

发酵酸菜的安全管控及包装杀菌技术应用

陈兴兴¹, 包爱明^{1*}, 敖文敏², 龙正玉², 李彬彬², 秦伟军¹

(1. 贵州南山婆食品加工有限公司, 贵州 安顺 561000; 2. 贵州南山婆食品研究院有限公司, 贵州 安顺 561000)

摘要: 发酵酸菜因富含碳水化合物且使用大量水作为发酵基质, 极易滋生腐败微生物使产品变质。我国大部分发酵酸菜产品采用自然发酵, 存在发酵不稳定、亚硝酸盐含量高等食品安全性差的问题。此外, 随着都市化发展和生活节奏加快, 发酵酸菜逐渐趋向小包装化, 但随之也出现防腐剂滥用、运输褐变、胀袋、产生异味等问题。这些问题使得发酵酸菜的食用安全性和货架期短等缺点难以消除, 严重限制了发酵酸菜产业的发展。该文综述了发酵酸菜目前面临的食品安全问题, 简要介绍了目前发酵酸菜菌种筛选及应用的研究进展, 阐述了目前的包装杀菌技术, 提出通过接种技术优化发酵过程以提升稳定性, 降低食品安全风险, 并从杀菌包装技术角度分析延长货架期并降低防腐剂使用的可行性办法, 为发酵酸菜规范化生产和行业发展提供理论依据。

关键词: 发酵酸菜; 食品安全; 亚硝酸盐; 接种发酵; 杀菌包装

中图分类号: TS255.36

文章编号: 0254-5071(2025)12-0021-07

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.12.004

引文格式: 陈兴兴, 包爱明, 敖文敏, 等. 发酵酸菜的安全管控及包装杀菌技术应用[J]. 中国酿造, 2025, 44(12): 21-27.

Safety control and packaging sterilization technology application of fermented sauerkraut

CHEN Xingxing¹, BAO Aiming^{1*}, AO Wenmin², LONG Zhengyu², LI Binbin², QIN Weijun¹

(1. Guizhou Nanshanpo Food Processing Co., Ltd., Anshun 561000, China;

2. Guizhou Nanshanpo Food Research Institute Co., Ltd., Anshun 561000, China)

Abstract: Fermented sauerkraut, rich in carbohydrates and produced using large volumes of water as the fermentation substrate, is highly susceptible to spoilage by contaminating spoilage microorganisms. In China, the majority of fermented sauerkraut products rely on natural fermentation, which is often characterized by poor process stability and elevated nitrite levels, posing significant food safety concerns. Additionally, with accelerating urbanization and the faster-paced modern lifestyles, fermented sauerkraut is gradually trending towards smaller packaging. However, this trend has also introduced new challenges, such as the abuse of preservatives, browning during transportation, gas expansion in packaging, and the development of off-flavors. These issues make it difficult to eliminate the shortcomings of fermented sauerkraut, such as its food safety and short shelf-life, which seriously restricts the development of the fermented sauerkraut industry. In this paper, the current food safety issues associated with fermented sauerkraut were reviewed, the recent research advances in the screening and application of fermented sauerkraut strains were briefly introduced, and the existing packaging and sterilization technologies were expounded. Furthermore, it was proposed to optimize the fermentation process through inoculation technology to enhance fermentation stability and reduce food safety risks. From the perspective of sterilization and packaging technology, the feasibility of extending shelf-life and reducing preservative usage were also explored. The aim was to provide theoretical support for the standardized production and industry development of the fermented sauerkraut.

Key words: fermented sauerkraut; food safety; nitrite; inoculum fermentation; sterilization packaging

中国是世界上最大的蔬菜生产和消费国家, 每年因初加工环节设备简陋、方法原始等导致蔬菜产出后损失超过蔬菜产量的10%^[1]。蔬菜的初级加工经济效益低、利润空间小, 而蔬菜的深、精加工能赋予产品更大的附加值, 增加经济效益、提升利润空间。我国蔬菜深加工起步较晚, 蔬菜深加工主要以粗加工为主, 加工种类有发酵蔬菜、脱水蔬菜、冻干蔬菜等, 其中产量最大的是发酵蔬菜, 如东北酸菜、四川泡菜、江西腌菜、贵州酸菜、云南富源酸菜、河南酸

菜、山西酸菜等^[2-3]。

发酵酸菜作为我国传统发酵食品, 从古至今, 我国发酵酸菜的制作与消费经历了多个阶段的发展。第一阶段为传统家庭制作阶段(先秦至清末^[4-7]), 该时期, 发酵酸菜主要由家庭自制, 用于储存多余的蔬菜以备冬季食用, 每个地区根据气候条件、蔬菜种类和风味偏好, 形成了不同的发酵酸菜制作方法; 第二阶段为小规模商业化阶段(清末至20世纪80年代), 发酵酸菜逐渐走出家庭, 进入市场流通。

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2025-05-22

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-ZZSG[2024]005, 黔科合平台KXJZ[2024]014, 黔科合成果[2023]重大011); 安顺市科技计划项目(安市科农重[2023]01号, 安市科平[2023]7号(粤黔协作))

作者简介: 陈兴兴(1994-), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为食品微生物。

*通讯作者: 包爱明(1971-), 女, 本科, 研究方向为食品加工。

一些地方开始出现发酵酸菜的专业加工户和小作坊,以满足城镇居民对腌制食品的需求,例如,东北地区形成以白菜酸菜为主的腌制产业^[8],四川泡菜也以其独特风味在全国范围内小有名气^[9-10],然而,这一时期的发酵酸菜生产仍以手工为主,规模较小,品质不够稳定;第三阶段为产业化初步发展阶段(80年代后至21世纪初),发酵酸菜产业开始逐步走向规模化和标准化,发酵酸菜生产由家庭作坊转向企业化经营。一些地方政府和企业通过发展区域品牌推动了发酵酸菜的产业化,例如,东北地区以“大缸酸菜”为特色^[11-12],四川泡菜成为区域经济的重要名片^[13-14];第四阶段为现代化与品牌化阶段(21世纪初至今)。近年来,我国发酵酸菜产业进入了快速发展的现代化阶段,企业纷纷引进现代化生产设备和技术,通过标准化的生产流程提高产品质量,地方特色发酵酸菜品牌逐步走向市场^[15-16],如主要由大白菜在低温、低盐条件(2%左右)下发酵而成的东北酸菜^[17];以萝卜、大白菜、豇豆以及辣椒等原料放置于含有盐、糖的水中浸泡发酵而成的四川泡菜^[18];以萝卜菜、油菜或青菜等当地特色蔬菜为原材料,经沸水漂烫1 min左右,冲洗后入坛,再加入酸汤水泡制而成,方言名为“冲菜”的贵州酸菜^[19]。

在都市化和工业化的背景下,发酵酸菜产品逐渐向标准化、小包装化方向转变,同时也衍生了亚硝酸盐含量超标、防腐剂滥用、褐变、胀袋等问题^[20-22]。因此,如何通过发酵优化和包装技术延长发酵酸菜货架期并确保其食品安全,已成为亟待解决的重要课题。鉴于此,本文对发酵酸菜目前存在的食品安全问题进行综述,并对食品安全问题进行分析,提出通过接种强化发酵方式结合包装杀菌技术的解决策略,旨在为发酵酸菜的标准化、现代化生产提供思路,为发酵酸菜品质提升提供理论参考。

1 发酵酸菜中的食品安全问题

1.1 自然发酵的不稳定性

传统发酵酸菜生产依赖自然发酵工艺,其发酵过程主要由环境微生物主导,包括乳酸菌、酵母菌、霉菌等^[12,23-24],然而,由于自然发酵对发酵时间、盐分、温度等外部条件高度敏感,使得微生物群落往往存在显著差异,导致产品在感官风味方面出现波动^[25-27]。例如,季节温度不同,导致发酵酸菜的发酵速度、风味物质积累程度存在一定差异,影响最终产品品质^[24];不同盐分会影响有益微生物的生长繁殖、产品鲜味、色泽、脆度、总酸,从而影响产品的风味及品质^[28-30]。此外,杂菌(如假单胞菌、霉菌等)的参与不仅会消耗原料的营养物质,严重的甚至会使产品腐败变质^[31],导致食品安全风险增加,进一步限制了自然发酵产品的稳定性和安全性。

1.2 亚硝酸盐积累

亚硝酸盐含量偏高是造成发酵酸菜食品安全问题的主要风险之一^[32-33],除发酵酸菜原材料本身就携带亚硝酸盐外(一般<0.5 mg/kg),还因其自身含有硝酸盐,发酵初

期,发酵酸菜体系pH较高、微生物种类多、氧气含量高,硝酸盐还原菌如大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)等微生物快速增殖,将硝酸盐转化为亚硝酸盐^[34-36]。当发酵酸菜发酵过程中的总酸增加速度与pH降低速度过慢时,导致亚硝酸盐积累速度大于还原速度^[26],亚硝酸盐的积累可能超过安全阈值20 mg/kg(GB 2762—2024《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定腌渍蔬菜中亚硝酸盐含量不得超过20 mg/kg),因此,发酵酸菜发酵需要保持一个较高的总酸增长速度及较快的pH降低速度。

欧雪^[33]通过使用不同浓度食盐进行发酵酸菜发酵得出盐浓度与亚硝酸盐含量呈正相关;王文建等^[37]研究发现,在10℃下,亚硝峰在第10天出现,且峰值较高(50.13 mg/kg),而在25℃下,亚硝峰在第2天出现且峰值仅为22.18 mg/kg。尽管通过调整盐浓度或发酵温度可以在一定程度上降低亚硝酸盐含量,但在工业化大规模生产中,这些方法的应用受到技术和成本的限制。

1.3 褐变及胀袋

褐变是食品加工和贮藏过程中常见的一种变色现象,主要是指发酵酸菜在存储过程中颜色逐渐由鲜绿色或黄色变为棕色甚至深褐色的现象,发酵酸菜在自然条件下贮存极易发生褐变^[38]。褐变又分为酶促褐变和非酶促褐变,董霞等^[39]研究发现,发酵酸菜褐变为非酶促褐变,且反应主要包括抗坏血酸氧化及酚类化学氧化。此外,包装材料的透氧性能不足、光照及高温环境也会加速褐变的产生^[40-41],最终导致产品失去新鲜感,影响消费者的购买意愿。

胀袋是指发酵酸菜在小包装存储过程中因微生物的代谢活动产生气体,使包装袋膨胀,并产生异味的现象^[21]。其根本原因在于发酵不完全或储存期间有少量活菌继续代谢。尤其是在运输或储存温度较高的情况下,乳酸菌、酵母菌或其他未被完全灭活的微生物会加速代谢,释放二氧化碳和其他挥发性气体,从而导致胀袋,进而引发异味。这不仅损害了产品的外观,还增加了食品安全风险。

1.4 防腐剂超标

针对发酵酸菜的储运问题,商家为了防止变质并延长保质期,会添加食品防腐剂^[42]。GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》对酱腌菜(发酵酸菜归属酱腌菜)中允许使用的防腐剂种类及限量有明确规定,主要是苯甲酸(≤ 1.0 g/kg)、山梨酸(≤ 1.0 g/kg)和脱氢乙酸(≤ 0.3 g/kg)。虽然使用防腐剂可以有效防止发酵酸菜变质,但长期摄入过量防腐剂会对人体器官造成一定的伤害^[43],苯甲酸及山梨酸的过量摄入会影响人体骨骼生长,并对肝脏及肾功能产生不良影响,而过量摄入脱氢乙酸则会影响人体中枢神经系统、凝血系统和生殖系统^[44]。目前市面上的发酵酸菜产品存在过量添加防腐剂的现象,罗钰珊等^[45]

对广东省内超市、市场、杂食店、餐馆及集体食堂销售的产品进行随机抽样,结果显示食品添加剂的不合格率均超过10%,总体不合格率达13.74%,防腐剂超标问题普遍;任彩霞等^[46]对西安市售腌白菜、腌萝卜等产品的防腐剂进行检测与分析,结果显示,苯甲酸使用量最大,且存在超标使用的情况;周瑚等^[47]对岳阳市市售发酵酸菜的防腐剂进行检测与分析,发现苯甲酸及脱氢乙酸存在超标使用的问题,且主要以苯甲酸为主,其不合格率为4.48%。

2 发酵酸菜中食品安全问题策略

2.1 发酵酸菜的发酵机理与乳酸菌分离筛选

发酵酸菜作为一种传统的发酵食品,其独特风味和保藏能力主要来源于乳酸菌的发酵作用。在发酵酸菜的天然发酵过程中乳酸菌生长代谢产生的酸性物质和活性代谢产物能够赋予发酵酸菜独特的风味,抑制腐败菌的繁殖生长^[48-50],使发酵酸菜能保藏更久时间。

2.1.1 发酵机理

发酵酸菜发酵的核心是微生物的代谢活动,是多种微生物共同作用的结果,其中,最主要的就是乳酸发酵^[51]。乳酸菌利用新鲜蔬菜中可发酵性碳水化合物代谢生成乳酸、乙醇等多种代谢物。蔬菜中含量最多的可发酵性糖是葡萄糖,因此,蔬菜发酵中乳酸菌主要进行葡萄糖代谢。根据代谢产物的不同,又分为同型乳酸发酵与异型乳酸发酵^[52],同型发酵产生的代谢产物80%以上都是乳酸,而异型乳酸发酵产生的代谢产物有50%左右为乳酸,同时产生一部分酒精和二氧化碳,前期异型发酵占主导,后期同型发酵占主导。

发酵初期,各种杂菌的生长与乳酸菌异型发酵同时开始,伴随着乳酸迅速积累、氧气的消耗,形成对杂菌的抑制^[48];发酵中期,乳酸菌逐渐成为优势菌群,伴随酸度逐渐上升,异型发酵乳酸菌如肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)和双歧杆菌(*Bifidobacterium*)等逐渐被植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)、戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*)和德氏乳杆菌(*Lactobacillus delbrueckii*)等蔬菜发酵中常见的同型发酵乳酸菌替代,使得同型发酵开始主导发酵^[23,53],发酵环境趋于稳定;至发酵后期,乳酸积累达到平衡,微生物活性逐渐下降,发酵过程进入停滞期。

2.1.2 乳酸菌分离筛选

乳酸菌是发酵酸菜发酵的核心微生物,其主要功能包括降解糖类生成乳酸、降低pH值、抑制腐败菌和病原菌的生长,赋予发酵酸菜独特的酸味并延长其保藏期。然而,由于天然发酵过程中微生物群落的复杂性和随机性,导致发酵产品的风味和质量存在波动,为解决这一问题,研究者们逐步开展对乳酸菌菌种的分离和筛选工作。黄微微等^[54]通过MRS培养基结合微生物碳源指纹图谱的方法从四川泡菜中分离到3株副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*)、2株德氏乳杆菌以及1株植物乳植杆菌;VASILEVA T等^[55]

利用培养基分离与种特异的多种聚合酶链反应结合的方法,从保加利亚传统泡菜中分离得到13株肠膜明串珠菌;何珍^[17]从市售酸菜、实验室自制酸菜和家庭自制酸菜中筛选到戊糖片球菌、植物乳植杆菌、肠膜明串珠菌和短乳杆菌(*Lactobacillus brevis*);王鑫宇^[56]从自然发酵酸菜、发酵大酱和开菲尔中筛选到3株产酸速度快、产酸量、降解亚硝酸盐能力和抑菌能力较强的菌种,其中2株为植物乳植杆菌,1株为乳杆菌(*Lactobacillus sp.*)。

乳酸菌菌种的分离筛选与应用不仅能够显著提高自然发酵酸菜的发酵效率,还能有效解决发酵不稳定性问题。将筛选到的优势乳酸菌接种于发酵酸菜,可在发酵初期迅速积累乳酸,有效降低体系pH值,抑制杂菌生长。此外,快速降酸还能缩短亚硝酸盐积累的窗口期,有效抑制亚硝酸盐的生成和累积,降低亚硝峰,从源头上控制亚硝酸盐超标风险。通过对乳酸菌发酵工艺的系统优化,有助于提升产品质量和口感一致性,为发酵酸菜品质的标准化奠定基础。

2.2 接种强化技术的应用

2.2.1 接种强化技术

接种强化技术可通过人为引入特定功能性微生物菌株,取代传统天然发酵过程中对环境随机菌群的依赖,从而显著提高发酵过程的稳定性和安全性。这种技术在发酵酸菜发酵中的应用,为解决传统发酵过程中存在的质量波动和食品安全问题提供了有效的解决方案。

接种乳酸菌可以迅速启动发酵过程,减少发酵前期因杂菌竞争导致的延迟。高效乳酸菌能够在短时间内大量繁殖并产生乳酸,快速降低环境pH值,抑制杂菌的生长繁殖,从而显著缩短发酵周期,提高生产效率。早在1961年,PEDERSON C S等^[57]使用植物乳植杆菌进行酸黄瓜的接种强化发酵;GARDNER N J等^[58]使用植物乳植杆菌、乳酸片球菌(*Pediococcus acidilactici*)和肠膜明串珠菌复合菌剂对混合蔬菜进行发酵,结果显示复合发酵菌种有助于加速发酵过程,使终产品的质量稳定;JUNG J Y等^[59]研究接种肠膜明串珠菌强化发酵对韩国泡菜发酵过程中的微生物群落和代谢物的影响,结果显示肠膜明串珠菌加速了韩国泡菜的发酵速率,并且产生更多有机酸。此外,接种乳酸菌可通过快速降解糖类生成乳酸,显著降低发酵体系的pH值,使其迅速进入乳酸菌主导的厌氧环境,从而有效抑制亚硝酸盐的积累,降低食品安全隐患。YAN P M等^[60]利用乳酸菌发酵剂发酵泡菜,结果显示发酵过程的硝酸盐还原菌受到发酵剂的抑制,使得亚硝酸盐含量处在较低水平;XIANG W L等^[61]通过接种植物乳植杆菌及食蜜魏斯氏菌(*Weissella cibaria*)以提升四川泡菜品质,结果显示接种强化发酵加速了初期非挥发性有机酸的生成,同时降低了亚硝酸盐含量。因天然发酵的菌群结构具有随机性,导致不同批次产品在风味、酸度和质地等方面存在显著差异。通过接种特

定的乳酸菌菌株,可以人为调控菌群组成,使发酵过程更加可控,保证产品的风味和品质一致性,是推动发酵酸菜工业化、标准化生产的重要策略。

2.2.2 工业化接种技术的应用

单一菌株接种虽然可以提高发酵效率,但在风味物质的生成和发酵稳定性方面可能存在不足。WANG D等^[62]对比了单菌发酵与复合发酵的风味组成及感官品质,结果显示复合菌种发酵较单菌发酵风味及感官品质更佳;YANG X等^[63]在传统东北酸菜中筛选到4株乳酸菌,分别为肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)、植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)、副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*)、食蜜魏斯氏菌(*Weissella cibaria*),其在商业化培养基中分别表现生长速度快、产酸能力高、亚硝酸降解能力强以及抑菌活性高,随后HU W等^[64]将植物乳植杆菌接种发酵酸菜能显著提高发酵酸菜中酯类含量,但将植物乳植杆菌与肠膜明串珠菌复合接种发酵酸菜后,除了酯类增加外,乳酸、萜类和多酚类化合物含量均增加;SONG G等^[65]使用植物乳植杆菌与戊糖片球菌接种发酵酸菜,发现共发酵酸菜

的挥发性代谢物组成与自然发酵更相似,同单菌发酵酸菜对比,复合发酵酸菜细菌菌群多样性更高。复合菌种接种在提升发酵酸菜风味物质多样性、发酵稳定性以及食品安全性方面具有显著优势,可为发酵酸菜工业化生产提供了更加科学、高效的技术支持。

2.3 现代杀菌及包装技术的应用

2.3.1 现代杀菌技术应用

杀菌技术是延长发酵酸菜货架期的关键手段,其主要目的是通过抑制或杀灭致腐微生物,减少微生物代谢对产品品质的破坏。目前发酵酸菜工业常用的杀菌技术是热杀菌结合防腐剂来实现产品防腐,但热杀菌会破坏泡菜脆度、色泽、维生素等成分,添加防腐剂虽然能避免有害微生物的危害,但防腐剂超量、超范围使用带来了食品安全隐患^[33,66]。由此可见,在保证食品安全和延长发酵酸菜货架期的前提下,选择合适的杀菌技术至关重要。不同杀菌技术各有优缺点,不仅对发酵酸菜中的微生物抑制效果不同,还会对产品的风味、质地和营养成分产生重要影响^[33]。目前发酵酸菜的主要杀菌技术见表1。

表1 发酵酸菜的主要杀菌技术
Table 1 Main sterilization techniques for fermented sauerkraut

杀菌方式	原理	优点	缺点	应用场景
高温杀菌	通过高温(通常在121℃以上)处理发酵酸菜,杀灭微生物,特别是耐热性强的芽孢菌 ^[67] 。	杀菌效率高,能够彻底灭活大部分致腐和致病微生物;适用于大规模工业化生产,工艺成熟且成本相对较低。	易导致发酵酸菜质地软化,口感变差;色泽和风味可能发生明显变化;部分热敏性营养成分(如维生素C)会受到破坏。	主要用于货架期较长的瓶装或罐装发酵酸菜。
巴氏杀菌	利用相对较低温(60~85℃)对发酵酸菜进行短时间杀菌,主要抑制腐败菌和部分致病菌,而非完全灭菌 ^[68] 。	杀菌过程温和,可较好保留发酵酸菜的质地和风味;对色泽和营养成分破坏较小。	对耐热微生物(如芽孢菌)效果有限;杀菌后仍需冷藏存储,以延长保质期。	适用于袋装、杯装、预制菜类等发酵酸菜。
辐照杀菌	通过γ射线或电子束照射发酵酸菜,破坏微生物的脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA),抑制其生长和繁殖 ^[69] 。	杀菌效率高,可显著减少微生物总数;不会显著改变发酵酸菜的质地和风味;可在常温下操作。	部分消费者对“辐照食品”存有偏见,接受度较低;对设备要求较高,成本相对较高。	适用于对杀菌效果要求较高的产品,如出口发酵酸菜。
超高压杀菌	通过将发酵酸菜置于超高压(300~600 MPa)环境中,破坏微生物的细胞膜和蛋白质结构,从而达到杀菌效果 ^[67] 。	杀菌效率高,可保持发酵酸菜原有的色泽、风味和质地;对热敏性营养成分无破坏。	对耐压性微生物(如部分芽孢菌)效果有限;设备成本高,工艺复杂,能耗较高。	适用于高品质或高附加值发酵酸菜产品的加工。
化学杀菌	过添加防腐剂(如山梨酸钾、苯甲酸钠等)或使用抗菌剂处理发酵酸菜,以抑制微生物生长。	简单高效,操作方便;成本低,适合大规模生产。	防腐剂超量或超范围使用可能带来食品安全问题;部分防腐剂可能对产品风味产生轻微影响。	常用于小包装发酵酸菜产品,但需严格控制添加剂用量。
紫外线杀菌	利用紫外线破坏微生物的细胞质变性,从而导致微生物死亡 ^[70] 。	能耗低,操作便捷;对发酵酸菜风味和质地无影响。	杀菌效果局限于发酵酸菜表面,难以处理内部微生物。	适合简单表面杀菌和低污染产品的初步处理。
等离子杀菌	利用等离子体中的高能粒子灭活微生物 ^[70] 。	环保、无化学残留;对风味和营养无破坏。	技术尚不成熟,设备成本较高。	用于高要求的发酵酸菜加工场景,例如出口或高端产品。

不同杀菌技术在杀菌效率、对发酵酸菜品质的影响以及适用场景上各具特点。在实际应用中,要根据发酵酸菜的产品类型、市场需求以及加工成本合理选择杀菌技术。如可利用菌种复合发酵结合巴氏杀菌,可进一步优化杀菌效果和产品货架期。

2.3.2 现代包装技术应用

包装技术是发酵酸菜产品在储存、运输和销售环节中的重要保护措施。通过隔绝外界环境、调控包装内部的气

体成分,能够有效减少发酵酸菜与氧气的接触,抑制微生物的生长,延缓氧化反应,减少褐变、胀袋、变质等问题,以延长货架期,保障产品质量和安全。为了实现对发酵酸菜产品的有效保护,包装技术的核心在于合理选择适合的包装材料。包装材料不仅直接影响发酵酸菜与外界环境的隔离效果,还可在储存和运输中起到支撑和保护的作用^[71]。发酵酸菜包装中常用的材料及其特性见表2。

选择适合的包装材料需要综合考虑发酵酸菜的特性、

产品定位以及储存和运输的具体需求。为了充分发挥包装材料的保护作用,确保发酵酸菜产品在储存、运输和销售环节中的质量稳定,必须结合合理的包装技术。包装技术

的核心在于利用包装材料的特性,通过适当的处理和设计,实现发酵酸菜的长效保鲜、抑菌和延缓氧化等功能。目前主要的发酵酸菜包装技术见表3。

表2 发酵酸菜包装中常用的材料及其特性
Table 2 Commonly used materials in the packaging of fermented sauerkraut and their characteristics

包装材料	原理	优点	局限性	应用场景
传统塑料	通常采用聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚酯 (polyester, PET)、聚丙烯 (polypropylene, PP) 等塑料薄膜。	成本低,材料易加工,适合多种杀菌技术。	氧气阻隔能力较差,容易导致发酵酸菜氧化和褐变。	适用于普通小包装发酵酸菜产品,成本低,操作便捷。
复合材料	由两种或多种材料复合而成,结合了不同材料的优点,如铝箔复合膜、纸塑复合 ^[72] 、尼龙复合膜等。	阻隔性好,强度高,适合多种包装形式。	生产成本较高,难以回收处理。	广泛用于发酵酸菜小包装中。
环保型材料	以生物基材料 (如聚羟基烷酸酯 (polyhydroxyalkanoates, PHA) 为主,环保、可降解 ^[73] 。	环保性好,符合可持续发展趋势。	成本较高,气体阻隔性能与传统材料相比稍逊。	适用于绿色、环保定位的发酵酸菜产品包装。
智能包装材料	功能型包装材料,可实现环境监测和动态调控功能 (如:抗菌膜、气调包装膜、指示性包装等 ^[74])。	功能性强,能够动态监测和调控储存环境。	研发成本高,推广应用尚需时间。	适用于高端或出口发酵酸菜产品。

表3 发酵酸菜的主要包装技术
Table 3 Main packaging techniques used in fermented sauerkraut

包装方式	原理	优点	局限性	应用场景
真空包装	通过将包装内空气抽出,减少氧气含量,抑制需氧微生物生长。	能显著延缓氧化反应,防止发酵酸菜腐败,延长货架期。	可能导致包装内压力过高,发酵酸菜因挤压而软化,且运输中易受碰撞影响。	适用于普通小包装发酵酸菜产品。
充氮包装	通过向包装内部填充惰性气体 (氮气) 代替氧气,降低氧化反应速率。	能有效保持发酵酸菜的质地和风味,延缓品质劣化。	成本较高,且需配合高阻隔性材料。	适用于高端发酵酸菜产品或长途运输产品。
气调包装	通过调控包装内的气体比例 (如CO ₂ 、N ₂ 和O ₂),抑制微生物生长并减缓呼吸作用。	能够精确调控包装环境,显著延长货架期并保持产品的外观和风味。	技术复杂,设备成本较高。	适用于高附加值发酵酸菜产品或出口发酵酸菜。
智能包装	采用抗菌膜或智能包装标签等 ^[75-76] 。	能够动态调节包装内部环境,保障发酵酸菜的新鲜度和安全性。	技术处于发展初期,成本较高,应用较少。	适用于高端品牌发酵酸菜产品或需要长时间储存的产品。

单一的杀菌或包装技术通常难以解决发酵酸菜货架期短的问题,而通过两者的结合使用,可以显著提高产品的储存稳定性。

在发酵酸菜生产过程中,通过筛选具有特定功能性的乳酸菌,并结合乳酸菌复合菌种强化发酵技术,可实现发酵初期快速产酸、迅速降低pH值,有效抑制杂菌生长并降低亚硝峰峰值,提升产品的安全性。同时,采用巴氏杀菌或辐照杀菌工艺,可进一步消除潜在的致病微生物,增强食品安全保障;在产品储存环节中,利用充氮包装或真空包装技术可减少氧化反应和微生物活性,显著降低甚至免除防腐剂的使用;在运输和销售阶段,引入智能包装技术实现环境参数的实时监测有助于预警温湿变化,降低褐变、胀袋及异味产生的风险。以上措施构建了从发酵、储存到流通各环节的食品安全控制体系,为提升发酵酸菜品质与货架期提供了全流程解决策略。

3 总结与展望

针对目前发酵酸菜的问题,可通过强化发酵菌种技术结合包装杀菌技术解决。接种强化发酵技术作为改善发酵稳定性的重要手段,通过筛选和优化高效乳酸菌株及菌株组合发酵,可以显著提升发酵过程的可控性,减少自然发酵中微生物群落波动引发的质量波动。复合菌种接种可优

化发酵酸菜的风味、减少亚硝酸盐等有害物质的积累、增加发酵酸菜的营养成分和食品安全性。在包装杀菌技术方面,使用对风味影响较小的巴氏杀菌结合真空包装技术,能很好满足目前小包装发酵酸菜的货架期及防腐剂问题,降低甚至去除防腐剂的使用,还可使用辐照杀菌结合抗菌膜材料增加杀菌效果。随着包装技术的不断发展及日益成熟,包装技术及材料的成本或可大幅降低,包装技术将逐渐从真空包装、充氮包装、气调包装等逐步过度到智能包装,发酵酸菜产品的储存和运输将更加高效与精细。未来,智能包装材料将不仅能够监测发酵酸菜的存储条件 (如温湿度、pH等),还能够实时反馈包装环境变化,甚至根据需要调节气体成分,延长发酵酸菜的货架期,并有效防止褐变、异味等问题。未来,发酵酸菜产业有望成为健康、绿色、创新的代表,推动发酵蔬菜行业迈向新的高峰。

参考文献:

[1] 王雪娇,毛昭庆,李梁,等. 云南省蔬菜加工业发展现状及对策研究[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(3): 118-122.
[2] 贺蓓蓓,彭晓顺,杨逸飞,等. 乳酸菌发酵酸菜研究进展[J]. 绿色科技, 2021, 23(20): 257-259.
[3] 张玉龙,胡萍,湛剑龙,等. 发酵酸菜的研究及其进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 3998-4003.

- [4] 贾恩嫒. 齐民要术(饮食部分)[M]. 北京:中国商业出版社,1984:88-89.
- [5] 徐光启. 农政全书校注[M]. 北京:中华书局,2020:907-919.
- [6] 林孔翼. 成都竹枝词[M]. 成都:四川人民出版社,1986:72-73.
- [7] 曾懿. 中馈录[M]. 北京:中国商业出版社,1984:58-60.
- [8] 李继文,姜爱丽,胡文忠,等. 东北酸菜的发酵工艺及使用食品抗氧化剂和防腐剂的必要性[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(19):5090-5094.
- [9] 杜莉. 四川泡菜的文化特色与川菜烹调中的运用[J]. 中国调味品,2016,41(12):138-141.
- [10] 李想,冯明会,杨祥禄. 试论四川泡菜与川菜文化[J]. 食品与发酵科技,2012,48(5):16-18,26.
- [11] 闫宝忠. 白菜腌制酸菜方法[J]. 科学种养,2008(10):56.
- [12] 田佳雪. 东北酸菜复合发酵剂的制备及其对酸菜品质影响探究[D]. 长春:吉林大学,2024.
- [13] 李幼筠. 成都泡菜正成为调味品行业新的经济增长点[J]. 中国调味品,2000,25(12):5-7.
- [14] 辜国材. 四川泡菜香味四溢[N]. 中国商报,2001-07-05(004).
- [15] 王继发,蒋俊伟. 四川泡菜加工从传统走向现代[N]. 中国食品报,2024-01-17(004).
- [16] 徐扬,于也童,刘艺淳. 酸菜为何占据东北餐桌C位?[N]. 新华每日电讯,2024-02-14(002).
- [17] 何珍. 传统酸菜中优势菌群筛选及其共酵对风味品质的影响[D]. 大连:大连工业大学,2021.
- [18] 肖晓玮. 东北酸菜对高脂饮食诱导的C57BL/6小鼠糖脂代谢的影响及其调控机制研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
- [19] 全昌彬,姚玉仙. 贵州黔东南地区泡制酸菜中酵母菌的分离与鉴定[J]. 食品安全质量检测学报,2022,13(13):4273-4281.
- [20] 赵岭,王超,王婷婷. 传统发酵酸菜安全管控研究—以湖南酸菜基地为例[J]. 食品安全导刊,2023,(27):10-12,16.
- [21] 邓劼,谢思,王浩文,等. 酸菜货架期褐变机理[J]. 食品工业,2023,44(1):125-128.
- [22] 杜杰. 四川酸菜保质期预测、品质快速检测及货架期延长研究[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [23] 栾天奇. 酸菜发酵剂的制备及酸菜风味成分分析[D]. 天津:天津科技大学,2011.
- [24] SONG S T, LI C Y, GU C T. *Lactocaseibacillus jixiensis* sp. nov., Isolated from traditional Chinese pickle[J]. **Curr Microbiol**, 2024, 81(11): 374.
- [25] 贾晶晶,魏爱丽,赵虎威,等. 基于高通量测序分析不同食盐浓度的酸菜中微生物多样性[J]. 中国调味品,2022,47(8):167-170,174.
- [26] 许建洋,陈忠军,张作仪,等. 内蒙古地区自然发酵酸菜汤中亚硝酸盐、有机酸含量和细菌群落特征分析[J]. 中国酿造,2024,43(8):54-60.
- [27] 于美玲. DGGE分析自然发酵酸菜中微生物的多样性[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2015.
- [28] 李凤姿. 接种乳酸杆菌及盐对东北酸菜发酵效果的影响研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [29] 生书晶,余婷婷,吴映明,等. 中国泡菜研究的现状、问题及建议[J]. 中国调味品,2015,40(9):113-116.
- [30] 江玉琴,罗凤莲,李文青,等. 不同食盐添加量对芥菜腌制过程中主要成分的影响[J]. 农产品加工,2018(16):47-50.
- [31] 吴铎. 发酵过程中东北酸菜品质特征监测分析及其菌群变化研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
- [32] LUO Y, LIU Y, REN T, WANG B, et al. Sichuan paocai fermented by mixed-starter culture of lactic acid bacteria[J]. **Food Sci Nutr**, 2020, 8(10): 5402-5409.
- [33] 欧雪. 接种乳酸菌发酵低盐泡菜工艺优化及辐照杀菌对其品质的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2022.
- [34] KIM D W, KIM B M, LEE H J, et al. Effects of different salt treatments on the fermentation metabolites and bacterial profiles of kimchi[J]. **J Food Sci**, 2017, 82(5): 1124-1131.
- [35] 厉丽. 健康角度说酸菜[J]. 开卷有益-求医问药,2023(2):1.
- [36] HU X Y, WEI W, ZHANG J Y, et al. Nitrite self-degradation process in radish paocai under the synergistic regulation of prokaryotic microorganisms[J]. **Food Biosci**, 2024, 57: 103612.
- [37] 王文建,闵锡祥,李兰英,等. 川式泡菜、韩式泡菜发酵过程中理化特性及微生物变化比较[J]. 食品科技,2020,45(6):6-10,17.
- [38] 叶春苗. 包装联合气调保鲜对东北酸菜品质的影响[J]. 食品工业,2021,42(6):160-163.
- [39] 董霞,王芳,庞美霞,等. 酸菜贮藏期间褐变机理的探讨[J]. 食品与发酵工业,2016,42(12):222-226.
- [40] 毛凯. 食品包装用塑料复合膜、袋透氧的性能[J]. 现代食品,2017(1):118-119.
- [41] 张芷芸,姜启兴,龚创奇. pH、包装厚度和光照对即食藕条产品褐变的影响[J]. 食品科技,2020,45(8):33-38.
- [42] 罗钰珊,乐丽华,宋美英,等. 酱腌菜常用添加剂的调查分析[J]. 食品与发酵科技,2019,55(5):51-54.
- [43] 胡牧. 食品安全中食品添加剂的功能与危害分析[J]. 食品安全导刊,2019(6):87.
- [44] 崔敏,郭新璞,伯钰,等. HPLC法同时测定酱腌菜中常用防腐剂和甜味剂的研究[J]. 中国食物与营养,2022,28(3):29-32.
- [45] 罗钰珊,乐丽华,宋美英,等. 酱腌菜常用添加剂的调查分析[J]. 食品与发酵科技,2019,55(5):51-54.
- [46] 任彩霞,王立霞,丁毅. 西安市售酱腌菜中防腐剂和糖精钠的检测与分析[J]. 保鲜与加工,2022,22(8):76-81.
- [47] 周瑚,杨顺明,周毅,等. 岳阳市市售酸菜常用食品防腐剂检测与分析[J]. 农产品加工,2024(9):82-86,89.
- [48] 王富. 乳酸菌在食品防腐中的应用探析[J]. 食品安全导刊,2022(10):145-147.
- [49] GÓMEZ-SALA B, MUÑOZ-ATIENZA E, SÁNCHEZ J, et al. Bacteriocin production by lactic acid bacteria isolated from fish, seafood and fish products[J]. **Eur Food Res Technol**, 2015, 241(3): 341-356.
- [50] LI D, NI K, PANG H, et al. Identification and antimicrobial activity detection of lactic acid bacteria isolated from corn stover silage[J]. **Asian Austral J Anim**, 2015, 28(5): 620-631.
- [51] NGUYEN D T L, VAN HOORDE K, CNOCKAERT M, et al. A description of the lactic acid bacteria microbiota associated with the production of traditional fermented vegetables in Vietnam[J]. **Int J Food Microbiol**, 2013, 163(1): 19-27.
- [52] 景秋菊. 东北酸菜中微生物多样性的研究进展[J]. 中国果菜,2023,43(4):49-53.
- [53] HE J, LI F, WANG Y, et al. Fermentation characteristics and bacterial dynamics during Chinese sauerkraut fermentation by *Lactobacillus curvatus* LC-20 under varied salt concentrations reveal its potential in low-salt Suan cai production[J]. **J Biosci Bioeng**, 2021, 132(1): 33-40.
- [54] 黄微微,张兰威. 源于中国传统发酵蔬菜乳酸菌分离及发酵特性[J].

- 黑龙江生态工程职业学院学报,2010,23(4):34-36.
- [55] VASILEVA T, ILIEV I, AMARI M, et al. Characterization of glycosyl-transferase activity of wild-type *Leuconostoc mesenteroides* strains from Bulgarian fermented vegetables[J]. **Appl Biochem Biotech**, 2012, 168(3): 718-730.
- [56] 王鑫宇. 天然发酵酸菜中乳酸菌的分离及发酵特性的评价[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [57] PEDERSON C S, ALBURY M N. The effect of pure culture inoculation on fermentation of cucumbers[J]. **Food Technol**, 1961, 15: 351-354.
- [58] GARDNER N J, SAVARD T, OBERMEIER P, et al. Selection and characterization of mixed starter cultures for lactic acid fermentation of carrot, cabbage, beet and onion vegetable mixtures[J]. **Int J Food Microbiol**, 2001, 64(3): 261-275.
- [59] JUNG J Y, LEE S H, LEE H J, et al. Effects of *Leuconostoc mesenteroides* starter cultures on microbial communities and metabolites during kimchi fermentation[J]. **Int J Food Microbiol**, 2012, 153(3): 378-387.
- [60] YAN P M, XUE W T, TAN S S, et al. Effect of inoculating lactic acid bacteria starter cultures on the nitrite concentration of fermenting Chinese paocai[J]. **Food Control**, 2008, 19(1): 50-55.
- [61] 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 Sci Technol**, 2019, 121: 108975.
- [62] WANG D, CHEN G, TANG Y, et al. Study of bacterial community succession and reconstruction of the core lactic acid bacteria to enhance the flavor of paocai[J]. **Int J Food Microbiol**, 2022, 375: 109702.
- [63] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Comparison of northeast sauerkraut fermentation between single lactic acid bacteria strains and traditional fermentation[J]. **Food Res Int**, 2020, 137(7): 109553.
- [64] HU W, YANG X, JI Y, et al. Effect of starter cultures mixed with different autochthonous lactic acid bacteria on microbial, metabolome and sensory properties of Chinese northeast sauerkraut[J]. **Food Res Int**, 2021, 148: 110605.
- [65] SONG G, HE Z, WANG X, et al. Improving the quality of Suancai by inoculating with *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus pentosaceus* [J]. **Food Res Int**, 2021, 148: 110581.
- [66] 吴梦西. 低盐酸菜中耐辐照微生物对酸菜品质的影响及联合杀菌工艺研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [67] 齐宁利, 张诚涵, 龚霄, 等. 超高温瞬时和超高压杀菌对诺丽发酵果汁风味物质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(6): 128-137.
- [68] 刘羽晏, 刁玉华, 张联琴, 等. 2020—2022年昆明市鲜奶吧巴氏杀菌乳中微生物污染现状分析[J]. 中国乳业, 2024(12): 98-103.
- [69] 朱婷婷, 王家琪, 蔚江涛, 等. 基于文献计量学的辐照杀菌研究进展及其行业发展现状分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 271-277.
- [70] 艾麦提·巴热提. 杀菌技术在食品加工中的应用与发展探究[J]. 农产品加工, 2024(2): 81-83, 92.
- [71] ZYGOURA P, MOYSSIADI T, BADEKA A, et al. Shelf life of whole pasteurized milk in Greece: effect of packaging material[J]. **Food Chem**, 2004, 87(1): 1-9.
- [72] 冯嘉伟. 食品纸塑复合包装材料中有机污染物检测存在的问题及优化策略[J]. 食品安全导刊, 2024(28): 181-183.
- [73] 张玲玲. 环保型生物基食品包装材料的开发与应用探讨[J]. 食品安全导刊, 2024(30): 186-189.
- [74] 陈景华, 林晨璐, 方应大为, 等. 热致变色材料的变色机理及其在智能包装中的应用[J]. 包装学报, 2024, 16(6): 81-91.
- [75] 李晨. 具有智能控释性能的食品抗菌包装膜的研制与应用[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.
- [76] 袁景宸, 杨昭悦, 汪美玲, 等. 花青素基新鲜度指示膜的制备及智能包装应用研究进展[J]. 绿色包装, 2024(12): 18-24.