

蓝靛果活性成分及应用的研究进展

谭卓然, 覃崇源, 张靖楠, 潘于乔, 蔺吉祥, 王竞红*
(东北林业大学园林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 蓝靛果 (*Lonicera caerulea* L.) 是一种营养物质丰富的寒地特色小浆果, 广泛应用于食品及健康医疗领域。但一直以来, 人们对蓝靛果的认知还很有限, 缺乏对其营养特征与应用的深入了解。基于此, 该文从蓝靛果活性成分、健康与食品应用等方面对国内外现有研究进行了归纳与总结。从现有研究来看, 蓝靛果富含花色苷、黄酮类化合物、酚酸、有机酸、萜类化合物、氨基酸、维生素、矿物质等活性成分, 具有抗氧化、降血脂、抗菌抗炎、抗癌、防辐射、护甲状腺等健康特性, 并发现矢车菊素-3-O-葡萄糖苷是其中主要的活性成分。此外, 该文对蓝靛果在果汁、果酒、冻干粉、酸奶等食品领域的应用也进行了归纳与总结, 最后提出了研究展望, 重视市场应用的需要, 在培育、种植、加工、生理研究等方面提出建议, 旨在为蓝靛果功能机理研究、食品及功能性产品开发等提供一定的科学依据。

关键词: 蓝靛果; 成分; 食品; 健康; 药用; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2024)07-324-333

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.7.0802

Research Progress on the Active Ingredients in and Applications of *Lonicera caerulea* L.

TAN Zhuoran, QIN Chongyuan, ZHANG Jingnan, PAN Yuqiao, LIN Jixiang, WANG Jinghong*
(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: *Lonicera caerulea* L. is a nutrient-rich small berry that characteristically inhabits cold regions and is widely used in the food and health fields. However, the understanding of *L. caerulea* L. is limited, particularly concerning its nutritional characteristics and applications. This article summarizes existing research at home and abroad on the active ingredients as well as the health and food applications of *L. caerulea* L. The fruit is rich in active ingredients, specifically anthocyanins, flavonoids, phenolic acids, organic acids, terpenoids, amino acids, vitamins, and mineral elements and has health properties such as antioxidant, lipid-lowering, antibacterial, anti-inflammatory, anti-cancer, anti-radiation, and thyroid protective activities. Furthermore, cyanidin-3-O-glucoside is the main active ingredient of the plant. The applications of *L. caerulea* L. in fruit juice, fruit wine, freeze-dried powder, yogurt, and other food are also summarized. Finally, the need for further studies is discussed. Suggestions are made for cultivation, planting, processing, physiological research, and other aspects, considering the needs of the market and application potential. The goal of this article is to provide a scientific basis for research on the functional mechanisms of *L. caerulea* L. and development of its food and functional products.

Key words: *Lonicera caerulea* L.; composition; food; health; medicinal use; research progress

引文格式:

谭卓然,覃崇源,张靖楠,等. 蓝靛果活性成分及应用的研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 324-333.

TAN Zhuoran, QIN Chongyuan, ZHANG Jingnan, et al. Research progress on the active ingredients in and applications of *Lonicera caerulea* L. [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 324-333.

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项 (2019FY10050604); 国家自然科学基金项目 (32072666); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2020C046)

作者简介: 谭卓然 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物生理代谢, E-mail: tanzhuoran@nefu.edu.cn

通讯作者: 王竞红 (1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 园林植物应用, E-mail: yuanlin@nefu.edu.cn

蓝靛果 (*Lonicera caerulea* L.) 为忍冬科、忍冬属的落叶灌木，俗称蓝靛果忍冬、黑瞎子果、羊奶子、山茄子等。国外多产于俄罗斯远东地区、朝鲜、日本等地，在我国主要分布于黑龙江、吉林等东北地区，河北、山西、宁夏、甘肃南部、青海、四川北部及云南西北部也有分布^[1]。蓝靛果常生于落叶林下或林缘荫处灌丛中，株丛高 0.5~2 m，复果蓝黑色，稍被白粉，花期 5~6 月，果期 6~7 月，耐寒性极强，休眠状态下能耐受 -50 °C 的低温，花能忍受 -8 °C 左右的低温，休眠期短，在温暖地区一般不能栽植，否则常因在冬季提前解除休眠而遭受冻害，受病虫害、土壤 pH 值变化的影响较小，易于栽培管理^[2]。蓝靛果是一种具有广阔前景的“第三代新兴小浆果”，在中国东北民间食用广泛，素有“花青素之王”的美誉，日本称其为“长生不老果”，欧盟委员会也于 2018 年 12 月发布条例批准蓝靛果作为新型浆果投放市场。

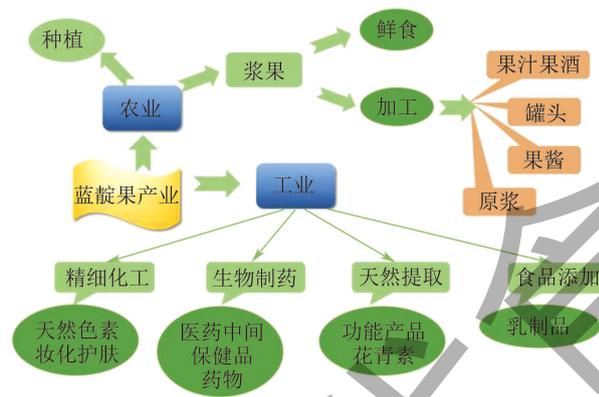


图 1 蓝靛果产业结构

Fig.1 Industrial structure of *Lonicera caerulea* L.

蓝靛果富含多酚、氨基酸、萜类、有机酸、维生素等活性成分，国内外对其医疗保健功能的研究逐渐深入，现已发现蓝靛果对多种疾病具有良好的调节作用，如蓝靛果多酚提取物具有良好的自由基清除能力^[3-7]，花色苷提取物可抑制 α -淀粉酶的活性从而改善高血糖和糖尿病^[8,9]，多酚提取物通过降低甘油三酯以及胆固醇等降低血脂^[10]。在癌症治疗方面，花色苷提取物可通过阻断细胞在 G2/M 时期的周期，诱发 DNA 损伤并最终导致细胞凋亡，且抑制肿瘤生长的同时还可调节免疫细胞因子水平，包括白细胞介素 (Interleukin, IL) -2、升高干扰素 (Interferon, IFN) - γ 和肿瘤坏死因子 (Tumor Necrosis Factor, TNF) - α ^[11,12]等。此外，蓝靛果作为酸甜可口的小浆果，在食品领域广泛应用于制作果

汁、果酱、罐头、酸奶、果酒等。

由于蓝靛果药食俱佳的特性，其应用前景广阔，是寒冷地区极具市场潜力的优良浆果 (图 1)。本文归纳总结了国内外蓝靛果花青素、类黄酮、酚酸、萜类、有机酸等活性成分，抗氧化、抗糖脂、抗癌、抗炎、抗菌、护肝肺等健康应用，果汁、果酒、冻干粉等食品应用的研究进展，旨在为蓝靛果的深入研究、产品开发及市场推广提供参考。

1 蓝靛果活性成分研究进展

1.1 花青素与花色苷

花青素又称花色素，属于黄酮类化合物，是自然界广泛存在于植物中的一类水溶性天然色素。花青素是花色苷水解而得到的有色苷元，在自然状态下极少游离，通常以糖苷形式存在，具有极强的抗氧化性^[13]。目前已知花青素有 22 类，食物中主要存在 6 类，分别为矢车菊素、牵牛花素、天竺葵素、飞燕草素、芍药素、锦葵素^[14]。蓝靛果中已发现的花青素种类主要有矢车菊素、芍药素、飞燕草素、天竺葵素，其中最重要的为矢车菊素，约占花青素总量的 79%~92%^[15]。

花色苷是花青素与糖以糖苷键结合而成的一类化合物，广泛存在于植物的花、果实、茎、叶和根的细胞液中。蓝靛果中已发现 24 种花色苷，其中包括矢车菊素花色苷 10 种、天竺葵素花色苷 3 种、芍药素花色苷 4 种、飞燕草素花色苷 4 种、锦葵素花色苷 1 种、吡喃花色苷 2 种^[16]。矢车菊素 -3-O-葡萄糖苷是蓝靛果果实中主要存在的花色苷，约占其总花色苷含量的 79%~92%，占总多酚的 60% 以上^[15]，其次是矢车菊素 -3-O-芸香糖苷 (1%~9%)，矢车菊素 -3,5-O-双葡萄糖苷 (2%~6%)，芍药素 -3-O-葡萄糖苷 (1%~5%)，其余花色苷的含量较低^[17]，此外还发现了蓝莓中都未见报道的二糖花色苷，矢车菊素 -3,5-O-二己糖苷和芍药素 -3,5-O-二己糖苷^[18]。Fan 等^[19]从中国东北地区采集 61 种不同基因型的蓝靛果，并对其果实花青素进行了定性与定量分析，发现花色苷总含量为 1.58~17.51 mg/g 不等，不同基因型间差距较大，羟基自由基清除率和超氧阴离子清除率分别为 13.3%~99.9% 和 21.5%~82.8%。蓝靛果叶片同样富含花色苷，对‘蓝精灵’品种叶片和果实进行鉴定，发现叶片中含有 6 种花色苷，与果实共有的花色苷包含飞燕草素 -3-芸香糖苷、

矢车菊素-3,5-双葡萄糖苷、矢车菊素-3-芸香糖苷、矢车菊素-3-葡萄糖苷, 叶片特有的花色苷包含飞燕草素-3-桑布糖苷、飞燕草素-3-对香豆酰葡萄糖苷^[20]。

1.2 黄酮类化合物

黄酮类化合物泛指两个苯环通过三个碳原子相互连接而成的一系列化合物, 即具有 $C_6-C_3-C_6$ 结构的一类化合物的总称, 大部分与糖结合成苷类或碳糖基, 很少以游离形式存在。黄酮类化合物具有良好的抗自由基和抗氧化作用, 是一类重要的植物次生代谢产物。蓝靛果中的黄酮类化合物已发现黄酮醇类 27 种, 主要为槲皮素、山奈酚; 黄烷醇类 6 种, 主要为儿茶素; 黄酮类 16 种, 主要为木犀草素; 二氢黄酮醇类 2 种, 主要为二氢槲皮素; 异黄酮 1 种; 二氢查耳酮类 1 种^[16]。芦丁与总黄酮的结构相似, 因此是黄酮类化合物的标志物, 国外研究人员对 8 个品种的蓝靛果果实进行成分鉴定, 发现其含量为 255.78~779.31 $\mu\text{g/g}$, 量化的黄酮衍生物是槲皮素、异槲皮素异鼠李素、木犀草素-7-葡萄糖苷和芹菜素等, 品种之间存在显著的定量差异^[21]。Mateja 等^[22]对 ‘Aurora’、‘Honey Bee’、‘Tundra’、‘Borealis’ 四个品种进行成分定量分析, 发现黄酮类化合物中槲皮素和山奈酚占比最大, 分别为 0.185~0.461、0.005~0.009 mg/g 。蓝靛果叶片同样是黄酮类化合物的良好来源, 黄宁等^[23]采用高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 方法对 20 个品种的蓝靛果叶片的黄酮类化合物种类及含量进行鉴定, 共鉴定出 11 种黄酮类化合物, 分别为槲皮素 3-O-桑布双糖苷、香叶木素 3-O-葡萄糖苷、山奈酚 3-O-桑布双糖苷、香叶木素-3-O-芸香糖苷、槲皮素 3-O-芸香糖苷、芹黄素 7-O-芸香糖苷、山奈酚 3-O-芸香糖苷、槲皮素 3-O-鼠李糖苷、山奈酚 7-O-芸香糖苷、异鼠李素 7-O-芸香糖苷、山奈酚 3-O-新橙皮糖。

1.3 酚酸与有机酸

酚酸是一类含有酚环的有机酸, 如咖啡酸、绿原酸、五倍子酸、没食子酸等, 具有良好的抗菌抗炎性。蓝靛果中已发现 25 种, 主要包含绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、二咖啡酰奎宁酸、咖啡酸、没食子酸、香草酸等^[6]。Lina 等^[21]对来自加拿大、波兰、俄罗斯等地的 8 个蓝靛果品种进行研究发现, 3,5-二咖啡酰奎宁酸在酚酸中占主导地位,

为 462.78~1 975.90 $\mu\text{g/g}$, 只有 ‘Tundra’ 以绿原酸为主, 约为 676.87 $\mu\text{g/g}$ 。另有研究采用超高效液相色谱结合电喷雾质谱在正负离子模式下鉴定化合物, 并通过高效液相色谱-二极管阵列 (High Performance Liquid Chromatography-Photo-diode Array, HPLC-PDA) 进行定量, 鉴定出 7 种酚酸, 包括 3 种咖啡酰奎宁酸, 3 种二咖啡酰奎宁酸, 1 种咖啡酰葡萄糖, 测定的酚酸总含量为 0.27~1.16 mg/g ^[17]。

有机酸是指一些具有酸性的有机化合物, 具有羧基化合物的统称, 广泛分布于在植物的叶、根, 特别是果实中, 具有良好的抗菌特性。蓝靛果中已发现 8 种有机酸, 分别为柠檬酸、奎宁酸、莽草酸、苹果酸、酒石酸、富马酸、草酸、植酸^[16]。通过对 11 种蓝靛果中的有机酸进行定量分析发现柠檬酸占主导地位, 总含量为 5.43~9.80 mg/g , 平均 7.69 mg/g , 同时确定了含量较低的苹果酸和奎宁酸的平均量, 分别为 2.90 mg/g 和 0.45 mg/g ^[24]。

1.4 萜类化合物

萜类化合物是由甲戊二羟酸衍生、且分子骨架以异戊二烯单元 (C_5 单元) 为基本结构单元的化合物及其衍生物, 具有抗糖化、抗炎等功能。蓝靛果中已发现的萜类化合物, 单萜类 11 种, 包含桉油精等, 四环三萜类 8 种, 包含菜油甾醇等, 五环三萜类 6 种, 包含 α -和 β -香树脂醇等, 环烯醚萜类 20 种, 包含马钱苷酸、马钱子苷、断马钱子酸等^[16]。蓝靛果中主要的萜类成分为单萜类、环烯醚萜类, Magdalena 等^[25]采用顶空固相微萃取法, 结合二维气相色谱和飞行时间质谱分析不同品种蓝靛果萜类化合物概况, 发现其中桉油精是最丰富的萜类化合物, 含量为 12.4~418.2 $\mu\text{g/L}$ 。Alicja 等^[17]在波兰植物园及园艺农场等地采集 30 个品种和基因型的蓝靛果, 对其环烯醚萜类化合物进行定性及定量检测, 总含量范围为 1.20 mg/g (Fresh Weight, FW) ~2.76 mg/g fw , 平均总含量为 1.81 mg/g fw , 其中四种环烯醚萜在所有品种和基因型中均存在, 分别为马钱苷酸 (Loganic Acid, LA)、7-表马钱苷酸 7-O-戊糖苷 (7-Epi-Loganic Acid 7-O-Pentoside, 7-epi-LAp)、马钱苷 (Loganin, Lo) 和獐牙菜苷 (Sweroside, S), 含量为 $LA > Lo + S > 7\text{-epi-LAp}$, LA 占环烯醚萜总含量的 22%~73%, 平均 0.811 mg/g fw 。

1.5 其他

蓝靛果含有丰富的营养成分, 包括糖类、氨

基酸、维生素、矿物质等。蓝靛果总糖含量为 18.27~25.85 mg/g 不等, 主要成分及含量为果糖 10.48~13.64 mg/g FW、葡萄糖 7.51~11.29 mg/g FW 和蔗糖 0.09~1.00 $\mu\text{g/g}$ ^[2,22]。蓝靛果多糖为酸性杂多糖, 具有较强的抗氧化活性及降血糖降血脂的作用, 单糖组成及物质的量比为半乳糖醛酸:鼠李糖:阿拉伯糖:甘露糖:葡萄糖:半乳糖=2.84:10.02:15.47:1.00:2.48:36.12^[26,27], 通过微波辅助的方法采用蓝靛果多糖可合成硒化多糖, 原多糖的主链结构在硒化后没有改变, 测定其 ABTS⁺ 自由基清除活性、脂质过氧化活性以及对 DNA 损伤的保护作用, 发现硒化多糖具有更好的抗氧化活性^[28]。蓝靛果中已发现 16 种氨基酸, 包含成人必需的 8 种氨基酸和儿童所必需的组氨酸, 氨基酸含量远多于蓝莓, 总量约为 9.85 mg/g^[29,30], 其中谷氨酸含量最高 1.612 mg/g。蓝靛果富含维生素 C、维生素 B1、维生素 B2、维生素 E、维生素 PP 等, 维生素 C 的含量高达 1.87 mg/g, 显著高于橙子、草莓和树莓等^[15]。此外, 蓝靛果中矿物质元素丰富, 主要包含钙、镁、钠、钾、锌等, 其中钙含量最高, 约为 1.030 mg/g, 其次为镁 1.020 mg/g、钠 0.863 mg/g^[31](图 2)。

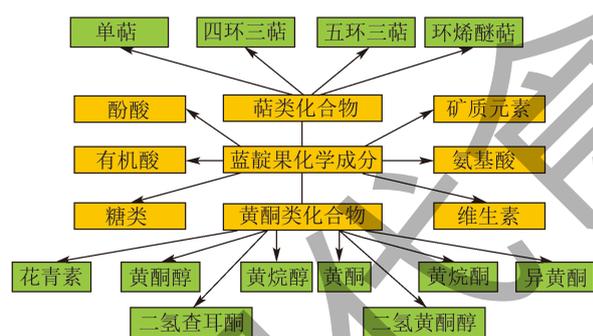


图 2 蓝靛果化学成分概况

Fig.2 Chemical composition profile of *Lonicera caerulea* L.

2 蓝靛果健康应用研究进展

2.1 抗氧化性

氧化应激是诱导细胞凋亡、组织损伤和身体病变的主要原因, 蓝靛果中富含花青素、黄酮等抗氧化剂, 可有效清除体内除活性氧自由基。刘英等^[3]研究发现, 蓝靛果花色苷在 0.02~0.1 mg/mL 浓度内, 自由基清除率和浓度呈现良好的量效关系, 对 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除能力增强, 最大清除率分别为 84.79% 和 71.79%。另有研究表明蓝靛果花色苷对超氧阴离子自由基有较高的清除能力, 清除率达 44.73%, 同时有较高的总还原

能力^[4]。饲喂果蝇蓝靛果原浆可显著提高其体内抗氧化指标, 降低丙二醛 (Malonaldehyde, MDA) 含量, 从而延缓果蝇的衰老^[5]。在小鼠饮食中添加蓝靛果多酚提取物, 通过调节抗氧化性和炎症蛋白, B 淋巴细胞瘤 -2 基因 (B-Cell Lymphoma-2, Bcl-2) /Bcl-2 相关 X 蛋白 (Bcl-2 Associated X Protein, BAX)、蛋白激酶 C (Protein Kinase C, PKC) α 、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸氧化酶 2/4 (NADPH-Oxidase 2/4, Nox2/Nox4) 通路蛋白的表达, 激活骨骼肌线粒体中磷酸腺苷激活的蛋白激酶 (AMP-activated Protein Kinase, AMPK)、(Peroxisome Proliferators-Activated Receptor γ Coactivator Alpha, PGC1 α)、核呼吸因子 (Nuclear Respiratory Factor 1, NRF1)、线粒体转录因子 A (Transcription Factor A, Mitochondrial, TFAM) 的表达, 来减少氧化应激、炎症和骨骼肌细胞的凋亡来缓解小鼠的运动疲劳^[6]。另有研究表明, 蓝靛果多酚对氨基甲酸甲酯引起的氧化损伤具有保护作用, 通过抑制活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 和超氧阴离子的积累, 减少谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 的消耗, 对氨基甲酸乙酯 (Ethyl Carbamate, EC) 诱导的 Caco-2 人结肠腺癌细胞有明显的保护作用^[7]。此外, Ezgi 等^[32]研究发现蓝靛果多酚的抗氧化功能可降低血浆低密度脂蛋白和总胆固醇水平, 提高血管一氧化氮合酶 (Nitric Oxide Synthase, NOS) 活性, 在心血管疾病方面具有治疗潜力。综合上述研究结果, 可以看出蓝靛果抗氧化成分主要为多酚类化合物, 其中花色苷作用尤为显著。

2.2 降糖脂作用

高糖高脂会增加动脉硬化、动脉狭窄等心血管并发症的风险, 对肝肾、神经系统等也有一定的损害, 蓝靛果具有良好的降糖降脂作用。蓝靛果提取物通过调节脂质代谢相关的 mRNA 表达, 抑制脂肪生成和肝脏葡萄糖产生, 达到抗肥胖和抗糖尿病的效果^[8]。Liu 等^[9]研究发现, 蓝靛果中矢车菊素 -3-葡萄糖苷、儿茶素、绿原酸的结合破坏了 α -淀粉酶的结构, 多酚-酶复合物的形成抑制了酶的活性, 表明蓝靛果多酚能有效降低餐后高血糖和 II 型糖尿病。除多酚、花青素以外, 蓝靛果中的一种酸性杂多糖 (Heteropolysaccharide, HEP) -2 对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶起抑制作用, 延缓淀粉分解为葡萄糖的速度, 抑制常数 (Inhibition Constant, Ki) 值分别为 0.77 mg/mL 和 0.84 mg/mL^[33]。

血脂水平不正常被认为是心脑血管疾病和高胆固醇症的风险因素, 多项研究表明, 蓝靛果提取物对降脂及心血管保护有良好的效果。Kim 等^[10]通过喂养高脂肪饮食小鼠蓝靛果提取物, 发现蓝靛果可能通过降低甘油三酯吸收和调节肠道微生物治疗代谢性疾病。另有研究表明, 蓝靛果多酚喂养的高脂肪饮食雄性大鼠, 血清甘油三酯 (Triglyceride, TG)、总胆固醇 (Total Cholesterol, TC) 和低密度脂蛋白 (Low Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C) 的水平明显下降, 粪便中的固醇含量增加, 同时恢复了小肠微生物群的平衡, 增加了脂肪吸收的特定细菌, 如乳酸菌的丰度, 有利于抑制脂肪的吸收^[34]。Liu 等^[35]将氧化低密度脂蛋白 (Oxidized Low Density Lipoprotein, Ox-LDL) 诱导的 RAW264.7 巨噬细胞在 80 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的蓝靛果提取物 (绿原酸、儿茶素、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷) 中培养 24 h, 发现可明显抑制巨噬细胞的脂质积累, 且实验激活了沉默调节蛋白 (Sirtuin 1, SIRT1) 从而增加 ATP 结合盒转运蛋白 A1 (ATP-Binding Cassette Transporter A1, ABCA1) 的表达, 细胞内胆固醇水平降低, 绿原酸的效果最佳。目前市面上的降糖脂药物大多具有副作用, 加快把蓝靛果这类浆果制成药物或补充饮食产品具有十分重要的意义。

2.3 护肝肺作用

蓝靛果在酒精性肝病、脂肪性肝病、肺损伤等肝肺疾病上有着良好的治疗效果。肝脏炎症和脂质的过度积累在酒精性肝病的发病机制中起着关键作用, 蓝靛果中提取纯化的花青素可明显增强 AMPK 的磷酸化, 抑制胆固醇调节元件结合蛋白 (Sterol-Regulatory Element Binding Protein-1, SREBP1) 的表达, 降低 F4/80 成熟巨噬细胞标志物水平和抑制胱氨酸蛋白酶-1 (Cysteiny Aspartate Specific Proteinase-1, Caspase-1) 来抑制炎症体的激活, 从而阻止激活的巨噬细胞产生促炎症细胞因子, 表明蓝靛果提取物具有抑制脂质积累和抑制炎症反应的能力^[36]。非酒精性脂肪性肝病是慢性肝病的主要原因, 通过检测喂养蓝靛果提取物的高脂肪饮食小鼠的血清脂质、胰岛素、肝脏蛋白, 对比发现蓝靛果提取物可抑制高脂肪引起的肥胖和肝脏脂肪沉积, 同时蓝靛果提取物通过增加胰岛素敏感性改善葡萄糖代谢, 并通过上调核因子 E2 相关因子 (Nuclear Factor (Erythroid-Derived 2)-like 2, Nrf2) 介导的途径减轻氧化压力^[37]。

亚硝胺是最重要的化学致癌物之一, 在香烟、啤酒、熏腊食品中广泛存在, 采用富含花青素、黄酮的蓝靛果提取物预处理人类正常肺上皮细胞 (Human Normal Lung Epithelial Cells, BEAS-2B) 细胞, 可明显减少烟草中 4-[(Acetoxymethyl) Nitrosamino]-1-(3-Pyridyl)-1-Butanone, NNKOAc) 诱导的 DNA 损伤、DNA 断裂和细胞内活性氧, 表明蓝靛果可有效降低亚硝胺诱导的人类正常肺上皮细胞的 DNA 损伤^[38]。Zhao 等^[39]给肺纤维化小鼠喂蓝靛果提取物, 发现小鼠肺部 T 辅助免疫反应改变, IL-4 和诱导型一氧化氮合酶 (Inducible Nitric Oxide Synthase, iNOS) 的表达水平降低, Nrf2 和血红素加氧酶 (Heme Oxygenase 1, HO-1) 的表达增强, 丝裂原活化蛋白激酶 (Mitogen-Activate Protein Kinase, MAPK) 的磷酸化被阻止。由此可得, 蓝靛果可通过抑制脂质积累、抑制炎症反应以及减轻氧化压力等对肝肺起到保护作用, 这可能是由于蓝靛果的花色苷等活性成分起到了抗氧化性。

2.4 抗炎与抗菌性

蓝靛果富含酚类、花青素、有机酸等活性成分, 具有较强的抗菌抗炎功能。在脂多糖 (Lipopolysaccharide, LPS) 诱导小鼠爪子水肿和巨噬细胞炎症实验中, 蓝靛果多酚提取物显著减轻了 LPS 诱导的爪子水肿, 降低了血清中单核细胞趋化蛋白-1、白细胞介素、巨噬细胞炎症蛋白等, 此外, 蓝靛果多酚提取物抑制了转化生长因子 β 激活激酶-1 (Transforming Growth Factor Beta Activated Kinase-1, TAK1) 介导的 MAPK 和核转录因子 κ B (Nuclear Factor-Kappa B, NF- κ B) 途径, 并增强了锰依赖性超氧化物歧化酶 (Manganese-Dependent Superoxide Dismutase, MnSOD) 等在早期反应的表达, 表明蓝靛果多酚提取物可能通过调节炎症和抗氧化介质来抑制 LPS 引起的炎症^[40]。李旭等^[41]研究发现蓝靛果花色苷提取物对 LPS 诱导的小鼠单核巨噬细胞 (RAW264.7) 释放炎症因子一氧化氮 (Nitric Oxide, NO) 和前列腺素 E_2 (Prostaglandin E_2 , PGE $_2$) 有明显的抑制作用。

国外研究人员在蓝靛果提取物中检测到有机酸为柠檬酸占主导地位, 通过蓝靛果乙醇和水提取物试验发现有机酸抑制革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌效果最佳^[24]。Masaaki 等^[42]在对小鼠化脓性链球菌感染的研究中发现, 蓝靛果提取物刺激小鼠淋巴结细胞中多能造血干细胞的分化, 对 TNF- 等炎症细

胞因子的过量起抑制作用,且激活了小鼠淋巴结细胞的增殖反应,从而对细菌感染有治疗作用。除多酚类成分,有机酸在抗炎抗菌上一直有着良好的作用,未来可进一步研究蓝靛果中酸性成分的功效。

2.5 抗癌性

近年来,研究发现蓝靛果中的活性物质有一定的抗癌性。Wu等^[43]研究发现蓝靛果中矢车菊素-3-O-葡萄糖苷对肺大细胞癌(Anti-Lung Large-Cell Carcinoma, LCC)有明显的抑制作用,表现为肿瘤生长受阻、肿瘤凋亡增加、炎症相关因子水平下降,与氟尿嘧啶(5-Fluorouracil, 5-FU)联合使用表现出更明显的抑制作用。Zhou等^[11]将蓝靛果中的花青素提取纯化,评估其在体内及体外对肝癌细胞的作用,在体外,不仅显著抑制了人类肝癌细胞的生长,还明显阻断细胞在G2/M时期的周期,诱发DNA损伤并最终导致细胞凋亡,在体内,可杀死小鼠肝癌细胞,抑制肿瘤生长,并改善小鼠的生存状况,蓝靛果花青素提取物也同时调节了免疫细胞因子水平,包括IL-2、IFN- γ 和TNF- α ,这可能是抑制肿瘤生长的原因之一。周丽萍^[12]实验同样发现蓝靛果花青素提取物可明显改善H22肝癌荷瘤小鼠的生存免疫机能,小鼠体内抗氧化能力得到提升,谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase, GSH-Px)、SOD活性提高,脂质过氧化水平降低,且通过调节免疫细胞因子IL-2、IFN- γ 和TNF- α 水平,尤其是肝脏中IL-2和TNF- α 的水平,使得免疫活性提高,直接杀伤肿瘤细胞。由此可见,蓝靛果可通过诱导细胞周期阻滞、抑制肿瘤生长、诱发细胞凋亡,从而产生抗癌的作用。

2.6 其它

除上述健康特性外,蓝靛果还具有诸多有益功能如抗肥胖、抗辐射、护甲状腺等。随着生活质量的不断提高,肥胖症患者人群逐渐增多,蓝靛果被认为是治疗或逆转肥胖症的有效物质来源,Chun等^[44]喂养高脂肪饮食小鼠蓝靛果提取物12周,剂量为100、200和400 mg/kg,结果发现小鼠体质量增加减少,线粒体解耦联蛋白2(Mitochondrial Uncoupling Protein 2, UCP2)和脂肪素的表达增加,导致AMPK的激活,SREBP1、瘦素、CCAAT增强子结合蛋白(CCAAT-Enhancer-Binding Protein, C/EBP) α 和C/EBP β 的表达受抑制,有效剂量为200 mg/kg。Lee等^[45]实验证明蓝靛果可以增加肌肉

质量和力量,降低肌肉萎缩标志物的mRNA表达,可有效防止与肥胖有关的肌肉疏松症。蓝靛果富含花青素等抗氧化成分,因此对辐射具有显著的防护作用,通过改善辐射造成的氧化损伤,抑制活性氧自由基产生,调节细胞氧化还原、凋亡信号转导,抑制线粒体凋亡信号途径^[46]。Zhao等^[47]给⁶⁰Co γ 射线处理过的小鼠每天饲喂50~200 mg/kg蓝靛果花青素提取物,喂养14 d后实验发现小鼠体内抗氧化酶、SOD、GSH-Px和GSH水平增加,肝脏氧化性损伤和MDA水平降低,具有剂量依赖性。蓝靛果对甲状腺的保护作用已通过实验得到证实,在治疗甲状腺功能亢进症的研究中发现,大鼠口服蓝靛果剂量依赖性的改善了甲亢,减少了甲状腺激素,增加了促甲状腺激素,是一种良好的甲亢补充和替代药物来源^[48]。此外,Glyn等^[49]研究发现蓝靛果有助于改善运动员耐力跑的表现。Lynne等^[50]研究发现急性补充蓝靛果提取物后可改善老年人的外显记忆和血压。

通过上述研究不难看出,国内外对蓝靛果成分健康应用研究较为深入,但仅对花青素单独提取功效研究较多,其余多针对蓝靛果成分混合提取物的功效,后续可围绕分离不同成分开展健康研究。

3 蓝靛果食品应用研究进展

3.1 蓝靛果果汁

蓝靛果出汁率高且营养丰富,果汁类产品开发较为广泛,但部分品种口感酸涩或含有苦味物质,严重程度影响蓝靛果果汁口感,王鑫等^[51]对酵母菌发酵生产蓝靛果汁进行研究,得出最优的发酵条件为发酵温度18 $^{\circ}$ C、发酵时间8 d、酵母菌添加量1%,该条件下香气物质较为丰富。活性炭可以作为脱苦剂,脱苦剂添加量为6%、脱苦时间为65 min、脱苦温度45 $^{\circ}$ C时脱苦效果最佳,且营养成分等无明显变化^[52]。另有研究发现酶解法可以提高蓝靛果的出汁率,果胶酶用量0.27%、纤维素酶用量0.92%、酶解温度47 $^{\circ}$ C出汁率最高,营养物质含量也得到提升^[53]。李唯^[54]研究发现蓝靛果中含有在加工过程中可转化生成A型原花青素的花色苷,可将蓝靛果果汁开发成富含A型原花青素的浓缩汁功能产品。蓝靛果复合果汁的研究报道相对较多,通过对乳酸菌发酵蓝靛果-沙棘复合果汁的研究,得出酶解温度50 $^{\circ}$ C、酶解时间2 h、酶添加量0.3%时出汁率

最优, 酶解温度 50 °C、酶解时间 2 h、酶添加量 0.3% 时酚类物质含量最高^[55]。制备蓝靛果、树莓、蓝莓复合果汁的最佳配方为树莓原汁 20%, 蓝莓原汁 5%, 蓝靛果原汁 10%, 白砂糖 10%^[56]。蓝靛果单宁含量高, 在口腔中与蛋白结合产生沉淀导致舌头着色, 研究发现在果汁中添加固定化酶, 着色能力在固定化酶 4 mg, 色差值 ΔE^*ab 为 3.49 时显著降低^[57]。由于蓝靛果果汁口感浓郁, 开发产品时可考虑开发成不同浓度梯度的高中低端产品, 此外, 目前市面上未见碳酸类蓝靛果汁, 可研究将其开发为果汁气泡饮。

3.2 蓝靛果果酒

蓝靛果与葡萄、蓝莓一样十分适合酿造果酒, 通常以果汁或含渣果浆为原料, 添加酵母菌或依靠自身菌株进行发酵。宗绪岩等^[58]研究得到蓝靛果酒发酵的最优参数, 果胶酶添加量 0.34% (根据果酒质量计算), 酵母添加量 1.48 g/L, 初始糖度 20° Bx, 初始 pH 值为 3.6, 该条件下感官评价最佳。通过实验对比蓝靛果鲜汁发酵、熟汁发酵、去渣发酵三种工艺, 发现不同发酵工艺对蓝靛果酒的香气成分及功能性成分的影响较大, 综合比较熟汁发酵工艺具有良好的活性功能和浓郁果香^[59]。采用高效液相色谱-串联质谱方法测定蓝靛果酒通过酵母发酵前后的花色苷变化, 发现发酵对花色苷种类没有影响, 对多数花色苷含量有促进作用, 对少部分有抑制作用^[60]。韩春然等^[61]研究发现低温 CO₂ 浸渍工艺可有效降低蓝靛果酒中的单宁和总酸, 多酚等活性成分可有效浸出, 最佳浸渍工艺为浸渍时间 5.6 d、浸渍温度 6 °C、浸渍压力 0.1 MPa。

3.3 蓝靛果冻干粉

蓝靛果富含对健康有益的多种活性成分, 但不易运输保质期短。冻干粉制品保质期长且可保证健康成分不受影响, 近年来蓝靛果冻干粉产品的开发不断深入。将蓝靛果冻干粉与泡腾片工艺结合制备蓝靛果冻干粉泡腾片是一个很好的生产工艺, 实验证明最佳配方为果粉添加量 18.3 mg/mL、白糖添加量 41.2 mg/mL、崩解剂添加量 454.2 mg/mL、崩解剂配比 2:1, 干燥时间和干燥温度分别对花色苷、黄酮影响最大^[62]。张星^[63]研究制备蓝莓与蓝靛果复合冻干粉并验证其储藏稳定性得出 4 °C 75% RH 和 25 °C 43% RH 下最利于冻干粉储藏。冻干粉在美容和食品领域应用广泛, 蓝靛果营养成分丰富, 符合

冻干粉行业对原材料的功效要求, 后续可将冻干粉作为高端产品线大力开发。

3.4 其他

蓝靛果休闲食品种类繁多, 市面常见的有果冻、果酱、果干、酸奶、糖果等, 除此之外, 研究人员开发出蓝靛果米糠复合酵素, 实验验证最优发酵条件为蓝靛果与米糠比例为 2:1, 植物乳杆菌与酿酒酵母接种比例为 2:1, 装液量为 80%, 发酵温度为 30 °C, 发酵时间为 24 h^[64]。赵月明^[65]采用微波真空与冷冻干燥联合的工艺制作蓝靛果酸奶脆片, 材料比例为酸奶:蓝靛果果浆:果葡糖浆=6:3:1, 可根据实际生产需求适当增减, 最佳工艺参数为最佳水分转换点 65.4% (1.89 g/g), 脆片厚度为 13 mm, 解析干燥温度为 36.9 °C; 国外研究人员通过麦芽糊精和麦芽糊精与阿拉伯胶的组合喷雾干燥样品, 从果汁中可获得两种着色剂配方, 具有良好的抗氧化和抗菌性, 且无细胞毒性问题, 可被考虑用作天然的食品着色剂^[66]。

4 展望

全球小浆果市场规模庞大, 2023 年预计可达 700 亿美元, 草莓、蓝莓等已具有稳定的产业链, 蓝靛果作为寒地新兴特色小浆果, 具备极高的食用价值、营养价值和药用价值, 可广泛应用于食品、医疗、生物提取、工业等场景, 但开发者和消费者对其认识还不够深刻, 今后的研究需要在以下几个方面进一步深入:

(1) 蓝靛果产业化的前提是品质优良的原料供给充足, 目前蓝靛果已认证的优良品种少, 种植规模小而散, 种植方式不规范导致采收浇灌等操作受影响。一方面, 未来可通过分子手段定向培育优良品种, 将不同成分含量的品种应用于不同领域; 另一方面, 应大面积推广标准化种植, 包括智慧农场建设, 配套采收机械研发等。

(2) 蓝靛果的采后储运有待深入研究, 由于果实特性导致蓝靛果储运困难, 极大限制蓝靛果鲜食市场的推广范围, 育种方面可将选育果实硬度高的品种作为重点目标, 技术方面需深入探究经济实用的运输、包装及保鲜方式。

(3) 蓝靛果产业的发展离不开消费市场产品的认可, 目前大众对蓝靛果整体认知度低, 市场流通的产品种类少, 因此其深加工领域的研究需不断

钻研,以不同形态应用在不同场景中,如以果汁形式应用在食品饮料市场,以浓缩原浆、果酱形式应用在乳制品市场,以提取物形式应用在功能性产品及天然提取物市场,以粉剂形式应用到生物制药及化妆品领域等。

(4) 通过利用生理学、分子生物学等技术深入挖掘蓝靛果生理特性,如果实成熟过程中的代谢物含量变化、颜色变化以及软化机制等,果实花青素、黄酮等活性成分合成的关键基因,以及环境因素对果实品质的影响,如光质、光强、温度等,目前上述类型的研究报道很少,通过明确蓝靛果生理特性,可为农业种植及育种提供理论依据,有利于推动蓝靛果产业的快速发展。

参考文献

- [1] 中国科学院《中国植物志》编委会.中国植物志[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] SENICA M, STAMPAR F, MIKULIC-PETKOVSEK M. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L. subs. *edulis*) berry; a rich source of some nutrients and their differences among four different cultivars [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 238: 215-221.
- [3] 刘英,秦程玉,吴嘉仪,等.三种形态蓝靛果花色苷的提取工艺及其抗氧化活性研究[J].*食品与发酵工业*,2023,49(21):161-166.
- [4] 李凤凤,张秀玲,柳晓晨,等.响应面优化微波辅助提取蓝靛果花色苷工艺及其抗氧化活性[J].*食品工业科技*,2019,40(2):195-200,214.
- [5] 屈美华,张彦龙,李元敬,等.蓝靛果原浆对果蝇寿命及其体内抗氧化活性的影响[J].*黑龙江大学自然科学学报*,2023,40(6):713-720.
- [6] LIU S, MENG F, ZHANG D, et al. *Lonicera caerulea* berry polyphenols extract alleviates exercise fatigue in mice by reducing oxidative stress, inflammation, skeletal muscle cell apoptosis, and by increasing cell proliferation [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 853225.
- [7] BAO T, KARIM N, XIE L, et al. Simulated gastrointestinal digestion and colonic fermentation of blue honeysuckle: phenolic profile and protectivity on ethyl carbamate-induced oxidative damage [J]. *Process Biochemistry*, 2022, 120: 74-84.
- [8] LEE H J, LEE D Y, CHUN Y S, et al. Effects of blue honeysuckle containing anthocyanin on anti-diabetic hypoglycemia and hyperlipidemia in ob/ob mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 89: 104959.
- [9] LIU S, YU J, GUO S, et al. Inhibition of pancreatic α -amylase by *Lonicera caerulea* berry polyphenols *in vitro* and their potential as hyperglycemic agents [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 126: 109288.
- [10] KIM J Y, LEE Y S, PARK E J, et al. Honeysuckle berry (*Lonicera caerulea* L.) inhibits lipase activity and modulates the gut microbiota in high-fat diet-fed mice [J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 4731.
- [11] ZHOU L, WANG H, YI J, et al. Anti-tumor properties of anthocyanins from *Lonicera caerulea* 'beilei' fruit on human hepatocellular carcinoma: *in vitro* and *in vivo* study [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 104: 520-529.
- [12] 周丽萍. 蓓蕾蓝靛果花色苷分离纯化及抗肿瘤作用研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2017.
- [13] 夏延斌,王燕.食品化学第2版[M].北京:中国农业出版社,2015.
- [14] LIOBIKAS J, SKEMIENE K, TRUMBECKAITE S, et al. Anthocyanins in cardioprotection: a path through mitochondria [J]. *Pharmacological Research*, 2016, 113: 808-815.
- [15] RUPASINGHE HPV, ARUMUGAM N, AMARARATHNA M, et al. The potential health benefits of haskap (*Lonicera caerulea* L.): role of cyanidin-3-O-glucoside [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 44: 24-39.
- [16] SHARMA A, LEE H J. *Lonicera caerulea*: an updated account of its phytoconstituents and health-promoting activities [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 107: 130-149.
- [17] KUCHARSKA A, SOKÓŁ-ŁĘTOWSKA A, OSZMIAŃSKI J, et al. Iridoids, phenolic compounds and antioxidant activity of edible honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* var. *kamtschaticasevast.*) [J]. *Molecules*, 2017, 22(3): 405.
- [18] WANG Y, ZHU J, MENG X, et al. Comparison of polyphenol, anthocyanin and antioxidant capacity in four varieties of *Lonicera caerulea* berry extracts [J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 522-529.
- [19] FAN L, LIN L, ZHANG Y, et al. Component characteristics and reactive oxygen species scavenging activity of anthocyanins from fruits of *Lonicera caerulea* L [J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134391.
- [20] 谢佳璇.蓝果忍冬果实和叶片多酚的鉴定及体外活性分析[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [21] RAUDONĖ L, LIAUDANSKAS M, VILKICKYTĖ G, et al. Phenolic profiles, antioxidant activity and phenotypic characterization of *Lonicera caerulea* L. berries, cultivated in Lithuania [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(1): 115.
- [22] SENICA M, BAVEC M, STAMPAR F, et al. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* subsp. *edulis* (turcz. ex herder) hultén.) berries and changes in their ingredients across different locations: changes in blue honeysuckle berry ingredients across different locations [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(9): 3333-3342.
- [23] 黄宁.蓝果忍冬叶片类黄酮成分鉴定及抗氧化活性研

- 究[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [24] ČESONIENĖ L, LABOKAS J, JASUTIENĖ I, et al. Bioactive compounds, antioxidant, and antibacterial properties of *Lonicera caerulea* berries: evaluation of 11 cultivars [J]. *Plants*, 2021, 10(4): 624.
- [25] KUPSKA M, CHMIEL T, JĒDRKIEWICZ R, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography for determination of the terpenes profile of blue honeysuckle berries [J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 88-93.
- [26] 徐雅琴,刘柠月,李大龙,等.蓝靛果多糖功能特性、结构及抗糖基化活性[J].食品科学,2020,41(2):8-14.
- [27] PEI F, LV Y, CAO X, et al. Structural characteristics and the antioxidant and hypoglycemic activities of a polysaccharide from *Lonicera caerulea* L. pomace [J]. *Fermentation*, 2022, 8(9): 422.
- [28] SHAO C, ZHONG J, LIU J, et al. Preparation, characterization and bioactivities of selenized polysaccharides from *Lonicera caerulea* L. fruits [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 225: 484-493.
- [29] 张星,毕金峰,陈芹芹,等.4种浆果成分分析及抗氧化活性研究[J].食品科技,2020,45(6):52-58.
- [30] PALÍKOVÁ I, HEINRICH J, BEDNÁŘ P, et al. Constituents and antimicrobial properties of blue honeysuckle: a novel source for phenolic antioxidants [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(24): 11883-11889.
- [31] CAPRIOLI G, IANNARELLI R, INNOCENTI M, et al. Blue honeysuckle fruit (*Lonicera caerulea* L.) from eastern russia: phenolic composition, nutritional value and biological activities of its polar extracts [J]. *Food & Function*, 2016, 7(4): 1892-1903.
- [32] DAYAR E, CEBOVA M, LIETAVA J, et al. Antioxidant effect of *Lonicera caerulea* L. in the cardiovascular system of obese zucker rats [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(8): 1199.
- [33] FU X, YANG H, MA C, et al. Characterization and inhibitory activities on α -amylase and α -glucosidase of the polysaccharide from blue honeysuckle berries [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 414-422.
- [34] WANG Y, GAO N, NIETO-VELOZA A, et al. *Lonicera caerulea* polyphenols inhibit fat absorption by regulating nrf2-are pathway mediated epithelial barrier dysfunction and special microbiota [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(4): 1309-1322.
- [35] LIU S, SUI Q, ZHAO Y, et al. *Lonicera caerulea* berry polyphenols activate sirt1, enhancing inhibition of raw264.7 macrophage foam cell formation and promoting cholesterol efflux [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(25): 7157-7166.
- [36] ZUO A, WANG S, LIU L, et al. Understanding the effect of anthocyanin extracted from *Lonicera caerulea* L. on alcoholic hepatosteatorsis [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, 117: 109087.
- [37] LIU M, TAN J, HE Z, et al. Inhibitory effect of blue honeysuckle extract on high-fat-diet-induced fatty liver in mice [J]. *Animal Nutrition*, 2018, 4(3): 288-293.
- [38] AMARARATHNA M, HOSKIN D W, RUPASINGHE H P V. Anthocyanin-rich haskap (*Lonicera caerulea* L.) berry extracts reduce nitrosamine-induced dna damage in human normal lung epithelial cells [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 141: 111404.
- [39] ZHAO J, ZANG J, LIN Y, et al. Polyphenol-rich blue honeysuckle extract alleviates silica-induced lung fibrosis by modulating th immune response and nrf2/ho-1 mapk signaling [J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 53: 176-186.
- [40] WU S, YANO S, CHEN J, et al. Polyphenols from *Lonicera caerulea* L. berry inhibit lps-induced inflammation through dual modulation of inflammatory and antioxidant mediators[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(25): 5133-5141.
- [41] 李旭,高博,赵丽华,等.响应面法优化超声波提取蓝靛果花色苷及其抗炎活性的研究[J].食品科技,2021, 46(3):176-183.
- [42] MINAMI M, NAKAMURA M, MAKINO T. Effect of *Lonicera caerulea* var. *emphyllocalyx* extracts on murine *streptococcus pyogenes* infection by modulating immune system [J]. *Biomed Research International*, 2019, 2019: 1-12.
- [43] WU C F, WU C Y, LIN C F, et al. The anticancer effects of cyanidin 3-o-glucoside combined with 5-fluorouracil on lung large-cell carcinoma in nude mice [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2022, 151: 113128.
- [44] CHUN Y S, KU S K, KIM J K, et al. Hepatoprotective and anti-obesity effects of korean blue honeysuckle extracts in high fat diet-fed mice [J]. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 2018, 22(4): 39-54.
- [45] LEE Y S, PARK E J, KIM S M, et al. Anti-sarcopenic obesity effects of *Lonicera caerulea* extract in high-fat diet-fed mice [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(10): 1633.
- [46] 赵海田.蓝靛果花色苷结构表征及对辐射诱导氧化损伤防护机制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [47] ZHAO H, WANG Z, MA F, et al. Protective effect of anthocyanin from *Lonicera caerulea* var. *edulis* on radiation-induced damage in mice [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, 13(12): 11773-11782.
- [48] PARK S I, LEE Y J, CHOI S H, et al. Therapeutic effects of blue honeysuckle on lesions of hyperthyroidism in rats [J]. *The American Journal of Chinese Medicine*, 2016, 44(7): 1441-1456.
- [49] HOWATSON G, SNAITH G C, KIMBLE R, et al. Improved endurance running performance following haskap berry

- (*Lonicera caerulea* L.) ingestion [J]. *Nutrients*, 2022, 14(4): 780.
- [50] BELL L, WILLIAMS C M. A pilot dose-response study of the acute effects of haskap berry extract (*Lonicera caerulea* L.) on cognition, mood, and blood pressure in older adults [J]. *European Journal of Nutrition*, 2019, 58(8): 3325-3334.
- [51] 王鑫,毕海鑫,修伟业,等.发酵蓝靛果果汁的工艺优化及香气成分分析[J].食品工业科技,2023,44(13):176-185.
- [52] 丁宁.蓝靛果果汁脱苦及温-压协同杀菌工艺研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [53] 吴国美,张秀玲,高诗涵,等.蓝靛果的酶解工艺优化及抗氧化特性研究[J].食品研究与开发,2020,41(23):124-130.
- [54] 李唯.A型低聚原花青素的检测、转化研究及应用[D].无锡:江南大学,2021.
- [55] 宋超男.蓝靛果-沙棘发酵果汁研制及功能性评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [56] 吴国美.三种小浆果复合饮料的研制及抗氧化性、花色苷提取研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [57] 韩春然,张家成,王鑫,等.单宁酶固定化及其降低蓝靛果汁口腔染色作用分析[J].食品科学,2018,39(16):118-125.
- [58] 宗绪岩,白彬阳,杨金山,等.蓝靛果酒酿造工艺优化[J].包装与食品机械,2018,36(5):13-17.
- [59] 张秀玲,汲润,李凤凤,等.发酵工艺对蓝靛果酒功能性及香气成分的影响[J].食品科学,2022,43(10):189-198.
- [60] 梁敏,包怡红.蓝靛果酒发酵工艺优化及发酵过程对花色苷的影响[J].食品科学,2018,39(10):151-157.
- [61] 韩春然,宋晨鑫,马蕊.响应面法优化蓝靛果酒低温二氧化碳浸渍工艺[J].食品研究与开发,2021,42(1):117-123.
- [62] 陈冰瑶.蓝靛果全果冻干粉泡腾片的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [63] 张星.蓝莓与蓝靛果复合冻干粉加工贮藏稳定性及产品开发[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [64] 包怡红,赵鑫磊,唐妍,等.蓝靛果米糠酵素发酵工艺优化及其代谢产物变化分析[J].中南林业科技大学学报,2022,42(2):147-158.
- [65] 赵月明.微波真空与冷冻联合干燥蓝靛果脆片工艺研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [66] MOLINA A K, VEGA E N, PEREIRA C, et al. Promising antioxidant and antimicrobial food colourants from *Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica* [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(9): 394.