DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250905003
引用格式: 王惠, 石学梅, 王淋, 等. 食醋发酵过程中生物胺的变化规律及影响因素研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 292–299.
WANG H, SHI XM, WANG L, *et al*. Study on the variation patterns and influencing factors of biogenic amines during vinegar fermentation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 292–299. (in Chinese with English abstract).

食醋发酵过程中生物胺的变化规律及影响因素研究

王 惠[1], 石学梅[1], 王 淋[1], 刘 源[2], 杨 镇[1], 黄永杰[3], 潘丽娜[1], 傅其旭[1], 王宪斌[1*], 王 跃[4]

(1. 四川元景达食品有限公司, 泸州 646000; 2. 泸州护国味业有限公司, 泸州 646000; 3. 四川生生护国调味品有限公司, 凉山彝族自治州 615000; 4. 泸州老窖集团有限责任公司, 泸州 646000)

摘 要: 目的 研究食醋发酵过程中生物胺的变化规律, 并探究生产条件对生物胺积累的影响。**方法** 利用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)分析了食醋不同发酵时间下生物胺的含量; 同时探究了料液比(1:1.1、1:1.2、1:1.3, g:mL)、醋酸菌添加量(1.0%、1.5%、2.0%)、黑曲霉添加量(0.5%、1.0%、1.5%)对食醋发酵过程中生物胺产生的影响。**结果** 食醋中生物胺含量随着发酵时间的延长呈现先增加后降低的趋势; 在1:1.2 (g:mL)的料液比下, 食醋发酵结束后的生物胺含量最高, 为190.49 mg/kg; 在醋酸菌添加量为2.0%时, 食醋发酵结束后的生物胺含量最高, 为220.12 mg/kg; 黑曲霉添加量为1.5%时, 食醋发酵结束后的生物胺含量最高, 为228.29 mg/kg。**结论** 生物胺作为食醋发酵过程中的有害物质, 其含量过高会对人体健康产生一定影响, 通过改变料液比、醋酸菌添加量和黑曲霉添加量, 可以影响食醋发酵过程中生物胺的形成, 从而有效提高食醋的安全性。

关键词: 食醋; 发酵; 生产条件; 生物胺; 变化规律

Study on the variation patterns and influencing factors of biogenic amines during vinegar fermentation

WANG Hui[1], SHI Xue-Mei[1], WANG Lin[1], LIU Yuan[2], YANG Zhen[1], HUANG Yong-Jie[3], PAN Li-Na[1], FU Qi-Xu[1], WANG Xian-Bin[1*], WANG Yue[4]

(1. *Sichuan Yuanjingda Food Co*., *Ltd*., *Luzhou* 646000, *China*; 2. *Luzhou Huguo Flavor Industry Co*., *Ltd*., *Luzhou* 646000, *China*; 3. *Sichuan Shengsheng Huguo Condiment Co*., *Ltd*., *Liangshan Yi Autonomous Prefecture* 615000, *China*; 4. *Luzhou Laojiao Group Co*., *Ltd*., *Luzhou* 646000, *China*)

收稿日期: 2025-09-05
基金项目: 泸州市科技计划项目(2024SYF190)
第一作者: 王惠(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: 1772380448@qq.com
***通信作者:** 王宪斌(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品发酵与工程。E-mail: 287127984@qq.com

ABSTRACT: Objective　To study the variation pattern of biogenic amines during vinegar fermentation, and explore the influence of production conditions on the accumulation of biogenic amines. **Methods**　The content of biogenic amines at different fermentation stages was analyzed using high performance liquid chromatography (HPLC). At the same time, the effects of the ratio of material to liquid (1:1.1, 1:1.2, 1:1.3, g:mL), the addition amount of acetic acid bacteria (1.0%, 1.5%, 2.0%) and *Aspergillus niger* (0.5%, 1.0%, 1.5%) on biogenic amines during vinegar fermentation were investigated. **Results**　The biogenic amine content in vinegar increased first and then decreased with the fermentation time. When the ratio of material to liquid was 1:1.2 (g:mL), the biogenic amine content of vinegar after fermentation was the highest, which was 190.49 mg/kg. When the addition of acetic acid bacteria was 2.0%, the biogenic amine content of vinegar after fermentation was the highest, which was 220.12 mg/kg. When the addition of *Aspergillus niger* was 1.5%, the biogenic amine content of vinegar after fermentation was the highest, which was 228.29 mg/kg. **Conclusion**　As a harmful substance in vinegar fermentation, excessive content of biogenic amines will have a certain impact on human health. By changing the ratio of material to liquid, the addition amount of acetic acid bacteria and *Aspergillus niger*, the formation of biogenic amines in vinegar fermentation can be affected, thus effectively improving the safety of vinegar.

KEY WORDS: vinegar; fermentation; production conditions; biogenic amines; variation pattern

0　引　言

食醋作为我国传统的发酵调味品, 其生产主要依赖微生物的复杂代谢活动, 包括酒精发酵和醋酸发酵两个关键阶段[1–3]。在这一过程中, 原料中的蛋白质在微生物酶的作用下分解为游离氨基酸, 并可能进一步脱羧生成生物胺[4–7]。生物胺是一类具有生理活性的含氮化合物, 过量摄入可能引发头痛、过敏、血压升高等健康风险[8–11]。其中, 以酪胺和组胺的危害最大, 其次是尸胺和腐胺, 我国 GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》规定高组胺鱼类组胺限量是 400 mg/kg。因此, 研究食醋发酵过程中生物胺的形成的影响因素, 对保障食品安全、优化生产工艺具有重要意义。

目前, 国内外关于生物胺的研究主要集中在发酵肉制品、乳制品和酒类(如葡萄酒、啤酒)中, 而对食醋这一传统发酵食品的关注相对较少。食醋的生物胺含量受多种因素影响, 包括原料种类(如高粱、大米、小麦麸等)、发酵菌群(如酵母菌、乳酸菌、醋酸菌等)以及加工条件(如料液比、温度等)。研究表明, 乳酸菌和某些酵母菌具有较强的氨基酸脱羧能力, 可能在酒精发酵阶段促进生物胺积累[12–14]。因此, 深入探究不同发酵阶段生物胺的动态变化规律和发酵过程中生物胺形成的影响因素, 有助于制定针对性的控制措施。

本研究系统分析了食醋发酵过程中生物胺的变化趋势和食醋发酵过程中生物胺形成的影响因素。研究结果可为食醋行业的安全生产提供理论依据, 同时为其他发酵食品的生物胺控制提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

小麦麸、醋酸菌、大米、食用盐等市售。

醋酸菌成品菌种(AS1.41 和沪酿 1.01 为原种), 添加形式为菌种粉末。

氯化钠、氢氧化钠、甲醛、乙腈、丙酮、乙醚、正丁醇、三氯甲烷、正已烷、正己烷(色谱纯)、酪胺盐酸盐(纯度≥98%)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 乙酸、乙酸铵(色谱纯, 瑞春化学科技有限公司); 组胺盐酸盐标准品(纯度≥99%)、酪胺盐酸盐标准品(纯度≥98%)、腐胺盐酸盐标准品(纯度≥98%)、尸胺盐酸盐标准品(纯度≥98%)、色胺盐酸盐标准品(纯度≥99%)、亚精胺盐酸盐标准品(纯度≥99%)、精胺盐酸盐(标准品纯度≥99%)、*β*-苯乙胺标准品(纯度≥98%)、章鱼胺盐酸盐标准品(纯度≥98%)(上海麦克林生化科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

ZYDM-III-20T 超纯水机(四川卓越水处理设备有限公司); Agilent 1260 高效液相色谱仪(安捷伦科技有限公司); T960Basic 全自动电位滴定仪(济南海能仪器股份有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　食醋的发酵工艺

(1)工艺流程

如图 1, 整个工艺分为两阶段: (1)酒精发酵, (2)醋酸发酵。酒精发酵阶段, 采用液化-糖化-酒化工艺, 液化是采

用 α-淀粉酶将大米中的淀粉分解糊精; 糖化工艺是采用糖化酶将糊精进一步分解为葡萄糖等糖类; 酒化工艺是采用酵母将葡萄糖等糖类转化为酒精。醋酸发酵阶段, 将三化工艺后的酒醪液酒精度稀释为 4.5%vol~5%vol, 与小麦麸按照一定比例混合, 加入醋酸菌和黑曲霉进行醋酸发酵。

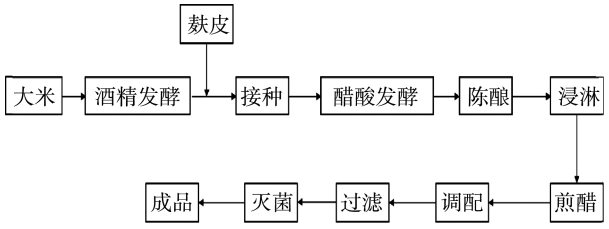


图 1 食醋工艺流程图

Fig.1 Flow diagram of vinegar process

(2)酒精发酵

液化阶段: 大米和水的配比为 1:3.1 (m:V), 将罐中水加热到 80 ℃后加入大米和 α-淀粉酶, 温度升至 93~95 ℃保温≥10 min 液化结束。

糖化阶段: 液化醪降温至 63 ℃时停止降温, 加入糖化酶, 搅拌 3 min, 维持此温度≥2 h 糖化结束。

酒化阶段: 酒化醪的温度为加入酒精酵母, 搅拌≥3 min, 酒化时间为 7 d: 前 3 d 温度控制在 28~32 ℃, 3 d 后常温进行酒化。

(3)醋酸发酵

将发酵完成的酒醪液酒精度稀释为 4.5%vol~5%vol, 按小麦麸:酒醪液=1:1.2 (g:mL, 下同)混合, 加入小麦麸重量 1.5%醋酸菌、0.5%黑曲霉进行醋酸发酵, 在醋酸发酵的过程中, 当醋醅温度≥42 ℃时进行翻醅, 醋酸发酵时间为 25 d。

醋酸发酵完成后还需陈酿一定时间再进行淋醋等后续操作。

本研究采用容量为 100 L 的 316 不锈钢容器, 麸皮的添加量为 25 kg, 其余酒化醪、醋酸菌、黑曲霉的添加量是按照麸皮的添加量进行计算。取样方式是翻醅后进行取样。

1.3.2 食醋发酵过程中的理化指标分析

总酸的检测参照 GB/T 18187—2000《酿造食醋》;

淀粉的检测参照 GB 5009.9—2023《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》;

氨基酸态氮的检测参照 GB 5009.235—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》。

1.3.3 食醋中的生物胺检测

生物胺的测定采用 GB 5009.208—2016《食品安全国家标准 食品中生物胺的测定》。

1.3.4 食醋发酵过程中生产条件对生物胺产生的影响

研究表明食醋发酵过程中料液比(小麦麸与酒醪液的比例)、醋酸菌添加量(占小麦麸重量的百分比)、黑曲霉添加量(占小麦麸重量的百分比)等对生物胺产生均有影响, 因此本研究考察发酵时间(5、10、15、20、25 d)、料液比(1:1.1、1:1.2、1:1.3)、醋酸菌成品菌种添加量(1.0%、1.5%、2.0%)、黑曲霉添加量(0.5%、1.0%、1.5%)对食醋发酵过程中生物胺形成的影响。取样时 5 个点随机取样 500 g, 混合均匀后进行检测。检测食醋的总酸、淀粉、氨基酸态氮、生物胺等重要指标。

1.4 数据处理

实验结果均进行 3 组平行实验, 并使用 SPSS 20.0 进行统计学分析, P<0.05 具有显著性差异; 再利用 Origin 2024 对试验数据和统计结果制图。

2 结果与分析

2.1 在食醋发酵过程中重要指标的变化情况

食醋发酵过程中重要指标和生物胺的变化情况研究采用料液比为 1:1.2, 醋酸菌添加量为 1.5%, 黑曲霉的添加量为 0.5%。总酸是食醋发酵的重要指标之一, 也是监测醋酸发酵结束的重要指标, 如图 2A 当总酸含量达到 4.5 g/100 mL 后停止发酵, 后续继续监控总酸变化, 发现当总酸到达 4.5 g/100 mL 后, 总酸的增长缓慢, 且此时酒精度未检出。淀粉含量的变化反映食醋在发酵过程中对淀粉的利用率, 淀粉被分解为葡萄糖, 葡萄糖供微生物的代谢活动, 同时葡萄糖也可被转化为酒精, 进而被醋酸菌利用[15–16]。除此之外, 淀粉也是固态发酵食醋中无盐固形物的主要成分。如图 2B 所示, 淀粉含量前 10 d 利用速度稍快, 从 10 d 后的利用速度稍缓, 但总体的利用效率不高, 当发酵结束时, 淀粉含量 4.75%。生物胺的前体物质是氨基酸, 微生物利用游离氨基酸合成生物胺, 因此研究生物胺含量的变化有必要监测氨基酸态氮含量。如图 2C 所示, 在发酵过程中, 氨基酸态氮含量呈现不断上升的趋势, 当发酵时间达到 15 d 后, 氨基酸态氮含量增长减缓。在生产过程中, 当发酵时间到达 20 d 后, 延长发酵时间, 总酸、淀粉含量、氨基酸态氮含量的变化趋于平缓, 若进一步延长发酵时间, 醋酸会进行过氧化, 导致总酸降低, 因此食醋发酵时间为 25 d, 可以清楚反映出总酸、淀粉含量、氨基酸态氮含量的变化趋势。

2.2 食醋中的生物胺分析

在发酵过程中, 食醋中的生物胺主要由氨基酸脱羧酶脱羧生成, 部分脂肪族生物胺由醛、酮的胺化和转氨化生成[17–21]。

如图 3 所示, 在由本研究发酵而成的食醋中的生物胺主要是苯乙胺、腐胺、尸胺、组胺、酪胺 5 种, 出峰时间分别是 16.871、18.468、20.166、21.209、27.955 min, 其余色胺、亚精胺、章鱼胺、精胺未在本研究发酵而成的食醋中检出, 该结果与已有研究结果类似, 腐胺、尸胺存在于食醋中, 组胺和酪胺存在大多数食醋中[22]。

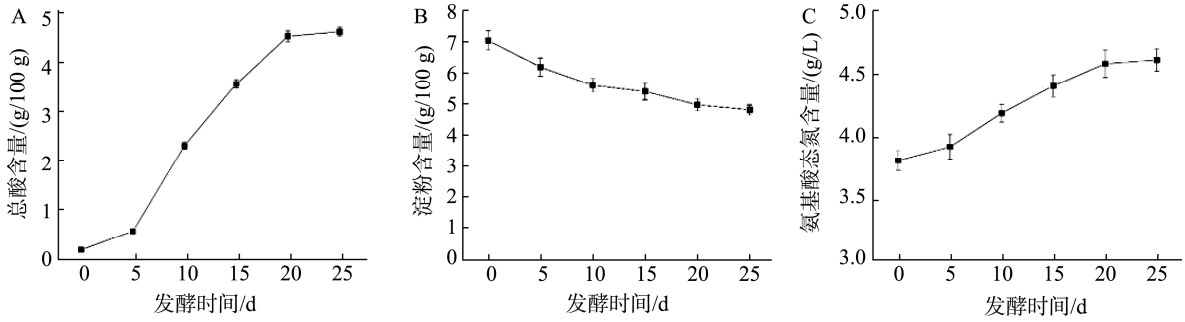
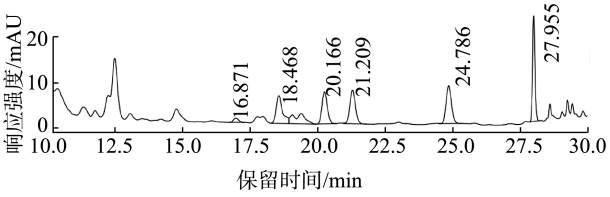


图 2　食醋发酵过程中重要指标的变化情况

Fig.2　Changes of important indicators in the fermentation process of vinegar



注: 24.786 处为内标物质。

图 3　食醋中生物胺的衍生色谱图

Fig.3　Derivative chromatogram of biogenic amines in vinegar

2.3　食醋发酵过程中生物胺变化规律

如图 4A 所示，随着发酵时间的延长，生物胺的含量逐渐上升，发酵 20 d 后生物胺含量达到顶峰，最高值为 204.91 mg/kg，但随着发酵时间的延长，生物胺的含量出现下降趋势。在醋酸发酵的过程中，微生物将小麦麸中的蛋白质分解成氨基酸，产胺微生物可利用酒精发酵结束后的氨基酸和小麦麸中蛋白质分解后的氨基酸合成生物胺，但随着发酵时间的延长，醋醅中的总酸不断升高，某些微生物对酸性环境不耐受，且醋醅中的氨基酸等前体物质不断被消耗，使生物胺的产生速率不断下降，同时环境中一些能够分解生物胺的微生物自发生长繁殖，降低生物胺含量。若进一步延长发酵时长，生物胺含量或许会持续降低。然而，在此过程中醋酸会发生过氧化反应，这一反应会致使总酸含量下降。而且，后续还有陈酿环节，陈酿过程本身也会对产品的风味和成分产生进一步影响。综合多方面因素考量，在发酵时间的研究中，选取 25 d 的发酵时长较为适宜。如图 4B 所示，在食醋的发酵过程中，发酵前期组胺和腐胺占总生物胺的比例较大，随着发酵时间的延长，苯乙胺和尸胺逐渐替代组胺和腐胺成为占总生物胺比例大的生物胺，此结果与刘超[23]的研究结果类似，四川醋的尸胺略高，组胺和酪胺的含量略少。酪胺在整个发酵过程中，占总生物胺的比例最小。

2.4　料液比对食醋发酵过程中主要理化指标和生物胺产生的影响

料液比(小麦麸重量:酒醪液重量)影响醋醅的水分和酒精度，水分过低不利于微生物的生长，且酒精度较低会导致醋酸发酵结束时的总酸含量低；料液比过大，水分高的同时酒精度也提高，过高的酒精度导致微生物难以生长，醋酸发酵缓慢。为了探究料液比对生物胺生成的影响。检测了不同料液比(1:1.1、1:1.2、1:1.3)条件下，发酵过程中生物胺含量的变化规律。

如图 5A 所示，随着醋醅发酵时间的延长，不同料液比的醋醅在发酵过程中的总酸含量都呈现增加的趋势，

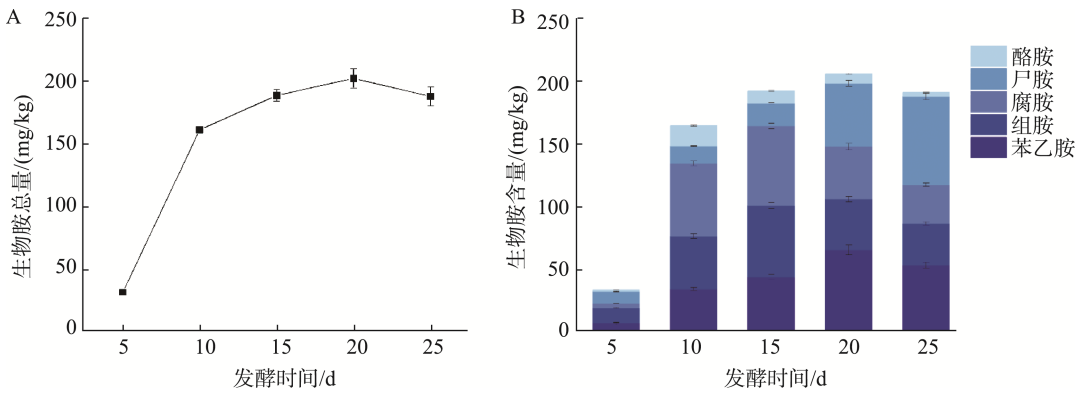


图 4　食醋发酵过程中总生物胺的变化规律

Fig.4　Changes in total biogenic amines in the fermentation process of vinegar

但料液比 1:1.2 的醋醅发酵结束总酸含量最高，因为料液比低导致醋醅中的水分过少，不利于微生物的生长，料液比高导致醋醅中的酒精度过高，同样也不利于醋醅中的微生物的生长。如图 5B 所示，不同料液比的醋醅随着发酵时间的延长，淀粉含量都呈现下降趋势。如图 5C 所示，不同料液比的醋醅随着发酵时间的延长氨基酸态氮含量都增加，但料液比 1:1.2 的醋醅氨基酸态氮含量先处于平稳，因为醋醅的水分含量和酒精度对醋醅的发酵都有影响。随着发酵时间的延长，生物胺含量的变化情况如图 5D所示，料液比为 1:1.2 的醋醅生物胺在发酵前 15 d 的增长速率最高，此时料液比为 1:1.2 的醋醅的生物胺含量明显高于其他料液比的醋醅，生物胺含量为 191.25 mg/kg，这是因为料液比为 1:1.2 的醋醅水分和酒精度含量适合微生物的生长，微生物大量合成生物胺发酵 15 d 后，氨基酸产生速率降低，导致产胺速率下降，发酵后期分解生物胺的速率大于产胺的速率，因此出现生物胺含量下降的情况。1:1.3 料液比的醋醅在 15 d 后的生物胺含量的增长速率最快，因为 1: 1.3 料液比的醋醅随着发酵时间的延长，酒精被缓慢转化和不断挥发，使醋醅中的环境逐渐适合微生物的生长，生物胺开始被快速合成。因此在发酵后期生物胺的增长速率最快。料液比为 1:1.1 醋醅由于水分含量较低，微生物的活动较为缓慢，因此产胺速率也较为缓慢。在发酵第 20 d 时生物胺含量达到最高，为 152.74 mg/kg。在发酵结束时，不同料液比(1:1.1、1:1.2、1:1.3)的醋醅中的生物胺含量分别为 149.8、190.49、160.12 mg/kg。在不同料液比的醋醅中，酪胺的含量最少，腐胺在发酵前期较少，但发酵后期在总生物胺中占比较大，苯乙胺在总生物胺的占比变化不大。如图 5E 所示。料液比通过影响水分含量和酒精度含量进而影响醋酸发酵和生物胺的合成，进而影响生物胺的含量。

2.5 醋酸菌添加量对食醋发酵过程中主要理化指标和生物胺产生的影响

醋酸菌添加量影响醋酸发酵，醋酸菌添加量高时醋酸菌会在短时间内大量繁殖，导致醋醅的总酸在短时间内迅速增加，产胺微生物为了在酸性环境中生存，会利用游离氨基酸合成生物胺[24]。为了探究醋酸菌添加量对生物胺生成的影响。检测了不同醋酸菌添加量(1.0%、1.5%、2.0%)下，发酵过程中生物胺含量的变化规律。

如图 6A 所示，随着醋醅发酵时间的延长，2.0%醋酸菌添加量醋醅在前期总酸产生速率最快，到发酵结束时总酸含量最高，达到 4.82 g/100 g。但醋酸菌的添加量对淀粉含量的变化影响不大，如图 6B 所示；醋酸菌添加量 2.0%的醋醅氨基酸态氮含量最低，氨基酸态氮检测的是氨基酸上 -NH_2 的 N 的含量，因此可用作代理氨基酸的含量。因为氨基酸是生物胺的前体物质，微生物利用氨基酸合成生物胺，醋酸菌添加量 2.0%醋醅的生物胺含量最高，消耗的氨基酸高于其他醋酸菌添加量的醋醅，如图 6C 所示。如图 6D 所示，

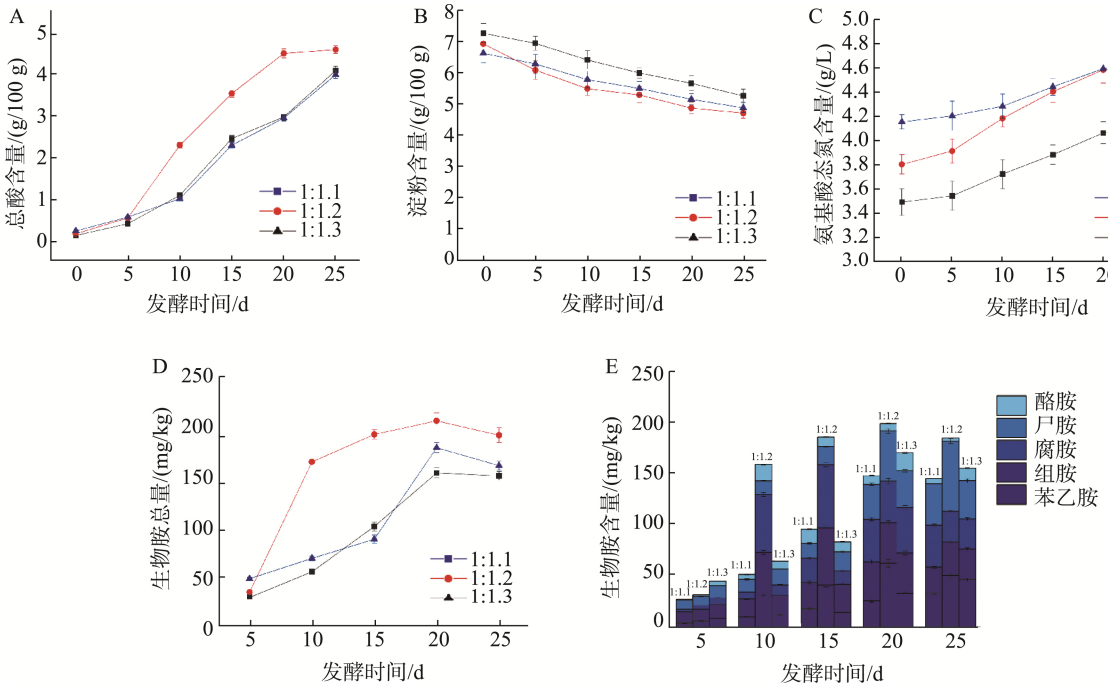


图 5 不同料液比对食醋发酵过程的影响

Fig.5 Effects of different ratio of solid to liquid in the fermentation process of vinegar

在醋醅的发酵前期，醋酸菌添加量 2.0%醋醅的生物胺的增长速率最快，在第 10 d 迅速达到了 234.29 mg/kg，发酵结束后的生物胺含量也是最高的，为 220.12 mg/kg。醋酸菌添加量 1.0%的醋醅的生物胺增长速率最慢，醋酸菌需要时间进行大量繁殖并产酸，在第 10 d 时，总酸含量明显最低，到 15 d 时总酸含量增大，微生物也在此时开始大量合成生物胺。醋酸菌的添加量没有影响各生物胺在总生物胺的占比，如图 6E 所示。

2.6　黑曲霉添加量对食醋发酵过程中主要理化指标和生物胺产生的影响

黑曲霉能产生淀粉酶，在醋醅发酵中可以增加淀粉的利用率。黑曲霉将小麦麸中的淀粉分解为糖类，酵母将糖类进一步发酵为乙醇，可供醋酸菌进行醋酸发酵。除此之外，黑曲霉还可辅助产酸，黑曲霉虽然不是食醋发酵的主力菌种，但醋酸发酵的前期也可能产生少量柠檬酸，丰富食醋的口感[25]。

如图 7A 所示，随着醋醅发酵时间的延长，黑曲霉添加量对醋醅发酵过程中总酸含量的影响较少，黑曲霉在醋酸发酵前期会产生较少的柠檬酸，使总酸的含量增加；如图 7B 所示，随着黑曲霉添加量的增加，醋醅中残余的淀粉含量减少，1.5%添加量的黑曲霉在发酵结束后淀粉含量比 0.5%添加量的黑曲霉低 15.36%，表明黑曲霉的添加量有利于小麦麸中淀粉的转化；如图 7C 所示，1.5%添加量的黑曲霉在发酵过程中的氨基酸态氮含量最低，可能是由于黑曲霉产生大量淀粉酶将淀粉分解为糖类，大量的糖类与氨基酸发生美拉德反应。此外，黑曲霉可产酸，当总酸达到一定程度时，微生物会进行产胺抵御酸性环境，所以 1.5%添加量的黑曲霉氨基酸态氮含量低于其余黑曲霉添加量。1.5%添加量的黑曲霉的醋醅在发酵过程中生物胺含量最高，但在发酵 20 d 时达到顶峰，生物胺含量为 247.98 mg/kg，发酵结束后的生物胺含量为 228.29 mg/kg。但不同黑曲霉添加量在发酵过程中生物胺的变化趋势一致，为先增加后减少，后期游离氨基酸较少，产胺速率小于分解生物胺速率，因此在发酵后期生物胺含量出现下降现象[26]，如图 7D 所示。在发酵过程中，酪胺的含量最少，组胺和尸胺的含量占总生物胺 50%以上，如图 7E 所示。

由上述结果可得，随发酵时间延长，生物胺的含量呈现先增加后降低的趋势。可能是醋酸发酵体系中产生物胺的微生物生长受到抑制导致氨基酸脱羧酶能力下降。而且在长期发酵过程中自然接种一部分能够降解生物胺的微生物，并在发酵后期分解生物胺的速率大于产胺能力[27]。

通过料液比实验发现，当料液比过低或过高时，不利于醋酸发酵，但生物胺的生成量少，料液比适中时总酸的含量较高，生物胺生成速率较快，因为总酸含量的增加会使产胺微生物为了抵御酸性环境大量产胺。在实际生产过程中，醋醅发酵过程中总酸含量达到一定范围才能进行陈酿阶段，料液比通过影响水分含量和酒精度含量进而影响醋酸发酵和生物胺的合成，料液比过高或过低虽然能抑制生物胺的产生，但不利于醋酸发酵，且陈酿阶段的生物胺含量会发生下降的趋势[26]，降低食品安全风险。

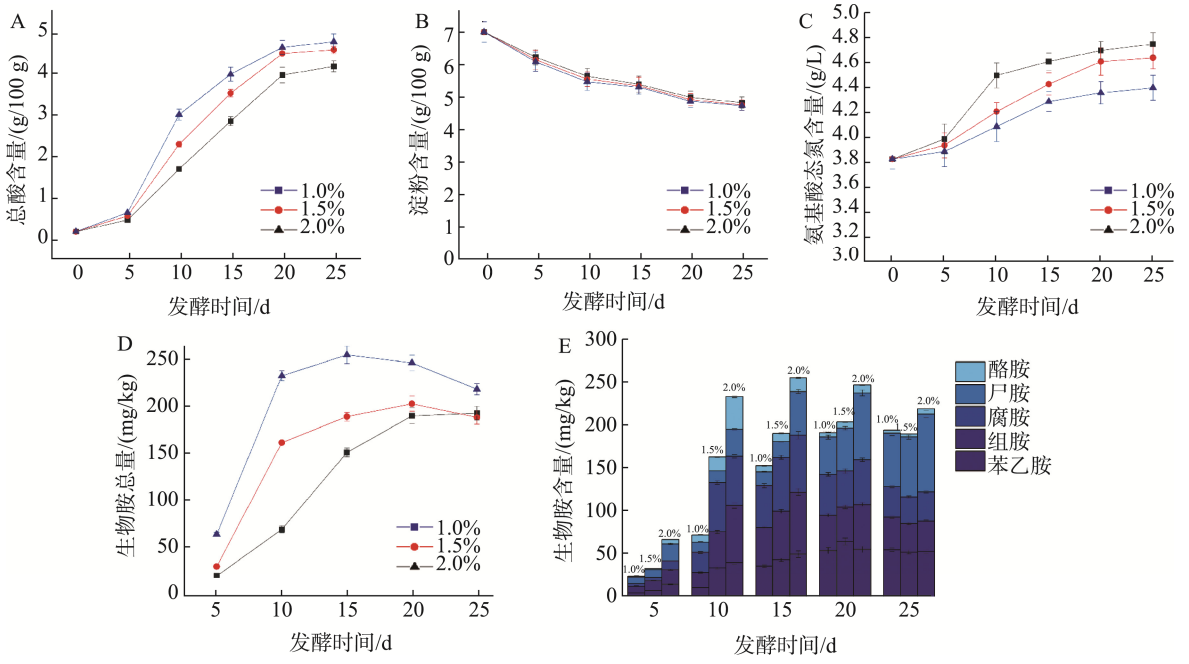


图 6　不同醋酸菌添加量对食醋发酵过程的影响

Fig.6　Effects of different acetic acid bacteria on the fermentation process of vinegar

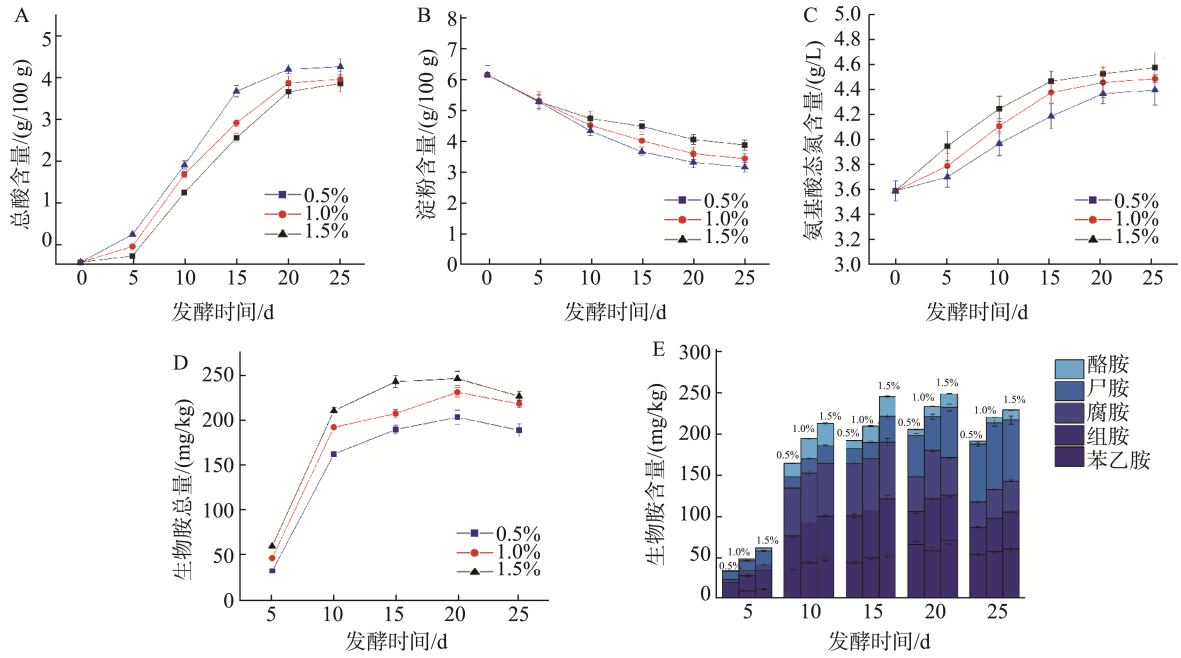


图 7 不同黑曲霉添加量对食醋发酵过程的影响

Fig.7 Effects of different amounts of *Aspergillus niger* in the fermentation process of vinegar

此外通过醋酸菌添加量实验表明，适量提高醋酸菌添加量，能够显著加速总酸的生成速率，但醋酸菌添加量过大会使生物胺的含量较高，推测为高添加量的醋酸菌短时间内使醋醅的总酸含量迅速增加，产胺微生物为了抵御酸性环境，大量产胺，导致高醋酸菌添加量的醋醅中生物胺的含量最高。

黑曲霉添加量对生物胺的产生有重要影响，实验结果表明，在超过一定限度的黑曲霉接种情况下，黑曲霉生长较为迅速，在醋酸发酵前期合成柠檬酸，提高醋醅中的总酸含量，且黑曲霉可以提高淀粉的转化率[28–31]，将淀粉分解为糖类，糖类发酵成乙醇，进一步转化为乙酸，酸性环境导致生物胺在前期过程中大量积聚。

3 结 论

本研究探索了在不同发酵时间、料液比、醋酸菌添加量、黑曲霉添加量对于醋醅生物胺产生的影响。发现在料液比 1:1.1 下，食醋发酵结束后的生物胺含量最低，为 149.8 mg/kg；在醋酸菌添加量 1.5%时，食醋发酵结束后的生物胺含量最低，为 190.49 mg/kg，因为醋酸菌添加量为 1.0%时，醋酸发酵较慢，此时生物胺还处于增长阶段；黑曲霉添加量为 0.5%时，醋酸发酵结束后的生物胺含量最低，为 190.49 mg/kg。生物胺作为食醋发酵过程中的有害物质，其含量过高会对人体健康产生一定影响，通过改变料液比、醋酸菌添加量和黑曲霉添加量，可以有效抑制食醋发酵过程中生物胺的形成，从而有效提高食醋的安全性。但本研究中所述实验仍有一定不足，即所设定梯度范围相对较大，且只对食醋发酵过程中部分因素进行了探究，后续可复合添加菌种等多个方面进行优化，提升食醋的品质。还可以对食醋发酵过程中降解生物胺的微生物进行筛选研究，减少食醋发酵过程中的生物胺的生成。

参考文献

[1] 李岩, 王爱霞, 李晓伟, 等. 食醋固态发酵罐关键参数解析与发酵工艺优化[J]. 中国调味品, 2024, 49(8): 142–148, 185.
LI Y, WANG AIX, LI XW, *et al.* Analysis of key parameters and optimization of fermentation process in vinegar solid-state fermentor [J]. China Condiment, 2024, 49(8): 142–148, 185.

[2] 孙宏韬, 李伟, 朱曼丽, 等. 食醋的固态发酵工艺及其反应器进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(12): 89–93, 98.
SUN HT, LI W, ZHU ML, *et al*. Solid state fermentation technology of vinegar and its reactor progress [J]. China Condiment, 2018, 43(12): 89–93, 98.

[3] TONG W, CHEN G, YU H, *et al*. Dynamic changes and correlation of organic acids, physicochemical properties, and microbial communities during fermentation of Sichuan bran vinegar [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2024, 132: 106355.

[4] ZENG XA, YAN B, LI XQ, *et al.* Detection and safety analysis of biogenic amines in several fermented foods [J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(7). DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.7.0939

[5] NIKITA ST, RENA C, LORRAINE M. A review of biogenic amines in fermented foods: Occurrence and health effects [J]. Heliyon, 2024, 10(2): 2405–8440.

[6] ANNA PAC, CARLOS ACJ. Health and bioactive compounds of fermented foods and by-products [J]. Fermentation-Basel, 2024, 10(1): 13.

[7] HAMZA MABM, CENGIZ MF. Influence of plants and spices on the formation of biogenic amines in meat [J]. Mediterranean Agricultural Sciences, 2024, 37(1). DOI: 10.29136/mediterranean.1380634

[8] ZHANG Y, PEI H, WEI HE, *et al*. Research progress on the formation

mechanism and control of tyramine in fermented foods [J]. Food Science, 2024, 45(15): 263–271.

[9] MIR MA. Biogenic amines: Catalysis, quality, and safety aspects of food items consumed in Saudi Arabia [J]. Current Organocatalysis, 2024, 11(4): 11.

[10] RIO BD, MARIA F, REDRUELLO B, *et al*. New insights into the toxicological effects of dietary biogenic amines [J]. Food Chemistry, 2024, 435.

[11] LI D, ZHANG W. Exploring the role of bacterial communities on the quality formation and biogenic amines accumulation during ripening and storage of dry-cured Chinese bacon (Larou) [J]. Food Science & Biotechnology, 2024, 33(10). DOI: 10.1007/s10068-023-01472-1

[12] ZHANG CC, ZHANG JM, LIU DQ. Biochemical changes and microbial community dynamics during spontaneous fermentation of Zhacai, a traditional pickled mustard tuber from China [J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 347(5): 109199.

[13] PENAS E, FRIAS J, SIDRO B, *et al*. Impact of fermentation conditions and refrigerated storage on microbial quality and biogenic amine content of sauerkraut [J]. Food Chemistry, 2010, 123(1): 143–150.

[14] LANDETE JM, FERRER S, PARDO I. Biogenic amine production by lactic acid bacteria, acetic bacteria and yeast isolated from wine [J]. Food Control, 2007, 18(12): 1569–1574.

[15] 张凯悦. 酿醋用黑曲霉糖化力与产孢能力的相关性研究及麸曲淀粉酶组分分析[D]. 太原: 山西师范大学, 2021.
ZHANG KY. Correlation between saccharification ability and sporulation ability of *Aspergillus Niger* for vinegar brewing and analysis of amylase components in bran koji [D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2021.

[16] 童仲荣, 赵奎, 谷欣悦, 等. 金山醋酸乳杆菌对四川麸醋发酵品质的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业, 1-9. [2026-01-07]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042165
TONG ZR, ZHAO K, GU XY, *et al*. Effect of *Lactobacillus* Jinshan on the fermentation quality of Sichuan bran vinegar [J/OL]. Food and Fermentation Industry, 1-9. [2026-01-07]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042165

[17] 钟斌, 徐雅芫, 万娅琼, 等. 酿造调味品中生物胺分析与控制研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 214–220.
ZHONG B, XU YW, WAN YQ, *et al*. Research progress on analysis and control of biogenic amines in brewing condiments [J]. China Condiments, 2024, 49(1): 214–220.

[18] 郑吴伟, 王超, 付诗鸣, 等. 食醋的功效成分和危害物质[J]. 中国调味品, 2020, 45(8): 183–186.
ZHENG WW, WANG C, FU SM, *et al*. Functional components and harmful substances of vinegar [J]. China Condiment, 2020, 45(8): 183–186.

[19] 周朗君, 陈钦, 李秀英. 丹磺酰氯柱前衍生-反相高效液相色谱法同时测定水产品中 9 种生物胺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 24–31.
ZHOU LJ, CHEN Q, LI XY, *et al*. Simultaneous determination of nine biogenic amines in aquatic products by pre-derivative-reversed-phase high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 24–31.

[20] ORDONEZ JL, CALLEJON RM, MORALES M, *et al*. A survey of biogenic amines in vinegars [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2713–2719.

[21] 杨文婉, 张婷, 李虹霖, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定预制菜中 5 种生物胺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 254–260.
YANG WW, ZHANG T, LI HL, *et al*. Determination of five biogenic amines in prefabricated vegetables by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 254–260.

[22] 魏泉增, 汤雅, 李伟民. 液相色谱-串联质谱测定食醋中生物胺含量[J]. 中国酿造, 2019, 38(4): 170–173.
WEI QZ, TANG Y, LI WM. Determination of biogenic amines in vinegar by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Brewing in China, 2019, 38(4): 170–173.

[23] 刘超. 优质食醋发酵过程中的风味及安全性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
LIU C. Study on flavor and safety of high-quality vinegar during fermentation [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2012.

[24] 郑宇, 张强, 刘静, 等. 我国传统食醋生产过程中潜在危害因子的综述[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(4): 1–8, 15.
ZHENG Y, ZHANG Q, LIU J, *et al*. Summary of potential harmful factors in traditional vinegar production in China [J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2019, 34(4): 1–8, 15.

[25] 彭杨. 黑曲霉及巴氏醋杆菌麸曲强化技术在四川麸醋固态发酵过程中的应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
PENG Y. Application of *Aspergillus niger* and *Acetobacter pasteurella* bran koji strengthening technology in solid-state fermentation of Sichuan bran vinegar [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.

[26] 邓朝霞. 永春老醋发酵过程中有机酸和生物胺变化分析及其细菌菌群结构分析[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
DENG ZX. Changes of organic acids and biogenic amines and analysis of bacterial flora structure during the fermentation of Yongchun old vinegar [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2014.

[27] 王惠, 石学梅, 黄冰羽, 等. 食醋发酵过程中生物胺的变化规律及影响因素研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 94–101.
WANG H, SHI XM, HUANG BY, *et al*. Study on the change law and influencing factors of biogenic amines during soy sauce fermentation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 94–101

[28] 黄小洁. 异麦芽糖代谢调控提升黑曲霉产柠檬酸[D]. 天津: 天津科技大学, 2024.
HUANG XJ. Regulation of isomaltose metabolism enhances citric acid production by *Aspergillus niger* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2024.

[29] SHAIMENOVA B, OSPANKULOVA G, SADUAKHASOVA S, *et al*. Improving the citric acid production by mutant strains *Aspergillus niger* using carbohydrate-containing raw materials as a carbon source [J]. Slovak Journal of Food Sciences, 2024, 18. DOI: https://doi.org/10.5219/1948

[30] 梁绍勋, 梁金辉, 蒋军, 等. 黑曲霉液态发酵产糖化酶条件的研究[J]. 酿酒, 2017, 44(2): 43–46.
LIANG SX, LIANG JH, JIANG J, *et al*. Study on the conditions of glucoamylase production by *Aspergillus niger* in liquid fermentation [J]. Brewing, 2017, 44(2): 43–46.

[31] PUCCI EFQ, BUFFO MM, SOUSA MDB, *et al*. An innovative multi-enzymatic system for gluconic acid production from starch using *Aspergillus niger* whole-cells [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2023, 171: 110309.

(责任编辑: 韩晓红　于梦娇)