

# 浆果酵素食品发酵工艺及功能特性研究进展

李航棋, 胡秋阳, 王文秀, 汤轶伟\*

(河北农业大学食品科技学院, 保定 071001)

**摘要:** 酵素是一种具有特定功效的发酵型产品, 其原料来源于动物、植物或菌类。浆果酵素是以浆果类果品为原料, 经益生菌等微生物发酵而成的富含多种营养物质和生物活性成分的酵素食品。作为功能食品的浆果酵素符合人们对健康饮食的追求方向, 被越来越多消费者认可。本文从自然发酵、接种发酵和酶解发酵方面阐述了当前浆果酵素食品的发酵工艺与各自优势, 探讨了浆果酵素中黄酮类、酚类、生物酶、多肽等生物活性物质的含量变化, 重点介绍了浆果酵素在抗肥胖、降血糖、改善肠道功能、抗癌等方面的功能特性, 分析并总结了浆果酵素食品当前亟需解决的问题和功能机制的揭示, 以为浆果酵素的深入研究提供思路, 为后期新产品开发提供技术支撑, 促进我国浆果酵素食品产业的发展。

**关键词:** 浆果; 酵素; 发酵工艺; 生物活性物质; 功能特性

## Research progress on fermentation technology and functional characteristics of berry Jiaosu food

LI Hang-Qi, HU Qiu-Yang, WANG Wen-Xiu, TANG Yi-Wei\*

(College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

**ABSTRACT:** Jiaosu is a kind of fermentation product with specific efficacy. Its raw materials come from animals, plants or fungi. Berry Jiaosu is a fermented food rich in a variety of nutrients and bioactive components, which is made from berry fruits and fermented by probiotics and other microorganisms. As a functional food, berry Jiaosu is in line with people's pursuit of healthy diet and is recognized and accepted by more and more consumers. This paper expounded the current fermentation technology and advantages of natural fermentation, inoculation fermentation and enzymatic fermentation, discussed the content changes of bioactive substances such as flavonoids, phenols, biological enzymes and peptides in berry Jiaosu food, and emphatically presented the functional characteristics of berry Jiaosu in anti-obesity, hypoglycemic, improving intestinal function and anti-cancer. Lastly, this paper analyzed and summarized urgent problems to be solved and the revelation of functional mechanism of berry Jiaosu food. This review is expected to provide ideas for the in-depth research of berry Jiaosu, provide technical support for the later development of new products, and promote the development of berry Jiaosu food industry in China.

**KEY WORDS:** berry; Jiaosu; fermentation process; bioactive substances; functional characteristics

基金项目: 河北农业大学引进人才科研项目(YJ01911)、河北农业大学大学生创新创业训练计划项目(2022166)

**Fund:** Supported by the Talent Research Project of Hebei Agricultural University (YJ01911), and the Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of Hebei Agricultural University (2022166)

\*通信作者: 汤轶伟, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: tangyiwei81@163.com

\*Corresponding author: TANG Yi-Wei, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, No.2596, Lekainan Street, Lianchi District, Baoding 071001, China. E-mail: tangyiwei81@163.com

## 0 引言

酵素是一种经微生物发酵,具有特定活性成分的一类食品,其原料包括动物、植物、菌类等。研究发现,果蔬发酵后可显著提高原料的功能性,如发酵橙汁饮料含有丰富的生物可利用类胡萝卜素,经常饮用有益健康<sup>[1]</sup>;基于植物乳杆菌发酵的胡萝卜汁可影响Ⅱ型糖尿病大鼠血清中的代谢物含量,而乳酸菌发酵处理后显著改变了脂类、脂蛋白、嘌呤、色氨酸、脂肪酸的生物合成、糖酵解和糖异生等生物通路和过程<sup>[2]</sup>;混合发酵制得的桑葚酵素抗氧化能力提高、自由基清除活性显著增强<sup>[3]</sup>。随着生活水平的不断提高,人们对健康的追求越发强烈,健康理念也越来越受到重视,作为功能性食品的酵素产品已进入大众视野,被越来越多的消费者认可。

浆果属于典型肉果,外果皮薄,中果皮和内果皮肉质多汁,主要包括葡萄、蓝莓、树莓、桑葚、沙棘等。浆果类水果色泽鲜艳,风味独特,富含多种维生素、氨基酸、膳食纤维、花青素、多酚、黄酮类等物质,具有增强机体免疫力、清除自由基、防止神经老化、软化血管、抗癌等保健功能,此类功能已受到世界卫生组织等国际机构认同<sup>[4-6]</sup>。浆果类水果酵素是以食用浆果为主要原料,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酵素食品。浆果酵素不仅可以最大程度保留原料中的维生素、膳食纤维、酚类化合物等营养成分,加工过程中还可产生超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)等酶类,风味更丰富、营养更均衡、功效更强<sup>[7-9]</sup>。

本文综述了近年来浆果水果酵素食品的生产工艺、生物活性成分及功能特性方面的研究进展,提出了目前浆果酵素食品研究亟需解决的问题,以为浆果酵素的深入研究提供思路,为后期新产品开发提供技术支撑,促进我国浆果酵素食品产业的发展。

## 1 浆果酵素食品制备方法

### 1.1 自然发酵法

浆果酵素的自然发酵是一种传统发酵工艺,通常将原料、蜂蜜或其他糖类和水按照一定质量比分层装入可水封的陶罐中,利用浆果表面自带的多种微生物,如乳酸菌、酵母菌、醋酸菌等室温条件下自然发酵获得发酵液的方法<sup>[10]</sup>。自然发酵过程操作简单,适合家庭酵素生产,高浓度的异麦芽糖、蔗糖或者米醋成分,可有效抑制酒精的产生和杂菌的生长<sup>[11]</sup>。然而,由于浆果种植环境、发酵温度、湿度等不可控因素的影响,致使自然发酵工艺的发酵时间长、产品品质差、易污染、难以标准化<sup>[12]</sup>。图 1 为浆果酵素自然发酵工艺流程示意图。

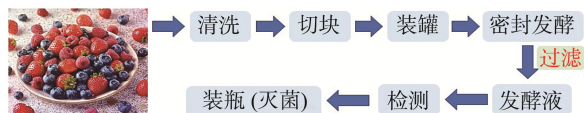


图 1 浆果酵素自然发酵工艺流程示意图<sup>[11]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of spontaneous fermentation process of berry Jiaosu<sup>[11]</sup>

酵素自然发酵过程中优势菌群的筛选与鉴定是浆果酵素食品标准化生产的基础<sup>[11]</sup>。汤灿辉等<sup>[13]</sup>以自然发酵的沙棘酵素为研究对象,利用 Illumina Miseq 高通量测序技术分析发酵过程中细菌群落结构的变化,发现沙棘酵素发酵过程中细菌群落的物种多样性整体呈下降变化趋势,厚壁菌门(*Firmicutes*)和变形菌门(*Proteobacteria*)是主要优势菌门,乳杆菌属(*Lactobacillus*)是发酵后期的绝对优势属,pH 和总酸是沙棘酵素发酵过程中细菌群落演替的主要驱动力。阴芳冉<sup>[14]</sup>利用高通量测序技术研究了红树莓自然发酵过程中微生物群落结构的演变,并对发酵过程中生物活性成分与微生物群落进行相关性分析,全面了解了红树莓酵素自然发酵全过程,筛选出树莓优良发酵菌株库德毕赤酵母 2 株、盔形毕赤酵母 1 株、酿酒酵母 8 株、短芽孢杆菌 1 株、植物乳杆菌 1 株。邱鹏月等<sup>[15]</sup>采用宏基因组技术研究了桑葚酵素自然发酵过程中细菌和真菌组成,结果发现汉逊酵母(*Hanseniaspora*)在发酵前期最多,中、后期急剧下降,表明该真菌在桑葚酵素发酵前期发挥了重要作用;发酵过程中在属水平上的细菌主要有乳杆菌属(*Lactobacillus*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、片球菌属(*Pediococcus*)和明串珠菌属(*Leuconostoc*)等。

酵素原料不同,自然发酵过程中的微生物类型也有差别,但主要微生物为酵母菌、乳酸菌、醋酸菌和霉菌<sup>[16]</sup>。浆果酵素自然发酵过程中微生物种类的确定为沙棘、红树莓、桑葚等浆果酵素食品生产的精准人工调控及标准化人工开发提供了科学依据和理论基础。

### 1.2 接种发酵法

浆果接种发酵是根据水果特性,人工添加优势菌种发酵生产酵素产品的发酵工艺,是浆果酵素食品实现规范化生产的有效途径(图 2 为浆果酵素接种发酵工艺流程示意图)。该工艺中菌种接种量、辅料添加量、发酵温度和时间、料液比等条件是制备高质量浆果酵素产品的关键因素。依据发酵过程中接种菌种的不同,可分为单菌种发酵和混合菌种发酵。

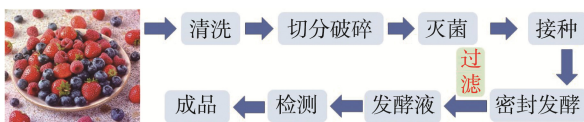


图 2 浆果酵素接种发酵工艺流程示意图<sup>[11]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of inoculation and fermentation process of berry Jiaosu<sup>[11]</sup>

浆果酵素单菌种接种发酵过程相对简单、易控制, 制备的产品安全性和质量稳定性较好<sup>[17]</sup>。崔国庭等<sup>[17]</sup>以超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力为监测指标, 以酵母菌为发酵菌种进行接种发酵, 在草莓、白糖、去离子水(0.3%维生素 C+0.5%柠檬酸)料液比为 1:3:8 (*m:m:m*)条件下, 研究了接种量、发酵时间、发酵温度等发酵条件对草莓酵素中 SOD 活性的影响。结果表明, 当酵母菌接种量为 1.5%、发酵时间 13.5 h、发酵温度 35℃时, SOD 值最大(35.98 U/mL)。樊秋元等<sup>[18]</sup>以葡萄酒专用高活性干酵母为发酵菌种研究了黑加仑酵素发酵工艺条件, 最佳条件为发酵温度 20℃、发酵时间 96 h、初始糖度为 20%、酵母菌接种量为 0.07%, 获得的黑加仑酵素具有良好的自由基清除能力。赵峥等<sup>[19]</sup>以鲁氏酵母(CGMCC16260)为接种菌种, 研究了葡萄皮和葡萄籽对葡萄废果厌氧发酵的影响, 结果发现去除葡萄皮和籽粒后发酵产物中的游离氨基酸含量与发酵前相比提高了 226.05%, 但总酚和总酸含量出现了显著降低。

接种乳酸菌制备浆果类酵素也是目前研究的热点之一。梁红敏等<sup>[20]</sup>研究了 4 种乳酸菌对葡萄发酵过程中代谢产物和抗氧化能力的影响, 结果显示 4 种乳酸菌均能在葡萄酵素发酵过程中较好的生长和产酸, 产酸能力大小依次为: 干酪乳杆菌>植物乳杆菌>副干酪乳杆菌>鼠李糖乳杆菌, 这 4 种乳酸菌均能提高葡萄酵素总酚含量和抗氧化活性。WU 等<sup>[21]</sup>以植物乳杆菌、嗜热链球菌和双歧杆菌为发酵菌种, 以蓝莓和黑莓汁为原料, 在发酵菌种( $\sim 5 \times 10^8$  CFU/mL)添加量为 2% (*V:V*)、发酵温度 37℃、发酵时间 48 h 条件下制备了蓝莓酵素和黑莓酵素。结果显示, 两种果汁中 3 种菌株的微生物数量增加了 0.4~0.7 log(CFU/mL), 达到了潜在益生菌食品的推荐水平; 发酵黑莓果汁中, 没食子酸、阿魏酸、丁香酸和酒石酸含量都有明显的上升趋势, 而在发酵蓝莓果汁中, 只有丁香酸含量有增加趋势。与嗜热链球菌和双歧杆菌相比, 植物乳杆菌具有更高的酚酸和有机酸代谢能力; 经过 48 h 发酵后, 植物乳杆菌发酵的黑莓和蓝莓汁含有较高的乳酸(4225.5 mg/L 和 3910.0 mg/L)和丁香酸(5.53 mg/L 和 3.66 mg/L)。植物乳杆菌发酵样品中酚类物质和有机酸的代谢能力较强, 这有助于提高发酵黑莓汁和蓝莓汁中 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2'-azino-bis(3-ethylbenzo-thiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]自由基清除活性。刘毓锋<sup>[22]</sup>研究了基于植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, GIM 1.191)的葡萄酵素制备过程, 探讨了红糖、白糖与蜂蜜为外源碳源对葡萄酵素微生物生长代谢及生物活性条件作用的影响, 结果发现: 红糖、白糖对酵母生长及乙醇代谢抑制能力较强, 与白糖和蜂蜜相比, 红糖可显著促进乳酸菌生长和提高 SOD 活性, 在初始糖度 25%、氮源浓度 0.3%、接种量 3%、发酵 60 h 最佳条件下, 总酚和 SOD 酶活分别为 2.34 mg/mL 和 75.58 U/mL; 所研究因素中影响葡萄酵素感官品质的主次

顺序为: 初始糖度、接种量、氮源浓度、发酵时间。此外, 该研究还发现经植物乳杆菌发酵制备的葡萄酵素无乙醇产生, 这符合食用酵素标准(T/CBFIA 08003—2017《食用植物酵素》)中乙醇含量低于 0.5 g/100 g 的规定和低乙醇或无乙醇饮料的研发符合大健康产业的发展趋势。

混合菌种发酵制备的浆果酵素生物活性成分更为丰富。白琳等<sup>[23]</sup>以 SOD 活力、总可溶性固形物(total soluble solid, TSS)含量和 pH 为指标, 通过响应面法优化了以植物乳杆菌、乳酸片球菌、嗜酸乳杆菌、副干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌为复合菌种发酵制备蓝莓酵素产品的工艺。结果显示植物乳杆菌、乳酸片球菌、嗜酸乳杆菌、副干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌的最佳接种体积比例分别为: 22.45%、42.86%、14.29%、16.33%、4.10%; 最佳发酵工艺为: 发酵时间 36 h、发酵温度 37℃、初始接种量为  $5.5 \times 10^6$  CFU/mL、初始总可溶性固形物为 11 °Brix, 发酵后蓝莓酵素的 SOD 活力最高(87.45 U/g)。张莉等<sup>[24]</sup>以浆果酵素的感官、TSS 含量、pH、总酚含量、超氧阴离子自由基清除率、羟基自由基清除率、2,2-二苯基-1-吡啶酰肼(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率以及 SOD 活力为检测指标, 探究了自然发酵、酵母发酵、乳酸菌发酵及复合菌种(酵母+乳酸菌)发酵方式对蓝莓-桑葚复合酵素品质的影响。结果表明, 混合菌种发酵方式优于单菌种发酵和自然发酵方式, 能显著提高蓝莓-桑葚复合酵素中总酚含量及其抗氧化能力。管章瑞等<sup>[25]</sup>以酵母菌、乳酸菌(干酪乳杆菌和嗜酸乳杆菌 1:1 混合)、醋酸乳杆菌为发酵菌种, 研究了蓝莓酵素发酵过程中的抗氧化活性变化, 结果显示发酵终期获得的蓝莓酵素抗氧化能力显著提高, 但乙醇含量(23.69 mg/mL)超过标准限量。接种发酵浆果酵素发酵工艺及配方优化为今后酵素产业的发展奠定了良好的理论与实践基础。

### 1.3 酶解发酵法

浆果类水果中含有丰富的纤维素及果胶物质, 这些物质在发酵过程中难以被微生物有效利用<sup>[26]</sup>。果胶酶和纤维素酶的使用可显著增加水果的出汁率及果汁的中酚类物质含量<sup>[27-28]</sup>, 大大提高了微生物的发酵效率, 丰富和提高了水果酵素中生物活性物质的种类和含量。樊秋元<sup>[29]</sup>研究发现制备黑加仑浆果酵素发酵原料时加入 Pectines XXL 果胶酶(添加量: 2.0 mL/kg; 酶解温度: 50℃; 酶解时间: 2 h), 增加了黑加仑酵素原料的出汁量, 提高了微生物发酵效率。刘鑫等<sup>[30]</sup>在蓝莓酵素发酵工艺中也应用 Pectinex XXL 果胶酶对原料进行了酶解, 提高了酵素中生物活性成分的含量。

## 2 生物活性成分

浆果类水果酵素中含有丰富生物活性成分, 包括黄酮类、酚类、花色苷、生物酶、氨基酸等, 这些成分是酵

素功效发挥的物质基础。

## 2.1 黄酮类化合物

黄酮类化合物(黄碱素)多以糖苷形式存在,属于植物的次级代谢产物,目前植物中已发现黄酮类化合物多达 8000 余种<sup>[31]</sup>。金哲宁等<sup>[32]</sup>采用三氯化铝法测定了沙棘酵素发酵过程中总黄酮的变化趋势。研究发现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,为 0.57 mg/mL。易媛等<sup>[33]</sup>研究了桑葚酵素自然发酵过程中黄酮类化合物的变化趋势,发现随着发酵时间的增长,黄酮类化合物含量逐渐增加,在发酵 40 d 时达到最大值(3.60 g/L),随后有下降趋势。发酵工艺的变化影响酵素中黄酮类化合物的含量,因此可通过优化发酵时间、发酵温度、菌种接种量以及糖的添加量等条件提高酵素中黄酮类化合物的含量<sup>[34]</sup>。

## 2.2 酚类化合物

浆果酵素中酚类化合物具有较强的抗氧化活性,是酵素食品功效品质的重要指标之一<sup>[35]</sup>。浆果在微生物发酵制备水果酵素过程中酚类物种的含量和种类组成可发生显著变化。ZHANG 等<sup>[36]</sup>用植物乳杆菌发酵蓝莓果汁后发现果汁中的酚类物质增加了 43.42%,这可能是由于乳酸菌代谢分解大分子多酚去糖基生成小分子酚造成的。ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ 等<sup>[37]</sup>首次鉴定出日本葡萄糖酸杆菌(*Gluconobacter japonicus*)葡萄糖酸发酵草莓汁中新橙皮糖苷、二氢己内酯己苷、单没食子酸二葡萄糖、羟基阿魏酰基己糖、菊苣酸等 43 种非花青素酚类化合物。RYU 等<sup>[38]</sup>采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定了不同发酵时间蓝莓酵素中 7 种代表性酚类化合物(苹果维苷 3-O-吡喃葡萄糖苷、没食子酸、原儿茶酸、邻苯二酚、绿原酸、丁香酸和表没食子儿茶素)含量。结果显示,蓝莓酵素中各酚类化合物的含量取决于发酵周期,随着发酵时间的延长,原儿茶酸和儿茶酚的含量显著增加。ZHANG 等<sup>[36]</sup>比较了蓝莓汁发酵前后花色苷多酚化合物的种类和含量变化,发现发酵后蓝莓汁发酵液中的花色苷类多酚总量由 45.93 mg/L 上升到 52.12 mg/L,经 HPLC 鉴定出蓝莓汁中含有 4 种花色苷化合物(花青素、天竺葵素、芍药素和氯化矮牵牛素),发酵后花青素和天竺葵素含量显著增加。然而,YANG 等<sup>[39]</sup>研究发现经酿酒酵母或德式环孢菌发酵的草莓汁饮料中花色苷类多酚化合物的含量降低了 60%,这可能与水果及发酵菌种类不同相关。这些研究结果表明,通过筛选菌种和优化发酵工艺可以定向开发富含特定酚类化合物的浆果酵素。

## 2.3 生物酶、氨基酸与多肽

蛋白酶、SOD 和脂肪酶是浆果酵素中的主要功效酶。SOD 是一种抗氧化金属酶,可以催化超氧阴离子自由基歧

化生成氧和过氧化氢,在机体氧化与抗氧化平衡中起到至关重要的作用,与很多疾病的发生和发展密不可分<sup>[40]</sup>。蛋白酶促进蛋白质发生水解反应,可以水解蛋白质中的肽键将其分解成小分子物质,促进人体对食物的消化和吸收。脂肪酶具有将甘油三酯水解成甘油和脂肪酸的功能。郑斌等<sup>[41]</sup>基于建立的酪氨酸-酪蛋白标准曲线,测定了蓝莓酵素中蛋白酶的含量及活性。结果表明,蓝莓酵素中含有丰富的蛋白酶,含量高达 23.939 μg/mL。魏文倩等<sup>[42]</sup>利用酵母菌共同发酵蓝莓果和红树莓,发酵后蓝莓果和红树莓果浆的蛋白酶活力为 9.42 U/mL, SOD 活力为 82.45 U/mL。张冰等<sup>[43]</sup>优化樱桃酵素发酵工艺后,脂肪酶活力明显增加,高达 1242 U/mL。浆果酵素发酵过程中生物酶活性的提高对丰富和提高产品中功效成分有重要作用。

氨基酸和多肽类物质是人体所需的重要营养物质,能够为人体提供热量、促进新陈代谢、修复体内病变器官和损伤组织,并可提高抗细菌和病毒侵染机体的能力<sup>[44]</sup>。陈小伟等<sup>[45]</sup>对草莓酵素发酵过程中氨基酸种类和含量进行了分析,结果发现发酵过程中总氨基酸的含量逐渐升高,从发酵第 10 d 开始,必需氨基酸的含量从 0.024 mg/mL 增长到 0.104 mg/mL,所占比例显著增加,其中天冬氨酸和谷氨酸含量最高。浆果酵素中氨基酸与多肽类物质种类和含量的增加有利于酵素在人体中发挥更大的功效作用。

## 3 功能特性

浆果酵素中含有的多种类、高含量生物活性成分已显示出诸多健康益处,如抗肥胖、降血糖、抗癌、改善肠道功能等。浆果酵素功能特性的研究有助于深入了解发酵浆果产品的功效及作用机制。

### 3.1 抗肥胖作用

肥胖是一种脂肪积累过多、体重超重的病理状态,易诱发高血压、糖尿病及心血管疾病,严重损害了人体健康<sup>[46]</sup>。GARCIA-DIAZ 等<sup>[47]</sup>基于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,探究了黑莓-蓝莓饮料中的花青素(anthocyanin, ANC)对脂肪生成的影响。研究结果发现,在 3T3-L1 脂肪细胞分化过程中使用黑莓-蓝莓发酵液可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%)。此外,混合 ANC 恢复了 TNF- $\alpha$  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%)。因此,蓝莓和黑莓脱醇发酵饮料中的 ANC 可作为炎症相关肥胖反应的潜在抑制剂和脂肪细胞胰岛素信号的增敏剂。

JOHNSON 等<sup>[48]</sup>研究了无酒精发酵蓝莓-黑莓液(酵素)中酚类提取物对降低饮食诱导的小鼠肥胖的作用。结果显示,高剂量组(18.9 mg 花色苷/kg 体重/d)可显著抑制小鼠体重和脂肪的增加,所有处理组均可显著降低小鼠的脂肪

质量百分比、平均脂肪细胞直径、血浆甘油三酯和胆固醇含量。然而,组织学和组织化学分析显示,中剂量组和高剂量组处理的小鼠发生了肝脏肿大和脂质沉积增加现象,高剂量组小鼠的谷丙氨酸转移酶(肝脏损伤的敏感指标)升高。这些结果表明,蓝莓-黑莓发酵液中的酚类物质有抗肥胖作用,但高剂量服用时可能会产生毒副作用。

SHENG 等<sup>[49]</sup>研究了发酵银耳/蓝莓(fermented tremella/blueberry, FTB)对代谢健康肥胖(metabolically healthy obesity, MHO)模型大鼠摄食量、体重和血脂的影响,测定了服用 FTB 前后肠道微生物菌群和短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFA)组成。结果表明,FTB 可以降低 MHO 大鼠体重、改善血脂水平,减肥效果显著;FTB 处理后肠道微生物菌群多样性发生了改变,与肥胖预防相关细菌(异杆菌、布劳提菌、副杆菌和普氏杆菌)丰度增加,致病菌丰度降低,并且具有促进健康功能的特定短链脂肪酸种类也有所增加。该研究首次明确了 FTB 在 MHO 模型中的减肥功效,显示出其作为功能减肥食品的潜力。

### 3.2 降血压/血糖作用

高血压是心血管疾病的主要风险因素,预防和早期治疗通常可以达到最佳效果。AHRÉN 等<sup>[50]</sup>评估了冷冻干燥后的发酵蓝莓对大鼠血压标志物的影响,结果显示诱导性高血压大鼠仅在干预 2 周后即表现出明显改善,且大鼠小肠内的微生物种群的生物多样性不断增加。该结果表明发酵蓝莓对大鼠具有降血压作用。

高血糖是一种严重的代谢紊乱现象,严重威胁着人体健康。ZHANG 等<sup>[36]</sup>研究了蓝莓汁发酵前后对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制效果,结果显示发酵蓝莓汁对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率由 32% 上升到 44.9%,具有降低餐后高血糖功能。JOHNSON 等<sup>[48]</sup>研究了无酒精发酵蓝莓-黑莓液(酵素)中酚类提取物对诱导小鼠高血糖症的降糖效果,结果显示:与对照组和降血糖药物饲喂组相比,中剂量处理组和高剂量处理组小鼠的空腹血糖值出现了显著降低,表明发酵蓝莓-黑莓酵素中酚类提取物具有显著的降血糖作用。另外,发酵蓝莓可以通过抗炎和抗氧化作用对抗糖尿病<sup>[51]</sup>。饲喂糖尿病小鼠发酵蓝莓汁后降低了小鼠的高血糖,并抑制了糖尿病前期 KKAy 小鼠肥胖、糖耐量异常和糖尿病的发生。脂联素可降低组织甘油三酯含量和胰岛素抵抗<sup>[52]</sup>,而脂联素基因表达又受到活性氧(reactive oxygen species, ROS)<sup>[51]</sup>和促炎细胞因子<sup>[51,53]</sup>的抑制,发酵蓝莓汁通过减轻氧化应激和增加脂联素水平显示出其降糖作用<sup>[51]</sup>。

### 3.3 改善肠道功能

肠道屏障功能是影响健康的重要因素,完善的肠道屏障使机体不受肠道致病微生物、内毒素及抗原的侵害,维护人体健康<sup>[54]</sup>。发酵食品具有调节肠道微生物群组成的功能,这有助于加强肠道屏障的完整性。CHENG 等<sup>[55]</sup>探

究了发酵蓝莓渣对肠道屏障功能的提升作用及其潜在作用机制。研究发现,发酵蓝莓渣含有丰富的蛋白质、可溶性膳食纤维、碳水化合物及 36 种多酚类化合物,饲喂发酵蓝莓渣实验组小鼠增加了小鼠肠道中紧密连接蛋白(ZO-1、claudin-1、claudin-4 和 occludin)的表达,改善了小鼠的肠道环境,减少了肠道炎症;对核转录因子(nuclear transcription factor, NF- $\kappa$ B)和肌球蛋白轻链激酶(myosin light-chain kinase, MLCK)蛋白表达的分析表明,发酵蓝莓渣通过 NF- $\kappa$ B-MLCK 信号通路改善了高脂饮食小鼠的肠道屏障功能,改善了小肠绒毛的深度和排列,并增加了回肠杯状细胞的数量和密度。转化生长因子(transforming growth factor, TGF- $\beta$ )是一种肠粘膜免疫调节剂,发酵蓝莓补充剂可促进肠道 TGF- $\beta$  的产生以提高肠道粘膜的免疫力<sup>[56]</sup>。

### 3.4 抗癌功能

癌症是当今世界死亡率最高的疾病,严重威胁着人类的生命健康,植物中功能化学成分对癌症干细胞自我更新途径的影响收到广泛关注<sup>[57-58]</sup>。浆果酵素中含有黄酮、多酚等丰富的植物化学物质,其在抗癌功能方面的研究已有报道。RYU 等<sup>[38]</sup>探究了植物乳杆菌发酵蓝莓对抗癌活性的影响。结果表明,发酵蓝莓的 80%乙醇提取物(fermented blueberries extracted with 80% ethanol, FBE)通过诱导凋亡增强对人宫颈癌 HeLa 细胞的抗增殖活性。在原儿茶酸、儿茶酚和绿原酸 3 种主要化合物中,当单独或以不同比例混合使用该 3 种化合物处理 HeLa 细胞时,儿茶酚显示出最显著的抗癌活性。皮尔逊乘积矩相关分析表明,蓝莓发酵后抗癌活性的增加与 FBE 中存在的酚酸呈正相关关系。进一步研究表明,植物乳杆菌发酵蓝莓较产单宁酶乳酸菌发酵的蓝莓对人宫颈癌 HeLa 细胞具有更高的抗癌细胞增殖活性,这可能是由于植物乳杆菌发酵可将蓝莓多酚转化为具有强抗增殖活性多酚代谢产物。该研究揭示,发酵蓝莓富含酚酸,是一种很有前途的抗癌药物来源,可作为食品、药品和化妆品制剂的添加剂使用。

VUONG 等<sup>[59]</sup>评估了富含多酚的蓝莓制剂(polyphenol-enriched blueberry preparation, PEBP)及其非发酵制剂(non-fermented counterpart, NBJ)对乳腺癌干细胞(mammary cancer stem cell, CSC)体外、体内和体外发育的影响。在体外 3 种细胞系:小鼠 4T1、人 MCF7 和人 MDA-MB-231 中测定了 PEBP 对细胞增殖、迁移、侵袭和乳腺球形成的影响。在 BALB/c 小鼠模型中进行离体乳腺球形成、肿瘤生长和转移的观察。研究表明,PEBP 可影响乳腺癌干细胞的细胞信号级联,调节转录因子活性,通过减少转移和控制 PI3K/AKT、MAPK/ERK 和 STAT3 通路(干细胞炎症信号传导的中心节点)抑制体内肿瘤生长,显著抑制了 4T1、MCF-7 和 MDA-MB-231 的细胞增殖,减少了乳腺球的形成和细胞迁移。在体内,PEBP 显著降低了肿瘤的发展,并

减少了肺转移的发生。因此,发酵富含多酚的蓝莓制剂有可能成为一种新的抗乳腺癌补充替代药物治疗剂。

### 3.5 其他功能

氧化应激与神经退行性疾病关系密切,活性氧自由基诱导的氧化应激可引起神经元损伤细胞损伤。研究发现,在神经元细胞培养中,用沙雷菌属细菌(*Serratia vaccini*)发酵的蓝莓可诱导抗氧化酶活性,通过上调细胞存活信号通路中关键酶的表达以及下调细胞死亡途径关键酶的表达以防止神经元细胞死亡<sup>[60]</sup>。枸杞多糖能有效减缓氧化应激,降低酒精性肝损伤。冯琳等<sup>[61]</sup>通过测定细胞上清液中天冬氨酸氨基转移酶、谷氨酸-丙酮酸转氨酶和乳酸脱氢酶以及细胞内的丙二醛,乙醇脱氢酶和 SOD 活性等指标发现枸杞酵素比未发酵的原浆对损伤细胞保护作用更强,并且由酵母菌 MN0110 和乳杆菌 MN1030 发酵获得的枸杞酵素效果最佳。因此,浆果酵素产品对缓解氧化应激相关疾病症状具有一定潜力。

## 4 结束语

长期食用精细加工食品增加了人们罹患糖尿病、冠心病、肥胖症等慢性疾病风险。浆果酵素食品在预防和治疗肥胖症、糖尿病、肠道功能紊乱等疾病方面具有巨大潜力。目前,浆果酵素生产工艺、生物活性成分及功效特性研究取得了一定的研究进展,但仍有一些问题和机制亟需解决和阐明,因此可在以下方面进行深入研究:(1)浆果酵素发酵过程中甲醇、甲醛或生物胺等有害物质的产生机制及消除方法研究,提高酵素食品的安全性;(2)建立高效提取、分离浆果酵素中生物活性成分的方法,鉴定不同浆果酵素中活性成分的种类、数量和分子结构,为深入开发浆果酵素食品奠定基础;(3)浆果酵素中活性成分与靶组织的相互作用机制应进一步阐明,并确定活性成分在人体中的剂量效应;(4)研究食用过程中 pH、胃肠酶、生理屏障等因素对浆果酵素活性成分生物利用度的影响,开发活性成分的包埋及缓释技术,以提高其生物利用度;(5)发酵菌种类及发酵方式对浆果酵素产品风味成分的影响及调控机制探究;(6)浆果酵素食品的储藏条件及货架期预测方法研究;(7)根据浆果种类和特性的不同建立酵素标准生产工艺。

### 参考文献

- [1] HORNERO-MÉNDEZ D, CERRILLO I, ORTEGA Á, *et al.*  $\beta$ -cryptoxanthin is more bioavailable in humans from fermented orange juice [J]. *Food Chem*, 2018, 262: 215–220.
- [2] LI C, NIE SP, ZHU KX, *et al.* *Lactobacillus plantarum* NCU116 fermented carrot juice evokes changes of metabolites in serum from type 2 diabetic rats [J]. *Food Res Int*, 2016, 80: 36–40.
- [3] 侯银臣, 吕行, 黄继红, 等. 发酵条件对桑葚酵素抗氧化能力的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(2): 251–256.  
HOU YC, LV X, HUANG JH, *et al.* Effect of fermentation conditions on

the antioxidant capacity of the ferment of mulberry [J]. *J Henan Agric Univ*, 2019, 53(2): 251–256.

- [4] 陈凤英. 典型浆果预处理、红外冷冻干燥及其干制品吸湿特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
CHEN FY. Study on pretreatment, infrared freeze-drying and hygroscopic properties of typical berries [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [5] 陈卫, 徐阳, 鲍涛, 等. 浆果花色苷的营养健康功效与功能食品创制 [C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会论文集, 2020.  
CHEN W, XU Y, BAO T, *et al.* Nutrition and health benefits of berry anthocyanins and innovation of functional foods [C]. Abstracts of the 17th Annual Meeting of Chinese Society for Food Science and Technology, 2020.
- [6] 顾小福, 赵建荣. 果汁的分类及果汁含量检测分析[J]. *食品安全导刊*, 2019, 14: 14–15.  
GU XF, ZHAO JR. Classification of fruit juice and detection and analysis of fruit juice content [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2019, 14: 14–15.
- [7] FILANNINO P, AZZI L, CAVOSKI I *et al.* Exploitation of the health-promoting and sensory properties of organic pomegranate (*Punica granatum* L.) juice through lactic acid fermentation [J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 163(2–3): 184–192.
- [8] PARK JB, LIM SH, SIM HS, *et al.* Changes in antioxidant activities and volatile compounds of mixed berry juice through fermentation by lactic acid bacteria [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2017, 26(2): 441–446.
- [9] 朱丹实, 吴逗逗, 沈雨思, 等. 多菌种混合发酵果蔬汁的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(10): 343–352.  
ZHU DS, WU DD, SHEN YS, *et al.* Research progress on mixed fermentation of multiple strains for fruits and vegetables juice [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(10): 343–352.
- [10] 康晓乐, 李东霓, 李晨, 等. 苹果自然发酵酵素微生物多样性分析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 283–290.  
KANG XL, LI DN, LI C, *et al.* Analysis of microbial diversity of naturally fermented apple Jiaosu [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(1): 283–290.
- [11] 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 JY, ZHU YJ, CHEN L, *et al.* The research and development prospect of edible Jiaosu [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(19): 271–283.
- [12] 沈燕飞, 聂小华, 孟祥河, 等. 酵素食品加工微生物与功能特性研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(1): 112–116.  
SHEN YF, NIE XH, MENG XH, *et al.* Research progress on microorganisms and functional characteristics of Jiaosu food processing [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 2019, 60(1): 112–116.
- [13] 汤灿辉, 王梦婵, 刘少雄, 等. 沙棘酵素自然发酵过程中品质特征和细菌群落动态变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 150–157.  
TANG CH, WANG MC, LIU SX, *et al.* Quality changes and bacterial community dynamics of Seabuckthorn Jiaosu during nature fermentation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(23): 150–157.
- [14] 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.  
YIN FR. Bioactivity and microbial diversity analysis of red raspberry during the natural fermentation process [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.
- [15] 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 PY, PENG Y, LI C, *et al.* Diversity analysis of microorganisms of

- mulberry Jiaosu based on metagenomics [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(5): 251–257.
- [16] 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, 9: 294–299.  
HAN ZY, LI XJ, YE F, *et al.* Development of solid fermented food [J]. *Food Ferment Ind*, 2018, 9: 294–299.
- [17] 崔国庭, 王缙, 刘向丽, 等. 响应面法优化草莓酵素的发酵工艺及其生物活性初探[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(9): 143–148.  
CUI GT, WANG D, LIU XL, *et al.* Optimization of fermentation process of strawberry Jiaosu by response surface methodology and the primary study of bioactivity [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(9): 143–148.
- [18] 樊秋元, 朱丹, 牛广财, 等. 黑加仑酵素发酵工艺优化及其体外抗氧化性能[J]. *食品工业*, 2020, 41(1): 132–137.  
FAN QY, ZHU D, NIU GC, *et al.* Optimization of fermentation process of blackcurrant Jiaosu, and antioxidant activity *in vitro* [J]. *Food Ind*, 2020, 41(1): 132–137.
- [19] 赵峥, 周德平, 褚长彬, 等. 不同葡萄废果组成对厌氧发酵转化活性物质的效果研究[J/OL]. *农业环境科学学报*: 1-9. [2022-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20211229.2036.004.html>  
ZHAO Z, ZHOU DP, CHU CB, *et al.* Effect of different waste grape fruit components on the transformation of active substances by anaerobic fermentation [J/OL]. *J Agric Environ Sci*: 1-9. [2022-04-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20211229.2036.004.html>
- [20] 梁红敏, 郭亚芸, 史红梅. 不同乳酸菌发酵葡萄酵素过程种代谢产物及其抗氧化特性分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(24): 170–176.  
LIANG HM, GUO YY, SHI HM. Analysis of the metabolic components and antioxidant properties of different lactic acid bacteria [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(24): 170–176.
- [21] WU Y, LI S, TAO Y, *et al.* Fermentation of blueberry and blackberry juices using *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus thermophilus* and *Bifidobacterium bifidum*: Growth of probiotics, metabolism of phenolics, antioxidant capacity *in vitro* and sensory evaluation [J]. *Food Chem*, 2021, 348: 129083.
- [22] 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.  
LIU YF. Research on fermentation of fruit beverages with probiotics and their quality change [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [23] 白琳, 茹先古丽·买买提依明, 丁帅杰, 等. 蓝莓酵素中复合菌种添加比例的确定及发酵工艺优化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(5): 91–99, 37.  
BAI L, RUXIANGULI MMTYM, DING SJ, *et al.* The adding ratios of multiple strains in the blueberry Jiaosu and optimization of fermentation process [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2021, 37(5): 91–99, 37.
- [24] 张莉, 栢红梅, 游敬刚, 等. 不同发酵剂菌种对蓝莓-桑葚复合酵素抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(6): 29–34.  
ZHANG L, BAI HM, YOU JG, *et al.* Effect of different fermentation strains on the antioxidant activity of blueberry-mulberry complex fermented liquor [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(6): 29–34.
- [25] 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 ZR, TIAN Y, ZHAO N, *et al.* Changes in antioxidant activity of blueberry jiaosu during fermentation [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016, 32(12): 74–80.
- [26] LI S, TAO Y, LI D, *et al.* Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles [J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130090.
- [27] 王贵新. 复合酶解毛酸浆果汁及其悬浮与色泽稳定性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.  
WANG GX. Study on compound enzymatic hydrolysis physalis juice and its suspension and color stability [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016.
- [28] MARSOL-VALL A, KELANNE N, NUUTINEN A, *et al.* Influence of enzymatic treatment on the chemical composition of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea*) juice [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 128052.
- [29] 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.  
FAN QY. Preparation of blackcurrant Jiaosu and its antioxidant activity [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.
- [30] 刘鑫, 朱丹, 牛广财, 等. 蓝莓酵素发酵工艺优化[J]. *中国酿造*, 2018, 37(3): 171–175.  
LIU X, ZHU D, NIU GC, *et al.* Process optimization of yeast fermentation for blueberry enzyme [J]. *China Brew*, 2018, 37(3): 171–175.
- [31] 段振, 朱彩平, 刘俊义, 等. 超高压技术及其在提取植物天然活性成分中的应用进展[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 245–252.  
DUAN Z, ZHU CP, LIU JY, *et al.* Review on the ultra-high pressure technology and its application progress in extracting plant active ingredients [J]. *Food Ferment Ind*, 2017, 43(12): 245–252.
- [32] 金哲宇, 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 ZN, FANG S, SHA RY, *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.
- [33] 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. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030134  
YI Y, ZHAO MH, ZUO Y, *et al.* Correlation between active substances and antioxidant capacity during mulberry Jiaosu fermentation [J]. *Food Ferment Ind*, 2022. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030134
- [34] 刘媛洁. 响应面法优化柚子酵素的发酵工艺[J]. *现代食品*, 2021, 13: 105–110.  
LIU YJ. Optimization of fermentation process of grapefruit enzyme by response surface methodology [J]. *Mod Food*, 2021, 13: 105–110.
- [35] 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.
- [36] ZHANG Y, LIU W, WEI Z, *et al.* Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 139: 110590.
- [37] ÁLVAREZ-FERNÁNDEZ MA, HORNEDO-ORTEGA R, CERESO AB, *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.
- [38] RYU JY, KANG HR, CHO SK. 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: 2347–2356.
- [39] 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 *Torulopsis delbrueckii* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 149: 111910.
- [40] 于晓艳, 任清, 卢舒娴, 等. 微生物酵素主要功效酶活力的测定[J]. *食品科技*, 2008, 7: 193-196.
- YU XY, REN Q, LU SX, *et al.* Mensuration of main efficacy enzyme activity in microbial ferment [J]. *Food Sci Technol*, 2008, 7: 193-196.
- [41] 郑斌, 王舒, 王子迎, 等. 蓝莓酵素中蛋白质和蛋白酶含量测定[J]. *吉林农业*, 2018, 19: 68-70.
- ZHENG B, WANG S, WANG ZY, *et al.* Determination of protein and protease in blueberry Jiaosu [J]. *Jilin Agric*, 2018, 19: 68-70.
- [42] 魏文倩, 张冰, 李利强, 等. 响应面法优化蓝靛果红树莓复合发酵汁的研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(8): 172-179.
- WEI WQ, ZHANG B, LI LQ, *et al.* Study on the optimization of the compound fermentation juice mixed with blue hazelnut and red raspberry using response surface method [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(8): 172-179.
- [43] 张冰, 张会娟, 张全盛, 等. 高还原力及脂肪酶活樱桃酵素生产工艺优化[J]. *中国酿造*, 2018, 37(7): 93-96.
- ZHANG B, ZHANG HJ, ZHANG QS, *et al.* Process optimization of cherry enzyme with high reducing power and lipase activity [J]. *China Brew*, 2018, 37(7): 93-96.
- [44] 郑重, 孙琦, 石永伟, 等. 高效液相色谱-串联质谱法直接定量分析植物酵素中多种氨基酸成分[J]. *色谱*, 2015, 33(3): 309-313.
- ZHENG Z, SUN Q, SHI YW, *et al.* Direct quantitative analysis of amino acids in fermented beverage of plant extract using high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2015, 33(3): 309-313.
- [45] 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, 78.
- CHEN XW, CHENG YJ, FAN HAN, *et al.* Amino acid composition analysis and protein nutrition evaluation of strawberry jiaosu during fermentation process [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(17): 64-70, 78.
- [46] 高学坤, 冯晨毅, 许详, 等. 橙皮苷对肥胖小鼠脂肪组织脂质代谢的作用及机制[J]. *营养学报*, 2021, 5: 474-478, 484.
- GAO XK, FENG CY, XU X, *et al.* Effects of hesperidin on lipid metabolism in fat tissues of obese mice and the mechanisms involved [J]. *Acta Nutr Sin*, 2021, 5: 474-478, 484.
- [47] GARCIA-DIAZ DF, JOHNSON MH, DE MEJIA EG. Anthocyanins from fermented berry beverages inhibit inflammation-related adiposity response *in vitro* [J]. *J Food Sci*, 2015, 18(4): 489-496.
- [48] JOHNSON MH, WALLIG M, LUNA VD, *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.
- [49] SHENG Z, YU L, LI X, *et al.* The anti-obesity effect of fermented tremella/blueberry and its potential mechanisms in metabolically healthy obese rats [J]. *J Funct Food*, 2021, 86: 104670.
- [50] AHRÉN IL, XU J, ÖNNING G, *et al.* Antihypertensive activity of blueberries fermented by *Lactobacillus plantarum* DSM 15313 and effects on the gut microbiota in healthy rats [J]. *Clin Nutr*, 2015, 34: 719-726.
- [51] VUONG T, BENHADDOU-ANDALOUSSI A, BRAULT A, *et al.* Antiobesity and antidiabetic effects of biotransformed blueberry juice in KKA(y) mice [J]. *Int J Obesit*, 2009, 33: 1166-1173.
- [52] ACHARI AE, JAIN SK. Adiponectin, a therapeutic target for obesity, diabetes, and endothelial dysfunction [J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18: 1321.
- [53] BRUUN JM, LIHN AS, VERDICH C, *et al.* Regulation of adiponectin by adipose tissue-derived cytokines: *In vivo* and *in vitro* investigations in humans [J]. *Am J Physiol Endoc M*, 2003, 285: 527-533.
- [54] 王琪, 肖融, 王敬, 等. 乳酸菌胞外多糖对动物肠道屏障功能的调控作用及机制[J]. *动物营养学报*, 2021, 7: 3657-3664.
- WANG Q, XIAO R, WANG J, *et al.* Regulation and mechanism of lactic acid bacteria exopolysaccharide on intestinal barrier function of animals [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2021, 7: 3657-3664.
- [55] CHENG Y, WU T, TANG S, *et al.* Fermented blueberry pomace ameliorates intestinal barrier function through the NF- $\kappa$ B-MLCK signaling pathway in high-fat diet mice [J]. *Food Funct*, 2020, 11(4): 3167-3179.
- [56] SONG B, ZHENG C, ZHA C, *et al.* Dietary leucine supplementation improves intestinal health of mice through intestinal SIgA secretion [J]. *J Appl Microbiol*, 2020, 128: 574-583.
- [57] 王珍珍, 任奕梦, 罗之林, 等. 纳米硒的靶向递送及抗癌机制研究进展[J]. *沈阳药科大学学报*, 2022, 39(1): 105-113.
- WANG ZZ, REN YM, LUO ZL, *et al.* Research progress on targeted delivery of selenium nanoparticles and anticancer mechanism [J]. *J Shenyang Pharm Univ*, 2022, 39(1): 105-113.
- [58] ROSSI T, GALLO C, BASSANI B, *et al.* Drink your prevention: Beverages with cancer preventive phytochemicals [J]. *Pol Arch Med Wewn*, 2014, 124: 713-722.
- [59] VUONG T, MALLETT JF, OUZOUNOVA M, *et al.* Role of a polyphenol-enriched preparation on chemoprevention of mammary carcinoma through cancer stem cells and inflammatory pathways modulation [J]. *J Transl Med*, 2016, 14: 13.
- [60] VUONG T, MATAR C, RAMASSAMY C, *et al.* Biotransformed blueberry juice protects neurons from hydrogen peroxide-induced oxidative stress and mitogen-activated protein kinase pathway alterations [J]. *Brit J Nutr*, 2010, 104: 656-663.
- [61] 冯琳, 常明, 唐年初. 不同菌种发酵枸杞酵素对酒精性肝损伤的保护作用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 17: 98-104.
- FENG L, CHANG M, TANG NC. Protective effects on alcoholic liver injury by fermented *Lycium barbarum* juice [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 17: 98-104.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

## 作者简介



李航棋, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: 2470998058@qq.com



汤轶伟, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全。

E-mail: tangyiwei81@163.com