

食用植物酵素中多酚类物质的研究进展

Research progress of polyphenols in edible plant enzymes

尹小庆

文华英

张玉红

白 婷

王姗姗

YIN Xiao-qing WEN Hua-ying ZHANG Yu-hong BAI Ting WANG Shan-shan

(西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

(Institute of Food Processing, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Tibet 850000, China)

摘要:多酚是食用植物酵素的特征理化指标之一,具有抗氧化、减脂和抗肿瘤等功效。文章综述了食用植物酵素产品中多酚类物质的组成、影响食用植物酵素多酚物质形成的因素,以及多酚类物质的保健功效,并展望了食用植物酵素多酚类物质进一步的研究方向。

关键词:发酵;食用植物酵素;多酚类物质;功能活性

Abstract: Polyphenol is one of the characteristic physical and chemical indexes of edible plant enzyme, which has the effects of anti-oxidation, reducing fat and anti-tumor. This paper reviews the composition of polyphenols in food plant enzyme products, the factors affecting the formation of polyphenols in food plant enzyme products, the health care effects of polyphenols, and the further research directions of polyphenols in edible plant enzymes are also prospected.

Keywords: fermentation; edible plant enzymes; polyphenols; functional activity

以植物为原料,经微生物发酵制得的含有特定生物活性可食用的酵素产品被定义为食用植物酵素,按原料分类可分为谷类、果蔬类、复合类和药食同源类酵素^[1-2]。多酚类化合物是指分子结构中苯环上连有若干个羟基的植物成分的总称,包括黄酮类、单宁类、酚酸类以及花色苷类等,具有抗氧化、减脂和抗肿瘤等功效^[3-5]。作为食用植物酵素的特征理化指标之一,其含量被要求液态不少于 0.5 mg/g,半固态不少于 0.6 mg/g,

固态不少于 1.4 mg/g。人体不能自身合成多酚类物质^[6],食用植物酵素已经成为人们摄入外源性多酚类物质的重要来源之一。有研究表明,酵素经过发酵增加了多酚类化合物的种类和含量^[7],比如蓝莓花青素在微生物作用下降解后产生酚酸,由蓝莓花青素产生的间苯二酚羧酸增加了 26 倍,原儿茶酸(来自花青苷)增加了 19 倍,甲基原儿茶酸(来自豌豆苷)增加了 7 倍,甲基没食子酸增加了 7 倍等,而黄酮醇和羟基肉桂酸通常被氧化为醌类,游离黄酮醇的糖基缩醛键上可能发生水解反应,使其在发酵后浓度约增加了 4 倍^[8-9]。基于此,文章拟综述食用植物酵素中多酚类物质的组成,影响食用植物酵素多酚物质形成的因素以及多酚类物质的功效等,期为富含多酚类物质的食用植物酵素产品的质量控制与功效研究提供参考依据。

1 食用植物酵素中多酚类物质的组成

食用植物酵素中的多酚类化合物一方面来源于植物原料本身,一方面来源于发酵过程中酵母、醋酸菌、乳酸菌等微生物代谢产生,包括黄酮类、单宁类、酚酸类以及花色苷类等。Andrea 等^[9]在安第斯蓝莓和酿酒酵母、植物乳杆菌发酵后的蓝莓汁提取物中共鉴定 309 种酚类化合物,包括 119 种类黄酮、145 种酚酸和 45 种原花青素。Álvarez-Fernández 等^[10]在日本葡萄糖杆菌发酵的草莓汁中鉴定出 43 种非花青素酚类物质,并鉴定出新橙皮糖苷、单没食子酸二葡萄糖、二氢己内酯己苷、羟基阿魏酰基己糖和菊苣酸。除了常见的果蔬原料,药食同源的植物以及鱼腥草、绞股蓝等中草药植物因含有独特的多酚类活性物质,被加入到植物酵素的研究之中^[11-13]。

2 影响食用植物酵素多酚物质形成的因素

食用植物酵素中多酚物质的形成受原料种类、发酵微生物、发酵时间的影响^[14]。因此,选好植物原料、发酵

基金项目:国家重点研发计划(编号:2021YFD1000305);西藏自治区重大专项(编号:XZ202201ZD001N);西藏自治区地区科学基金项目(编号:32060532)

作者简介:尹小庆,女,西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所研究实习生,硕士。

通信作者:张玉红(1975—),女,西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所高级研究员,硕士。

E-mail: zhangyh75@126.com

收稿日期:2022-11-02 **改回日期:**2023-04-28

菌种和发酵方式能更好地控制食用植物酵素中多酚物质的种类和含量,为根据不同植物原料种类建立酵素标准和规范生产工艺提供依据。

2.1 原料种类

多酚物质在不同原料中差异较大,在不同来源的同一原料中也存在较大差异。魏雪琴等^[15]以红枣分别搭配葡萄、生姜、枸杞经自然发酵制得的红枣酵素、葡萄红枣酵素、生姜红枣酵素和枸杞红枣酵素中的总多酚含量为 2.11~5.70 mg/mL,4 种酵素总多酚含量差异显著。蓝莓酵素和沙棘酵素在黄酮和黄酮醇生物合成中代谢差异物质最多,其中蓝莓酵素中富含山奈酚、山奈素和木犀草素,沙棘酵素中富含 3-O-甲基槲皮素^[16]。Hu 等^[17]购买了不同产地(黑龙江的宜春、黑河、加格达奇)的蓝莓酵素进行比较研究,结果表明不同产地的蓝莓酵素总酚、总黄酮、花青素的含量呈显著性差异,其中宜春的蓝莓酵素总酚、总黄酮以及花青素含量最低,加格达奇的最高。

2.2 发酵微生物

在微生物的作用下,酚类物质的种类和含量发生了改变,不同菌种发酵产生的酚类物质也有差异。新鲜佛手瓜中含有的芹菜素糖苷戊苷Ⅱ、木犀草素 7-O-芦丁苷Ⅱ和二甲素 7-戊丁苷,在发酵后的佛手瓜酵素中却未检出,且其中的木犀草素、芹菜素、二甲素和异鼠李素含量增加^[18],可能是由于发酵导致高极性偶联糖苷分解转化为了简单的酚类化合物^[7]。Rona 等^[19]通过植物乳杆菌、干酪乳杆菌以及两菌混合发酵得到 3 种樱桃银莓酵素,共检出 7 种黄酮类化合物和 8 种酚酸。经植物乳杆菌和干酪乳杆菌共同发酵的樱桃银莓酵素与单独使用植物乳杆菌和干酪乳杆菌发酵的樱桃银莓酵素中多酚物质含量差异显著。具体表现为表儿茶素含量基本不变,其他 6 种

黄酮类化合物含量均显著增加,对香豆酸含量增加,其他酚酸含量均有所下降。然而,经酿酒酵母或德氏环孢菌发酵的草莓酵素中花色苷类多酚化合物含量降低了 60%^[20]。可见,通过筛选、复配菌种可定向调节植物酵素中的酚类化合物。

2.3 发酵时间

发酵时间对食用植物酵素中酚类物质也会产生影响。随着发酵时间的延长,沙棘酵素中总黄酮含量呈上升趋势,发酵 60 d 时含量最高(0.57 mg/mL)^[21]。桑葚酵素中黄酮类化合物的变化趋势与之类似,在发酵 40 d 时达到最大值(3.60 g/L)^[22]。蓝莓酵素中锦葵素 3-O-吡喃葡萄糖苷、丁香酸、没食子酸、原儿茶酸、绿原酸、邻苯二酚和表没食子儿茶素含量取决于发酵周期,其中原儿茶酸和儿茶酚的含量随发酵时间的延长而显著增加^[23]。

3 食用酵素中多酚类物质的功效

3.1 抗氧化作用

植物多酚可以直接清除体内的自由基,也可以通过调节氧化酶和抗氧化酶活性及金属离子含量间接清除体内的自由基^[24]。张思等^[25]研究了 16 种市售素食品清除 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基、羟自由基的能力,结果表明 16 种酵素食品均具有较强的自由基清除能力,总抗氧化性能是 20 μg/mL 维生素 C 的 1~2 倍。在微生物的作用下,植物酵素不仅可以完整保留其天然活性成分且在机体有效释放,发酵后还产生了次级代谢产物,增强原有植物活性成分^[26]。所以发酵可以显著提高食用植物酵素抗氧化能力,如表 1。但是在不同的植物酵素中,体现抗氧化的多酚物质是多样的,途径和机制也存在较大的差异。

表 1 食用植物酵素中多酚类物质体现抗氧化活性的证据

Table 1 Evidence for antioxidant activity of polyphenols in edible plant enzymes

酵素种类	多酚物质	抗氧化能力的体现
芸豆、大豆复合 发酵液 ^[27]	多酚	含量变化与酵素 ABTS 自由基清除能力、还原力呈高度正相关性
铁 皮 石 斛 酵素 ^[28]	总黄酮	含量变化与酵素 ABTS 自由基清除能力、羟自由基清除率呈正相关性
蓝莓酵素 ^[22]	酚酸	含量变化与超氧化物歧化酶活性、DPPH 自由基以及烷基自由基的清除率呈正相关
归 芪 参 草 酵素 ^[12]	甘草苷 阿魏酸	C7 位和 C4 位的酚羟基为活性位点,发生抽氢反应,增加了分子抗氧化活性 —CH=CHCOOH 基团具有吸电子作用,—CH=CHCOO—具有推电子性质,使归芪参草功能酵素抗氧化活性增强
佛手瓜酵素 ^[18]	芹菜素、芹菜苷戊苷Ⅰ、芹菜苷Ⅲ、芹菜素二糖苷、木犀草素、木犀草素-7-O-芦丁苷、二氢咖啡酸、二糖素和异鼠李素等	通过减少活性氧的生成和激活先天抗氧化防御系统,保护 HepG-2 细胞免受 H ₂ O ₂ 引起的氧化损伤

3.2 抗肥胖作用

肥胖是一种脂肪生长与过度积累,在肝脏、肌肉、胰腺和大脑等代谢器官中引起炎症,造成胰岛素抵抗和代谢紊乱,且极易诱发各种慢性疾病危害人体健康^[29]。酚类物质可以通过抑制胰脂肪酶的活性预防和改善肥胖^[30],也可以通过调节肠道微生物群和肠道微生物群相

关的肠道氧化应激和屏障功能来减少肥胖^[31]。食用植物酵素中多酚类物质通过阻断脂肪生长与积累,缓解高脂膳食引起的肥胖和高血糖表现出抗肥胖作用,如表 2。当然,也不能将植物酵素的功能物质割裂开来,忽视其中多糖等物质通过修护受损的胰岛 β 细胞、恢复胰岛 β 细胞正常分泌功能等抗肥胖作用^[34-35]。

表 2 食用植物酵素中多酚类物质体现抗肥胖的证据

Table 2 Evidence for anti-obesity effects of polyphenols in edible plant enzymes

模型	酵素种类	多酚物质	抗肥胖的体现
高脂膳食肥胖 C57BL/6J 小鼠模型	蓝莓—黑莓发酵液 ^[32]	酚类提取物	小鼠的脂肪质量百分比、平均脂肪细胞直径、血浆甘油三脂、胆固醇以及空腹血糖值显著降低
模拟脂肪细胞和巨噬细胞之间病理相互作用的体外炎症模型	黑莓—蓝莓酵素 ^[33]	酵素液	在 3T3-L1 脂肪细胞分化过程中,减少细胞内脂肪积累(28.2%),抑制异丙肾上腺素诱导的成熟 3T3-L1 细胞的脂肪分解(18.6%)
		混合花青素	恢复了 TNF- α 处理诱导的脂联素钝化基因表达(18.2%),并减少了巨噬细胞条件培养基培养的脂肪细胞的甘油释放(15.9%)

3.3 抗癌作用

多酚物质可以通过调节癌细胞增殖、血管生成、诱导细胞凋亡、抑制癌症的侵袭和转移等方式预防和治疗癌症^[36]。蓝莓多酚通过诱导细胞凋亡增加了对宫颈癌 HeLa 细胞的抗增殖活性。当单独使用原儿茶酸、儿茶酚和绿原酸或以不同比例混合处理 HeLa 细胞时,儿茶酚显示出最显著的抗癌活性^[23]。陆雨等^[37]从诺利酵素中分离出 16 个化合物,并采用 MTT 法研究化合物的体外抗肿瘤活性,研究结果发现(+) -丁香脂素对 HeLa 细胞有一定的抑制活性,IC₅₀ 值为 47.12 $\mu\text{g/mL}$ 。Rona 等^[38]分别用植物乳杆菌(*L. plantarum*)、干酪乳杆菌(*L. casei*)以及两者等比例混合发酵的樱桃银莓水提物处理结直肠腺癌 SW480 细胞,混合发酵樱桃银莓提取物($\geq 25 \mu\text{g/mL}$)通过诱导细胞周期阻滞 S 和 G2/M 阶段,下调细胞周期蛋白及其依赖激酶而增加肿瘤抑制蛋白 p27 和 p53。并且通过下调基质金属蛋白酶-9 和 PI3K/AKT/mTOR 通路,上调 TIMP-9 和 e-钙黏蛋白来发挥其肿瘤抑制作用。相关

分析表明,混合发酵的樱桃银莓中的儿茶素、表没食子儿茶素、表食子儿茶素没食子酸酯、柚皮素、芦丁、槲皮素等多酚物质的含量上升,表现出多方面的抗癌特性。

3.4 其他作用

食用植物酵素中的多酚物质除了上述功效,还有提高免疫力、延缓衰老等作用。越橘经植物乳杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)发酵后获得的越橘酵素能增强细胞的抗氧化活性和免疫调节特性^[39],如表 3。紫薯酵素中花青素通过乳酸菌(*W. confusa*)发酵降解为生物利用度更高的酚酸,从而获得了更高的抗氧化作用。通过紫薯酵素处理的秀丽隐杆线虫,其寿命延长 37.5%,随年龄增长而在体内积累的衰老标志物脂褐质、丙二醛的含量下降,对耐热性和氧化应激的抵抗力更强。同时,紫薯酵素处理显著上调了线虫中抗衰老基因 *daf-16*、*hsp-16.2*、*sir-2.1*、*skn-1* 和 *sod-3* 的 mRNA 表达,紫薯酵素可以通过胰岛素/IGF-1 信号传导、*skn-1* 依赖性和 *sir-2.1* 依赖性途径发挥抗衰老作用^[40]。

表 3 越橘酵素增强细胞的抗氧化活性和免疫调节特性

Table 3 Vaccinium floribundum berries enzymes enhance antioxidant activity and immunomodulatory properties of cells

模型	剂量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	处理时间/h	体现
人脐静脉内皮细胞	10	24	H ₂ O ₂ 诱导的细胞死亡和 H ₂ O ₂ 诱导的血红素加氧酶-1 (Heme oxygenase-1, HO-1) 基因表达减少
巨噬细胞(RAW 264.7)	10	72	促进巨噬细胞的生长,增加同一细胞系中诱导型一氧化氮合酶的表达

4 展望

食用植物酵素中多酚物质种类和含量对酵素的品质和风味有重要的影响,且在清除活性氧自由基、抗肥胖、抗肿瘤、增强人体免疫力和延缓衰老等方面具有巨大潜力。目前,食用植物酵素的多酚物质成分分析及功效特性研究取得了一定的进展,但其具体的功效机制还有待探究完善。

未来相关研究应聚焦在挖掘用于食用植物酵素的潜力植物原料,制定相关标准,规范生产工艺以及补充临床数据上。具体为:以药食同源类植物为原料制得的食用植物酵素中多酚类物质解析及功效开发;根据食用植物酵素的种类和发酵条件制定相关标准并规范生产工艺;补充临床试验相关数据,改善以动物或细胞为模型的食用植物酵素中多酚物质的功效及量效关系研究带来的不足。

参考文献

- [1] 中国生物发酵产业协会. 食用植物酵素: T/CBFIA 08003—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2.
China Biotech Fermentation Industry Association. Edible plant source jiaosu: T/CBFIA 08003—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 2.
- [2] KUWAKI S, NAKAJIMA N, TANAKA H, et al. Plant-based paste fermented by lactic acid bacteria and yeast: Functional analysis and possibility of application to functional foods [J]. *Biochemistry Insights*, 2012, 5: 9-21.
- [3] KIM S Y, CHA H J, HWANGBO H, et al. Protection against oxidative stress-induced apoptosis by fermented sea tangle (*Laminaria japonica* aresch) in osteoblastic Mc3t3-E1 cells through activation of Nrf2 signaling pathway[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2 807.
- [4] SUGIMOTO M, WATANABE T, TAKAOKA M, et al. Anti-inflammatory effect on colitis and modulation of microbiota by fermented plant extract supplementation[J]. *Fermentation*, 2021, 7 (2): 55.
- [5] 李雪, 李俐, 王小龙, 等. 多酚类化合物基于非编码 RNA 调控发挥抗肿瘤及辐射增敏作用研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 222-230.
LI X, LI L, WAGN X L, et al. Research progress on anti-tumor and radiosensitization of polyphenols based on non-coding RNA regulation[J]. *Food Science*, 2023, 44(5): 222-230.
- [6] MANDAL S M, CHAKRABORTY D, DEY S. Phenolic acids act as signaling molecules in plant-microbe symbioses [J]. *Plant Signal Behav*, 2010, 5(4): 359-368.
- [7] HUR S J, LEE S Y, KIM Y C, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods[J]. *Food Chemistry*, 2014, 160: 346-356.
- [8] SINELA A, RAWAT N, MERTZ C, et al. Anthocyanins degradation during storage of *Hibiscus sabdariffa* extract and evolution of its degradation products[J]. *Food Chem*, 2017, 214: 234-241.
- [9] ANDREA C, SUSY P, SARA E A, et al. Detailed investigation of the composition and transformations of phenolic compounds in fresh and fermented *Vaccinium floribundum* berry extracts by high-resolution mass spectrometry and bioinformatics[J]. *Phytochemical Analysis*, 2021, 33(4): 507-516.
- [10] ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ M A, HORNEDO-ORTEGA R, CEREZO A B, et al. Non-anthocyanin phenolic compounds and antioxidant activity of beverages obtained by gluconic fermentation of strawberry[J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2014, 26: 469-481.
- [11] XU Y N, ZENG L P, XIAO N, et al. Quality enhancement of *Dendrobium officinale* and banana juice through probiotic fermentation using beneficial lactic acid-producing bacteria [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2020, 16(8): 20190370.
- [12] 胡肖利. 归芪参草功能酵素的制备与抗自由基活性的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018: 45.
HU X L. Study on the preparation and anti-free radical activity of Chinese herbal medicine functional enzyme[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018: 45.
- [13] LI Y Z, LI P, ZHANG Y, et al. Utilization of *Gynostemma pentaphyllum* and *Houttuynia cordata* medicinal plants to make Jiaosu: A healthy food [J]. *Cyta-journal of Food*, 2022, 20(1): 143-148.
- [14] SEPTEMBRE-MALATERRE A, FEMIZE F, POUCHERET P. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation[J]. *Food Res Int*, 2018, 104: 86-99.
- [15] 魏雪琴, 武燕蓉, 庞杰. 四种红枣酵素品质对比研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(11): 52-56.
WEI X Q, WU Y R, LIAO J. Comparative study on the quality of four jujube enzymes[J]. *China Condiment*, 2021, 46(11): 52-56.
- [16] 姚沛琳, 刘梦茹, 杨澳, 等. 基于非靶向代谢组学的蓝莓酵素和沙棘酵素代谢产物特征比较[J]. *食品工业科技*, 2022, 43 (19): 160-166.
YAO P L, LIU M R, YANG A, et al. Comparison of metabolite characteristics of blueberry jiaosu and sea-buckthorn jiaosu based on non-targeted metabolomics approach [J]. *Technology in the Food Industry*, 2022, 43(19): 160-166.
- [17] HU N, LEI M, ZHAO X L, et al. Analysis of the microbial diversity and characteristics of fermented blueberry beverages from different regions[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1 656.
- [18] SHANG Z X, LI M Q, ZHANG W W. Analysis of phenolic compounds in pickled chayote and their effects on antioxidant activities and cell protection[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111325.
- [19] RONA C M L, HYUN D C, YEONG S W, et al. Fermentation with mono- and mixed cultures of *Lactobacillus plantarum* and *L. casei* enhances the phytochemical content and biological activities of cherry silverberry (*Elaeagnus multiflora* Thunb.) fruit[J]. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(9): 3 687-3 696.

- [20] YANG W, LIU S, MARSOL-VALL A, et al. Chemical composition, sensory profile and antioxidant capacity of low-alcohol strawberry beverages fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and *Torulaspora delbrueckii* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 149: 111910.
- [21] 金哲宁, 方晟, 沙如意, 等. 沙棘酵素功能成分及其体外抗氧化性能研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(17): 20-28.
- JIN Z N, FANG S, SHA R Y, et al. Study on the functional components and in vitro antioxidant activity of sea-buckthorn Jiaosu[J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(17): 20-28.
- [22] 易媛, 赵敏惠, 左勇, 等. 桑葚酵素发酵过程中活性物质与抗氧化能力的相关性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 117-122.
- YI Y, ZHAO M H, ZUO Y, et al. Correlation between active substances and antioxidant capacity during mulberry Jiaosu fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 117-122.
- [23] RYU J Y, KANG H R, CHO S K. Changes over the fermentation period in phenolic compounds and antioxidant and anticancer activities of blueberries fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *J Food Sci*, 2019, 84: 2 347-2 356.
- [24] 马莹莹, 姚金彤, 张超, 等. 茶叶籽油酚类化合物抗氧化作用机制研究新进展[J]. *化学工程师*, 2018, 32(9): 47-51.
- MA Y Y, YAO J T, ZHANG C, et al. New progress in antioxidant action mechanism of tea seed oil phenolic compounds[J]. *Chemical Engineer*, 2018, 32(9): 47-51.
- [25] 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 S, WANG L, ZHANG Z X, et al. Functional analysis and evaluation on commercially available enzyme food [J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(9): 196-200, 224.
- [26] 杨志鹏, 周宝琳, 刘新利, 等. 一种具有潜在解酒护肝功能酵素的开发及其生物活性评价[J]. *食品科技*, 2019, 44(1): 154-159.
- YANG Z P, ZHOU B L, LIU X L, et al. Development and bioactivity evaluation of an enzyme with potential function of relieving alcoholism and protecting liver [J]. *Food Technology*, 2019, 44(1): 154-159.
- [27] 李志芳, 佐兆杭, 王颖, 等. 芸豆/大豆复合发酵液代谢组分及功能性研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 38-43.
- LI Z F, ZUO Z H, WANG Y, et al. Studies on metabolites and functions of soy-based plant fermentation broth [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 38-43.
- [28] 章显, 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 C H, et al. Changes of active substances and antioxidant activity of *Dendrobium officinale* Jiaosu during fermentation process[J]. *China Brewing*, 2022, 41(5): 188-193.
- [29] MARGARET F G, GÖKHAN S H. Inflammatory mechanisms in obesity[J]. *Chinese Journal of Biochemistry & Molecular Biology*, 2011, 29: 415-445.
- [30] SERGENT T, VANDERSTRAETEN J, WINAND J, et al. Phenolic compounds and plant extracts as potential natural anti-obesity substances[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(1): 68-73.
- [31] ZHOU F, LI Y L, ZHANG X, et al. Polyphenols from fu brick tea reduce obesity via modulation of gut microbiota and gut microbiota-related intestinal oxidative stress and barrier function [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(48): 14 530-14 543.
- [32] JOHNSON M H, WALLIIG M, LUNA V D, et al. Alcohol-free fermented blueberry-blackberry beverage phenolic extract attenuates diet-induced obesity and blood glucose in C57BL/6J mice[J]. *J Nutr Biochem*, 2016, 31: 45-59.
- [33] GARCIA-DIAZ D F, JOHNSON M H, DE MEJIA E G. Anthocyanins from fermented berry beverages inhibit inflammation-related adiposity response in vitro[J]. *J Food Sci*, 2015, 18(4): 489-496.
- [34] 唐华丽, 夏惠, 王锋, 等. 枸杞多糖作用于 2 型糖尿病大鼠的血清代谢组学研究[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 160-166.
- TANG H L, XIA H, WANG F, et al. Serummetabonomics study of type 2 diabetic rats administrated with *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 160-166.
- [35] 王成祥, 刘玉霞, 常绍鸿, 等. 马齿苋多糖对幼年糖尿病大鼠糖脂代谢、肾功能的影响及其作用机制[J]. *中国医科大学学报*, 2021, 50(1): 46-50, 56.
- WANG C X, LIU Y X, CHANG S H, et al. Effect and mechanism of action of *Portulaca oleracea* L. polysaccharides on glycolipid metabolism and renal function in juvenile diabetic rats[J]. *Journal of China Medical University*, 2021, 50(1): 46-50, 56.
- [36] SHANMUGAM M K, RANE G, KANCHI M M, et al. The multifaceted role of curcumin in cancer prevention and treatment [J]. *Molecules*, 2015, 20(2): 2 728-2 769.
- [37] 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 Y, JIANG S P, SUN D X, et al. Chemical constituents from noni enzyme and their antitumor activities[J]. *Chinese Journal of Pharmacy*, 2018, 53(18): 1 552-1 556.
- [38] RONA C M L, HYUN D C, JIN-HWAN L, et al. Extracts of *Elaeagnus multiflora* Thunb. fruit fermented by lactic acid bacteria inhibit SW480 human colon adenocarcinoma via induction of cell cycle arrest and suppression of metastatic potential [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(8): 2 565-2 577.
- [39] MARRACINO L, PUNZO A, SEVERI P, et al. Fermentation of *vaccinium floribundum* berries with *Lactiplantibacillus plantarum* reduces oxidative stress in endothelial cells and modulates macrophages function[J]. *Nutrients*, 2022, 14(8): 1 560.
- [40] ZHAO J C, YU J, ZHI Q, et al. Anti-aging effects of the fermented anthocyanin extracts of purple sweet potato on *Caenorhabditis elegans*[J]. *Food & Function*, 2021, 12(24): 12 647-12 658.