酸菜发酵过程中微生物对其风味形成及安全性的影响研究进展

孔金金[1],班世栋[2],龙　云[1],宗春阳[1],于院国[3],王晓丹[1,4]*

(1.贵州大学 酿酒与食品工程学院 贵州省生态特色食品新质化加工与贮藏全省重点实验室,贵州 贵阳 550025;
2.大连大学 生命健康学院,辽宁 大连 116622;3.贵州珍酒酿酒有限公司,贵州 遵义 563000;
4.贵州久酿微生物技术服务中心,贵州 贵阳 550025)

摘　要:酸菜作为一种历史悠久的传统发酵蔬菜,因其清脆爽口、酸香醇厚的风味以及丰富的维生素、膳食纤维和矿物质等营养物质,赢得消费者的青睐。酸菜是由大白菜、芥菜、青菜等为原材料经微生物代谢及其一系列生化反应发酵而成的发酵食品,酸菜发酵过程中微生物群落结构交替变化,在不同阶段发挥不同的作用,对酸菜的品质、风味及安全性有极大影响。该文综述酸菜微生物多样性,探讨发酵条件对酸菜品质的影响,解析不同微生物种群对酸菜风味形成及安全性的影响,旨在通过调控微生物代谢改善酸菜品质的可行性,为酸菜品质提升提供参考。

关键词:酸菜;微生物群落;发酵过程;风味物质;安全性

中图分类号:TS255.54　　**文章编号:**0254-5071(2026)03-0007-08　　doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.03.002

引文格式:孔金金,班世栋,龙云,等. 酸菜发酵过程中微生物对其风味形成及安全性的影响研究进展[J]. 中国酿造,2026,45(3):7-14.

Research progress on the effect of microorganism on flavor formation and safety during fermentation process of Suancai

KONG Jinjin[1], BAN Shidong[2], LONG Yun[1], ZONG Chunyang[1], YU Yuanguo[3], WANG Xiaodan[1,4]*

(1.Guizhou Key Laboratory of New Quality Processing and Storage of Ecological Specialty Food, College of Brewing and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.College of Life and Health, Dalian University, Dalian 116622, China; 3.Kweichow Zhen Distillery Co., Ltd., Zunyi 563000, China;4.Guizhou Jiuniang Microbial Technology Service Center, Guiyang 550025, China)

Abstract: Suancai, as a traditional fermented vegetable with a long history, has won the favor of consumers because of its crisp and refreshing, sour and mellow flavor, and rich nutrients such as vitamins, dietary fiber and minerals. Suancai is a fermented food which is fermented from Chinese cabbage, mustard vegetables and green vegetables through microbial metabolism and a series of biochemical reactions. During the fermentation process, the structure of microbial community changes alternately, and the microbes in different stages plays different roles, which has a great impact on the quality, flavor and safety of Suancai. The microbial diversity of Suancai was reviewed, the effect of fermentation conditions on the quality of Suancai was discussed, and the effect of different microbial populations on the flavor formation and safety of Suancai was analyzed. The aim was to explore the feasibility of improving the quality of Suancai by regulating microbial metabolism, and to provide reference for enhancing the quality of Suancai.

Key words: Suancai; microbial community; fermentation process; flavor component; safety

发酵蔬菜(酸菜)是我国历史悠久的传统发酵食品,因其清香、入口爽脆、营养丰富而深受人们的喜爱。酸菜的产生最早可追溯到周朝[1],最初是为了延长保存期限,后因其风味独特,逐渐受到广大消费者的喜爱,在日常饮食中可作为开胃小菜、调味品和下饭菜[2]。酸菜的种类繁多,东北、华北、西北以及华中地区的酸菜常以白菜为原材料,西南地区的酸菜常以青菜为原料。此外,也有用胡萝卜、芹菜、蔓菁的块茎、块根等作为原材料腌制的酸菜。不同地域酸菜差异主要由不同的气候条件、地理环境和饮食习惯等原因导致[3-4]。由于所用原料、生产工艺和地理环境的不同,发酵过程中的微生物也不相同,从而形成了各地风味独特、各具特点的酸菜。酸菜具有解腻开胃、促进消化[5]、抗衰老、降低胆固醇[6]等功效。传统酸菜制作工艺流程为原料挑选、清洗、切分、烫漂、添加母水和食盐、发酵、成品。

酸菜是一种经盐渍、密封发酵后产生独特的酸味和香气,利用附着在蔬菜上或人工接种的微生物,通过发酵制成的发酵蔬菜。这一过程涉及细菌、酵母等多种微生物,通过产酸、产酶及其他物质来改变酸菜的质地和风味,同时

收稿日期:2025-03-19　　**修回日期:**2025-12-16

基金项目:贵州省高层次创新型人才(黔科合平台人才-GCC[2023]013);贵州省发酵工业特征微生物资源挖掘与利用科技创新人才团队建设(黔科合平台人才-CXTD[2023]029);校企合作项目(K22-0115-017);贵州省科晖特征微生物资源化利用创新平台建设(黔科合服企[2023]012)

作者简介:孔金金(1999-),男,硕士研究生,研究方向为微生物代谢。

***通讯作者:**王晓丹(1980-),女,正高级实验师,博士,研究方向为应用生物技术。

参与酸菜发酵过程的各种生化反应,形成了独特的风味和口感,也确保了产品的安全性(如降低亚硝酸盐、胺类物质等)。不同地域酸菜的原料、发酵工艺等不同,最终呈现的微生物结构、风味和安全性等也会不同。其中,微生物群落结构对酸菜品质起着决定性作用:一方面能帮助酸菜的风味、营养物质和口感等更易达到预期状态;另一方面可能滋生条件致病菌、腐败菌等有害微生物,引发安全隐患,制约标准化生产。因此,研究发酵过程中微生物的特性,明确其对酸菜品质形成的影响机制,对优化生产工艺、提升产品质量稳定性和推动标准化生产等具有重要的理论与实践意义。本文围绕酸菜发酵过程中微生物种群,综述酸菜微生物多样性,分析发酵条件对酸菜品质的影响,探讨不同微生物种群对酸菜风味形成和安全性的影响,旨在探明酸菜发酵过程中微生物作用机理,为改善酸菜品质及标准化、安全可控及产业化生产酸菜提供科学依据。

1 酸菜发酵过程中微生物种群

酸菜通常由自然发酵生产,白菜、青菜中含有多种微生物,包括好氧菌(假单胞菌、肠杆菌、酵母和霉菌)和厌氧菌(乳酸菌)[7]。乳酸菌有助于启动自然发酵并有利于酸菜的保存和稳定性,大多数乳酸菌因对宿主健康有益,所以可作为益生菌的来源。经常参与酸菜发酵的乳酸菌有明串珠菌属(*Leuconostoc*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、乳球菌属(*Lactococcus*)和片球菌属(*Pediococcus*),植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)是最常见的分离物种之一[8]。乳酸菌在几乎所有类型的酸菜中都普遍存在,显示其广泛参与酸菜发酵。

1.1 主要细菌属和真菌属

酸菜的细菌类群主要源于原料、加工设备及自然环境中携带的微生物,其中优势菌群特指在酸菜特定发酵阶段(如初期、中期或后期)以及特定工艺条件(如盐浓度、发酵温度)下,经高通量测序相对丰度较高的微生物类群[9]。酸菜的发酵系统中含有丰富的细菌和真菌。目前的研究主要集中在不同加工方法下酸菜的细菌结构和动态演替,细菌被认为是优势微生物,发挥着重要作用[10]。在酸菜自然发酵过程中,真菌相对于细菌较少,主要集中在酵母菌,霉菌常作为腐败菌出现。例如德巴利酵母属(*Debaryomyces*)、哈萨克斯坦酵母属(*Kazachstania*)、假丝酵母属(*Candida*)和毕赤酵母属(*Pichia*)等[11]。这些酵母菌具有较强的耐酸性和耐盐性,能在乳酸菌营造的pH值为3.5～4.5的酸性环境中稳定生长,且在发酵初期与中期丰度较高,后期随酸度进一步降低而略有下降,但仍能维持一定种群规模[12]。不同产地酸菜发酵过程中主要细菌属和真菌属见表1。由表1可知,不同产地酸菜发酵过程中主要细菌属为乳酸杆菌属(*Lactobacillus*),主要真菌属为毕赤酵母属(*Pichia*)。

表1 不同产地酸菜发酵过程中主要细菌属和真菌属

Table 1 Main bacterial and fungal genus of Suancai from different regions during fermentation process

酸菜产地	细菌属	真菌属	参考文献
东北地区	乳酸杆菌属(*Lactobacillus*) 明串珠菌属(*Leuconostoc*) 克雷伯氏菌属(*Klebsiella*) 乳球菌属(*Lactococcus*) 魏斯氏菌属(*Weissella*)	德巴利酵母属(*Debaryomyces*) 假丝酵母属(*Candida*) 威克汉姆酵母属(*Wickerhamomyces*) 毕赤酵母属(*Pichia*)	[13-15]
华中地区	乳酸杆菌属(*Lactobacillus*) 片球菌属(*Pediococcus*) 假单胞菌属(*Pseudomonas*) 明串珠菌属(*Leuconostoc*)	假丝酵母属(*Candida*) 哈萨克斯坦酵母属(*Kazachstania*) 毕赤酵母属(*Pichia*)	[16-18]
华北地区	假单胞菌属(*Pseudomonas*) 乳酸杆菌属(*Lactobacillus*) 乳球菌属(*Lactococcus*) 魏斯氏菌属(*Weissella*) 片球菌属(*Pediococcus*) 明串珠菌属(*Leuconostoc*)	东方伊萨酵母属(*Issatchenkia*) 齐藤土星形酵母属(*Saturnispora*) 酿酒酵母属(*Saccharomyces*) 接合酵母属(*Zygosaccharomyces*) 德巴利酵母属(*Dabaryomyces*) 毕赤酵母属(*Pichia*)	[19-22]
西南地区	乳球菌属(*Lactococcus*) 芽孢杆菌属(*Bacillus*) 乳酸杆菌属(*Lactobacillus*) 海洋芽孢杆菌属(*Oceanobacillus*)	桑帕约氏酵母属(*Sampaiozyma*) 枝孢菌属(*Cladosporium*) 附球菌属(*Epicoccum*) 哈萨克斯坦酵母属(*Kazachstania*) 毕赤酵母属(*Pichia*) 地霉属(*Geotrichum*) 假丝酵母属(*Candida*)	[23-27]

酸菜发酵过程中的优势细菌种群是一个由发酵阶段和工艺条件共同决定的动态演替结果。LIANG H等[13]探究盐浓度对酸菜发酵中微生物多样性的影响,结果表明,在发酵的初始阶段,克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)为优势属,在所有样品的发酵后期,乳酸杆菌属为优势属;在整个发酵过程中,乳球菌属的相对丰度逐渐降低。WANG J等[15]研究东北地区酸菜真菌群落对品质、安全性之间的关系,发现哈尔滨酸菜中所含的真菌群落最多,主要是德巴利酵母属、假丝酵母属和威克汉姆酵母属(*Wickerhamomyces*)。熊世进[18]分析老坛酸菜的微生物群落结构,结果显示,毕赤酵母和哈萨克斯坦酵母是老坛酸菜的优势真菌,池泡老坛酸菜中德巴利酵母的相对丰度显著高于坛泡老坛酸菜。贾晶晶等[19]对酸菜发酵过程中的细菌群落结构变化及驱动机制的研究,发现假单胞菌、乳酸杆菌属、肠杆菌属(*Enterbacter*)和乳球菌属为优势属;发酵初期主要为假单胞菌、肠杆菌和乳球菌,相对丰度分别为65.36%、10.33%和6.27%;发酵中期乳酸菌为优势菌群,相对丰度迅速上升(58.06%),假单胞菌相对丰度降低(21.21%);发酵后期乳酸杆菌为优势菌群。郭倩倩等[25]对晴隆酸菜进行微生物多样性动态分析,发现在发酵过程中占主导地位的真菌主要为桑帕约氏酵母属(*Sampaiozyma*)(24.80%)、枝孢菌属(*Cladosporium*)(11.23%)、附球菌属(*Epicoccum*)(6.62%)、癣囊腔菌属(*Plectosphaerella*)(27.74%)。全昌彬等[26]对贵州黔南地区的酸菜中酵母菌的分离筛选,发现筛选酵母菌主要为哈萨克斯坦酵母属(30.43%)、毕赤酵母属(26.96%)和地霉属(*Geotrichum*)(17.39%)。ZHAO N[27]根据腌制时间对酸菜微生物群落演替的研究,在整个发酵过程中均出现巴德利酵母属、哈萨克斯坦酵母属和毕赤酵母属,发酵一个月主要以巴德利酵母属和哈萨克斯坦酵母属为优势菌种;发酵七个月则毕赤酵母属为优势菌种。由此可见,酸菜自然发酵过程中,细菌种群主要依赖于附着在原料上的乳酸菌群,而其中植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)是最突出的,其次是肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)。而德巴利酵母属、毕赤酵母属和哈萨克斯坦酵母属等是酸菜发酵体系中的核心酵母菌群。

1.2 主要细菌和真菌

酸菜发酵是多种微生物共同作用的结果,在发酵过程中乳酸菌主导的异型乳酸发酵生成乳酸、乙醇、乙酸和CO_2等,酵母菌可以增加风味形成,提高成熟度[28]。酸菜中主要细菌和真菌种群见表2。由表2可知,不同产地酸菜发酵过程中主要细菌为植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*),主要真菌为酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)。

表2 不同产地酸菜发酵过程中主要细菌和真菌

Table 2 Main bacteria and fungi of Suancai from different regions during fermentation process

酸菜产地	细菌	真菌	参考文献
东北地区	植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*) 肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*) 融合魏斯氏菌(*Weissella confuse*) 戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*)	汉逊德巴利酵母(*Debaryomyces hansenii*) 瑟氏哈萨克斯坦酵母(*Kazachstania servazzii*) 盔形毕赤酵母(*Pichia manshurica*) 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)	[15,29]
华中地区	植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*) 泛萨乳杆菌(*Lactobacillus panisapium*) 肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)	瑟氏哈萨克斯坦酵母(*Kazachstania servazzii*) 盔形毕赤酵母(*Pichia manshurica*) 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)	[16,30]
华北地区	植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*) 乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*) 戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*) 肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)	酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*) 鲁氏接合酵母(*Zygosaccharomyces rouxii*) 瑟氏哈萨克斯坦酵母(*Kazachstania servazzii*)	[21-22]
西南地区	乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*) 植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*) 肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)	瑟氏哈萨克斯坦酵母(*Kazachstania servazzii*) 盔形毕赤酵母(*Pichia manshurica*) 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)	[27,31]

2 微生物发酵条件对酸菜品质的影响

优化微生物对酸菜的品质影响,不仅可以通过筛选特定的乳酸菌或酵母菌进行接种发酵,还能调整温度、盐浓度和接种量等发酵条件来改变微生物群落结构,从而改变代谢物质[32-33]。温度直接影响发酵速率与菌群结构,适宜温度利于乳酸菌优势生长,产生柔和酸味;温度过高则易滋生腐败菌,导致风味劣变[34]。发酵时间决定了风味的成熟度,时间过短则酸味不足、风味单一;时间过长则酸味过于尖锐,质地软烂[35]。盐浓度是关键调控手段,盐分过低不足以抑制杂菌,产品易软腐;盐分过高则会严重抑制乳酸菌,导致发酵缓慢、咸而不酸[36-37]。接种量通过人工接种菌剂,可以快速建立优势菌群,有效缩短发酵周期,抑制杂菌,提高产品风味和质地的稳定性与一致性。因此,精确协同控制温度、时间、盐浓度及接种量,是获得酸爽脆嫩、风味纯正优质酸菜的关键。

2.1 发酵温度

温度对于微生物的生长至关重要。酸菜发酵过程中温度不同,微生物群落结构不同,所产生的代谢产物也会不同。HE Z等[38]以东北酸菜为实验原料,分析不同温度对酸菜细菌多样性的影响。结果显示,在20 ℃时,pH值最低(3.3)、乳酸含量高(3.0～3.1 g/L),肠膜明串珠菌、戊糖片球菌、微小杆菌(*Exiguobacterium*)、嗜冷杆菌(*Psychrobacter*)和欧文氏菌(*Erwinia*)为优势菌种;酸菜苦味(2.80±0.18)、涩味(1.59±0.11)、鲜味(1.76±0.09)最低。20 ℃可以加速酸菜的成熟,提高酸菜的感官品质。何家乐[39]研究弯曲乳杆菌(*Latilactobacillus curvatus*)对温度应激处理的响应,结果表明,弯曲乳杆菌在20 ℃冷应激时生长的最快,且循环冻融后菌株的复活能力高于其他组。由此可见,适宜温度(20 ℃)不仅促进乳酸菌成为优势菌群,加速产酸并改善感官特性,还增强乳酸菌的耐低温性能。

2.2 发酵时间

酸菜传统发酵需要适宜时间,风味才能达到最佳。目前,酸菜行业可通过添加乳酸菌或酵母菌缩短发酵周期,加快生产效率。钟秋等[40]研究复合乳酸菌剂发酵四川泡菜过程中细菌群落变化及风味特征分析,结果显示,植物乳植杆菌-1、植物乳植杆菌-2和屎肠球菌(*Enterococcus faecium*)复合乳酸菌剂在泡菜发酵第7天时,盐卤pH值已降至(3.60±0.30),显著低于自然发酵组pH值(4.30±0.40)($P<0.05$),且总酸含量(4.56±0.08) g/L和乳酸含量(4.27±0.33) g/L最高。刘庆静等[41]利用红茶菌发酵酸菜,结果表明,发酵时间为7 d时,总酸为1.79 g/100g、亚硝酸盐为0.96 mg/kg、酸菜感官评价最好。由此可知,发酵时间需平衡,过短易导致微生物之间代谢缓慢,风味特征差;过长则可能引起质地劣变。

2.3 盐浓度

酸菜发酵过程需要加入一定量的盐,可促进有益微生物的生长、防腐、增香[42]等作用。YANG X等[43]研究利用肠膜明串珠菌ORC 2和植物乳植杆菌HBUAS 51041在不同盐浓度下发酵对东北酸菜的影响,结果发现,在0.5%盐含量发酵的酸菜中,酯、醛、酮的相对含量最高,酸菜具有更高丰度的乳酸杆菌和积累更多的风味化合物(酯、醛、酮、腈和硫化物)。HE J等[44]研究酸菜在发酵过程中盐浓度对弯曲乳杆菌LC-20和酸菜的影响,发现盐含量为1% 时有利于菌株LC-20的生长和酸菜pH值的降低,且总可滴定酸和乳酸浓度较高,整体感官评定最好。盐浓度能显著调控菌群结构,低盐有助于风味物质积累,而较高的盐浓度则抑制杂菌但可能延缓发酵时间。

2.4 接种量

接种量是影响发酵过程的重要因素之一。接种量过小导致发酵周期延长,生产效率低;接种量过大导致菌种生长快,影响代谢产物品质[45]。李朔[46]对高产γ-氨基丁酸(γ-aminobutyric acid,GABA)乳酸菌的筛选及其在酸菜中的应用研究发现,从发酵食品筛选出植物乳杆菌 LAG-1003接种到酸菜发酵中,当接种量为3%时,GABA含量最高[(36.24±0.31) mg/L];酸菜的感官得分最高[(16.85±0.41)分]。苏敬红等[47]研究混菌发酵对无盐酸菜品质的影响,结果表明,当乳酸菌接种量为450 μL时,发酵pH值最低(3.24±0.01),发酵5 d后总酸含量最高[(0.61±0.01) g/100 g]、亚硝酸盐含量最低[(0.65±0.21) mg/kg],发酵液颜色、组织形态和滋味等方面感官评价最优。综上,接种量(3%～8%为宜)直接影响发酵速率和代谢产物,合理接种能有效提升酸菜中功能成分含量、降低亚硝酸盐和优化产品风味与质地。

3 微生物对酸菜风味物质形成及安全性的影响

3.1 风味物质

风味是衡量酸菜品质的关键因素,由原料、环境、微生物等多个因素决定。因此,酸菜具有丰富和复杂的风味物质。酸菜自然发酵挥发性风味物质主要含有醇类、酯类、酸类、异硫氰酸酯类、醛类和酮类等[48]。且不同地区不同种类酸菜的风味物质也不同,如酯类和醇类是东北酸菜最主要的风味物质,使其更具有酸香[49];异硫氰酸酯是卷心菜中代表性风味物质,具有芳香味和辛辣味,对人体健康有益[50];酸类物质对酸菜品质影响有好有坏,如适量的乙酸、辛酸和癸酸等有助于酸菜酸味的形成[51];而丁酸具有黄油味,令人不愉快。醛类使发酵蔬菜类呈现出果香、芳香味,如苯甲醛具有苦杏仁味[52]。酸菜中非挥发性物质主要是有机酸、氨基酸、糖类等。糖类提供甜味,有机酸和氨基酸主要提供酸涩味,丰富了酸菜滋味。酸菜发酵过程中主要风味物质的形成机理见图1,酸菜发酵过程中产生的主要风味物质见表3[53-56]。

微生物对于酸菜风味的形成具有关键作用。乳酸菌是塑造酸菜特征风味的核心,通过分解原料碳水化合物产乳酸、乙酸和柠檬酸等有机酸,同时代谢生成酯类、醛类及氨基酸衍生物构建特征风味[57]。田佳雪[58]从自然发酵酸菜中筛选出三株乳酸菌构建成复合发酵剂,发现接种复合发酵剂的酸菜明显比自然发酵更快成熟,风味物质种类更丰富,主要以酯类、醇类、酸类和腈类为主;添加发酵剂的酸菜对关键风味物质的总量至少提高了12.65%。CAO X等[59]研究乳酸菌强化发酵对酸菜品质的影响,结果发现酸菜pH值明显降低;有机酸如乳酸、苹果酸和琥珀酸明显增加;醇类的含量升高,如3-己烯-1-醇、1-己醇、苯乙醇、1-辛醇等。NIE Y等[60]利用混合乳酸菌发酵剂与不同蔬菜共发酵泡菜,发现利用植物乳植杆菌、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)和鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)制成发酵剂,所制成的酸菜挥发性风味物质为49种、醇类含量为10 545.90 μg/kg、烯烃类为63 464.17 μg/kg、醛类为2 616.25 μg/kg;而添加金针菇和蔬菜所制成的酸菜挥发性风味物质为23种、醇类含量

为34.95 μg/kg、烯烃类和醛类未检出。LIANG J等[61]研究植物乳杆菌和胶红酵母(*Rhodotorula mucilaginosa*)在共发酵过程中的相互作用及其对发酵蔬菜风味的协同增强机制,结果表明,共发酵酸菜乳酸含量为1.7 g/L、乙偶姻含量为129.29 μg/L、二甲基三硫醚含量为0.53 μg/L;单一植物乳杆菌发酵酸菜乳酸含量为1.2 g/L、乙偶姻含量为82.76 μg/L、二甲基三硫醚含量为37.79 μg/L,共发酵酸菜中异戊醇含量相对于单一发酵提升了76.23%。综上所述,利用多种乳酸菌复配作发酵剂的研究较多,能够改善酸菜的风味、营养物质和缩短发酵周期等。而乳酸菌和酵母菌联合使用较少,这可能是因为乳酸菌与酵母之间存在着拮抗、竞争关系[62],对乳酸菌的生长代谢产生不良影响。所以,应进一步研究酸菜中的真菌与细菌之间相互关系,为生产出种类更多、风味独特的酸菜提供理论依据,为酸菜多元化发展提供方向。

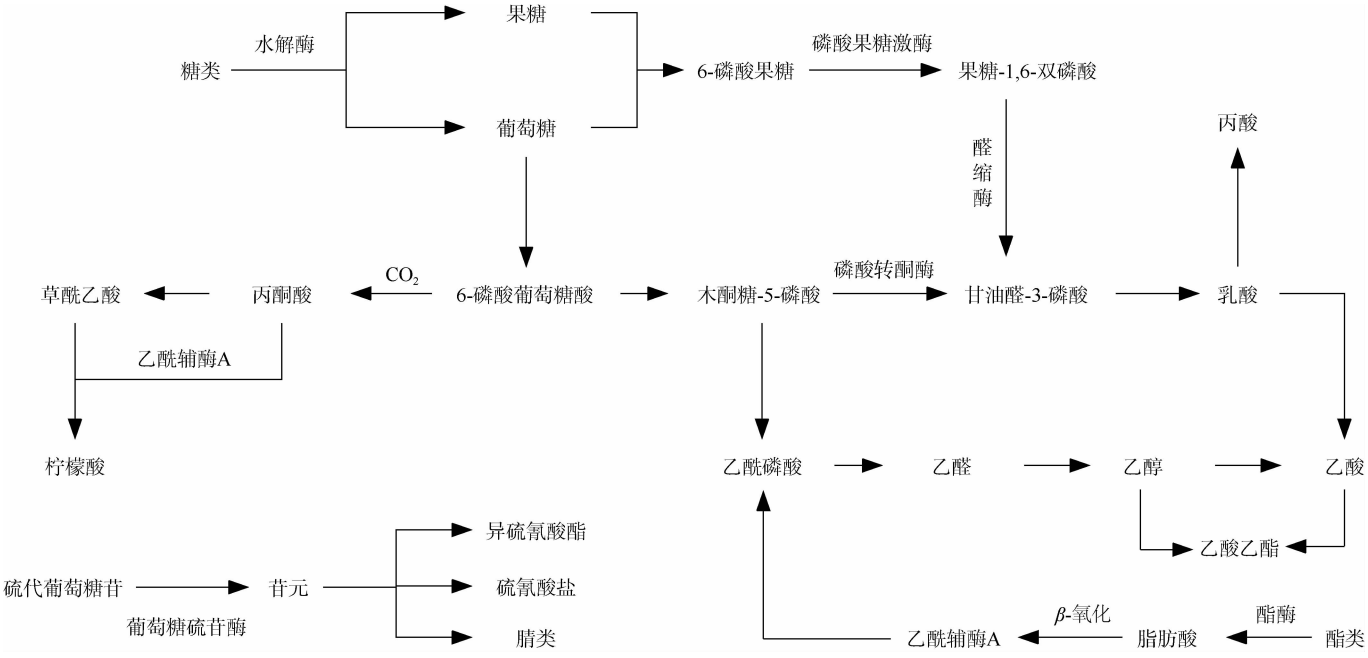


图1　酸菜发酵过程中主要风味物质的形成机理

Fig. 1 Formation mechanism of main flavor substances of Suancai during fermentation process

表3　酸菜发酵过程中主要风味物质

Table 3 Main flavor substances of Suancai during fermentation process

类别	化合物
有机酸类	乳酸、乙酸、琥珀酸、酒石酸、苹果酸、草酸、甲酸、柠檬酸、富马酸、丁二酸
氨基酸类	*L*-精氨酸、*L*-脯氨酸、*L*-甲硫氨酸、焦谷氨酸、反-4-*L*-羟基谷氨酸、*L*-半胱氨酸、*L*-丝氨酸、*L*-天冬酰胺、*β*-丙氨酸、*L*-天冬氨酸、*L*-谷氨酰胺、*L*-谷氨酸
酯类	乙酸乙酯、乙酸丙酯、丁酸乙酯、乳酸乙酯、亚硝酸叔丁酯、邻苯二甲酸丁酯、丙酸乙酯、乙酸丁酯、反油酸乙酯、十六酸乙酯、十二烷基甲酸酯、甲酸庚酯、甲酸乙酯
异硫氰酸酯类	1-异硫代氰酸丁酯、异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸甲酯、2-甲基丁基硫代异氰酸酯、异硫氰酸 3-丁烯酯、异硫氰酸仲丁酯
酸类	丙酸、己酸、辛酸、丁酸、硬脂酸、正壬酸、棕榈酸、脱氢乙酸、油酸、肉豆蔻酸、癸酸
醇类	乙醇、异戊醇、叶醇、1-壬醇、苯乙醇、己二酸二醇、苯甲醇
醛类	壬醛、正庚醛、反-2-庚烯醛、癸醛、反-2-辛烯醛、3 -羟基丁醛、*β*-环柠檬醛、苯甲醛
烷烃类	戊基环丙烷、1,1-二乙酰氧基十二烷、十六烷、(3-甲基丁基)环戊烷
酮类	六氢吡咯并[1,2-*α*]吡嗪-1,4-二酮、(*EZ*)-*β*-紫罗兰酮、3-羟基-2-丁酮、3-羟基-2-丁酮、2-辛酮、4,6,8-三甲基-1-壬酮
腈类	苯代丙腈、巴豆腈、4-(甲硫基)丁腈
胺类	4-氯-2,5-二甲氧基苯胺、1*H*-吡咯-2-甲酰胺

3.2 安全性

在传统发酵蔬菜的复杂微生态体系中,微生物群落既是风味与品质的塑造者,也是导致产品安全风险与腐败变质的根源。传统酸菜主要依靠原材料所含有的微生物种群,一方面乳酸菌、酵母菌等益生菌的代谢活动能抑制致病菌和腐败菌的生长,如乳酸菌在发酵初期产生更多的酸,抑

制致病菌的生长[63];另一方面可能因工艺控制、管理不当等会导致原料中的腐败微生物生长繁殖,从而产生安全隐患[64]。酸菜中的有害物质主要是亚硝酸盐和生物胺。生物胺可分为色胺、苯乙胺、腐胺、尸胺、组胺、酪胺、亚精胺、亚精胺,其中组胺是中毒性最强的类型。新鲜卷心菜从土壤中吸收大量氮,转化为硝酸盐并附着在卷心菜上。在发酵过程中,环境中的微生物和卷心菜会产生硝酸盐还原酶,将硝酸盐还原为亚硝酸盐。亚硝酸盐含量逐渐增加,直到出现“亚硝酸盐峰值”,之后含量可能会降低,这主要是由于细菌或真菌产生的酸和酶[65]。腐败菌不仅能够形成破坏性的生物膜[66],还通过代谢产生生物胺、促进亚硝酸盐积累,并与后者在酸性条件下反应生成强致癌物亚硝胺[67],易引发消化道癌症,对消费者健康构成潜在威胁[68]。

3.2.1 微生物对生物胺的影响

生物胺是一类由微生物利用氨基酸脱羧或醛形成的含氮化合物,摄入过量的生物胺,会对人体产生毒性作用,如恶心、潮红、心悸、头痛、红疹和高血压等[69]。发酵蔬菜主要产生的生物胺是腐胺、尸胺、组胺和酪胺[70]。JASTRZEBSKA A等[71]对发酵蔬菜汁生物胺进行测定发现,发酵芹菜汁生物胺总含量为11.00 mg/L,其中腐胺含量为4.89 mg/L;组胺含量为1.76 mg/L。而发酵芹菜根汁生物胺总含量为38.00 mg/L,其中腐胺含量为6.07 mg/L;尸胺含量为8.41 mg/L;组胺含量为12.31 mg/L。WU J等[72]研究泡菜盐水和甘氨酸添加量对泡菜发酵中生物胺生成的影响,结果表明,使用生物胺含量高的泡菜卤水进行发酵,会导致最终产品中积累更多的生物胺,腐胺主要由乳酸菌、片球菌和毕赤酵母生成,而组胺和酪胺则主要由乳酸菌和四联球菌生成。目前,对生物胺含量的限制尚无统一标准。美国食品和药物管理局和欧盟规定,食品中组胺的含量应分别低于 50 mg/kg 和 100 mg/kg[73]。由此可知,通过接种优选乳酸菌和酵母进行发酵,能显著降低酸菜中有害生物胺的含量,有效提升其食用安全性。

3.2.2 微生物对亚硝酸盐的影响

亚硝酸盐是蔬菜原料通过土壤、肥料或氮循环等生成硝酸盐,在还原菌的作用下脱氮形成的化合物。少量的亚硝酸盐有利于抑制食品氧化酸败、增加色泽和抑制致病菌的生长等[74]。根据国标GB 2714—2015《食品安全国家标准酱腌菜》规定亚硝酸盐含量(以$NaNO_2$计)≤20 mg/kg。刘凯等[75]探究乳酸菌发酵粉对泡菜中亚硝酸盐含量的影响,发酵粉添加量为0.1%时,其亚硝酸盐含量最低。HUANG Y Y等[76]利用植物乳杆菌、短乳杆菌和肠膜明串珠菌来研究对传统泡菜亚硝酸盐、挥发性物质和感官评定的影响,结果发现,3株菌制备成复合发酵剂能明显降低泡菜中的亚硝酸盐含量,其中纯种培养的短乳杆菌在发酵1 d时,亚硝酸盐含量达到0.132 mg/mL,且随着有机酸含量增加,亚硝酸盐逐渐被降解。ZHANG W等[77]利用顶空固相微萃取气相色谱-质谱(headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrography,HS-SPME-GC-MS)和液质联用(liquid chromatography-mass spectrometry,LC-MS)技术分析接种肠膜明串珠菌和副干酪乳杆菌对东北酸菜品质的影响,结果显示,在发酵第3天亚硝酸盐含量达到峰值(3.875 mg/kg),随着发酵时间的延长,亚硝酸盐含量迅速下降并趋于稳定,发酵结束时其含量为1.50 mg/kg,均符合国家标准。乳酸菌通过自身代谢活动,特别是产酸,成为控制发酵蔬菜中亚硝酸盐含量、提升产品安全性的有效手段。

3.2.3 微生物对酸菜腐败菌的抑制作用

酸菜产品易发生腐败变质主要是由酸菜中存在的微生物菌群所导致。酸菜中常见的腐败菌有毕赤酵母、白地霉(*Geotrichum candidum*)和芽孢杆菌等,特别是毕赤酵母属是产生膜醭的主要真菌[15],破坏酸菜的颜色和脆度,促进亚硝酸盐、生物胺和盐水表面生物膜的形成,并产生不良风味[78]。由于酸菜是利用盐渍蔬菜的汁液自然发酵而成的一种传统食品,在制作过程中蔬菜原料未经灭菌处理,原料中存在的多种微生物使酸菜发酵过程不可控,导致发酵时间延长和产品质量不稳定,甚至发生腐败变质,进而成为工业发酵的瓶颈。陀小莉等[79]对酸菜中腐败酵母菌研究,从变质酸菜筛选出库德里阿兹威毕赤酵母(*Pichia kudriavzevii*),其能在高酸、高盐和营养物质少的情况下利用乳酸生成腐败生物膜,不仅具有产纤维素酶、不良风味物质和生物胺的能力,还能促进其他腐败菌生长。同时,陀小莉等[80]进行不同乳酸菌抑制库德里阿兹威毕赤酵母的研究,结果表明,乳酸菌qj抑制阿兹威毕赤酵母pks效果最好、pH最低(3.34)、有机酸含量最高(62.10 mg/mL)、腐败菌活菌数最少(5.00×10^6 CFU/mL)、腐败菌生物膜形成量最少(0.021 g)、生物胺种类和含量也较少。由此可知,酸菜中的腐败菌会产生生物膜、生物胺等有害物质,严重威胁消费者健康,导致产品变质,造成重大经济损失。

4 总结

微生物对酸菜品质的形成是一个复杂过程。不同的原材料、工艺和气候等都会使酸菜发酵过程中的微生物群落结构发生改变,从而代谢产物也会发生改变。改变其发酵条件,能够使酸菜品质按照预期的方向发展。通过对这些微生物的深入研究和有效控制,可以显著提高酸菜的风味和安全性。因此,研究微生物群落对酸菜中风味形成及安全性的作用对于酸菜品质的改善和工业化生产具有重要意义。

参考文献:

[1] 罗鑫鑫. 湘西苗族地区酸食文化研究:以凤凰县山江镇为例[D]. 吉首:吉首大学,2025.

[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):257-260,265.
[3] 李佳芯,练银银,宋佳佳,等. 酵母菌与乳酸菌协同发酵对酸菜品质和风味的影响[J/OL]. 食品与发酵工业,1-11[2026-01-27]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043328.
[4] 马一轩,李汴生,阮征,等. 不同盐度下潮汕地区芥菜酸菜的品质及微生物种群比较[J/OL]. 现代食品科技,1-13[2026-01-27]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0132.
[5] 燕平梅,魏爱丽. 蔬菜半固态发酵的探究[J]. 中国调味品,2020,45(11):34-37,50.
[6] CISKA E, HONKE J, DRABIŃSKA N. Changes in glucosinolates and their breakdown products during the fermentation of cabbage and prolonged storage of sauerkraut: Focus on sauerkraut juice[J]. **Food Chem**, 2021, 365: 130498.
[7] 袁求松. 盐含量对梅干菜发酵风味及机制影响研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2025.
[8] 吕伟民,李娜,刘文丽,等. 传统酸菜发酵乳酸菌多样性及其功能特性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2024,15(15):39-46.
[9] 刘鑫,王家旺,隋雨萌,等. 中国传统发酵蔬菜中微生物多样性及其对品质形成影响研究进展[J]. 食品科学,2024,45(10):290-297.
[10] 陈雪玲,刘琨毅,王琪,等. 宜宾芽菜发酵过程中微生物群落与风味物质的变化及其相关性分析[J]. 食品工业科技,2025,46(13):36-45.
[11] GUAN Q, ZHENG W, HUANG T, et al. Comparison of microbial communities and physiochemical characteristics of two traditionally fermented vegetables[J]. **Food Res Int**, 2020, 128: 108755.
[12] 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.
[13] LIANG H, HE Z, WANG X, et al. Effects of salt concentration on microbial diversity and volatile compounds during suancai fermentation[J]. **Food Microbiol**, 2020, 91: 103537.
[14] 张庆芳,陈文丽,吴家明,等. 基于内生菌分析东北酸菜发酵菌群溯源[J]. 食品科学,2024,45(22):51-64.
[15] WANG J, SUI Y, LIU X, et al. Exploring potential correlations between fungal communities, safety, and quality properties of traditional fermented sauerkraut from Northeast China[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2023, 185: 115185.
[16] 续钊,卢前明. 自然发酵的酸菜中微生物多样性研究[J]. 中国调味品,2022,47(9):59-62.
[17] 折米娜,望诗琪,赵慧君,等. 酸菜水中细菌多样性研究[J]. 中国调味品,2019,44(1):26-31.
[18] 熊世进. 老坛酸菜功能微生物代谢调控机制及其直投式发酵关键技术研究[D]. 南昌:南昌大学,2024.
[19] 贾晶晶,赵虎威,燕平梅. 酸菜发酵过程中细菌群落结构变化及驱动机制[J]. 中国食品学报,2023,23(8):354-368.
[20] 刘长根. 我国传统发酵蔬菜微生物多样性比较[D]. 南昌:南昌大学,2021.
[21] 许建洋. 内蒙古地区酸菜汤中亚硝酸盐、有机酸、挥发性风味物质及细菌多样性特征[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
[22] 赵虎威,燕平梅. PCR-DGGE法分析酸菜中酵母菌微生物的多样性[J]. 中国调味品,2020,45(11):51-54.
[23] 郭倩倩,卢彪. 基于高通量测序不同生产工艺晴隆酸菜细菌多样性分析[J]. 中国酿造,2019,38(8):73-76.
[24] 刘慧,王秋萍. 富源酸菜细菌多样性研究及乳酸菌的分离鉴定[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十九届年会论文摘要集.云南农业大学食品科学技术学院,2022.
[25] 郭倩倩,卢彪. 晴隆酸菜发酵过程中微生物菌群多样性动态分析[J]. 中国酿造,2020,39(8):86-91.
[26] 全昌彬,姚玉仙. 贵州黔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.
[27] ZHAO N. Unraveling the contribution of pre-salting duration to microbial succession and changes of volatile and non-volatile organic compounds in Suancai (a Chinese traditional fermented vegetable) during fermentation[J]. **Food Res Int**, 2022, 159: 111673.
[28] 全昌彬,刘丽萍,龙应霞,等. 贵州黔南地区泡制酸菜中酵母菌的分离鉴定及特性研究[J]. 粮食与油脂,2024,37(9):103-108.
[29] 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.
[30] 程爽,臧晋,王崎锞,等. 河南淅川酸菜中乳酸菌的分离鉴定及其益生特性初探[J]. 中国调味品,2022,47(2):60-63,68.
[31] 袁海彬,董平,唐万婷,等. 彝族传统芫根酸菜发酵过程中挥发性风味物质及微生物群落变化特征[J]. 中国调味品,2025,50(9):72-81.
[32] 张运丰,武俊瑞,穆德伦,等. 植物乳植杆菌ww和Fs 5-5混合发酵对酸菜品质的影响研究[J]. 中国酿造,2026,45(1):216-222.
[33] 陈曼曼. 耐乙醇乳酸菌菌种筛选及其在酸菜发酵中的应用[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2024.
[34] 曾雪晴,葛黎红,贾欣阳,等. 变温发酵对萝卜泡菜品质及微生物变化研究[J]. 中国酿造,2025,44(9):58-64.
[35] 黄正午. 自然发酵泡椒中微生物群落演替规律与特征风味物质的相关性研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2024.
[36] 秦双霞. 多菌共生发酵乳酸菌群的构建及其对轻盐发酵剁椒品质的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2024.
[37] 赖海梅,王雅利,杨梦露,等. 盐渍池深度对酸菜盐渍过程中理化特性及风味的影响[J]. 中国酿造,2026,45(1):79-86.
[38] HE Z, CHEN H, WANG X, et al. Effects of different temperatures on bacterial diversity and volatile flavor compounds during the fermentation of suancai, a traditional fermented vegetable food from northeastern China[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2020, 118: 108773.
[39] 何家乐. 糖和接种剂对酸菜发酵的影响及接种剂对温度变化的响应初探[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2021.
[40] 钟秋,李生帅,蒲树燕,等. 复合乳酸菌剂发酵四川泡菜过程中细菌群落变化及风味特征分析[J]. 西华大学学报(自然科学版),2025,44(4):19-31.
[41] 刘庆静,赵平,郭莹莹,等. 红茶菌酸菜发酵条件的优化[J]. 现代食品科技,2022,38(5):56-63.
[42] 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.
[43] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Microbial dynamics and volatilome profiles during the fermentation of Chinese northeast sauerkraut by *Leuconostoc mesenteroides* ORC 2 and *Lactobacillus plantarum* HBUAS 51041 under different salt concentrations[J]. **Food Res Int**, 2020, 130: 108926.
[44] 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 suancai production[J]. **J Biosci Bioeng**, 2021, 132(1): 33-40.

[45] TIAN H, XIONG J, YU H, et al. Flavor optimization in dairy fermentation: From strain screening and metabolic diversity to aroma regulation[J]. **Trends Food Sci Tech**, 2023, 141: 104194.
[46] 李朔. 高产γ-氨基丁酸乳酸菌的筛选及其在酸菜中的应用研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
[47] 苏敬红,武彬. 混菌发酵对无盐酸菜品质特性的影响[J]. 食品与机械,2023,39(2):188-197.
[48] 赖海梅,颜朗,王雅利,等. 圆根酸菜风味成分分析[J]. 食品安全质量检测学报,2024,15(9):205-212.
[49] 黄玉立,赵楠,黄庆,等. 发酵蔬菜风味物质形成机制及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业,2021,47(24):279-285.
[50] 彭鹤松,魏凡舒,杨春娟. 莱菔硫烷:一种潜力巨大的天然药物[J]. 中国新药杂志,2023,32(4):428-434.
[51] 张玉. 咸梅干菜呈味呈香物质基础研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2025.
[52] 郝诗琴. 乳酸菌对发酵香肠凝胶特性及风味的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
[53] 赖慧婷,刘伟,罗艺璇,等. 芥菜发酵用产香乳酸菌的筛选、鉴定及特性研究[J]. 食品工业科技,2026,47(5):186-197.
[54] ZHAO S, HAO C, HUANG L, et al. Unraveling the mystery of microecology behind the fermented Chinese sauerkraut (Jiangshui): flavor profile, community structure, and functional taxa[J]. **Food Chem: X**, 2025, 30: 102976.
[55] WANG J, LIU X, LIU J, et al. Improving the bacterial community, flavor, and safety properties of northeastern sauerkraut by inoculating autochthonous *Levilactobacillus brevis*[J]. **Food Chem: X**, 2024, 22: 101408.
[56] 李潇,吴兴壮,韩艳秋,等. 人工接种东北酸菜发酵过程中氨基酸类物质的代谢变化[J]. 现代食品科技,2023,39(8):40-47.
[57] 赖慧婷,刘伟,罗艺璇,等. 发酵芥菜中微生物多样性及风味研究进展[J]. 食品工业,2025,46(3):247-252.
[58] 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.
[59] CAO X, ZHAO M, ZOU S, et al. Effect of autochthonous lactic acid bacteria-enhanced fermentation on the quality of suancai[J]. **Foods**, 2022, 11(21): 3310.
[60] NIE Y, ZHANG J, ZHAO Z, et al. Screening of mixed lactic acid bacteria starter and exploring the sources of flavor substances in co-fermentation of *Flammulina velutipes* with different vegetables[J]. **Food Biosci**, 2025, 64: 105988.
[61] LIANG J, WANG Y, WANG T, et al. Enhancing fermented vegetable flavor with *Lactobacillus plantarum* and *Rhodotorula mucilaginosa*[J]. **Food Res Int**, 2025, 200: 115500.
[62] 高丽. 传统发酵食品中乳酸菌和酵母菌互作机制分析[J]. 食品安全导刊,2023(21):172-174,178.
[63] 唐丽. 传统发酵食品安全风险控制管理研究[D]. 石家庄:河北经贸大学,2022.
[64] 明双喜,张秀真,吴裕健,等. 发酵蔬菜生产加工中的食品安全风险因素分析[J]. 食品工业,2022,43(8):334-337.
[65] 朱志妍,吴昕怡,李启明,等. 复配精油对芥菜泡菜发酵过程中色泽质构及风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2025,16(21):158-167.
[66] 蔡济巽,尹鹏程,靳延斌,等. 植物提取物作为群体感应抑制剂对食品腐败研究现状[J]. 现代食品科技,2025,41(5):399-408.
[67] 方彤雅娜,付世骞,吴丽清,等. 水产品腐败机制及栅栏保鲜技术的应用进展[J/OL]. 保鲜与加工,1-25[2026-03-16]. https://link.cnki.net/urlid/12.1330.S.20251031.1327.002.
[68] 王晓礼,孙永,刘楠,等. 加工水产品中*N*-亚硝胺的形成和控制技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2022,13(21):6799-6807.
[69] LICANDRO H, HO P H, NGUYEN T K C, et al. How fermentation by lactic acid bacteria can address safety issues in legumes food products?[J]. **Food Control**, 2020, 110: 106957.
[70] 袁欣然,唐佳灵,曹永连,等. 益生菌对生物胺的控制机制及在发酵食品中应用的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业,1-11[2025-11-02]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043975.
[71] JASTRZĘBSKA A, KMIECIAK A, BRZUZY K, et al. Determination of selected biogenic amines in fermented vegetables juices[J]. **Food Control**, 2023, 154: 109980.
[72] WU J, WU Z, ZHANG W. Effects of pickle brine and glycine addition on biogenic amine production in pickle fermentation[J]. **Food Res Int**, 2024, 188: 114501.
[73] 刘馨. 水产品中组胺可视化检测方法的建立及应用研究[D]. 厦门:集美大学,2024.
[74] 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.
[75] 刘凯,肖付才. 泡菜发酵工艺优化研究[J]. 焦作师范高等专科学校学报,2021,37(2):72-76.
[76] HUANG Y Y, JIA X Z, YU J J, et al. Effect of different lactic acid bacteria on nitrite degradation, volatile profiles, and sensory quality in Chinese traditional paocai[J]. **LWT–Food Sci Technol**, 2021, 147: 111597.
[77] ZHANG W, YU X, XIN L, et al. Effect of rapid fermentation on the quality of northeastern sauerkraut analyzed based on HSSPME-GC-MS and LC-MS[J]. **LWT–Food Sci Technol**, 2024, 198: 116005.
[78] 李生帅,钟秋,姚瑶,等. 蔬菜乳酸发酵及其活性成分研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版),2024,43(4):24-36.
[79] 陀小莉,茜琳,赵凯,等. 酸菜中腐败酵母菌分离、鉴定及其特性的研究[J]. 中国调味品,2025,50(9):93-101,147.
[80] 陀小莉,马晔,代志鹏,等. 不同乳酸菌抑制酸菜腐败菌:库德里阿兹威毕赤酵母的研究[J]. 中国调味品,2025,50(3):90-97.