, 最优工艺条件组合为 $A_3B_1C_3D_1$ 或 $A_3B_3C_3D_1$。由于极差分析得出的两个最优工艺条件组合均不在表中的 9 组试验中, 故又分别对此两组进行 3 次重复的试验验证, $A_3B_1C_3D_1$ 组综合感官得分为 86 分, $A_3B_3C_3D_1$ 组综合感官得分为 83 分, 故最优工艺条件组合为 $A_3B_1C_3D_1$, 即接种量为 4% (g:mL)、发酵温度为 39 ℃、发酵时间为 8 h、研浆料液比为 1:4 (g:mL)、低聚异麦芽糖添加比例为 10%。

2.4　产品品质分析结果

2.4.1　产品相关指标

由表 5 可知, 产品的 pH 为 5.2~5.5, 呈弱酸性, 能够抑制部分病原微生物的生长, 且能维持产品的稳定性。可溶性固形物含量为 10%~11%, 表明产品具有适量的糖以及可溶性成分, 具备良好的口感基础。脂肪含量为 0, 符合目前主流的低脂健康食品的饮食需求。每 100 g 产品含有 0.15 g 蛋白质, 本产品具有一定的营养价值。

依据 GB 7101—2022《食品安全国家标准 饮料》对产品进行微生物指标检测。结果显示, 大肠杆菌属、霉菌和酵母菌均为未检出, 说明产品在生产过程中未受到粪便污染及常见腐败微生物的污染, 卫生控制良好, 符合国家食品安全标准。

除此之外, 产品显示出较高的活菌浓度, 其纳豆芽孢杆菌活菌数大于 1.7×10^8 CFU/mL, 具有良好的益生菌潜

力。纳豆芽孢杆菌已被多项研究证实具有改善肠道健康[9]、增强免疫力[13]等功能，因此本产品在功能性饮料开发方面具有较高的应用价值。

表 5 产品相关指标
Table 5 Product related indicators

项目	指标
pH	5.2~5.5
可溶性固形物/%	10~11
脂肪/(g/100 g)	0.0
蛋白质/(g/100 g)	0.15
大肠杆菌属/(MPN/100 mL)	未检出
霉菌/(CFU/mL)	未检出
酵母菌/(CFU/mL)	未检出
纳豆芽孢杆菌活菌数/(CFU/mL)	>1.7×10^8

2.4.2 发酵前后气味变化情况

本研究通过电子鼻的检测探究产品发酵前后的气味变化规律，以下表 6 为电子鼻各传感器对应的敏感物质，并对比检测后得出以最优工艺条件制备的紫薯清汁、发酵基质以及产品的气味响应值雷达图，探究其变化。在对样品检测至 60~80 s 和 90~100 s 时，各传感器变化趋于平稳，故分别选取 75 s 和 95 s 时的响应值雷达图进行以下分析。

由图 16 和图 17 得出，紫薯清汁和发酵基质中各传感器响应值均相近，两者的 W1S、W1W 和 W2S 的响应值最突出，表明两者中的烷类、硫化物、醇类以及醛酮类物质含量最高。但发酵基质中添加了低聚异麦芽糖，而紫薯清汁中没有，故本研究认为低聚异麦芽糖在产品的风味形成方面无明显作用。

由图 18 可得，仅有 W5S 和 W1W 的响应值最突出，即产品中的风味成分以氮氨化合物和硫化物为主，而这两种风味成分均为豆类食品含量丰富的物质。与图 17 对比，由于纳豆芽孢杆菌的微生物发酵作用，将氮氨化合物和硫化物以外的风味物质原成分分解转化，而使得产品具有特殊纳豆发酵风味。

表 6 电子鼻传感器对应的敏感物质
Table 6 Sensitive substances corresponding to the electronic nose sensor

阵列序号	传感器名称	敏感物质[35–36]
1	W1C	芳烃化合物
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨类芳香成分
4	W6S	氢气
5	W5C	烷烃芳香成分
6	W1S	烷类
7	W1W	硫化物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	芳烃化合物，有机硫化合物
10	W3S	烷类，脂肪类

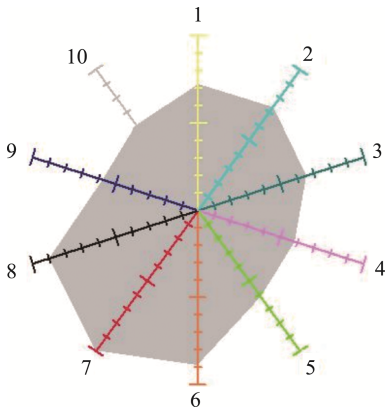


图 16 气味响应值雷达图(紫薯清汁)
Fig.16 Odor response value radar chart (purple sweet potato clear juice)

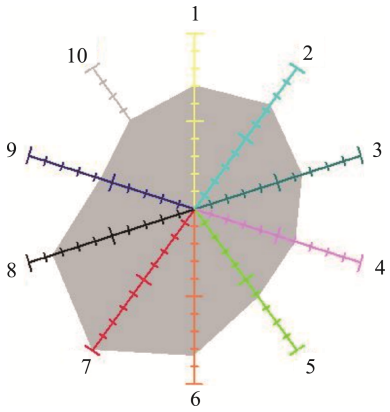


图 17 气味响应值雷达图(发酵基质)
Fig.17 Odor response value radar map (fermentation matrix)

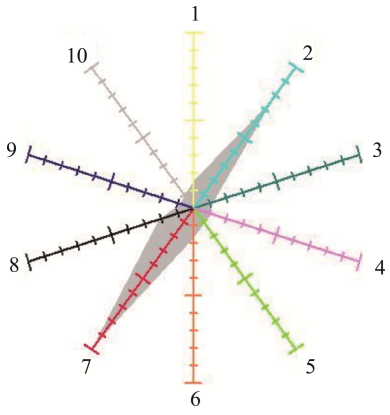


图 18 气味响应值雷达图(产品)
Fig.18 Odor response value radar plot (product)

3 讨论与结论

本研究采用单因素试验和正交试验系统地探究了料液比、低聚异麦芽糖添加量比例、纳豆芽孢杆菌接种量、发酵温度和发酵时间对纳豆芽孢杆菌液体发酵 pH、可溶固形物含量和感官评分的影响。

在食品生产中, 纳豆芽孢杆菌可被应用于食品保鲜、菌种改良、提高食品加工副产物附加值及生产新型功能性食品等[36]。在食品保鲜方面的应用, 张丽靖等[37]在豆浆中添加纳豆芽孢杆菌抗菌粗提液使其达到显著抗菌作用, 王东等[38]探究了纳豆菌抗菌肽 APNT-6 对凡纳滨对虾的低温保鲜效果。在菌种改良应用方面, 余凤云等[39]利用 PCR 法扩增纳豆芽孢杆菌的纳豆激酶原基因, 构建其基因载体, 转化乳酸乳球菌, 得到了具栓溶活性的重组菌。但纳豆芽孢杆菌在相关饮品开发方面仍存在较大空白, 本研究首次将其直接接种于果蔬汁中进行发酵, 且完全替代蔗糖, 使用低聚异麦芽糖, 验证了该菌种在非豆类基质中的发酵适应性及低聚异麦芽糖不被其利用的特性, 拓展了益生菌发酵果蔬饮品的原料与菌种组合。

综上, 本研究的创新点主要体现在 3 个方面: (1)目前紫薯相关饮品种类以及纳豆芽孢杆菌发酵饮料的开发研究较少, 更是鲜有将纳豆芽孢杆菌投入果蔬汁中发酵的研究报道。益生菌与果蔬的结合有广阔的发展前景, 本研究为首次将纳豆芽孢杆菌接种于紫薯清汁并采用微生物发酵技术, 最终开发出一款发酵型紫薯清汁活菌饮品, 产品同时具紫薯香气和特殊发酵风味、口感清爽、色泽良好、甜度适中。(2)目前关于低聚异麦芽糖用于发酵食品的应用一般为部分替代蔗糖, 本研究中采用完全替代的方式, 同时作为抑制发酵气味形成的路径之一, 此举之下研制的饮品口感更清爽柔和, 理论上热量值更低, 满足人们对于健康饮食的要求。(3)本研究研制的饮品具有低聚异麦芽糖和纳豆芽孢杆菌的复合保健作用, 为开发新型益生菌功能性饮品提供了工艺参考, 对促进紫薯产业链延伸、提升附加值以及助力乡村振兴具有实际应用前景。

参考文献

[1] Cao Zhenhui, Green-Johnson J M, Buckley N D, et al. Bioactivity of soy-based fermented foods: a review [J]. Biotechnology Advances, 2019, 37(1): 223–238.

[2] Omura K, Hitosugi M, Zhu Xia, et al. A newly derived protein from *Bacillus subtilis* natto with both antithrombotic and fibrinolytic effects [J]. Journal of Pharmacological Sciences, 2005, 99(3): 247–251.

[3] Hsia C H, Shen M C, Lin J S, et al. Nattokinase decreases plasma levels of fibrinogen, factor VII, and factor VIII in human subjects [J]. Nutrition Research, 2009, 29(3): 190–196.

[4] Sanjukta S, Rai A K. Production of bioactive peptides during soybean fermentation and their potential health benefits [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 50: 1–10.

[5] Ademiluyi A O, Oboh G, Boligon A A, et al. Effect of fermented soybean condiment supplemented diet on *α*-amylase and *α*-glucosidase activities in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 9: 1–9.

[6] Yang Juan, Wu Xiaobin, Chen Honglei, et al. A value-added approach to improve the nutritional quality of soybean meal byproduct: enhancing its antioxidant activity through fermentation by *Bacillus amyloliquefaciens* SWJS22 [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 396–403.

[7] 李秀凉, 倪庆圆, 杨宸, 等. 纳豆芽孢杆菌发酵菜用大豆中总黄酮的提取及其降血脂效果评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 223–230.
Li Xiuliang, Ni Qingyuan, Yang Chen, et al. Extraction of total flavonoids in vegetable soybean fermented by *Bacillus natto* and evaluation of its effect on hypolipidemic effect [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 223–230.

[8] 吴明霞, 赵文净, 郑昇阳, 等. 纳豆芽孢杆菌发酵紫菜的培养基优化[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2022, 34(2): 168–173.
Wu Mingxia, Zhao Wenjing, Zheng Shengyang, et al. Optimization of culture medium for fermentation of *Porphyra* by *Bacillus natto* [J]. Journal of Ningde Normal University (Natural Science), 2022, 34(2): 168–173.

[9] 楚佳希. 纳豆芽孢杆菌发酵小米糠制备膳食纤维的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 17–32.
Chu Jiaxi. Research on dietary fibre of millet bran fermented by bacillussubtilis [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016: 17–32.

[10] Dong Mingzhu, An Juanyan, Wang Litao, et al. Development of fermented chestnut with *Bacillus natto*: functional and sensory properties [J]. Food Research International, 2020, 130: 108941.

[11] Guo Na, Jiang Yiwei, Song Xinrui, et al. Effect of *Bacillus natto* solid-state fermentation on the functional constituents and properties of *Ginkgo* seeds [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(5): e12820.

[12] 徐慧, 孙晓富, 李可心, 等. 纳豆芽孢杆菌发酵牡蛎的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(4): 107–111.
Xu Hui, Sun Xiaofu, Li Kexin, et al. Study on fermentation technology of oyster by *Bacillus natto* [J]. China Food Additives, 2019, 30(4): 107–111.

[13] 葛英亮, 谢玉锋, 赵全, 等. 纳豆发酵型饮料的研制[J]. 饮料工业, 2013, 16(5): 29–32, 36.
Ge Yingliang, Xie Yufeng, Zhao Quan, et al. A study on a fermented natto beverage [J]. The Beverage Industry, 2013, 16(5): 29–32, 36.

[14] 王继伟, 吉亚力, 葛英亮, 等. 纳豆芽孢杆菌发酵玉米浆饮料工艺[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 480–482.
Wang Jiwei, Ji Yali, Ge Yingliang, et al. Optimizing the production process of *Bacillus* natto-fermented corn steep liquor beverage [J]. Food Science, 2010, 31(18): 480–482.

[15] 杨柳. 米糠饮料发酵条件的研究[J]. 粮油加工(电子版), 2014(6): 57–59.
Yang Liu. Fermentation conditions for rice bran beverage [J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Version), 2014(6): 57–59.

[16] 杨柳, 陈宇飞. 黑豆纳豆饮料发酵条件的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(10): 39–42.
Yang Liu, Chen Yufei. Study on fermentation conditions of black beans and natto beverage [J]. Cereal & Feed Industry, 2014(10): 39–42.

[17] Jiang Tian, Mao Ying, Sui Lushan, et al. Degradation of anthocyanins and polymeric color formation during heat treatment of purple sweet potato extract at different pH [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 460–470.

[18] Zhang Jieyu, Yang Yujie, Lv Rongzhen, et al. Sugar reduction process of purple sweet potato concentrated juice by microbial fermentation for improved performance of natural pigments [J]. Biochemical Engineering Journal, 2023, 191: 108781.

[19] Velly H, Djali M, Sukarminah E, et al. The effect of fermentation time and

consortium starter bacteria on properties of modified purple sweet potato flour [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5). DOI: 10. 1111/JFPP. 16522.

[20] 揭小玲. 紫薯全粉品质特性及紫薯饼干加工技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 34–46.
Jie Xiaoling. Study on the quality characteristics of purple sweet potato flour and the processing technology of purple sweet potato biscuits [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013: 34–46.

[21] Tang Chao, Han Jiaqi, Chen Dan, et al. Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102670.

[22] Bendokas V, Skemiene K, Trumbeckaite S, et al. Anthocyanins: from plant pigments to health benefits at mitochondrial level [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(19): 3352–3365.

[23] Speer H, D'Cunha N M, Alexopoulos N I, et al. Anthocyanins and human health: a focus on oxidative stress, inflammation and disease [J]. Antioxidants, 2020, 9(5): 366.

[24] Krga I, Milenkovic D. Anthocyanins: from sources and bioavailability to cardiovascular-health benefits and molecular mechanisms of action [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(7): 1771–1783.

[25] Winter A N, Bickford P C. Anthocyanins and their metabolites as therapeutic agents for neurodegenerative disease [J]. Antioxidants, 2019, 8(9): 333.

[26] Li Yue, Zhao Renyong, Tian Shuangqi, et al. Effect of wheat bran fermentation with *Wickerhamomyces anomalus*, *Pediococcus pentosaceus*, and *Bacillus natto* on flavor, structure, and processing properties [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(12): e70692.

[27] Yang Botao, Wu Jialin, Li Cuiqin, et al. Physicochemical analysis during co-fermentation of saccharified potato natto with *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis and *Bacillus subtilis* [J]. LWT, 2025, 236: 118673.

[28] Yi Yunxin, Chen Moutong, Coldea T E, et al. A novel integrated bioprocessing strategy for co-production and sequential extraction of menaquinone-7, nattokinase, and γ-polyglutamic acid from *Bacillus subtilis* natto [J]. Food Bioscience, 2025, 69: 106915.

[29] Li Dongyu, Liu Zhen, Xu Xing, et al. Co-production of menaquinone-7 and poly-γ-glutamic acid by ARTP-induced mutagenesis in *Bacillus natto* [J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2025, 5(3): 1100–1110.

[30] Fonteles T V, Costa M G M, de Jesus A L T, et al. Optimization of the fermentation of cantaloupe juice by *Lactobacillus casei* NRRL B-442 [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(7): 2819–2826.

[31] 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 Di, Wang Ying, Zhang Yanli, 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.

[32] 赵家乐, 吴虹艳, 孔令姝, 等. 响应面法优化蓝靛果桑葚低糖饮料发酵工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(8): 76–80.
Zhao Jiale, Wu Hongyan, Kong Lingshu, et al. Optimization of fermentation process of *Lonicera* eduils and mulberry low sugar beverage by response surface methodology [J]. The Food Industry, 2019, 40(8): 76–80.

[33] 杨丽, 孙泽萍, 任礼霖, 等. 响应面法优化混合菌种发酵苹果汁工艺[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 203–208.
Yang Li, Sun Zeping, Ren Lilin, et al. Optimization of fermentation process of apple juice with mixed strains based on response surface method [J]. China Brewing, 2025, 44(7): 203–208.

[34] 张智慧, 庞惟俏, 徐炳政, 等. 藜麦和蓝靛果发酵菌株的筛选及复合发酵工艺的优化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 204–213.
Zhang Zhihui, Pang Weiqiao, Xu Bingzheng, et al. Screening of fermentation strains of quinoa and *Lonicera caerulea* and optimization of complex fermentation process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 204–213.

[35] 文佳玉, 向麒文, 刘秋妍, 等. 清汁型米酒的研制及挥发性风味成分分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(1): 203–209.
Wen Jiayu, Xiang Qiwen, Liu Qiuyan, et al. Preparation and volatile flavor components of clear juice type rice wine [J]. China Brewing, 2024, 43(1): 203–209.

[36] 李梦丹, 谢艳华, 陈力力, 等. 纳豆芽孢杆菌及其在食品生产中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(8): 3209–3215.
Li Mengdan, Xie Yanhua, Chen Lili, et al. Research advances of *Bacillus natto* and its application in food production [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(8): 3209–3215.

[37] 张丽靖, 陈志良, 杨郁. 纳豆菌体外抑制大肠杆菌的培养基优化[J]. 生物技术, 2009, 19(1): 40–42.
Zhang Lijing, Chen Zhiliang, Yang Yu. Optimization of medium for inhibition of *Bacillus natto* to *Escherichia coli in vitro* [J]. Biotechnology, 2009, 19(1): 40–42.

[38] 王东, 孙力军, 王雅玲, 等. 纳豆菌抗菌肽 APNT-6 对凡纳滨对虾的低温保鲜效果[J]. 水产学报, 2012, 36(7): 1133–1139.
Wang Dong, Sun Lijun, Wang Yaling, et al. Effect of antimicrobial peptide APNT-6 produced by *Bacillus natto* on fresh-keeping of *Litopenaeus vannamei* at low temperature [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(7): 1133–1139.

[39] 余凤云, 冯浩, 许芳, 等. 具有溶栓活性的重组乳酸乳球菌的构建[J]. 中国酿造, 2011, 30(1): 100–103.
Yu Fengyun, Feng Hao, Xu Fang, et al. Construction of recombinant *Lactococcus lactis* with fibrinolytic activity [J]. China Brewing, 2011, 30(1): 100–103.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)