

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240905001

微生物发酵对酸笋风味品质的影响研究进展

林丽华^{1,2*}, 陈璟^{1,2}

- 柳州职业技术大学环境与食品工程学院, 柳州 545006;
- 柳州市农产品快速检测工程技术中心, 柳州 545006)

摘要: 微生物发酵在食品加工领域中扮演着重要角色, 尤其在传统发酵食品酸笋的制作中起到关键作用。竹笋经过微生物发酵后可改善其口感, 提升风味品质, 实现竹笋高值化利用。酸笋产品深受消费者喜爱, 具有广阔的市场前景。本文总结国内外微生物发酵对酸笋风味品质的提升作用, 包括增加酸、酚、酯、醇和醛等多种风味物质, 提升了草酸、乳酸和乙酸等多种有机酸的比例, 同时氨基酸也能得到较完整保留。为了更好地拓展微生物发酵在竹笋食品中的应用, 本文综述了微生物发酵对酸笋风味品质的影响及发酵工艺, 探讨了微生物发酵竹笋存在的不足和问题, 揭示了科学应用微生物发酵提升酸笋风味的广阔前景, 旨在为酸笋发酵相关研究者及行业未来市场拓展提供参考借鉴。

关键词: 酸笋; 微生物发酵; 风味品质; 发酵工艺

Research progress on effects of microbial fermentation on flavor quality of sour bamboo shoots and its application in bamboo shoot

LIN Li-Hua^{1,2*}, CHEN Jing^{1,2}

- College of Environmental and Food Engineering, Liuzhou Polytechnic University, Liuzhou 545006, China;
- Liuzhou Agricultural Products Rapid Testing Engineering Technology Center, Liuzhou 545006, China)

ABSTRACT: Microbial fermentation plays a crucial role in food processing, especially in the production of traditional fermented foods like sour bamboo shoots. Through microbial fermentation, bamboo shoots can improve in texture and enhance flavor quality, thus achieving high-value utilization of bamboo shoots. Sour bamboo shoots are well-loved by consumers and have a broad market prospect. This article summarized the role of microbial fermentation in enhancing the flavor and quality of sour bamboo shoots, both domestically and internationally. It included the increase of various flavor compounds such as acids, phenols, esters, alcohols, and aldehydes, and the improvement of the ratios of various organic acids like oxalic acid, lactic acid, and acetic acid. Additionally, the amino acid could be better preserved. To further expand the application of microbial fermentation in bamboo shoot foods, this article briefly described the impact of microbial fermentation on the flavor and quality of sour bamboo shoots and the fermentation process. It also discussed the shortcomings and issues associated with microbial

基金项目: 大学生创新与创造项目(柳职院教字〔2024〕20号)、“课堂革命”立项建设项目(柳职院教字[2023]3号)、广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(桂教科研〔2024〕1号)

Fund: Supported by the University Student Innovation and Creation Project (Liu Vocational College Education [2024] No.20), the “Classroom Revolution” Project (Liu Vocational College Education [2023] No.3), and the Guangxi Higher Education Young and Middle-aged Teachers’ Scientific Research Basic Capacity Enhancement Project (Guangxi Education and Scientific Research [2024] No.1)

*通信作者: 林丽华, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 708999620@qq.com

*Corresponding author: LIN Li-Hua, Master, Lecturer, Liuzhou Polytechnic University, No.28, Shewan Road, Yufeng District, Liuzhou 545006, China. E-mail: 708999620@qq.com

fermentation of bamboo shoots, revealing the vast potential of scientifically applying microbial fermentation to enhance the flavor of sour bamboo shoots. The aim is to provide reference and guidance for researchers and industry professionals in the field of sour bamboo shoots fermentation and future market expansion.

KEY WORDS: sour bamboo shoot; microbial fermentation; flavor quality; fermentation technology

0 引言

竹笋是竹子的幼嫩芽体,是一种营养丰富且口感独特的食材。它不仅在亚洲饮食文化中占有重要地位,而且在全球范围内也逐渐受到欢迎。竹笋富含纤维、维生素和矿物质,是一种健康的绿色食品^[1]。酸笋是竹笋通过微生物发酵工艺制作而成的传统食品,具有独特的酸味和香气。在酸笋发酵过程中,微生物可通过自身代谢产生多种风味物质,使得酸笋在口感上有显著提升^[2]。风味独特并鲜香脆爽的酸笋深受消费者喜爱,其风味组成、营养成分及发酵工艺等已成为当今研究热点。

酸笋含有多种风味物质,其主要来源于发酵过程中产生的各种挥发性化合物。其中,酯类、醇类和醛类等是酸笋发酵过程中产生的主要挥发性化合物,赋予酸笋独特香气。乳酸和醋酸等有机酸的生成是酸笋酸味的主要来源,赋予酸笋独特酸味,还具有防腐良效。此外,发酵过程中蛋白质分解产生的游离氨基酸和小分子肽也增添酸笋的风味^[3]。随着生活质量的提升,人们对酸笋的品质更加重视,酸笋在国内的产品种类(特点)有鲜酸笋(直接发酵新鲜的竹笋,保留了竹笋的原始口感和脆度,味道酸爽,有竹笋的清香)、干酸笋(将酸笋晒干后保存,发酵味道更加浓郁,质地较为坚硬,需浸泡后食用)、袋装即食酸笋(真空包装后直接发酵或腌制,方便食用,风味保持较好)、特色风味酸笋(结合地方特色调味料,如辣椒、花椒等,酸笋在发酵过程中加入独特的风味元素,增强口感和层次感),而酸笋的腌制发酵工艺影响最大,常规发酵工艺流程为:选择适宜的竹笋,经清洗、切片、加纯水或食盐水或接种微生物、装罐和发酵等几个工艺便可得到酸笋^[4]。发酵时长依据气候、温度和所需的酸度而定,微生物发酵可缩短发酵周期、更易控制发酵条件以及抑制有害微生物肠杆菌的生长^[5]。近年来,随着科学技术的发展,酸笋的发酵工艺和发酵菌种选择也在不断优化,提高菌种的发酵效率来增强酸笋品

质,是当下趋势^[6]。

参与酸笋发酵的微生物多种多样,乳酸菌作为发酵菌种时,通过代谢糖类产生乳酸,使竹笋呈现酸味,同时抑制有害微生物的生长^[7]。酵母菌在发酵初期起到重要作用,分解竹笋中的糖类,产生乙醇和二氧化碳,赋予酸笋独特的风味^[8]。醋酸菌在发酵后期,乙醇被氧化为醋酸,与乳酸共同增加酸笋的酸味层次,其他微生物如霉菌等也可能参与发酵,分解复杂的有机物,生成多种风味物质^[9]。微生物发酵完成后,酸笋连同发酵液一起储存在低温环境下可延长保质期,经济又安全,可赋予酸笋良好的质地和风味,发酵过程中生成的具有生物活性的代谢产物提升了酸笋的附加值。本文拟介绍微生物发酵对酸笋中风味品质的影响,总结酸笋发酵工艺的优缺点,分析存在问题,以期为其提升其生产工艺和产品质量提供部分借鉴。

1 参与发酵的主要微生物

酸笋中的细菌微生物以乳酸菌为主,包括植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)、乳酸片球菌(*Pediococcus acidilactici*)、柠檬明串珠菌(*Leuconostoc citreum*)等乳酸菌等(见表 1),通过微生物发酵及酶催化等一系列化学反应,酸笋产生了复杂多样风味物质,包括酚类、醛类、醇类、酮类和酸类等化合物。乳酸菌通过糖类的发酵代谢产生乳酸,赋予酸笋主要的酸味,具有增强食欲的功效。此外,乳酸菌的参与还可以抑制其他有害微生物的生长,确保发酵过程的安全性和稳定性^[13]。已有研究表明:乳酸菌发酵酸笋的酸味显著高于自然发酵,苦味、涩味均低于自然发酵,而鲜味、丰富性和咸味稍低于自然发酵^[12]。此外,乳酸菌发酵的酸笋的酸度亦高于盐发酵的酸笋,而亚硝酸盐含量则显著低于盐发酵^[5],研究发现一株名为 NM-12 的异型发酵的柠檬明串珠菌,其产酸的质量浓度高达 6.81 g/L,亚硝酸盐降解率为 79.05%^[10]。酸笋中还含有酵母菌参与发酵,广东酸笋中的赤壁酵母属(*Chishui yeast*)最为丰富,在总菌

表 1 发酵酸笋的主要菌种
Table 1 Main strains used in the fermentation of sour bamboo shoots

菌属	菌种	参考文献
乳杆菌	植物乳杆菌(<i>Lactobacillus plantarum</i>)、老面乳杆菌(<i>Lactobacillus zymae</i>)、斯比氏乳杆菌(<i>Lactobacillus spicheri</i>)、列维短乳杆菌(<i>Levilactobacillus brevis</i>)	[10-11]
明串珠菌	柠檬明串珠菌(<i>Leuconostoc citreum</i>) NM-12	[12]
乳球菌	乳酸片球菌(<i>Pediococcus acidilactici</i>)	[10]
酵母菌	赤壁酵母(<i>Chishui yeast</i>)	[8]
醋酸菌	醋酸杆菌(<i>Acetobacter</i>)	[9]

里占比 28.32%, 酵母菌在发酵初期可将竹笋中的糖类发酵生成乙醇和二氧化碳, 乙醇带有微甜的酒香味, 还可与其他风味物质相互作用, 增强风味丰富性^[8]。醋酸杆菌 (*Acetobacter*) 也是发酵后期的优势菌种, 在发酵后期, 醋酸菌将酵母菌产生的乙醇氧化为醋酸, 其具有刺鼻的酸味, 进一步丰富酸笋的酸味层次^[9]。菌种的协同作用使得发酵酸笋具有独特的酸味和风味。

2 微生物发酵对酸笋风味品质影响

2.1 改善酸笋风味成分

2.1.1 有机酸

酸笋的酸味主要源自发酵产生的乳酸和醋酸及竹笋本身自带的微量草酸以及部分质量浓度较低的柠檬酸和酒石酸^[14]。酸类物质呈先增加后降低, 在发酵 120 d 时含量最高达 25.9 $\mu\text{g/g}$ ^[15], 乳酸在发酵 150 d 时含量最高达 3.7 mg/g, 柠檬酸和酒石酸质量浓度较低^[15]。也有研究发现乳酸和酒石酸分别从初期 2.8 mg/g、1.7 mg/g 最高增至 39.5 mg/g、51.0 mg/g, 表明酸笋含较高酒石酸^[16]。醋酸主要由醋酸菌 (如醋酸杆菌) 在发酵后期将乙醇氧化产生, 具有强烈的酸味和挥发性, 赋予酸笋独特的刺鼻酸香, 也具有一定的抑菌作用, 增加酸笋的酸味层次, 使其风味更加复杂, 还可以改善酸笋的保存性^[17]。采用顶空固相微萃取法检测分析酸笋中的醋酸含量为 6.08 g/100 g^[18]。有研究发现植物乳杆菌与乳酸含量呈正相关, 而柠檬明串珠菌与乙酸含量呈正相关^[19]。

草酸天然存在于竹笋中, 味道较为涩口, 不是发酵产生的主要酸味, 但会影响整体风味。高含量的草酸会影响钙的吸收, 因此在制作酸笋前通常经焯水去除部分草酸。在 pH 为 2.7 酸性条件下, 测得酸笋中草酸为 301.6 mg/100 g、乳酸为 83.4 mg/100 g、乙酸为 20.3 mg/100 g, 而苹果酸、柠檬酸、富马酸和琥珀酸含量较低^[11]。酸笋还含己酸和辛酸^[20]。通过微生物发酵酸笋产生多种酸类物质, 包括乳酸、醋酸、草酸和苹果酸等, 这些物质赋予酸笋独特的酸味和风味, 有促进消化、抗菌和维持肠道健康等多种益处。

2.1.2 挥发性气味物质

微生物发酵酸笋的独特风味除了上述有机酸, 还包含酚类、醛类、醇类、酯类以及其他挥发性化合物。

植物乳杆菌能有效提高酸笋的发酵速率, 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术测出酸笋挥发性成分以酚类、醇类、醛类、酸类这四者占主导地位, 其中酚类含量占总挥发性物质的 90% 以上; 电子鼻测得酸笋发酵液挥发性物质主要成分为甲基类、醇类、醛酮类、烷烃类、有机硫化物和氮氧化物等^[21]。植物乳杆菌 R1 和乳酸片球菌 R9 发酵酸笋, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术从 R1 发酵酸笋里分离鉴定出 88 种挥发性风味物质, 发酵中后期的主要挥发性物质为酚类和酸类, R9 接种发酵

酸笋中共检测出 51 种挥发性风味物质, 气相色谱-质谱联用技术选择性离子扫描检出酸笋含对甲苯酚和 2-甲氧基-5-甲基苯酚, 但在其他发酵蔬菜中均未检出^[19]。酸笋风味的最主要呈味物质为对甲苯酚, 它是竹笋中游离氨基酸酪氨酸的主要发酵副产物^[22]。对甲苯酚有较强刺激性气味, 能为酸笋带来独特的香气, 是气味成分的主要贡献者, 使其具有辨识度 and 吸引力, 还有一定抗氧化性和抗菌作用, 有助于保持酸笋的品质稳定, 延长保质期。

植物乳杆菌发酵的酸笋, 电子鼻测出其含醛类物质, 含量仅次于酚类^[21]。顶空固相微萃取及气相色谱-质谱法检测出酸笋含醛类等挥发性风味物质, 含量排前的为正己醛、戊醛及 β -柠檬醛 3 种醛类物质^[16]。顶空固相微萃取及气相色谱-质谱法检测出乳球菌和乳杆菌发酵的酸笋同样含有己醛和正戊醛, 还含有反-2-壬烯醛、3-甲基丁醛、苯甲醛及庚醛多种醛类特征风味物质, 但未发现含有 β -柠檬醛^[23]。在酸笋中检测到至少 13 种挥发性化合物为特征香气化合物, 以 2,4-二甲苯基甲醛的含量最高, 为芳香族化合物的降解产物, 赋予杏仁香气, 是酸笋气味的主要贡献者^[24]。酸笋中的醛类物质包括己醛、戊醛、壬醛和苯甲醛等, 赋予酸笋独特的香气和风味, 增加食物的感官愉悦性, 并具有抗菌和抗氧化等多种健康益处^[25]。

采用顶空固相微萃取及气相色谱-质谱联用技术研究发现酸笋中还含有乙醇、3-辛醇、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇等醇类成分, 赋予酸笋独特的酒香和水果香气^[16]。此外, 酸笋含有别的醇类物质, 如 2-乙基己醇及二氧化硫物质^[20]。醇类在发酵 30 d 时含量最高达 13.94 g/100 g^[14]。酸笋还含有 1-辛烯-3-醇乙酸乙酯、2-壬醇及茴香醚等风味物质^[22]。采用气相色谱-嗅觉法和感官评定分析酸笋的香气成分为水杨酸甲酯、反-2-辛烯醛、反-2-壬烯醛、壬醛、1-辛烯-3-酮、1-辛烯-3-醇和苯乙醇等^[26]。添加菌种发酵酸笋中的酯类含量高于自然发酵, 以乙酸甲酯的含量最高, 而醛类含量低于自然发酵, 酚类、酮类、酸类则较为接近^[27]。

添加乳酸菌菌种发酵的酸笋含丰富的风味物质, 包括酚类、醛类、酮类、醇类和酯类等, 总结如表 2, 这些物质共同作用, 赋予酸笋其独特的香气和口感, 增加食物的复杂性和层次感。可以根据需求选择不同的菌种, 调控发酵过程中的风味物质和营养成分, 优化产品的口感和营养价值, 使酸笋风味更丰富, 营养价值更高。

2.1.3 呈味氨基酸

在发酵过程中, 微生物如乳酸菌会分泌多种酶如蛋白酶, 这些酶能够降解竹笋中的蛋白质, 蛋白质进一步被分解成更小的多肽和氨基酸, 这些小分子化合物更易于被人体吸收利用。大多数氨基酸呈现鲜味、甜味和酸味, 少数呈现苦味^[28]。在发酵初期, 微生物与竹笋自带的酶类物质共同作用, 将蛋白质分解产生游离的氨基酸; 在发酵后期, 微生物把氨基酸当作营养物质之一进行利用, 从而分

解产生新的风味物质^[28]。随着发酵进行,酸笋中蛋白质含量逐渐降低,天冬氨酸、谷氨酸、胱氨酸及精氨酸含量也降低^[19]。但也有发现微生物发酵不仅不降低蛋白质和氨基酸的营养价值,反而可能提高氨基酸的生物利用度,微生物的代谢活动可能会增加某些氨基酸^[29]。采用高效液相色谱-串联质谱法检测出酸笋中含有苯丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸等 16 种游离氨基酸,含量为 0~625.8 mg/kg,含量较丰富^[30]。经乳杆菌发酵后的酸笋,呈味氨基酸含量显著提升,含量最高的游离氨基酸谷氨酸,呈鲜味^[31]。不同氨基酸的积累情况可能会有所不同,这取决于发酵菌种和发酵条件。

表 2 发酵酸笋的挥发性气味物质
Table 2 Volatile aromatic compounds of fermented sour bamboo shoots

种类	名称	参考文献
酚类	甲苯酚、2-甲氧基-5-甲基苯酚	[22]
	正己醛、戊醛、 β -柠檬醛	[16]
醛类	正戊醛、反-2-壬烯醛、3-甲基丁醛、苯甲醛及庚醛	[23]
	2,4-二甲基苯甲醛	[24]
	反-2-辛烯醛、壬醛	[26]
酮类	1-辛烯-3-酮	[26]
	乙醇、3-辛醇、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇	[16]
醇类	2-乙基乙醇	[20]
	2-壬醇	[22]
酯类	1-辛烯-3-醇、苯乙醇	[26]
	1-辛烯-3-醇乙酸乙酯	[22]
	水杨酸甲酯	[26]
其他	乙酸甲酯	[27]
	二氧化硫	[20]
	茴香醚	[22]

微生物发酵酸笋过程中,蛋白质经历了复杂的降解和转化过程,生成了多种小分子肽和氨基酸,同时可能形成生物活性肽,并发生蛋白质-多酚相互作用,形成蛋白质-多酚复合物。这些变化不仅增加了发酵产品的氨基酸种类,还可能改善其风味和质地,为竹笋的进一步加工和应用提供了新的可能性。

2.2 改善酸笋品质特性

2.2.1 滋味

香气和滋味影响着酸笋的品质及消费者对其的接受度。发酵过程中,乳酸菌等微生物将竹笋中的糖类发酵生成乳酸和其他有机酸,有机酸的积累使得酸笋的酸味显著增加。某些苦味物质如酚类化合物和生物碱可能被降解或转化,导致苦味减少。此外,微生物代谢活动也可能会生成一些掩盖苦味的物质,如甜味氨基酸和肽类,从而进一步降低苦味,如乳酸菌分解单宁和植酸,从而降低涩味。

微生物的代谢活动会生成多种挥发性和非挥发性风味化合物,如醇类、酯类、醛类、酮类和酸类等,这些风味化合物共同赋予发酵酸笋独特的香气和风味^[20]。竹笋的细胞壁成分如纤维素和半纤维素可能被部分降解,使得竹笋质地更加柔软,口感更好,这种质地的变化也会影响到食物的咀嚼感和味道的释放^[23]。乳酸菌发酵会产生独特的乳酸菌香气,而酯类和醛类化合物则会带来水果香和花香,某些不良气味如硫化物和胺类化合物可能会被降解或转化,从而减少不良气味的产生^[32]。

微生物发酵酸笋过程中,滋气味发生了显著变化。酸味增加,苦味和涩味减少,生成多种风味化合物,使得发酵酸笋具有独特的香气和风味。同时,氨基酸和小肽的产生提升了鲜味和甜味,质地的改善使口感更加柔软和舒适。总体来说,发酵提升了酸笋的滋味特性。

2.2.2 营养功能特性

微生物发酵酸笋过程中,微生物及其代谢产物赋予了发酵酸笋多种功能特性,这些特性包括但不限于以下几个方面:

(1) 提高营养价值

发酵过程中,乳酸菌分泌的蛋白酶将竹笋中的蛋白质分解成氨基酸和小肽,这些小分子更易被人体吸收利用^[16]。此外,某些乳酸菌在发酵过程中能够合成多种维生素,如维生素 A 和维生素 B(包含 B₁、B₂、B₃、B₆、B₉)及维生素 C 等多种维生素,进一步提高了发酵酸笋的营养价值^[33-34]。

(2) 形成益生菌群

发酵酸笋中含有大量活性乳酸菌,食用后有助于维持肠道微生态平衡,改善消化功能,具有一定的免疫调节作用,能够增强机体免疫力^[35]。某些乳酸菌甚至能够分泌抗菌物质,如乳酸对肠杆菌具有抑制作用,有助于减少酸笋发酵过程中生成亚硝酸盐、防止酸笋腐败和延长保质期^[36]。有研究发现在酸笋发酵液中筛选得到 1 株具有优良益生特性的发酵乳杆菌 SS-31,初步证明了该菌具有潜在的炎症治疗应用和开发价值^[37]。

(3) 生成生物活性物质

蛋白质在发酵过程中被分解成具有生物活性的肽,这些肽具有抗氧化作用,能清除 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]阳离子自由基和 1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH),还具有抗菌作用,能抑制有害菌的生长,延长酸笋的保质期,提升食品安全性^[38]。

3 微生物发酵酸笋工艺流程

微生物发酵酸笋的工艺流程涉及多个步骤,每个步骤都需要精细控制以确保产品的风味和质量。图 1 为微生物发酵酸笋的工艺流程图。

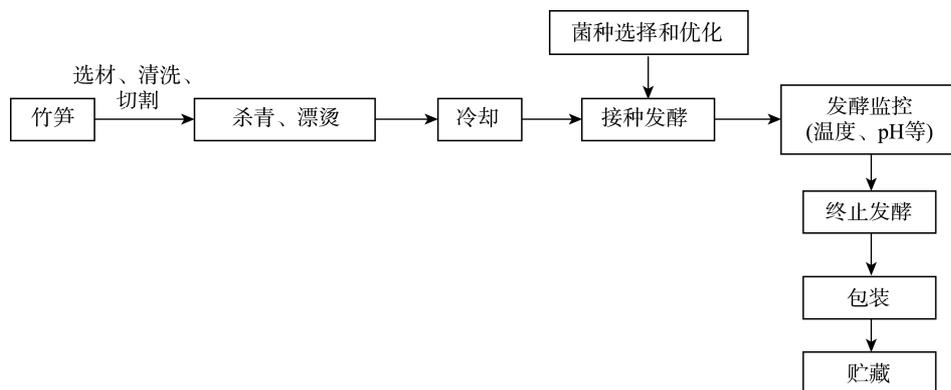


图 1 微生物发酵酸笋的工艺流程

Fig.1 Process flow for microbial fermentation of sour bamboo shoots

微生物发酵酸笋作为一种传统发酵食品,近年来在发酵工艺、菌种选育、风味分析和营养功能等方面的研究已取得了显著进展,其工艺涉及以下几个方面:

(1) 发酵菌种的筛选、鉴定和优化

通过分离和鉴定竹笋中的天然微生物,筛选出适合发酵的优良菌种。研究表明,乳酸菌如乳酸乳球菌(*Lactococcus lactis*)和植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)在发酵过程中具有重要作用,乳酸片球菌 R9、植物乳杆菌 R19 和 R25 是酸笋纯种发酵优势菌株^[12]。针对不同菌种在发酵过程中对酸度、风味和质地的影响进行研究,优化菌种组合如乳酸片球菌 R9:植物乳杆菌 R25 以 1:1 比例,最佳发酵条件为 4 g/100 g 的接种量,可提升酸笋产品质量^[12]。

(2) 发酵条件的优化

研究不同温度和发酵时间对发酵效果的影响,优化发酵条件以达到最佳的风味和质地。研究发现在 31 °C 温度下,接种乳酸菌发酵酸笋,发酵 14 d 得到的发酵酸笋高产 γ -氨基丁酸,含量为 817.4 $\mu\text{g/mL}$, γ -氨基丁酸是神经递质,能提升神经技能、改善睡眠质量、有舒缓血管和降血压功效^[39],而亚硝酸盐残留量为 0.43 mg/kg, pH 为 3.4,感官评分为 82.1 分^[12]。控制发酵液的 pH 和盐浓度,以抑制有害菌的生长,促进有益菌的发酵。在发酵过程中,1%食盐浓度时乳酸菌数峰值最高,达到了 9.65 lgCFU/mL;发酵结束时,1%食盐浓度的酸笋中,乳酸浓度最高,含量达到了 5.23 g/L,控制 1%食盐添加量,有利于酸笋发酵^[40]。

(3) 风味物质的分析

利用现代分析技术,采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术^[16]、电子鼻^[21]和超高效液相色谱-串联质谱法^[30]等,对发酵酸笋中的挥发性风味物质进行定性和定量分析,发现酸笋含有多种风味物质,包括酚类、醛类、酮类、醇类、酯类和酸类等。研究发酵过程中不同阶段风味物质的变化规律,揭示关键风味物质的生成机制。在 0.6 g/L 盐浓度下,酸笋主要代谢途径为碳水化合物代谢和氨基酸代谢,生成乳酸、乙醛和乙酸则由丙酮酸代谢。在 1.0 g/L 盐浓度

下,色氨酸代谢基因数量下降,由色氨酸代谢产生的粪臭素和吡啶-3-乙醇受到了抑制,减少了酸笋的臭味^[41]。植物乳杆菌发酵酸笋使半胱氨酸、蛋氨酸和酪氨酸代谢受到了抑制,从而减少不悦气味产生,提升酸笋的风味品质^[42]。

(4) 营养与功能性研究

评估发酵过程对竹笋中维生素、矿物质和膳食纤维等营养成分的影响,研究表明发酵可以增强某些营养成分的生物利用度,纯种乳酸菌发酵得到的酸笋氨基酸含量高,达 23.02 mg/kg,风味更浓厚^[43]。发酵酸笋含多种功能性成分如益生菌,具有抗氧化、心脏保护、减肥和调节肠道菌群平衡等多种保健功效,对健康有益^[44]。从酸笋乳酸菌属筛选分离鉴定出的发酵乳杆菌、植物乳杆菌和布鲁斯乳杆菌具有抗氧化和降低胆固醇功效^[45]。有研究从酸笋中分离出乳酸发酵菌 MC3 (*Lb. fermentum* MC3),该菌具有高胞外多糖生产能力,凝胶渗透色谱法测得该胞外多糖的分子质量为 9.85×10^4 Da,气相色谱-质谱法分析了胞外多糖为一种杂多糖,其主链中主要含 D-葡萄糖和 D-甘露糖,具有生物医学应用的潜力^[46]。竹笋含淀粉和蔗糖,酶水解成葡萄糖,葡萄糖转化为果糖,乳酸菌异型发酵将果糖转化为甘露醇,非代谢性甜味剂甘露醇具有抗氧化作用,其独特清凉口感提升了酸笋滋味^[47]。

(5) 品质控制与安全性研究

建立发酵酸笋的质量控制标准,包括感官评价、理化指标和微生物指标等,确保产品的一致性和高质量。研究发酵过程中可能产生的有害物质,如生物胺和亚硝酸盐等,确保产品的安全性和食用安全。将魏斯氏菌与植物乳杆菌结合作为复合菌发酵酸笋,其亚硝酸含量为 0.36 mg/kg,显著低于自然发酵(1.16 mg/kg)^[48]。肠杆菌是腐败菌,也是食源性致病菌,大量存在在微生物发酵酸笋初期,在发酵中后期随着酸笋酸度的增加而显著减少,最终含量极低^[49]。

(6) 工艺流程的优化

研究不同预处理方法对发酵效果的影响,如杀青、漂烫等。通过实验研究和数据分析,优化发酵工艺参数,提

高生产效率和产品质量。有研究采用切片和整根发酵酸笋,分别以盐和乳酸菌发酵酸笋,盐发酵的切片酸笋色泽和口感最佳,评分 91 分,酸度适宜,品质最佳^[5]。接种乳酸杆菌发酵酸笋,其亚硝酸盐含量低于自然发酵^[50]。还要接种 3 种混菌直投发酵剂进行酸笋的直投发酵, pH 为 3.76, 酸度值 7.35 g/L, 其中乳酸值 2.73 g/L^[51]。

微生物发酵酸笋工艺的研究在菌种选育、发酵条件优化、风味物质分析、营养与功能性研究以及品质控制与安全性评估等方面取得了重要进展。但也存在一些不足和问题需要解决:(1)发酵过程不稳定。发酵过程中微生物种群的变化和外部环境如温度、光照等影响,酸笋质量和口感可能存在波动,难以保证每批产品的一致性;(2)发酵周期长。传统微生物发酵竹笋过程通常需要较长时间。影响生产效率,还增加生产成本;(3)易被杂菌污染。在发酵过程中,杂菌的污染是一个常见问题。这些杂菌不仅可能影响最终产品的风味,还可能带来食品安全隐患;(4)风味单一。尽管发酵可以提升竹笋的风味,但由于发酵菌种的选择有限,发酵竹笋的风味可能较为单一,难以满足多样化的饮食需求;(5)生产标准化不足。发酵竹笋的生产工艺尚未完全标准化,缺乏统一的质量控制标准和规范。这导致市场上的产品质量参差不齐,影响消费者的信任度;(6)营养成分流失。在发酵过程中,竹笋中的某些营养成分可能会发生降解或流失,影响其营养价值。

4 结束语

通过对微生物发酵对酸笋风味品质影响的研究,了解微生物在发酵过程中起着至关重要的作用。发酵菌种的选择和组合、发酵条件的优化以及对发酵过程中代谢产物的分析,都是提升酸笋风味品质的关键因素。乳酸菌,尤其是植物乳杆菌等,在发酵过程中不仅能够产生丰富的有机酸和芳香物质,还能显著改善酸笋的质地和营养价值。此外,为了解决发酵工艺的问题,未来的研究和生产实践可以从以下几个方面入手:

(1)优化发酵工艺。通过研究发酵过程中的关键参数和微生物种群动态,优化发酵条件,缩短发酵时间,提高发酵稳定性;(2)菌种筛选和改良。筛选和培育高效、安全的发酵菌种,丰富发酵竹笋的风味,提高其营养价值;(3)加强质量控制。建立标准化的生产流程和质量控制体系,确保每批产品的一致性和安全性;(4)开发多样化产品。根据市场需求,开发多种风味和形式的发酵竹笋产品,满足不同消费者的需求。

未来的研究应进一步探索不同菌种及其代谢途径对酸笋风味的具体影响机制,并结合现代分子生物学技术,筛选和改良高效优质的发酵菌种。现代分子生物学的应用在食品领域具有部分局限性,存在技术成本高难题,如基因测序、聚合酶链式反应等,通常需要昂贵的仪器设备和

专业技术人员。同时,应重视发酵工艺参数的标准化和规模化生产技术的研发,以确保产品的稳定性和一致性。通过不断深入的研究和技术创新,有望进一步提升酸笋的风味品质,使其不仅在国内市场上保持竞争力,还能在国际市场上展现独特的风味魅力和健康价值。

参考文献

- [1] 张佳佳,白瑞华,丁兴萃.两种主要食用竹笋的营养及安全品质比较[J].食品研究与开发,2021,42(8):18-23.
ZHANG JJ, BAI RH, DING XC. Comparison of nutrition and safety of two main edible bamboo shoots [J]. Food Res Dev, 2021, 42(8): 18-23.
- [2] 熊建文,桂扬,周小玲,等.柳州酸笋中降胆固醇乳酸菌的筛选及鉴定[J].中国调味品,2021,46(9):74-80.
XIONG JW, GUI Y, ZHOU XL, et al. Screening and identification of cholesterol-reducing lactic acid bacteria from Liuzhou fermented bamboo shoots [J]. China Cond, 2021, 46(9): 74-80.
- [3] QIN X, XIONG T, KANG X, et al. Comparison of the quality of Suansun product between starter inoculation and natural fermentation [J]. Food Biosci, 2024, 1: 58103782.
- [4] ZHANG X, WANG Q, XIE Y, et al. Correlation between microorganisms and volatile compounds during spontaneous fermentation of sour bamboo shoots [J]. Fermentation, 2024, 10(7): 333.
- [5] 康林芝,聂丹霞,陈霖,等.不同加工工艺对酸笋品质的影响[J].食品工业科技,2024,45(8):182-189.
KANG LZ, NIE DX, CHEN L, et al. Effect of different processing techniques on the quality of sour bamboo shoots [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 45(8): 182-189.
- [6] TANG H, MA JK, CHEN L, et al. Characterization of key flavor substances and their microbial sources in traditional sour bamboo shoots [J]. Food Chem, 2023, 437(Pt 1): 137858.
- [7] 卢宏皓.异/同型发酵乳酸菌对酸笋接种发酵的影响[D].柳州:广西科技大学,2022.
LU HH. Effects of hetero/homofermentative lactic acid bacteria on inoculation and fermentation of Suansun (sour bamboo shoot) [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2022.
- [8] GUAN QQ, ZHENG WD, MO JL, et al. Evaluation and comparison of the microbial communities and volatile profiles in homemade Suansun from Guangdong and Yunnan provinces in China [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(14): 5197-5206.
- [9] LI JJ, LIU Y, XIAO H, et al. Bacterial communities and volatile organic compounds in traditional fermented salt-free bamboo shoots [J]. Food Biosci, 2022, 50: 102006.
- [10] 卢宏皓,刘昭明,黄翠姬,等.酸笋中高产甘露醇异型发酵乳酸菌的筛选及其发酵性能[J].中国调味品,2022,47(4):32-36.
LU HH, LIU ZM, HUANG CJ, et al. Screening and fermentation performance of heterofermentative lactic acid bacteria with high-yield mannitol from sour bamboo shoots [J]. China Cond, 2022, 47(4): 32-36.
- [11] 张雅雯.螺蛳粉酸笋中微生物菌群及风味物质的分析[D].武汉:华中农业大学,2022.
ZHANG YW. Analysis of microbial flora and flavor substances in *sour bamboo shoots* of Liuzhou river snails rice noodle [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.

- [12] 钟源. 酸笋菌群多样性分析及乳酸菌的筛选、特性研究与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
ZHONG Y. Analysis of the diversity of bacterial flora in sour bamboo shoots and the screening, characterization and application of lactic acid bacteria [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [13] 钟源, 张雅雯, 吕健曼, 等. 广西酸笋微生物多样性分析及其乳酸菌的特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 1-9.
ZHONG Y, ZHANG YW, LV JM, et al. Analysis of microbial diversity of Guangxi sour bamboo shoots and study on their lactic acid bacteria characteristics [J]. China Cond, 2023, 48(5): 1-9.
- [14] POONAM S, MOHAN LB, SANTOSH S, et al. Bamboo shoots: A novel source of nutrition and medicine [J]. Crit Rev Food Sci, 2013, 53(5): 517-534.
- [15] 李笑怡. 酸笋自然发酵中微生物菌群及主要成分变化的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
LI XY. Study on the variation law of microbial community and main components in natural fermentation of sour bamboo shoots [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.
- [16] LAXMIKANT SB, PALLAB KB, KANKANA B, et al. Influence of fermentation on nutritional compositions, antioxidant activity, total phenolic and microbial load of bamboo shoot [J]. Food Sci Technol Res, 2014, 20(2): 255-262.
- [17] 朱照华. 酸笋的营养成分检测及其主要风味物质的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
ZHU ZH. Study on fermented bamboo shoot nutrition and flavor components [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [18] ZHENG J, ZHANG F, ZHOU C, et al. Comparison of flavor compounds in fresh and sour bamboo shoots by GC-MS and GC-olfactometry [J]. Food Sci Technol Res, 2014, 20(1): 129-138.
- [19] LU HH, HUANG CJ, YU KN, et al. Effects of mixed inoculation of *Leuconostoc citreum* and *Lactobacillus plantarum* on Suansun (sour bamboo shoot) fermentation [J]. Food Biosci, 2022, 1: 47.
- [20] 廖安, 杜海平, 程昊, 等. 两种酸笋主要成分、挥发性成分及抗氧化活性对比[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 145-151.
LIAO AN, DU HP, CHENG H, et al. Comparison of the main components, volatile components, and antioxidant activity of two types of fermented bamboo shoots [J]. Food Mach, 2024, 40(1): 145-151.
- [21] 赵蓉. 植物乳杆菌 ss001 在柳州酸笋中的应用研究[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023.
ZHAO R. Application study of *Lactobacillus plantarum* SS001 in Liuzhou sour shoots [D]. Linzhi: Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, 2023.
- [22] FU SG, YOON Y, BAZEMORE R. Aroma-active components in fermented bamboo shoots [J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(3): 549-554.
- [23] CHEN CX, CHENG GG, LIU YP, et al. Correlation between microorganisms and flavor of Chinese fermented sour bamboo shoot: Roles of *Lactococcus* and *Lactobacillus* in flavor formation [J]. Food Biosci, 2022, 50(PA): 101994.
- [24] LONG ZJ, ZHAO SL, XU XF, et al. Dynamic changes in flavor and microbiota in traditionally fermented bamboo shoots (*Chimonobambusa szechuanensis* (rendle) keng f.) [J]. Foods, 2023, 12(16): 3035.
- [25] LI SB, TIAN YF, SUN MH, et al. Characterization of key aroma compounds in fermented bamboo shoots using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor activity values, and aroma recombination experiments [J]. Foods, 2022, 11(14): 2106.
- [26] 田玉峰, 孙明浩, 许家敏, 等. 广西酸笋特征风味化合物的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 299-306.
TIAN YF, SUN MH, XU JM, et al. Characterization of key aroma compounds in Guangxi fermented bamboo shoots [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(23): 299-306.
- [27] 刘永逸, 林华, 杨超, 等. 低亚硝酸盐柳州酸笋的研制及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 220-224.
LIU YY, LIN H, YANG C, et al. Development and quality analysis of Liuzhou sour bamboo shoots with low nitrite [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(19): 220-224.
- [28] 薛冰洁, 胡荣, 吴良如, 等. 酸笋中微生物区系演替和风味物质形成机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 315-321.
XUE BJ, HU R, WU LR, et al. Advances on microbial flora succession and flavor substance formation mechanism in Suansun [J]. Food Ferment Ind, 2024, 50(4): 315-321.
- [29] FONSECA S, RIVAS I, ROMAGUERA D, et al. Association between consumption of fermented vegetables and COVID-19 mortality at a country level in Europe [J]. Med Lett Drugs Ther, 2020, 6(8): 297.
- [30] 武源, 覃慧丽, 陈荣珍, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定酸笋中多种游离氨基酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(3): 917-925.
WU Y, QIN HL, CHEN RZ, et al. Determination of multiple free amino acids in fermented bamboo shoots by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(3): 917-925.
- [31] WANG, LUO YY, ZHANG Y, et al. Quality analysis of ultra-fine whole pulp of bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) fermented by *Lactobacillus plantarum* and *Limosilactobacillus reuteri* [J]. Food Biosci, 2023, 1: 52.
- [32] SONAR NR, HALAMI PM. Phenotypic identification and technological attributes of native lactic acid bacteria present in fermented bamboo shoot products from North-East India [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(12): 4143-4148.
- [33] YE JZ, SU ZP, LIN L et al. Determination of inorganic elements content and distribution in bamboo shoots by microwave digestion and ICP-MS [J]. J Agric Chem Environ, 2016, 5(3):152-157.
- [34] WU JS, ZHENG J, XIA XJ, et al. Purification and structural identification of polysaccharides from bamboo shoots [J]. Int J Molecul Sci, 2015, 16(7): 15560-15577.
- [35] 贾冬冬, 梁绍煜, 熊建文, 等. 柳州市不同产区麻竹笋品质分析[J]. 广西林业科学, 2024, 53(1): 87-93.
JIA DD, LIANG SY, XIONG JW, et al. Analysis on *Dendrocalamus latiflorus* shoot qualities in different areas of Liuzhou [J]. Guangxi Fore Sci, 2024, 53(1): 87-93.
- [36] 吴锦兰, 白云, 黄海, 等. 酸笋源乳酸菌抑菌活性影响因素研究[J]. 粮食科技与经济, 2022, 47(5): 104-107.
WU JL, BAI Y, HUANG H, et al. Study on influencing factors of antibacterial activity of lactic acid bacteria from sour bamboo shoots [J]. Grain Sci Technol Econ, 2022, 47(5): 104-107.
- [37] 秦雅莉, 赵笑颖, 沈圆圆, 等. 酸笋中具有抗炎活性乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 121-127.

- AIN YL, ZHAO XY, SHEN YY, *et al.* Screening and identification of anti-inflammatory lactic acid bacteria from sour bamboo shoot [J]. *Food Sci*, 2022, 43(8): 121–127.
- [38] THAGE BV. Purification and characterization of a branched-chain amino acid aminotransferase from *Lactobacillus paracasei* subsp. *paracasei* CHCC 2115 [J]. *J Appl Microbiol*, 2004, 96(3): 593–602.
- [39] 冯浩森, 李湘鑫, 冯爱军, 等. 酸笋微生物与风味形成研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(22): 91–99.
FENG HS, LI XL, FENG AJ, *et al.* Research progress on microorganisms and flavor formation of sour bamboo shoots [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(22): 91–99.
- [40] 张开翼, 黄翠姬, 庞凤萍, 等. 食盐浓度对乳酸菌接种发酵酸笋的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2024, 60(1): 53–57.
ZHANG KJ, HUANG CJ, PANG FP, *et al.* Effect of salt concentrations on the lactic acid bacteria inoculated fermentation of Suansun [J]. *Sichuan Food Ferment*, 2024, 60(1): 53–57.
- [41] 吴宇辉, 李昕诺, 唐荣灿, 等. 不同盐水浓度酸笋细菌群落结构及代谢功能的宏基因组学解析[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–12. [2024-07-30]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039459>
WU YH, LI XN, TANG RC, *et al.* Metagenomic analysis of bacterial community structure and metabolic function in Suansun with different salt water concentrations [J/OL]. *Food Ferment Ind*, 1–12. [2024-07-30]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039459>
- [42] 李昕诺, 吴宇辉, 吴良如, 等. 基于宏基因组学揭示自然发酵与植物乳杆菌接种发酵酸笋中微生物代谢及关键风味基因[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1–12. [2024-07-30]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039366>
LI XN, WU YH, WU LR, *et al.* Revealing microbial metabolism and key flavor genes in natural fermented and *Lactobacillus plantarum* inoculated fermented Suansun based on macrogenomics [J/OL]. *Food Ferment Ind*, 1–12. [2024-07-30]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039366>
- [43] 谢元, 季家举, 王新权. 纯种乳酸菌发酵竹笋技术[J]. *农产品加工*, 2018(11): 28–29, 33.
XIE Y, JI JJ, WANG XQ. The technology of fermented *bamboo shoot* with pure lactic acid bacteria [J]. *Farm Prod Process*, 2018(11): 28–29, 33.
- [44] PRAPTI B, SEETHARAMAN B. Health benefits of fermented bamboo shoots: The twenty-first century green gold of Northeast India [J]. *Appl Biochem Biotech*, 2021, 193(6): 1–13.
- [45] HU YP, CHEN XD, ZHOU J, *et al.* Metagenomic analysis of Suansun, a traditional Chinese unsalted fermented food [J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1669.
- [46] DO TBT, TRAN LAT, TRAN TVT, *et al.* Novel exopolysaccharide produced from fermented bamboo shoot-isolated lactobacillus fermentum [J]. *Polymers*, 2020, 12(7): 1–5.
- [47] WISSELINK HW, WEUSTHUIS R.A, EGGINK G, *et al.* Mannitol production by lactic acid bacteria: A review [J]. *Int Dairy J*, 2002, 12(2): 151–161.
- [48] 任亭, 刘玉凌, 彭玉梅, 等. 传统泡菜中乳酸菌的筛选鉴定及其在麻竹笋泡菜中的应用[J]. *食品科技*, 2021, 46(8): 33–37, 45.
REN T, LIU YL, PENG YM, *et al.* Screening and identification of lactic acid bacteria from traditional pickle and its application in *Dendrocalamus latiflorus* pickle [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(8): 33–37, 45.
- [49] YANG XZ, HU WZ, XIU ZL, *et al.* Comparison of northeast sauerkraut fermentation between single lactic acid bacteria strains and traditional fermentation [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109553.
- [50] 崔娜, 惠翔, 王宇轩, 等. 不同发酵方式对酸笋发酵过程亚硝酸盐含量变化的影响研究[J]. *食品安全导刊*, 2022(33): 46–49.
CUI N, HUI X, WANG YX, *et al.* Effects of different fermentation methods on the content of nitrite in sour bamboo shoots [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022(33): 46–49.
- [51] 郑文迪. 直投式发酵酸笋生产技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
ZHENG WD. The research on the production technology of direct-injection fermented sour bamboo shoots [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



林丽华, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 708999620@qq.com