

醪糟酸笋复合发酵体系构建及营养成分与风味特性分析

赵翊滢^{1,2} 程昊^{1,2} 田毅³ 周春红³ 杜海平¹ 田艳^{1,2,3,4}

(1. 广西科技大学,广西 柳州 545006; 2. 广西柳州螺蛳粉工程技术研究中心,广西 柳州 545006;
3. 重庆市食品药品检验检测研究院,重庆 401121; 4. 柳州笋丫头农业有限公司,广西 柳州 545103)

摘要:[目的]探究醪糟酸笋的最优工艺,并分析对比其营养成分和挥发性成分。**[方法]**基于单因素、Plackett-Burman 和 Box-Behnken 响应面设计优化醪糟酸笋复合发酵的工艺参数,并将其与自然发酵酸笋进行营养与风味比较。**[结果]**优化后的醪糟酸笋复合发酵工艺条件为乳酸菌添加量 0.20%、食盐添加量 5.00%、氯化钙添加量 0.07%、醪糟添加量 16.00%,该条件下醪糟酸笋的综合评分为 90。与自然发酵相比,pH 更低(2.73 vs 3.89)、总酸更高(52.15 g/kg vs 43.65 g/kg),可溶性总糖(0.15% vs 0.04%)、蛋白质(3.91% vs 2.12%)、氨基态氮(0.38% vs 0.12%)显著提高;挥发性成分检出种类更多(21 vs 10),酯类总量更高(1.38% vs 0.08%),共同主导成分为对甲基苯酚(97.81% vs 95.19%)。**[结论]**与自然发酵相比,复合发酵赋予产品更醇和的香气与更佳的营养特征。

关键词:酸笋;醪糟;HS-SPME-GC-MS 法;挥发性成分;营养品质

Construction of a Laozao-Suansun composite fermentation system and its nutritional components and flavor analysis

ZHAO Yiyng^{1,2} CHENG Hao^{1,2} TIAN Yi³ ZHOU Chunhong³ DU Haiping¹ TIAN Yan^{1,2,3,4}

(1. Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Guangxi Liuzhou Luosifen Engineering Technology Research Center, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 3. Chongqing Institute for Food and Drug Control, Chongqing 401121, China; 4. Liuzhou Sunyatou Agriculture Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545103, China)

Abstract: [Objective] To explore the optimal process of fermented bamboo shoots (Suansun) with sweet rice wine residue (Laozao) and analyze and compare their nutritional and volatile components. [Methods] Process parameters for co-fermentation of bamboo shoots with sweet rice wine residue are optimized using single-factor analysis, Plackett-Burman design, and Box-Behnken response surface methodology. The nutritional and flavor characteristics of the optimized product are compared with those of naturally fermented bamboo shoots. [Results] The optimized fermentation conditions are as follows: lactic acid bacteria inoculum of 0.20%, salt content of 5.00%, calcium chloride addition of 0.07%, and sweet rice wine residue dosage of 16.00%. Under these conditions, the comprehensive quality score of the co-fermented bamboo shoots reaches 90. Compared with natural fermentation, the optimized product exhibits a lower pH (2.73 vs. 3.89), higher total acidity (52.15 vs. 43.65 g/kg), and significantly elevated levels of total soluble sugar (0.15% vs. 0.04%), protein content (3.91% vs. 2.12%), and amino nitrogen (0.38% vs. 0.12%). Additionally, a greater diversity of volatile compounds is detected (21 vs. 10), with a notably higher total ester content (1.38% vs. 0.08%), and *p*-cresol was identified as the dominant volatile component (97.81% vs. 95.19%). [Conclusion] Compared with natural fermentation, co-fermentation with sweet rice wine residue imparts a mellower aroma and

基金项目:广西自然科学基金项目(编号:2024GXNSFBA010349);广西自然科学基金联合专项项目(编号:2025GXNSFHA069219);
广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(编号:2023KY0351)

通信作者:田艳(1988—),女,广西科技大学高级工程师,博士。E-mail:Tianyan0329@126.com
程昊(1980—),男,广西科技大学研究员,硕士。E-mail:iamchenghao@126.com

收稿日期:2025-09-19 **改回日期:**2025-12-08

引用格式:赵翊滢,程昊,田毅,等.醪糟酸笋复合发酵体系构建及营养成分与风味特性分析[J].食品与机械,2025,41(12):143-154.

Citation:ZHAO Yiyng, CHENG Hao, TIAN Yi, et al. Construction of a Laozao-Suansun composite fermentation system and its nutritional components and flavor analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 143-154.

superior nutritional profile to the fermented bamboo shoots.

Keywords: fermented bamboo shoots; sweet rice wine residue (Laozao); HS-SPME-GC-MS; volatile compounds; nutritional quality

酸笋是以新鲜竹笋为原料,经剥壳洗净后切段、切丝或不切入坛,通过自然发酵制成的一种传统发酵食品。酸笋不仅是广西、广东、云南等地特有的风味美食,还是柳州螺蛳粉、南宁老友粉、桂林米粉等著名米粉小吃中不可或缺的“灵魂”配菜,其独特的“臭”为菜品赋予了不可替代的特色^[1]。传统自然发酵的酸笋存在发酵周期长、风味不够稳定及亚硝酸盐含量可能超标等问题^[2]。因此,保持和优化传统风味、缩短发酵周期、稳定产品品质和降低安全风险,是目前酸笋产业化发展的关键课题。

近年来,酸笋相关的研究较为广泛,包括工艺优化、风味形成机制、微生物演替规律等方面^[3~5]。钟源^[3]研究发现,广西地区的酸笋菌群在属水平上的主要优势菌属均为乳杆菌属,以筛选纯化后的乳杆菌发酵的酸笋的硬度、脆度以及口感优于自然发酵酸笋,但在降低苦味、涩味以及增鲜方面略逊于自然发酵酸笋。Chen 等^[1]对传统自然发酵酸笋在发酵过程中菌群进行分析,结果表明,乳酸乳球菌和乳杆菌是酸笋风味形成的关键功能菌。Long 等^[4]在传统方法发酵 28 d 的酸笋样品中检测了至少 13 种特征性香气成分。任亭等^[6]通过接种乳酸菌或复合菌种,加快了麻竹笋酸化发酵进程并提高了产品风味的稳定性;刘永逸等^[7]采用纯种乳酸菌发酵酸笋,结果发现,以纯种乳酸菌发酵的酸笋中亚硝酸盐含量显著低于自然发酵酸笋,但其风味却不如自然发酵酸笋。综上,接种纯种乳酸菌对酸笋有感官上的改变,但风味改变不大,且未发现更多对发酵工艺条件的系统优化以及多因素协同作用的分析,缺少兼顾营养品质和感官风味的综合性评估^[2,8]。

醪糟(又称甜酒酿或米酒)是以糯米为主要原料,经酒曲发酵制成的传统米酒发酵产物,富含多种酵母菌及酶类。基于此,拟将醪糟引入酸笋发酵过程,利用醪糟中丰富的酵母菌及酶系来提升酸笋发酵风味的复杂度。有研究^[2]表明,外加乳酸菌的快速产酸则有助于抑制杂菌生长、降低亚硝酸盐积累风险。因此,研究拟以醪糟与乳酸菌协同发酵竹笋为核心,针对食盐添加量、乳酸菌发酵剂接种量、葡萄糖添加量、氯化钙添加量、维生素 C 添加量和醪糟添加量等关键参数对酸笋发酵品质的影响开展优化研究。通过多因素协同优化策略,统筹平衡各关键发酵因素,在保持传统风味特色的前提下缩短发酵周期、提高产品风味稳定性并降低安全风险,以期为酸笋的产业化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 原料

新鲜竹笋、醪糟:柳州市添翼种养专业合作社;
饮用纯净水:杭州娃哈哈集团有限公司;

精制加碘食盐:广西盐业集团有限公司;

乳酸菌发酵粉(m 植物乳杆菌干粉: m 嗜酸乳杆菌干粉: m 鼠李糖乳杆菌干粉=1:1:1):广西柳州螺蛳粉工程技术研究中心发酵室;

葡萄糖、氯化钙、维生素 C:食品级,石药集团维生药业(石家庄)有限公司。

1.2 试剂

酚酞、乙酸锌、铬酸钾、硝酸银、N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐、福林—酚试剂(Folin-Ciocalteu 试剂)、氯化铝、碳酸钠、五水硫酸铜、酒石酸钾钠、碘化钾、硫代硫酸钠、淀粉指示剂、甲醛溶液:分析纯,四川西陇科学股份有限公司;

氯化钠、邻苯二甲酸氢钾:工作基准试剂,天津市科密欧化学试剂有限公司;

芦丁、没食子酸标准对照品:纯度≥98%,中国食品药品检定研究院。

1.3 主要仪器设备

pH 计:ST3100 型,美国 Ohaus 公司;

电子天平:BSA224S 型,德国 Sartorius AG 公司;

超声波清洗机:Branson 5510 型,美国 Branson 公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9070A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,岛津企业管理(中国)有限公司;

索氏抽提器:SOX606 型,济南海能仪器股份有限公司;

凯氏定氮装置:K9840 型,济南海能仪器股份有限公司;

GC-MS 联用仪:7000 D 型,安捷伦科技有限公司;

弹性石英毛细管柱:TG-5 SILMS(60 m×250 μm×0.25 μm)型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

固相微萃取装置:SPME GC 型,美国 Supelco 公司。

1.4 酸笋加工工艺

将新鲜的竹笋切除笋根、剥壳、清洗干净,分割成大小大致相同的大块,再切分成细条状(约 4 cm×0.5 cm×0.5 cm),每个发酵坛装 80 g 新鲜竹笋,按料液比 1:2(g/mL)加入纯净水于 20~30 ℃下进行自然发酵(醪糟酸笋需在发酵时加入相应比例的乳酸菌、食盐、葡萄糖、氯化钙、维生素 C、醪糟等),发酵 20 d。

1.5 醪糟酸笋发酵工艺优化单因素试验

分别考察乳酸菌添加量(0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%)、食盐添加量(0, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%)、葡萄糖添加量(0, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%)、氯化钙添加量(0, 0.02%, 0.04%, 0.06%, 0.08%, 0.10%)、维生素 C 添加量(0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.25%)、醪糟添加量(0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%)6 个因素对醪糟酸笋感官与理化指

标的影响。研究某一因素时,其他因素取中心水平(乳酸菌 0.10%、食盐 4%、葡萄糖 2%、氯化钙 0.04%、维生素 C 0.10%、醪糟 10%)。以感官评分、亚硝酸盐含量、pH 值和总酸含量综合评估各因素对醪糟酸笋发酵的影响。

1.6 Plackett-Burman 试验设计

在单因素试验的基础上,结合文献[7]进行 Plackett-Burman 设计($N=12$),采用多指标加权综合评分法作为评价依据,分别从接受度、安全性、酸度及发酵程度等多维度全面评价产品品质^[9]。对产品品质的综合评价进行试验,涉及 6 个变量因素,包括乳酸菌、食盐、葡萄糖、醪糟、氯化钙和维生素 C 的添加量。

1.7 响应面试验设计

以酸笋综合评分为评价指标,选取乳酸菌添加量、食盐添加量、氯化钙添加量和醪糟添加量 4 个影响显著的因素,采用 Box-Behnken 设计进行响应面试验。

1.8 评价指标

1.8.1 酸笋感官评定 将酸笋样品放在一次性透明杯中,由 8 名食品科学与工程专业的人员组成评定小组,根据评分标准对酸笋的色泽(3 分)、气味和滋味(4 分)、口感(3 分)进行感官评分,以 8 名同学给出分数的平均值为最终得分。酸笋感官评分标准见表 1。

表 1 感官评分标准
Table 1 Sensory evaluation criteria

感官指标	评分标准	分值
色泽	色泽均匀,呈乳白色	2~3
	色泽较均匀,呈淡黄色	1~2
	色泽灰暗	0~1
气味和滋味	发酵香气浓郁,笋香味浓,酸咸适宜,无涩味,无异味	3~4
	发酵香气一般,有酸味,咸味较重,有涩味,有苦味	1~3
	无发酵香气,无酸味,苦味、涩味很重,有异味	0~1
口感	硬度适中,口感脆嫩	2~3
	口感一般,不够脆	1~2
	组织松软,无脆性	0~1

1.8.2 其他理化及挥发性成分测定 参照廖安等^[10]的方法。

1.8.3 多指标加权综合评分 综合评分时,感官评分、亚硝酸盐、总酸和 pH 值权重分别为 40%,30%,15%,15%。数据标准化处理:感官评分、总酸含量按式(1)计算标准化得分;亚硝酸盐含量、pH 值按式(2)计算标准化得分。

$$S = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100, \quad (1)$$

$$S = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100, \quad (2)$$

式中:

S —标准化得分;

X —检测指标的实际测量值;

X_{\min} —对应检测指标在全部响应面试验中的最小值;

X_{\max} —对应检测指标在全部响应面试验中的最大值。

1.9 数据处理

所有试验均进行 3 次独立测定,并计算其均值作为最终结果。数据统计与可视化采用 GraphPad Prism 软件完成,图表处理使用 WPS 表格工具辅助绘制。色谱数据通过比对 NIST 标准质谱库(版本 11)进行物质初步识别,并采用色谱峰面积的比值法进行半定量分析,各成分含量通过归一化计算得到。试验设计与因素筛选采用 Minitab 17 和 Design-Expert 13 软件进行建模与分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 乳酸菌添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响 如图 1 所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH 值、总酸含量及亚硝酸盐含量均受乳酸菌添加量影响。随着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分呈上升趋势,0.20% 和 0.25% 添加量的酸笋感官评分较高,显示出高添加量有助于改善感官质量。pH 值在发酵初期迅速下降,乳酸菌添加量为 0.25% 的酸笋 pH 值下降更快,可能是由于高乳酸菌数量加速了酸的生成。随着发酵时间的延长(0~20 d),亚硝酸盐含量先上升后下降,与 Xu 等^[11]的研究结果一致,发酵第 8 天达到峰值,未接种乳酸菌的酸笋亚硝酸盐含量较高,接种乳酸菌的酸笋降解速度较快,所有组别样品的亚硝酸盐含量均低于酱腌菜的食品安全国家标准(20 mg/kg)^[12]。总酸含量在发酵期间上升,未接种乳酸菌的酸笋总酸含量最低,接种乳酸菌的酸笋总酸含量较高,说明乳酸菌接种可促进酸生成,提高酸笋的品质和安全性。

2.1.2 食盐添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响

如图 2 所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH 值、总酸含量及亚硝酸盐含量均受到食盐添加量的显著影响。随着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分随发酵时间延长呈上升趋势,添加 2% 和 4% 食盐的酸笋感官评分较高,说明适量添加食盐有助于提高酸笋的感官质量。pH 值在发酵初期迅速下降,随后下降速度趋缓,未添加食盐组的 pH 值下降最快,表明低盐环境更适合乳酸菌的生长繁殖,这与 Lee 等^[13]的报道结果一致。随着发酵时间的延长(0~20 d),亚硝酸盐含量先上升后下降,未添加食盐组亚硝酸盐含量最高,在发酵第 8 天达到峰值,而添加 6%~10% 食盐组亚硝酸盐降解较快,所有组别亚硝酸盐含量均低于国家标准(20 mg/kg)^[12]。总酸含量随发酵时间增加持续

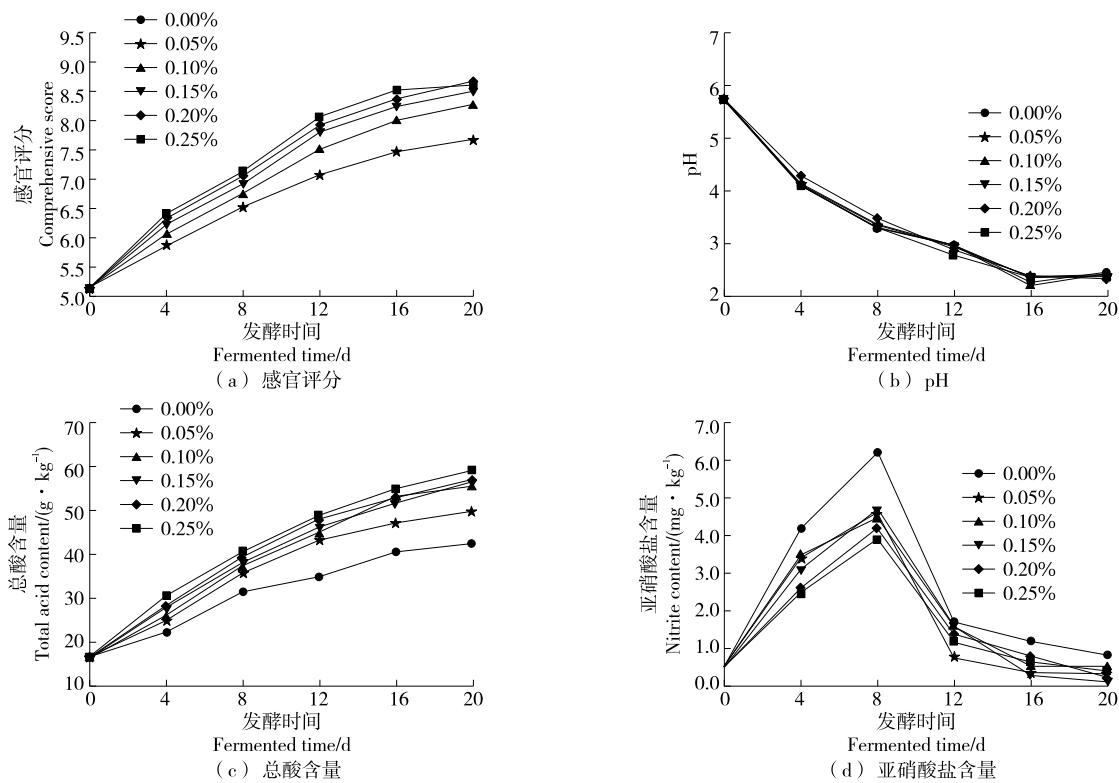


图 1 乳酸菌添加量对酸笋品质的影响

Figure 1 Effects of lactic acid bacteria addition levels on the quality of fermented bamboo shoots

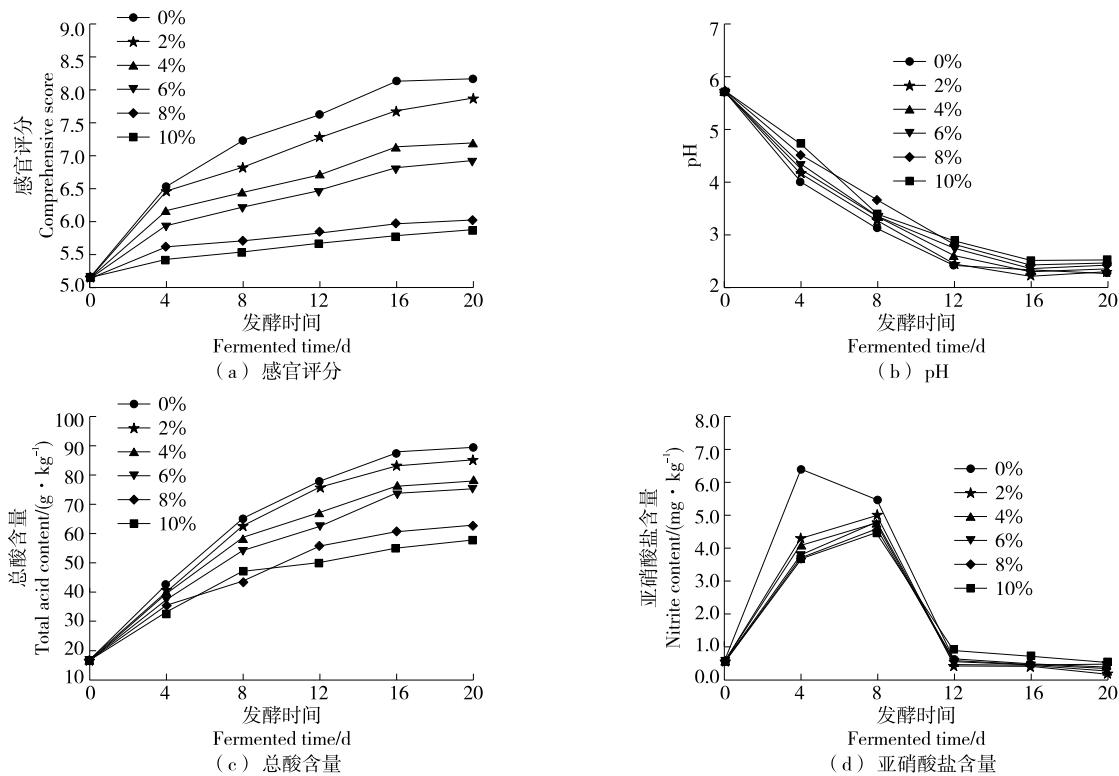


图 2 食盐添加量对酸笋品质的影响

Figure 2 Effects of salt addition levels on the quality of fermented bamboo shoots

累积,0%和2%食盐组的总酸含量较高,8%~10%组的酸含量较低,表明低盐环境有利于酸的生成。因此,2%~4%的食盐添加量有利于提高酸笋的品质和安全性。

2.1.3 葡萄糖添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响 如图3所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH值、总酸含量和亚硝酸盐含量均受到葡萄糖添加量的影响。随着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分和总酸含量整体呈上升趋势,其中添加4%葡萄糖的酸笋感官评分最高,添

加5%葡萄糖的酸笋总酸含量最高,表明适量添加葡萄糖有助于改善酸笋的感官和品质。Choi等^[14]研究也显示,甜味剂对萝卜泡菜发酵品质特性有显著的影响。发酵初期pH值迅速下降,而未添加葡萄糖组pH下降速度相对较慢,可能是由于乳酸菌缺乏充足碳源导致产酸能力降低所致。各组亚硝酸盐含量均于发酵第8天达到峰值,随后迅速下降,且所有葡萄糖添加组的亚硝酸盐含量均符合国家标准限值(20 mg/kg)^[12]。

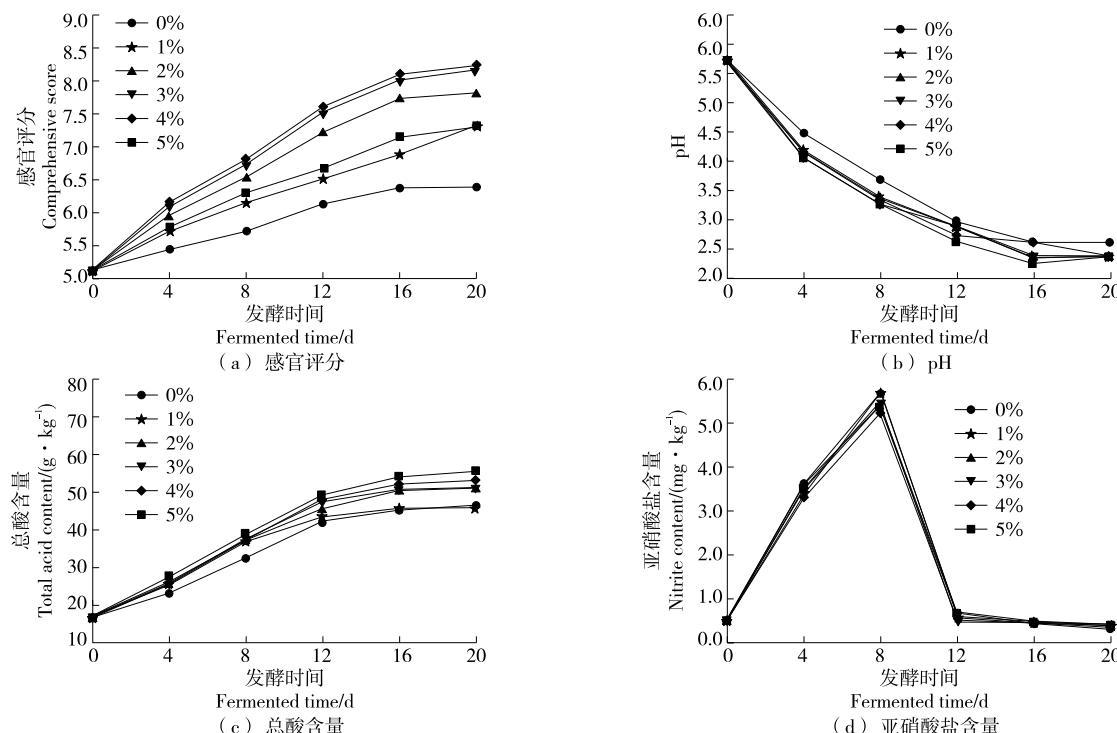


图3 葡萄糖添加量对酸笋品质的影响

Figure 3 Effects of glucose addition levels on the quality of fermented bamboo shoots

2.1.4 氯化钙添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响 如图4所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH值、总酸含量和亚硝酸盐含量均受到氯化钙添加量的影响。随着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分总体呈上升趋势,以添加0.06%和0.08%氯化钙的感官评分较高,表明适量加入氯化钙可以改善酸笋的口感和质地。发酵初期pH值迅速下降,总酸含量则在发酵过程中逐步上升,添加0.08%和0.10%氯化钙的pH下降幅度相对较大,总酸含量更高,可能是由于钙离子促进发酵,从而加快了酸的产生^[15]。各组亚硝酸盐含量的变化趋势与图3中的结果相似,表明氯化钙和葡萄糖在亚硝酸盐代谢动力学上可能未产生截然不同的影响模式。

2.1.5 维生素C添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响 如图5所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH值、总酸含量及亚硝酸盐含量均受维生素C添加量的影响。随

着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分呈上升趋势,添加0.25%维生素C的酸笋感官评分最高,表明适量添加维生素C能够改善酸笋的风味和口感。pH值在发酵初期迅速下降,添加0.25%维生素C的pH值下降速度较快,可能是由于维生素C促进了乳酸菌的生长,加快了酸的生成。亚硝酸盐含量在发酵第8天达到峰值,随后下降,添加维生素C的酸笋亚硝酸盐含量较低,这与维生素C可促进亚硝酸盐还原、抑制亚硝化反应的报道^[16]一致。总酸含量在发酵期间逐步上升,未添加维生素C的酸笋总酸含量较低,表明维生素C对乳酸菌的生长有促进作用,能够提高酸笋的品质和安全性。

2.1.6 酪糟添加量对醪糟酸笋感官及理化指标的影响

如图6所示,发酵过程中,酸笋的感官评分、pH值、总酸含量和亚硝酸盐含量均受到醪糟添加量的影响。随着发酵时间的延长(0~20 d),感官评分整体呈上升趋势,其

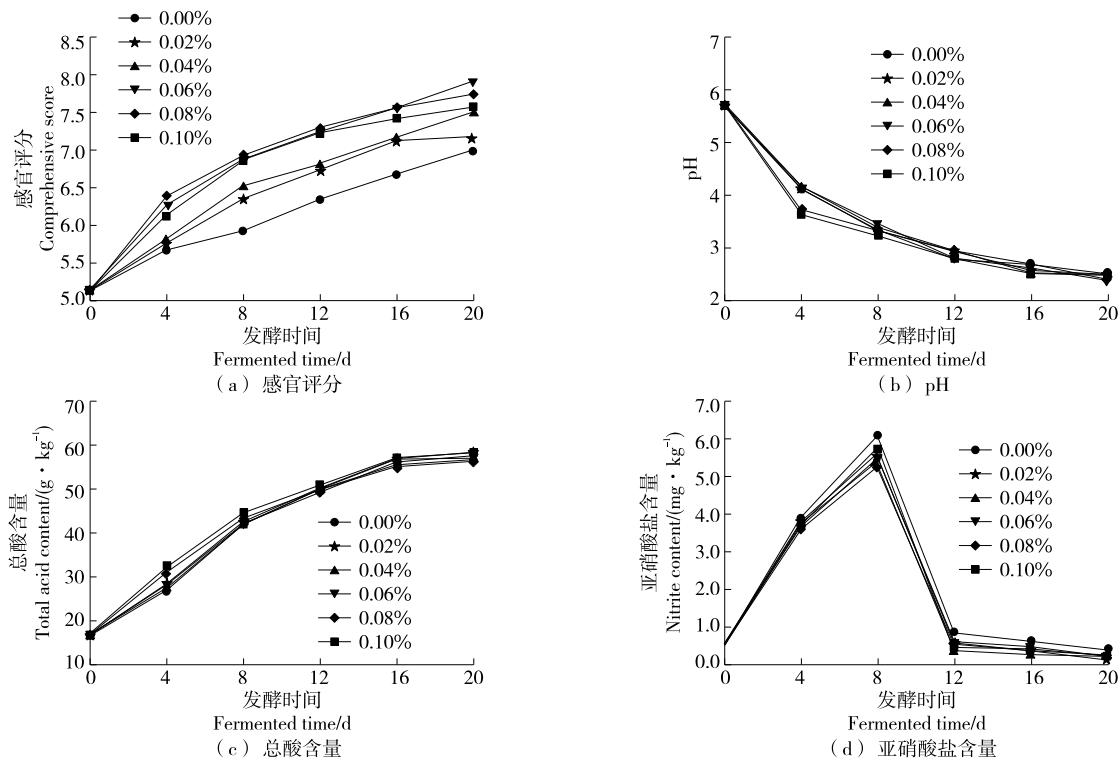


图 4 氯化钙添加量对酸笋品质的影响

Figure 4 Effects of calcium chloride addition levels on the quality of fermented bamboo shoots

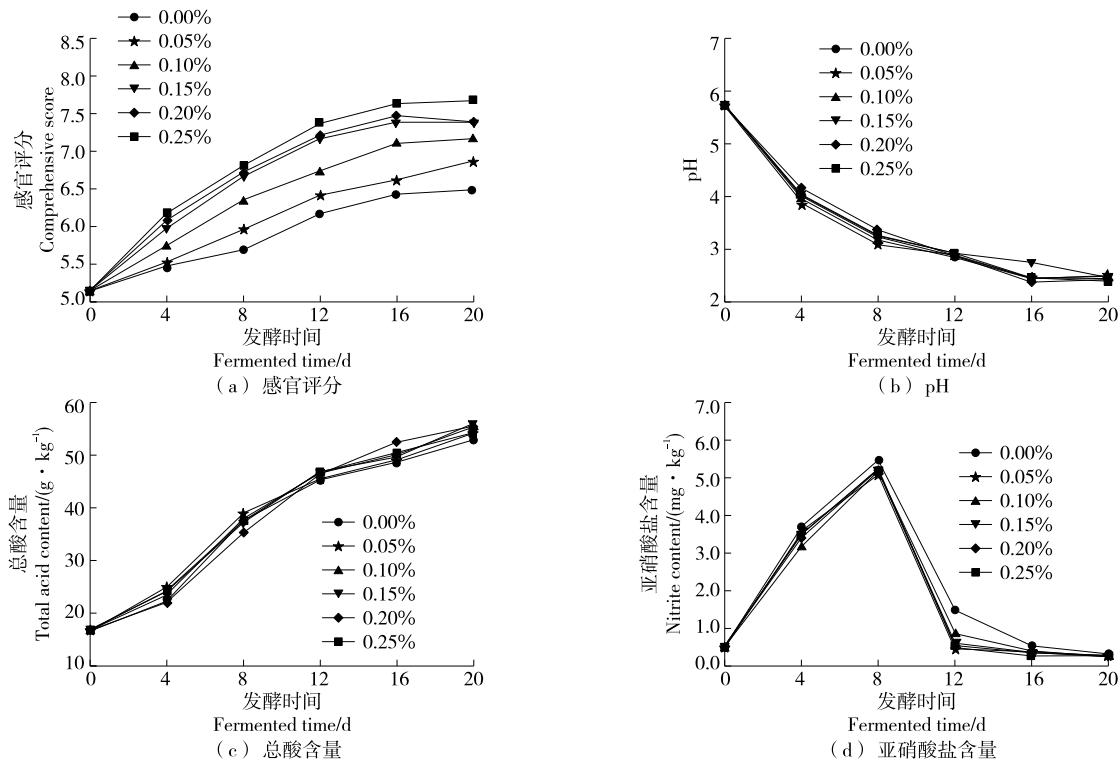


图 5 维生素 C 添加量对酸笋品质的影响

Figure 5 Effects of vitamin C addition levels on the quality of fermented bamboo shoots

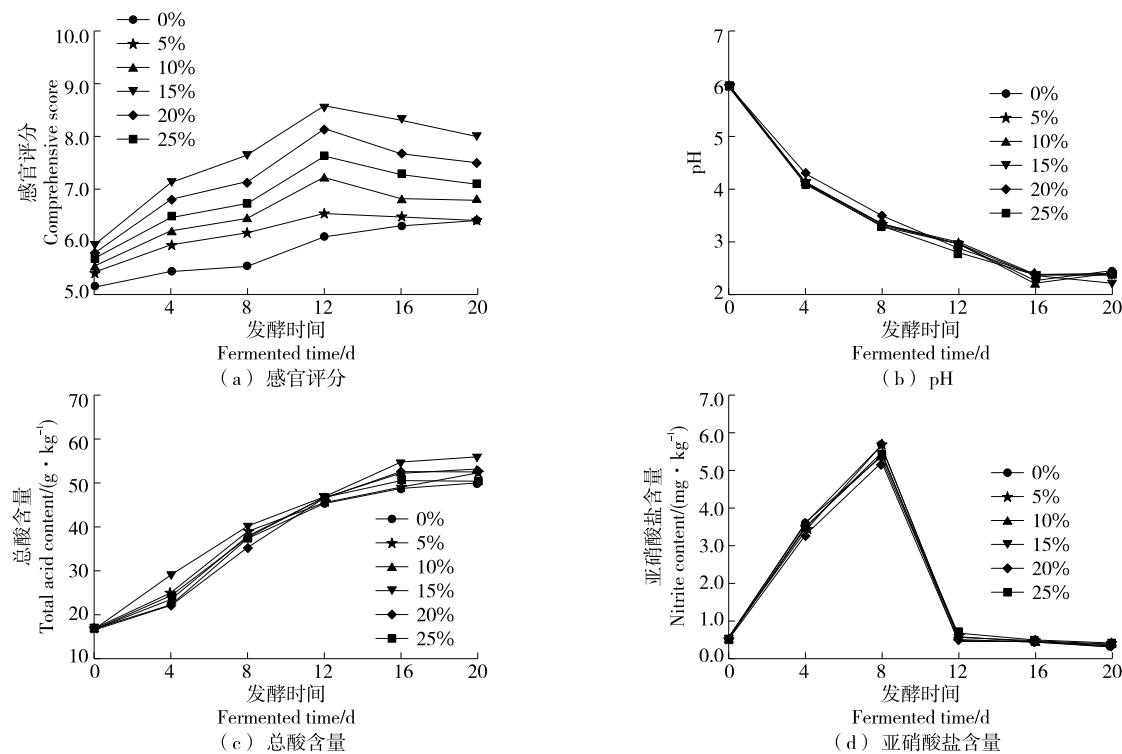


图6 饴糟添加量对酸笋品质的影响

Figure 6 Effects of sweet rice wine residue levels on the quality of fermented bamboo shoots

中添加15%和20%醪糟的酸笋感官评分最高,表明适量添加醪糟有助于增强酸笋的风味和口感。发酵初期pH值迅速下降,添加25%醪糟的pH下降幅度更大,可能是由于较高剂量的醪糟进一步促进了酸的生成^[17]。各组酸笋的亚硝酸盐含量均在发酵第8天达到峰值,随后下降;醪糟添加量较高的组别亚硝酸盐降解速度更快,且各组的亚硝酸盐含量均符合食品安全国家标准(20 mg/kg)^[12]。总酸含量在发酵过程中逐步升高,其中未添加醪糟的总酸含量最低,而添加15%~20%醪糟的总酸含量相对较高。说明适量加入醪糟能够促进产酸,从而提高酸笋的品质和安全性。

2.2 Plackett-Burman试验

2.2.1 试验设计及结果 Plackett-Burman试验因素及水平见表2,试验设计及结果见表3。采用Minitab 17软件对表3中的数据进行多元回归分析,得到酸笋综合评分为响应值的最优方程:

$$Y=78.16-2.86A+4.93B-0.8083C+2.71D-3.91E-0.5083F \quad (3)$$

2.2.2 关键因素的确定 各因素效应评价结果见表4。

由表4可知,食盐添加量对酸笋感官评分的影响达到了极显著水平($P<0.01$),氯化钙添加量、乳酸菌添加量和醪糟添加量的影响达到了显著水平($P<0.05$),葡萄糖添加量和维生素C添加量的影响则不显著。因此,选取食盐添加量、氯化钙添加量、乳酸菌添加量和醪糟添加量4个因素作为关键因素,进行响应面优化试验。综合考虑成本、效率以及单因素试验结果,将葡萄糖添加量和维生素C添加量分别固定为4%和0.25%。

2.3 响应面试验

2.3.1 试验设计及结果 响应面试验因素及水平见表5,试验设计及结果见表6,回归模型的方差分析结果见表7。

使用Design-Expert 13对表6中响应面试验数据进行回归拟合分析,得到二次回归拟合方程:

表2 Plackett-Burman试验因素及水平

Table 2 Factors and levels of Plackett-Burman experiments

水平	A 乳酸菌添加量/%	B 食盐添加量/%	C 葡萄糖添加量/%	D 饴糟添加量/%	E 氯化钙添加量/%	F 维生素C添加量/%
1	0.15	2	3	0.15	0.04	10
-1	0.25	6	5	0.25	0.08	20

表 3 Plackett-Burman 试验设计及结果

Table 3 Design and results of Plackett-Burman experiments

试验号	A	B	C	D	E	F	综合评分
1	1	-1	1	-1	-1	-1	70.6
2	1	1	-1	1	-1	-1	90.0
3	-1	1	1	-1	1	-1	79.4
4	1	-1	1	1	-1	1	76.8
5	1	1	-1	1	1	-1	78.5
6	1	1	1	-1	1	1	75.9
7	-1	1	1	1	-1	1	88.2
8	-1	-1	1	1	1	-1	73.2
9	-1	-1	-1	1	1	1	78.5
10	1	-1	-1	-1	1	1	60.0
11	-1	1	-1	-1	-1	1	86.5
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	80.3

表 4 Plackett-Burman 试验因素、水平及显著性分析[†]

Table 4 Factors, levels, and significance analysis of Plackett-Burman experiments

来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	6	671.37	111.90	8.74	0.015 5	显著
A	1	98.04	98.04	7.66	0.039 5	显著
B	1	291.07	291.07	22.73	0.005 0	显著
C	1	7.84	7.84	0.61	0.469 3	不显著
D	1	88.02	88.02	6.37	0.047 0	显著
E	1	183.30	183.30	14.32	0.012 8	显著
F	1	3.10	3.10	0.24	0.643 5	不显著
残差	5	64.02	12.80			
总平方和	11	735.39				

[†] 决定系数(R^2)0.912 9; 调整决定系数(R_{Adj}^2)0.808 5; 预测决定系数为0.498 6; 信噪比为9.946 7。

表 5 响应面试验因素及水平

Table 5 Factors and levels of response surface methodology

水平	X ₁ 乳酸菌 添加量/%	X ₂ 食盐 添加量/%	X ₃ 氯化钙 添加量/%	X ₄ 酸糟 添加量/%
-1	0.15	2	0.04	10
0	0.20	4	0.06	15
1	0.25	6	0.08	20

$$Y=85.24+1.94X_1+6.69X_2+1.47X_3+3.98X_4-0.275X_1X_2-0.9X_1X_4+1.07X_2X_3+0.325X_2X_4+0.025X_3X_4-4.37X_1^2-5.37X_2^2-1.86X_3^2-9.74X_4^2 \quad (4)$$

由表 7 可知, 模型差异极显著($P<0.01$), 失拟不显著($P>0.05$), 说明所得模型拟合度良好。 $R^2=0.961 0$, $R_{\text{Adj}}^2=0.922 0$, 说明此模型能较准确且真实地模拟、预测醪糟酸笋的发酵工艺条件。

表 6 响应面试验设计及结果

Table 6 Design and results of response surface methodology

水平	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	综合评分
1	-1	-1	0	0	68.0
2	1	-1	0	0	72.2
3	-1	1	0	0	80.2
4	1	1	0	0	83.3
5	0	0	-1	-1	68.6
6	0	0	1	-1	71.6
7	0	0	-1	1	76.5
8	0	0	1	1	79.6
9	-1	0	0	-1	63.7
10	1	0	0	-1	70.4
11	1	0	0	1	75.3
12	1	0	0	1	78.4
13	0	-1	-1	0	69.8
14	0	1	-1	0	83.9
15	0	-1	1	0	71.6
16	0	1	1	0	90.0
17	1	0	-1	0	75.3
18	1	0	-1	0	78.4
19	1	0	1	0	77.1
20	1	0	1	0	80.2
21	0	-1	0	-1	60.0
22	0	1	0	-1	71.6
23	0	-1	0	1	65.5
24	0	1	0	1	78.4
25	0	0	0	0	85.1
26	0	0	0	0	84.5
27	0	0	0	0	85.1
28	0	0	0	0	88.8
29	0	0	0	0	82.7

2.3.2 响应面结果分析与验证 由图 7 可知, 各因素间交互作用的响应面均呈抛物面且开口均向下, 说明有极大值点。通过响应面优化设计分析, 确定醪糟酸笋的最适宜发酵工艺为乳酸菌添加量0.250%、食盐添加量5.319%、氯化钙添加量0.072% 和醪糟添加量15.848%, 该工艺条件下感官评分预测值为85.619。为便于操作, 对优化后试验条件适当调整为乳酸菌添加量0.25%、食盐添加量5.00%、氯化钙添加量0.07% 和醪糟添加量16.00%, 在此条件下进行验证实验, 综合评分为89, 高于大部分响应面试验组合且与模型预测值接近, 表明所建立模型具有较好的预测性和实用性。尽管表6中个别组合的综合评分达到90, 但其食盐和氯化钙添加量较高, 不利于产品的健康属性与成本控制, 因此最终未将该组合作为推荐工艺参数。

表 7 回归模型方差分析[†]
Table 7 Variance analysis of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	1 537.690	14	109.830	24.650	<0.000 1	显著
X_1	45.240	1	45.240	10.150	0.006 6	显著
X_2	537.340	1	537.340	120.580	<0.000 1	显著
X_3	25.810	1	25.810	5.790	0.030 5	显著
X_4	190.400	1	190.400	42.730	<0.000 1	显著
X_1X_2	0.303	1	0.303	0.068	0.798 2	不显著
X_1X_3	0.000	1	0.000	0.000	1.000 0	不显著
X_1X_4	3.240	1	3.240	0.727	0.408 2	不显著
X_2X_3	4.620	1	4.620	1.040	0.325 7	不显著
X_2X_4	0.423	1	0.423	0.095	0.762 7	不显著
X_3X_4	0.003	1	0.003	0.001	0.981 4	不显著
X_1^2	124.110	1	124.110	27.850	0.000 1	显著
X_2^2	187.340	1	187.340	42.040	<0.000 1	显著
X_3^2	22.480	1	22.480	5.040	0.041 4	显著
X_4^2	614.940	1	614.940	137.990	<0.000 1	显著
残差	62.390	14	4.460			
失拟项	42.680	10	4.270	0.866	0.613 6	不显著
纯误差	19.710	4	4.930			
总和	1 600.080	28				

† $R^2=0.961\ 0$; $R_{Adj}^2=0.922\ 0$ 。

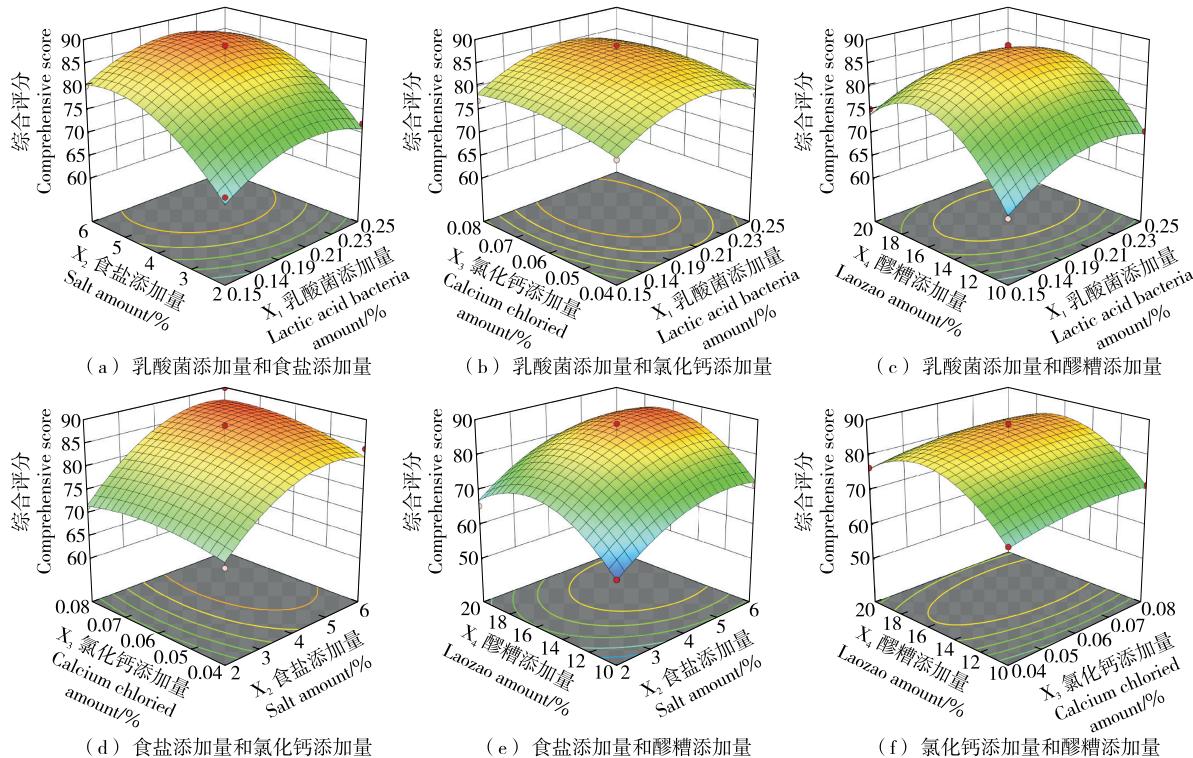


图 7 各因素交互作用对醪糟酸笋综合评分影响的响应面图

Figure 7 Response surface plots for interaction effects of different factors on the comprehensive score of fermented bamboo shoots with sweet rice wine residue

2.4 饴糟发酵酸笋与自然发酵酸笋营养风味对比

2.4.1 品质与主要营养成分分析 由表 8 可知,醪糟酸笋的感官评分、总酸、可溶性总糖、脂肪、蛋白质和氨基酸态氮含量显著高于自然发酵酸笋($P<0.05$),pH 则相反,而亚硝酸盐、总黄酮、总多酚含量无显著性差异。这可能与醪糟发酵过程中微生物群落组成及酶促作用的不同有关。醪糟中加入的糯米经过酒曲糖化作用产生了丰富的可发酵糖,为乳酸菌大量产酸提供了充足底物^[18]。乳酸菌迅速繁殖并产生有机酸,不仅降低了发酵体系的 pH、提高了酸度,也有助于抑制亚硝酸盐的积累^[19]。醪糟发酵引入的酒曲富含多种微生物及其分泌的水解酶(如淀粉酶、蛋白酶等),能够加速将竹笋原料中的淀粉和蛋白质降解为可发酵糖和氨基酸^[20]。这一过程使醪糟发酵体系中底物更加充足,乳酸菌得以产生更多的有机酸,从而显著降低 pH 并提高总酸度^[18]。同时,大量氨基酸和肽的积累赋予了产品更突出的鲜味和更复杂的风味层次^[4]。醪糟发酵过程中酵母等微生物的参与也可能产生醇类、酯类等挥发性风味物质,提升酸笋的香气丰富度^[4]。相较之下,自然发酵酸笋由于缺乏外源发酵底物和复合菌种的协同作用,风味和酸度的提升相对有限。醪糟发酵过程中氨基酸态氮的大幅提高也印证了蛋白质发生了显著水解。汤娇娇等^[21]研究发现,竹笋在发酵 72 h 后其蛋白质

表 8 酸笋主要营养成分的含量(以湿基计)对比[†]

Table 8 Comparison in content of main nutritional components in fermented bamboo shoots (counted by wet basis)

样品	感官评分	pH	总酸/ (g·kg ⁻¹)	亚硝酸盐/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性总糖/ (mg·kg ⁻¹)
醪糟酸笋	8.63±0.01 ^a	2.73±0.02 ^a	52.15±0.18 ^a	0.54±0.001	1.50±0.020 ^a
自然发酵酸笋	7.53±0.02 ^b	3.89±0.02 ^b	43.65±0.16 ^b	0.61±0.001	0.40±0.005 ^b
样品	脂肪/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	蛋白质/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	氨基酸态氮/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	总黄酮/ (mg RE·g ⁻¹)	总多酚/ (mg GAE·g ⁻¹)
醪糟酸笋	0.31±0.010 ^a	3.91±0.01 ^a	0.38±0.002 ^a	0.15±0.002	0.45±0.003
自然发酵酸笋	0.08±0.003 ^b	2.12±0.02 ^b	0.12±0.010 ^b	0.11±0.001	0.41±0.002

[†] 同列小写字母不同表示两样品间差异显著($P<0.05$)。

含量和总游离氨基酸含量均显著上升。这些由蛋白质降解产生的氨基酸不仅提高了产品的营养价值,同时也提供了鲜味物质,是醪糟发酵酸笋风味更佳的原因之一^[4]。

表8中两种发酵方式制得的酸笋的总黄酮和总多酚含量

差异并不显著,可能是由于发酵周期较短或工艺条件对酚类物质的释放作用有限。综上,醪糟酸笋感官及营养指标整体优于自然发酵酸笋。

2.4.2 挥发性成分 由表9可知,两种酸笋样品的挥发性

表 9 酸笋主要挥发性成分[†]

Table 9 Major volatile components of fermented bamboo shoots

组分	CAS号	保留时间/ min	相对含量/%	
			醪糟发酵酸笋	自然发酵酸笋
乙醛	75-07-0	1.960	ND	0.21
乙醇	64-17-5	2.853	ND	1.42
丙醛	123-38-6	3.163	ND	0.02
异丁醛	78-84-2	4.677	ND	0.04
正丙醇	71-23-8	5.583	ND	1.29
乙酸乙酯	141-78-6	6.517	ND	0.08
戊酸丙酯	141-06-0	13.043	0.15	ND
正己酸乙酯	123-66-0	13.209	0.39	ND
对甲基苯酚	106-44-5	17.786	97.81	95.19
己酸丙酯	626-77-7	18.197	0.23	ND
己酸	142-62-1	19.190	ND	1.14
2-乙基己醇	104-76-7	20.904	ND	0.14
2-甲氧基-4-甲基苯酚	93-51-6	21.580	0.18	ND
辛酸乙酯	106-32-1	21.713	0.07	ND
环己甲酸丙酯	6739-34-0	22.818	0.09	ND
辛酸丙酯	624-13-5	24.668	0.05	ND
茶香螺烷	36431-72-8	24.902	0.11	ND
辛酸	124-07-2	27.693	ND	0.47
十二甲基二氢六硅氧烷	995-82-4	29.895	0.02	ND
巴伦西亚橘烯	4630-07-3	29.977	0.02	ND
硬脂基溴	112-89-0	31.193	0.02	ND
2,6-二羟基苯甲酸三(三甲基硅基)酯	3782-85-2	31.723	0.02	ND
新间白术醇	5945-72-2	31.852	0.02	ND
5-(1-甲基丙基)-壬烷	62185-54-0	32.720	0.12	ND
植烷	638v36v8	32.787	0.02	ND
2-硝基-N-(4-(吡啶-2-基)噻唑-2-基)苯甲酰胺	467217-29-4	34.018	0.11	ND
棕榈酸乙酯	628-97-7	34.186	0.24	ND
十六烷酸丙酯	2239-78-3	35.109	0.21	ND
亚油酸乙酯	544-35-4	35.983	0.03	ND

风味成分种类和相对含量存在显著差异。其中醪糟发酵酸笋检出挥发性成分的种类(21种)高于自然发酵酸笋(10种)。就主体气味物质而言,两者均以对甲基苯酚为主:醪糟酸笋相对含量达97.81%,自然发酵酸笋亦达95.19%。对甲基苯酚阈值极低(约0.003 mg/kg),高稀释度即可贡献典型“臭味”印象,被认为是酸笋标志性气味的核心化合物,该结果与周杏荣等^[22]和Zhang等^[23]关于螺蛳粉酸笋的报道一致。此外,醪糟发酵酸笋中共检出12种酯类,合计约1.38%,其中己酸乙酯约0.39%(呈水果香),棕榈酸乙酯约0.24%(呈蜡质香),为整体气味提供了更为圆润的果香与脂香背景;自然发酵酸笋仅检出乙酸乙酯(约0.08%),酯化程度明显偏低^[24-25]。相对而言,自然发酵酸笋中酸类(4种,总量约2.77%)与醇/醛类(4种,总量约3.06%)占比较高,如己酸(约1.14%)、辛酸(约0.47%)、乙醇(约1.42%)与正丙醇(约1.29%)等,使得发酵酸笋容易在发酵早期呈现出“生青味”与更突出的酸感^[26]。

造成上述差异的机制与微生物组成及代谢通路密切相关。醪糟带入的酵母与外源乳酸菌协同作用,使发酵启动更快、底物转化更充分:酵母产生的乙醇与高级醇为后续酯化反应提供前体,配合乳酸菌降低pH并通过竞争抑制杂菌,从而减少蛋白质降解类异味的累积并促进酯类生成^[27]。醪糟酸笋中较高的对甲基苯酚含量,可能源于醪糟与乳酸菌共同营造的特定微生物环境,加速了原料中酪氨酸经微生物脱羧生成对甲基苯酚的代谢通路^[28]。醪糟和乳酸菌的加入,使得发酵前期乳酸菌(如植物乳杆菌、明串珠菌等)数量快速增多,可加速微生物对发酵原料中碳水化合物和蛋白质等的利用,从而产生更多有利的降解产物^[28]。醪糟发酵以同型发酵乳酸菌为主,乳酸产量相对更高而乙酸产量相对减少^[29];自然发酵过程中则可能由于异型乳酸发酵以及其他杂菌的作用产生较多乙酸、丁酸等挥发性脂肪酸,增添了酸笋酸臭气味的复杂度^[30]。综上所述,醪糟发酵通过酵母菌和乳酸菌的引入间接调控了发酵微生物群落及其代谢途径,使酸笋风味朝更加浓郁芳香的方向转变;而自然发酵由于菌种杂乱且发酵缓慢,易积累酚类、吲哚类和短链脂肪酸等具有刺激性气味的代谢产物,其成品风味更为酸烈刺鼻。

3 结论

该研究针对传统酸笋自然发酵存在周期长、品质不稳定以及亚硝酸盐可能超标等问题,引入醪糟与乳酸菌复合发酵并采用响应面方法优化关键参数,建立了一种能够提升酸笋风味和营养品质的发酵工艺。结果显示,与自然发酵酸笋相比,醪糟发酵酸笋在酸度、营养成分含量和感官品质方面更好。该研究通过多因素协同优化和复合发酵体系,充分发挥了醪糟中酵母菌及酶系与外源乳酸菌之间的协同作用,弥补了以往研究中依赖单一因

素或单菌种发酵的不足。后续将进一步开展基于高通量测序与非靶向代谢组学的多组学联合解析,阐明醪糟—乳酸菌复合体系中关键功能菌群的时空演替及其风味代谢通路,并建立机制化的品质形成模型。

参考文献

- [1] CHEN C X, CHENG G G, LIU Y P, 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.
- [2] 陈璟,赵子龙,林丽华.酸笋的挥发性成分及其应用研究进展[J].中国调味品,2024,49(8): 215-220.
CHEN J, ZHAO Z L, LIN L H. Research progress on volatile components and application of sour bamboo shoots[J]. China Condiment, 2024, 49(8): 215-220.
- [3] 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: 48-66.
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: 48-66.
- [4] LONG Z J, ZHAO S L, XU X F, et al. Dynamic changes in flavor and microbiota in traditionally fermented bamboo shoots (*Chimonobambusa szechuanensis*) [J]. Foods, 2023, 12(16): 3 035.
- [5] BEHERA P, BALAJI S. Health benefits of fermented bamboo shoots: the twenty-first century green gold of Northeast India[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2021, 193(6): 1 800-1 812.
- [6] 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 Y L, PENG Y M, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria from traditional pickle and its application in *dendrocalamus latiflorus* pickle[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(8): 33-37, 45.
- [7] 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 Y Y, LIN H, YANG C, et al. Development and quality analysis of Liuzhou sour bamboo shoots with low nitrite[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 220-224.
- [8] 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: 22-28.
LI X Y. Study on the variation law of microbial community and main components in natural fermentation of sour bamboo shoots [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020: 22-28.
- [9] 于亚辉,陈心雯,李晓婷,等.响应面法优化鸡肉蛋白酶解工艺[J].福建农业学报,2020,35(1): 80-89.
YU Y H, CHEN X W, LI X T, et al. Optimized proteolysis of

- chicken protein for food flavoring[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35(1): 80-89.
- [10] 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 A, DU H P, CHENG H, et al. Comparison of major components, volatile compounds, and antioxidant activity of two types of sour bamboo shoots[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 145-151.
- [11] XU X F, LONG Z J, DU W N, et al. Dynamics of physicochemical properties, flavor, and microbial communities of salt-free bamboo shoots during natural fermentation: correlation between microorganisms and metabolites[J]. *Fermentation*, 2023, 9(8): 733.
- [12] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 国家卫生健康委, 2022.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard maximum levels of contaminants in foods: GB 2762—2022[S]. Beijing: National Health Commission of the People's Republic of China, 2022.
- [13] LEE M A, CHOI Y J, LEE H, et al. Influence of salinity on the microbial community composition and metabolite profile in kimchi[J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 308.
- [14] CHOI Y J, LEE H W, YANG J H, et al. Effects of sweetener on the quality characteristics of radish kimchi during fermentation [J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2023, 9: 2286045.
- [15] MCFEETERS R F, PÉREZ-DÍAZ I. Fermentation of cucumbers brined with calcium chloride instead of sodium chloride[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(3): 291-296.
- [16] TIAN X J, HU W, CHEN J H, et al. The supplement of vitamin C facilitates *L*-lactic acid biosynthesis in *Lactobacillus thermophilus* A69 from sweet sorghum juice coupled with soybean hydrolysate as feedstocks[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 146: 112159.
- [17] 汪铃, 王亮. 传统发酵蔬菜制作工艺、品质特征及影响因素研究概况[J]. 中国酿造, 2022, 41(7): 21-25.
- WANG L, WANG L. Overview of production process, quality characteristics and influencing factors of traditional fermented vegetables[J]. *China Brewing*, 2022, 41(7): 21-25.
- [18] YASUI M, ODA K, MASUO S, et al. Invasive growth of *Aspergillus oryzae* in rice koji and increase of nuclear number [J]. *Fungal Biology and Biotechnology*, 2020, 7(1): 8.
- [19] TAN X Q, CUI F C, WANG D F, et al. Fermented vegetables: health benefits, defects, and current technological solutions[J]. *Foods*, 2024, 13(1): 38.
- [20] ITO K, MATSUYAMA A. Koji molds for Japanese soy sauce brewing: characteristics and key enzymes[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(8): 658.
- [21] 汤娇娇, 李珂, 张智鑫, 等. 竹笋加工副产物功能成分研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 233-240.
- TANG J J, LI K, ZHANG Z X, et al. Progress on utilization of bamboo shoot by-products and functional components[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 233-240.
- [22] 周杏荣, 陈晓艺, 蒋立文, 等. 竹笋自然发酵过程中风味物质变化规律[J]. 中国酿造, 2019, 38(8): 20-24.
- ZHOU X R, CHEN X Y, JIANG L W, et al. Changes of flavor substances in natural fermentation of bamboo shoots[J]. *China Brewing*, 2019, 38(8): 20-24.
- [23] ZHANG X Y, WANG A X, YAO H X L, et al. Research advancements on the flavor compounds formation mechanism of pickled bamboo shoots in river snails rice noodles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 186: 115226.
- [24] 胡博文, 陈皓文, 张焱盈, 等. 四种发酵果酒香气成分及抗氧化活性[J]. 食品与营养科学, 2021, 10(3): 212-223.
- HU B W, CHEN H W, ZHANG Y Y, et al. Aroma composition and antioxidant capacity of four fruit fermented wine[J]. *Hans Journal of Food and Nutrition Science*, 2021, 10(3): 212-223.
- [25] GUO R C, YU F T, WANG C H, et al. Determination of the volatiles in fermented bamboo shoots by HS-SPME-GC-O-MS and aroma extract dilution analysis[J]. *Analytical Letters*, 2020, 54(7): 1 162-1 179.
- [26] 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: 28-47.
- ZHU Z H. Study on fermented bamboo shoot nutrition and flavor components[D]. Nanning: Guangxi University, 2014: 28-47.
- [27] CHEN M L, XIA H Q, ZUO X F, et al. Screening and characterization of lactic acid bacteria and fermentation of GABA-enriched bamboo shoots[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 133538.
- [28] PASSMORE I J, LETERTRE M P M, PRESTON M D, et al. Para-cresol production by *Clostridium difficile* affects microbial diversity and membrane integrity of Gram-negative bacteria[J]. *PLoS Pathogens*, 2018, 14(9): e1007191.
- [29] 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 B J, HU R, WU L R, et al. Advances on microbial flora succession and flavor substance formation mechanism in Suansun[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(4): 315-321.
- [30] LIANG H, HE Z, WANG X Y, et al. Bacterial profiles and volatile flavor compounds in commercial Suancui with varying salt concentration from Northeastern China[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109384.