

桑椹浆果及其生物发酵制品研究进展

王聪聪¹, 马永昆^{1*}, 许满青¹, 李彦枢¹, 胡杰¹, 薛晋东², 李大海²

(1. 江苏大学 食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212000; 2. 丹阳颐和公司, 江苏 镇江 212000)

摘要: 桑椹是药食同源类小浆果, 富含氨基酸、矿物质、维生素、有机酸、酚类物质等营养成分, 具有降血糖、抗氧化、安神助眠等功效。为解决桑椹不易储存和运输等问题, 同时保留其原有的营养价值, 对桑椹进行酵母菌发酵、醋酸菌发酵、乳酸菌发酵等生物发酵后可得到桑椹酒、桑椹果醋、桑椹酵素等系列产品。该文综述桑椹浆果的研究现状及桑椹生物发酵制品的开发, 为后续桑椹的精深加工研究提供参考。

关键词: 桑椹; 营养价值; 酚类化合物; 生物发酵; 产品开发

Research Progress of Mulberry Berry and Biological Fermentation Products

WANG Cong-cong¹, MA Yong-kun^{1*}, XU Man-qing¹, LI Yan-shu¹, HU Jie¹, XUE Jin-dong², LI Da-hai²

(1. School of Food and Bioengineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, Jiangsu, China; 2. Danyang Yihe Food Co., Ltd., Zhenjiang 212000, Jiangsu, China)

Abstract: Mulberry, a small berry, is a medicinal and edible product. It is rich in amino acids, minerals, vitamins, organic acids, various phenolic substances, and other nutrients. It has medicinal effects such as lowering blood sugar, antioxidation, soothing the nerves, and helping sleep. To solve the problem that mulberries are not easy to store and transport and retain their original nutritional value at the same time, mulberries can be subjected to yeast fermentation, acetic acid bacteria fermentation, lactic acid bacteria fermentation, and other biological fermentation to obtain mulberry wine, mulberry fruit vinegar, mulberry enzymes, and other series products. In this paper, the research status of mulberry berry and the development of the biological fermentation products of mulberry were reviewed, which laid a foundation for the further study of mulberry processing.

Key words: mulberry; nutritive value; phenolic compounds; biological fermentation; product development

引文格式:

王聪聪, 马永昆, 许满青, 等. 桑椹浆果及其生物发酵制品研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 215-219.

WANG Congcong, MA Yongkun, XU Manqing, et al. Research Progress of Mulberry Berry and Biological Fermentation Products[J]. Food Research and Development, 2023, 44(10): 215-219.

桑椹(*Fructus Mori*)又名桑椹子、桑果、乌椹等, 属于桑科落叶乔木桑树的果实, 体型为长圆状(长 2 cm~3 cm, 直径 1.2 cm~1.8 cm), 为聚花果, 采摘期集中在 4 月~6 月, 20 d 左右。桑椹广泛分布在北半球的温带至亚热带地区以及南半球的热带地区^[1]。最常见的桑椹按颜色分为白桑、红桑、黑桑, 其中紫黑色的桑椹果实较为常见。黑桑成熟后汁多皮薄, 呈紫黑色, 口感酸甜。我国桑椹资源丰富, 目前收录的桑树品种约有 3 000 种, 这些桑树品种主要种植在四川、浙江、安徽、

山东等地^[2]。我国自 1998 年引入果桑试种, 已筛选出“镇椹一号”、“大什”、“红果系列”、“黑珍珠”等品种, 如今随着人们对生活品质追求的提高, 用于鲜食或加工的桑椹种植面积呈现快速增长的趋势。

我国蚕桑文化历史悠久, 在古代种植的桑树多数以养蚕为主, 桑椹一直被当作药材使用, 《本草纲目》记载“捣汁后服解酒毒”及《滇南本草》记载“入肝、肾经, 利五脏关节, 通血气, 久服黑发明目”^[3]。现代科学研究表明, 桑椹具有众多生理功效, 这与桑椹中含有的丰富

基金项目: 镇江市重点研发计划(SNY20200130052)

作者简介: 王聪聪(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品风味及发酵工程、果蔬发酵。

* 通信作者: 马永昆(1963—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 超高压食品、食品风味及发酵工程、果蔬发酵。

多糖及多酚类物质如花青素、黄酮、黄酮醇、酚酸等活性成分有关。目前,生物发酵食品的研究受到广泛关注,但涉及的食品种类较少,桑椹因其丰富的功能价值被加工成桑椹果醋、桑椹果酒、桑椹酵素等。但桑椹在生物发酵产品开发方面的研究较少。本文综述桑椹浆果的研究现状及桑椹生物发酵制品的开发,为后续桑椹的精深加工研究提供参考。

1 桑椹浆果研究现状

桑椹中含有碳水化合物^[4]、蛋白质、氨基酸、矿物质、维生素等营养物质以及多糖、多酚、有机酸等生物活性成分^[5],具体组成见表1。

表1 桑椹中的营养成分

Table 1 Nutrient composition in mulberry

种类	组成	参考文献
基本营养物质	水分、蛋白质、总糖、灰分、总酯、纤维素等	[4]
有机酸	柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸等	[5]
维生素	维生素C、维生素B ₁ 、维生素B ₂ 、维生素B ₃ 、维生素B ₆ 、维生素E等	[5]
游离氨基酸	必需氨基酸:赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸、缬氨酸、异亮氨酸 非必需氨基酸:天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、半胱氨酸、天冬酰胺、组氨酸、精氨酸、脯氨酸、谷氨酰胺、酪氨酸	[5]
脂肪酸	棕榈酸、亚油酸、油酸等	[6]
多酚类	总酚、花青素等	[7]
黄酮类	芦丁、异槲皮苷、槲皮苷、黄芩苷等	[8]
矿物质	Ca、K、Mg、Zn、Se、Fe、P等	[9]

桑椹中含有较高浓度的硒,其相对含量是猕猴桃的10倍、苹果的8倍。桑椹中含有19种游离氨基酸,其中包含的必需氨基酸中苏氨酸含量最高,可达33.81 mg/100 g。桑椹脂肪酸^[6]组成中主要以亚油酸、棕榈酸和油酸为主,含量分别为78.02%、17.98%、7.26%。桑椹中含有丰富的酚类物质,主要为花色苷^[7]、芦丁^[8]、白藜芦醇、酚酸等,这些活性成分的研究极大丰富了消费者对桑椹营养成分的认知。研究发现,黑桑较白桑含有更高含量的酚类物质,黑桑更适宜进行桑椹功能性食品的开发研究。此外,桑椹中含有硒、铁、锌等矿物质^[9],以桑椹为基料可以开发相关的富硒饮品,丰富市场产品种类,提高产品附加值。

研究表明,桑椹可以降低肝脏中磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶和葡萄糖6-磷酸酶的水平,从而发挥抗糖尿病的功效^[10]。从桑椹中提取出的酚类化合物和异戊二烯基黄酮类化合物具有良好的抗糖尿病活性,其作用机制涉及过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (peroxisome proliferator activated receptor γ , PPAR γ),PPAR γ 是一个重要的抗糖尿病靶点,其激动剂能够增强胰岛素的敏感性,是针对2型糖尿病的发病机制、从根源上治疗

2型糖尿病的方法^[11]。研究发现,桑椹多糖(mulberry fruit polysaccharide, MFP)可以调节肠道菌群,使糖尿病小鼠体质量增加、血糖水平下降、葡萄糖耐量提高^[12]。MFP还可以通过抗氧化和抗炎特性减少 β 细胞功能障碍,促进 β 细胞的增殖,并减缓 α -糖苷酶和 α -淀粉酶活性,通过胰岛素依赖和与胰岛素无关的途径恢复葡萄糖的摄入^[13-14]。桑椹的抗氧化性与富含酚类及黄酮类化合物有关^[15]。人体在正常新陈代谢过程中会产生氧化活性很强的活性氧自由基($O_2^{\cdot-}$ 、 $HOO^{\cdot}$ 、 $HO^{\cdot}$)及脂质过氧化氢(H_2O_2)等其他代谢产物。氧化自由基产生过多,自身的抗氧化体系无法及时清除,两者之间的平衡破坏后,产生的氧化应激反应是导致众多疾病的因素之一^[16-17]。而桑椹所表现出的抗氧化特性主要依赖于酚类化合物独特的酚醛结构^[18],类黄酮B环中O-二酚羟基的存在是提高1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力的重要因素。花青素B环上的3,4-二羟取代基也是清除自由基的关键,其易与羟基($OH^{\cdot}$)、叠氮($N_3^{\cdot}$)和过氧基($ROO^{\cdot}$)等自由基反应,减少活性氧自由基对机体的损伤。桑椹中酚酸类物质存在邻二羟基或3-OH取代基和烷基结构,增强了酚酸的亲脂性和螯合能力;同时,桑椹中含有的绿原酸也有一定的抗氧化作用^[19]。

研究证实,桑椹含有的高剂量酚类化合物使其拥有较强的抗氧化能力,这些化合物能够有效清除活性氧自由基,保护细胞免受损伤,减少炎症反应^[20]。褪黑素是一种能够调节睡眠的物质,其生理作用包括调整生物钟、诱导睡眠、延缓衰老、调节内分泌系统等。其中最突出的作用是对睡眠的调节,尤其对睡眠延迟或由时差引起的睡眠障碍具有明显效果。经过微生物发酵的食品不仅含有褪黑素,而且含有大量的褪黑素同分异构体。王成等^[21]研究不同酿酒酵母发酵模拟葡萄汁中褪黑素及其同分异构体变化规律时发现,褪黑素及其同分异构体可在发酵过程中产生,而桑椹在发酵过程中已被证实有大量的褪黑素同分异构体产生,并且桑椹产生的同分异构体含量高于草莓、蓝莓和树莓,由此可以进一步推断出桑椹可能起到安神助眠的作用。此外,后续试验也有必要研究褪黑素与其同分异构体之间的生理效果是否有差异,用来进一步证实桑椹安神助眠的功效。桑椹中含有的花青素及 β -胡萝卜素具有改善视力的功效, β -胡萝卜素作为维生素A的前体物质对正常视力的维持具有重要作用^[22]。花青素能够减轻氧化自由基对视网膜的损伤,缓解眼睛疲劳,提高夜视能力^[23]。桑椹中含有的维生素C具有抗氧化作用,在一定程度上也可以起到保护视力的作用。桑椹对人体健康状态的改善有积极作用,表现出的众

多功效及功效之间的差异主要取决于其含有的多种营养成分和生物活性物质。综上所述,桑椹的保健功效广泛,现代科学及传统中医学均证明桑椹具有一定的功能价值,其在降血糖、抗氧化功效显著,开发潜力大,市场前景广阔。

2 桑椹生物发酵产品

2.1 桑椹生物发酵产品开发方向

桑椹营养价值高,但是桑椹鲜果汁多皮薄,不易储存运输,利用微生物作用,发酵得到一系列的桑椹产品是目前的研究热点。桑椹生物发酵产品种类丰富,如酵母菌发酵得到桑椹酒^[24],酵母菌和醋酸菌发酵得到桑椹果醋^[25],酵母菌、醋酸菌和乳酸菌发酵得到桑椹酵素^[26]等。微生物在发酵桑椹的过程中,首先发生显著变化的是含糖量降低,pH值、乙醇含量、挥发性组分含量发生变化,其次,功能性成分花色苷、黄酮类、酚类也会随之发生变化。如酵母菌发酵产生乙醇,有利于活性成分的渗出,增强桑椹酒的抗氧化能力;乳酸菌发酵使花青素含量降低,但也会在降低产品含糖量的同时,保留葡萄糖苷酶抑制剂的活性;植物乳杆菌发酵新疆桑椹产生的有机酸、过氧化氢、细菌素等天然抑菌物质有益于维持肠道菌群平衡,提高机体免疫力^[27]。此外,经微生物发酵的桑椹产品会产生果香、花香、蜜香等令人愉悦的香气物质,可提高桑椹发酵产品的感官质量,为后续桑椹发酵产品开发奠定良好的基础。

2.2 桑椹生物发酵产品

2.2.1 桑椹果酒

以新鲜桑椹或桑椹汁为原料,通过酵母菌全部或部分酒精发酵,经陈酿后得到集天然、营养、保健于一体的桑椹果酒产品^[28]。桑椹酒可以极大保留鲜果中的营养物质及独特的果香味,研究发现,桑椹酒中花青素含量是红葡萄酒的5倍,白藜芦醇含量达1.38 $\mu\text{g/mL}$ ^[29],维生素含量高,其中维生素B₂是红葡萄酒的3.35倍,氨基酸总量是红葡萄酒的3.45倍以上^[30]。目前,桑椹果酒一般选用葡萄酒酿造酵母,对桑椹果酒专用酿酒酵母的研究较少。吴梦^[2]在桑椹酒发酵液中添加15%苹果乳酸发酵液,以酵母接种量0.26%、发酵温度21.50℃、初始糖度20°Brix发酵桑椹酒可显著影响桑椹酒感官评分。张志兰等^[31]为降低桑椹果酒发酵过程中挥发酸含量,进行桑椹原料低温保鲜、桑椹原汁低温前置澄清、适度低温发酵等对果酒品质特别是挥发酸含量的影响试验。结果表明,使用5℃低温保鲜、成熟度较好的桑椹打汁,添加1 g/L膨润土前置澄清,控制发酵温度16℃~19℃,可以显著降低桑椹发酵酒挥发酸含量。接种纯种酵母发酵过程易于控制,但是果香味淡薄、风味及其口感单一^[32]。

非酿酒酵母是指在果酒酿造中除酿酒酵母之外的所有酵母菌株,多来源于水果果皮、果园土壤以及酿造环境中,一般通过分泌更多的蛋白酶、纤维素酶、果胶酶、葡萄糖苷酶、脂肪水解酶等胞外酶,与果汁中的相关底物反应产生醇类、酯类、酸类、萜烯类等物质,进而影响果酒品质(香气、口感、色泽、营养物质)。非酿酒酵母产乙醇能力弱,纯种发酵果酒乙醇含量仅为9%~10%,可达到生物降醇的效果。此外,非酿酒酵母发酵桑椹酒可以增加酯类、萜烯类物质产生,丰富酒体风味^[33]。但非酿酒酵母耐酒精度较差,酒精含量10%及以上即不能正常生长。因此结合两种酵母的优势和特点,可采用多种酵母菌共同发酵果酒,通过酵母间相互作用,提升果酒品质,改善单一酵母菌发酵缺陷。非酿酒酵母在发酵期间产生的较多乳酸导致酒样pH值降低,较低pH值可增加花色苷的红、紫色调度,有助于稳定酒体陈酿中的颜色变化。金海炎等^[34]对猕猴桃汁单菌(*Hanseniaspora vineae*)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)、混菌发酵猕猴桃果酒的体外抗氧化能力进行探究,结果表明,自由基清除能力以及铁离子还原能力与样品用量呈正相关,混菌发酵的猕猴桃果酒抗氧化活性优于单菌发酵果酒。综上所述,桑椹果酒是以果代粮生产酒精的另一途径,可有效缓解现存的粮食危机。此外,酿酒酵母与非酿酒酵母混合发酵桑椹果酒,进一步丰富了酒体风味,降低酒精度。

2.2.2 桑椹果醋

醋酸发酵是在酶的作用下将乙醇氧化成醋酸的过程,以桑椹或桑椹产品加工下脚料为主要原料,采用全液态生物发酵技术,经酒精发酵、醋酸发酵酿制得到桑椹果醋饮品,其兼具桑椹和一般果醋的营养价值,有安神助眠、解酒毒、抗氧化等功效^[3]。醋酸发酵过程需要充足的氧气来保证醋酸菌的正常发酵,但一些多酚类物质如花色苷等,易受氧气的影响发生降解,马永昆等^[35]提出了一种富含花色苷的发酵型果醋制备方法,采用真空脱醇技术处理得到浓缩发酵液和酒精液,然后采用分次补加流加液和半连续发酵相结合的发 酵方式对蒸馏出的酒精液进行醋酸发酵得到醋酸液,最后将醋酸液与浓缩发酵液适当比例调配和超高压技术处理得到富含花色苷的发酵型桑椹果醋。发酵过程中的酶解工序增加了花色苷的溶出,脱醇技术和超高压技术有效避免了花色苷的氧化降解和热降解,更好地保留了桑椹果醋中的花色苷含量。目前,国内大多厂家选用的醋酸菌属于醋酸杆菌属,产酸量仅在40 g/L~70 g/L(以醋酸计),并且不耐酸,严重影响了果醋的质量和产量^[36]。马永昆等^[37]筛选到一株高产酸醋酸菌,该醋酸菌属于葡萄糖醋杆菌属,已保藏于中国典型培养物保藏中心(编号为CCTCCNO:M2017563)。将该

菌株作为发酵菌种,以食用酒精或果酒、粮食酒为主要原料,采用分段补料法启动发酵和半连续发酵相结合的发酵方式酿造得到高酸度醋,总酸含量可达到 90 g/L~120 g/L(以乙酸计),产酸速率最高达 8.19 g/(L·h),高于已报道的醋酸菌产酸速率[0.1 g/(L·h)~3.5 g/(L·h)]。高酸度果醋有利于花青素的保留,保鲜效果好,不易受杂菌污染,存储和运输成本较低、生产效率高。

2.2.3 桑椹酵素

乳酸菌是以碳水化合物为主要底物,通过代谢作用产生乳酸的一类革兰氏阳性菌的总称,具有调节人体肠道菌群、增加益生菌、保鲜防腐、提高抗氧化等作用。发酵桑椹后可赋予产品爽快、清香的口感,果香、奶油香突出。肖邦等^[38]研制了一种桑椹酵素的生产工艺,以桑椹原料、白糖、益生菌配合酿造桑椹酵素,增加了产品营养价值,工艺简单、普及程度较高。陈智慧等^[39]研究发现,乳酸菌单独发酵桑椹活菌数达到最高时,仍有 86.49%果糖和 66.12%葡萄糖未降解,对糖的利用率较慢,对功能性影响较小。与酵母菌、醋酸菌复配后,可以改变有机酸种类,有机酸与醇结合生成芳香性物质,丰富产品风味、提高产品抑菌性能和抗氧化能力等。马胜梅等^[36]将处理后的苹果汁与部分桑椹汁进行乳酸发酵,得到乳酸发酵液再与剩余桑椹汁混合进行酒精发酵和醋酸发酵,得到的桑椹果醋进行微波杀菌、热杀菌和超高压杀菌,发现超高压处理可以更好保留桑椹果醋的抗氧化能力,增加酯类、醛类化合物,突出果醋的果香味,同时酸类、醇类等物质显著降低,可以改善桑椹果醋的刺激味,整体风味更加协调。

从桑椹自然发酵液中分离酵母菌、乳酸菌等野生菌株,配合醋酸菌等菌株发酵得到桑椹酒、桑椹果醋、桑椹酵素等发酵产品,解决了桑椹原料不易储存运输的问题,增加了产品的营养价值和药用功效,提高了产品附加值。同时,发酵得到的产品进行超高压灭菌后,既能保留产品原有营养功效,还能延长食品货架期、增加产品的市场价值。

3 结语

桑椹产业现已蓬勃发展,亟需高新的生物技术提高产品附加值,确保产业的稳定、可持续性发展。目前桑椹市场上多以鲜果、果汁类饮料为主,生物发酵产品较少。产量居多的桑椹酒在风味品质方面相比高档红酒仍有较大的差距,而桑椹果醋、桑椹酵素等产品极少。因此,结合桑椹原料和微生物发酵的优势,还需在原料复配、菌株优选及工艺优化等方面展开深入研究,以期得到风味物质更丰富、营养功能的桑椹发酵产品。

参考文献:

- [1] WEN P, HU T G, LINHARDT R J, et al. Mulberry: A review of bioactive compounds and advanced processing technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83: 138–158.
- [2] 吴梦. 发酵型桑椹酒酚类物质、抗氧化能力及澄清效果的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
WU Meng. Study on phenolics, antioxidant capacity and clarification effect of fermented mulberry wine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [3] 马永昆, 许满青, 陈必祥, 等. 桑椹果醋营养功能功效解读[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2117–2124.
MA Yongkun, XU Manqing, CHEN Bixiang, et al. Interpretation of the nutritional function of mulberry vinegar[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(6): 2117–2124.
- [4] RODRIGUES E L, MARCELINO G, SILVA G T, et al. Nutraceutical and medicinal potential of the *Morus* species in metabolic dysfunctions[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(2): 301.
- [5] SÁNCHEZ-SALCEDO E M, SENDRA E, CARBONELL-BAR-RACHINA Á A, et al. Fatty acids composition of Spanish black (*Morus nigra* L.) and white (*Morus alba* L.) mulberries[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 566–571.
- [6] NAYAB S, RAZZAQ K, ULLAH S, et al. Genotypes and harvest maturity influence the nutritional fruit quality of mulberry[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 266: 109311.
- [7] GUNDOĞDU M, MURADOĞLU F, SENSOY R I G, et al. Determination of fruit chemical properties of *Morus nigra* L., *Morus alba* L. and *Morus rubra* L. by HPLC[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 132: 37–41.
- [8] 崔京燕, 杨静, 桑鑫燕, 等. 桑椹花青素的提取及其与总黄酮的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(15): 53–60.
CUI Jingyan, YANG Jing, SANG Xinyan, et al. Extraction of mulberry anthocyanins and comparative study of its anthocyanins and total flavonoids[J]. Food Research and Development, 2018, 39(15): 53–60.
- [9] YUAN Q X, ZHAO L Y. The mulberry (*Morus alba* L.) fruit—A review of characteristic components and health benefits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(48): 10383–10394.
- [10] LONG X S, LIAO S T, WEN P, et al. Superior hypoglycemic activity of mulberry lacking monosaccharides is accompanied by better activation of the PI3K/Akt and AMPK signaling pathways[J]. Food & Function, 2020, 11(5): 4249–4258.
- [11] XU L J, YU M H, HUANG C Y, et al. Isoprenylated flavonoids from *Morus nigra* and their PPAR γ agonistic activities[J]. Fitoterapia, 2018, 127: 109–114.
- [12] CHEN C, YOU L J, HUANG Q, et al. Modulation of gut microbiota by mulberry fruit polysaccharide treatment of obese diabetic db/db mice[J]. Food & Function, 2018, 9(7): 3732–3742.
- [13] 董强, 李阳, 国锦琳. 桑椹多糖研究进展[J]. 中药与临床, 2021, 12(4): 77–80.
DONG Qiang, LI Yang, GUO Jinlin. Research progress of mulberry polysaccharide[J]. Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica, 2021, 12(4): 77–80.
- [14] BHATTACHARJYA D, SADAT A, DAM P, et al. Current concepts and prospects of mulberry fruits for nutraceutical and medicinal benefits[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 40: 121–135.
- [15] KHALIFA I, ZHU W, LI K K, et al. Polyphenols of mulberry fruits as multifaceted compounds: Compositions, metabolism, health benefits, and stability—A structural review[J]. Journal of Functional

- Foods, 2018, 40: 28–43.
- [16] GRASEMANN H, HOLGUIN F. Oxidative stress and obesity-related asthma[J]. Paediatric Respiratory Reviews, 2021, 37: 18–21.
- [17] 云博, 吴景东. 氧化应激与相关疾病及其作用机制[J]. 沈阳医学院学报, 2018, 20(3): 272–276.
- YUN Bo, WU Jingdong. Oxidative stress and related diseases and their mechanisms[J]. Journal of Shenyang Medical College, 2018, 20(3): 272–276.
- [18] XU X, HUANG Y Y, XU J W, et al. Anti-neuroinflammatory and antioxidant phenols from mulberry fruit (*Morus alba* L.)[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 68: 103914.
- [19] 韦丽文. 不同成熟度桑椹多酚绿原酸含量测定及抗氧化活性研究[J]. 中国现代中药, 2019, 21(7): 946–950.
- WEI Liwen. Content determination of chlorogenic acid in different maturity mulberry and antioxidant research[J]. Modern Chinese Medicine, 2019, 21(7): 946–950.
- [20] 高伟, 易静. 活性氧在T淋巴细胞中的作用[J]. 中国细胞生物学学报, 2018, 40(10): 1787–1792.
- GAO Wei, YI Jing. Role of reactive oxygen species in T lymphocytes[J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2018, 40(10): 1787–1792.
- [21] 王成, 施雪莹, 肖华, 等. 酿酒酵母发酵过程中褪黑素及其同分异构体变化规律的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(8): 77–82.
- WANG Cheng, SHI Xueying, XIAO Hua, et al. Variations in the content of melatonin and its isomer during ethanol fermentation by different *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(8): 77–82.
- [22] 左珊珊, 李阳, 马露, 等. β -胡萝卜素的生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7694–7699.
- ZUO Shanshan, LI Yang, MA Lu, et al. Research progress on bioactivity of β -carotene[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(21): 7694–7699.
- [23] SMERIGLIO A, BARRECA D, BELLOCCO E, et al. Chemistry, pharmacology and health benefits of anthocyanins[J]. Phytotherapy Research, 2016, 30(8): 1265–1286.
- [24] OUYANG X Y, ZHU B Q, LIU R J, et al. Comparison of volatile composition and color attributes of mulberry wine fermented by different commercial yeasts[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): e13432.
- [25] 于怀龙. 桑椹品种筛选及其发酵果醋关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- YU Huailong. Research on screening for mulberry varieties and key technology in mulberry vinegar processing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [26] 郭伟峰, 王红梅, 邹晓桐, 等. 桑葚酵素饮料的发酵工艺研究及其质量评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 88–93.
- GUO Weifeng, WANG Hongmei, ZOU Xiaotong, et al. Research on fermentation process of mulberry ferment beverage and its quality evaluation[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 88–93.
- [27] 陈智慧, 邹宇晓, 刘凡, 等. 基于微生物转化技术的桑椹食品加工研究进展[J]. 蚕业科学, 2016, 42(2): 336–340.
- CHEN Zhihui, ZOU Yuxiao, LIU Fan, et al. Advancement in mulberry fruit food processing based on microbial transformation technology[J]. Science of Sericulture, 2016, 42(2): 336–340.
- [28] 王婷, 毛亮, 雷静, 等. 优质桑葚酒酿造工艺的研究[J]. 酿酒科技, 2015(1): 86–88, 92.
- WANG Ting, MAO Liang, LEI Jing, et al. The producing techniques of quality mulberry wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2015(1): 86–88, 92.
- [29] 刘功良, 余洁瑜, 姜弘佳, 等. 桑葚果酒的发酵工艺研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 59–63.
- LIU Gongliang, YU Jieyu, JIANG Hongjia, et al. Fermentation process of mulberry fruit wine[J]. China Brewing, 2017, 36(11): 59–63.
- [30] 梁贵秋, 吴婧婧, 祁广军, 等. 桑椹酒的营养价值及保健作用[J]. 现代食品科技, 2011, 27(4): 457–460.
- LIANG Guiqiu, WU Jingjing, QI Guangjun, et al. Nutritional value and health function of mulberry wine[J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(4): 457–460.
- [31] 张志兰, 韩红发, 王宏恩, 等. 降低桑椹发酵酒中挥发酸含量的工艺方法研究[J]. 中国蚕业, 2021, 42(4): 15–18.
- ZHANG Zhilan, HAN Hongfa, WANG Hongen, et al. Research on the technological method for reducing volatile acid content in mulberry fermented wine [J]. China Sericulture, 2021, 42(4): 15–18.
- [32] CAMPO E, FERREIRA V, ESCUDERO A, et al. Quantitative gas chromatography-olfactometry and chemical quantitative study of the aroma of four Madeira wines[J]. Analytica Chimica Acta, 2006, 563(1/2): 180–187.
- [33] JOHNSON E A. Biotechnology of non-*Saccharomyces* yeasts—the ascomycetes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(2): 503–517.
- [34] 金海炎, 王丰园, 鲁云凤, 等. 混菌发酵猕猴桃果酒工艺条件优化及抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 177–185.
- JIN Haiyan, WANG Fengyuan, LU Yunfeng, et al. Optimization of fermentation conditions for mixed bacteria of kiwifruit wine and its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 177–185.
- [35] 马永昆, 肖露露, 马胜梅, 等. 一种富含花色苷的发酵型果醋的制备方法: CN108384701B[P]. 2021–10–08.
- MA Yongkun, XIAO Lulu, MA Shengmei, et al. Method for preparing fermented fruit vinegar rich in anthocyanin: CN108384701B[P]. 2021–10–08.
- [36] 马胜梅. 益生菌混菌发酵高酸度桑椹果醋的工艺研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- MA Shengmei. Study on the process of fermentation of high acidity mulberry vinegar by probiotics mixed bacteria[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [37] 马永昆, 肖露露, 马胜梅, 等. 一株高产醋酸菌及其在酿造高酸度醋中的应用: CN108384737B[P]. 2019–12–31.
- MA Yongkun, XIAO Lulu, MA Shengmei, et al. A ceticbacterium for highly yielding acid and application of acetic bacterium to brewing of high-acidity vinegar: CN108384737B[P]. 2019–12–31.
- [38] 肖邦军. 一种桑椹酵素及生产工艺: CN114403433A[P]. 2022–04–29.
- XIAO Bangjun. A mulberry enzyme and its production process: CN114403433A[P]. 2022–04–29.
- [39] 陈智慧. 益生菌生物转化制备低糖型桑椹精粉的加工技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- CHEN Zhihui. Study on preparation of low-sugar mulberry flour based on probiotics biotransformation technologies[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2022-09-26