

# 食用植物酵素中有机酸功能活性研究进展

## Research on functional activities of organic acids in edible plant ferment

黄颖<sup>1</sup>任廷远<sup>2</sup>万红琼<sup>3</sup>谢姣<sup>1</sup>HUANG Ying<sup>1</sup> REN Ting-yuan<sup>2</sup> WAN Hong-qiong<sup>3</sup> XIE Jiao<sup>1</sup>

(1. 贵州医科大学环境污染与疾病监控教育部重点实验室公共卫生学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 甘肃省白银市靖远县科学技术局, 甘肃 白银 730600)

(1. School of Public Health and the key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. School of Brewing and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

3. Science and Technology Bureau of Jingyuan County in Baiyin City, Baiyin, Gansu 730600, China)

**摘要:**文章综述了酵素产品中有机酸组成及发酵过程的动态变化,对酵素中有机酸的抗氧化、调整肠道菌群、增强饱腹感、抗肿瘤等有助于人体健康的功能活性进行了分析,指出后续可对食用酵素中有机酸评价体系及作用机制进行研究。

**关键词:**有机酸;食用植物酵素;发酵;功能活性

**Abstract:** The composition of organic acids in enzyme products and their dynamic changes during fermentation process were reviewed, and the function activities of organic acids in enzyme products beneficial to human health, such as antioxidant, adjustment of intestinal flora, enhancement of satiety, anti-tumor, etc were summarized. Moreover, the evaluation system and mechanism of organic acids in edible enzymes were proposed to be further studied.

**Keywords:** organic acids; edible plant enzymes; fermentation; functional activity

目前,酵素产品因具有抗氧化、抗肿瘤、增强免疫等功能活性而被广泛应用<sup>[1]</sup>。已有研究<sup>[2-3]</sup>表明,酵素保健功能是由多种物质共同发挥作用而成,其中有机酸不仅因其具有调整肠道菌群能力、维护肠道形态及功能,还具有抗炎、抗氧化作用进而可缓解和治疗结肠炎等多种肠道疾病而备受关注。而食用植物酵素是利用一种或多

种益生菌发酵果蔬、谷物、菌藻、中草药等而形成的富含多种酶、矿物质、维生素、有机酸及其他代谢产物的固态和液态食品<sup>[4]</sup>。其中,食用植物酵素中有机酸主要源于植物原料及其他有益菌发酵,而发酵过程中有机酸含量和种类是一个动态过程,故研究有机酸与微生物群落共性变化规律,有助于生产过程中以有机酸为指标而进一步控制酵素中微生物发酵过程和品质<sup>[5]</sup>。因此,文章拟主要综述酵素中有机酸的组成、发酵过程中的变化、生理功能,以期对食用酵素有机酸评价体系及生理功能提供依据。

### 1 食用植物酵素简介

近年来,随着酵素在国外市场的迅速发展,中国酵素市场也开始孕育和发展,植物酵素目前逐步扩展到美容护肤、食品等方面<sup>[6-7]</sup>。而酵素主要源于果蔬等植物,这类食用植物是维生素、有机酸、矿物质等营养素的主要来源,故食用植物酵素中相应的营养素种类和含量丰富,且含糖量低<sup>[8]</sup>,同时酵素产品经发酵后其与普通乳制品替代品不同,即食用植物性酵素适用于乳糖不耐症、牛奶过敏或纯素食者。此外,随着人们生活水平的逐步提高,健康意识逐步加强,对功能性食品的需求也与日俱增。而食用植物酵素具有多种保健功能如抗氧化<sup>[9]</sup>、美白护肤<sup>[10-11]</sup>、增强免疫<sup>[12-13]</sup>、抗肿瘤<sup>[14]</sup>、改善肠道菌群<sup>[15]</sup>等,与大众的养生理念一致,故食用植物酵素具有广阔的市场前景。

食用植物酵素发酵的本质是微生物为了获得能量和维持其合成代谢过程,降低了原基质中碳水化合物和其他大分子含量,积累分解代谢产物,从而不断改变整个体系物质组成,最后达到平衡的过程,故酵素发酵机理为各种微生物基础代谢的活动<sup>[16-17]</sup>。研究<sup>[18]</sup>表明,食用植物

**基金项目:**贵州省特色林业产业研发项目(编号:特林研 2020-05);贵州省工业与信息化厅专项(编号:黔财农[2020]307);贵州省林业局科技项目(编号:黔林科合[2020]2015);贵州省高等学校工程研究中心(编号:黔教合 KY 字[2021]008)

**作者简介:**黄颖,女,贵州医科大学在读本科生。

**通信作者:**谢姣(1985—),女,贵州医科大学讲师,博士。

E-mail: lxj4516@126.com

**收稿日期:**2021-06-17

酵素发酵液在酵母菌、乳酸菌和醋酸菌等转化下生成酯类、酸类和酚类等代谢产物,其风味物质发生明显变化。目前,植物酵素发酵过程中相关代谢产物主要有:①多酚类,如类黄酮、单宁<sup>[19]</sup>;②醇类,如乙醇、丁醇<sup>[20]</sup>;③有机酸类,如乳酸、苹果酸等<sup>[21]</sup>;④酶类,如蛋白酶、SOD等<sup>[22]</sup>;⑤氨基酸和维生素等其他物质<sup>[23-25]</sup>,丰富的代谢产物赋予了植物酵素特别的口感和风味。其中,有机酸对酵素的风味起重要作用,有机酸类物质为酯类形成的前体物质,它既能构成其他香味物质,如金刺梨酵素中有有机酸对风味的重要性仅次于酯类,还是重要的味觉物质使酵素口感丰满<sup>[26]</sup>。因此,通过分析发酵酵素中有有机酸的组成,可建立食用酵素的质量评价体系来改善和指导酵素中风味和品质,还可根据有机酸的性质与作用机制,建立食用植物酵素有机酸功能性的评价体系<sup>[27]</sup>。

## 2 食用植物酵素有机酸研究进展

### 2.1 食用植物酵素有机酸的组成

有机酸是指具有酸性的有机化合物,大多数具有酸味植物中含有该类物质,其具抗氧化、杀菌消炎、维持酸碱平衡、增强抵抗力等作用<sup>[28]</sup>。目前,有机酸包括天然有机酸和合成有机酸,而植物酵素中富含的大量有机酸,一方面来自于植物原料中天然存在的有机酸,另一方面来自于发酵过程中由于微生物代谢生成的产物。因此,不同植物原料来源酵素中有有机酸的组成与含量差异较大,而不同菌种发酵的植物酵素中有有机酸的含量和种类存在差异。

张思等<sup>[27]</sup>研究表明,市售的 16 种酵素中,由于食品原料和生产工艺不同,酵素产品质量参差不齐,含有 3~7 种有机酸,且主要为乳酸、柠檬酸、苹果酸和异丁酸,各种有机酸含量差异较大,对产品口感和风味有重要影响。研究<sup>[29]</sup>发现,金佛手酵素在自然发酵过程中有机酸组成多样,主要含 L-酒石酸、草酸、乙酸、L-苹果酸、抗坏血酸、莽草酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸,乳酸、乙酸、柠檬酸和 L-酒石酸为发酵过程中含量排名靠前的有机酸。此外,对 4 种不同原料配比的黑果枸杞酵素中有有机酸种类及含量进行分析发现,4 种酵素中有有机酸的种类及含量不同,黑果枸杞酵素在发酵过程中的有机酸种类丰富,共检出 12 或 13 种有机酸,其中含量较多的是乳酸、 $\gamma$ -氨基丁酸、抗坏血酸、草酸和苹果酸<sup>[30]</sup>。此外,乳酸菌辅助超声对葛根汁进行发酵,主要含有乳酸、草酸、抗坏血酸、 $\gamma$ -氨基丁酸、乙酸、柠檬酸、苹果酸等,其中乳酸的酸味温和适中,口感较好,也是发酵葛根汁的特征性风味酸<sup>[31]</sup>。综上,不同植物原料与发酵方法中,食用植物酵素中有有机酸种类不同,但其共有的有机酸种类主要有乳酸、酒石酸、乙酸、丁酸、柠檬酸等,其中乳酸是乳酸菌发酵产生的主要有机酸,在发酵过程中变化最大。此外,发酵过程也会产生一些短链脂肪酸,如乙酸、丁酸等,此类短链脂肪酸对维持

人体健康有益。

### 2.2 食用植物酵素发酵过程中有机酸的变化

食用植物酵素发酵时会产生新的有机酸且其原有的有机酸含量也会发生变化。林灵等<sup>[26]</sup>研究发现金刺梨发酵前后有机酸种类和含量均发生了显著变化,有机酸含量总体升高、种类增多,较发酵前新增了 3 种有机酸,分别是乳酸、苹果酸和醋酸;此外苹果酸相较发酵前含量增长了 7.51 倍,柠檬酸含量较发酵前增长了 3.42 倍。以上有机酸变化的差异,除与原料密切相关外,主要源于微生物及各物质间的相互转化,使得发酵各阶段处于一个动态变化过程<sup>[32]</sup>。微生物主要利用糖酵解、三羧酸循环和苹果酸—乳酸发酵等途径,代谢生成乳酸、醋酸、苹果酸、柠檬酸、丙酮酸等有机酸,导致发酵过程中有机酸含量总体呈上升趋势,由于发酵各时段微生物数量与代谢生理不同,所以各时段的总体增长趋势有所差异<sup>[33]</sup>。研究<sup>[34]</sup>发现,聚类分析将百合酵素发酵过程分为 3 类,即适应期、增长期和平缓期,发酵第 5~10 天为适应期,该时期酶类物质及微生物代谢产生的有机酸较少;发酵第 15~60 天为增长期,此阶段有机酸含量显著上升,微生物生长繁殖旺盛,产生大量代谢产物,包括丰富的有机酸,发酵第 70~90 天为平稳期,有机酸含量趋于稳定且含量较高。草莓酵素有机酸发酵初期,糖类物质消耗较少,发酵液中的总酸变化不显著,发酵中期发酵液的总酸浓度快速上升,总糖含量随之快速下降,乳酸和醋酸等有机酸含量增多,发酵后期总糖和有机酸含量趋于稳定<sup>[35]</sup>。这可能是发酵初期微生物菌群在此阶段主要是适应环境,繁殖及代谢活动缓慢,产生的有机酸也较少;发酵中期,由于植物原料的降解,发酵液中的各种营养物质丰富,产酸微生物大量繁殖并代谢产酸;发酵后期,由于较低 pH 抑制了微生物的生理活动,加上糖类物质消耗导致总量不断减少,微生物利用发酵液中有有机酸作为碳源进行一系列代谢活动,另一方面可能与有机酸类物质产生的酯类等风味物质有关,导致有机酸含量在后期趋于稳定或略有下降<sup>[36-37]</sup>。综上,明确有机酸的组成及其变化规律,进而开展对酵素中有有机酸性质与特定生理活性的研究,有目的地调节有机酸种类和含量,进而对酵素产品质量控制及酵素有机酸调节机体生理功能进行综合性评价提供理论基础。

### 2.3 食用植物酵素中有有机酸的生理活性

2.3.1 抗氧化 方晟等<sup>[29]</sup>研究表明,金佛手酵素发酵过程中 DPPH 自由基清除率与琥珀酸呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数为 0.786;超氧自由基清除率与乳酸含量具有显著正相关( $P<0.05$ );羟基自由基清除率与乳酸和乙酸含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与草酸和 L-酒石酸含量为显著正相关( $P<0.05$ ),说明金佛手酵素中有有机酸具有一定的抗氧化作用,且与有机酸含量密切相关。

此外,蒋增良等<sup>[38]</sup>研究发现,葡萄酵素的还原力、DPPH 自由基清除能力、羟基自由基清除能力、超氧自由基清除能力和 ABTS 自由基清除能力均与有机酸浓度相关,葡萄酵素中有机酸主要为苹果酸、乙酸、酒石酸和柠檬酸<sup>[39]</sup>,微生物发酵代谢过程中积累了新的有机酸,如乙酸、丙酮酸、富马酸和莽草酸,其良好的自由基清除能力,可能来自于有机酸与多种物质协同作用。综上,发酵可以显著提高酵素抗氧化能力,其中乳酸、乙酸、草酸、酒石酸、琥珀酸等有机酸抗氧化作用显著。

**2.3.2 调整肠道菌群** 食用植物酵素中的益生菌如乳酸菌,一方面可以粘附在肠道上皮,从而阻止大肠杆菌、沙门氏菌、梭状芽孢杆菌等致病菌向肠道上皮内的入侵,另一方面益生菌产生的有机酸,如乳酸和短链挥发性脂肪酸,可以为潜在致病性微生物创造限制性的生理环境,如降低 pH 值,从而达到调整肠道菌群的效果<sup>[6]</sup>。有机酸调整肠道菌群主要是在肠道发生结合反应,包括糖基化、羟基化和甲基化,酵素中有机酸对风味有重要作用外,还可以被肠道黏膜吸收利用,为肠黏膜代谢提供能源,促进黏膜生长、肠道细胞增殖和钠离子吸收等作用,调整肠道菌群,以此降低肠道及慢性疾病的发病风险<sup>[40]</sup>。因此,食用植物酵素中所含有机酸有助于调整肠道菌群。

**2.3.3 增强饱腹感,预防肥胖** 食用植物酵素中有机酸如丙酸、丁酸和乙酸,在饱腹感级联反应中发挥作用,而以上短链脂肪酸主要通过控制肠道激素(如肽 PYY 和胰高血糖素样肽)的表达来调节食物的摄入,丙酸通过延迟胃排空率和降低血糖和胰岛素反应使人产生饱腹感,丁酸、丙酸和乙酸盐均能防止饮食引起的肥胖和胰岛素抵抗,可诱导肠道激素和减少食物摄入量<sup>[41-43]</sup>。对嗜酸乳杆菌和弗氏丙酸杆菌发酵饮料的饱腹效果进行评价,食用富含丙酸的发酵饮料明显增加了饱腹感,同时通过视觉模拟反应评估发现其饥饿感降低<sup>[44]</sup>。有机酸中的短链脂肪酸通常是通过发酵产生<sup>[45]</sup>,故可利用益生菌发酵产生丙酸、乙酸和/或丁酸来作为生产引起饱腹感的酵素食品,可增强饱腹感并预防由饮食诱导的肥胖。

**2.3.4 抗肿瘤** 丁酸有抑制 HCT-116 细胞增殖的作用,丁酸标准溶液以剂量一效应依赖性诱导细胞凋亡,且凋亡诱导作用与增殖抑制作用强弱顺序一致,乳酸菌发酵产物能诱导 HCT-116 细胞凋亡,DNA 发生片段化,说明发酵产物诱导细胞凋亡是其抑制细胞增殖的重要途径;凋亡诱导作用与增殖抑制作用强弱顺序也一致,说明发酵产物中的丁酸含量直接影响发酵产物的抗癌作用<sup>[46]</sup>,其作用机制可能是营养肠黏膜、恢复细胞生理增殖模式和增强谷氨酰胺酶活性诱导细胞凋亡<sup>[47]</sup>。故酵素中含有的短链脂肪酸,如  $\gamma$ -氨基丁酸具有抗肿瘤作用,这为开发预防结肠癌作用的酵素功能性食品提供了理论依据。

**2.3.5 抑菌抗炎** 酵素食品中富含有机酸,而有机酸对肠道 pH 调节有重要作用,如李宁等<sup>[48]</sup>研究发现,微生物

酵素有预防术后早期感染作用,使环境 pH 下降呈酸性,促进肠道蠕动,并对病原菌有拮抗作用,能提高消化道局部免疫抗菌功能,同时可使全身其他黏膜组织产生特异性免疫效应,共同达到抑制致病菌感染的功效。Lamia 等<sup>[49]</sup>研究发现,由葡萄汁与红茶共发酵所形成的酵素液,其发酵过程中产生的乙酸及其他代谢产物,对细菌有抑制作用,能够起到抑菌抗炎效果。综上,酵素食品中有机酸的抗菌抗炎作用主要是在控制肠道管腔 pH 中发挥作用,从而影响其对低 pH 敏感的细菌(包括部分病原体)的水平<sup>[50]</sup>。

**2.3.6 其他作用** 除以上功能外,有机酸还可能具有降低心脑血管疾病风险、降血脂等其他作用。有研究<sup>[51]</sup>表明,乳酸菌产生短链脂肪酸,主要是乙酸、丙酸和丁酸,作为最终产品短链脂肪酸可能会降低患胃肠道疾病和心血管疾病的患病率。梁艳花<sup>[52]</sup>研究发现,红枣乳酸饮料较红枣汁有明显降血脂功能,其中有机酸、多酚物质和其他发酵产物可能有协助降血脂的效果。

### 3 结论与展望

发酵过程中不同时间的微生物群落、代谢物的变化规律与酵素的品质、功能和安全性密切相关,其中有机酸的监测可在一定程度上反映微生物对底物的利用程度,预测发酵完成时间,也可以作为区分是否有异常发酵的重要指标之一<sup>[53]</sup>。中国对酵素产品中有机酸的评价体系研究甚少,其中有机酸调节肠道菌群能力评价体系的评价指标单一,且缺乏科学的试验数据,后续可进一步对酵素中有机酸的作用机制进行研究,并提出有机酸的综合评价体系。微生物在发酵过程中产生的有机酸种类和含量不仅对发酵产品的品质和风味有重要影响,还会影响酵素特定生理活性的发挥,如何准确调控发酵过程中有机酸的含量和种类是目前待解决的难题之一。

### 参考文献

- [1] 赵芳芳,莫雅雯,蒋增良,等.功能性微生物酵素产品的研究进展[J].食品与发酵工业,2016(7):283-287.  
ZHAO Fang-fang, MO Ya-wen, JING Zeng-liang, et al. Research progress on functional microbial ferment product[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(7): 283-287.
- [2] JIAN Tan, CRAIG M, MARIA P, et al. The role of short-chain fatty acids in health and disease[J]. Advances in Immunology, 2014, 121: 91-119.
- [3] 程勇杰,陈小伟,王珍珍,等.树莓酵素与蓝莓酵素有机酸分析及体外抗氧化性能[J].食品工业科技,2017,38(20):141-145.  
CHENG Yong-jie, CHEN Xiao-wei, WANG Zhen-zhen, et al. Analysis of organic acids of in vitro antioxidant activity of raspberry-ferment and blueberry-ferment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(20): 141-145.
- [4] 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 Wei-jian, WU Yuan-feng, FANG Sheng. Research progress on microbial ferment[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology, 2010, 39(3): 42-44.
- [5] 李希羽, 高洁, 李云姣, 等. 水果酵素自然发酵过程中优势菌群与有机酸变化规律分析[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 61-68.
- LI Xi-yu, GAO Jie, LI Yun-jiao, et al. Analysis of the relationship between bacterial community composition and changes in organic acids during natural fermentation of mixed fruits[J]. Food Science, 2020, 41(24): 61-68.
- [6] 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, 345.
- HAN Qi, ZHAO Jin-min, GAO Xiao-qin, et al. Development status of functional fermented enzymes [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 337-340, 345.
- [7] OGUNREMI O R, SANNI A I, AGRAWAL R. Probiotic potentials of yeasts isolated from some cereal-based nigerian traditional fermented food products[J]. Journal of Applied Microbiology, 2015, 119(3): 797-808.
- [8] CHAMINDA S R, JANAK V, RAMON R, et al. Probiotic delivery through fermentation: Dairy vs. non-dairy beverages [J]. Fermentation, 2017, 3(4): 67.
- [9] 管章瑞, 田裕, 赵娜, 等. 蓝莓酵素发酵过程中的抗氧化活性变化研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 74-80.
- GUAN Zhang-rui, TIAN Yu, ZHAO Na, et al. Changes in antioxidant activity of blueberry Jiaosu during fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(12): 74-80.
- [10] 董银卯, 何聪芬, 王领, 等. 火龙果酵素生物活性的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 192-196.
- DONG Y M, HE C F, WANG L, et al. Study on the bioactivity of pitaya enzyme[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(3): 192-196.
- [11] 田中清隆, 王力群, 白井祐史, 等. 李子酵素分解物 Clairju 在美白化妆品中的应用研究[J]. 日用化学品科学, 2014, 37(11): 31-35.
- TANAKA K, WANG Li-qun, YUJI U, et al. Research on the application of Clairju(plum enzyme decomposition) in whitening cosmetics[J]. Detergent & Cosmetics, 2014, 37(11): 31-35.
- [12] WUYTS S, BEECK W V, ALLONSIUS C N, et al. Applications of plant-based fermented foods and their microbes [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2020, 61: 45-52.
- [13] 郭爽. 敖东酵素保健功能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 5.
- GUO Shuang. The studies on the health care functions of AoDong fermented beverage[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 5.
- [14] 陆雨, 江石平, 孙冬雪, 等. 诺丽酵素化学成分及其抗肿瘤活性研究[J]. 中国药学杂志, 2018, 53(18): 1 552-1 556.
- LU Yu, JIANG Shi-ping, SUN Dong-xue, et al. Chemical constituents from noni enzyme and their antitumor activities[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2018, 53(18): 1 552-1 556.
- [15] 赵菲, 刘孝余, 宫芳婧, 等. 高通量测序技术研究鱼腥草酵素对小鼠肠道菌群的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(32): 156-159, 172.
- ZHAO Fei, LIU Xiao-yu, GONG Fang-jing, et al. Effect of Houttuynia cordata enzyme on intestinal flora in mice evaluated by high-throughput sequencing[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2018, 46(32): 156-159, 172.
- [16] 苏春雷. 高压静电场辅助发酵余甘子酵素工艺及其酵素特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- SU Chun-lei. Study on high-voltage electrostatic field-assisted fermentation of Phyllanthus Emblica Jiaosu and its characteristics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [17] MARCO M L, HEENEY D, BINDA S, et al. Health benefits of fermented foods: Microbiota and beyond[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2017, 44: 94-102.
- [18] 陈英, 余雄伟, 龚文发, 等. 植物酵素发酵特性及风味物质变化的研究[J]. 饮料工业, 2015, 18(2): 9-12.
- CHEN Ying, YU Xiong-wei, GONG Wen-fa, et al. Study on fermentation property and the change of flavor substances of plant enzyme[J]. Beverage Industry, 2015, 18(2): 9-12.
- [19] 潘梓源, 林佳漫, 邓乃铨, 等. 桂圆酵素的发酵工艺优化及其酚类化合物生物转化分析[J]. 中国酿造, 2019, 38(7): 95-99.
- PAN Zi-yuan, LIN Jia-man, DENG Nai-quan, et al. Optimization of fermentation process for longan ferment and biotransformation analysis of its phenolic compounds[J]. China Brewing, 2019, 38(7): 95-99.
- [20] 范昊安, 沙如意, 杜柠, 等. 苹果梨酵素发酵过程中香气成分的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 177-184.
- FAN Hao-an, SHA Ru-yi, DU Ning, et al. Changes in aroma components during fermentation of 'Pingguoli' pear Jiaosu (fermented fruit juice)[J]. Food Science, 2021, 42(2): 177-184.
- [21] 刘毓锋. 益生菌发酵水果饮料工艺及品质变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 32.
- LIU Yu-feng. Research on fermentation of fruit beverages with probiotics and their quality change[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 32.
- [22] 王辉, 马秀敏, 张鹰. 青梅酵素的生物活性及体外抑菌作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(12): 39-43.
- WANG Hui, MA Xiu-min, ZHANG Yin. Bioactivity and inhibition effects of greengage ferment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(12): 39-43.
- [23] 李俊芳. 产维生素 B<sub>12</sub>乳酸菌的筛选及生物学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008: 2.
- LI Jun-fang. Screening of Lactobacillus for vitamin B<sub>12</sub>-produced and studying on biological characteristics [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2008: 2.
- [24] 罗苗苗, 胡学超, 邱宏伟, 等. 微生物发酵法制备维生素 K<sub>2</sub> 研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(10): 221-225.
- LUO Miao-miao, HU Xue-chao, QIU Hong-wei, et al. Research progress on vitamin K<sub>2</sub> by microorganism fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(10): 221-225.

- [25] 常若毅, 吕嘉彬, 余芳. 乳酸菌发酵产维生素 B<sub>1</sub> 和 B<sub>6</sub> 的研究[J]. 中国调味品, 2018, 43(2): 4-7, 11.  
CHANG Ruo-yi, LU Jia-bi, YU Fang. Study on the production of vitamin B<sub>1</sub> and B<sub>6</sub> by lactic acid bacteria[J]. China Condiment, 2018, 43(2): 4-7, 11.
- [26] 林灵, 王瑜, 杨娟, 等. 金刺梨发酵前后风味物质变化研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 155-161.  
LIN Ling, WANG Yu, YANG Juan, et al. Changes of flavor substances in Rosa Sterilis before and after fermentation[J]. China Brewing, 2020, 39(6): 155-161.
- [27] 张思, 王蕾, 张志旭, 等. 16 种市售酵素食品功能分析与评价[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 196-200, 224.  
ZHANG Si, WANG Lei, WANG Zhi-xu, et al. Functional analysis and evaluation on commercially available enzyme food[J]. Food & Machinery, 2016, 32(9): 196-200, 224.
- [28] 饶智, 陈彦坤, 刘斌, 等. “药食同源”植物酵素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 290-294.  
RAO Zhi, CHEN Yan-kun, LIU Bin, et al. Research progress on “herb-food homology” plant Jiaosu[J]. Food and Fermentation Industries 2020, 46(9): 290-294.
- [29] 方晟, 陈俊池, 周瑾, 等. 金佛手酵素发酵过程中有机酸及其体外抗氧化性能分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 68-74.  
FANG Sheng, CHEN Jun-duo, ZHOU Jin, et al. Analysis of organic acids and antioxidant activity in vitro of citrus medica Jiaosu during fermentation process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 68-74.
- [30] 高庆超, 常应九, 马蓉, 等. 黑果枸杞酵素发酵前后主要成分分析及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 275-283.  
GAO Qing-chao, CHANG Ying-jiu, MA Rong, et al. Analysis of main components and antioxidant activity in vitro for Lycium ruthenicum Murr. Jiaosu before and after fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 275-283.
- [31] 刘加友. 富含  $\gamma$ -氨基丁酸葛根酵素发酵及其解酒功能的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016: 41-43.  
LIU Jia-you. Fermentation and alcoholic intoxication prevention of kudzu ferment rich in  $\gamma$ -aminobutyric acid[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016: 41-43.
- [32] 张梦梅, 刘芳, 胡凯弟, 等. 酵素食品微生物指标与主要功效酶及有机酸分析[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(9): 195-200.  
ZHANG Meng-mei, LIU Fang, HU Kai-di, et al. Analysis on microorganism index main enzymes and organic acids of leaven food[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(9): 195-200.
- [33] 李维妮, 张宇翔, 魏建平, 等. 益生菌发酵苹果汁工艺优化及有机酸的变化[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 80-87.  
LI Wei-ni, ZHANG Yu-xiang, WEI Jian-pin, et al. Optimization of fermentation of apple juice by probiotics and organic acids evolution during fermentation[J]. Food Science, 2017, 38(22): 80-87.
- [34] 方晟, 陈彝, 沙如意, 等. 百合酵素自然发酵过程中有机酸及其体外抗氧化活性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 39-46.  
FANG Sheng, CHEN Ben, SHA Ru-yi, et al. Study on adsorption and diffusion parameters of flavor substances in polyethylene[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(22): 39-46.
- [35] 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 Xiao-wei, CHEN Yong-jie, JIANG Li-xin, et al. Studies on the changes of metabolites and antioxidant activity during the fermentation process of strawberry Jiaosu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 157-165.
- [36] 陈彝, 方晟, 张佳城, 等. 栀子花和玉兰花粉素营养液发酵过程中营养成分的动态分析[J]. 农业工程, 2018, 8(3): 122-126.  
CHEN Ben, FANG Sheng, ZHANG Jia-cheng, et al. Dynamic analysis of nutrition component in magnolia and gardenia enzyme nutrient solutions during fermentation process[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(3): 122-126.
- [37] 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 Long-wei, TANG Xiao-juan, LIN Xiang-na, et al. Studies on the organic acid and antioxidant activity of loquat enzyme during spontaneous fermentation process[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 42-47, 54.
- [38] 蒋增良, 刘晓庆, 王珍珍, 等. 葡萄酵素有机酸分析及其体外抗氧化性能[J]. 中国食品学报, 2017, 17(5): 255-262.  
JIANG Zeng-liang, LIU Xiao-qin, WANG Zhen-zhen, et al. Analysis of organic acids and in vitro antioxidant activity of grape-ferment[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(5): 255-262.
- [39] 刘毓锋, 曾嘉锐, 黄文琪, 等. 外源碳源对葡萄酵素微生物生长代谢及生物活性的调节作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 104-110, 116.  
LIU Yu-feng, ZENG Jia-rui, HUANG Wen-qi, et al. Regulating effect of exogenous carbon source on microbial growth and metabolism in grape fermentation and its bioactivity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 104-110, 116.
- [40] 朱晓振. 菊粉及其短链脂肪酸酯对糖尿病和肥胖小鼠代谢和肠道微生态的影响[D]. 烟台: 中国科学院大学, 2020: 6-17.  
ZHU Xiao-zhen. Effects of inulin and short chain fatty acid ester on metabolism and intestinal microecology in diabetic and obese mice[D]. Yantai: University of Chinese Academy of Science, 2020: 6-17.
- [41] METTLER S, SCHWARZ I, COLOMBANI P C. Additive postprandial blood glucose-attenuating and satiety-enhancing effect of cinnamon and acetic acid[J]. Nutrition Research, 2009, 29(10): 723-727.
- [42] ARORA T, SHARMA R, FROST G. Propionate: Anti-obesity and satiety enhancing factor? [J]. Appetite, 2011, 56(2): 511-515.
- [43] LIN H V, FRASSETTO A, KOWALIK E J, et al. Butyrate and propionate protect against diet-induced obesity and regulate gut hor-

- mones via free fatty acid receptor 3-independent mechanisms[J]. PLoS One, 2017, 7(4): e35240.
- [44] RUIJSCHOP R, BOELRIJK A, GIFFEL M. Satiety effects of adairy beverage fermented with propionic acid bacteria[J]. International Dairy Journal, 2008, 18(9): 945-950.
- [45] HUGENHOLTZ J. Traditional biotechnology for new foods and beverages[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2013, 24(2): 155-159.
- [46] 殷丹婷. 外源乳酸菌对膳食纤维体外发酵产物抗结肠癌活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 32-33.
- YIN Dan-ting. Effect of exogenous lactic acid bacteria on anti-colon cancer activity of dietary fiber fermentation products in vitro[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017: 32-33.
- [47] D'ARGENIO G, MAZZACCA G. Short-chain fatty acid in the human colon: relation to inflammatory bowel diseases and colon cancer[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 1999, 472: 149-158.
- [48] 李宁, 郎韧, 郝建宇, 等. 微生物酵素预防肝移植术后早期感染的作用[J]. 中华医院感染学杂志, 2002(12): 21-23.
- LI Ning, LANG Ren, HAO Jian-yu, et al. Oral microbes-ferments for preventing early infection after liver transplantation[J]. Chinese Journal of Nosocomiology, 2002(12): 21-23.
- [49] AYED L, ABID S B, HAMDI M. Development of a beverage from red grape juice fermented with the Kombucha consortium [J]. Annals of Microbiology, 2016, 67(1): 1-11.
- [50] VLIEG J, VEIGA P, ZHANG C, et al. Impact of microbial transformation of food on health—from fermented foods to fermentation in the gastro-intestinal tract[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2011, 22(2): 211-219.
- [51] VALLABHA V S, INDIRA T N, LAKSHMI A J, et al. Enzymatic process of rice bran: A stabilized functional food with nutraceuticals and nutrients[J]. Journal of Food Science & Technology, 2015, 52(12): 8 252-8 259.
- [52] 梁艳花. 红枣乳酸饮料功能性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015: 42-43.
- LIANG Yan-hua. Functional studies on red jujube lactic acid drink[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2015: 42-43.
- [53] 薛淑龙, 范昊安, 陈小伟, 等. 竹叶酵素发酵过程中代谢产物及抗氧化活性的变化[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 228-235, 174.
- XUE Shu-long, FAN Hao-an, CHEN Xiao-wei, et al. Study on the changes of material metabolism and antioxidant activity of bamboo leaf Jiaosu during the fermentation process [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 228-235, 174.

(上接第 154 页)

- [13] 何小龙, 周晓燕, 李辉, 等. 辣椒油制作过程中的品质变化研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(11): 91-93.
- HE Xiao-long, ZHOU Xiao-yan, LI Hui, et al. Study on different varieties peper effect on quality of chili oil[J]. Food Research and Development, 2014, 35(11): 91-93.
- [14] 沈文娇, 何新益, 冯长禄, 等. 辣椒籽对猪油抗氧化作用研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 170-174.
- SHEN Wen-jiao, HE Xin-yi, FENG Chang-lu, et al. Study on the antionxidation of chilli seed in lard oil[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 170-174.
- [15] 张洪新, 刘辉, 陈光静, 等. 不同品种辣椒油制品的品质研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 190-198.
- ZHANG Hong-xin, LIU Hui, CHEN Guang-jin, et al. Study on the quality of chili oil products form different chili varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 190-198.
- [16] GARRUTI D, PINTO N, ALVES V, et al. Volatile profile and sensory quality of new varieties of Capsicum chinense pepper Perfil de voláteis e qualidade sensorial de novas variedades de pimentas Capsicum chinense[J]. Food Science and Technology, 2013, DOI: 10.1590/S0101-20612013000500016.
- [17] 俞慧红, 崔晓红, 刘平. 电子鼻在酱油气味识别中的应用[J]. 中国调味品, 2016, 41(2): 121-125.
- YU Hui-hong, CUI Xiao-hong, LIU Ping. Application of electronic nose in odor recognition of soy sauce[J]. China Condiment, 2016, 41(2): 121-125.

(上接第 166 页)

- [8] 邓羽翔, 罗诚, 李东亮, 等. 基于 BP 神经网络的烟叶醇化感官质量仿真模拟[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 161-165.
- DENG Yu-xiang, LUO Cheng, LI Dong-liang, et al. Simulation of sensory quality of tobacco leaf alcoholization based on BP neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 161-165.
- [9] 聂铭, 周冀衡, 杨荣生, 等. 基于 MIV-SVM 的烤烟评吸质量预测模型[J]. 中国烟草学报, 2014(6): 56-62.
- NIE Ming, ZHOU Ji-heng, YANG Rong-sheng, et al. Prediction model of tobacco smoking quality based on MIV-SVM[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2014(6): 56-62.
- [10] 任亚飞, 田帅, 邵馨叶, 等. 基于改进的 PSO-BP 神经网络的参
- 考作物腾发量预测[J]. 节水灌溉, 2020(5): 7-10, 15.
- REN Ya-fei, TIAN Shuai, SHAO Xin-ye, et al. Prediction of reference crop evapotranspiration based on improved PSO-BP neural network[J]. Water Saving Irrigation, 2020(5): 7-10, 15.
- [11] 马锐. 人工神经网络原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 45-66.
- MA Rui. Principle of artificial neural network[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 45-66.
- [12] 周品. MATLAB 神经网络设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 27-53.
- ZHOU Pin. Design and application of MATLAB neural network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 27-53.