

周文钊, 黄文平, 张华, 等. 食用酵素产品稳定性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 32–41. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050342

ZHOU Wenzhao, HUANG Wenping, ZHANG Hua, et al. Research Progress on the Stability of Edible Jiaosu Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 32–41. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050342

· 未来食品 ·

食用酵素产品稳定性研究进展

周文钊¹, 黄文平^{1,2}, 张 华^{1,*}, 祁俊生¹, 周 浓¹, 陈天福³, 郭冬琴¹
(1.重庆三峡学院生物与食品工程学院三峡库区道地中药材绿色种植与深加工
重庆市工程实验室, 重庆 404020;
2.重庆市万州食品药品检验所, 重庆 404199;
3.重庆市万州区农产品质量安全中心, 重庆 404120)

摘 要: 食用酵素是一种含有多种活性物质, 有利于人体健康的食品。食用植物酵素的稳定性是酵素新产品开发的关键点和难点之一。目前国内开展了许多植物酵素的稳定性相关研究, 但是至今没有系统的归纳和总结。因此本文基于现有文献研究, 总结归纳了酵素产品稳定性相关检测模型和评价指标, 显示其模型主要有预测货架期动力学模型; 稳定性检测指标主要包括感官评价、pH 指标、功能检测、活性成分含量和益生菌含量等, 其中感官评价和抗氧化性作为稳定性的评价指标居多。影响食用酵素产品稳定性的因素包括生产工艺条件 (发育菌种和发酵时间)、食用酵素产品后加工和贮藏环境等, 显示通过选育合适菌种或混菌发酵, 合理调整发酵时间, 选择合适的灭菌和干燥方式等后处理方式, 采取低温、避光、无氧的贮藏条件, 均有利于提高酵素产品的稳定性。建议后续继续进一步探究优势菌种的选育, 后加工技术的研究和酵素加工稳定性规程研究。总之, 本文归纳出了食用酵素稳定性评价模型和指标, 指出了生产工艺条件, 食用酵素产品后加工, 贮藏环境对食用酵素稳定性均有较大影响, 并提出了提高稳定性措施和建议, 为促进食用酵素稳定性及其相关产业的发展提供了一定的理论参考基础和指导。

关键词: 食用酵素, 稳定性, 影响因素, 建议

中图分类号: TS201.2⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0032-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050342

本文网刊:



Research Progress on the Stability of Edible Jiaosu Products

ZHOU Wenzhao¹, HUANG Wenping^{1,2}, ZHANG Hua^{1,*}, QI Junsheng¹, ZHOU Nong¹,
CHEN Tianfu³, GUO Dongqin¹

(1.The Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of the Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, College of Biological and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China;
2.Chongqing Institute for Food and Drug Control, Chongqing 404199, China;
3.Chongqing Wanzhou District Agricultural Product Quality and Safety Center, Chongqing 404120, China)

Abstract: Edible jiaosu is one type of food with many bioactive substances, which is very beneficial to human health. The stability of edible jiaosu is the key and difficult point to the development to the new jiaosu products. Currently, many studies on edible jiaosu have been conducted both domestically and internationally. However, there has been no systematic induction and summary until now. Therefore, based on the existing research results, this article summarizes the detection models and evaluation indicators related to the stability of jiaosu products. It shows that the main models include the predicting shelf life dynamics models. The stability indicators mainly include the sensory evaluation, pH index, the functional evaluation, the content of activity, and the probiotic content, among which the sensory evaluation and the

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 重庆市万州区科技计划项目 (wzstc-2020041)。

作者简介: 周文钊 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2879799773@qq.com。

* 通信作者: 张华 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 药食同源食品功能成分提取及抗氧化活性分析, E-mail: zhanghua03129@163.com。

antioxidant activity are the main evaluation indicators for the most stability evaluation. The factors that affect the stability of edible jiaosu products include the production process conditions (breeding strain, and fermentation time), the post-processing and the storage environment. The summary shows that by selecting suitable strains or mixed strains for fermentation, reasonable adjustment of fermentation time, adopting appropriate sterilization and drying methods, other post-processing methods, and using the low temperature, dark, anaerobic conditions are all beneficial to improve the stability of jiaosu products. It is recommended to further explore the selection of advantageous strains, research on post processing techniques, and stability regulations for jiaosu processing in the future. In summary, this paper summarizes the evaluation models and indicators for the stability of edible jiaosu, pointed out that production the process conditions, the post-processing of edible enzyme products, and the storage environment have a significant impact on the stability of edible jiaosu, and proposed measures and suggestions to improve its stability. This work provides a theoretical reference basis and guidance for promoting the stability of edible jiaosu and the development of its related industries.

Key words: edible jiaosu; stability; influencing factors; proposal

酵素一词最早是由 Kuhne 于 1877 年提出的, 用词为 Enzyme, 指的是“在酵母中”的意思, 而汉语中“酵素”的称呼则是来源于日本, 最早是在日本学者山内慎所做的《保健食品袖珍典》(保健食品 ミノバブル) 中有所表述, 其概念是植物之酶的提取物。酵素按其用途可分为食用酵素、环保酵素、日化酵素、农用酵素、饲用酵素和其他酵素^[1]。在我国食用植物酵素是指可以用于食品加工的植物为主要原料, 添加或不添加辅料, 经微生物发酵制得的含有特定生物活性成分的可供人类食用的酵素产品^[1]。食用酵素依据发酵原料类型不同分为单一型酵素和复合型酵素^[2], 以其产品形态分为液态、膏状、干粉状态和片块型酵素^[3]。研究表明食用酵素具有多种生理作用和功能活性, 例如具有抗氧化活性^[4]、提高免疫力^[5]、降脂^[6]、减肥^[7]、解酒护肝^[8]、改善肠道环境^[9]、抑菌^[10-11]、改善视力^[12]、促凝血^[13]等作用。而其主要的活性成分包括蛋白质与多肽类、单糖类、多糖类、维生素类、氨基酸类、酚酸类、黄酮类、类胡萝卜素以及有机硫化物和萜类化合物等^[14-15]。

关于食用植物酵素产品的制备是一个复杂的体系, 其制备工艺、品质优化及维持其稳定性是酵素新产品开发的关键点和难点^[16]。关于酵素产品稳定性的研究, 主要涉及产品功能活性及品质在一定条件下的稳定性^[17-18]。酵素食品的稳定性, 不仅影响食品的感官评价和产品货架期, 而且还影响着食品的健康品质, 与人体健康与营养有着直接的联系^[19]。因此本文主要针对国内外食用酵素稳定性的相关研究, 对食用酵素产品稳定性的相关检测指标、影响食用酵素产品稳定性的相关因素和提高食用酵素产品稳定性的方法进行综述, 并且就如何提高酵素产品稳定性给出建议, 为后续酵素产品稳定性的相关研究提供理论参考。

1 酵素产品稳定性的相关检测指标

酵素产品稳定性的相关检测模型和指标, 主要有预测货架期动力学模型、感官评价、pH 指标、功能检测、活性成分含量和益生菌含量等检测指标, 下文将对酵素产品检测中不同检测指标的分类及研究

进展进行梳理总结。

1.1 贮藏稳定性模型和指标

1.1.1 预测货架期动力学模型的建立 关于食品在贮藏过程中的品质变化及食品的货架期预测, 动力学模型被广泛运用^[20-23]。其中将一级方程与 Arrhenius 方程结合预测食品保质期是基于食品内部化学反应进行建模的方法^[21]。曾光^[24]通过货架期的预测模型对酵素的自然发酵和接种发酵进行了比较, 最后得出了综合评价模型。白琳等^[25]在研究蓝莓酵素稳定性的试验中也通过货架期的预测模型, 计算出不同温度下的蓝莓酵素产品的货架期。一级动力学方程及 Arrhenius 方程如公式(1)、公式(2)所示。

$$A = A_0 e^{kt} \quad \text{式 (1)}$$

式中, A 为贮藏 t d 的指标数值含量; A_0 为贮藏前的指标初始值含量; k 反应速率常数; t 为贮藏时间。

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{R \times T} \quad \text{式 (2)}$$

式中, k 为反应速率常数; k_0 为方程指前因子; E_a 表示活化能 (kJ/mol); T 表示绝对温度 (K); R 为气体常数 [$R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]。

在获得贮藏 t d 的指标数值含量后, 通过公式(3)可以得出相应温度下的预测货架期。

$$SL = \frac{\ln A - \ln A_0}{k_0 \times e^{-\frac{E_a}{R \times T}}} \quad \text{式 (3)}$$

式中, SL (shelf life) 为预测货架期, 单位为 d。

在式(1)中, 可以将 SOD 酶活力和 pH 代入, 即可得到两项因素在相应发酵温度中随时间的变化情况。将 $\ln k$ 作为纵坐标, $1000/T$ (T 为绝对温度) 作横坐标, 即可得出酵素在不同贮藏温度下的 Arrhenius 方程, 通过得出的线性方程与公式(2)结合, 即可得出相应条件下的 E_a 与 k_0 值, 再将 E_a 与 k_0 值代入公式(3)中, 即可得出相应 SOD 酶活力和 pH 的预测货架期。

1.1.2 酵素产品的感官评价 感官评价是通过味觉、视觉、嗅觉对产品进行三方面的评价, 这是一项

评价食品是否达到了一般标准的基础评价指标^[22]。通过感官评价检测,可以直观地了解到食品的基础品质是否合格,也可以对食品的基础性质进行评级对比。唐敏等^[26]对比了桑葚的复合与自然发酵的性质,通过感官评价的对比,证明了复合发酵的酵素品质优于自然发酵。贺娜等^[27]对自制酵素产品的评价中,用感官评价进行评级,结果表明油橄榄原味酵素的总体感官较好,而核桃玫瑰花酵素的产品中色泽状态更为优秀。可见感官评价是评价酵素产品是否符合一般标准的最基础和最广泛的方法。

1.1.3 酵素产品的 pH 检测 pH 也是酵素产品在检测时的一项重要指标,合适的 pH 可以使酵素产品的感官状态更好,并且能减少食用酵素产品中的营养物质流失^[28]。魏玉娟等^[29]在哈密瓜酵素的优化过程中,就以 pH 作为其中一项指标,发现在 pH 为 4.5~5.0 产品的状态最好,根据 pH 的浮动情况得出取 10% 的哈密瓜量,于 30 ℃ 中发酵 27 h 的情况下,哈密瓜酵素的状态最好。pH 也可以作为发酵过程中的终点指标,洪厚胜等^[18]在葡萄果渣发酵过程中以 pH 为 5.0 时开始发酵,以 pH 为 3.5 时作为发酵终点,在这个发酵周期的葡萄果渣酵素状态最好。

1.1.4 活性物质及益生菌检测 食用酵素中的活性物质主要包括维生素类、有机酸类、酶类、总酚、黄酮类、花色苷、蛋白质与多肽类、糖类、氨基酸类、类胡萝卜素、有机硫化合物、萜类化合物等。通过搜集 CNKI 数据库检索相关文献,截止到 2023 年 4 月,酵素相关研究共计 3959 条,其中和活性物质检测相关的文献为 983 条,统计出以酶类物质、维生素类物质、黄酮类物质、蛋白质与多肽类物质、氨基酸类物质、糖类物质、有机酸类物质、益生菌及其他活性物质成分作为活性物质进行检测的相关文献数量分别为 229 条、179 条、118 条、111 条、100 条、79 条、73 条、40 条及 54 条,分别占比为 23.30%、18.21%、12.00%、11.29%、10.17%、8.04%、7.43%、4.07% 及 5.49%。

总体来看,以酶类、维生素类和黄酮类物质作为活性物质进行检测的研究占比较多,其中,又以酶类及维生素类检测为最多(详见图 1)。

酵素中的功效酶主要涉及到淀粉酶、纤维素酶、蛋白质酶、果胶酶和超氧化物歧化酶等^[30-31],秦宇蒙等^[30]在研究番茄酵素发酵过程酶类变化的实验中,发现发酵不仅可以提升酶活性,还可以增强活性物质的转化。芮蓬^[32]在研究中发现,在酵素产品中的糖类主要包括还原糖、淀粉。益生菌检测指标主要有乳酸菌、酵母菌、醋酸菌;氨基酸中主要变化的是天冬氨酸和天冬酰胺。维生素的检测指标通常包含维生素 B₂、B₆^[27]、维生素 C 与维生素 E^[33] 等。黄酮类物质的检测主要集中在总黄酮上,也有研究是主要检测其异黄酮的含量指标^[34]。章昱等^[35]在铁皮石斛叶酵素活性物质变化的研究中以黄酮、多酚的含量为

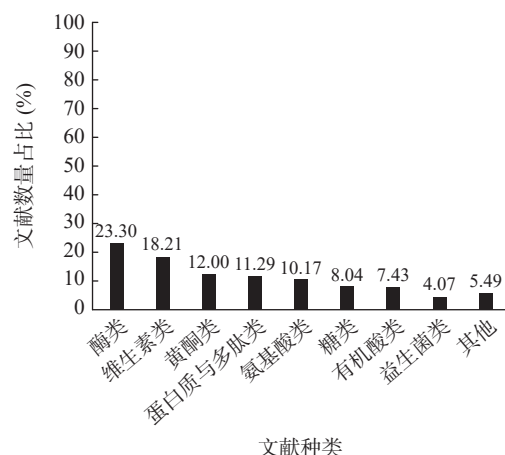


图 1 酵素产品性物质检测及益生菌检测的相关文献数量
Fig.1 Number of relevant literature on the detection of enzyme products and probiotics

指标,得出酵素在第 10 d 的综合指标最好,并得出酵素产品的发酵过程以活性物质为指标的方法可行。酵素中含有很多对产品有益的活性成分和有益菌,高洁等^[36]在研究进展中表明酵素中的主要营养物质为生物酶、乳酸菌、酵母菌,通过研究发现这些物质对人体健康有着很多益处,陈小伟等^[37]对总酚、总黄酮、总酸及有机酸等物质发酵前后进行对比,得出草莓酵素发酵前后活性物质的变化状态,从而证明草莓酵素具有很高的营养性。总的来说,对活性成分和益生菌的检测,既可以将其作为营养指标,又可以通过其变化掌握酵素发酵过程中的状态。

1.1.5 功能检测 食用酵素具有多种生理功能和生物活性。通过 CNKI 查询,截止到 2023 年 4 月,酵素相关文献为 3959 条,与功能检测相关的文献为 753 条。主要涉及抗氧化活性检测、免疫功能检测、肠道环境检测、减肥能力检测和抑菌能力检测等。

其中以抗氧化活性为检测指标的相关文献最多,为 368 条,占到功能检测相关文献的 48.87%;其次是以免疫功能为检测指标的相关文献,为 120 条,占功能检测相关的文献的 15.94%;之后是以改善肠道环境能力检测指标的文献为 102 条,占功能检测相关的文献的 13.55%;再次是以减肥能力为检测指标的相关文献为 79 条,占功能检测相关的文献的 10.50%;再然后是检测抑菌能力的相关文献为 63 条,占功能检测相关的文献的 8.37%,最后是其其他功能占相关的文献 2.77%(详见图 2)。

对于食用酵素的抗氧化活性检测指标主要包括 SOD 酶活力的测定、羟自由基清除能力的测定、DPPH 自由基清除能力的测定、还原力的测定、超氧阴离子自由基清除能力的测定、ABTS⁺自由基清除能力的测定^[38-40]。在抗氧化性的测定中,多用两种或两种以上的方法进行测定,其中, SOD 酶活力的测定、羟自由基清除能力的测定、DPPH 自由基清除能力的测定三种方法的使用次数较多,例如在响应面法优化金刺梨酵素发酵工艺的试验中,以 SOD 酶活力

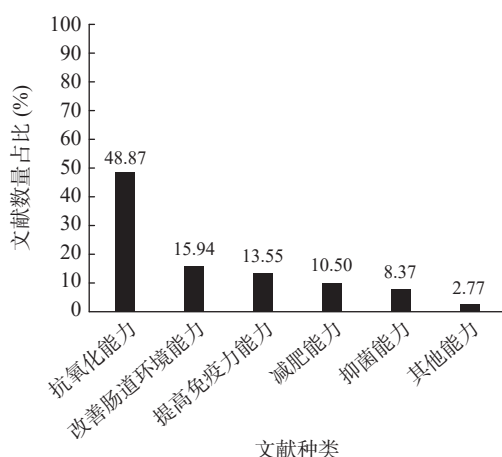


图 2 酵素产品检测功能活性的相关文献数量

Fig.2 Number of relevant literature on the detection of functional activity of enzyme products

和 DPPH 自由基清除能力作为抗氧化能力的指标^[41];在霍山石斛酵素发酵过程中抗氧化性能的变化试验中,又以羟基自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力以及 SOD 酶活力作为抗氧化能力的指标^[42];而在响应面法优化樱桃酵素的发酵工艺及抗氧化活性研究的试验中,又将 SOD 酶活力和 DPPH 自由基清除能力作为抗氧化活性的指标^[43];付龙威等^[44]在发酵过程中,通过检测枇杷酵素的抗氧化活性(羟自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率、DPPH 自由基清除率和超氧阴离子自由基清除率)得到了枇杷酵素自然发酵过程中的有机酸变化和抗氧化活性变化。

改善肠道环境能力的检测主要通过检测肠道菌群数量的变化,其中益生菌的数量越高,证明酵素对肠道环境的改善能力越强^[45]。减肥能力检测是通过喂养大鼠,以大鼠前后的体重、体内脂肪含量和体脂比来进行测算^[46]。抑菌指标检测是通过选定一种指示菌,再以比浊法指示菌的抑制作用和效果进行测定,最终通过菌落总数为指标,通过前后对比来表明抑菌的能力大小^[47-48]。

1.2 安全性指标

酵素产品主要的安全指标包括甲醇、亚硝酸盐及致病菌种安全性,下文将对不同安全指标的危害和限量进行总结梳理。

1.2.1 甲醇 水果中含有果胶,在酵素发酵过程中,因微生物作用,果胶发酵后会产生甲醇。在健康人体内,发酵过程中产生的过量甲醇会给人体带来极大的伤害,甲醇含量达到 100 mg/kg 时,人体就会产生中毒反应,如若摄入量达到 0.3~1 g/kg,就会造成死亡,也就是说,一个体重为 60 kg 的成年人如果不小心摄入 6 g 甲醇就会引起中毒,如果达到了 18~60 g 即会致死^[49]。因此发酵过程中要对甲醇的含量进行监测。李红等^[50]在评价苹果酵素安全性时,将甲醇含量作为其中一项安全指标,选择最合适的发酵温度,结果表明,在 10~35 ℃ 的区间中,甲醇含量随着温度的升高而升高,在 35 ℃ 时甲醇含量达到最高,最终

选择了 10~25 ℃ 的发酵温度来进行发酵,在酵素制作环节,检测甲醇含量是非常重要的。

1.2.2 亚硝酸盐 亚硝酸盐是一种具有毒性的产品,成年人摄入亚硝酸盐达到 0.3~0.5 g 就会出现中毒现象,达到 1.0~3.0 g 时就会有致死风险^[51]。在发酵过程中,蔬菜水果制品容易产生亚硝酸盐,在酵素产品中菌种的种类、数量不能做到精确控制,容易造成亚硝酸盐含量超标。即将施行的 GB 2762-2022《食品安全国家标准 食品中污染物的限量》中的蔬菜及其制品中亚硝酸盐含量限量为 20 mg/kg,在制作食用酵素产品时,不得超过此限值^[52]。亚硝酸盐含量在酵素发酵期间是不断变化的,很多科研人员对此进行了探究和利用。杨吉慧^[53]通过检测亚硝酸盐的含量变化来确定自制酵素产品的安全性和发酵方式。常桂芳等^[54]对冬瓜酵素和蒲公英酵素在发酵期间亚硝酸盐含量的变化进行了研究,结果表明,冬瓜酵素和蒲公英酵素分别在发酵 36 和 60 h 的时候,亚硝酸盐的含量最高,而随着发酵时间的延长,亚硝酸盐的含量逐渐降低,因此,根据亚硝酸盐含量的变化制定了发酵周期。在制作食用酵素时,对亚硝酸盐的含量进行测定,是一项非常重要的安全标准。

1.2.3 致病菌种安全性 菌落总数是评估食品卫生安全的重要品质标准之一,它可以反映出食品是否被污染或者腐败,是预测食品货架期实验中必检的项目之一^[22]。酵素在发酵过程中,因为微生物的种类和数量不受控制,因此在操作或者原材料上极可能混入杂菌,例如霉菌会产生展青霉素,它会对人体的内脏造成极大损害。李勇等^[55]在动物实验中发现,展青霉素会毒害神经并且有一定的致癌性,会破坏免疫系统。食用酵素发酵过程中易于产生的致病菌主要有金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌和霉菌。根据酵素国标 GB 4789.1-2016 规定,酵素产品内的菌落总数不超过 $10^2 \sim 10^3$ CFU/g(mL)、大肠杆菌不超过 1~10 CFU/g(mL)、金黄色葡萄球菌不超过 10^2 CFU/g(mL)、霉菌不得超过 20~50 CFU/g(mL)、不得查出沙门氏菌^[56]。在很多实验中,研究人员都会检测其中两种或两种以上的致病菌含量,来确定其致病菌种的安全性。例如,在葡萄皮西瓜皮复合酵素加工工艺的研究中,在安全性上就检测了大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的含量,以确保此工艺生产出的食用酵素产品的安全性^[57]。为确保食用酵素发酵产品的安全性,致病菌的安全性检测是必不可少的一环。

2 影响食用酵素稳定性的因素

影响食用酵素产品稳定性的因素包括生产工艺条件(发育菌种和发酵时间)、食用酵素产品后加工、贮藏环境等,其中发酵菌种因素影响较大^[58]。

2.1 生产工艺条件

2.1.1 发酵菌种 自然发酵具有不确定性,可能受到其他微生物的污染,导致最终成品风味和营养成分

的变化,最终可能致使产品的性质和口味不理想^[59]。选育良好的菌种,确定优势菌种,能够更加精确的控制发酵进程,进一步提高产品的良好性质,并且能够准确得出目标产品,同时使产品安全可靠^[60]。因此,发酵菌种的选育优化是食用酵素发酵工艺中的重要环节,有利于酵素产品的稳定^[61]。目前,在酵素发酵中,植物乳杆菌、乳酸菌、酵母菌和醋酸菌用到的较多,而混合菌种发酵在当今的研究中,也开始不断增多。以发酵效果来说,不同的菌种可以制造出不同感官性状的产品,相比较而言,酵母菌是传统的发酵菌种,用酵母菌制备的酵素产品更符合大众口感,发酵方法也比较稳定可靠,产品保质期更长^[62],营养价值更高。乳酸菌发酵可以改善产品风味,获得独特的感官性状^[63]。另外,植物乳杆菌有着很高的营养价值,以植物乳杆菌发酵的产品有着能促进健康的效果^[64]。不同的发酵菌种对产品本身有着不同的功效,不同的菌种所制备的酵素产品也有着不同的风味,选取菌种时要依据其本身性质和产品特性来决定。

2.1.2 发酵时间 酵素发酵时间受酵素种类、发酵方法、环境等因素的影响,不同酵素或者不同的条件都会影响酵素的最终发酵时间,发酵时间的合理调整是增强酵素品质的有效手段。范昊安等^[65]研究过程中发现,苹果酵素发酵时,随着发酵时间的不断延长,酵素的抗氧化活性也在不断升高,当苹果梨酵素的发酵时间延长到 140 d 时,总酚、有机酸等成分达到最高值。表明食用酵素可以通过延长其发酵时间来提高其抗氧化活性,进而增强其稳定性。陈小伟等^[37]发现草莓酵素发酵时随着时间的延长,草莓酵素的 DPPH 自由基、羟基自由基和 ABTS⁺自由基的清除能力在不断加强,因此产品的总抗氧化活性不断增强,草莓酵素的贮藏期也在延长,在草莓酵素发酵的过程中,前 20 d 产品的各项性质缓慢变化,在 20~30 d 时,产品的性质变化最为剧烈,在 30 d 时发酵到达终点,这时的蓝莓酵素性质最为稳定。付龙威等^[44]在发酵过程中发现,枇杷酵素的抗氧化活性(羟自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率、DPPH 自由基清除率和超氧阴离子自由基清除率)均呈现先上升后下降的趋势,最终确定在发酵 40 d 时枇杷酵素的抗氧化活性最高,性质最稳定。但是蓝莓酵素花青素含量稳定性研究试验显示,发酵时间越长,蓝莓发酵液的花青素含量越低,花青素的损失越高,蓝莓酵素在发酵 36 h 时达到最好的状态^[17]。可见发酵时间在一定范围内的延长有助于增强酵素稳定性,但也要依据酵素种类和检测指标的不同而有所调整。

2.2 食用酵素产品的后加工

食用酵素产品的后加工对其稳定性也有着重要的影响,后加工杀菌工艺不完善,导致市售酵素大多存在益生菌缺乏、生物酶活性弱、风味不佳等缺点,杀菌后质量不稳定。

在酵素产品的灭菌方式中,主要的灭菌方式

为高压蒸汽灭菌、巴氏灭菌、化学试剂辅助灭菌、辐照以及微波灭菌等。目前应用最广泛的杀菌方式依旧是高压蒸汽灭菌和巴氏灭菌。巴氏杀菌属于低温杀菌法,在保证杀死病原菌的同时也保留了食品中大数目的营养成分,梁翻^[66]对酵素饮料质量分析中发现,时间合适的巴氏杀菌不仅能很好地完成杀菌作用,还能对酵素饮料的状态和口感进行优化。超高温瞬时灭菌属于高温杀菌法,能十分有效地杀灭残存在产品中的微生物和致病菌,张笑莹^[67]在研究灭菌对梨酵素活性物质和稳定性的影响中证实超高温高压杀菌可以有效的留存活性物质,并且能很好地延长货架期。微波加热能大大缩短热加工时间、提高食品品质,微波灭菌技术应用于包装食品可以克服传统罐装食品风味品质低的缺陷,并可在常温下长期贮存^[68]。舒旭晨^[69]在研究石斛酵素的制备方法中,根据石斛鲜条紫外灭菌、次氯酸钠灭菌和高压蒸汽灭菌的最终效果中发现,只有高压蒸汽灭菌法能够完全去除石斛鲜条内的各种内生菌。可见传统的高热杀菌方式对去除内生菌有着明显的效果,而一些新兴的非热杀菌技术可以很好地保存酵素产品的营养活性,在实际应用中,要充分考虑到所制备的食用酵素产品特性来进行选择。

另外改变产品形态等后加工方式也可以提高酵素产品稳定性。液态酵素具有不稳定性,易受到致病菌和杂菌侵袭的性质,并且不易于运输和存储。固态的酵素产品能够很好的保持其营养性质,方便运输和储存^[70]。因此在以食用酵素产品稳定性为标准的基础上,固态酵素产品的优势更大,制作粉状、片状或块状的固态酵素产品是提高其在贮藏期间稳定性的最佳选择。

2.3 贮藏环境因素

食用酵素对周围环境十分敏感,在储存过程中会受到温度、光照、氧气含量的影响。陈天^[71]在对水果酵素贮藏稳定性的研究试验中发现,在 4 ℃ 的温度下酵素的稳定性最高,在 37 ℃ 最不稳定。白琳^[17]在进行蓝莓酵素饮料的稳定性研究时,将产品以 8、25、37 ℃ 三个不同的温度储藏 45 d,结果表明,储存条件为 8 ℃ 的产品感官状态最好且未检测出菌落数,25 ℃ 的产品状态适中,但检测出有菌落存在,37 ℃ 的产品感官最差且伴有较多的菌落数。根据测定结果得知,8 ℃ 储存的产品在储存过程中 SOD 酶活力下降幅度最小,pH 的变化幅度也最小,结果表明,在低温状态下的蓝莓酵素稳定性更强、贮藏期更长。而冯彦君^[72]在食用麦苗酵素的研究中发现,在低温、避光、无氧环境中,总酚含量的损失率以及 SOD 酶活力的损失率最低,分别为 18.34% 和 20.43%,通过对比得知,此条件下的食用麦苗酵素粉存放时间更长、稳定性更好。通过以上试验可发现食用酵素产品在低温、避光、无氧的贮存条件下,可以获得更高的稳定性和更长的货架期。

3 提高食用酵素产品稳定性的方法

3.1 生产工艺的优化

3.1.1 优育菌种与混合菌种发酵 食用酵素所使用的发酵菌种包括酵母菌、醋酸菌、霉菌和乳酸菌等^[73-74], 在食用酵素的生产中, 更多的采用酵母菌、乳酸菌和植物乳杆菌进行发酵, 然而根据想要得到的食用酵素产品特性来选择合适的菌种十分关键, 对选择的菌种进行培育, 再用于食用酵素的发酵, 可以有效优化产品状态、提高其稳定性^[26]。

除了优育菌种以外, 混菌发酵也是一种有效的稳定酵素产品品质的方式。在刘秀娟等^[75]进行混菌发酵苹果酵素的实验中, 证明酵素发酵后的性质及其稳定性与发酵菌种的选择有着密切关联。其研究结果表明, 将苹果酵素前期在 31 ℃ 发酵 5 h 的条件下进行酵母菌发酵, 再接种植物乳杆菌, 在 34 ℃ 条件下进行最后为期 5 h 的发酵, 这种方法发酵的苹果酵素效果最好。文献^[76-79]研究显示酵母菌和植物乳杆菌存在互利共生的关系, 酵母菌促进植物乳杆菌的生长, 植物乳杆菌在发酵中也可以为酵母菌提供碳源, 不仅会使发酵食品发酵的更加完整, 也可以创造出更为独特的风味特征, 因此近些年, 更多的研究人员致力于混合菌种发酵, 以期获得更好的产品性状或者更具创新性的产品。由此可见, 选择合适的菌种和发酵方式对提高酵素产品的稳定性有着十分重要的作用。

3.1.2 适当调整发酵时间 发酵时间的合理选择能很好地增强食用酵素的稳定性, 研究表明, 适当延长发酵时间可以使产品的稳定性更高^[65], 总的来说, 在酵素发酵的最佳时段中尽量地延长其发酵时间, 能够有效提高其最终产品的稳定性^[65], 但不能错过其最佳发酵期, 因此要合理调控不同酵素的发酵时间。

3.2 加工后处理的选择

3.2.1 灭菌方式的选择 酵素产品的杀菌方式多种多样, 杀菌方式的选择对于维持产品稳定有着积极作用, 不同杀菌方式的选择会使食用酵素产生不同的营养价值和感官性状。低温杀菌对产品更加温和, 可以留下更多的活性物质和风味物质, 高温杀菌对食品结构和活性物质破坏比较严重, 但是杀菌效果更为彻底^[80], 生产中采用巴氏杀菌的方式可以使食用酵素产品的状态更好、观感更佳, 但酵素产品的储藏期和稳定性可能不尽人意, 而在产品制作中使用高温灭菌的方式则能灭菌更彻底、酵素产品的稳定性更强。

其次, 添加化学试剂进行抑菌的后加工方式也可以提高酵素产品稳定性。发酵过程优势菌群是不断变化的^[81], 提高益生菌的占比可以更好地提高酵素产品的稳定性, Perricone 等^[82]通过冷藏和添加抗氧化剂, 并将成品制成胶囊化产品, 有效的提高了益生菌的存活率。Batista 等^[83]通过添加葡萄糖氧化酶来强化益生菌酸奶的特性, 与市售酸奶相比, 葡萄糖氧化酶酸奶的乳酸和益生菌培养物活性适宜、pH 较

低, 双乙酰、共轭亚油酸和多不饱和脂肪酸的值较高, 且产品的稳定性有所增强。Rúa 等^[84]研究了草本提取物对 6 种益生菌型乳酸菌生存能力的影响, 结果表明圣诞蜜瓜酵素产品的抗氧化成分与植物酚提取物的协同作用, 提高了益生菌乳酸菌在 4 ℃ 冷藏条件下的存活率并增强了此酵素产品的稳定性。

不同的产品有着不同的性质和状态, 具体灭菌方式的选择要酌情处理, 在只考虑产品稳定性的情况下, 使用高温灭菌和化学添加剂辅助灭菌的方式进行灭菌的效果更好。

3.2.2 干燥方式的选择 喷雾干燥、冷冻干燥等方式是传统的干燥方式, 葛朋焯^[85]在制作沙棘酵素产品时, 采取了真空冷冻干燥技术, 取得了良好的效果, 很好地保存了酵素产品的相关营养性质。为保持益生菌活性, Vivek 等^[86]对喷雾干燥的 Sohiong 益生菌酵素产品在储藏期间的物理稳定性进行了评价, 通过试验表明了喷雾干燥对植物乳杆菌有保护作用。罗鼻劼^[87]发现直接喷雾干燥对酵素产品的稳定性效果不好, 在研究中采用 W/O/W 复乳化技术, 最终得到了稳定性更高的酵素产品。另有研究表明, 微胶囊化和纳米胶囊化技术也可用于保护益生菌免受酸性介质的伤害^[84]。干燥方式的具体选择还要以最终产品的要求为主, 但在增强酵素产品稳定性的基础上, 喷雾干燥和胶囊化技术的结合是现阶段的最优选择。

3.3 贮藏条件的合理选择

通过 2.3 的论述可知, 将需要储存的食用酵素产品置于低温、避光、无氧的贮存条件下, 可以获得更高的稳定性和更长的货架期, 而具体需要的温度、光照强度和氧气含量还要根据酵素的种类进行微调, 根据其性质进行合理的选择, 这样可以最大限度的增强食用酵素产品的稳定性。

4 结论与展望

酵素在日常生活中的应用愈加广泛。本文就食用酵素的稳定性研究进展, 从酵素稳定性研究指标、影响酵素稳定性因素以及如何提高稳定性几方面进行综述, 可以看出大部分研究选取预测货架期、感官评价和抗氧化性来作为稳定性的评价指标。此外, 通过选育合适菌种或混菌发酵, 合理延长发酵时间, 采取合适的灭菌和干燥方式等后处理方式, 尤其是考虑高温灭菌和喷雾干燥的方式, 通过低温、避光、无氧的贮藏条件进行食用酵素产品的储藏, 在一定程度上有利于提高酵素产品的稳定性。后续就酵素稳定性研究建议应针对以下方面: 探究优势菌种的选育; 后加工技术的研究; 酵素加工稳定性规程研究。相信随着对上述问题的深入研究, 将有利于食用植物酵素产品稳定性提高, 促进其相关加工产业的大力发展。

参考文献

- [1] 工业和信息化部. QB/T 5324-2018 酵素产品分类导则[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 1-6. [Ministry of Industry and

- Information Technology. QB/T 5324-2018 Guidelines for the classification of enzyme products[S]. Beijing: China Light Industry Press, 2018: 1-6.]
- [2] 索婧怡, 朱雨婕, 陈磊, 等. 食用酵素的研究及发展前景分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 271-283. [SUO J Y, ZHU Y J, CHEN L, et al. Research and development prospect analysis of edible enzymes[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(19): 271-283.]
- [3] 朱政, 周常义, 曾磊, 等. 酵素产品研究进展及问题探究[J]. 中国标准出版社, 2019, 38(3): 10-13. [ZHU Z, ZHOU C Y, ZENG L, et al. Research progress and problem exploration of enzyme products[J]. China Standard Press, 2019, 38(3): 10-13.]
- [4] REIS F S, MARTINS A, VASCONCELOS M H, et al. Functional foods based on extracts or compounds derived from mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 66: 48-62.
- [5] MA G X, KIMATU B M, ZHAO L Y, et al. *In vivo* fermentation of a *Pleurotus eryngii* polysaccharide and its effects on fecal microbiota composition and immune response[J]. Food & Function, 2017, 8(5): 1810-1821.
- [6] 戴凌燕, 关琛, 翟爱华, 等. 糙米酵素提取物对高血脂大鼠脏器及消化酶影响的研究[J]. 农产品加工(创新版), 2010(4): 21-24. [DAI L Y, GUAN CH, ZHAI A H, et al. Study on the effects of brown rice enzyme extract on organs and digestive enzymes in hyperlipidemic rats[J]. Agricultural Product Processing (Innovative Edition), 2010(4): 21-24.]
- [7] BROWNLEE I A, CHATER P I, PEARSON J P, et al. Dietary fibre and weight loss: Where are we now[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 68: 186-191.
- [8] ZHANG X L, WU Y F, WANG Y S, et al. The protective effects of probiotic-fermented soymilk on high-fat diet-induced hyperlipidemia and liver injury[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 30: 220-227.
- [9] GONZÁLEZ-MONTOYA M, HERNÁNDEZ-LEDESMA B, MANUEL S J, et al. Peptides derived from *in vitro* gastrointestinal digestion of germinated soybean proteins inhibit human colon cancer cells proliferation and inflammation[J]. Food Chemistry, 2017, 242: 75-82.
- [10] 李俊霖, 杨晓慧, 王腾飞, 等. 10-HDA 对金黄色葡萄球菌的抑菌机理研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 73-79. [LI J L, YANG X H, WANG T F, et al. Study on the antibacterial mechanism of 10-HDA against *Staphylococcus aureus*[J]. Chinese Journal of Food, 2014, 14(12): 73-79.]
- [11] BARBOSA A A T, MANTOVANI H C, JAIN S, et al. Bacteriocins from lactic acid bacteria and their potential in the preservation of fruit products[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(7): 852-864.
- [12] 蒋光月, 万水霞, 朱宏斌. 蓝莓的营养保健价值与栽培条件[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(19): 80-81. [JIANG G Y, WAN S X, ZHU H B. The nutritional and health value of blueberries and their cultivation conditions[J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2011, 17(19): 80-81.]
- [13] SIMSEK S, NEHIR S E I, KILINC A K, et al. Vegetable and fermented vegetable juices containing germinated seeds and sprouts of lentil and cowpea[J]. Food Chemistry, 2014, 156(1): 289-295.
- [14] 梁红敏, 刘洁史, 红梅. 食用植物酵素研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 193-197. [LIANG H M, LIU J S, HONG M. Research progress in edible plant enzymes[J]. Food Industry, 2020, 41(7): 193-197.]
- [15] 白浩, 文佳嘉, 费爽雯, 等. 酵素的功能与综合应用研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 270-272. [BAI H, WEN J J, FEI SH W, et al. Research progress on the function and comprehensive application of enzymes[J]. Food Industry, 2017, 38(6): 270-272.]
- [16] 易媛, 左勇, 黄雪芹, 等. 食用植物酵素开发关键技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 316-321. [YI Y, ZUO Y, HUANG X Q, et al. Research progress on key technologies for the development of edible plant enzymes[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(7): 316-321.]
- [17] 白琳. 蓝莓酵素饮料的研制及其贮藏稳定性的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022: 90. [BAI L. Development of blueberry enzyme beverage and study on its storage stability[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2022: 90.]
- [18] 洪厚胜, 朱曼利, 李伟, 等. 葡萄果渣酵素的发酵工艺优化及其理化特性[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 63-72. [HONG H S, ZHU M L, LI W, et al. Optimization of fermentation process and physicochemical properties of grape pomace enzyme[J]. Food Science, 2019, 40(8): 63-72.]
- [19] 陈晓宇, 朱志强, 张小栓, 等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 192-199. [CHEN X Y, ZHU Z Q, ZHANG X S, et al. Research progress and trends in predicting food shelf life[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 192-199.]
- [20] 翟洋, 索玉娟, 蔡祥, 等. 基于挥发性盐基氮快速预测冷鲜鸡货架期[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 311-316. [QU Y, SUO Y J, CAI X, et al. Rapid prediction of shelf life of cold fresh chicken based on volatile base nitrogen[J]. Food Industry Technology, 2021, 42(16): 311-316.]
- [21] LABUZA T P. Enthalpy/entropy compensation in food reactions[J]. Food Technology, 1980, 34(2): 67-77.
- [22] 吴浩然, 张镭译, 林琳等. 风味蟹肉酱货架期的动力学预测研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 55-60. [WU H R, ZHANG L Y, LIN L, et al. Dynamics prediction of shelf life of flavored crab meat sauce[J]. Chinese Seasonings, 2021, 46(2): 55-60.]
- [23] 牛耀星, 王霆, 毕阳, 等. 温度对金针菇贮藏品质的影响及货架期的预测模型[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 264-271. [NIU Y X, WANG T, BI Y, et al. Effect of temperature on storage quality of *flamulina velutipes* and prediction model of shelf life[J]. Food Science, 2021, 42(1): 264-271.]
- [24] 曾光. 两种酵素发酵工艺、消化模拟及货架预测模型的研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2021: 120. [ZENG G. Research on two enzyme fermentation processes, digestion simulation, and shelf prediction models[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021: 120.]
- [25] 白琳, 郑霞, 丁帅杰, 等. 蓝莓酵素产品贮藏稳定性及抗氧化性研究[C]//中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 西安, 2020: 318-319. [BAI L, ZHENG X, DING SH J, et al. Study on the storage stability and antioxidant activity of blueberry enzyme products[C] //Abstract of the 17th Annual Meeting of China Food Science and Technology Society. Xi'an, 2020: 318-319.]
- [26] 唐敏, 刘刚, 王雪力, 等. 酵素复合与自然发酵的功效成分、感官评价与抗氧化活性比较[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 73-78. [TANG M, LIU G, WANG X L, et al. Comparison of functional components, sensory evaluation, and antioxidant activity between enzyme complex and natural fermentation[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 45(1): 73-78.]
- [27] 贺娜, 徐田, 耿树香, 等. 几种自制植物酵素功能性成分测定及感官评价[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 208-210. [HE N, XU T, GENG S X, et al. Determination of functional components and sensory evaluation of several homemade plant enzymes[J]. An-

- hui Agricultural Science, 2020, 48(1): 208–210.]
- [28] 商健. 食用酵素产 pH 的测定[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2017, 4(2): 190–191. [SHANG J. Determination of pH of edible enzyme products[J]. Management and Technology of Small and Medium Enterprises (Last Ten Days), 2017, 4(2): 190–191.]
- [29] 魏玉娟, 郁梅山, 李雪梅, 等. 哈密瓜酵素制备工艺探索优化及性能[J]. 广州化工, 2022, 50(5): 55–58. [WEI Y J, YU M SH, LI X M, et al. Exploration and optimization of Hami melon enzyme preparation process and performance[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(5): 55–58.]
- [30] 秦宇蒙, 王艳丽, 周笑犁, 等. 番茄酵素自然发酵过程中主要功效酶的变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 60–66. [QIN Y M, WANG Y L, ZHOU X L, et al. Changes in main functional enzymes during natural fermentation of tomato enzymes[J]. Food Industry Technology, 2022, 43(20): 60–66.]
- [31] 王乃馨, 李超, 苗敬芝, 等. 牛蒡复合果蔬酵素发酵工艺优化及品质变化跟踪[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 204–208. [WANG N X, LI CH, MIAO J ZH, et al. Optimization of fermentation process and quality change tracking of burdock compound fruit and vegetable enzyme[J]. Chinese Brewing, 2022, 41(4): 204–208.]
- [32] 芮蓬. 金果梨紫薯发酵果饮工艺研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022: 85. [RUI P. Research on the fermentation technology of jinguo pear purple potato fruit drink[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022: 85.]
- [33] 宁志雪, 牛广财, 朱立斌, 等. 沙棘活性成分、生理功能及开发利用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 221–227, 240. [NING ZH X, NIU G C, ZHU L B, et al. Research progress on active ingredients, physiological functions, and development and utilization of seabuckthorn[J]. Food and Machinery, 2021, 37(11): 221–227, 240.]
- [34] 杨玉, 李红艳, 邓泽元, 等. 基于主成分分析方法筛选乳酸菌发酵葛根酵素[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 196–205. [YANG Y, LI H Y, DENG Z Y, et al. Screening of lactic acid bacteria fermented puerarin based on principal component analysis[J]. Chinese Journal of Food Science, 2023, 23(3): 196–205.]
- [35] 章昱, 谭强, 曾春晖, 等. 铁皮石斛叶酵素发酵过程中活性物质及抗氧化性变化研究[J]. 中国酿造, 2022, 41(5): 188–193. [ZHANG Y, TAN Q, ZENG CH H, et al. Study on changes in active substances and antioxidant activity during the fermentation process of *Dendrobium officinale* leaves[J]. Chinese Brewing, 2022, 41(5): 188–193.]
- [36] 高洁, 栾倩, 侯丽真, 等. 酵素食品研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 227–231. [GAO J, LUAN Q, HOU L ZH, et al. Research progress in enzymatic foods[J]. Food Industry, 2021, 42(2): 227–231.]
- [37] 陈小伟, 程勇杰, 蒋立新, 等. 草莓酵素发酵过程中代谢产物及抗氧化性的变化研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 157–165. [CHEN X W, CHENG Y J, JIANG L X, et al. Changes in metabolites and antioxidant properties during strawberry enzyme fermentation[J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(5): 157–165.]
- [38] 樊秋元. 黑加仑酵素制备及其抗氧化活性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 83. [FAN Q Y. Preparation and antioxidant activity of black currant enzyme[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural and Reclamation University, 2019: 83.]
- [39] 高庆超, 常应九, 马蓉, 等. 微生物酵素的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(2): 190–195. [GAO Q C, CHANG Y J, MA R, et al. Research progress in microbial enzymes[J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 190–195.]
- [40] 阴芳冉. 红树莓自然发酵过程中生物活性研究与微生物多样性分析[D]. 保定: 河北农业大学, 2019: 70. [YIN F R. Research on biological activity and microbial diversity analysis of red raspberry during natural fermentation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019: 70.]
- [41] 赵春妮, 汤鑫鑫, 刘可, 等. 响应面法优化金刺梨酵素发酵工艺[J]. 中国酿造, 2023, 42(3): 151–156. [ZHAO CH N, TANG X X, LIU K, et al. Optimization of enzyme fermentation process for *Rosa roxburghii* by response surface methodology[J]. Chinese Brewing, 2023, 42(3): 151–156.]
- [42] 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 performance during the fermentation process of *Huoshan Dendrobium officinale*[J]. Chinese Journal of Food Science, 2023, 23(3): 80–89.]
- [43] 王缙, 崔国庭, 刘盈盈. 响应面法优化樱桃酵素的发酵工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品与药品, 2023, 25(1): 13–17. [WANG D, CUI G T, LIU Y Y. Optimization of fermentation process and antioxidant activity of cherry enzymes using response surface methodology[J]. Food and Drug, 2023, 25(1): 13–17.]
- [44] 付龙威, 汤晓娟, 林祥娜, 等. 枇杷酵素自然发酵过程中有机酸及其抗氧化活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(4): 42–47, 54. [FU L W, TANG X J, LIN X N, et al. Study on organic acids and their antioxidant activity during natural fermentation of loquat enzymes[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 42–47, 54.]
- [45] 赵冰捷. 红树莓酵素冻干粉对 I 型糖尿病小鼠肠道菌群及其代谢物影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021: 67. [ZHAO B J. Study on the effect of freeze-dried powder of mangrove enzyme on intestinal flora and its metabolites in type I diabetes mice[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021: 67.]
- [46] 邵颖, 陈安徽, 黄勃等. 植物酵素发酵过程中几种功效酶的动态变化及减肥功效评价[J]. 食品科技, 2018, 43(9): 117–120. [SHAO Y, CHEN A H, HUANG B, et al. Dynamic changes of several functional enzymes during plant enzyme fermentation and evaluation of weight loss efficacy[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(9): 117–120.]
- [47] 龚兰敏, 刘刚, 白杰, 等. 桑黄提取物的制备工艺及冻干粉抗氧化、抑菌活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(22): 143–149. [GONG L M, LIU G, BAI J, et al. Study on the preparation process of mulberry yellow extract and the antioxidant and antibacterial activities of freeze-dried powder[J]. Food Research and Development, 2021, 42(22): 143–149.]
- [48] 夏国灯. 玫瑰花酵素工艺、抗氧化性及抑菌性研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021: 81. [XIA G D. Study on the process, antioxidant activity, and antibacterial activity of rose enzyme[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021: 81.]
- [49] 赵福斌, 陈小全, 周秀艳. 甲醇及其对人体的危害[J]. 中国科技信息, 2008(10): 175, 177. [ZHAO F Q, CHEN X Q, ZHOU X Y. Methanol and its harm to human health[J]. China Science and Technology Information, 2008(10): 175, 177.]
- [50] 李红, 毛继龙, 陈文静, 等. 发酵温度对苹果酵素抗氧化性和安全性的影响[J]. 食品与药品, 2020, 22(5): 337–341. [LI H, MAO J L, CHEN W J, et al. The effect of fermentation temperature on the antioxidant and safety of apple enzymes[J]. Food and Drug Journal, 2020, 22(5): 337–341.]
- [51] 金培刚, 丁刚强, 顾振华. 食源性疾病预防与应急处置[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2006: 136–138. [JIN P G, DING G Q, GU ZH H. Foodborne disease control and emergency response[M].

- Shanghai: Fudan University Press, 2006: 136–138.]
- [52] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762-2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. GB 2762-2022 National food safety standard. Pollutant limits in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.]
- [53] 杨吉惠. 自制“水果酵素”及其亚硝酸盐含量的测定[J]. 黑龙江科技信息, 2016(25): 51. [YANG J H. Determination of self-made "fruit enzyme" and its nitrite content[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(25): 51.]
- [54] 常桂芳, 祝贺, 田莹莹, 等. 冬瓜、蒲公英酵素发酵过程中亚硝酸盐含量及其抗氧化活性测定[J]. 中国果菜, 2019, 39(12): 49–51, 55. [CHANG G F, ZHU H, TIAN Y Y, et al. Determination of nitrite content and antioxidant activity in the fermentation process of winter melon and dandelion enzymes[J]. Chinese Fruits and Vegetables, 2019, 39(12): 49–51, 55.]
- [55] 李勇, 单硕, 吴丹舟, 等. 棒曲霉素的毒性及其机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 309–316. [LI Y, SHAN SH, WU D ZH, et al. Research progress on the toxicity of patulin and its toxic mechanism[J]. Food Science, 2023, 44(11): 309–316.]
- [56] 中国生物发酵产业协会团体标准. T/CBFIA 8003-2017 食用植物酵素[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1–10. [Group standard of China biological fermentation industry association. T/CBFIA 8003-2017 Edible plant enzymes[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017: 1–10.]
- [57] 度有朋. 葡萄皮西瓜皮复合酵素加工工艺参数优化及特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022: 68. [TUO Y P. Optimization of processing parameters and characteristics of grape skin watermelon skin composite enzyme[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2022: 68.]
- [58] YUNITA D, DODD C E R. Microbial community dynamics of a blue-veined raw milk cheese from the United Kingdom[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(6): 4923–4935.
- [59] LEROY F, VUYST L D. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(2): 67–78.
- [60] CAGNO R D, CODA R, ANGELIS M D, et al. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation[J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(1): 1–10.
- [61] 宋佳. 酵素发酵工艺的优化研究[D]. 太原: 山西大学, 2017: 56. [SONG J. Optimization of enzyme fermentation process[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017: 56.]
- [62] CHWASTEK A, KLEWICKA E, KLEWICKI R, et al. Lactic acid fermentation of red beet juice supplemented with waste highbush blueberry-sucrose osmotic syrup as a method of probiotic beverage production[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2016, 40(4): 780–789.
- [63] PENG W Y, MENG D Q, YUE T L, et al. Effect of the apple cultivar on cloudy apple juice fermented by a mixture of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus plantarum*, and *Lactobacillus fermentum*[J]. *Food Chemistry*, 2020, 340: 127922.
- [64] 叶淑红, 何连芳. 植物乳杆菌的筛选及其在泡菜中的应用[J]. *中国酿造*, 2004(7): 19–21. [YE SH H, HE L F. Screening of *Lactobacillus plantarum* and its application in kimchi[J]. *China Brewing*, 2004(7): 19–21.]
- [65] 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 apple pear enzyme fermentation[J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 116–123.]
- [66] 梁翻. 酵素饮料质量问题分析及其控制措施[J]. 食品界, 2021(12): 76–77. [LIANG F. Analysis of quality problems and control measures for enzymatic beverages[J]. *Food Industry*, 2021(12): 76–77.]
- [67] 张笑莹. 梨酵素加工工艺优化及品质评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023: 97. [ZHANG X Y. Optimization of pear enzyme processing technology and quality evaluation[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023: 97.]
- [68] 阎若萍, 王易芬, 涂桂飞, 等. 工业微波灭菌技术在食品加工领域的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 302–308. [YAN R P, WANG Y F, TU G F, et al. Research progress of industrial microwave sterilization technology in the field of food processing[J]. *Food Industry Technology*, 2018, 39(8): 302–308.]
- [69] 舒旭晨. 石斛酵素制备工艺及其功能活性研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019: 68. [SHU X C. Study on the preparation process and functional activity of *Dendrobium* enzyme[D]. Wuhu: Anhui University of Engineering, 2019: 68.]
- [70] 韩宗元, 李晓静, 叶丰, 等. 固态酵素食品的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 294–299. [HAN Z Y, LI X J, YE F, et al. Research progress in solid-state fermented foods[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2018, 44(9): 294–299.]
- [71] 陈天. 不同发酵方式对水果酵素发酵特性、贮藏稳定性及其干物质的影响研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 88. [CHEN T. Study on the effects of different fermentation methods on the fermentation characteristics, storage stability, and dry matter of fruit enzymes[D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2021: 88.]
- [72] 冯彦君. 麦苗酵素粉及其代餐粉的加工与抗氧化功能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 65. [FENG Y J. Study on the processing and antioxidant function of wheat seedling enzyme powder and its substitute meal powder[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 65.]
- [73] WARDHANI D H, VÁZQUEZ J A, PANDIELLA S S. Optimisation of antioxidants extraction from soybeans fermented by *Aspergillus oryzae*[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 731–739.
- [74] FENG Y J, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Recent research process of fermented plant extract: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 65: 40–48.
- [75] 刘秀娟, 李庆鹏, 崔龙, 等. 混菌发酵苹果酵素工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 190–198. [LIU X J, LI Q P, CUI L, et al. Study on the process of mixed fermentation of apple enzymes[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(1): 190–198.]
- [76] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 28–36.
- [77] MANINI F, BRASCA M, PLUMED-FERRER C, et al. Study of the chemical changes and evolution of microbiota during sourdough like fermentation of wheat bran[J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(4): 342–349.
- [78] ZALÁN Z, HEGYI F, SZABÓ E E, et al. Bran fermentation with lactobacillus strains to develop a functional ingredient for sourdough production[J]. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 2015, 4(4): 409–419.
- [79] DEY T B, CHAKRABORTY S, JAIN K K, et al. Antioxidant phenolics and their microbial production by submerged and sol-

id state fermentation process: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 53: 60–74.

[80] 王明, 李铁志, 雷激. 杀菌方式对熟肉制品品质的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(2): 54–58. [WANG M, LI T ZH, LEI J. The effect of sterilization methods on the quality of cooked meat products[J]. Food Industry, 2016, 37(2): 54–58.]

[81] 邸鹏月, 彭宇, 李晨, 等. 基于宏基因组分析桑葚酵素的微生物多样性[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 251–257. [DI P Y, PENG Y, LI CH, et al. Microbial diversity of mulberry enzymes based on metagenomic analysis[J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(5): 251–257.]

[82] PERRICONE M, BEVILACQUA A, ALTIERI C, et al. Challenges for the production of probiotic fruit juices[J]. *Beverages*, 2015, 1(2): 95–103.

[83] BATISTA A L D, SILVA R, CAPPATO L P, et al. Quality parameters of probiotic yogurt added to glucose oxidase compared to commercial products through microbiological, physical-chemical and metabolic activity analyses[J]. *Food Research International*,

2015, 77: 627–635.

[84] RÚA J, LÓPEZ-RODRÍGUEZ I, SANZ J, et al. Improving functional properties of "Piel de Sapo" melon juice by addition of a *Lippia citriodora* natural extract and probiotic-type lactic acid bacteria[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 96: 75–81.

[85] 葛朋辉. 沙棘酵素的加工工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 44. [GE P Y. Research on the processing technology of seabuckthorn enzyme[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 44.]

[86] VIVEK K, MISHRA S, PRADHAN R C. Characterization of spray dried probiotic Sohiong fruit powder with *Lactobacillus plantarum*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 117(3): 108–699.

[87] 罗昇劫. 微胶囊化松针酵素粉加工关键技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 90. [LUO J J. Research on key technologies for microencapsulated pine needle enzyme powder processing[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022: 90.]