

泡青菜袋内发酵工艺优化及品质分析

杨小云¹, 李艾蒙¹, 张春容², 贾利蓉^{1*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川成都 610065) (2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 四川宜宾 644000)

摘要: 研究泡青菜袋内发酵的新型工艺, 以期替代传统池泡和坛泡工艺。以小叶芥菜为原料, 接种 1.0% 复配乳酸菌 (植物乳植杆菌: 乳酸片球菌为 2:1) 进行袋内发酵, 筛选热烫条件, 探究感官品质、理化指标及微生物指标在发酵过程中的变化, 采用 16S rDNA 和 ITS 高通量测序分析微生物群落结构。结果表明, 100 ℃ 水浴烫漂 1 min 的控菌效果和感官最佳。在 20 d 的发酵周期中, 泡青菜 pH 值从 5.78 降至 3.21, 总酸含量从 0.48 g·L⁻¹ 升至 6.13 g·L⁻¹, 亚硝酸盐含量始终低于 1.46 mg·kg⁻¹, 发酵 15 d 时产品感官评分达到峰值 36.30 分。泡青菜发酵过程中, 乳酸菌数和菌落总数在 0~5 d 增长至 4.33×10⁸ CFU/mL 和 4.47×10⁸ CFU/mL, 在发酵 15 d 后下降至 7.07×10⁶ CFU/mL 和 9.23×10⁶ CFU/mL 并趋于稳定; 酵母和霉菌数在 0~10 d 持续增长, 在第 10 天达到峰值 4.40×10⁶ CFU/mL 后趋于稳定; 大肠菌群在发酵 5 d 后未检出。袋内发酵体系微生物结构简单, 细菌以植物乳植杆菌与乳酸片球菌为主, 真菌则以季也蒙氏酵母和迈耶汉逊酵母为主。研究证实, 袋内发酵工艺具有可行性和较高的安全性, 研究结果为解决发酵蔬菜现存瓶颈问题提供了新的思路。

关键词: 泡青菜; 袋内发酵; 接种发酵; 乳酸菌

文章编号: 1673-9078(2026)05-80-88 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0338

Process Optimization and Quality Evaluation of In-Bag Fermentation for Mustard Greens

YANG Xiaoyun¹, LI Aimeng¹, ZHANG Chunrong², JIA Lirong^{1*}

(1.College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2.Sichuan Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: To replace traditional pool and jar fermentation methods, an in-bag fermentation process for mustard greens was investigated. Small-leaf mustard greens were inoculated with 1.0% compound lactic acid bacteria (LAB) (*Lactiplantibacillus plantarum*: *Pediococcus acidilactici*=2:1) and subjected to in-bag fermentation. Blanching conditions were optimized, and changes in sensory quality, physicochemical indices, and microbial characteristics during fermentation were systematically evaluated. Microbial community structures were analyzed using 16S rDNA and ITS high-throughput sequencing. The results showed that blanching in boiling water (100 ℃) for 1 min provided optimal microbial control and sensory quality. During the 20-day fermentation period, pH decreased from 5.78 to 3.21, total acidity increased from 0.48 g·L⁻¹ to 6.13 g·L⁻¹, and nitrite content remained consistently below 1.46 mg·kg⁻¹. The highest sensory score (36.30) was observed on day 15. LAB and total bacterial counts rapidly increased to 4.33×10⁸ CFU/mL and 4.47×10⁸ CFU/mL, respectively, within the first 0~5 days, followed by a decline to 7.07×10⁶ CFU/mL and

引文格式:

杨小云,李艾蒙,张春容,等.泡青菜袋内发酵工艺优化及品质分析[J].现代食品科技,2026,42(5):80-88.

YANG Xiaoyun, LI Aimeng, ZHANG Chunrong, et al. Process optimization and quality evaluation of in-bag fermentation for mustard greens [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 80-88.

收稿日期: 2025-03-10 ; 修回日期: 2025-06-07 ; 接受日期: 2025-06-16
基金项目: 成都市科技局重点研发支撑计划项目 (2024-YF05-00383-SN)
作者简介: 杨小云 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: xyunyxy@163.com
通讯作者: 贾利蓉 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: jialirong@scu.edu.cn

9.23×10⁶ CFU/mL, respectively, and stabilization after day 15. Yeast and mold counts increased during the first 10 days, reaching a maximum of 4.40×10⁶ CFU/mL on day 10, and then remained stable. Coliform bacteria were undetectable after 5 days of fermentation. High-throughput sequencing revealed a relatively simple microbial community structure, with *L. plantarum* (83.15%) and *P. acidilactici* (16.10%) as the dominant bacterial species, and *Meyerozyma guilliermondii* (66.46%) and *Hanseniaspora meyeri* (30.81%) as the dominant fungal species. These results demonstrate that in-bag fermentation is a safe and feasible approach for mustard greens and provides a promising alternative for overcoming production bottlenecks in fermented vegetable processing.

Key words: fermented mustard greens; in-bag fermentation; inoculated fermentation; lactic acid bacteria

泡青菜是一种以芥菜为主要原料,通过乳酸发酵制成的传统发酵蔬菜制品^[1],广泛应用于酸菜鱼、酸菜粉丝汤等经典川菜中。作为中国传统发酵食品的典型代表之一,其独特的酸鲜风味与爽脆口感不仅承载着地域饮食文化的精髓,更在现代餐饮与预制食品市场中展现出蓬勃的生命力。当前工业化生产中,泡青菜主要依赖大池盐渍与陶坛泡制两种工艺。大池盐渍工艺通过高盐(盐度>10%)抑制杂菌增殖,但高盐环境同时也会严重抑制乳酸菌活性,导致发酵周期长;同时,脱盐过程产生的大量高盐废水的排放对生态环境造成压力;且自然发酵过程中微生物群落波动易引发产品质量不稳定^[2-4]。陶坛泡制工艺虽能保留传统风味,不产生盐水排放,但其生产效能难以适配规模化需求,陶坛体积固定导致单位空间产能低下,人工翻坛、控温等环节依赖经验操作,劳动力成本高昂;此外,其发酵过程受自然环境中微生物影响较大,导致不同季节批次的品质存在差异^[5]。

泡菜的发酵过程主要分为三个阶段:初始阶段由异型乳酸发酵主导,将糖分转化为乳酸、乙醇、二氧化碳及少量乙酸,pH值初步降低并加速建立厌氧环境;主发酵阶段转为同型乳酸发酵,高效产出大量乳酸使环境pH值降至3.0~3.5,抑制杂菌并强化酸香特质;后熟阶段在低pH值环境下,耐酸酵母与残余乳酸菌协同作用,通过酯化、蛋白水解等反应生成复杂风味物质,最终形成酸鲜平衡、脆爽协调的成熟泡菜^[6-8]。由于发酵第二阶段不产气,第三阶段产气量极少,不会导致密闭容器明显涨袋或涨罐。因此本研究提出新型袋内同型乳酸发酵的方法。与传统坛泡和池泡工艺相比,本工艺以复合塑料袋代替陶坛,通过抽真空、热封创造低氧密闭环境,减少杂菌污染,促进发酵;通过接种同型乳酸发酵菌的方式对发酵环境中的微生物实现定向调控,产品质量更加稳定,同时规避产气涨袋风险;与现有袋内发酵工艺相比,本工艺以热烫(杀菌)代替化学消毒对原料进行控菌,增强了控菌效果,同时降低了化学残留的风险。这种袋内发酵的方式占地面积小,操作简单,环境且能在运输的过程中进行

发酵,是解决传统工艺瓶颈问题的新思路。同时尽管袋内发酵技术在泡青菜生产中展现出潜在优势,但目前关于袋内发酵的研究较为少见,其可行性和实际应用效果仍有待进一步验证。本研究通过优化袋内发酵工艺并分析袋内发酵过程中微生物指标、理化指标及感官品质的变化规律和成品微生物群落结构,探究袋内发酵工艺对泡青菜品质的影响,为袋内发酵泡青菜的工艺优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 试验材料

小叶芥菜、无碘食盐、葡萄糖,市售;植物乳杆菌、乳酸片球菌(均为直投式菌粉,活菌数约1×10¹⁰ CFU/g),山东中科嘉亿生物工程有限公司;食品级PE包装袋(双面20丝),浙江名科塑业股份有限公司。

1.1.2 试验试剂

氢氧化钠、酚酞试剂(指示剂)、亚铁氰化钾、乙酸锌、冰乙酸、硼酸钠、盐酸、对氨基苯磺酸(均为优级纯)、亚硝酸钠标准溶液(200 μg·mL⁻¹,标准物质),上海泰坦科技股份有限公司;盐酸萘乙二胺(分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无菌生理盐水,四川科伦药业股份有限公司;平板计数琼脂培养基、马铃薯葡萄糖琼脂、结晶紫中性红胆盐琼脂、MRS琼脂培养基、煌绿乳糖胆盐肉汤(均为生物试剂),青岛海博生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

岛津UV-1900i紫外可见光谱仪,日本岛津公司;SPX-150BIII生化培养箱,上海精宏实验设备有限公司;DZQ-420C型真空包装机,安盛科机械有限公司;CM-3700型色度色差分析仪,柯尼卡美能达有限公司;雷磁PHS-3E pH计,上海雷磁传感器科技有限公司;T100 Thermal Cycler PCR仪,美国BIO-RAD公司;DW-2菌落计数器,青岛聚创环保集团有限公司;

JY600C 电泳仪, 北京君意东方电泳设备有限公司;
SW-CJ-1D 型单人单面垂直送风净化工作台, 上海鼎科科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 袋内发酵泡青菜样品的制作

将新鲜的小叶芥菜除去杂质和不可食用部分, 对半切开, 清洗、沥干, 按 500 g 一份称重后分别进行 80 ℃ 水浴烫漂 1 min 和 2 min、100 ℃ 水浴烫漂 1 min 和 100 ℃ 蒸汽烫漂 1 min 的处理。水浴烫漂方法: 将小叶芥菜浸没在 80 ℃ (100 ℃) 水中, 维持 1 min (2 min) 后捞出, 烫漂水量为小叶芥菜质量的 10 倍。蒸汽烫漂方法: 小叶芥菜单层平放, 堆放厚度约 5 cm, 与蒸汽源垂直距离 10 cm, 熏蒸时间为 1 min。将处理好的小叶芥菜沥水、冷却。汤汁按质量分数 4.5% 无碘食盐、1.0% 葡萄糖、1.0% 直投式乳酸菌复配菌粉 (植物乳植杆菌: 乳酸片球菌为 2:1) 调配, 发酵环境中接种的乳酸菌起始活菌数约为 1×10^8 CFU/g。将处理好的小叶芥菜和汤汁各称重 500 g 装入包装袋中, 真空密封, 放置室温下 (25~30 ℃) 发酵 20 d。

1.3.2 感官评价

由 10 名经过培训的感官评定人员 (男女比例为 1:1) 组成评价小组, 对不同发酵周期 (5、10、15、20 d) 的泡青菜样品进行感官品质评定。评价标准如表 1 所示。

表 1 泡青菜感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria for fermented mustard		
评分指标	评分标准	分值 (分)
色泽 (10分)	色泽黄亮、有光泽、不发黑	7~10
	色泽暗淡, 无光泽	5~7
	色泽发黑或发白	0~5
香气 (10分)	无生青味, 具有泡菜清香和发酵香气	7~10
	泡菜清香和发酵香气较淡	5~7
	有异味, 缺乏泡菜香气	0~5
质地 (10分)	菜体脆嫩, 汁液饱满, 不发硬或发软	7~10
	菜体较脆, 肉质较为饱满	5~7
	菜体绵软, 缺乏泡青菜口感	0~5
滋味 (10分)	酸咸适中, 风味鲜美, 无苦味或涩味	7~10
	酸咸适中, 具有泡菜风味	5~7
	缺乏泡菜应有滋味	0~5

1.3.3 汤汁浊度的测定

参考 GB 13200-91 《水质 浊度的测定》中的分光光度法, 以样品在 680 nm 波长下的吸光度值表示。

1.3.4 色泽的测定

采用 $L^*a^*b^*$ 表色系统, 分别取样品叶片和菜杆, 使用色度色差仪测定。

1.3.5 理化指标的测定

泡青菜 pH 值的测定方法参考 GB 5009.237-2016; 可滴定酸的测定方法参考测定参考 GB 12456-2021; 亚硝酸盐的测定方法参照 GB 5009-2016。

1.3.6 微生物活菌总数的测定

菌落总数按 GB 4789.2-2022 测定; 霉菌和酵母菌数按 GB 4789.15-2016 采用平板计数法测定; 乳酸菌数按 GB 4789.35-2023 测定; 大肠菌群数按 GB 4789.3-2016 采用平板计数法检测。

1.3.7 微生物群落结构的测定

在充分震荡样品后, 取 30 mL 泡青菜发酵液分装于 50 mL 离心管, 4 ℃ $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 获取沉淀后置于 -80 ℃ 超低温冰箱保存。委托上海美吉生物医药科技有限公司进行扩增子测序: 细菌采用 338F/806R 引物 (16S rRNA 基因 V3-V4 区), 真菌采用 ITS5-1737F/ITS2-2043R 引物 (ITS2 区), 使用 Illumina Nextseq2000 平台进行高通量测序。

1.4 数据分析

每个实验重复 3 次平行, 实验结果以平均值 $\pm$ 标准差表示, 使用 IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析和显著性分析, OriginPro 2021 进行统计分析和作图。

2 结果与讨论

2.1 热烫处理对原料菌落总数及成品感官品质的影响

蔬菜原料自身携带明串珠菌、短乳杆菌等异型乳酸发酵菌和大肠杆菌、芽孢杆菌等腐败菌^[9], 若直接进行袋内发酵则会引发涨袋现象, 因此, 对原料的控菌处理是袋内发酵工艺中的关键环节, 其处理方式直接影响发酵产品的品质。本研究对比了 80 ℃ 水浴烫漂、100 ℃ 水浴烫漂和 100 ℃ 蒸汽烫漂及不同处理时间对小叶芥菜原料感官品质的影响, 筛选出 4 种较优的条件并对控菌效果进行定量评估, 结果如图 1 所示。经过热烫处理的原料菌落总数均显著低于空白对照组 (5.31×10^6 CFU/mL), 100 ℃ 水浴烫漂处理 1 min 和 80 ℃ 处理 2 min 表现出最优的控菌效果, 其菌落总数分别为 6.10×10^2 CFU/mL 和 8.10×10^2 CFU/mL, 显著低于 80 ℃ 水浴烫漂 1 min (1.03×10^3 CFU/mL) 和 100 ℃ 蒸汽烫漂 1 min (2.43×10^4 CFU/mL) 处理组 ($P < 0.05$)。温度升高能够突破微生物的耐热阈值,

在相同时间下灭活效果更强；且热烫时间的延长能够显著提升对耐热菌和芽孢的灭活效率^[10]；同时，水浴处理具有更好的热传导效率，能够更有效地杀灭表面微生物。经 15 d 袋内发酵，空白对照组和 100 ℃蒸汽烫漂 1 min 组发生严重涨袋，对其余组别进行感官评价，将每一项得分分值与该项满分相除，绘制雷达图（图 2），结果表明，100 ℃水浴烫漂 1 min 处理组在滋味、香气上表现突出，感官评分分别为 9.00 和 8.80 分，感官总分为 35.80 分，显著高于其它组别（ $P<0.05$ ），具有浓郁的发酵香气和鲜美的滋味，其色泽更加黄亮，这可能是由于适度热处理促进了叶绿素的转化^[11]；此外，适度的热处理时间（1 min）既保证了原料的初始杀菌效果，又避免了过度软化，使成品保持了理想的脆嫩质地。基于上述研究结果，本文确定 100 ℃水浴烫漂 1 min 为最优热烫工艺，并采用该工艺进行后续实验，以深入探究袋内发酵过程中泡青菜品质的动态变化规律及最佳成熟期。

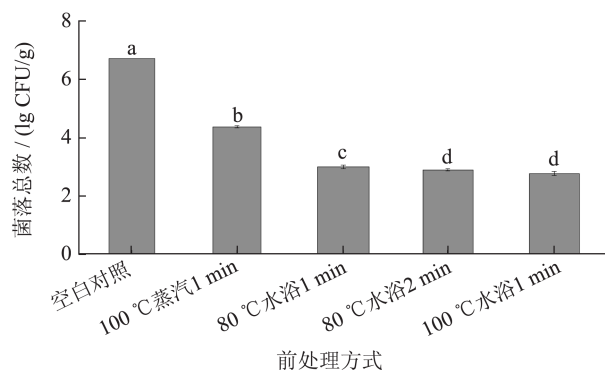


图 1 热烫条件对原料菌落总数的影响

Fig.1 Effect of hot blanching conditions on the total colony count of raw materials

注：同一图内不同字母表示不同样品具有显著差异（ $P<0.05$ ），下同。

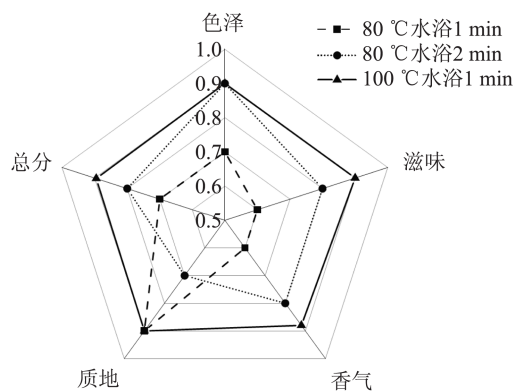


图 2 热烫条件对泡青菜成品感官评分的影响

Fig.2 Effect of hot blanching conditions on sensory scores of finished fermented mustard

2.2 泡青菜发酵过程中外观和感官品质的变化

泡青菜在发酵过程中的外观变化如图 3 示。发酵初期（0~5 d），样品色泽由青绿色逐渐转变为明亮的黄色，这种变化是由于在低 pH 值条件下，高浓度 H^+ 取代叶绿素分子中的 Mg^{2+} ，进一步降解后绿色消失，原本存在的黄色类胡萝卜素显色^[12]。随着发酵时间的延长，在 15 d 后样品开始出现褐变现象，色泽逐渐变暗并呈现绿色，这可能是多酚类物质的酶促氧化和美拉德反应共同作用的结果^[13]。

泡青菜发酵过程中汤汁浊度的变化如图 4 所示。结果显示，在发酵前期（0~10 d），汤汁浊度呈现显著上升趋势（ $P<0.05$ ），这可能归因于：（1）酵母菌等微生物的快速增殖导致菌体密度增加；（2）菜体组织在酶和酸性环境作用下的逐渐分解，释放出可溶性物质；（3）细胞内容物渗出导致的胶体物质增加^[14]。当发酵进行至 10 d 后，发酵体系中的物理化学条件趋于稳定，汤汁浊度趋于稳定。

泡青菜发酵过程中菜叶和菜杆的色度值如图 5、6 所示。利用 L^* 、 a^* 和 b^* 值来描述泡青菜的色泽特性，分别反映泡青菜色泽的明暗度、红绿度和黄蓝度。由图可知，菜叶和菜杆的 L^* 值在发酵过程中分别由 41.48 和 58.41 下降至 39.82 和 52.27，这可能是由于在发酵过程中叶绿素降解和多酚类物质的氧化褐变导致的颜色加深^[12]。菜叶和菜杆的 a^* 值 -7.63 和 -2.62 上升至 6.03 和 -2.16，这可能是由于在发酵过程中 Vc 被氧化脱水形成羟基糠醛，再聚合成为褐色物质，同时叶绿素和花色苷类物质的降解与转化和美拉德反应产物的积累也会导致泡青菜的褐变^[15]。 b^* 值呈现先上升后下降的趋势，在发酵 10 d 时菜叶和菜杆分别达到峰值 21.30 和 9.70，这可能是由于发酵过程中的酸性环境会促使叶绿素降解，导致泡青菜变黄变暗^[12]。泡青菜的色泽变化规律与薛寒^[16]的研究结果相近。其中，菜叶的色泽变化主要集中在 0~5 d，这与其较薄的组织结构和较高的代谢活性有关；而菜杆的色泽变化则出现在发酵后期（15~20 d），这与其致密的组织结构有关。研究表明，发酵第 10 天的泡青菜具有最佳的色泽特征，表现为较高的 L^* 值（叶：39.51；杆：58.53）、适中的 a^* 值（叶：5.32；杆：-2.65）和较高的 b^* 值（叶：21.31；杆：9.70），此时产品亮度适宜，褐变程度较低，黄色色调明显，发酵 15 d 的样品次之。

泡青菜发酵过程中感官评分如图 7 所示。结果表明，泡青菜在发酵第 5 天时，样品色泽评分较高（9 分），但滋味与香气评分偏低，可能由于发酵时间不足，原料自带的生青味未完全降解，且酯类等挥发性

风味物质尚未大量合成。随着发酵的进行,在第10天时泡青菜脱离生青味,具有成熟泡青菜的风味,色泽和质地达到最优值,分别为9.2分和9.5分,而香气和滋味则在发酵第15天达到峰值,分别为8.9分和9.3分,这可能是由于风味物质的持续积累所致。当发酵时间延长至20 d时,各项感官评分均出现显著下降($P<0.05$),这种品质下降可能与过度发酵导致的细胞壁分解和丁酸、硫化氢、生物胺类物质及各类醛酮化合物等不良风味物质生成有关^[17]。



图3 不同发酵时间泡青菜样品照片

Fig.3 Photographs of fermented mustard samples with different fermentation times

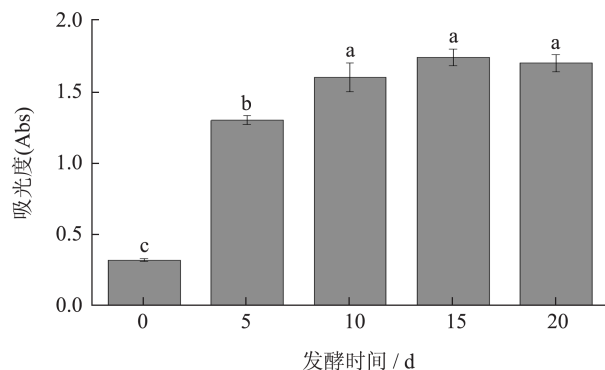


图4 不同发酵时间泡青菜汤汁的吸光度值

Fig.4 Absorbance values of fermented mustard broth at different fermentation times

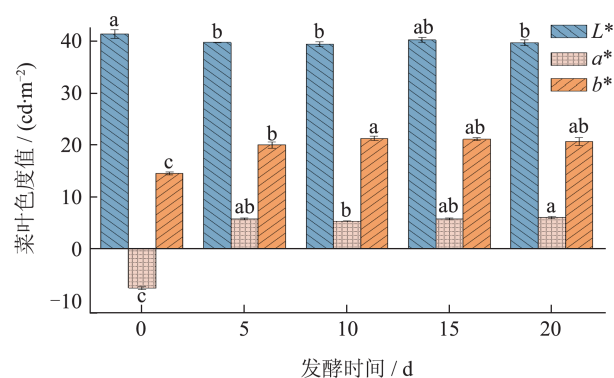


图5 不同发酵时间泡青菜菜叶色度值

Fig.5 Colour values of fermented mustard leaves at different fermentation times

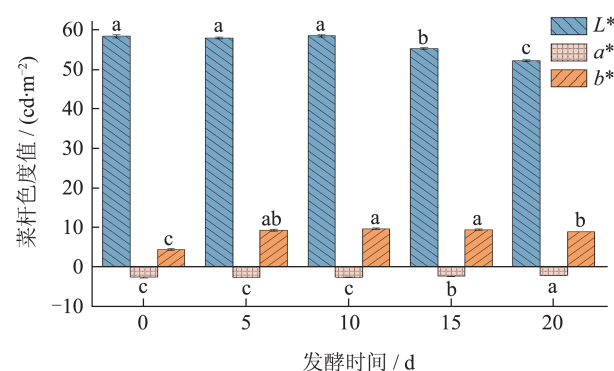


图6 不同发酵时间泡青菜菜杆色度值

Fig.6 Colour values of fermented mustard stalks at different fermentation times

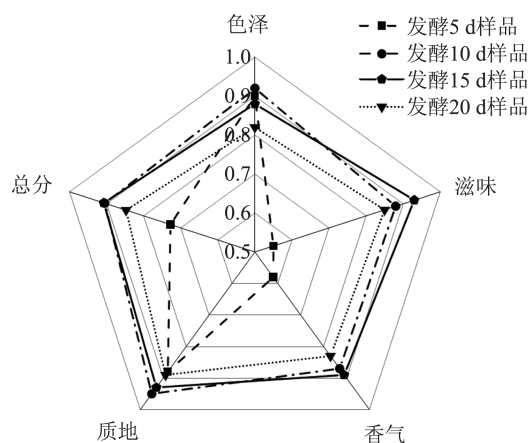


图7 不同发酵时间泡青菜的感官评分

Fig.7 Sensory scores of fermented mustard with different fermentation times

2.3 泡青菜发酵过程中理化指标的变化

泡青菜发酵过程中 pH 值和总酸含量的变化如图 8 所示。在发酵初期 (0~5 d), 体系发生快速酸化, pH 值从初始的 5.78 显著降低至 3.21 ($P<0.05$), 同时总酸含量从 0.48 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 快速上升至 6.13 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$),

这种变化主要归因于乳酸菌的代谢活动,其通过同型发酵途径将碳水化合物转化为乳酸,同时菜体组织中的有机物质在酶解作用下释放出可滴定酸,共同导致体系酸度的显著提升。与贾秋思等^[1]通过坛泡方式发酵6 d时pH值降至3.54相比,本研究的酸度上升更快,这可能由于袋内发酵的方式有利于乳酸菌快速建立优势进行产酸。随着发酵的进行,在5~20 d, pH值和总酸含量均达到相对稳定的状态,分别维持在3.14~3.21和6.13~6.96 g·L⁻¹的范围内。这种稳定状态是由于底物浓度的降低和代谢产物的积累对微生物活性产生抑制作用,限制了有机酸的进一步积累。

泡青菜发酵过程中的亚硝酸盐含量变化如图9所示。结果显示,泡青菜在发酵全程亚硝酸盐含量远低于国家标准限量(20 mg·kg⁻¹)。初始亚硝酸盐含量为1.46 mg·kg⁻¹,较新鲜芥菜原料降低了约30%,这可能归因于高温烫漂处理导致硝酸还原酶失活,抑制硝酸盐向亚硝酸盐的转化,同时促进亚硝酸盐的热分解,加之浸出作用导致水溶性亚硝酸盐流失,共同作用使得初始亚硝酸盐含量显著降低^[18]。在发酵过程中,亚硝酸盐含量显著降低至0.56 mg·kg⁻¹并维持在1 mg·kg⁻¹以下($P<0.05$),本实验结果与杜玫等^[19]发现蒸汽和微波处理组泡青菜亚硝酸盐含量(2.11 mg·kg⁻¹和2.59 mg·kg⁻¹)显著低于对照组和紫外组(4.62 mg·kg⁻¹和5.60 mg·kg⁻¹)的结果相近,因热烫和发酵方式不同存在些许差异。经过热烫的原料和袋内发酵的方式可以大幅度减少发酵环境中具有硝酸还原酶活性的杂菌,减少了亚硝酸盐的合成和积累;此外,接种发酵使发酵环境中乳酸菌的初始浓度升高,通过快速产酸降低了发酵环境的pH值,在低pH值条件下乳酸菌可以通过亚硝酸盐的酸降解途径有效抑制发酵食品中亚硝酸盐的积累^[20]。

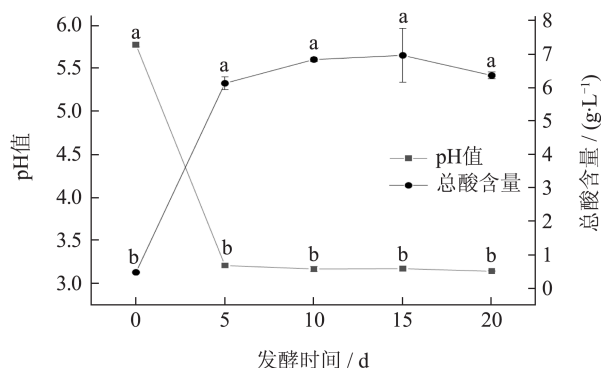


图8 不同发酵时间泡青菜的总酸和pH值

Fig.8 Total acid and pH of fermented mustard at different fermentation times

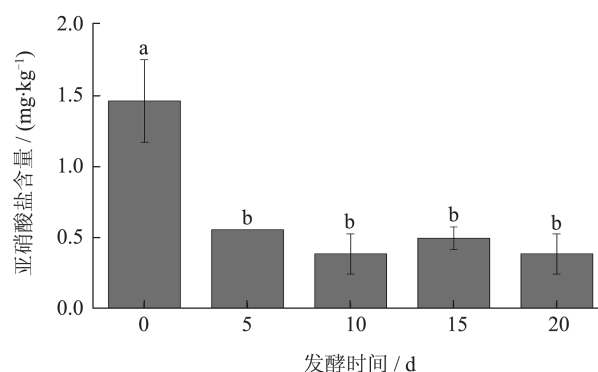


图9 不同发酵时间泡青菜的亚硝酸盐含量

Fig.9 Nitrite content of fermented mustard with different fermentation times

2.4 泡青菜发酵过程中菌落数的动态变化

泡青菜发酵过程中菌落数的动态变化如图10所示。在发酵初期(0~5 d),菌落总数和乳酸菌数呈现显著增长趋势($P<0.05$),在第5天分别达到 4.47×10^8 CFU/mL和 4.33×10^8 CFU/mL的峰值,这主要归因于接种发酵确保了乳酸菌的初始优势和袋内发酵阻断了外界杂菌的竞争性干扰。随着发酵的进行,微生物数量分别下降至 9.23×10^6 CFU/mL和 7.07×10^6 CFU/mL($P<0.05$),后趋于稳定,这是由于随着发酵的进行,环境pH值和发酵底物浓度降低,从而抑制了不耐酸微生物和乳酸菌的生长繁殖^[21]。霉菌和酵母菌总数的初始数量较低,这主要归因于100℃烫漂处理能有效抑制原料中大部分真菌的活性,且袋内发酵的方式阻断了外界真菌的污染。与菌落总数和乳酸菌数不同的是,在发酵5~10 d,其数量持续增长($P<0.05$),并在第10天达到峰值 4.40×10^6 CFU/mL,这可能是由于随着细菌数量的衰减,其代谢产物与细菌素等会抑制真菌生长的物质减少,同时细菌在衰亡期释放的胞内容物(如多糖、氨基酸),为真菌提供了次级生长基质^[22]。大肠菌群在第0天少量检出(0~3 CFU/g),显著低于传统晾晒工艺3.50~3.70 lg CFU/g^[19],表明烫漂处理可以减少大肠菌群带入,降低污染风险。随着发酵的进行,大肠菌群数量急剧下降,在5~20 d发酵期间未检出。本研究结果与张其圣等^[23]总结的不同微生物在泡菜发酵过程中的变化规律相近,即乳酸菌在发酵前期迅速增长繁殖,在发酵中期达到8~10 lg CFU/mL,在发酵中后期下降;酵母菌和霉菌在发酵前期缓慢上升,在中后期保持稳定或略有下降;大肠菌群在前期快速增长,随着发酵的进行迅速下降,本研究经过热烫处理和发酵袋隔绝,避免了大肠菌群前期的增长。

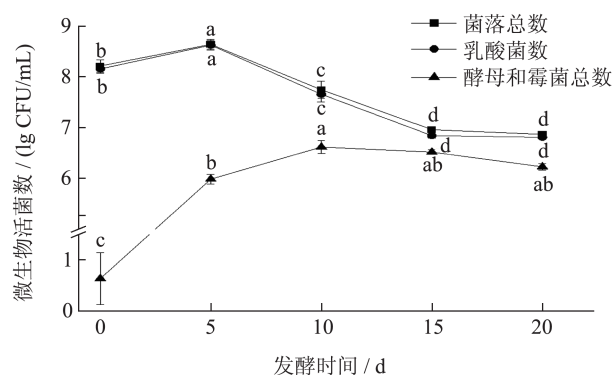


图 10 不同发酵时间泡青菜的活菌数

Fig.10 Viable bacteria counts of fermented mustard at different fermentation times

2.5 成熟泡青菜中的微生物群落结构

采用基于 16S rDNA 和 ITS 的二代高通量测序技术对发酵 15 d 泡青菜样品的细菌和真菌群落结构进行解析, 结果如图 11 所示 (others 为占比 <1% 物种合集)。在细菌群落组成上, 厚壁菌门 (Firmicutes) 占比 99.28%, 为绝对优势菌门 (图 11a), 该菌门以耐酸特性著称, 是蔬菜发酵体系的核心功能类群^[24]。在属水平上 (图 11b), 主要为乳杆菌属 (*Lactobacillus*, 83.15%) 和片球菌属 (*Pediococcus*, 16.10%), 进一步明确为接种菌株植物乳植杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*, 83.15%) 与乳酸片球菌 (*Pediococcus acidilactici*, 16.10%)。此外, 还检测到少量分枝杆菌属 (*Mycobacterium*, 0.23%)、鞘脂

单胞菌属 (*Sphingomonas*, 0.04%) 和甲基杆菌属 (*Methylobacterium*, 0.02%), 这些细菌主要来源于蔬菜原料, 经过热烫后少量存活, 在发酵过程中由于乳酸菌的竞争优势及低 pH 值环境, 生长繁殖受到抑制^[25]。

在真菌群落组成上, 子囊菌门 (Ascomycota, 99.98%) 为唯一优势门, 在属/种水平上 (图 11e、11f), 群落主要由迈耶氏酵母属 (*Meyerozyma*, 66.47%)、汉逊酵母属 (*Hanseniaspora*, 30.81%) 及假丝酵母属 (*Candida*, 2.53%) 构成, 对应种水平分别为季也蒙迈耶氏酵母 (*Meyerozyma guilliermondii*, 66.46%)、迈耶汉逊酵母 (*Hanseniaspora meyeri*, 30.81%) 和近平滑念珠菌 (*Candida parapsilosis*, 2.33%), 其中季也蒙迈耶氏酵母 (*Meyerozyma guilliermondii*) 具有较强的耐酸性, 常见于自然发酵蔬菜, 通过分泌酯酶催化生成乙酸苯乙酯, 可赋予泡菜花果香调^[26]; 迈耶汉逊酵母 (*Hanseniaspora meyeri*) 的孢子具有较强的耐热性, 作为兼性厌氧菌, 在低氧袋内环境中能够通过糖酵解代谢生成乙醇与甘油, 协同乳酸提升防腐效力^[27]; 近平滑念珠菌 (*Candida parapsilosis*) 具有一定的耐热性和较强的耐酸性, 但其主要以需氧方式生长, 这导致了它在袋内低氧环境中的增殖能力受限^[28]。此外, 还有少量的解脂耶氏酵母 (*Yarrowia lipolytica*, 0.18%) 和胶红酵母 (*Rhodotorula mucilaginosa*, 0.02%), 由于其不耐酸和需氧性, 在袋内发酵的环境中难以大量增殖^[29]。

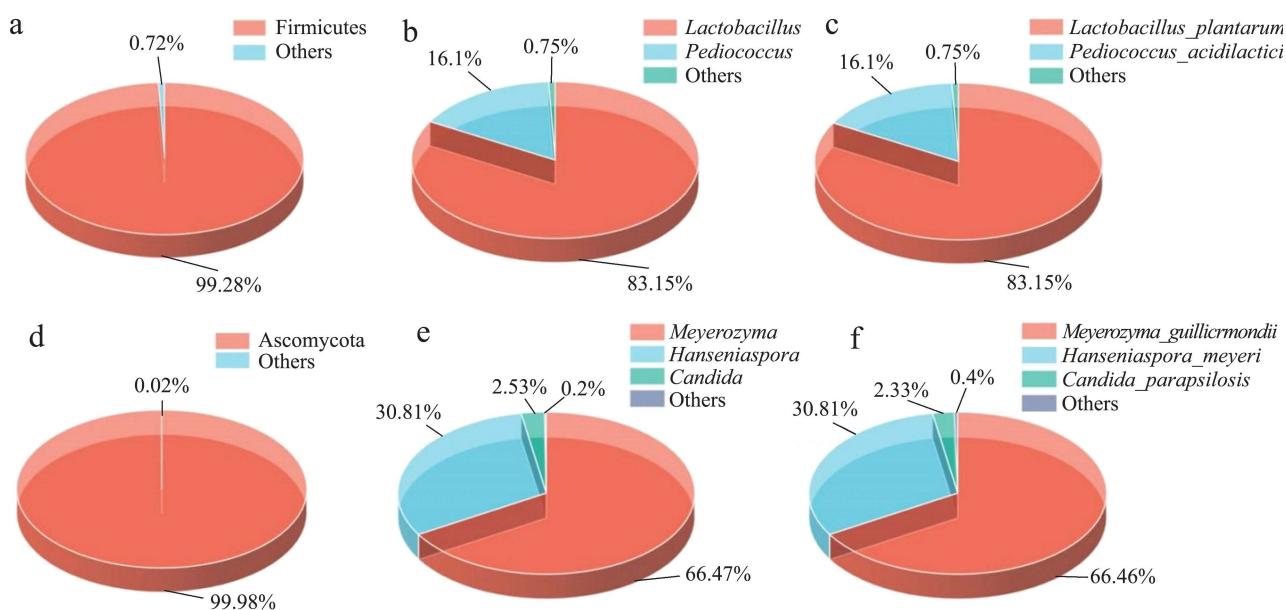


图 11 泡青菜成品中细菌和真菌菌落组成

Fig.11 Bacterial and fungal colony composition in mature fermented mustard

注: a 为泡青菜中细菌门水平群落组成图, b 为泡青菜中细菌属水平群落组成图, c 为泡青菜中细菌种水平群落组成图, d 为泡青菜中真菌门水平群落组成图, e 为泡青菜中真菌属水平群落组成图, f 为泡青菜中真菌种水平群落组成图。

传统坛泡和池泡工艺中,微生物组成较为复杂,常检出假单胞菌属、肠杆菌属等条件致病菌,以及青霉、毕赤酵母等腐败真菌,这些微生物的存在可能导致产品品质劣变并引发安全隐患^[30]。相比之下,本研究采用的袋内发酵工艺未检出上述潜在危害菌群,其微生物群落结构呈现高度简化特征,有利于增加泡青菜产品的安全性和品质的稳定性。

3 结论

本研究通过对比控菌效果和感官评分,对袋内发酵的工艺进行优化,结果表明,100℃水浴烫漂1 min为最优热烫工艺,既能有效杀灭原料中的微生物,显著降低初始菌落总数(降至 6.10×10^2 CFU/g),又能保持原料的质地和色泽,避免过度软化,且经过发酵后感官评分最高(35.80分),为后续发酵提供了良好的原料基础。在此基础上探究了袋内发酵泡青菜微生物指标、理化指标和感官特征的动态变化规律及成品的微生物群落结构。结果表明,泡青菜的色泽和质地发酵第10天达到最佳,在发酵15 d滋味和香气更加浓郁,发酵第20天时,产品因过度发酵导致感官品质明显下降。因此,发酵第10天至第15天为本工艺袋内发酵泡青菜的较优成熟期,发酵15 d时产品感官评分达到峰值36.30分。发酵初期(0~5 d),菌落总数和乳酸菌数迅速增长,pH值和总酸含量产生显著变化,表明袋内微生物具有较高的活性和产酸能力。霉菌和酵母菌数在0~10 d持续增长,于第10天达到峰值 4.40×10^6 CFU/mL后趋于稳定。大肠菌群在发酵初期少量检出,随后迅速消失,亚硝酸盐初始含量为 $1.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在0~5 d迅速下降后维持在 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,低于安全限量。袋内发酵体系微生物结构简单,以植物乳杆菌(*L. plantarum*, 83.15%)与乳酸片球菌(*P. acidilactici*, 16.10%)为优势菌群,真菌群落则以季也蒙氏酵母(*M. guilliermondii*, 66.46%)和迈耶汉逊酵母(*H. meyeri*, 30.81%)为主,与传统坛泡和池泡工艺相比,本袋内发酵工艺未检出假单胞菌属、肠杆菌属等条件致病菌,以及青霉、毕赤酵母等腐败真菌。综上所述,本研究采用的袋内发酵工艺具有可行性,且能通过物理隔离、生物竞争和化学抑制的多重机制,显著提升了泡青菜的品质稳定性和安全性,为传统发酵蔬菜制品的现代化生产提供了理论参考。与传统发酵工艺相比,袋内发酵生产效率高、无高盐废水排放且产品质量稳定,其微生物群落结构简单,发酵成熟后可通过冷藏替代杀菌处理维持产品品质,在餐饮行业和预制菜供应生产企业中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 贾秋思,何芝菲,罗佩文,等.不同发酵方式下泡青菜的品质分析[J].食品与发酵工业,2015,41(8):111-116.
- [2] 黄润秋,唐垚,唐晓慧,等.工业软化泡菜理化指标及主要致微生物特性分析[J].食品与发酵科技,2024,60(2):1-6,19.
- [3] 郑琦锴,蔡常宇,王临好,等.传统泡菜中高产乳酸菌的筛选与鉴定[J].现代食品科技,2023,39(9):96-105.
- [4] ZHAO Y, WEI W, TANG L, et al. Characterization of aroma and bacteria profiles of sichuan industrial paocai by HS-SPME-GC-O-MS and 16S rRNA amplicon sequencing [J]. Food Research International, 2021, 149: 110667.
- [5] 胡此海,杨絮,郭全友,等.四川泡菜母水的微生物群落与理化特性分析[J].中国食品学报,2024,24(2):281-291.
- [6] 张义奎,曹梦茜,李俊丽,等.酸白菜腌制过程中优势乳酸菌及菌群演替规律研究[J].中国食品学报,2023,23(7):363-373.
- [7] 马媛,耿伟涛,王金菊,等.乳酸菌代谢与食品风味物质的形成[J].中国调味品,2019,44(1):159-163,172.
- [8] DI C R, CADA R, DE A M, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation [J]. Food Microbiology, 2013, 33(1): 1-10.
- [9] GUAN Q, ZHENG W, HUANG T, et al. Comparison of microbial communities and physiochemical characteristics of two traditionally fermented vegetables [J]. Food Research International, 2020, 128: 108755.
- [10] 魏丽娜,冉胤德,李秉恒,等.“微型”胡萝卜的抑菌及抑制白化保鲜技术研究进展[J].现代食品科技,2025,41(3):414-425.
- [11] ZHANG Z H, WANG L H, ZENG X A, et al. Effect of pulsed electric fields (PEFs) on the pigments extracted from spinach (*Spinacia oleracea* L.)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43: 26-34.
- [12] DEGRAIN A, MANHIVI V, REMIZE F, et al. Effect of lactic acid fermentation on color, phenolic compounds and antioxidant activity in african nightshade [J]. Microorganisms, 2020, 8(9): 1324.
- [13] AO X, YAN J, CHEN C, et al. Isolation and identification of the spoilage microorganisms in sichuan homemade paocai and their impact on quality and safety [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(9): 2939-2947.
- [14] GE L, LAI H, HUANG Y, et al. Comparative evaluation of package types in alleviating textural softening and package-swelling of paocai during storage: Insight into microbial invasion, cell wall pectinolysis and alteration in sugar and organic acid profiles [J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130489.
- [15] STAROWICZ M, ZIELINSKI H. How maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food Reviews International, 2019, 35(8): 707-725.
- [16] 薛寒.低亚硝酸盐泡菜生产工艺与品质变化研究[D].绵阳:西南科技大学,2023.
- [17] 胡容,唐垚,覃书漫,等.低盐泡菜的贮藏后酸化及其对泡菜品质安全的影响[J].中国调味品,2023,48(8):66-69,76.
- [18] 范智义,邓维琴,李雄波,等.四川泡菜发酵早期亚硝酸盐生成转化途径的初探[J].食品与发酵工业,2025,51(1):151-157.

- [19] 杜玫,蔡玥,杨潇然,等.前处理方式对小叶芥菜发酵过程的影响[J].食品科技,2020,45(12):67-72.
- [20] 商景天,王修俊,王继辉.有机酸对泡菜中亚硝酸盐的降解作用[J].食品与机械,2018,34(3):73-78.
- [21] CHEN C, CHENG G, LIU Y, et al. Correlation between microorganisms and flavor of Chinese fermented sour bamboo shoot: Roles of *Lactococcus* and *Lactobacillus* in flavor formation [J]. Food Bioscience, 2022, 50: 101994.
- [22] DARBANDI A, ASADI A, MAHDIZADE A M, et al. Bacteriocins: Properties and potential use as antimicrobials [J]. Journal of Clinical Laboratory Analysis, 2022, 36(1): e24093.
- [23] 张其圣,陈功,申文熹,等.中国泡菜乳酸菌群落结构动态变化研究进展[J].食品与发酵科技,2016,52(6):1-8.
- [24] 于文平,张亚豪,吴正云,等.青菜泡菜工业发酵过程中微生物群落结构变化分析[J].中国调味品,2019,44(6):30-35.
- [25] ZHANG C, WANG M Y, KHAN N, et al. Potentials, utilization, and bioengineering of plant growth-promoting methylobacterium for sustainable agriculture [J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3941.
- [26] YAN W, GAO H, QIAN X, et al. Biotechnological applications of the non-conventional yeast *Meyerozyma guilliermondii* [J]. Biotechnology Advance, 2021, 46: 107674.
- [27] MARTIN V, JOSE V M, MEDINA K, et al. Oenological impact of the *Hanseniaspora/kloeckera* yeast genus on wines-a review [J]. Fermentation-basel, 2018, 4(3): 76.
- [28] SILVA S, NEGRI M, HENRIQUES M, et al. Candida glabrata, candida parapsilosis and candida tropicalis: Biology, epidemiology, pathogenicity and antifungal resistance [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2012, 36(2): 288-305.
- [29] ZINJARDE S S. Food-related applications of *Yarrowia lipolytica* [J]. Food Chemistry, 2014, 152: 1-10.
- [30] RAO Y, TAO Y, CHEN X, et al. The characteristics and correlation of the microbial communities and flavors in traditionally pickled radishes [J]. LWT, 2020, 118: 108804.