

三种酶前处理对香蕉酵素理化性质、生物活性及感官的影响

李天昊，位绍文，毛伟健，姜秀兰，薛彦华，丁洪发，盖凌云，程凡升，徐海忠

Effects of Pretreatment with Three Different Enzymes on Physicochemical Properties, Biological Activity and Sensory of Banana Jiaosu

LI Tianhao, WEI Shaowen, MAO Weijian, JIANG Xiulan, XUE Yanhua, DING Hongfa, GAI Lingyun, CHENG Fansheng, and XU Haizhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维素酶和果胶酶提取对甘草渣多糖抗氧化和抗肿瘤性能的影响

Effects of Cellulase and Pectinase Extraction on the Antioxidant and Antitumor Activities of Licorice Residue Polysaccharide

食品工业科技. 2020, 41(9): 309–313, 319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.09.050>

香蕉酵素发酵过程中的组分及抗氧化活性变化研究

Change of Components and Antioxidant Activity of Banana Enzymes during Fermentation Process

食品工业科技. 2019, 40(16): 290–293, 303 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.049>

复合酶法提取长白木根总黄酮工艺优化及抗氧化活性研究

Optimization of Enzyme Extraction Method for Total Flavonoids from Root of *Aralia continentalis* Kitagwa and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(12): 174–180, 206 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.028>

酒醅中高产纤维素酶菌株的筛选及其酶学性质

Study on screening of high-yield cellulase strains in the fermented grains and its enzymatic properties

食品工业科技. 2017(24): 109–113 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.24.022>

复合酶辅助超声波提取菊苣根总黄酮的工艺优化及其抗氧化活性

Optimization of Extraction Technology and Antioxidant Activity of Total Flavonoids from Roots of *Cichorium Intybus* L. by Ultrasonic Assisted with Complex Enzyme

食品工业科技. 2021, 42(8): 164–171 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060184>

扁桃斑鸠菊叶酵素发酵过程中理化性质分析、抗氧化能力评价及对氧化应激细胞防护作用研究

Physicochemical Properties, Antioxidant Activity and Protective Effect on Oxidative Stress Cells of *Vernonia amygdalina* Delile Leaf Jiaosu during Fermentation

食品工业科技. 2021, 42(18): 9–17 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110014>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李天昊, 位绍文, 毛伟健, 等. 三种酶前处理对香蕉酵素理化性质、生物活性及感官的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 86–92.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050204

LI Tianhao, WEI Shaowen, MAO Weijian, et al. Effects of Pretreatment with Three Different Enzymes on Physicochemical Properties, Biological Activity and Sensory of Banana Jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 86–92. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050204

· 研究与探讨 ·

三种酶前处理对香蕉酵素理化性质、生物活性及感官的影响

李天昊¹, 位绍文², 毛伟健^{1,3}, 姜秀兰⁴, 薛彦华⁴, 丁洪发⁴, 盖凌云¹, 程凡升^{1,5,*}, 徐海忠^{2,*}

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266109;
2. 青岛农业技术推广技术中心, 山东青岛 266109;
3. 山东省特种食品技术创新中心, 山东青岛 266109;
4. 山东天同食品有限公司, 山东临沂 276000;
5. 青岛特种食品研究院, 山东青岛 266109)

摘要: 为比较不同酶前处理后对水果发酵酵素品质的影响, 本文采用香蕉作为原料, 选用纤维素酶、果胶酶和木瓜蛋白酶分别对香蕉进行前处理, 比较不同酶前处理对香蕉酵素的理化指标、抗氧化及感官的影响。结果显示: 酶处理对 pH 和总酸的影响较小; 酶前处理组利用还原糖的能力显著, 还原糖含量降低了 10 g/L 左右; 发酵第 72 h 时, 纤维素酶和木瓜蛋白酶处理组总酚含量显著提升 1.31 倍左右 ($P<0.05$), 同时纤维素酶处理组类黄酮含量较其余处理组显著提升了 40% 左右 ($P<0.05$); 纤维素酶处理组发酵 72 h 后 SOD 酶活力与其他组相比显著提高 9 倍左右, 其余两组显著提高 3 倍左右 ($P<0.05$); 在发酵过程中, 纤维素酶前处理组在产 γ -氨基丁酸的能力上显著, 在第 72 h 提高 25% ($P<0.05$); 纤维素酶、木瓜蛋白酶和果胶酶前处理提高了香蕉酵素发酵过程中 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除活力和 FRAP 还原力, 使抗氧化活性提升。纤维素酶与其他酶相比, 在发酵糖的利用和产 SOD 酶的能力上更为强大, 并具有高度的抗氧化活性和优异的口感。本研究为香蕉酵素的生产提供了理论依据, 并扩展了其应用前景。

关键词: 香蕉酵素, 纤维素酶, 果胶酶, 蛋白酶, 抗氧化活性, 风味物质

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)07-0086-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050204

本文网刊:



Effects of Pretreatment with Three Different Enzymes on Physicochemical Properties, Biological Activity and Sensory of Banana Jiaosu

LI Tianhao¹, WEI Shaowen², MAO Weijian^{1,3}, JIANG Xiulan⁴, XUE Yanhua⁴, DING Hongfa⁴, GAI Lingyun¹, CHENG Fansheng^{1,5,*}, XU Haizhong^{2,*}

(1. School of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2. Qingdao Agricultural Technology Extension Technology Center, Qingdao 266109, China;
3. Shandong Special Food Technology Innovation Center, Qingdao 266109, China;
4. Shandong Tiantong Food Co., Ltd., Linyi 276000, China;
5. Qingdao Special Food Research Institute, Qingdao 266109, China)

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)(2022TZXD0012); 青岛特种食品研究院揭榜挂帅项目(6602422201)。

作者简介: 李天昊(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 1424659731@qq.com。

*通信作者: 程凡升(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: cfs1225@126.com。

徐海忠(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 果蔬深加工, E-mail: 254660961@qq.com。

Abstract: In order to compare the effects of different enzyme pretreatments on the quality of fruit fermented Jiaosu. Bananas were used as raw materials in this paper. Cellulase, pectinase and papain were used to pretreat bananas, and the effects of different enzyme pretreatments on the physical and chemical indexes, antioxidant, sensory of banana enzyme were compared. The results showed that enzyme treatment had little effect on pH and total acid. The ability of reducing sugar utilization in the enzyme pretreatment group was significant, and the final sugar content was reduced by about 10 g/L. At 72 h of fermentation, the total phenolic content of cellulase and papain treatment groups was significantly increased by about 1.31 times ($P<0.05$), and the flavonoid content of cellulase treatment group was significantly increased by about 40% compared with the other treatment groups ($P<0.05$). After 72 h fermentation, the SOD activity of cellulase treatment group was significantly increased by about 9 times compared with other groups, and the other two groups were significantly increased by about 3 times ($P<0.05$). During the fermentation process, the ability of cellulase pretreatment group to produce γ -aminobutyric acid was significantly increased by 25% at 72 h ($P<0.05$). The pretreatment of cellulase, papain and pectinase increased the DPPH and ABTS⁺ free radical scavenging activity and FRAP reducing power during the fermentation of banana enzyme, and enhanced the antioxidant activity. Compared with other enzymes, cellulase was more powerful in the utilization of fermented sugar and the ability to produce SOD enzymes, and had high antioxidant activity and excellent taste. This study provides a theoretical basis for the production of banana Jiaosu, and expands the research and application of banana Jiaosu.

Key words: banana Jiaosu; cellulose; pectinase; protease; antioxidant activity; flavor substances

水果酵素是一种发酵食品, 是指以可用于食品加工的水果为主要原料, 添加或不添加辅料, 通过微生物发酵制成, 含有特定的生物活性成分, 适合人们食用^[1]。其不仅含有植物本身的多种维生素、酶和矿物质等营养物质^[2], 还通过微生物发酵产生了新的次生代谢物及活性成分, 可满足人们对口感、风味、营养以及健康功能的需求^[3~4]。姜忠丽等^[5]研究证实糙米酵素有效成分具有抗氧化作用, 可加速自由基的消除, 防止各种细胞的氧化损伤, 进而增强生物体内新陈代谢的作用。林金莺等^[6]在诺丽酵素长效抗自由基的探究中得出诺丽酵素具有强而稳定的抗自由基能力、抗疲劳作用。目前, 酵素产品已经成功实现商业化, 并在国内外市场上有广阔的发展空间^[7~9]。

香蕉(*Musa spp.*)属芭蕉科(Musaceae)芭蕉属(*Musa*), 含有较为丰富的营养功能性成分和活性物质, 具备保健功能。香蕉果肉富含各种营养成分, 如矿物质、抗性淀粉和膳食纤维等。此外, 还含有酚类化合物、类胡萝卜素、植物甾醇、胺类和抗氧化剂等活性物质, 这些活性物质赋予香蕉多种功能, 如降血糖、降血压、抗菌、抗氧化和抗溃疡等^[10]。同时具备了降低胆固醇、预防胃溃疡和高血压等功效, 是世界上最受欢迎的水果之一^[11]。目前国内香蕉主要的加工产品有香蕉饮料、香蕉粉、香蕉片等^[10]。由于香蕉富含果胶、糖类、单宁等物质, 在加工过程中极易发生褐变, 造成颜色和风味劣变, 同时由于粘度高, 也使其渣汁分离困难, 限制了香蕉加工产业的发展^[12]。传统酵素食品在加工过程中通常直接添加微生物进行发酵^[13]。但是, 酶前处理会增加酵素本身的理化性质和风味, 有研究发现, 酶前处理会增加蜜桃酵素中可溶性固体含量, 对后期蜜桃酵素的品质也有显著影响^[14]。但是, 不同的酶是否会达到同样的效果以及酶处理对香蕉酵素是否也会有同样效果目前还不清楚。

本文通过比较自然发酵和不同酶前处理对香蕉

酵素发酵过程中理化指标、抗氧化活性、 γ -氨基丁酸含量、超氧化物歧化酶活力以及风味感官的不同变化, 对其发酵规律进行初步探究, 以期获得美味和营养兼具的新型发酵饮品, 同时为香蕉酵素产品的开发提供技术支持和理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香蕉 高山甜香蕉, 广西; 绵白糖(食品级) 大润发超市; 福林-酚、芦丁、DNS、Al(NO₃)₃、NaNO₂、葡萄糖、Na₂CO₃(食品级)、焦亚硫酸钾(食品级)等

分析纯, 北京索莱宝科技有限公司; DPPH、ABTS、FRAP、SOD、 γ -氨基丁酸试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; 纤维素酶(10000 U/g)、果胶酶(30000 U/g)、木瓜蛋白酶(100000 U/g) 南宁庞博生物工程有限公司; 商品化果蔬酵素发酵剂(植物乳杆菌 N13、保加利亚乳杆菌、瑞士乳杆菌、肠膜明串珠菌肠膜亚种和嗜热链球菌) 安琪酵母股份有限公司。

SW-CJ-1F 型超净工作台 沃宏实验仪器有限公司; ZDM-1101 型酶标仪 卓的仪器设备(上海)有限公司; 1 L 密封式发酵罐 青岛市城阳区大润发; 101-00S 型电热鼓风干燥箱 上华脉仪器有限公司; DT-IO1200 型 pH 计 杭州秋籁科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香蕉酵素制备工艺 酿造方法参考之前的研究并进行修改^[15~16]。挑选成熟后的香蕉, 选取没有腐烂和病斑的果实, 带果皮清洗并将其破碎, 随后装入罐中, 按 1:2(v/v)果肉与水的比例进行混合, 分三组, 分别加入 80 mg/kg 的纤维素酶, 果胶酶和木瓜蛋白酶, 分别在 55 °C、pH6, 50 °C、pH5.5 和 55 °C、pH6 的条件下酶解 4 h, 以不添加酶的为空白对照, 加入 170 g/L(w/v)的绵白糖, 用食品级 Na₂CO₃ 调节 pH

至 5.5 左右, 随后加入 0.1 g/L(m/v) 食品级焦亚硫酸钾, 搅拌均匀, 封口静置 2 h, 随后 95 ℃ 加热 5 min 进行杀菌。利用商品化的发酵剂进行发酵, 取 1 g 溶于 30 ℃ 温水中活化, 混匀静置 10 min。随后以 10 mL/L 的接种量接种, (37±1) ℃ 恒温发酵, 分别于发酵第 0、24、48、72 h 同一时间点取样。

1.2.2 pH 和总酸含量测定 取新鲜发酵液, 10000 r/min 离心 20 min, 取上清液。pH 采用 pH 计测定。总酸含量的测定参照食品中总酸的测定(GB 12456-2021)。

1.2.3 还原糖含量测定 采用 DNS(二硝基水杨酸)法^[17], 适当修改。取 500 μL 样品加入 1 mL DNS 中, 沸水浴 20 min 后, 于 540 nm 测定吸光值。标准曲线以葡萄糖作为标准品, $y=0.8881x+0.0561$, $R^2=0.9981$ 。

1.2.4 总酚和类黄酮含量测定 采用福林-酚法测定总酚含量^[18], 适当修改。取 1 mL 标准液或样品液于 15 mL 试管中, 分别加入 1 mL 福林酚显色剂及 3 mL 20% Na₂CO₃, 混匀, 于 50 ℃ 水浴反应 30 min。在 765 nm 波长下测定吸光度。每个浓度做 3 组平行实验, 以没食子酸为标准品, 吸光度为纵坐标, 作标准曲线: $y=0.08473x-0.01762$, $R^2=0.9894$ 。测得的样品吸光度代入回归方程计算样品中总酚含量。

采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃ 法测定类黄酮含量^[19]。准确移取 0.50 mL 样品溶液置于 25 mL 容量瓶中, 加入 5% NaNO₂ 溶液 0.50 mL, 静置 5 min, 再加入 10% Al(NO₃)₃ 溶液 0.50 mL, 摆匀静置 5 min 后加入 4% NaOH 溶液 4.00 mL, 摆匀后用 60% 乙醇定容, 25 ℃ 条件下放置 15 min 后, 测定在 510 nm 波长处的吸光度。配制芦丁标准溶液, 加入试液测定吸光度得标准曲线方程: $y=0.0288x-0.0079$, $R^2=0.9994$ 。测得的样品吸光度代入回归方程计算样品中类黄酮含量。

1.2.5 SOD 酶活力测定 按照 SOD 酶活力试剂盒进行测定。

1.2.6 γ-氨基丁酸(γ-Aminobutyric acid, GABA)含量测定 按照 γ-氨基丁酸试剂盒进行测定。

1.2.7 抗氧化活性测定 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基清除能力, FRAP 还原力(以 FeSO₄ 为标准品作标准曲线, $y=0.3485x-0.0054$, $R^2=0.9983$)测定采用试剂盒进行检测。

1.2.8 感官评价 采用 9 点快感标度法^[20] 评价发酵结束后香蕉酵素的感官性质, 从 20~25 岁的学生中选出 20 名进行感官评价, 男女比例为 1:1, 组成评定小组。该小组对食品的颜色、酸甜度、香气、味道、体态、风味和整体接受性等七个性质进行评价。评分分为 9 个等级, 对应评价人员的喜好程度。其中, 9 代表极度喜欢, 8 代表很喜欢, 7 代表中等喜欢, 6 代表轻度喜欢, 5 代表无所谓, 4 代表轻度不喜欢,

3 代表中等不喜欢, 2 代表很不喜欢, 1 代表极度不喜欢。

1.3 数据处理

每组实验均重复 3 次, 以平均值±标准差的形式展示。采用 Origin 2021 软件绘图; 采用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行单因素方差分析(ANOVA), 其中 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同酶前处理发酵过程酵素理化性质的变化

pH 和总酸是反映酵素整体发酵状况的理化指标^[21]。不同酶前处理后, 根据表 1 和表 2 的数据显示, 在发酵过程中, pH 和总酸含量呈现出相反的变化趋势。由表 1 可以看出, 发酵结束后, 几种酵素的 pH 从 4 降到了 3 左右, 说明发酵过程中产生的酸性物质逐渐增加。根据表 2 的数据显示, 在发酵过程中, 第 48 h 时发酵液的总酸含量从 $0.41\pm0.08\sim2.46\pm0.19$ g/L 上升到 $2.23\pm0.19\sim3.81\pm0.11$ g/L, 这可能是由于此时碳源充足, 乳酸菌可以利用碳源迅速产生乳酸和乙酸等物质, 导致总酸含量不断上升。在发酵后期, 随着乳酸菌数量的减少, 总酸含量在最后 24 h 发酵期间, 增幅减小。木瓜蛋白酶和果胶酶处理发酵后总酸含量差异不大, 纤维素酶处理组总酸较高但差值并不大, 相比于空白对照组三组酶处理后总酸含量较低。但总体而言酶处理对总酸含量有影响但影响幅度不大。

表 1 香蕉发酵前后 pH 变化

Table 1 Changes in pH before and after fermentation of banana

发酵时间(h)	空白	纤维素酶	木瓜蛋白酶	果胶酶
0	5.582 ± 0.027^a	5.620 ± 0.106^a	5.707 ± 0.065^a	5.711 ± 0.056^a
24	4.263 ± 0.003^b	4.260 ± 0.007^b	3.903 ± 0.001^c	4.599 ± 0.011^a
48	3.718 ± 0.002^c	3.772 ± 0.004^b	3.772 ± 0.004^b	3.829 ± 0.005^a
72	3.662 ± 0.001^d	3.734 ± 0.001^b	3.727 ± 0.002^c	3.770 ± 0.003^a

注: 表中不同字母代表每一个时间点不同组之间的差异($P<0.05$); 表 2 同。

表 2 香蕉发酵前后总酸含量变化(g/L)

Table 2 Changes in total acid content before and after fermentation of banana (g/L)

发酵时间(h)	空白	纤维素酶	木瓜蛋白酶	果胶酶
0	0.22 ± 0.19^a	0.29 ± 0.07^a	0.23 ± 0.08^a	0.21 ± 0.07^a
24	0.89 ± 0.19^c	1.17 ± 0.17^b	2.46 ± 0.19^a	0.41 ± 0.08^d
48	3.81 ± 0.11^a	3.42 ± 0.06^b	3.74 ± 0.05^a	2.23 ± 0.19^c
72	4.52 ± 0.17^a	4.20 ± 0.15^b	3.33 ± 0.10^c	3.28 ± 0.12^c

还原糖含量的变化可以反映出发酵液中微生物活动的情况^[22]。由图 1 所示, 在 72 h 发酵过程中, 所有组的糖含量均是下降的趋势, 在发酵过程中, 乳酸菌等生物利用了大量的葡萄糖和果糖进行生长代谢。同时酶处理组在发酵 72 h 时, 总还原糖含量降低至 130.00 g/L, 而空白组还原糖含量为 146.00 g/L。这可能是由于酶对香蕉多糖的降解, 产生更多葡萄糖, 从而加强乳酸菌对糖的利用而导致的^[23]。

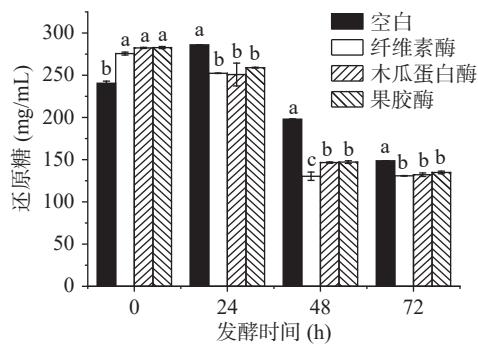


图 1 不同酶前处理发酵过程中还原糖含量的变化

Fig.1 Changes in reducing sugar content during fermentation with different enzyme pretreatments

注: 图中不同小写字母代表同一时间点不同组之间的差异 ($P<0.05$); 图 2~图 8 同。

2.2 不同酶前处理发酵过程中总酚和类黄酮的变化

为了更加详细地评价不同酶处理对酵素营养物质的影响, 检测了总酚和类黄酮含量(图 2), 几组总酚的变化均为持续升高。空白组在第 72 h 总酚含量提高到了原来的 1.23 倍, 其余三种酶处理组, 均提高约 1.31 倍左右, 显著高于对照组($P<0.05$)。其中, 纤维素酶处理组相较于其他处理, 总酚含量有明显提升, 这可能是在其处理下, 果肉和果皮中与纤维素结合的不溶多酚类物质转化为可溶的游离态多酚^[24]。

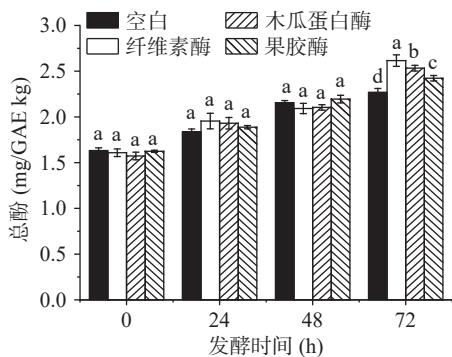


图 2 不同酶前处理发酵过程中总酚含量的变化

Fig.2 Changes in total phenol content during fermentation with different enzyme pretreatments

类黄酮在自然界的植物中广泛存在, 具有抗炎、抗菌、抗癌、抗氧化、保肝和降糖降脂等活性^[25]。从图 3 可以看出, 在发酵过程中, 处理组的类黄酮含量逐渐上升, 并在 72 h 时达到最大值, 分别为 3.60 mg/g (纤维素酶)、3.22 mg/g (果胶酶)、3.26 mg/g (木瓜蛋白酶), 并相较于 24 h 提高了 40% 左右, 与对照组出现显著差异($P<0.05$), 这与李江等^[26]的研究相似。同时, 在第 72 h 时, 空白对照组类黄酮含量出现了下降趋势, 这可能是因为是其中含有过氧化物酶导致氧化分解而下降^[27]。而酶处理组持续升高, 可能是因为酶水解糖类物质从而加速黄酮醇类物质与糖苷结合, 从而成黄酮醇配糖体, 其在发酵期间会发生水解, 导致黄酮含量升高^[15]。

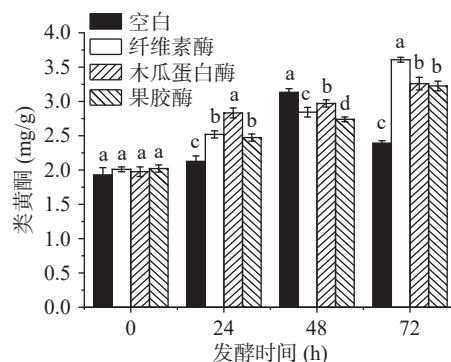


图 3 不同酶前处理发酵过程中类黄酮含量的变化

Fig.3 Changes in flavonoid content during fermentation with different enzyme pretreatments

2.3 不同酶前处理发酵过程中 SOD 酶活的变化

由图 4 所示, 在第 48 h 时, 无酶空白对照组的 SOD 酶活力达到最大值, 为 93 U/mL, 而在 72 h 时又下降, 这可能是因为空白组初始 pH 较低, 发酵后上升, 降低了 SOD 酶活力^[28]。其余三组处理组, 均在 72 h 时达到最大值, 分别为 387 U/mL(纤维素酶)、209 U/mL(木瓜蛋白酶) 和 138 U/mL(果胶酶), 较第 1 d 分别提高了 9 倍、4 倍和 3 倍, 均显著高于对照组($P<0.05$)。在发酵 24 h 左右, SOD 作为胞内酶, 可以通过微生物的细胞裂解释放出来^[29], 从而导致了 SOD 酶活性在后续发酵过程中升高。

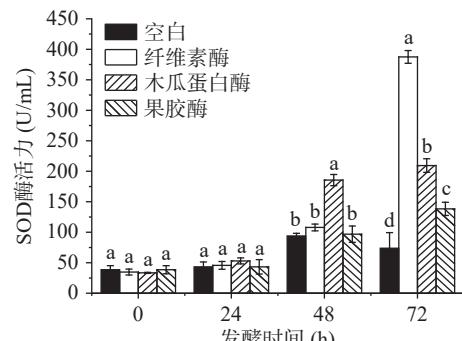


图 4 不同酶前处理发酵过程中 SOD 酶活力变化

Fig.4 Changes in SOD enzyme activity during fermentation with different enzyme pretreatments

2.4 不同酶前处理发酵过程中 γ -氨基丁酸的变化

γ -氨基丁酸(GABA)是一种非蛋白质的天然氨基酸, 广泛存在于植物、动物和微生物中^[30]。 γ -氨基丁酸具有抗衰老、降血压、改善肝功能、调节激素分泌、改善睡眠、增强记忆力、防治肥胖等重要生理功能^[31-32]。由图 5 可以看出, 经过发酵后, 所有组的含量均有提升, 对照组提高了 25% 左右, 而处理组则提高了 1 倍多, 特别是纤维素酶处理组, 从初始值 4.93 μ mol/mL 提高到 11.45 μ mol/mL, 显著高于对照组($P<0.05$)。这可能是由于酶的添加促进了酵素中蛋白和糖类的水解, 从而促进其 pH 和 GABA 的变化^[33], 同时 GABA 在以糙米为材料发酵的酵素产品中也发现了同样的趋势^[34]。

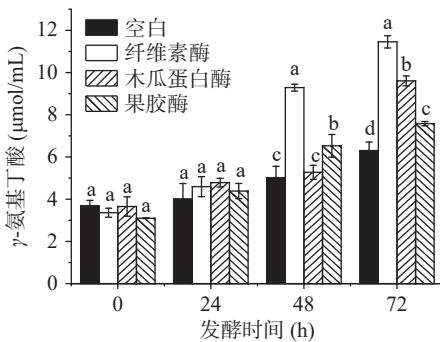


图 5 不同酶前处理发酵过程中 γ -氨基丁酸含量的变化
Fig.5 Changes in γ -aminobutyric acid during fermentation with different enzyme pretreatments

2.5 不同酶前处理发酵过程中抗氧化活性的变化

进一步研究香蕉酵素发酵过程中抗氧化活性的变化,发现不同的酶处理对发酵的抗氧化能力有明显差异,具体结果见图 6~图 8。果胶酶,纤维素酶和木瓜蛋白酶均在第 72 h 达到 DPPH 自由基清除活力最大值,分别为 14.1%、19.8%、15%,经过 72 h 发酵后,纤维素酶处理组 DPPH 自由基清除力相较空白对照组提高了 2~3 倍。这种提高的机制比较复杂,据 Karaman 等^[35] 的报道,酚类物质能够轻易地释放一个氢离子,这一特性是其强大自由基清除能力的主要原因。因此,酶前处理发酵使得 DPPH 自由基清除力提高可能与酚类物质的增加有关。同时,相较于未加酶处理组有显著差异($P<0.05$)。

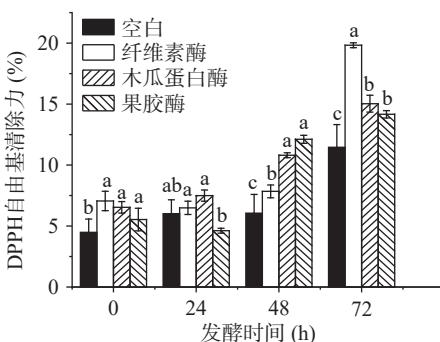


图 6 不同酶前处理发酵过程中 DPPH 自由基清除力的变化
Fig.6 Changes in DPPH radicals scavenging rate during fermentation with different enzyme pretreatments

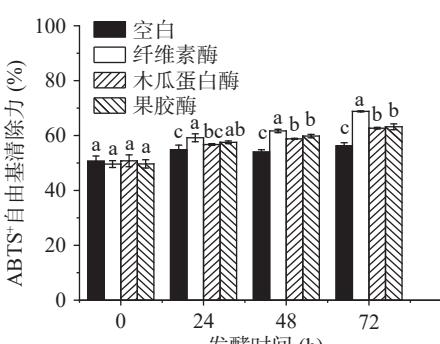


图 7 不同酶前处理发酵过程中 ABTS⁺自由基清除力的变化
Fig.7 Changes in ABTS⁺ radicals scavenging rate during fermentation with different enzyme pretreatments

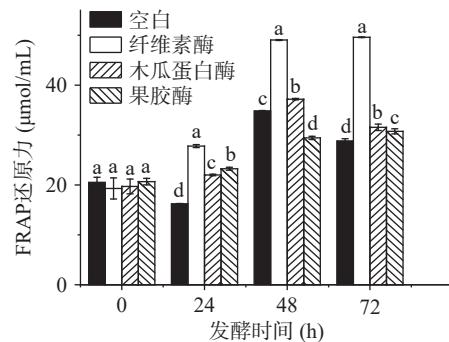


图 8 不同酶前处理发酵过程中 FRAP 还原力的变化
Fig.8 Changes in FRAP reducing power during fermentation with different enzyme pretreatments

对于 ABTS⁺自由基清除活力,三组酶处理组均在第 72 h 达到最高值,分别为 56.2%(空白)、68.8%(纤维素酶)、62.6%(木瓜蛋白酶)和 63.2%(果胶酶),相较于 24 h 提高了 5%~6%,三种处理相较于空白对照组均表现出显著差异,且纤维素酶的清除活力最高($P<0.05$)。未处理组与初始相比也有提高,但清除活力显著低于其他处理组($P<0.05$)。酚类物质与 ABTS⁺自由基清除能力有关,而有机酸等物质的芳香环数量、分子数量和羟基取代基的性质也会对其产生影响^[36]。

对于 FRAP 还原力,所有处理组均在 48 h 达到最大值,值得注意的是,纤维素酶处理组在 FRAP 还原力上也表现出了极大的优势,三个时间点的活力均显著高于其余处理组和对照组($P<0.05$),在 48 h 时达到 49.00 μ mol/mL 左右,较 24 h 提高了 45% 左右。其余两种酶处理组在 48 h 时与空白对照组也有显著差异,但在 72 h 时还原力显著降低($P<0.05$)。酵素 FRAP 还原力呈现先上升后下降的趋势, Yang 等^[37] 的研究发现,酵素的 FRAP 能力与 SOD 的活力和酚类物质的有关,同时也发现了抗氧化能力在发酵后期降低的现象。综上所述,DPPH 自由基清除活力和 ABTS⁺自由基清除活力呈现上升趋势,这可能与香蕉在发酵过程中活性物质的变化以及乳酸菌代谢产物的作用密切相关。总的来说,纤维素酶在发酵 48~72 h 时有利于香蕉酵素抗氧化活性的提升。

2.6 不同酶前处理发酵对酵素感官品质的影响

感官评价是判断食品是否受到消费者认可的重要因素。如图 9 所示,与其它酶处理组相比,空白对照组处理的香蕉酵素发酵后呈现暗黄色,不如其它组的棕色更具吸引力,因此平均分较低。对于酸甜度,纤维素酶处理组得分最高(7.14±0.06),而空白组的酸度明显,导致得分较低。香气方面,所有发酵组均有明显的香蕉果香和发酵味,香味柔和,得分较高。味道方面,空白组口感较涩,而酶处理组的味道则是酸甜清爽。在外观方面,所有样品都有少量细小果肉沉淀,评分在 5~6 分之间。在风味方面,酶辅助发酵组具有明显的果香味,得分高于对照组。总的来说,纤维素酶处理组和果胶酶处理组在整体包括整体印

象和接受度方面得分较高。纤维素酶处理组的香蕉酵素在颜色(6.25 ± 0.09)和味道(6.52 ± 0.08)方面得分较高,而在酸甜度(7.14 ± 0.06)、香气(7.33 ± 0.11)、风味(7.14 ± 0.08)和整体(7.42 ± 0.09)得分方面最高。纤维素酶处理发酵有助于改善香蕉酵素的感官品质,提高其可接受度。

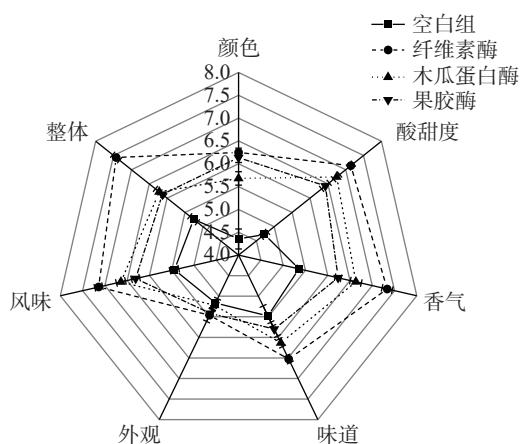


图 9 不同酶前处理发酵过程中感官性质的变化

Fig.9 Changes of sensory properties during fermentation with different enzyme pretreatments

3 结论

本文利用了 3 种不同的酶对香蕉进行前处理,探究其对香蕉发酵酵素品质的影响。结果表明,不同酶前处理对香蕉酵素发酵的酸度变化较为一致。不同酶前处理后,纤维素酶、果胶酶和木瓜蛋白酶对还原糖的利用要高于对照组。同时,纤维素酶处理使总酚和类黄酮含量显著提升;纤维素酶、果胶酶和木瓜蛋白酶处理后 SOD 酶活性均有显著提高,纤维素酶处理下最为显著。在三种酶中,纤维素酶和木瓜蛋白酶的处理有利于在发酵 72 h 后提高香蕉酵素的抗氧化活性。经过纤维素酶、木瓜蛋白酶和果胶酶处理后,纤维素酶处理的香蕉酵素中 γ -氨基丁酸的含量最高,72 h 后提高了约 25%。在感官评价方面,纤维素酶处理组得分最高。

综上所述,纤维素酶处理显著提高了发酵液的总酚含量、类黄酮含量和 SOD 酶活性,增强了抗氧化活性,提高了 γ -氨基丁酸含量并具备较好的感官品质。此外,还需要进一步研究发酵选用的菌种、发酵的工艺流程和发酵过程内部产物生成的相关性,以期为果蔬酵素开发更好的平台和策略,同时也为高质量香蕉酵素的开发提供新的依据和新思路。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 张海燕, 康三江, 张霁红, 等. 苹果酵素发酵过程中微生物群落与风味物质的相关性分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(12): 110–119. [ZHANG H Y, KANG S J, ZHANG J H, et al. Correlation analysis between microbial community and flavor substances during apple enzyme fermentation[J]. China Brewing, 2022, 41(12): 110–119.]
- [2] DAI J, SHA R, WANG Z, et al. Edible plant Jiaosu: Manufacturing, bioactive compounds, potential health benefits, and safety aspects[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5313–5323.
- [3] 陈小伟, 程勇杰, 范昊安, 等. 草莓酵素发酵过程中氨基酸成分分析和蛋白质营养评价[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 64–70. [CHEN X W, CHENG Y J, FAN H A, et al. Amino acid composition analysis and protein nutrition evaluation during strawberry enzyme fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 64–70.]
- [4] 张海燕, 康三江, 袁晶, 等. 苹果酵素自然发酵过程中生物活性物质的变化[J]. 中国酿造, 2021, 40(3): 111–114. [ZHANG H Y, KANG S J, YUAN J, et al. Changes of bioactive substances during natural fermentation of apple enzyme[J]. Chinese Brewing, 2021, 40(3): 111–114.]
- [5] 姜忠丽, 杨平, 庞文录, 等. 糯米酵素红曲酒的抗疲劳作用[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(4): 488–493. [JIANG Z L, YANG P, PANG W L, et al. Anti-fatigue effect of brown rice enzyme red koji wine[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2013, 31(4): 488–493.]
- [6] 林金莺, 刘鹏, 方韵婷, 等. 诺丽酵素长效抗自由基的探究[J]. 食品工业, 2017, 38(4): 222–225. [LIN J Y, LIU P, FANG Y T, et al. Study on long-term anti-free radical effect of Noni enzyme[J]. Food industry, 2017, 38(4): 222–225.]
- [7] 韩齐, 赵金敏, 高小琴, 等. 功能性酵素发展研究现状[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 337–340. [HAN Q, ZHAO J M, GAO X Q, et al. Research status of functional enzymes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 337–340.]
- [8] 毛建卫, 吴元锋, 方晟. 微生物酵素研究进展[J]. 发酵科技通讯, 2010, 39(3): 42–44. [MAO J W, WU Y F, FANG S. Advances in microbial enzyme research[J]. Fermentation Technology Newsletter, 2010, 39(3): 42–44.]
- [9] 谢文佩, 冯玲, 王雨亭, 等. 食品酵素加工工艺研究进展[J]. 现代农业科技, 2018(12): 256–258. [XIE W P, FENG L, WANG Y T, et al. Research progress on processing technology of food enzyme[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(12): 256–258.]
- [10] 杨凤, 刘灿灿, 邓贵明, 等. 香蕉营养品质与功能特性研究进展[J]. 广东农业科学, 2022, 49(10): 146–154. [YANG F, LIU C C, DENG G M, et al. Research progress on nutritional quality and functional characteristics of banana[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(10): 146–154.]
- [11] 阙斐, 黄涵年, 赵粼. 香蕉酵素发酵过程中的组分及抗氧化活性变化研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 290–293, 303. [QUE F, HUANG H N, ZHAO L. Study on the changes of components and antioxidant activity during the fermentation of banana enzyme[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 290–293, 303.]
- [12] 赖长鸿, 王忠合, 王军, 等. 香蕉成熟度对香蕉粉中营养成分及功能特性的影响[J]. 食品科技, 2016, 41(7): 92–96. [LAI C H, WANG Z H, WANG J, et al. Effects of banana maturity on nutritional components and functional properties of banana powder[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(7): 92–96.]
- [13] 王虎玄, 柯西娜, 王聪, 等. 苹果酵素的制备及其抗氧化功能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(3): 37–46. [WANG H X, KE X N, WANG C, et al. Preparation of apple enzyme and its an-

- tioxidant function[J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2023, 41(3): 37–46.]
- [14] 荆金金, 林冰洁, 许雯静, 等. 不同发酵菌及酶处理的蜜桃酵素体外抗氧化活性比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(4): 260–267.
- [JING J J, LIN B J, XU W J, et al. Comparison of antioxidant activity *in vitro* of peach enzymes treated with different fermentation bacteria and enzymes[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(4): 260–267.]
- [15] 杨婧娟, 李娜, 赵声兰. 一种酵素的配方优化研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(1): 95–99. [YANG J J, LI N, ZHAO S L. Study on formula optimization of an enzyme[J]. *China Brewing*, 2016, 35(1): 95–99.]
- [16] 董洁, 夏敏敏, 王成忠, 等. 金丝小枣枣泥酵素发酵工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 197–200. [DONG J, XIA M M, WANG C Z, et al. Study on the fermentation process of Jinsi jujube mud enzyme[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(2): 197–200.]
- [17] 于蒙娜. 黑蒜液态发酵工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. [YU M N. Study on the liquid fermentation process of black garlic[D]. Taian: Food Engineering of Shandong Agricultural University, 2019.]
- [18] LI T, JIANG T, LIU N, et al. Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127859.
- [19] 刘伟, 高红艳, 李紫薇, 等. 野生樱桃李叶总黄酮含量测定方法比较研究[J]. 江西农业大学学报, 2016(1): 192–197. [LIU W, GAO H Y, LI Z W, et al. Comparative study on the determination methods of total flavonoids in wild cherry plum leaves[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2016(1): 192–197.]
- [20] 李维妮, 郭春锋, 张宇翔, 等. 气相色谱-质谱法分析乳酸菌发酵苹果汁香气成分[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 146–154. [LI W N, GUO C F, ZHANG Y X, et al. GC-MS analysis of aroma components in lactic acid bacteria fermented apple juice[J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 146–154.]
- [21] 张浩然, 范昊安, 顾逸菲, 等. 沙棘酵素发酵过程中代谢产物及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 125–133.
- [ZHANG H R, FAN H A, GU Y F, et al. Metabolites and antioxidant activity of sea buckthorn enzyme during fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(11): 125–133.]
- [22] 周映君, 谢纯良, 陈柏忠, 等. 不同酵母菌与植物乳杆菌复合发酵对新会柑酵素品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 118–125. [ZHOU Y J, XIE C L, CHEN B Z, et al. Effects of different yeast and *Lactobacillus plantarum* compound fermentation on the quality of Xinhui citrus enzyme[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(6): 118–125.]
- [23] 于思文, 王玉超, 黄一承, 等. 黑曲霉纤维素酶对蓝莓果酵素中挥发性化合物和有机酸的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(11): 36–42. [YU S W, WANG Y C, HUANG Y C, et al. Effects of cellulase from *Aspergillus niger* on volatile compounds and organic acids in *Lonicera edulis* enzyme[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(11): 36–42.]
- [24] 李浩然, 刘伟, 王晓文, 等. 野生樱桃李酵素的主要成分及其抗氧化性能分析[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 176–183.
- [LI H R, LIU W, WANG X W, et al. Analysis of the main components and antioxidant properties of wild cherry plum enzyme[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(3): 176–183.]
- [25] XIAO J, CAPANOGLU E, JASSBI A R, et al. Advance on the flavonoid C-glycosides and health benefits[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(1): S29–S45.
- [26] 李江, 顾逸菲, 王珍珍, 等. 霍山石斛酵素发酵过程中抗氧化性能的变化[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 80–89. [LI J, GU Y F, WANG Z Z, et al. Changes in antioxidant properties during fermentation of *Dendrobium huoshanense* enzyme[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2023, 23(3): 80–89.]
- [27] 范昊安, 沙如意, 方晟, 等. 苹果梨酵素发酵过程中的褐变与抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 116–123. [FAN H A, SHA R Y, FANG S, et al. Browning and antioxidant activity during fermentation of apple pear enzyme[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 116–123.]
- [28] FANG F, LI J, PAN Q, et al. Determination of red wine flavonoids by HPLC and effect of aging[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(1): 428–433.
- [29] ESPIRITO-SANTO A P, CARLIN F, RENARD C. Apple, grape or orange juice: Which one offers the best substrate for lactobacilli growth? - A screening study on bacteria viability, superoxide dismutase activity, folates production and hedonic characteristics[J]. *Food Research International*, 2015, 78: 352–360.
- [30] 梁恒宇, 邓立康, 林海龙, 等. 新资源食品—— γ -氨基丁酸(GABA)的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(15): 119–123. [LIANG H Y, DENG L K, LIN H L, et al. Research progress of new resource food- γ -aminobutyric acid (GABA)[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(15): 119–123.]
- [31] 王辉, 项丽丽, 张锋华. γ -氨基丁酸(GABA)的功能性及在食品中的应用[J]. 食品工业, 2013, 34(6): 186–189. [WANG H, XIANG L L, ZHANG F H. Functionality of γ -aminobutyric acid (GABA) and its application in food[J]. *Food Industry*, 2013, 34(6): 186–189.]
- [32] 金红星, 田楠, 成文玉, 等. 微生物发酵合成 γ -氨基丁酸的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6385–6386, 6470. [JIN H X, TIAN N, CHENG W Y, et al. Research progress of microbial fermentation synthesis of γ -aminobutyric acid[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(11): 6385–6386, 6470.]
- [33] 董欣睿, 赵鑫磊, 杨裔茜, 等. 预处理方式对米糠酵素品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 150–155. [DONG X R, ZHAO X L, YANG Y Q, et al. Effects of pretreatment methods on the quality of rice bran enzyme[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(7): 150–155.]
- [34] 高漫漫, 张旭普, 白俊岩, 等. 不同发酵工艺糙米酵素中游离氨基酸、 γ -氨基丁酸及挥发性香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 36–41. [GAO M M, ZHANG X P, BAI J Y, et al. Analysis of free amino acids, γ -aminobutyric acid and volatile aroma components in brown rice Jiaosu from different fermentation processes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(23): 36–41.]
- [35] KARAMAN S, TUTEM E, BASKAN S K, et al. Comparison of total antioxidant capacity and phenolic composition of some apple juices with combined HPLC-CUPRAC assay[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(4): 1201–1209.
- [36] 王迪, 王颖, 张艳莉, 等. 芸豆酵素发酵过程中组分及抗氧化功能研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 18–24. [WANG D, WANG Y, ZHANG Y L, et al. Study on the composition and antioxidant function of kidney bean enzyme during fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 18–24.]
- [37] YANG X, ZHOU J, FAN L, et al. Antioxidant properties of a vegetable-fruit beverage fermented with two *Lactobacillus plantarum* strains[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(6): 1719–1726.