

赵勇, 刘毕琴, 陈骏飞, 等. 明串珠菌与乳植杆菌复合发酵对低盐泡萝卜品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 102-109.  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080039

ZHAO Yong, LIU Biqin, CHEN Junfei, et al. Effect of Combined Fermentation of *Leuconostoc* and *Lactiplantibacillus* on the Quality of Low-salt Pickled Radish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 102-109. (in Chinese with English abstract).  
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080039

· 研究与探讨 ·

# 明串珠菌与乳植杆菌复合发酵对低盐泡萝卜品质的影响

赵勇<sup>1,2</sup>, 刘毕琴<sup>2</sup>, 陈骏飞<sup>2</sup>, 汤回花<sup>2</sup>, 唐蓉<sup>2</sup>, 史巧<sup>2</sup>, 阚欢<sup>1,\*</sup>, 李宏<sup>2,3,\*</sup>

(1. 西南林业大学生命科学学院, 云南昆明 650224;

2. 云南农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650223;

3. 云南农业大学, 云南昆明 650201)

**摘要:**为研究不同乳酸菌对泡萝卜品质的影响, 采用肠膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*) AP7、戊糖乳植杆菌 (*Lactiplantibacillus pentosus*) LP10 及 AP7-LP10 双菌复合制备泡萝卜, 分析发酵过程理化指标、色差、质构特性变化和感官指标。结果表明: 接种组 pH、还原糖含量下降速率和总酸、乳酸升高速率优于自然发酵组 ( $P<0.05$ ); 接种组亚硝酸盐含量低, 无亚硝峰的出现, 果胶酶活性保持较低水平; AP7-LP10 组和 AP7 组  $L^*$  高于其余 2 组 ( $P<0.05$ ), 褐变指数和多酚氧化酶活性保持在较低水平; 发酵 7 d, AP7-LP10 组硬度 ( $70.92\pm 3.94$  N) 高于其他组 ( $P<0.05$ ); AP7-LP10 感官评分最高 ( $92\pm 2.11$ )。综上, 接种乳酸菌泡萝卜成熟快, 安全性高, AP7-LP10 双菌复合有助于提升泡萝卜品质。

**关键词:** 乳酸菌, 泡萝卜, 接种发酵, 理化指标, 感官品质

中图分类号: TS201.3; TS255.5 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2024)11-0102-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080039



本文网刊:

## Effect of Combined Fermentation of *Leuconostoc* and *Lactiplantibacillus* on the Quality of Low-salt Pickled Radish

ZHAO Yong<sup>1,2</sup>, LIU Biqin<sup>2</sup>, CHEN Junfei<sup>2</sup>, TANG Huihua<sup>2</sup>, TANG Rong<sup>2</sup>, SHI Qiao<sup>2</sup>,

KAN Huan<sup>1,\*</sup>, LI Hong<sup>2,3,\*</sup>

(1. College of Life Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. Institute of Agricultural Products Processing, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223, China;

3. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different lactic acid bacteria on the quality of pickled radish, pickled radish was prepared with *Leuconostoc mesenteroides* AP7, *Lactiplantibacillus pentosus* LP10 and AP7-LP10 combination. The changes in physicochemical indicators, color differences, texture properties and sensory indicators during the fermentation process were analyzed. The results showed that the decrease rate of pH and reducing sugar content and the increase rate of total acid and lactic acid in the inoculated group were better than those in the natural fermentation group ( $P<0.05$ ). For the inoculated group, the nitrite content was low, and no nitrite peak appeared. The pectinase activity remained at a low level. For the AP7-LP10 and AP7 groups, the  $L^*$  was higher than that of the other two groups ( $P<0.05$ ), and the browning index and polyphenol oxidase activity remained at a low level. After 7 days of fermentation, the hardness of AP7-LP10 group ( $70.92\pm 3.94$  N) was higher than that of other groups ( $P<0.05$ ). The sensory score of AP7-LP10 was the highest ( $92\pm 2.11$ ).

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 云南省科技厅重大科技专项 (202002AE320006); 现代农产品加工科技支撑专项。

作者简介: 赵勇 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农畜产品加工与发酵, E-mail: 2237251226@qq.com。

\* 通信作者: 阚欢 (1966-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 农林食品加工及研发, E-mail: 13700650213@163.com。

李宏 (1974-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: ynveg@163.com。

In summary, the pickled radish inoculated with lactic acid bacteria is fast to mature and safe. The combination of AP7-LP10 can improve the quality of pickled radish.

**Key words:** lactic acid bacteria; radish pickles; inoculated fermentation; physicochemical indicators; sensory quality

蔬菜富含多种营养成分, 但因其易腐败变质造成非必要的浪费和经济损耗<sup>[1]</sup>, 而发酵是延长蔬菜保质期的方法之一, 经发酵后产生独特的风味深受大众喜爱<sup>[2-3]</sup>。泡萝卜是发酵蔬菜的一种, 以新鲜萝卜为原料, 添加辅料后经过发酵生产而成的食品, 口感清爽、独特, 具有抗癌、降糖、抗氧化、抑制肠道致病菌的优点<sup>[4-5]</sup>。

目前, 我国泡萝卜以传统方法自然发酵为主, 受环境等多种因素影响, 产品质量不稳定, 货架期短, 易变质; 高食盐浓度的加入, 通过调节渗透压维持泡萝卜体系稳定, 但人体过度摄入食盐会引发一系列疾病; 而低食盐浓度易引发泡萝卜软化, 色泽不佳<sup>[6]</sup>。为泡萝卜在低盐条件下仍能保持色泽、脆度、货架期, 并实现专业化规模化生产, 泡萝卜专用发酵剂的研发迫在眉睫。乳酸菌是泡萝卜发酵过程的主要微生物, 在发酵蔬菜中发挥核心作用, 对提升发酵蔬菜品质和保障发酵蔬菜安全有突出作用<sup>[7]</sup>。泡菜发酵起始阶段以异型发酵乳酸菌为主, 其中魏斯氏菌和肠膜明串珠菌最为活跃<sup>[8]</sup>。乳酸在发酵过程中逐渐积累, 随着酸度的增加和厌氧环境的形成, 中后期以乳杆菌为代表的耐酸同型发酵乳酸菌成为优势菌种<sup>[9]</sup>。史梅莓等<sup>[10]</sup>发现接种肠膜明串珠菌可快速启动泡菜发酵, 有效抑制杂菌生长; 张慧敏等<sup>[11]</sup>利用植物乳杆菌发酵泡萝卜, 可以有效防止萝卜变色, 缩短各指标平衡所需时间, 成熟度更高; 戊糖乳植杆菌是发酵蔬菜中主要菌群, 具有降解亚硝酸盐能力<sup>[12-13]</sup>; 张楠笛等<sup>[14]</sup>将魏斯氏菌和植物乳杆菌复合发酵泡菜发现相比于单独发酵更具愉悦香气, 风味物质更加丰富, 能弥补单独发酵泡菜口感差的缺陷。但目前少见利用肠膜明串珠菌和戊糖乳植杆菌复合发酵泡萝卜的研究。李莘莘等<sup>[15]</sup>接种肠膜明串珠菌和戊糖乳植杆菌混合发酵萝卜风味佳, 产酸快, 但未对发酵过程品质变化做相关研究。

本团队前期筛选得到使萝卜颜色佳、口感脆且清爽的异型发酵肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)AP7 和使萝卜酸味浓郁滋味清香的同型发酵戊糖乳植杆菌(*Lactiplantibacillus pentosus*)LP10, 本文将 AP7、LP10 作为发酵剂单独及混合接种发酵萝卜, 对比萝卜发酵过程中基本理化指标、色度、质构特性, 并进行感官评估, 进一步考察菌株 AP7、LP10 单独和复合接种对泡萝卜发酵过程中品质变化规律, 以期为泡萝卜的安全、稳定生产开发专用发酵剂。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜白萝卜 昆明市五华区沃尔玛超市; 食盐

云南省盐业有限公司昆明盐矿; 肠膜明串珠菌 AP7、戊糖乳植杆菌 LP10 分离自云南传统发酵蔬菜保存于云南省农业科学院发酵食品微生物菌种库; 亚铁氰化钾 武汉普洛夫生物科技有限公司; 硼砂 安田化学有限公司; 乙酸锌、氯化钠、盐酸、对氨基苯磺酸、盐酸萘乙二胺、磷酸二氢钠、氢氧化钠 广州市三昌化工有限公司; MRS 肉汤培养基、MRS 培养基 青岛海博生物技术责任有限公司; 乳酸标准品、果胶酶活性试剂盒、还原糖试剂盒、多酚氧化酶活性试剂盒 北京索莱宝生物科技有限公司。

CM-5 台式色差仪 美能达办公系统有限公司; TMS-Touc 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; Multiskan Go 酶标仪 四川翼高科技有限公司; MIX1000 涡旋仪 广东佛衡仪器有限公司; PHS-3C pH 计 郑州宝晶电子科技有限公司; XY-08 无菌均质器 上海析宇仪器有限公司; LC-20AT 型高效液相色谱仪 日本岛津公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 菌种的制备 将存于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻存甘油管中的菌株 AP7 和菌株 LP10 分别按 3%(v/v)和 1%(v/v)的量接入 MRS 肉汤培养基中  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  活化 15 h, 重复一代, 7000 r/min 离心 10 min, 弃上清液, 用无菌生理盐水洗涤 2~3 次, 制成菌悬液备用。

1.2.2 泡萝卜制备工艺 泡萝卜制备工艺如图 1 所示。

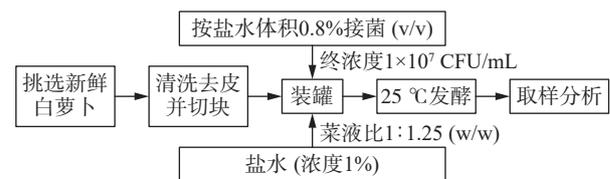


图 1 泡萝卜制备工艺

Fig.1 Preparation process of pickled radish

各组泡萝卜按照菌株命名, 分别为 AP7 组、LP10 组、AP7-LP10 组(各 50%)以及 CK 组(自然发酵), 发酵 7 d, 从第 0 d 起每天取样, 每种处理三个重复。

1.2.3 pH、总酸和乳酸的测定 pH 参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》取泡萝卜汁进行测定; 总酸参考 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸含量的测定》取泡萝卜进行测定; 乳酸参考 Zhang 等<sup>[16]</sup>的方法, 取 1 g 沥干水的泡萝卜置于研钵中, 加入 5 mL 流动相混合, 制成匀浆, 于  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  超声 60 min, 7000 r/min 离心 10 min 取上清, 过  $0.22\text{ }\mu\text{m}$  滤膜备用。通过制作标准曲线, 以峰面积外标法对乳酸进行定量, 标准曲线为:  $y=434166x-15447(R^2=0.9991)$ 。色谱条件:  $\text{C}_{18}$  色谱

柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm), 紫外检测器波长 210 nm, 流动相为 0.01 mol/L 磷酸二氢钾-甲醇 97:3(v/v); (pH2.8), 流速为 1 mL/min。

1.2.4 乳酸菌数测定 参考 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》取泡萝卜汁进行测定。

1.2.5 还原糖含量测定 取 0.2 mL 泡萝卜汁, 加入 1.8 mL 纯水, 冰浴匀浆, 80 °C 水浴 40 min, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液参考还原糖含量检测试剂盒方法进行测定。

1.2.6 亚硝酸盐含量测定 参考 GB 5009.33-2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》取泡萝卜进行测定。

1.2.7 色度测定 取泡萝卜均匀切块置于台式色差仪测定  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ , 并计算褐变指数 BI, 通过内置的标准白板进行仪器校准。

$$BI = \frac{X - 0.31}{0.17}$$

式中:  $X = (a^* + 1.75L^*) / (5.645L^* + a^* - 3.012b^*)$ 。

1.2.8 多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性测定 取 0.1 g 泡萝卜和 1 mL 缓冲液冰浴研磨, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液根据多酚氧化酶活性试剂盒方法进行测定。酶活定义: 1 g 泡萝卜 1 min 于 410 nm 处吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位。

1.2.9 质构特性测定 取泡萝卜采用质构仪进行测定, 相关参数设定采用孙钟雷等<sup>[17]</sup>方法并作出调整: 形变量 50%; 起始力 0.75 N; 高度 15 mm; 力量感应元 500 N。

1.2.10 果胶酶活性测定 取 0.1 g 泡萝卜和 1 mL 缓冲液冰浴研磨, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液根据果胶酶活性检测试剂盒方法进行测定。酶活定义: 在 50 °C, pH3.5 条件下, 1 g 泡萝卜 1 h 分解果胶产生 1 μmol 半乳糖醛酸为一个酶活力单位。

1.2.11 感官评价 采用 Demi 等<sup>[18]</sup>建立的感官评定模型并稍作改动, 选取 10 名具有感官评定背景的人员对发酵 7 d 的样品色泽、气味、滋味和脆度进行评分。评分标准如表 1, 最后评分为 4 项指标评分值的总和(100 分)。

### 1.3 数据处理

实验数据显著性差异分析和相关性分析采用 SPSS Statistics 26 软件单因素 ANOVA 法和相关性双变量斯皮尔曼法处理分析, 以平均值±标准差表示; 使用 GraphPad Prism 8 软件作图。质构测定重复 6 次, 其他指标分析均重复 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵过程中 pH、总酸和乳酸变化

pH、总酸是发酵蔬菜主要理化参数, 其能直观反

表 1 泡萝卜感官指标评分标准

Table 1 Scoring standard of sensory indicator of pickled radish

指标	评分标准	分值(分)
色泽(25分)	色泽均匀, 呈白色, 无褐变	21~25
	色泽均匀, 呈微黄色, 稍有褐变	16~20
	色泽一般, 呈暗黄色, 褐变一般	11~15
气味(25分)	暗黄色, 褐变较重	0~10
	发酵香气浓郁	21~25
	发酵香味较淡, 无异味	16~20
	发酵香味较淡, 有异味	11~15
	有明显异味	0~10
滋味(25分)	滋味鲜美, 酸味适中	21~25
	滋味较鲜美, 酸味可接受	16~20
	滋味较淡, 酸味不适	11~15
	酸味过重, 强烈不适	0~10
脆度(25分)	很脆, 有咀嚼感	21~25
	较脆	16~20
	不够脆	11~15
	不脆, 咀嚼感较差	0~10

映品质变化及成熟情况<sup>[18]</sup>, 与微生物生长密切相关。如图 2 所示, 各组 pH 均逐渐下降, 总酸与之相反; 整个发酵过程中, 接菌组产酸快, 总酸度高, 有效缩短发酵周期, 和 CK 组差异显著( $P < 0.05$ )。发酵初期, 各组 pH 显著下降( $P < 0.05$ ), 总酸含量显著上升( $P < 0.05$ ); 接菌组泡萝卜乳酸菌丰富, 迅速增殖为优势菌群, 产生大量乳酸, 维持较低 pH<sup>[19]</sup>; 接菌组第 2 d 后趋于稳定, CK 组第 5 d 趋于稳定, 随着泡萝卜酸度增加, 抑制体系微生物生长使繁殖速度减缓, 产酸量下降<sup>[20]</sup>。发酵至 7 d, 接菌组泡萝卜 pH 差异不显著( $P > 0.05$ ), 而 LP10 组总酸含量与 AP7 组差异显著( $P < 0.05$ ), 这可能是由于异型发酵菌的产酸能力弱于同型发酵菌<sup>[20-21]</sup>。

乳酸是酸菜、泡菜等发酵蔬菜中的主要有机酸, 与发酵过程糖代谢、接种微生物与底物之间密切相关<sup>[22-23]</sup>。可降低泡菜体系 pH、抑制杂菌, 更可掩盖不愉快滋味, 是极佳的调味剂, 同时能与体系内乙醇作用形成酯类, 增加泡菜香气, 对泡菜风味的形成具有重要作用<sup>[10]</sup>。各组泡萝卜乳酸含量均随发酵时间的延长呈上升趋势, 第 2 d, AP7 组乳酸含量最高达  $0.91 \pm 0.03$  g/kg, 显著高于其余 3 组( $P < 0.05$ ), 第 7 d, 接菌组显著高于自然发酵组( $P < 0.05$ ), 这与发酵后期总酸变化趋势一致。

### 2.2 发酵过程中乳酸菌活菌数变化

发酵蔬菜是微生物群落种类和数量不断演替变化的过程, 乳酸菌是发酵体系中主要菌群<sup>[5]</sup>。如图 3 所示, 随着发酵时间的延长, 接菌组乳酸菌数呈现先升高后降低的趋势, 接菌组整个发酵过程中菌落数显著高于 CK 组( $P < 0.05$ )。0~2 d, 接菌组乳酸菌迅速繁殖, 第 2 d 达到峰值, 其中, AP7 组活菌数最高, 达到  $10.82 \pm 0.41$  lgCFU/mL, 2 d 后接菌组迅速下降, 4 d 后趋于稳定。CK 组前 3 d 乳酸菌数升高, 随后

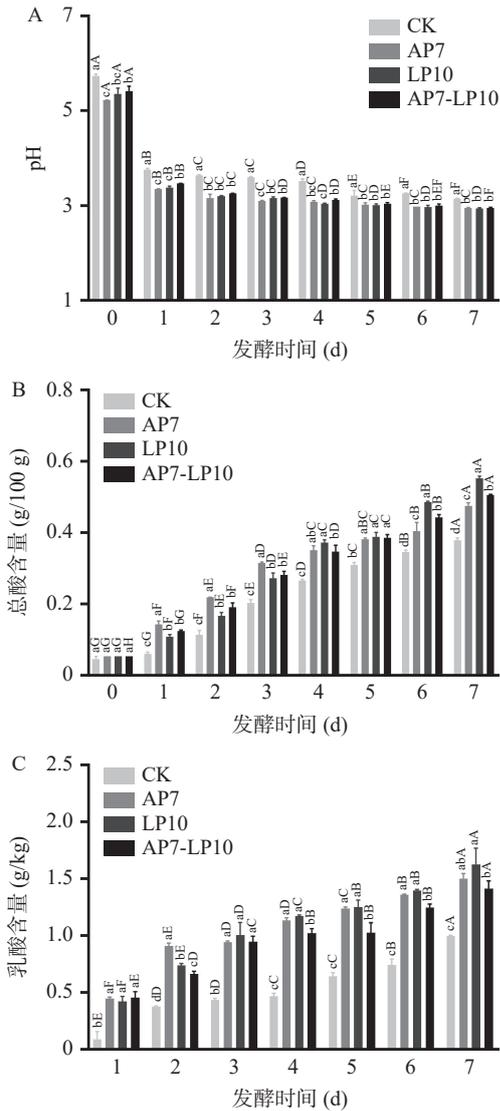


图 2 发酵过程中 pH(A)、总酸(B)、乳酸(C)含量的变化  
Fig.2 Changes of pH (A), total acid (B), lactic acid (C) content during fermentation

注: 不同小写字母表示相同发酵时间不同处理组差异显著 ( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示同一处理组不同发酵时间差异显著 ( $P<0.05$ ); 图 3~图 9 同。

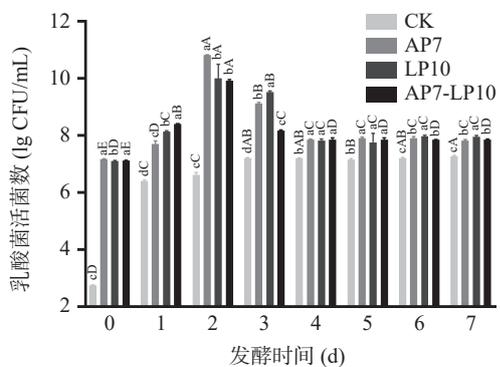


图 3 发酵过程中乳酸菌活菌数的动态变化  
Fig.3 Change of the number of live lactic acid bacteria during fermentation

趋于稳定, 显著低于接种组 ( $P<0.05$ ), 由此可见, 接种乳酸菌发酵, 能有效增加乳酸菌数直至发酵结束。

### 2.3 发酵过程中还原糖含量变化

还原糖作为碳源可被迅速消耗利用, 为泡萝卜中微生物生长繁殖提供营养<sup>[24]</sup>。如图 4 所示, 各组还原糖含量均呈下降趋势, 接种组第 1 d 还原糖含量迅速下降, 极显著低于 CK 组泡萝卜 ( $P<0.01$ ), CK 组体系中微生物量少于接种组, 因此生长繁殖消耗还原糖含量较少; 第 2~7 d, 下降速度变缓, LP10 组泡萝卜第 7 d 还原糖含量下降至  $0.06\pm 0.01$  mg/mL, 几乎耗尽, 显著低于其它 3 组 ( $P<0.05$ )。

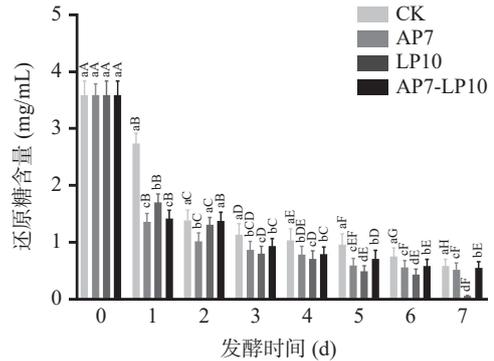


图 4 发酵过程中还原糖含量的变化  
Fig.4 Change of reducing sugar content during fermentation

### 2.4 发酵过程中亚硝酸盐含量变化

如图 5 所示, 接种组整个发酵过程中均无亚硝峰的出现, 发酵过程最大含量为  $0.19\pm 0.03$  mg/kg, 远低于国家规定食品中亚硝酸盐含量不能超过 20 mg/kg 的标准<sup>[25]</sup>。CK 组泡萝卜第 1 d 出现亚硝峰, 最高含量达  $4.06\pm 0.12$  mg/kg, 可能是发酵初期罐内含有氧气致使其他杂菌生长繁殖将萝卜中硝酸盐还原成亚硝酸盐<sup>[26]</sup>。接种组泡萝卜亚硝酸盐含量均低于 CK 组。接种乳酸菌发酵可有效降低亚硝酸盐含量, 保证泡萝卜的安全性。

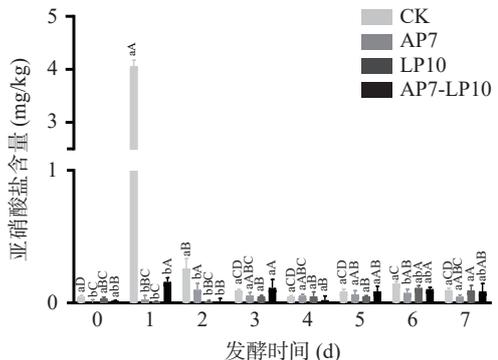


图 5 发酵过程中亚硝酸盐含量的变化  
Fig.5 Change of nitrite content during fermentation

### 2.5 发酵过程中色度及 PPO 活性变化

泡菜色泽与营养价值、商业价值呈正相关性<sup>[27]</sup>。泡菜色泽通常由  $L^*$  (亮度程度)、 $a^*$  (红绿程度) 和  $b^*$  (黄蓝程度) 表示。如图 6A 所示, 随着发酵的进行, 各组  $L^*$  值均呈现先升高后下降趋势; 第 1 d, 各组均有不同程度升高, 第 7 d, CK 组  $L^*$  值由  $75.49\pm 0.56$

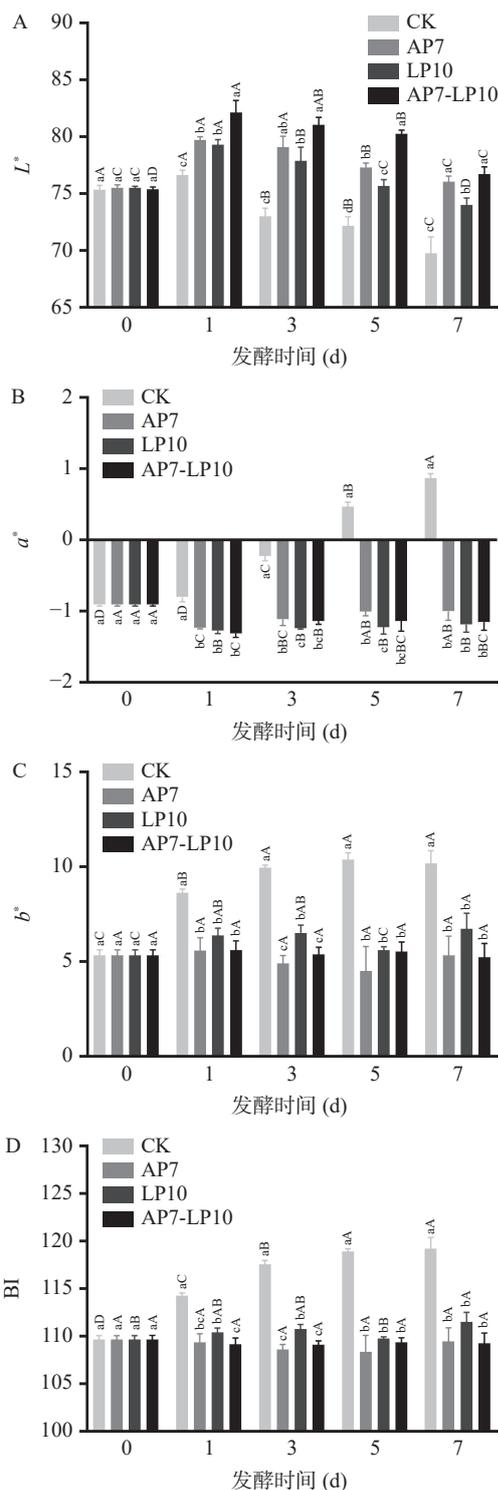


图6 发酵过程中  $L^*$ (A)、 $a^*$ (B)、 $b^*$ (C)、BI(D)变化

Fig.6 Changes of  $L^*$ (A),  $a^*$ (B),  $b^*$ (C), BI (D) during fermentation

降至  $69.75 \pm 1.44$ ; 整个发酵过程中, 相同的发酵天数里, 接菌组  $L^*$  显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ); 其中, AP7-LP10 组和 AP7 组  $L^*$  值明显高于 LP10 组和 CK 组, 亮度更好; 如图 6B 所示, 接菌组  $a^*$  值始终为负且变化幅度较小, 说明泡萝卜发酵过程最大程度的保持萝卜原有色泽。而 CK 组泡萝卜  $a^*$  值由  $-0.91 \pm 0.02$  增至  $0.87 \pm 0.05$ , CK 组发酵后白萝卜偏红色, 色泽变化明显。如图 6C 所示, CK 组  $b^*$  值呈逐渐升高趋势,

由  $5.32 \pm 0.24$  增至  $10.18 \pm 2.96$ , 接菌组基本不变, CK 组萝卜在发酵过程中由纯白色逐渐变黄, 接菌组萝卜无明显变化。

褐变是导致品质下降的主要因素, 通过  $a^*$ 、 $b^*$  和  $L^*$  值计算出褐变指数 BI。如图 6D 所示, 接菌组 BI 维持平稳; CK 组 BI 呈上升趋势, 第 7 d, 褐变指数为  $119.24 \pm 0.96$ , 极显著高于接菌组 ( $P < 0.01$ ), 可能是接种乳酸菌迅速繁殖代谢后抑制 PPO 活性进而减弱萝卜褐变。酶促褐变是浅色蔬菜发生褐变的主要原因, 通过组织中 PPO 催化内源性的酚类物质经过一系列化学变化最终形成褐色或黑色物质<sup>[28]</sup>。

如图 7 所示, 整个发酵过程中, CK 组 PPO 呈现先升高后下降趋势, 而接菌组 PPO 活力始终低于 CK 组; 发酵前期, AP7-LP10 组 PPO 活性最低; 发酵至第 7 d, 接菌组显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), AP7 组 PPO 活力最低为  $3.12 \pm 0.03$  U/g 显著低于其他组 ( $P < 0.05$ ), 与 0 d 的  $14.10 \pm 0.20$  U/g 相比, PPO 活性下降了 81.05%, 其次是 AP7-LP10 组, 可能是乳酸菌代谢产物导致酶变性失活, 也可能是接种乳酸菌发酵间接消耗酶促反应底物, 致使酶活性下降<sup>[29]</sup>。

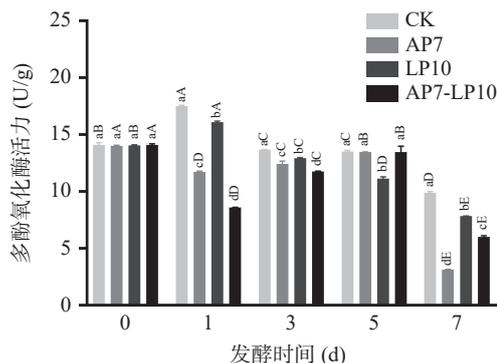


图7 发酵过程中多酚氧化酶活力的变化  
Fig.7 Change of polyphenol oxidase activity during fermentation

综上, 接种乳酸菌发酵能抑制 PPO 活性, 有效阻止萝卜发酵过程中发生褐变, 具有较好的护色功效。

## 2.6 发酵过程中质构和果胶酶活性变化

质构是感官品质直接指标之一, 硬度是泡萝卜质构特性的代表性指标<sup>[17]</sup>。如图 8 所示, 各组硬度

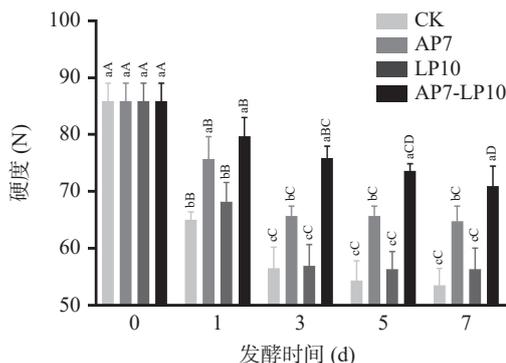


图8 发酵过程中硬度的变化

Fig.8 Change of hardness during fermentation

随着发酵的进行逐渐下降; 发酵至第 3 d, AP7 组、LP10 组、AP7-LP10 组和 CK 组硬度由新鲜样品的 85.88±3.20 N 显著下降为 65.72±1.70、56.88±3.80、75.87±2.70 和 56.54±3.70 N ( $P<0.05$ )。随后的发酵过程中, LP10 组、AP7 组和 CK 组基本保持不变, AP7-LP10 组逐渐下降; 然而整个发酵过程, AP7-LP10 组和 AP7 组硬度总是显著高于 LP10 组和 CK 组 ( $P<0.05$ ), AP7-LP10 组硬度维持得最好。果胶酶是导致组织软化的主要因素, 来源于原组织的内源性果胶酶和微生物代谢所产生的外源性果胶酶直接作用于细胞壁和细胞间层结构, 导致泡菜软化<sup>[30-31]</sup>。

泡菜发酵过程中总果胶酶活性变化见图 9, 第 1 d, AP7 组、LP10 组、AP7-LP10 组的总果胶酶活性由新鲜样品的 78.93±1.80 U/g 分别下降为 7.54±0.12、7.46±0.23、7.39±0.21 U/g 然后保持稳定; CK 组第 1 d 无明显变化, 第 3 d 迅速下降为 9.54±0.39 U/g, 之后缓慢下降, 但整个发酵中 CK 组总果胶酶活性均显著高于接菌组 ( $P<0.05$ ), 可能接菌组乳酸菌迅速繁殖为优势菌群, 迅速形成高酸环境从而抑制果胶酶活性。

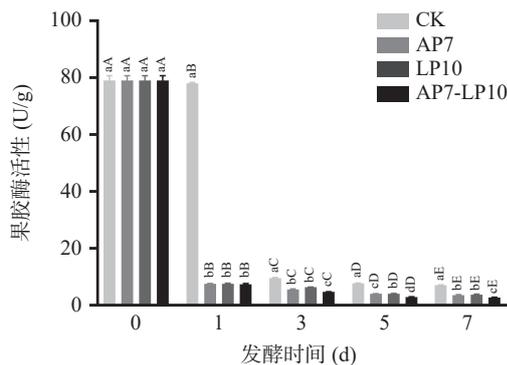


图 9 发酵过程中果胶酶活性的变化

Fig.9 Change of pectinase activity during fermentation

整个发酵过程中, 接菌组果胶酶活性显著低于 CK 组 ( $P<0.05$ ), 硬度基本高于 CK 组; 接菌发酵组中, 第 3~7 d, AP7-LP10 果胶酶活性显著低于 AP7、LP10 组 ( $P<0.05$ ), 而硬度维持得最好 ( $P<0.05$ ), 推测降低果胶酶的活性有助于维持发酵萝卜的硬度。

### 2.7 感官评价分析

接菌组和 CK 组 7 d 泡萝卜感官如表 2 所示, 接菌泡萝卜在色泽、气味、滋味、脆度得分以及总分显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ )。与色泽、质构、pH 和总酸

结果一致。AP7-LP10 组气味和滋味得分显著高于其它组 ( $P<0.05$ ), 可能是由于异型发酵菌 AP7 在发酵初期会产生大量挥发酯类物质及乳酸、乙醇、甘露醇等风味化合物<sup>[23-25]</sup>, 同型发酵菌 LP10 在发酵后期可持续产生乳酸并维持发酵体系稳定<sup>[32]</sup>。云琳<sup>[33]</sup>将 3 种乳酸菌单独以及复配发酵泡萝卜, 发现将肠膜明串珠菌与植物乳杆菌按 1:2 比例复配时产酸较快, 风味物质种类更多含量更高, 有机酸含量与总糖含量适中, 口感更受喜爱, 赋予良好风味。综上, 乳酸菌之间适当的复配, 有助于提升泡萝卜的感官品质。

表 2 感官评估结果(分)

Table 2 Results of sensory analysis (score)

组别	色泽	气味	滋味	脆度	总分
CK	16±1.63 <sup>b</sup>	19±1.41 <sup>c</sup>	16±1.76 <sup>c</sup>	15±2.16 <sup>c</sup>	66±2.51 <sup>c</sup>
AP7	23±1.41 <sup>a</sup>	21±1.05 <sup>b</sup>	20±1.66 <sup>b</sup>	23±1.24 <sup>a</sup>	87±3.60 <sup>ab</sup>
LP10	23±1.63 <sup>a</sup>	20±1.29 <sup>b</sup>	20±1.39 <sup>b</sup>	22±0.81 <sup>b</sup>	85±3.31 <sup>b</sup>
AP7-LP10	23±1.34 <sup>a</sup>	22±1.82 <sup>a</sup>	23±1.41 <sup>a</sup>	24±1.49 <sup>a</sup>	92±2.11 <sup>a</sup>

注: 同列不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.8 感官评价及发酵过程中理化指标相关性分析

对接菌组和 CK 组发酵第 7 d 萝卜感官评价和 pH、总酸、色度、酶活性、质构等理化指标相关性分析, 如表 3 所示, 感官色泽与  $a^*$  呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与  $b^*$  和果胶酶活性呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 感官气味与硬度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ); 感官滋味与  $L^*$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与果胶酶活性呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 感官脆度与  $a^*$ 、 $b^*$ 、果胶酶活性呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 感官评价总分与果胶酶活性呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与  $a^*$  和  $b^*$  呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 与  $L^*$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。

对接菌组和 CK 组发酵过程中萝卜 pH、总酸、色度、酶活性、质构等理化指标相关性分析, 如表 4 所示, 总酸与 pH、还原糖呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与乳酸呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ); 乳酸与 pH、还原糖呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与乳酸菌数呈显著正相关 ( $P<0.05$ ); 乳酸菌数与 pH 显著负相关 ( $P<0.05$ );  $L^*$  与  $a^*$ 、 $b$  呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); PPO 活性与 pH、果胶酶活性呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与总酸、乳酸呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 与还原糖含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ); 硬度与 pH、还原糖、果胶酶活性呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与总酸、乳酸呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ); 果胶酶活性与

表 3 发酵 7 d 泡萝卜感官评价结果与理化指标间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between sensory results and physicochemical indicators of pickled radish fermented for 7 days

指标	pH	总酸	乳酸	乳酸菌数	亚硝酸盐	还原糖	$L^*$	$a^*$	$b^*$	PPO活性	硬度	果胶酶活性
色泽	0.3766	-0.6001	-0.5934	-0.3979	-0.3333	0.5768	0.9288	-0.9965**	-0.9547*	-0.7377	0.6624	-0.9699*
气味	0.7991	-0.9160	-0.9335	-0.8455	-0.2582	0.9069	0.8375	-0.7641	-0.9067	-0.7344	0.9849*	-0.8957
滋味	0.7839	-0.9156	-0.9084	-0.7938	-0.05803	0.7208	0.9668*	-0.8825	-0.9101	-0.5984	0.8777	-0.9625*
脆度	0.5295	-0.7307	-0.7313	-0.5597	-0.3266	0.7107	0.9474	-0.9739*	-0.9883*	-0.7743	0.7982	-0.9959*
总分	0.5939	-0.7812	-0.7795	-0.6190	-0.2635	0.7167	0.9639*	-0.9647*	-0.9802*	-0.7386	0.8228	-0.9995**

注: \*表示呈显著相关  $P<0.05$ , \*\*表示呈极显著相关  $P<0.01$ , 表 4 同。

表4 泡萝卜发酵过程理化指标间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between physicochemical indicators of pickled radish during fermentation

指标	pH	总酸	乳酸	乳酸菌数	亚硝酸盐	还原糖	$L^*$	$a^*$	$b^*$	PPO活性	硬度	果胶酶活性
pH	1											
总酸	-0.6797**	1										
乳酸	-0.8196**	0.9503**	1									
乳酸菌数	-0.6664**	0.3464	0.5065*	1								
亚硝酸盐	0.0098	-0.2472	-0.2566	-0.1981	1							
还原糖	0.9466**	-0.8270**	-0.9250**	-0.4882	0.2191	1						
$L^*$	-0.1759	-0.2261	-0.0016	0.3794	0.0008	-0.0337	1					
$a^*$	0.0032	0.0734	-0.0936	-0.2542	0.0366	-0.0509	-0.7836**	1				
$b^*$	-0.1773	-0.0225	-0.0903	-0.1337	0.2983	-0.1400	-0.6506**	0.4342	1			
PPO活性	0.4983*	-0.7200**	-0.7598**	-0.2968	0.3974	0.6424**	0.0038	0.1020	0.2092	1		
硬度	0.7424**	-0.6007**	-0.6167**	-0.3634	-0.0947	0.7559**	0.4200	-0.4205	-0.4918	0.2094	1	
果胶酶活性	0.9184**	-0.6437**	-0.7966**	-0.6421**	0.3745	0.9400**	-0.1930	0.0038	-0.0976	0.5661*	0.6429**	1

pH、还原糖呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与总酸、乳酸、乳酸菌数呈极显著负相关( $P<0.01$ )。发酵过程中,引起褐变和软化的代表性酶 PPO 和果胶酶活性不断下降,但随着发酵进行,硬度仍然会下降,除果胶酶外淀粉酶、纤维素酶、多聚半乳糖醛酸酶等导致泡菜质地变软的酶还在发挥作用,导致萝卜质地变软<sup>[34-35]</sup>。

### 3 结论

本实验研究不同类型乳酸菌对泡萝卜品质的影响,以异型乳酸发酵肠膜明串珠菌 AP7、同型乳酸发酵戊糖乳植杆菌 LP10 单独及 AP7-LP10 双菌复合对萝卜进行发酵,接菌组与自然发酵组各项指标差异显著( $P<0.05$ ),接菌组中,AP7、LP10 单独与 AP7-LP10 复合对泡萝卜的 pH 和乳酸的影响差异不显著( $P>0.05$ );对泡萝卜的总酸、还原糖、乳酸菌数差异显著( $P<0.05$ ),LP10 产酸能力更强,均未出现亚硝峰且亚硝酸盐含量远低于国家标准;对泡萝卜的色度与硬度的影响差异显著( $P<0.05$ ),AP7-LP10 复合发酵组色度、硬度与感官评分显著优于 AP7、LP10 单独发酵组与自然发酵组( $P<0.05$ ),LP10 硬度低于 AP7,PPO 活性、果胶酶活性和 BI 指数高于 AP7。对发酵过程指标相关性分析得出 PPO 活性、果胶酶活性和硬度与 pH、还原糖含量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与总酸、乳酸呈极显著负相关( $P<0.01$ )。综上,接种乳酸菌泡萝卜可避免亚硝峰出现,提高安全性,缩短发酵周期,降低萝卜软化程度;AP7-LP10 混合发酵,可较好的维持萝卜原有色泽与硬度,丰富泡萝卜的滋味与气味,弥补单菌株发酵所带来的不足,综合品质更佳,为泡萝卜发酵剂的选择提供参考。本文采用 AP7-LP10 同时接种混合发酵,并未对 AP7、LP10 接种顺序作出探究,因此两者先后接种顺序对于品质的影响与两者协同作用机制有待进一步研究。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 陈露,尹礼国,朱文优,等.泡菜中生物胺污染及控制方法研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(11):303-309,323. [CHEN L, YIN L G, ZHU W Y, et al. Review on the contamination of biogenic amines and its control methods in pickle[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(11): 303-309,323.]
- [2] CAO J, YANG J, HOU Q, et al. Assessment of bacterial profiles in aged, home-made Sichuan paocai brine with varying titratable acidity by PacBio SMRT sequencing technology[J]. Food Control, 2017, 78: 14-23.
- [3] XIANG W L, ZHANG N D, LU Y, et al. Effect of *Weissella cibaria* co-inoculation on the quality of Sichuan pickle fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 121: 108975.
- [4] TANG Y, ZHOU X, HUANG S, et al. Microbial community analysis of different qualities of pickled radishes by Illumina MiSeq sequencing[J]. Journal of Food Safety, 2019, 39(2): e12596.
- [5] 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 technics and storing technology of pickles[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.]
- [6] 欧雪,吴梦西,廖一漠,等.不同盐浓度对接种发酵萝卜泡菜品质的影响[J].四川农业大学学报,2022,40(3):438-448. [OU X, WU M X, LIAO Y M, et al. Effects of different salt concentrations on the quality of radish pickles produced by inoculated fermentation[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(3): 438-448.]
- [7] JUNG J Y, LEE S H, JEON C O. Kimchi microflora: History, current status, and perspectives for industrial kimchi production[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(6): 2385-2393.
- [8] 康健依,洪洁,高逸,等.山西地方自然发酵蔬菜发酵过程中细菌多样性分析[J].食品科学,2019,40(10):106-111. [KANG J Y, HONG J, GAO Y, et al. Analysis of bacterial diversity during fermentation of naturally fermented vegetables in Shanxi[J]. Food Science, 2019, 40(10): 106-111.]
- [9] LIANG H P, CHEN H Y, ZHANG W X, et al. Investigation on microbial diversity of industrial Zhacai Paocai during fermentation using high-throughput sequencing and their functional characterization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 460-466.
- [10] 史梅莓,杨恺,吕鹏军,等.单菌与多菌接种发酵对多轮发酵四川泡菜风味的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(14):154-160. [SHI M M, YANG K, LÜ P J, et al. Effects of single-bacteria and multi-bacteria inoculation on the flavor of Sichuan pickles of multi-round fermentation[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(14): 154-160.]

- [ 11 ] 张慧敏, 姜林君, 赵江欣, 等. 预添加乳酸对直接式发酵萝卜感官品质的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(1): 246-253. [ ZHANG H M, JIANG L J, ZHAO J X, et al. The effect on radish pickles direct fermentation process by pre-adding a few lactic acids[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(1): 246-253. ]
- [ 12 ] PENG Q N, JIANG S M, CHEN J L, et al. Uniquemicrobial diversity and metabolic pathway features of fermented vegetables from Hainan, China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 399.
- [ 13 ] 朱英莲, 郭丽萍. 发酵乳杆菌与戊糖乳杆菌降解亚硝酸盐的效果比较研究[J]. 食品科技, 2014, 39(7): 22-25. [ ZHU Y L, GUO L P. Different degradation effect to nitrite between *Lactobacillus fermentum* and *Lactobacillus pentosus*[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(7): 22-25. ]
- [ 14 ] 张楠笛, 祝林, 许琴, 等. 食窦魏斯氏菌协同植物乳杆菌改善四川泡菜风味[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 102-108. [ ZHANG N D, ZHU L, XU Q, et al. Improvement of the flavor of Sichuan pickle by co-fermentation with *Weissella cibaria* and *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Science, 2020, 41(14): 102-108. ]
- [ 15 ] 李革革, 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. Study on the screening of excellent starter for pickles[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(16): 8969-8971. ]
- [ 16 ] ZHANG C, ZHANG J, LIU D. Biochemical changes and microbial community dynamics during spontaneous fermentation of zhacai, a traditional pickled mustard tuber from China[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 347: 109199.
- [ 17 ] 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. ]
- [ 18 ] DEMI N, BACHCECI K S, ACAR J. The effects of different initial *Lactobacillus plantarum* concentrations on some properties of fermented carrot juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2006, 30(3): 352-363.
- [ 19 ] 汪冬冬, 鲍永碧, 管锐, 等. 温度对甘蓝泡菜发酵过程中风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 233-240. [ WANG D D, BAO Y B, GUAN R, et al. Effect of temperature on the flavor of cabbage paocai during fermentation[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(2): 233-240. ]
- [ 20 ] 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. ]
- [ 21 ] 汪姣玲, 李加兴, 岳元媛. 植物乳杆菌与肠膜明串珠菌混合发酵萝卜的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 172-182. [ WANG J L, LI J X, YUE Y Y. 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. ]
- [ 22 ] 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 Industry, 2020, 46(13): 69-75. ]
- [ 23 ] 石川, 王科. 基于模糊数学感官优化白萝卜泡菜加工工艺[J]. 中国调味品, 2022, 47(2): 112-116, 125. [ SHI C, WANG K. Optimization on the processing technology of white radish pickles based on fuzzy mathematics sensory comprehensive evaluation method[J]. China Condiment, 2022, 47(2): 112-116, 125. ]
- [ 24 ] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Microbial dynamics and volatile profiles during the fermentation of Chinese northeast sauerkraut by *Leuconostoc mesenteroides* ORC 2 and *Lactobacillus plantarum* HBUAS 51041 under different salt concentrations[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108926.
- [ 25 ] 国家食品药品监督管理局. GB 5009.33-2016 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10-12. [ China Food and Drug Administration. GB 5009.33-2016 National food safety standard Determination of nitrites and nitrates in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 10-12. ]
- [ 26 ] SEZEN Ö, ESMEYAY K, FATİH Ö. Formation of lactic, acetic, succinic, propionic, formic and butyric acid by lactic acid bacteria[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 536-542.
- [ 27 ] 苗乘源. 东北传统蔬菜发酵食品的微生物及品质分析[D]. 延吉: 延边大学, 2018. [ MIAO C Y. Analysis of microbial diversity and quality of northeast fermented vegetables foods[D]. Yanji: Yanbian University, 2018. ]
- [ 28 ] SIGURDSON G T, TANG P P, GIUSTI M M. Natural colorants: Food colorants from natural sources[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2017, 8(1): 261-280.
- [ 29 ] 华颖, 沈国华, 刘大群. 白萝卜 PPO 的酶学特性研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 69-73. [ HUA Y, SHEN G H, LIU D Q. Characterization of polyphenol oxidase extracted from white radish[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 69-73. ]
- [ 30 ] 乔永祥, 谢晶, 雷昊, 等. 酸性电解水联合气调包装对鲜切生菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 111-115. [ QIAO Y X, XIE J, LEI H, et al. Effect of acidic electrolytic water combined with modified atmosphere packaging on the quality of fresh-cut lettuce[J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 111-115. ]
- [ 31 ] WANG D, ZHAO L, SU R, et al. Effects of different starter culture combinations on microbial counts and physico-chemical properties in dry fermented mutton sausages[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 1957-1968.
- [ 32 ] 赵楠, 葛黎红, 郭壮, 等. 泡辣椒发酵过程中质构劣化规律及其影响因素研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(1): 119-123. [ ZHAO N, GE L H, GUO Z, et al. Texture change of pickled pepper during fermentation and its influence factors[J]. China Brewing, 2020, 39(1): 119-123. ]
- [ 33 ] 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. ]
- [ 34 ] 陈功, 唐焜, 张其圣, 等. 泡菜浅发酵与冷加工的研究及应用[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(2): 1-8. [ CHEN G, TANG Y, ZHANG Q S, et al. Research and application of shallow fermentation and cold processing of paocai[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2022, 58(2): 1-8. ]
- [ 35 ] 汪欣, 汪立平, 吴正钧, 等. 前处理方式对预腌萝卜果胶酶活性和脆度的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(20): 219-222. [ WANG X, WANG L P, WU Z J, et al. Effect of pretreatment method to pickled radishes on the activity of pectinase and brittleness[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(20): 219-222. ]