

汪姣玲, 李加兴, 岳元媛. 植物乳杆菌和肠膜明串珠菌混合发酵泡萝卜的工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 172-182. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040282

WANG Jiaoling, LI Jiaying, YUE Yuanyuan. Process Optimization on Mixed Fermentation of Pickled Radish with *Lactobacillus plantarum* and *Leuconostoc mesenteroides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 172-182. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040282

· 工艺技术 ·

# 植物乳杆菌和肠膜明串珠菌混合 发酵泡萝卜的工艺优化

汪姣玲<sup>1</sup>, 李加兴<sup>2</sup>, 岳元媛<sup>3,\*</sup>

(1.雪天盐业集团股份有限公司, 湖南长沙 410015;  
2.湖南省轻工盐业集团技术中心有限公司, 湖南长沙 410015;  
3.湖南省井矿盐工程技术研究中心, 湖南长沙 410015)

**摘要:** 利用植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*, LP) 和肠膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*, LM) 混合发酵改善泡萝卜品质。以发酵过程中泡萝卜的亚硝酸盐含量、pH、总酸含量、总糖含量、质构特性和感官评分为评价指标, 研究菌种配比、接种量、食盐种类和添加量、氯化钙及蔗糖添加量对泡渍萝卜品质的影响, 并利用电子舌进行滋味对比分析。通过响应面试验, 确定泡渍萝卜的最佳工艺为: 植物乳杆菌和肠膜明串珠菌配比为 1.6:1, 接种量 5.7%、低钠盐添加量 4.5%、氯化钙添加量 0.3%、蔗糖添加量 2%。在此条件下发酵 6 d, 与自然发酵组相比, 接种萝卜的总酸含量、脆度及感官评分显著增加, 分别为 0.59 g/100 g、108.8 N 和 38.9 分, 且亚硝酸盐含量低, 为 0.41 mg/kg。电子舌测定结果表明, 混合发酵可有效降低泡萝卜的苦味回味, 增强酸味、甜味和鲜味。综上, 本研究表明混合发酵有利于提升泡渍萝卜的质地、风味和安全性。

**关键词:** 乳酸菌, 泡萝卜, 接种发酵, 响应面法, 电子舌

中图分类号: TS255.54

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)03-0172-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040282



本文网刊:

## Process Optimization on Mixed Fermentation of Pickled Radish with *Lactobacillus plantarum* and *Leuconostoc mesenteroides*

WANG Jiaoling<sup>1</sup>, LI Jiaying<sup>2</sup>, YUE Yuanyuan<sup>3,\*</sup>

(1.Snowsky Salt Industry Group Co., Ltd., Changsha 410015, China;  
2.Hunan Light Industry and Salt Industry Group Technology Centre Co., Ltd., Changsha 410015, China;  
3.Hunan Provincial Research Centre of Well and Rock Salt Engineering Technology, Changsha 410015, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of pickled radish, *Lactobacillus plantarum* and *Leuconostoc mesenteroides* were mixedly used as fermentation strains. The nitrite content, pH value, total acid content, total sugar content, texture characteristics and sensory score of pickled radish during fermentation were used as evaluation index to study the effects of strain ratio, inoculation amount, salt type and addition amount, calcium chloride and sucrose addition amount on the quality of pickled radish, and the contrastive analysis of taste was used by electronic tongue. Through the response surface test, the optimum fermentation parameters of pickled radish was as follows: The ratio of *Lactobacillus plantarum* and *Leuconostoc mesenterica* was 1.6:1, the inoculation amount was 5.7%, the addition amount of low sodium salt was 4.5%, the addition amount of calcium chloride was 0.3%, and the addition amount of sucrose was 2%. Under these conditions, compared with the natural fermentation group, the total acid content, brittleness and sensory score of inoculated radish after 6 days of fermentation increased significantly, which were 0.59 g/100 g, 108.8 N and 38.9 points, respectively, and the nitrite content

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 长沙市科技计划项目 (kh1902249)。

作者简介: 汪姣玲 (1989-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食盐及相关食品研发、标准研究与质量检测, E-mail: sansewjl@sina.com。

\* 通信作者: 岳元媛 (1982-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 食盐及相关食品研发、标准研究与质量检测, E-mail: 13554829@qq.com。

was 0.41 mg/kg. The results of electronic tongue test showed that the mixed fermentation could effectively reduce the bitterness and aftertaste of pickled radish and enhance the acidity, sweetness and freshness. In conclusion, this study showed that mixed fermentation was beneficial to improve the texture, flavor and safety of pickled radish.

**Key words:** *Lactobacillus*; pickled radish; inoculated fermentation; response surface methodology; electronic tongue

萝卜,是十字花科的根系类植物,又名莱菔,原始种起源于欧、亚温暖海岸的野萝卜,是世界古老的栽培作物之一,易成活、产量高、销量广<sup>[1]</sup>。白萝卜为最常见的品种,肉质白嫩,水分充足,口感略带辛辣,爽脆可口;富含多种营养物质,如维生素、氨基酸、膳食纤维、淀粉酶、可溶性糖、异硫氰酸酯、萝卜硫素和钾、磷、钙、铁等矿质元素<sup>[2-5]</sup>。生食有助于润肺止咳,化痰解渴;熟食可调整胃肠机能,促进肠道消化;另外,还具有降血脂、降胆固醇等功效<sup>[6]</sup>。同时,白萝卜也是民间传统发酵蔬菜的常用原料,人们添加食盐、香辛料、蔗糖等辅料生产的泡渍萝卜,口感清脆、酸甜可口,其富含的大量乳酸菌能够帮助肠道有益菌群的生长繁殖和正常分布;有机酸和酯类等物质则有助于缓解便秘<sup>[7-8]</sup>。

目前,我国大部分地区采用传统的自然发酵方式,操作简单,但由于原料及环境带杂菌或操作不规范,很容易导致泡萝卜腐坏变质,且生产周期长,可控程度低,产生有害产物的风险高<sup>[9]</sup>。乳酸菌发酵不仅有效提升发酵制品安全性<sup>[10]</sup>,还能加快发酵速度,提升产品风味<sup>[11-12]</sup>,因此,近些年利用乳酸菌加工发酵食品的研究越来越多。其中,植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)是接种发酵中最常用的菌株<sup>[13-14]</sup>。李庆羊等<sup>[15]</sup>以白萝卜为原料,分别接种植物乳杆菌和棒状乳杆菌以及混合菌种发酵萝卜干,发现接种乳酸菌发酵能加快 pH 的下降和总酸的上升,混菌发酵的萝卜干总酸和游离氨基酸含量最高,风味评价最好。史婷等<sup>[16]</sup>研究发现发酵乳杆菌、嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌 3 株菌混合发酵可显著增加香气成分的种类和含量,有效改善剁辣椒的口感与风味。此外,肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*, LM)由于在发酵初期较为活跃,是蔬菜发酵过程的启动菌群,占优势作用,同时异型乳酸发酵产品品质比同型乳酸发酵产品要好,因此也被广泛使用<sup>[17-19]</sup>。李莘莘等<sup>[20]</sup>用不同菌种组合的发酵剂发酵萝卜,发现有肠膜明串珠菌的菌种组合发酵初期产酸快,有戊糖乳杆菌和植物乳杆菌的菌种组合发酵中后期产酸快且产酸量大。

由此可以看出,肠膜明串珠菌和植物乳杆菌分别在发酵初期、中后期为优势菌群,然而目前少见利用以上两种乳酸菌混合发酵泡萝卜的研究。因此,本文拟以白萝卜为原料,利用植物乳杆菌和肠膜明串珠菌进行混合发酵,测定发酵过程中的亚硝酸盐含量、pH、总酸含量、总糖含量等理化指标以及质构特性,并进行感官评分和电子舌分析,探究不同因素条件对泡渍萝卜品质的影响,为泡萝卜的工业化安全、稳定

生产提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

植物乳杆菌、肠膜明串珠菌 中国工业微生物菌种保藏管理中心;氯化钙(食品级) 连云港日丰钙镁有限公司;白萝卜、蔗糖、精制盐、粉洗盐、日晒盐、低钠盐 长沙步步高超市红星店。

SA402B 电子舌 日本 INSENT 公司;TMS-PRO 质构仪 美国 Food Technology Corporation 公司;UV1900 紫外可见分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司;ES-E210B 电子天平 天津市德安特传感技术有限公司;PHS-3C 型 pH 计 上海仪电科学仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 水泡萝卜发酵工艺流程 白萝卜→清洗→切分→漂烫→晾干→入坛(等质量腌制液)→水封发酵

挑选新鲜萝卜,清洗干净去除表皮杂质,切成 50 mm×10 mm×10 mm 相同大小的长方体块,放入 50 ℃ 温开水中漂烫 20 min,捞出晾干后装坛,并加入用食盐、氯化钙和蔗糖配制好的等质量腌制液,接种或不接种混合菌种(菌落总数 10<sup>8</sup> CFU/mL),拌匀,坛口用水密封,室温下进行发酵。

1.2.2 单因素实验设计 分别研究 LP 和 LM 配比、接种量、食盐种类、食盐添加量、氯化钙添加量和蔗糖添加量对泡萝卜 pH、总酸含量、总糖含量、亚硝酸盐、质构特性和感官评分等的影响,确定泡萝卜发酵工艺的主要影响因素和水平,自然发酵为对照组。

1.2.2.1 LP 和 LM 对比对泡萝卜品质的影响 将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,添加 0.3% 氯化钙、2% 蔗糖和 5% 食盐的腌制液,并分别按照 2:1、1.5:1、1:1、1:1.5、1:2(v/v)的配比将 LP 和 LM 混匀,以 5% 接种量接种发酵,考察 LP 和 LM 对比对泡萝卜品质的影响。

1.2.2.2 接种量对泡萝卜品质的影响 将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,添加 0.3% 氯化钙、2% 蔗糖和 5% 食盐的腌制液,并按照 1.5:1 的配比将 LP 和 LM 混匀,分别以 1%、3%、5%、7%、9% 的接种量接种发酵,考察接种量对泡萝卜品质的影响。

1.2.2.3 食盐种类对泡萝卜品质的影响 将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,分别添加以精制盐、粉洗盐、日晒盐、低钠盐 4 种不同类型食盐 5% 与 0.3% 氯化钙和 2% 蔗糖配制的腌制液,并按照 1.5:1 的配比将 LP 和 LM 混匀,以 5% 接种量接种发酵,考察食盐种类对泡萝卜品质的影响。

1.2.2.4 食盐添加量对泡萝卜品质的影响 将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,分别添加1%、3%、5%、7%、9%的食盐与0.3%氯化钙和2%蔗糖配制的腌制液,并按照1.5:1的配比将LP和LM混匀,以5%接种量接种发酵,考察食盐添加量对泡萝卜品质的影响。

1.2.2.5 氯化钙添加量对泡萝卜品质的影响 氯化钙影响腌制萝卜的脆度。将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,分别添加0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%的氯化钙与2%蔗糖和5%食盐配制的腌制液,并按照1.5:1的配比将LP和LM混匀,以5%接种量接种发酵,考察氯化钙添加量对泡萝卜品质的影响。

1.2.2.6 蔗糖添加量对泡萝卜品质的影响 蔗糖作为乳酸菌重要的碳源物质,影响发酵进程。将萝卜洗净、漂烫、晾干后装坛,分别添加1%、2%、3%、4%、5%的蔗糖与0.3%氯化钙和5%食盐配制的腌制液,并按照1.5:1的配比将LP和LM混匀,以5%接种量接种发酵,考察蔗糖添加量对泡萝卜品质的影响。

1.2.3 响应面试验设计 综合单因素实验结果,发现植物乳杆菌与肠膜明串珠菌配比、接种量和食盐添加量三个因素对泡萝卜的感官评分影响较大,因此,以LP和LM配比(A)、接种量(B)、食盐添加量(C)为试验因素,以感官评分为响应值,采用Design-Expert V8.0.6软件,进行三因素三水平的Box-Behnken试验设计,试验设计因素与水平如表1所示。

表1 Box-Behnken 试验因素和水平  
Table 1 Factors and levers used in Box-Behnken design

水平	因素		
	A LP和LM配比	B 接种量(%)	C 食盐添加量(%)
-1	1:1	3	3
0	1.5:1	5	5
1	2:1	7	7

1.2.4 理化指标的测定 亚硝酸盐含量测定:盐酸萘乙二胺法,参照国标 GB 5009.33-2016 方法。

总酸含量测定:酸碱滴定法,参照国标 GB/T 12456-2008 方法,总酸含量以乳酸计。

pH 测定:采用数字 pH 计,用 pH4.00 和 pH6.86 标准缓冲溶液校准。

总糖含量测定:参考赵楠<sup>[21]</sup>的方法,取5g萝卜匀浆后加入25mL蒸馏水煮沸,冷却过滤,定容至50mL,量取1mL上清液,利用硫酸蒽酮法测定总糖含量。

1.2.5 质构特性测定 将萝卜切成25mm×10mm×10mm长方体块,在TPA模式下进行测试。质构仪设定参数参考孙钟雷等<sup>[22]</sup>的方法:TMS25.4圆柱形探头,触发力0.2N,测试速度100mm/min,样品形变量70%,回程高度15mm,同一种样品重复测试10次,结果取平均值。

1.2.6 感官评定方法 根据国标 GB/T 16291.1-2012 对感官人员进行筛选和培训,选取12名组成感官评定小组,对泡萝卜的色泽、香气、口感和滋味进行感官评分,每项10分,满分40分,取平均分作为最终评分,感官评分标准见表2。

1.2.7 电子舌检测滋味方法 采用电子舌测定产品滋味,利用与味蕾细胞工作原理相类似的人工脂膜传感技术,认知并表征味强度及味特征<sup>[23]</sup>。测试参考云琳<sup>[24]</sup>的方法并略作修改:称取100g泡萝卜样品加入200mL基准液匀浆、过滤,10000g离心20min,取上清液150mL待用。传感器活化后,准确称取50g(±0.0003g)样品上清液,完全溶解于100mL基准液中,过滤,取样35mL上机测试,重复测定4次。

### 1.3 数据处理

采用SPSS 22.0、Excel 2007 软件对数据进行统计学分析与绘图,每组试验重复3次, $P < 0.05$ ,差异显著;采用Design-Expert V8.0.6软件,进行三因素三水平的Box-Behnken试验设计;采用电子舌自带的Taste Analysis System Application软件进行数据采集与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 LP和LM配比对泡萝卜品质的影响

2.1.1 LP和LM配比对泡萝卜pH和总酸含量的影响 pH和总酸含量可以反映发酵过程中微生物的产酸情况,也是衡量泡萝卜成熟情况和品质的重要指标<sup>[25]</sup>。由图1可知,发酵初期,接种乳酸菌的泡萝卜pH迅速下降,随之总酸含量迅速升高,而自然发酵的泡萝卜pH和总酸含量变化缓慢。这是由于发酵剂中的乳酸菌含量丰富,在发酵初期形成优势菌群,抑制了其他杂菌的生长,从而快速大量产酸,而酸含量的增加反过来又加强了对不耐酸杂菌繁殖的抑制<sup>[26]</sup>。

表2 感官评分标准

Table 2 The sensory evaluation standards

评分(分)	性状描述			
	色泽	香气	滋味	口感
0-3	褐变严重,发酵液浑浊	有不良气味	咸涩或有酸败等异味	软烂或过硬有渣
4-6	有褐变,发酵液轻微浑浊	香气不正,无异味	滋味一般,稍酸或稍咸	脆度一般,稍软或稍硬
7-8	少许褐变,发酵液轻微浑浊	香气较淡,无异味	滋味尚可,微酸	脆度较好,口感略粗糙
9-10	均匀白色,发酵液清澈透亮	酸香浓郁,无异味	滋味鲜美,酸咸适中	软硬适中,爽脆可口

在发酵过程中, LM 占比越高, 变化越迅速, LP 和 LM 配比为 1:2(v/v) 的试验组 pH 在发酵第 3 d 达到 3.18, 总酸含量在发酵第 4 d 达到 0.41 g/100 g, 而 LP 和 LM 配比为 2:1 的试验组虽前期没有 1:2 试验组变化迅速, 但在发酵第 6 d 其 pH 为 3.06, 总酸含量为 0.51 g/100 g。这与 LM 和 LP 生长特性有关, LM 为异型发酵乳酸菌, 它的延滞期最短, 能迅速繁殖产生乳酸等物质, 降低环境的 pH; LP 为同型发酵菌种, 到发酵后期, 乳酸浓度继续增高, 大部分乳酸菌的活动逐渐受到抑制, 而耐酸性较强的 LP 成为优势菌, 继续发酵<sup>[27]</sup>。所有试验组在发酵第 4~7 d, pH 和总酸含量趋于稳定, 1:2 和 1:1.5 试验组在发酵第 7 d 总酸含量降低, 这可能是因为盐分的作用使萝卜组织脱水, 一些可溶性酸等营养成分进入发酵液, 导致总酸含量降低<sup>[28]</sup>, 也可能是由于发酵过程中其他微生物利用消耗了乳酸<sup>[29]</sup>。

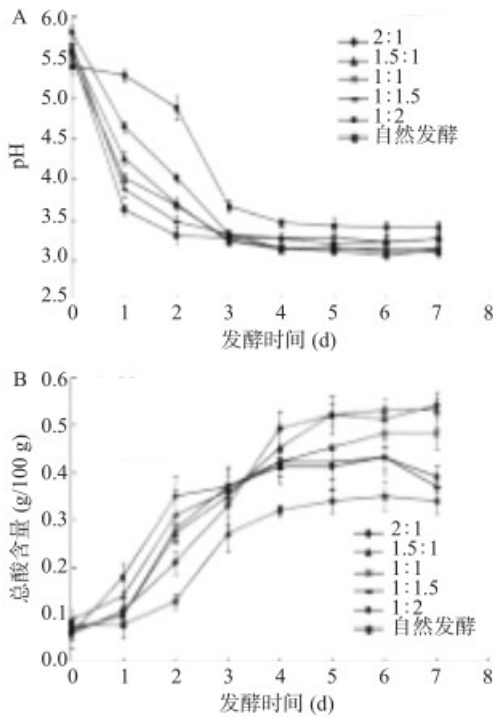


图 1 LP 和 LM 配比对泡萝卜 pH 和总酸含量的影响  
Fig.1 Effects of LP and LM ratio on pH value and total acid content of pickled radish

2.1.2 LP 和 LM 配比对泡萝卜总糖含量的影响 总糖含量也是影响泡菜感官品质的重要指标, 它可以反映泡菜发酵过程中乳酸菌对泡菜中糖类物质的消耗与糖类物质产生的动态变化<sup>[24]</sup>。由图 2 可知, 发酵第 3 d, 所有试验组总糖含量均下降, 且 LM 占比越高, 总糖含量下降越多, 1:2 试验组 3 d 内总糖含量由 44.7 mg/mL 下降到 15.9 mg/mL, 而 2:1 试验组仅降低到 22.9 mg/mL, 自然发酵组降低到 26.1 mg/mL。这是由于 LM 对果糖等糖类物质的利用能力优于 LP, LM 不仅可以利用糖类生产乳酸, 还可以产乙酸、乙醇和甘露醇等物质。在发酵第 3~7 d, 所有试验组总糖含量变化不大, 趋于稳定。

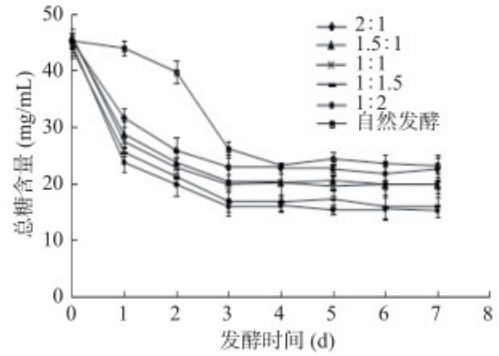


图 2 LP 和 LM 对比对泡萝卜总糖含量的影响  
Fig.2 Effect of LP and LM ratio on total sugar content of pickled radish

2.1.3 LP 和 LM 对比对泡萝卜亚硝酸盐含量的影响

在蔬菜发酵过程中, 硝酸盐会在硝酸还原酶的作用下转化为亚硝酸盐, 而亚硝酸盐在人体内可转变为有致癌作用的亚硝胺类化合物, 因此要注意蔬菜中亚硝酸盐的累积问题。由图 3 可知, 所有试验组亚硝酸盐含量呈先升高再降低的趋势。在发酵初期, 坛内存在大量氧气, 乳酸菌还处在繁殖阶段, 好氧杂菌活跃, 将萝卜的硝酸盐还原成亚硝酸盐。待发酵一段时间后, 乳酸菌为优势菌群, 抑制杂菌生长, 从而抑制亚硝酸盐生成; 乳酸菌大量繁殖产生的乳酸可与亚硝酸盐作用生成亚硝酸, 以促进亚硝酸盐分解; 乳酸菌代谢产生的有机酸、细菌素、双乙酰、过氧化氢等物质也能起到抑菌作用; 此外一些乳酸菌和大肠杆菌能产生亚硝酸盐还原酶, 降低亚硝酸盐含量<sup>[30]</sup>。接种乳酸菌试验组比自然发酵的亚硝酸盐峰出现早, 分别在第 1~2 d 和第 3 d 出现峰值, 且接种组峰值低, 说明接种乳酸菌能有效降低亚硝酸盐含量。LM 含量高的试验组比 LM 含量低的试验组亚硝酸盐峰出现早, 但峰值高, 这与 LM 产酸快, 而 LP 产酸能力强有关。接种组在第 3~7 d, 亚硝酸盐含量无明显变化, 趋于稳定, 且含量均低于 0.7 mg/kg。所有试验组在整个发酵过程中的亚硝酸盐含量均符合我国关于酱腌菜的卫生标准 GB 2714-2003《酱腌菜卫生标准》中亚硝酸盐的限量规定(20 mg/kg)。

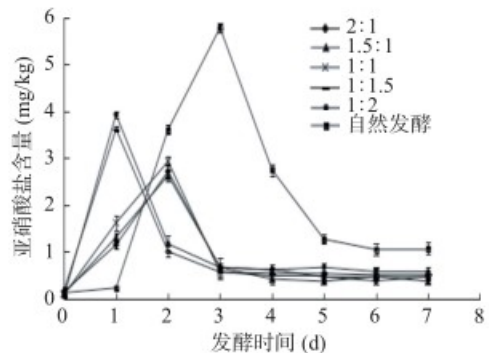


图 3 LP 和 LM 对比对泡萝卜亚硝酸盐含量的影响  
Fig.3 Effect of LP and LM ratio on nitrite content in pickled radish

2.1.4 LP 和 LM 对比对泡萝卜质构特性和感官评分

的影响。孙钟雷等<sup>[22]</sup>研究表明硬度、脆度、咀嚼性可作为萝卜最具有代表性的质地特性指标。硬度指咀嚼萝卜所需最大力,与细胞壁原果胶成分有关,原果胶具有黏着性,黏连支撑细胞保持组织硬度<sup>[31]</sup>。脆度指咀嚼脆裂时所需力,与细胞膨压有关,细胞内液体越多,膨压越大,脆性越强,也与原果胶成分有一定关系。咀嚼性指将食品咀嚼到可吞咽时所需功,反映样品对持续咀嚼的抵抗能力。基于梁曹雯等<sup>[32]</sup>研究表明感官评价与质构分析中的硬度、胶着性、咀嚼性和穿刺功呈显著相关性,本文在已进行感官研究的基础上,补充脆度作为泡萝卜的质地特性指标。

由图4可知,发酵1~3 d,所有试验组脆度迅速下降,自然发酵组脆度低于接种组,由150.4 N左右降低到80~90 N。这是由于盐水渗透压大于细胞内渗透压,细胞组织液减少,细胞发生质壁分离,细胞膨压变小,脆度降低;原果胶物质发生水解,变为果胶酸,无法对细胞壁继续起到支撑作用,导致脆度下降,而杂菌在发酵过程中可产生果胶酶等物质,也加速了萝卜的软化<sup>[33]</sup>。在第4~6 d,发酵进入成熟期,酸性环境使酶系迅速失活,且抑制杂菌繁殖,促进果胶酸钙生成,果胶酸钙形成的网络结构,对细胞壁有支撑作用;同时氯化钠进入组织细胞,使细胞内渗透压回升,细胞组织液增加,样品脆度缓慢上升,但始终低于初始脆度。2:1试验组在发酵第6 d脆度为91.2 N;自然发酵组脆度为86.5 N,低于其余试验组;随着LM占比增加,泡萝卜脆度随之升高,但1.5:1、1:1、1:1.5、1:2四个试验组间的脆度差异不明显。由此可知在一定范围内,LM发酵的泡萝卜有良好的脆度,

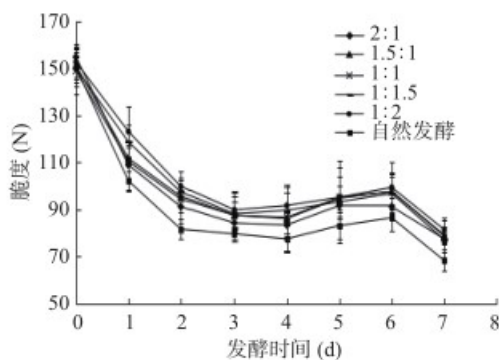


图4 LP和LM配比对泡萝卜脆度的影响

Fig.4 Effect of LP and LM ratio on crispness of pickled radish

这与王冉<sup>[27]</sup>和侯晓艳<sup>[19]</sup>研究结果一致。在发酵后期,其他微生物增殖产生的酶系物质导致果胶酸继续水解成半乳糖醛酸,样品脆度再次迅速下降。因此,LP和LM混合发酵泡萝卜的最佳发酵时间为6 d。

接种不同LP和LM配比发酵6 d的泡萝卜感官评价如表3所示。LM占比越大的试验组,起酸越快,香气丰富,脆度好,但酸度偏弱,色泽不佳;LP占比大的试验组,尽管起酸速度稍慢,但后期产酸量大,风味优良,色白透亮,这与上述pH、总酸含量和脆度的研究结果一致。LM在发酵初期产生的大量挥发酯类物质及乳酸、乙醇、乙醛、甘露醇等代谢产物是泡萝卜风味物质的主要来源,而LP在发酵后期产生的大量乳酸,可有效增强泡萝卜酸感,且酸味柔和。因此,适当配比有助于综合提升泡萝卜感官质量,LP和LM配比为1.5:1的试验组风味、口感俱佳,感官评分为38.1分,显著高于其余试验组( $P<0.05$ )。综上,LP和LM的最佳配比确定为1.5:1。

## 2.2 接种量对泡萝卜品质的影响

接种不同含量混合乳酸菌(LP和LM比例为1.5:1)发酵6 d的泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量如表4所示。随着混合菌种接种量的增加,泡萝卜pH、总糖含量和亚硝酸盐含量显著降低( $P<0.05$ ),总酸含量显著增加( $P<0.05$ ),这说明接种量的增加有助于提升泡萝卜发酵成熟速度,加快亚硝酸盐降解。当接种量为5%~9%时,上述四个理化指标变化趋于平缓,无显著性差异( $P>0.05$ ),这是因为发酵系统中可供乳酸菌生长代谢的营养物质含量有限,5%接种量已然足够,即使继续增大混合菌种接种量,发酵质量也不会显著变化。泡萝卜的脆度和感官评分随着接种量的增加,呈现先升高再降低的趋势,当接种量为9%时,泡萝卜的脆度和感官评分显著低于其余试验组( $P<0.05$ ),分别为76.6 N和23.2分,这说明9%接种量偏高,导致发酵过度,滋味偏酸,口感不良,脆度下降;当接种量为7%时,虽然脆度与5%试验组无显著性差异( $P>0.05$ ),但由于发酵强烈引起萝卜少许褐变导致感官评分降低,且综合考虑发酵成本问题,因此最佳接种量确定为5%。

## 2.3 食盐种类对泡萝卜品质的影响

添加不同种类食盐接种5%混合乳酸菌(LP和LM比例为1.5:1)发酵6 d的泡萝卜理化指标、质构

表3 LP和LM配比对泡萝卜感官质量的影响

Table 3 Effect of LP and LM ratio on sensory quality of pickled radish

LP和LM配比	感官评价	感官评分(分)
2:1	汤汁清亮,萝卜色白,香气稍淡,滋味鲜美,酸度适宜,脆度较好	36.7±1.2 <sup>b</sup>
1.5:1	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味鲜美,酸度适宜,爽脆可口	38.1±0.3 <sup>a</sup>
1:1	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味良好,酸度稍弱,爽脆可口	36.1±0.6 <sup>b</sup>
1:1.5	汤汁清亮,萝卜少许褐变,香气丰富,滋味良好,酸度不足,爽脆可口	34.2±0.7 <sup>c</sup>
1:2	汤汁轻微浑浊,萝卜少许褐变,香气丰富,滋味尚可,酸度不足,爽脆可口	32.9±0.4 <sup>d</sup>
自然发酵	汤汁轻微浑浊,萝卜少许褐变,香气淡薄,滋味一般,酸度不足,稍软	25.5±1.8 <sup>e</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );表4~表8同。

表 4 接种量对泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量的影响

Table 4 Effects of inoculation amount on physical and chemical indexes, texture characteristics and sensory quality of pickled radish

接种量 (%)	pH	总酸 (g·100 g <sup>-1</sup> )	总糖 (mg·mL <sup>-1</sup> )	亚硝酸盐 (mg·kg <sup>-1</sup> )	脆度 (N)	感官评价	感官评分 (分)
1	3.35±0.04 <sup>b</sup>	0.37±0.01 <sup>c</sup>	22.8±0.9 <sup>b</sup>	0.92±0.04 <sup>b</sup>	87.1±5.2 <sup>b</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气稍淡, 滋味一般, 酸度不足, 稍软	29.4±0.9 <sup>d</sup>
3	3.21±0.03 <sup>c</sup>	0.46±0.02 <sup>b</sup>	21.2±0.8 <sup>c</sup>	0.65±0.04 <sup>c</sup>	91.4±4.6 <sup>b</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气稍淡, 滋味良好, 酸度稍弱, 脆度较好	32.5±1.6 <sup>c</sup>
5	3.11±0.03 <sup>d</sup>	0.55±0.02 <sup>a</sup>	19.3±0.6 <sup>d</sup>	0.47±0.07 <sup>d</sup>	107.5±6.6 <sup>a</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气丰富, 滋味鲜美, 酸度适宜, 爽脆可口	38.7±0.6 <sup>a</sup>
7	3.12±0.05 <sup>d</sup>	0.53±0.03 <sup>a</sup>	16.7±0.8 <sup>e</sup>	0.48±0.09 <sup>d</sup>	103.2±3.2 <sup>a</sup>	汤汁清亮, 少许褐变, 香气丰富, 滋味鲜美, 酸度适宜, 爽脆可口	36.3±0.3 <sup>b</sup>
9	3.06±0.06 <sup>d</sup>	0.59±0.06 <sup>a</sup>	15.8±1.2 <sup>e</sup>	0.51±0.02 <sup>d</sup>	76.6±3.7 <sup>e</sup>	汤汁轻微浑浊, 有褐变, 香气不正, 滋味一般, 稍酸, 稍软	23.2±1.4 <sup>f</sup>
自然发酵	3.44±0.03 <sup>a</sup>	0.31±0.03 <sup>d</sup>	25.1±1.3 <sup>a</sup>	1.12±0.09 <sup>a</sup>	81.5±6.8 <sup>b,c</sup>	汤汁轻微浑浊, 少许褐变, 香气淡薄, 滋味一般, 酸度不足, 稍软	27.1±1.0 <sup>e</sup>

特性和感官质量如表 5 所示。低钠盐试验组的各项风味及质构指标显著优于其余试验组 ( $P<0.05$ ), 但安全指标显著低于其余试验组 ( $P<0.05$ )。这是因为低钠盐中氯化钠含量少, 对微生物抑制作用弱, 导致硝酸还原酶诱导作用升高, 亚硝酸盐含量增加, 这与刘超瑞<sup>[34]</sup>的研究结果一致。低钠盐试验组的总酸含量高是因为钾离子能促进乳酸菌的生长和代谢; 脆度值高则是因为氯化钾渗透性好, 使萝卜组织渗透压升高, 水分含量增加。尽管氯化钾有些许苦涩味和金属味, 但泡萝卜发酵的酸香味浓郁, 可在一定程度上遮盖此不良风味, 且王晶晶等<sup>[35]</sup>对不同低钠盐剁辣椒挥发性风味成分分析的研究表明, 适当添加氯化钾有助于增加挥发性风味成分种数及其相对含量, 因此, 低钠盐试验组的感官评分相对较高。而用日晒盐腌制的泡萝卜试验组整体品质排名第 2, 与精制盐和粉洗盐相比, 虽然其 pH、总酸含量及总糖含量无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 但亚硝酸盐含量显著低于其他两组 ( $P<0.05$ ), 脆度和感官评分显著高于其他两组 ( $P<0.05$ )。这可能是由于制盐工艺不同导致的, 根据我国国家标准 GB/T 19420-2021《制盐工业术语》可知, 精制盐和粉洗盐加工工艺复杂, 而日晒盐加工工艺相对简单, 因此日晒盐保留了更多的钙、镁矿物质离子和微藻类生物。矿物质离子与萝卜中的果胶酸结合可提升

产品脆度; 微藻类生物则给乳酸菌提供了更多更丰富的营养物质, 从而增强产品风味, 且提高了发酵速度, 加速亚硝酸盐的分解。因此最佳食盐种类确定为低钠盐。

## 2.4 食盐添加量对泡萝卜品质的影响

添加不同含量低钠盐接种 5% 混合乳酸菌 (LP 和 LM 比例为 1.5:1) 发酵 6 d 的泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量如表 6 所示。在食盐添加量为 1%~5% 时, 泡萝卜的 pH 无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 亚硝酸盐含量和总酸含量显著降低 ( $P<0.05$ ), 脆度和感官评分显著升高 ( $P<0.05$ )。尤其是当食盐添加量为 1% 时, 泡萝卜的亚硝酸含量为 5.71 mg/kg, 安全隐患远远高于其他试验组, 在腌制过程中易出现发霉、酸败现象。这说明食盐能够抑制杂菌繁殖, 杂菌减少随之的不良风味减弱, 同时增强了乳酸菌降解亚硝酸盐的能力<sup>[36]</sup>。当食盐添加量增加至 7%~9% 时, 泡萝卜品质显著下降 ( $P<0.05$ ), pH、总糖含量、亚硝酸盐含量显著升高 ( $P<0.05$ ), 总酸含量、脆度、感官评分显著下降 ( $P<0.05$ )。这是因为食盐浓度过高也会抑制乳酸菌的生长, 特别是导致 LM 活性降低, 引起泡萝卜前期发酵不足, 起酸速度减缓, 产品风味下降。此外, 高浓度的发酵体系加重细胞失水, 细胞膨压降低导致脆度下降, 且咸味过重会导致口感滋味偏差, 出现苦涩味<sup>[37]</sup>。因此最佳食盐添加量确定为 5%。

表 5 食盐种类对泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量的影响

Table 5 Effects of salt types on physical and chemical indexes, texture characteristics and sensory quality of pickled radish

食盐种类	pH	总酸 (g·100 g <sup>-1</sup> )	总糖 (mg·mL <sup>-1</sup> )	亚硝酸盐 (mg·kg <sup>-1</sup> )	脆度 (N)	感官评价	感官评分 (分)
精制盐	3.29±0.04 <sup>a</sup>	0.46±0.03 <sup>b</sup>	19.4±0.4 <sup>a</sup>	0.51±0.03 <sup>b</sup>	94.4±4.8 <sup>c</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气稍淡, 滋味良好, 酸度稍弱, 脆度较好	33.7±1.9 <sup>e</sup>
粉洗盐	3.32±0.03 <sup>a</sup>	0.45±0.04 <sup>b</sup>	19.3±0.8 <sup>a</sup>	0.53±0.04 <sup>b</sup>	93.5±3.1 <sup>c</sup>	汤汁轻微浑浊, 萝卜色白, 香气稍淡, 滋味良好, 酸度稍弱, 脆度较好	32.1±1.1 <sup>e</sup>
日晒盐	3.25±0.04 <sup>a</sup>	0.49±0.02 <sup>b</sup>	18.7±0.5 <sup>a</sup>	0.44±0.03 <sup>c</sup>	102.1±1.1 <sup>b</sup>	汤汁轻微浑浊, 萝卜色白, 香气丰富, 滋味鲜美, 酸度稍弱, 爽脆可口	36.7±0.6 <sup>b</sup>
低钠盐	3.17±0.05 <sup>b</sup>	0.57±0.02 <sup>a</sup>	17.7±0.7 <sup>b</sup>	0.69±0.11 <sup>a</sup>	107.9±2.0 <sup>a</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气丰富, 滋味鲜美, 酸度适宜, 爽脆可口	38.5±0.7 <sup>a</sup>

表 6 食盐添加量对泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量的影响

Table 6 Effects of salt addition on physical and chemical indexes, texture characteristics and sensory quality of pickled radish

食盐添加量 (%)	pH	总酸 (g·100 g <sup>-1</sup> )	总糖 (mg·mL <sup>-1</sup> )	亚硝酸盐 (mg·kg <sup>-1</sup> )	脆度 (N)	感官评价	感官评分 (分)
1	3.15±0.06 <sup>e</sup>	0.59±0.02 <sup>a</sup>	17.4±0.8 <sup>d</sup>	5.71±0.07 <sup>a</sup>	64.7±4.5 <sup>d</sup>	汤汁轻微浑浊, 有褐变, 香气不良, 有酸败味, 无咸味, 软烂	13.2±3.2 <sup>e</sup>
3	3.22±0.03 <sup>e</sup>	0.50±0.03 <sup>b</sup>	18.2±1.4 <sup>d</sup>	0.63±0.13 <sup>d</sup>	93.5±9.4 <sup>b</sup>	汤汁轻微浑浊, 少许褐变, 香气丰富, 滋味良好, 咸度弱, 脆度较好	31.8±1.7 <sup>b</sup>
5	3.18±0.07 <sup>e</sup>	0.52±0.01 <sup>b</sup>	19.7±1.6 <sup>c</sup>	0.45±0.05 <sup>e</sup>	102.8±3.1 <sup>a</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 香气丰富, 滋味鲜美, 酸度适宜, 爽脆可口	37.9±0.6 <sup>a</sup>
7	3.43±0.07 <sup>b</sup>	0.37±0.03 <sup>c</sup>	26.5±2.2 <sup>b</sup>	1.22±0.08 <sup>c</sup>	76.9±2.7 <sup>e</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 有生萝卜气味, 滋味稍咸, 酸度不足, 稍软	25.3±1.9 <sup>e</sup>
9	3.57±0.04 <sup>a</sup>	0.29±0.02 <sup>d</sup>	33.7±1.7 <sup>a</sup>	1.79±0.07 <sup>b</sup>	71.3±3.6 <sup>e</sup>	汤汁清亮, 萝卜色白, 有生萝卜气味, 滋味咸涩, 酸度弱, 稍软	19.5±1.2 <sup>d</sup>

## 2.5 氯化钙添加量对泡萝卜品质的影响

添加不同含量氯化钙接种 5% 混合乳酸菌(LP 和 LM 比例为 1.5:1)发酵 6 d 的泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量如表 7 所示。氯化钙常被用作蔬菜发酵的保脆剂。随着氯化钙含量的增加,泡萝卜品质呈现先升高再降低的趋势,氯化钙添加量 0.3% 试验组的感官评分显著高于其余试验组( $P<0.05$ ),这是多种因素共同作用的结果。一方面,由于  $\text{Ca}^{2+}$  能与果胶酸形成果胶酸钙,使样品脆度升高;但组织过度硬化,会导致细胞失水,脆度下降<sup>[38]</sup>。另一方面,氯化钙会增加发酵液的渗透压,使细胞失水,且抑制乳酸菌活性,影响营养成分的发酵利用,导致产酸速度减缓和产酸量降低。此外,氯化钙添加量过多还会产生苦涩味,因此最佳氯化钙添加量确定为 0.3%。

## 2.6 蔗糖添加量对泡萝卜品质的影响

添加不同含量蔗糖接种 5% 混合乳酸菌(LP 和 LM 比例为 1.5:1)发酵 6 d 的泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量如表 8 所示。当蔗糖添加量为 1% 时,总酸含量显著低于其余试验组( $P<0.05$ ),亚硝酸盐含量显著高于其余试验组( $P<0.05$ );当蔗糖添加量在 2%~5% 之间,随着蔗糖含量增加,虽然总糖含量显著升高( $P<0.05$ ),但 pH、总酸含量、亚硝酸盐含量无显著变化( $P>0.05$ )。这说明蔗糖作为乳酸菌重要的碳源物质,尽管添加蔗糖有利于乳酸菌生长繁殖,在起始阶段优势明显;但随着发酵进行,乳酸菌活动被抑制,产酸量趋于相同,2% 蔗糖添加量足够乳酸菌发酵利用。此外,1% 和 5% 试验组的脆度显著低于 2%~4% 试验组( $P<0.05$ ),分别因为发酵不足和部分杂菌的生长导致,蔗糖不仅能被乳酸菌利用,杂菌也可。感官评分随蔗糖添加量的增加呈现先升高再降低的趋势,这是因为适当添加蔗糖有助于泡萝卜发酵,且可掩盖萝卜本身的辛辣味,柔和发酵带来的

酸味,但糖过多会带来甜腻感和杂菌生长,影响产品综合风味<sup>[8]</sup>。闫凯<sup>[33]</sup>研究也表明,随着蔗糖添加量增加,萝卜中糖含量下降趋势明显变缓,泡菜口感增强,但蔗糖添加量大于 2% 后,多余糖无法充分利用,影响萝卜泡菜感官。因此最佳蔗糖添加量确定为 2%。

## 2.7 响应面结果与分析

2.7.1 响应面试验设计与结果 综合单因素实验结果,采用 Design-Expert 软件进行泡萝卜发酵工艺的响应面优化,Box-Behnken 试验设计及结果见表 9。

2.7.2 响应面模型的方差分析与交互作用 通过拟合得到的 LP 和 LM 配比(A)、接种量(B)和食盐添加量(C)与感官评价(Y)之间的二次多项回归方程如下:

$$Y=38.44+1.04A+2.18B-2.95C+0.825AB+0.675AC+0.725BC-1.51A^2-4.46B^2-11.01C^2$$

响应面二次模型的方差分析如表 10 所示。试验模型的  $F$  值为 522.30,  $P<0.0001$ ,模型具有极显著差异,表明试验方法可靠。失拟项的  $F$  值为 5.82,  $P$  值为 0.0610( $P>0.05$ ),失拟项无显著性差异,表明没有异常点,模型选择正确。模型中校正系数  $R^2_{\text{Adj}}$  为 0.9966,决定系数  $R^2$  为 0.9985,表明试验误差小,模型与试验拟合良好,能有效对泡萝卜感官评分进行分析和预测。从回归方程系数的显著性检验可看出:三个因素对泡萝卜感官评分都有极显著影响( $P<0.01$ ),影响效果从大到小依次为  $C>B>A$ ,即食盐添加量>接种量>LP 和 LM 配比。

发酵参数交互作用强弱及对响应值的影响如图 5 所示。等高线数量少且图形趋于圆形、响应面坡度平缓,说明交互作用不显著;反之,等高线数量多且图形趋于椭圆,响应面坡度陡峭,说明交互作用显著。三个因素中,AB 和 BC 交互极显著( $P<0.01$ ),AC 交互显著( $P<0.05$ ),即 LP 和 LM 配比与接种量

表 7 氯化钙添加量对泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量的影响

氯化钙添加量 (%)	pH	总酸 (g·100 g <sup>-1</sup> )	总糖 (mg·mL <sup>-1</sup> )	亚硝酸盐 (mg·kg <sup>-1</sup> )	脆度 (N)	感官评价	感官评分 (分)
0.1	3.14±0.02 <sup>c</sup>	0.51±0.02 <sup>a</sup>	20.7±1.0 <sup>b</sup>	0.48±0.05 <sup>c</sup>	93.5±4.1 <sup>b</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味鲜美,酸度适宜,脆度较好	37.5±0.1 <sup>b</sup>
0.3	3.14±0.01 <sup>c</sup>	0.53±0.02 <sup>a</sup>	19.3±0.5 <sup>b</sup>	0.43±0.03 <sup>c</sup>	109.3±5.3 <sup>a</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味鲜美,酸度适宜,爽脆可口	38.3±0.5 <sup>a</sup>
0.5	3.23±0.02 <sup>b</sup>	0.48±0.03 <sup>a</sup>	19.2±0.2 <sup>b</sup>	0.47±0.02 <sup>c</sup>	105.7±4.8 <sup>b</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味良好,酸度稍弱,稍硬	33.1±2.1 <sup>c</sup>
0.7	3.37±0.02 <sup>b</sup>	0.41±0.01 <sup>b</sup>	22.4±1.5 <sup>a</sup>	0.66±0.04 <sup>b</sup>	86.4±3.6 <sup>c</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气稍淡,滋味略苦,酸度不足,过硬	26.6±1.0 <sup>d</sup>
0.9	3.36±0.03 <sup>b</sup>	0.39±0.02 <sup>b</sup>	24.3±1.4 <sup>a</sup>	0.75±0.06 <sup>a</sup>	75.1±4.5 <sup>d</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气稍淡,有苦味,酸度不足,过硬有渣感	21.3±1.9 <sup>e</sup>

表 8 蔗糖添加量对泡萝卜理化指标、质构特性和感官质量的影响

蔗糖添加量 (%)	pH	总酸 (g·100 g <sup>-1</sup> )	总糖 (mg·mL <sup>-1</sup> )	亚硝酸盐 (mg·kg <sup>-1</sup> )	脆度 (N)	感官评价	感官评分 (分)
1	3.16±0.04 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>b</sup>	19.4±0.8 <sup>d</sup>	0.56±0.03 <sup>a</sup>	95.7±3.9 <sup>b</sup>	汤汁轻微浑浊,萝卜色白,香气稍淡,滋味良好,酸度稍弱,脆度较好	31.8±0.9 <sup>e</sup>
2	3.12±0.04 <sup>a</sup>	0.51±0.01 <sup>a</sup>	20.3±0.4 <sup>d</sup>	0.44±0.03 <sup>b</sup>	103.4±3.0 <sup>a</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味鲜美,酸度适宜,爽脆可口	38.8±1.1 <sup>a</sup>
3	3.17±0.02 <sup>a</sup>	0.49±0.02 <sup>a</sup>	25.5±1.1 <sup>c</sup>	0.47±0.04 <sup>b</sup>	106.1±5.1 <sup>a</sup>	汤汁清亮,萝卜色白,香气丰富,滋味鲜美微甜,酸度适宜,爽脆可口	37.5±0.5 <sup>a</sup>
4	3.09±0.03 <sup>a</sup>	0.53±0.04 <sup>a</sup>	31.4±1.5 <sup>b</sup>	0.43±0.02 <sup>b</sup>	104.1±1.9 <sup>a</sup>	汤汁清亮略粘稠,萝卜色白,香气丰富,稍甜腻,酸度适宜,爽脆可口	35.7±0.6 <sup>b</sup>
5	3.11±0.04 <sup>a</sup>	0.54±0.02 <sup>a</sup>	38.1±0.6 <sup>a</sup>	0.41±0.05 <sup>b</sup>	93.9±4.8 <sup>b</sup>	汤汁清亮略粘稠,萝卜色白,香气丰富,甜腻明显,酸度适宜,脆度较好	30.1±0.2 <sup>d</sup>

表 9 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 9 Box-Behnken design with experiment results

试验号	A LP和LM配比	B 接种量	C 食盐添加量	Y 感官评分(分)
1	0	1	-1	27.7
2	0	-1	-1	24.5
3	0	-1	1	16.8
4	1	1	0	36.1
5	0	0	0	38.4
6	-1	-1	0	30.5
7	0	0	0	38.6
8	-1	1	0	32.9
9	0	0	0	38.1
10	0	0	0	38.4
11	-1	0	-1	28.1
12	0	0	0	38.7
13	1	-1	0	30.4
14	0	1	1	22.9
15	-1	0	1	21.2
16	1	0	1	25.1
17	1	0	-1	29.3

表 10 响应面二次模型的方差分析

Table 10 Analysis of variance of response surface quadratic model

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	763.53	9	84.84	522.30	<0.0001	**
A LP和LM配比	8.41	1	8.41	51.75	0.0002	**
B 接种量	37.85	1	37.85	232.99	<0.0001	**
C 食盐添加量	69.62	1	69.62	428.62	<0.0001	**
AB	2.72	1	2.72	16.76	0.0046	**
AC	1.82	1	1.82	11.22	0.0123	*
BC	2.10	1	2.10	12.94	0.0088	**
A <sup>2</sup>	9.57	1	9.57	58.91	0.0001	**
B <sup>2</sup>	83.66	1	83.66	515.06	0.0001	**
C <sup>2</sup>	510.17	1	510.17	3140.88	<0.0001	**
回归	1.14	7	0.1624			
失拟项	0.9250	3	0.3083	5.82	0.0610	
纯误差	0.2120	4	0.0530			
总回归	764.66	16				

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

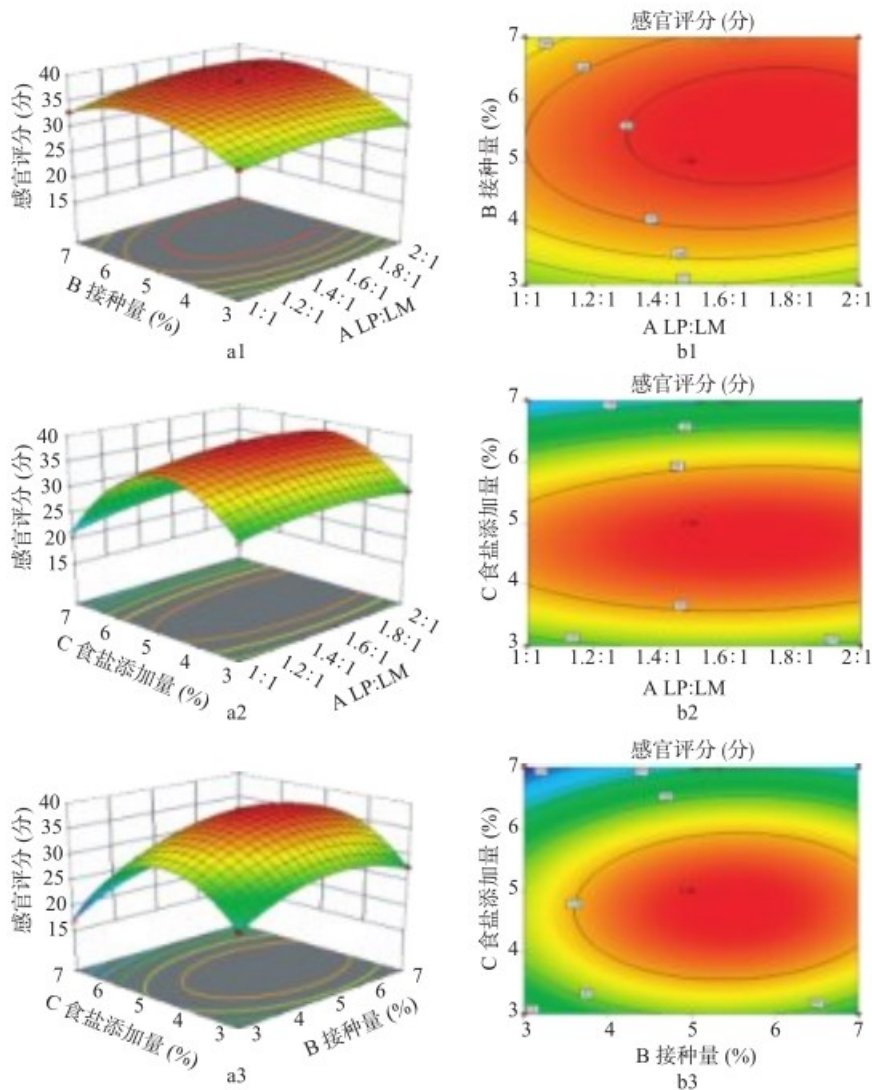


图 5 试验因素交互作用对泡萝卜感官评分的影响

Fig.5 Effect of interaction of experimental factors on sensory score of pickled radish



之间、接种量与食盐添加量之间有极显著交互作用, LP 和 LM 配比与食盐添加量之间有显著交互作用。

2.7.3 最佳工艺参数预测与验证 通过回归模型预测泡萝卜的最佳工艺参数为: LP 和 LM 配比为 1.64:1, 接种量为 5.67%, 低钠盐添加量为 4.53%, 氯化钙添加量为 0.3%、蔗糖添加量为 2%, 感官评分为 38.9 分。根据实际生产情况调整工艺参数: LP 和 LM 配比为 1.6:1, 接种量为 5.7%, 低钠盐添加量为 4.5%, 氯化钙添加量为 0.3%、蔗糖添加量为 2%, 在此条件下进行 3 次平行实验, 泡萝卜的感官评分为 38.9 分, 实测值接近模型预测值, 拟好良好, 模型有效。同时, 测定了最佳工艺参数下泡萝卜的理化指标和质构特性: pH 为 3.06, 总酸含量为 0.59 g/100 g, 总糖含量为 18.7 mg/mL, 亚硝酸盐含量为 0.41 mg/kg, 脆度为 108.8 N。

### 2.8 电子舌感官滋味结果分析

利用电子舌技术对自然发酵的泡萝卜和最佳工艺条件下接种发酵的泡萝卜滋味值进行检测, 并将数据转化为雷达图进行分析, 结果如表 11 和图 6 所示。接种发酵的泡萝卜苦味回味值为-0.38, 低于自然发酵的-0.18; 而酸味值 0.12、甜味-1.27 和鲜味值 1.16 分别高于自然发酵的-2.22、-1.95 和 0.19。这可能是因为接种发酵有助于有机酸及酯类物质的快速生成。李庆羊等<sup>[15]</sup>研究不同乳酸菌对发酵萝卜干风味品质的影响时发现, 3 组接种乳酸菌发酵的萝卜干都比自然发酵的口感和风味更好, 其中混合发酵的风味物质种类不是最多但是风味评价最好, 某些特有香气突出, 对应风味物质含量最高。在咸味方面, 接种发酵和自然发酵的泡萝卜咸味值差异较小。这是由于发酵时的食盐添加量均控制在 4.5%, 而发酵不会引起氯化钠含量的变化, 因此咸味特征几乎无差异。

表 11 泡萝卜电子舌滋味数据

Table 11 Electronic tongue taste data of pickled radish

样品	酸味	甜味	涩味	苦味回味	涩味回味	鲜味	丰富性	咸味	甜味
接种发酵	0.12	2.41	1.90	-0.38	0.76	1.16	-0.02	9.55	-1.27
自然发酵	-2.22	2.50	1.80	-0.18	0.79	0.19	-0.18	9.70	-1.95

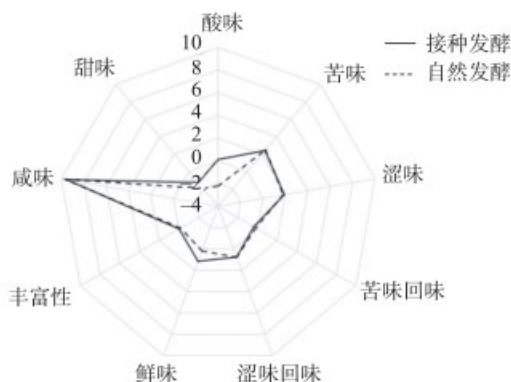


图 6 泡萝卜电子舌雷达图

Fig.6 Electronic tongue radar of pickled radish

### 3 结论

通过响应面法优化混合菌种发酵泡萝卜工艺参数, 所建立的回归模型具有显著性差异, 拟合性良好, 调整后的最佳工艺参数为: LP 和 LM 配比为 1.6:1, 接种量为 5.7%, 低钠盐添加量为 4.5%, 氯化钙添加量为 0.3%、蔗糖添加量为 2%。在此条件下发酵 6 d, 泡萝卜的感官评分为 38.9 分, 总酸含量为 0.59 g/100 g, 脆度为 108.8 N, 风味、口感俱佳; 亚硝酸盐含量为 0.41 mg/kg, 食用安全性较高; 电子舌测定的苦味回味明显低于自然发酵, 酸味、甜味和鲜味明显优于自然发酵, 为泡萝卜的风味改进提供了可靠的理论依据。在进一步研究中, 拟将感官品质的变化与挥发性组分动态分析相结合, 以期更好地为泡萝卜工业化、标准化生产提供技术支持。

### 参考文献

[1] 杜伟利. 中国萝卜的栽培利用史研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019. [DU W L. Research on the cultivation and utilization history of Chinese radish[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.]

[2] 戴希尧. 萝卜主要营养品质性状遗传的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [DAI X Y. Genetic analysis of nutrient content in radish (*Raphanus sativus* L.)[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]

[3] GOYENECHE R, SCALA K D, ROURA S. Biochemical characterization and thermal inactivation of polyphenol oxidase from radish (*Raphanus sativus* var. *sativus*)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(1): 57-62.

[4] 梅明鑫, 刘卫, 宋颖, 等. 不同包装低盐腌制白萝卜贮藏货架期预测模型[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(4): 69-77. [MEI M X, LIU W, SONG Y, et al. Storage shelf life prediction model of low salt pickled white radish by different packaging[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(4): 69-77.]

[5] TAEKYUN S, MEEJUNG A, GI O K, et al. Biological activity of various radish species[J]. *Oriental Pharmacy and Experimental Medicine*, 2015, 15(2): 105-111.

[6] CASTRO-TORRES I G, O-ARCINIEGA M, GALLEGOS-ESTUDILLO J, et al. *Raphanus sativus* L. var *niger* as a source of phytochemicals for the prevention of cholesterol gallstones[J]. *Phytotherapy research: PTR*, 2014, 28(2): 167-71.

[7] TANG Y Y, ZHOU X R, HUANG S L, et al. Microbial community analysis of different qualities of pickled radishes by Illumina MiSeq sequencing[J]. *Journal of Food Safety*, 2019, 39(2): 1-8.

[8] 周强, 刘蒙佳, 游慧英. 发酵条件对腌制萝卜品质影响及其工艺优化研究[J]. *中国调味品*, 2018, 43(2): 12-16. [ZHOU Q, LIU M J, YOU H Y. Research on the influences of fermentation conditions on the pickled radishes and the optimization of producing process[J]. *China Condiment*, 2018, 43(2): 12-16.]

[9] JING P, SONG L H, SHEN S Q, et al. Characterization of phytochemicals and antioxidant activities of red radish brines during lactic acid fermentation[J]. *Molecules*, 2014, 19(7): 9675-9688.

[10] 李共国, 孙志栋. 乳酸菌影响腌制芥菜亚硝酸盐含量的途径分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(6): 2351-2356. [LI

- G G, SUN Z D. Path analysis of lactic acid bacteria affecting nitrite content in pickled mustard[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(6): 2351-2356. ]
- [ 11 ] 刘永逸, 林华, 杨超, 等. 不同发酵方式对酸豆角品质和风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 43-51. [ LIU Y Y, LIN H, YANG C, et al. Effects of different fermentation methods on the quality and flavor of capers[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 43-51. ]
- [ 12 ] 云琳, 毛丙永, 崔树茂, 等. 不同发酵方式对萝卜泡菜理化特性和风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(13): 69-75. [ YUN L, MAO B Y, CUI S M, et al. Effects of different fermentation methods on the physicochemical properties and flavor of pickles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(13): 69-75. ]
- [ 13 ] YE H Q, LANG X S, JI Y Y, et al. The interaction between *Lactobacillus plantarum* SC-5 and its biogenic amine formation with different salt concentrations in Chinese Dongbei Suancai[J]. *Food Research International*, 2021, 150(PB): 110813. ]
- [ 14 ] PARK D W, KIM S H, PARK J H. Distribution and characterization of prophages in *Lactobacillus plantarum* derived from Kimchi[J]. *Food Microbiology*, 2022, 102: 103913. ]
- [ 15 ] 李庆羊, 吴祖芳, 翁佩芳, 等. 植物乳杆菌和棒状乳杆菌对发酵萝卜干风味品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(9): 150-159. [ LI Q Y, WU Z F, WENG P F, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus rodarum* on flavor quality of fermented dried radish[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(9): 150-159. ]
- [ 16 ] 史婷, 高甜甜, 刘伟, 等. 不同发酵剂对剁辣椒品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(15): 144-153. [ SHI T, GAO T T, LIU W, et al. Effect of different starters on quality of chopped pepper[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(15): 144-153. ]
- [ 17 ] ZHANG P, ZHANG P F, WU J R, et al. Effects of *Leuconostoc mesenteroides* on physicochemical and microbial succession characterization of soybean paste, Da-jiang[J]. *Lebensmittel Wissenschaft UND Technologie*, 2019, 115(C): 108028-108028. ]
- [ 18 ] PARK S E, SEO S H, KIM E J, et al. Changes of microbial community and metabolite in kimchi inoculated with different microbial community starters[J]. *Food Chemistry*, 2018, 274: 558-565. ]
- [ 19 ] 侯晓艳. 接种不同乳酸菌发酵对泡萝卜品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015. [ HOU X Y. Effects of different fermentation methods on the quality of pickled radishes[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015. ]
- [ 20 ] 李芊芊, 张冬梅, 全永亮, 等. 泡菜优良发酵剂的筛选研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 8969-8971. [ LI P P, ZHANG D M, QUAN Y L, et al. Selection of fermentation agent for pickles[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(16): 8969-8971. ]
- [ 21 ] 赵楠. 四川泡菜的主要特性及其成因分析[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [ ZHAO N. Analysis of the main characteristics of Sichuan Paocai and its formation mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017. ]
- [ 22 ] 孙钟雷, 熊玥, 李宇. 胭脂萝卜质地特性分析研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 53-58. [ SUN Z L, XIONG Y, LI Y. Study on the texture properties of carmine radish[J]. *China Condiment*, 2020, 45(7): 53-58. ]
- [ 23 ] 蔡乔宇. 黄酒酿造用米专用化评价体系构建[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2020. [ CAI Q Y. Construction of rice-specific evaluation system for brewing Huangjiu[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2020. ]
- [ 24 ] 云琳. 不同发酵方式的萝卜泡菜风味特征解析及发酵剂菌种的筛选[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [ YUN L. Analysis of the flavor characteristics of radish pickles with different fermentation methods and selection of the starter cultures[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020. ]
- [ 25 ] 经骥源, 李婷, 曾凡坤, 等. 发酵剂对泡萝卜品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(22): 171-177. [ JING Q Y, LI T, ZENG F K, et al. Effect of starters on the quality of pickled radish[J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 171-177. ]
- [ 26 ] 张锡茹, 关慧, 邢少华, 等. 泡菜微生物演替与风味物质变化的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 294-305. [ ZHANG X R, GUAN H, XING S H, et al. Advances in research on microbial succession and flavor changes in pickles[J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 294-305. ]
- [ 27 ] 王冉. 发酵方式对萝卜泡菜发酵过程中品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014. [ WANG R. Effects of fermentation on methods on the quality of pickled radishes in the fermentation[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2014. ]
- [ 28 ] 朴泓洁, 黄存辉, 金清. 肠膜明串珠菌发酵对四川泡菜品质的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(8): 31-35. [ PU H J, HUANG C H, JIN Q. Effects of *Leuconostoc mesenteroides* fermentation on quality of Sichuan pickle[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(8): 31-35. ]
- [ 29 ] 刘宗敏, 谭兴和, 周红丽, 等. 不同乳酸菌发酵萝卜干挥发性成分分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(24): 144-149. [ LIU Z M, TAN X H, ZHOU H L, et al. Analysis of volatile components in dried radish fermented by different *Lactobacillus* species[J]. *Food Science*, 2017, 38(24): 144-149. ]
- [ 30 ] 洪冰. 大头菜发酵工艺及其品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016. [ HONG B. Study on the fermentation process and quality change of kohlrabi[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. ]
- [ 31 ] 王向阳, 吴婷, 俞兴伟. 食品添加剂对贮藏泡菜质地的影响[J]. *中国调味品*, 2015, 40(12): 73-75. [ WANG X Y, WU T, YU X W. Effect of food additives on texture of stored pickles[J]. *China Condiment*, 2015, 40(12): 73-75. ]
- [ 32 ] 梁曹雯, 李清明, 邓洁红, 等. 泡萝卜感官评价及质构相关性分析[J]. *湖南农业科学*, 2016(8): 99-102. [ LIANG C W, LI Q M, DENG J H, et al. Correlation between texture and sensory evaluation of pickled radish[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(8): 99-102. ]
- [ 33 ] 闫凯. 泡菜发酵工艺及保藏性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. [ YAN K. Study on salted techniques and storing technology of pickles[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. ]
- [ 34 ] 刘超瑞. 几种食盐腌制甘蓝过程中亚硝酸盐变化规律[J]. *农产品加工(学刊)*, 2012(5): 49-51. [ LIU C R. Several kinds of salted cabbage salt process change law of nitrate in central asia[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(5): 49-51. ]
- [ 35 ] 王晶晶, 王蓉蓉, 刘成国, 等. 低钠盐发酵剁辣椒的挥发性成分研究[J]. *农产品加工*, 2017(18): 32-36. [ WANG J J, WANG

R R, LIU C G, et al. Volatile compounds of chopped pepper with low sodium salt[J]. *Farm Products Processing*, 2017(18): 32-36. ]

[ 36 ] 梅明鑫, 刘卫, 晏敏, 等. 萝卜低盐腌制过程中脆度变化原因探究[J]. *中国酿造*, 2017, 36(12): 27-33. [ MEI M X, LIU W, YAN M, et al. Reasons for brittleness changes of radish during pickling process with low-salt content[J]. *China Brewing*, 2017, 36(12): 27-33. ]

[ 37 ] 王馨. 用于发酵工程的乳酸菌筛选及复配菌剂研究[D]. 哈

尔滨工业大学, 2021. [ WANG X. Screening of lactic acid bacteria used in fermentation engineering and engineering and research on compound bacteria[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. ]

[ 38 ] 陈小宇, 李丹, 叶峻. 腌制萝卜脆度的影响因素探究[J]. *农村科学实验*, 2020(2): 28-31. [ CHEN X Y, LI D, YE J. Factors affecting the crispness of radish[J]. *Rural Scientific Experiment*, 2020(2): 28-31. ]