

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240929001

引用格式: 王珏莹, 单维婷, 李潇, 等. 炒制-超微粉碎联合处理对山楂核品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 104–112.

WANG JY, SHAN WT, LX, *et al.* Effects of combined treatment of stir-frying and ultramicro grinding on quality of *Crataegus pinnatifida* kernel [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 104–112. (in Chinese with English abstract).

炒制-超微粉碎联合处理对山楂核品质的影响

王珏莹^{1,2}, 单维婷^{1,2}, 李潇¹, 韩艳秋¹, 王琛^{1,2*}

(1. 辽宁省农业科学院食品与加工研究所, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学食品学院, 沈阳 110866)

摘要: **目的** 探究炒制-超微粉碎联合处理对山楂核品质的影响。**方法** 以企业生产加工的废弃物山楂核为实验材料, 采用普通磨粉、炒制-普通磨粉和炒制-超微粉碎联合处理技术处理山楂核, 测定表面色泽、表面结构、持水力、持油性等物理特性及其抗氧化性和黄酮释放量的变化。**结果** 经炒制-超微粉碎处理的山楂核粉, 对水的束缚能力增大, 溶解性增大为 35.63%, 膨胀力增大为 3.71 mL/g, 持油力增大为 2.61 g/g。休止角及滑角都减小, 分别为 37.12° 和 43.63°。山楂核粉的黄酮释放率由 60.47% 提高至 71.48%, 抗氧化性提高了近 20%, 表现为 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2-diazine-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]阳离子自由基、1,1-联苯基-1-苦基胍基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和羟自由基清除率提高。**结论** 炒制-超微粉碎联合处理技术是一种切实可行的山楂核粉加工方法。该技术能够有效改善山楂核粉的理化特性, 提高总黄酮释放率。研究结果有助于提升山楂核粉的市场价值, 促进山楂产业的可持续发展。

关键词: 山楂核; 炒制-超微粉碎; 粉粒结构; 抗氧化活性; 黄酮释放量

Effects of combined treatment of stir-frying and ultramicro grinding on quality of *Crataegus pinnatifida* kernel

WANG Jue-Ying^{1,2}, SHAN Wei-Ting^{1,2}, LI Xiao¹, HAN YAN-Qiu¹, WANG Chen^{1,2*}

(1. Institute of Food and Processing, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110866, China;
2. Department of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effect of stir-frying and ultramicro grinding on the quality of *Crataegus pinnatifida* kernel. **Methods** The *Crataegus pinnatifida* kernels produced and processed by the enterprise were used as the test materials, and the *Crataegus pinnatifida* kernels were treated by ordinary grinding, frying-ordinary grinding and frying-ultrafine grinding combined treatment technology, and the physical properties of surface color, surface structure, water-holding capacity, oil-holding capacity, and the changes of oxidation resistance and flavonoid release were determined. **Results** The *Crataegus pinnatifida* kernel powder treated by frying and ultrafine grinding had an increased binding capacity to water, a solubility of 35.63%, an expansion force of 3.71 mL/g, and an oil-holding capacity of 2.61 g/g. The angle of repose and slip angle were reduced to 37.12° and 43.63°, respectively.

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300135)

第一作者: 王珏莹(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬采后贮藏与品质控制。E-mail: 1808298558@qq.com

*通信作者: 王琛(1979—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: wangchen0913@163.com

The flavonoid release rate of *Crataegus pinnatifida* kernel powder increased from 60.47% to 71.48%, and the oxidant resistance increased by nearly 20%, which was manifested by a increase in the scavenging rates of 2,2-diazine-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) cationic radical, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radicals and hydroxyl radicals. **Conclusion** Therefore, the combined treatment technology of frying and ultrafine grinding is a feasible processing method for *Crataegus pinnatifida* kernel powder. This technology can effectively improve the physicochemical properties of *Crataegus pinnatifida* kernel powder and increase the total flavonoid release rate. The results of this study are helpful to enhance the market value of *Crataegus pinnatifida* nuclear powder and promote the sustainable development of *Crataegus pinnatifida* industry.

KEY WORDS: *Crataegus pinnatifida* kernel; stir-frying and ultramicro grinding; silty texture; antioxidant activity; amount of flavonoids released

0 引言

山楂核, 是蔷薇科山楂(*Crataegus pinnatifida* Bunge)的种子, 质地坚硬、不易粉碎^[1]。山楂核的外观为黄棕色, 背面拱起呈弧形, 是山楂果实在加工过程中的副产品^[2]。山楂作为一种传统的药食兼用食品原料, 其核通常在食品加工中被去除并视为废弃物^[3]。近年来的研究发现, 山楂核含有多种生物活性成分, 如黄酮类、木脂素类、苯丙素类等, 具有抗氧化、保护心血管、抗炎、促进消化的功能^[4], 对促进人类健康具有积极作用, 特别是在预防慢性疾病如心血管疾病和某些类型的癌症^[5]。尽管山楂核具有多种益处, 但其坚硬的质地使得传统粉碎方法难以将其充分细化, 导致有效成分的溶出率低, 这限制了其在食品和医药领域的应用, 并造成了资源的浪费^[6]。在产业中, 山楂核通常用于生产低附加值的动物饲料或肥料, 这不利于产业链的延伸和价值的提升。为了解决这一问题, 需要开发新的加工技术, 提高山楂核的利用效率和经济价值。

黄酮类化合物是植物果核(籽)的重要营养成分^[7], 主要包括黄酮、黄酮醇、黄酮醇、黄酮、异黄酮、异黄酮和查尔酮, 共同决定了产品的品质与功能^[8]。超微粉碎技术通过细胞破壁效果, 使粉体粒径分布均匀和比表面积增加, 进而提高吸附性和溶解性, 实现有效成分的充分溶出和有效利用^[9]。寇福兵等^[10]发现超微粉碎技术提高了红花中有效营养成分的溶出能力和粉体利用率, 使黄酮与提取溶剂的接触更充分, 促进了黄酮的释放和溶出。炒制是中药常用的技术手段, 其处理对改善药物的药性、增强疗效有很好的帮助^[11]。山楂核炒制后, 可以降低有机酸含量, 减少对胃肠的刺激作用, 同时黄酮、磷脂和微量元素等功效成分液会发生变化, 从而改变了山楂核的药理作用和临床疗效。研究发现酸枣仁经过炒制后, 大多数样品中的黄酮类、皂苷类及脂肪酸类成分的含量均有所增加^[12]。所以, 炒制与超微粉联合处理山楂核可能比传统的机械处理更有利于功能性成分的溶出, 并提高山楂核粉的细化程度^[13]。

为了获得高价值的山楂核粉, 在提高山楂核粉中总

黄酮释放率的前提下, 本研究按采用普通磨粉、炒制-普通磨粉和炒制-超微粉碎联合处理技术处理山楂核, 通过比较各处理后山楂核粉粉粒结构、表面色泽、物化特征及抗氧化活性的变化, 确定炒制-超微粉碎联合处理对山楂核粉中总黄酮代谢物种类的贡献与作用, 进而提高山楂核粉的功能性, 为山楂核的高值化利用提供科学依据和技术支持, 减少资源浪费, 促进山楂核产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 实验材料、试剂与仪器

实验所用山楂核均来自于沈阳市山山伟业食品有限公司, 是企业生产加工的废弃物。挑选颗粒饱满、大小一致、色泽均匀、光滑无异物的山楂核作为实验材料。

甲酸、甲醇、乙腈(色谱纯, 天津科密化学试剂有限公司); 芦丁标准品(纯度 99%, 中国药品生物制品鉴定所); 无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、硫酸亚铁、过硫酸钾(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2-diazine-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]、1,1-联苯基-1-苦基肼基 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(纯度 99.9%, 上海麦克林生化科技有限公司); 维生素 C(纯度 99%, 上海麦克林生化科技有限公司)。

FW100 型高速万能粉碎机(中国江苏江阴市正则机械有限公司); SF180 高速万能粉碎机粉碎(中国江苏江阴市杰顺机械有限公司); XULANG 130 °C多功能炒货机(中国广东省东莞市麦席森电子有限公司); KJYC 超微粉碎振动磨(中国江苏恒迈干燥科技有限公司); H-16 台式高速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司); CR-221 色差仪(日本 Chromameter 公司); LA-920 型激光粒度仪(德国 Eppendorf 有限公司); IGMA 扫描电子显微镜(美国 Biosystems 有限公司); BSA-224 电子天平(精度 0.01 mg, 上海精科天平有限公司); HH-6 恒温水浴锅(常州国华仪器厂); TU-1810 紫外分光光度计(北京善析通用有限公司); KD-810B 酶标仪[科

迪云亨生物科技(南京)有限公司]; QL-901 旋转蒸发器(江苏省海门市麒麟医用仪器厂)。

1.2 粉碎处理

将山楂核清洗干净, 恒温 50 °C 干燥 2 h, 冷却待用。分别称取 500 g 山楂核, 分成 3 组, 其中一组用高速万能粉碎机粉碎 7 min, 至 60 目筛, 得到普通核粉(SP); 另两组先在 130 °C 多功能炒货机中烘炒 7 min, 其中一组用高速万能粉碎机粉碎 7 min, 至 60 目筛, 得到炒制粗粉(SCP), 另一组再用超微粉碎振动磨粉碎 7 min, 至 200 目, 得到炒制超微粉(SCC)。

1.3 表面色泽

参考杨智超等^[14]的方法, 取适量山楂核粉置于无色透明自封袋中, 使用色差仪进行测定。色差测定以白板为标准, 测定各试样的亮度 L^* 、红绿色 a^* 和黄蓝色 b^* , 按公式(1)计算色差值(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中, L_0^* 为白板的亮度, a_0^* 为白板的红绿色, b_0^* 为白板的黄蓝色。

1.4 表面结构

参考 KAWA 等^[15]的方法, 采用激光粒度仪测量山楂核粉的粒径及分布。采用导电胶将山楂核粉样品固定样品载体片上, 利用离子溅射镀膜仪喷金, 再用扫描电子显微镜对样品进行 30、500、2000 以及 8000 倍的表现形态观察, 得到样品的粉体分布情况。

1.5 持水力

参考江润生等^[16]的方法, 准确称量山楂核粉 0.5 g, 置于 50 mL 离心管称重, 加入 50 mL 的蒸馏水, 摇晃均匀, 再将混合溶液于 6000 r/min 的速度离心 15 min, 去除上清液重新称重。按公式(2)计算持水力。

$$\text{持水力}/(\text{g/g}) = \frac{M_2 - M_1}{M} \quad (2)$$

式中, M 为试样的重量, g; M_1 为试样与离心管的总质量, g; M_2 为试样在离心后倒出上清液时沉淀和离心管的总质量, g。

1.6 持油力

参考 MAGNI 等^[17]的方法, 稍作改动, 准确称取 1g 山楂核粉于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 大豆油搅拌均匀, 然后在 37°C 的恒温水中静置 1 h。6000 r/min 离心 15 min, 除去油层, 分别称量。按公式(3)计算持油力。

$$\text{持油力}/(\text{g/g}) = \frac{M_5 - M_4}{M_3} \quad (3)$$

式中, M_3 为试样质量, g; M_4 为试样和离心管质量, g; M_5 为离心后除去油层时沉淀和离心管的重量, g。

1.7 溶解性

参考刘荣等^[18]的方法, 稍作改动, 准确称量 0.5 g 山楂核粉溶于 50 mL 蒸馏水中, 于 80 °C 水浴振荡 30 min。6000 r/min 离心 15 min, 将样品放在 105 °C 下烘干称至恒重, 称重。按公式(4)计算溶解性。

$$\text{溶解性}/\% = \frac{M_7}{M_6} \times 100\% \quad (4)$$

式中, M_6 为粉体的质量, g; M_7 为离心烘干后粉体的质量, g。

1.8 膨胀力

参考 NAN 等^[19]的方法, 稍作改动。准确称量 0.5 g 山楂核粉, 加入 10 mL 蒸馏水于量筒中, 记录山楂核超微粉的体积 V_1 ; 搅拌均匀静置 12 h, 记录样品体积 V_2 。按列公式(5)计算膨胀力。

$$\text{膨胀力}/(\text{mL/g}) = \frac{V_2 - V_1}{M_8} \quad (5)$$

式中, M_8 为试样的质量, g; V_1 为试样前体积, mL; V_2 为试样静置后体积, mL。

1.9 休止角和滑角

参考江润生等^[20]的方法, 准确称取 3 g 山楂核粉经离桌面 3 cm 的漏斗流入到玻璃板上, 形成一个圆锥体, 测定圆锥体高度 h 和底面圆形半径 r , 通过反正切函数即可求出休止角 α , $\alpha = \arctan h/r$ 。

参考 CIRLINI 等^[21]的方法, 准确称取 10 g 的山楂核粉, 平均分布在玻璃板上, 将玻璃板缓慢倾斜至 90% 左右 (体积) 山楂核粉均发生移动, 测量此时玻璃板与水平面的角度 θ , 即滑角。

1.10 DPPH 自由基清除率

参考李状等^[22]的方法, 稍作改动。准确称取 50 mg 山楂核粉, 加入 10 mL 无水乙醇充分溶解, 作为样品溶液, 再分别稀释为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 质量浓度的样品溶液。配制 DPPH 标准溶液, 质量浓度为 40.4 mg/L。取 2 mL DPPH 标准溶液, 与等体积样品溶液充分混合, 测定其在 517 nm 处吸光度值 A_1 ; 用蒸馏水代替 DPPH 标准溶液测定其吸光度值 A_2 ; 用蒸馏水代替样品溶液测定吸光度值 A_0 。以维生素 C (vitamin C, VC) 为阳性对照, 按公式(6)计算 DPPH 自由基的清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \left[1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right] \times 100\% \quad (6)$$

1.11 ABTS 阳离子自由基清除率

参考孙小晶等^[23]的方法, 稍作改动。按 1.10 的方法配制不同稀释度的样品溶液, 同时配制 7 mmol/L ABTS 标准溶液, 内含 2.45 mmol/L 过硫酸钾。取 200 μ L 样品溶液, 与 5 mL ABTS 标准液混合均匀, 室温静置 6~8 min, 测其在 734 nm

处的吸光度值 A_3 ; 用蒸馏水代替 ABTS 标准溶液测定吸光度值 A_4 ; 用蒸馏水代替样品溶液测定吸光度值 A_0 。用 VC 作为阳性对照, 根按公式(7)计算 ABTS 阳离子自由基的清除率。

$$\text{ABTS 阳离子自由基清除率}/\% = [1 - \frac{A_3 - A_4}{A_0}] \times 100\% \quad (7)$$

1.12 羟自由基清除率

参考 OUATTARA 等^[24]的方法, 稍作改动。按 1.10 的方法配制不同稀释度的样品溶液, 同时配制 9 mmol/L 水杨酸-乙醇标准溶液。取 0.5 mL 水杨酸-乙醇标准溶液, 依次加入 0.5 mL 样品溶液、0.5 mL 9 mmol/L 硫酸亚铁溶液和 4.5 mL 8.8 mmol/L H_2O_2 溶液, 混合均匀, 37 °C 水浴 30 min, 4500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 打入 96 孔酶标板, 使用酶标仪测定其在 510nm 处的吸光度值 A_5 ; 用蒸馏水代替硫酸亚铁溶液测定吸光度值 A_6 ; 用蒸馏水代替样品溶液测定吸光度值 A_0 。以 VC 为阳性对照, 按公式(8)计算羟自由基清除率。

$$\text{羟自由基清除率}/\% = [1 - \frac{A_5 - A_6}{A_0}] \times 100\% \quad (8)$$

1.13 总黄酮释放量

参考厉盈颖等^[25]的方法, 略有修改。准确称取 5 g 山楂核粉, 加入 75% 无水乙醇 150 mL 搅拌均匀, 超声振荡

30 min, 于 6000 r/min 离心 20 min, 取上清液, 旋转蒸发浓缩, 得山楂核粉提取液。取 1 mL 山楂核粉提取液, 加 5 mL 蒸馏水, 测定其在 510 nm 处的吸光值。按照公式(9)计算山楂总黄酮释放率。

$$\text{总黄酮释放量}/(\text{mg/g}) = \frac{C \times N \times V}{W} \quad (9)$$

式中, C 为山楂核粉总黄酮质量浓度, mg/mL; N 为稀释倍数; V 为山楂核粉提取液体积, mL; W 为山楂核粉质量, g。

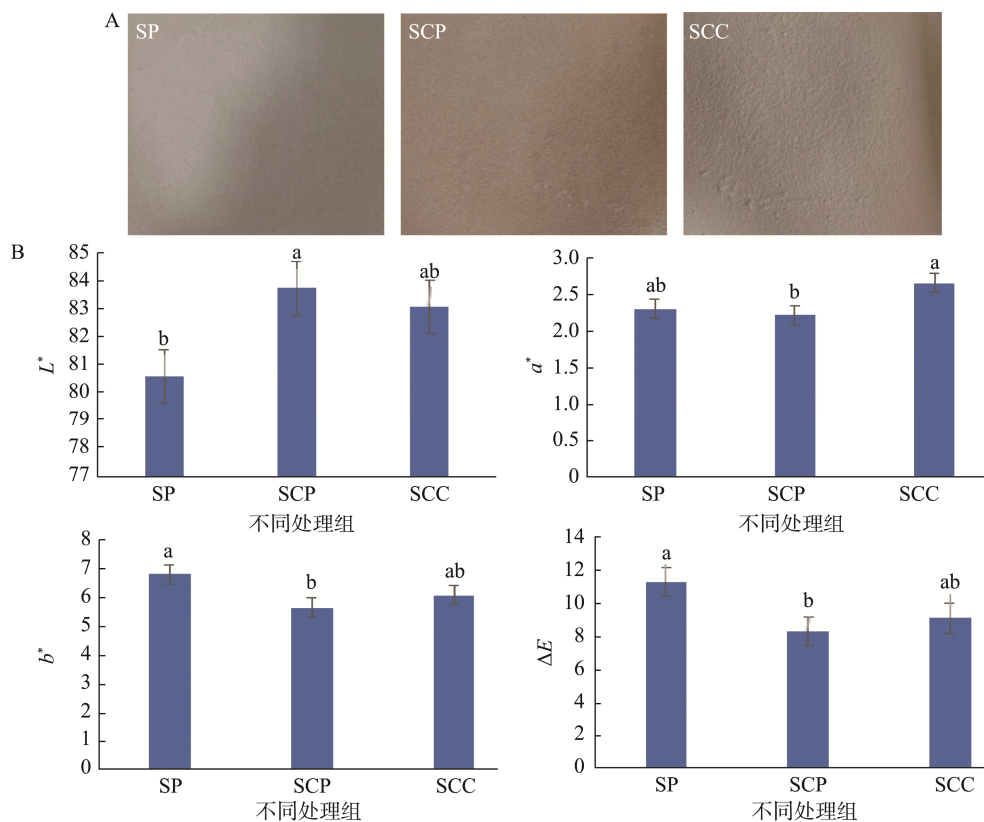
1.14 数据处理

实验重复 3 次测定, 结果表示为平均值±标准偏差。通过 SPSS 25.0 中的方差分析(analysis of variance, ANOVA)确定统计学上显著的差异, 然后进行最小显著差异法(least-significant difference, LSD)的多范围检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对山楂核粉及其表面色泽的影响

如图 1A 所示, 显示 SCP 组与 SP 组相比, 颜色更深, 呈深褐色, 失去了其原本的色泽, 而 SCC 组相较于 SCP 组, 颜色更浅, 更接近于未炒制前的粗粉色色泽, 结果表明, 经过超微粉碎处理的山楂核粉结构更加稳定。炒制超微粉的颜色更浅, 其原因是经过超微粉碎后山楂核粉的表面积增加, 导致光反射率增大^[26]。



注: 不同小写字母表示组间具有显著性差异, $P < 0.05$, 图 3~5 同。

图 1 不同处理对山楂核粉表面结构及其表面色泽的影响

Fig.1 Effects of different treatments on on surface structure and its surface color of *Crataegus pinnatifida* kernel powder

表面色泽是表征粉体感官品质的一项重要指标。图 1B 中可以看出未炒制的粉体比炒制的粉体亮度高,展示了未炒制和炒制超微粉的 L^* 值。结果表明,SCP 组具有比 SCC 组更高的 L^* ,意味着其在视觉上更为明亮。然而, a^* 和 b^* 的变化(ΔE)表明炒制过程对超微粉的色泽影响不大。这可能意味着炒制过程并没有显著改变超微粉的基本色调或饱和度^[27]。

2.2 不同处理对山楂核粉表面结构的影响

图 2 所示,SP 组在 30 倍和 500 倍的微观结构相对粗糙,粒度较大,细胞结构较为完整,这可能是由于粉碎过程中机械力未能充分作用于山楂核的硬质结构,细胞壁未完全破坏,导致黄酮类化合物的释放和溶出效率较低^[28]。SCP 组在

2000 倍和 8000 倍的微观结构更为松散,部分细胞壁破裂,这可能是由于炒制过程中的热效应促进了细胞结构的破坏^[29]。但是,SCC 组结构得到了显著改善,其细胞壁几乎完全破坏,细胞内容物充分暴露,这极大地增加了黄酮类化合物与溶剂的接触面积,从而促进了有效成分的释放和溶出^[30]。

2.3 不同处理对山楂核粉物理特性的影响

如图 3A 所示,SCP 组的持水力明显低于 SP 组和 SCC 组,原因可能是山楂核在超微粉碎过程中的粉体粒度减小,导致其内部的膳食纤维结构遭受破坏,从而引发结构性质的变化^[31]。这种变化促进了水溶性成分的释放,同时也使得一些原本不溶于水的纤维成分转变为可溶性,因此,粉体的持水力随之降低^[32]。

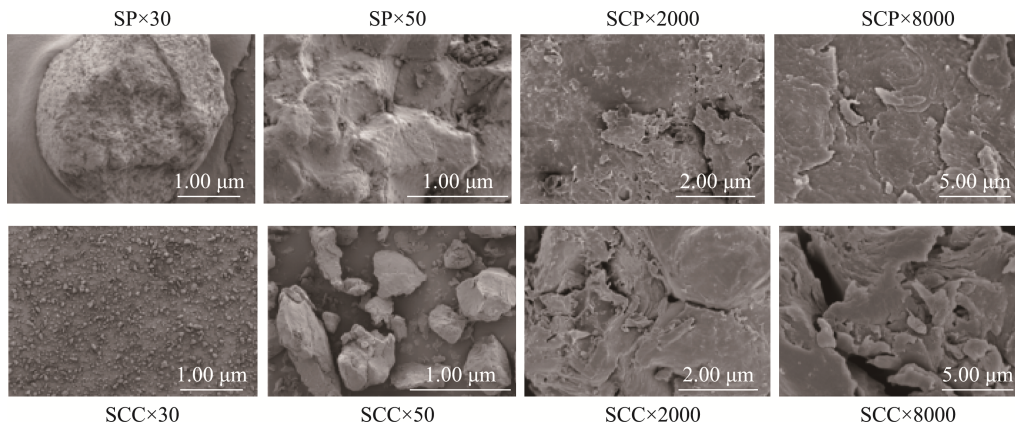


图 2 不同处理对山楂核粉表面结构的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the surface structure of *Crataegus pinnatifida* kernel powder

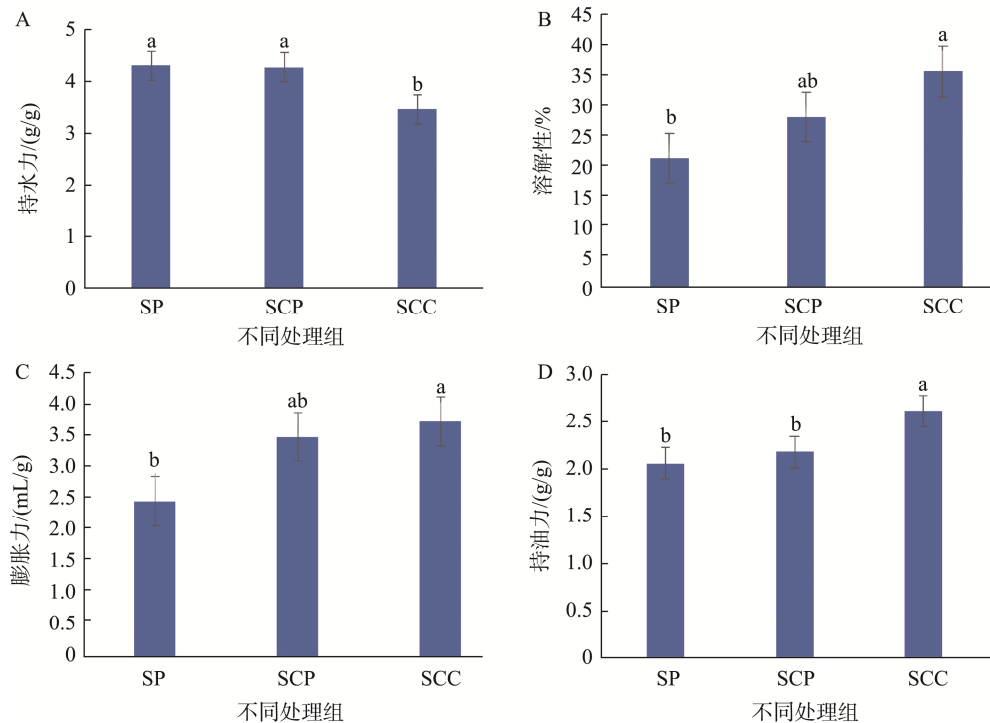


图 3 不同处理对山楂核粉物理特性的影响

Fig.3 Effects of different treatments on the physical properties of *Crataegus pinnatifida* kernel powder

但是, SCC 组的溶解性、膨胀力、持油力均高于其他两组, 而 SCP 组和 SP 组差异不大(图 3B、3C、3D)。说明超微粉碎能明显改善山楂核粉的溶解性至 35.63%, 提高山楂核粉的膨胀力为 3.71 mL/g。粉末经过超微粉碎之后, 颗粒间通过团聚、黏附作用来增大其对水的束缚能力和膨胀力, 不溶于水的物质也可以转化为可溶于水的物质^[33], 持油性增大为 2.61 g/g。因此, 粉料的膨胀能力也随之增强^[34]。超微粉碎过程可能伴随着热处理, 这种热处理可以改变原料中高分子聚合物的结构, 从而增强其膨胀性能和持油力^[35]。

2.4 不同处理对山楂核粉流变学特性的影响

图 4A、4B 图中, SCC 组的休止角和滑角低于其他两组, 为 37.12° 和 43.63°。SCP 组和 SP 组差异不大。休止角和滑动角是评价粉体流动性的重要指标, 与摩擦系数和原料颗粒性质有关, 休止角和滑角越小, 粉体的流动性越好^[36]。这说明随着粉体粒径减小, 粉体间更容易出现团聚, 在重力作用下成团滑落, 导致流动性增加^[37]。而超微粉粉体粒度较小, 粉体表面聚合力越大, 流动性越好, 质量越稳定, 因此山楂核超微粉的休止角及滑角都会减小^[38]。

2.5 不同处理对山楂核粉抗氧化性和黄酮释放量的影响

不同处理山楂核粉对 DPPH 自由基清除能力如图 5A 所示, 在样品质量浓度低于 0.6 mg/mL 的条件下, 各处理组山楂核粉对 DPPH 自由基清除能力与浓度呈正相关, 当样品质量浓度大于 0.6 mg/mL 时, 各处理组山楂核粉的清除能力趋于稳定, SCC 组的清除率接近 90%。其中 SCC 组的 DPPH 自由基清除能力最高, SCP 组, 而 SP 组的最低。可能是因为山楂核超微粉碎粒度到达一定程度时, 山楂核内部组织结构遭到破坏与空气接触表面积增大, 造成一些有效成分更容易溶出^[39], 从而使得 DPPH 自由基清除率达到最大值, 通过计算, 样品溶液与 VC 溶液对 DPPH 自由基的半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC₅₀)值分别为 586 mg/L 和 186 mg/L。

不同处理山楂核粉对 ABTS 阳离子自由基清除能力如图 5B 所示, 可知不同处理山楂核粉对 ABTS 阳离子自由基清除能力与其清除 DPPH 自由基能力相似, 在样品质量浓度低于 0.4 mg/mL 的条件下, 不同处理山楂核粉对 ABTS 阳离子自由基清除能力与浓度呈正相关。样品质量浓度高于 0.4 mg/mL 的条件下不同处理山楂核粉的清除能力趋于稳定, SCC 组的清除率接近 100%。可知不同处理山楂核粉清除 ABTS 阳离子自由基的能力: SCC 组>SCP 组>SP 组。ABTS 阳离子自由基是一种常用的化学试剂, 用于评估抗氧化物质的自由基清除能力^[40]。清除 ABTS 阳离子自由基的能力可以反映山楂核粉的总抗氧化活性, 这对于研究和开发具有抗氧化特性的食品、药品和化妆品非常重要。通过计算, 样品溶液与 VC 溶液对 ABTS 阳离子自由基的 IC₅₀ 值分别为 412 mg/L 和 198 mg/L。

不同处理山楂核粉对羟自由基清除能力如图 5C 所示, 不同处理山楂核粉对羟自由基清除能力与浓度呈正相关。样品质量浓度为 1.0 mg/mL 时, SCC 组的清除率最高, 接近 50%。不同处理组山楂核粉均表现出一定的清除能力, 且浓度与清除率呈正相关。说明超微粉碎可显著改善山楂核粉的羟自由基清除能力。超微粉碎后羟自由基清除能力增强, 这可能是因为经超微粉碎后粒径减小, 增加了抗氧化相关活性物质的溶出量, 抗氧化能力升高, 从而提高了羟自由基清除能力^[41]。通过计算, 样品溶液与 VC 溶液对羟自由基的 IC₅₀ 值分别为 459 mg/L 和 165 mg/L。

不同处理方式对山楂核总黄酮含量的影响如图 5D 所示。3 种不同处理方式处理提取山楂核总黄酮含量由高到低为炒制超微粉、炒制粗粉和未炒制粗粉, 分别是 (71.48±3.23)、(64.59±3.57)和(60.77±3.04) mg/g, 且 3 种样品具有显著性差异($P<0.05$)。经超微粉碎后, 可以将山楂核粉粉碎至非常细小的粒度, 这大大增加了其比表面积, 使得更多的黄酮类化合物与溶剂接触, 从而提高了释放量^[42]。同时, 炒制和超微粉碎可能破坏了山楂核粉中的物理屏障, 如纤维素和木质素, 这些屏障在未处理的粗粉中可能限制了黄酮类化合物的释放^[43]。

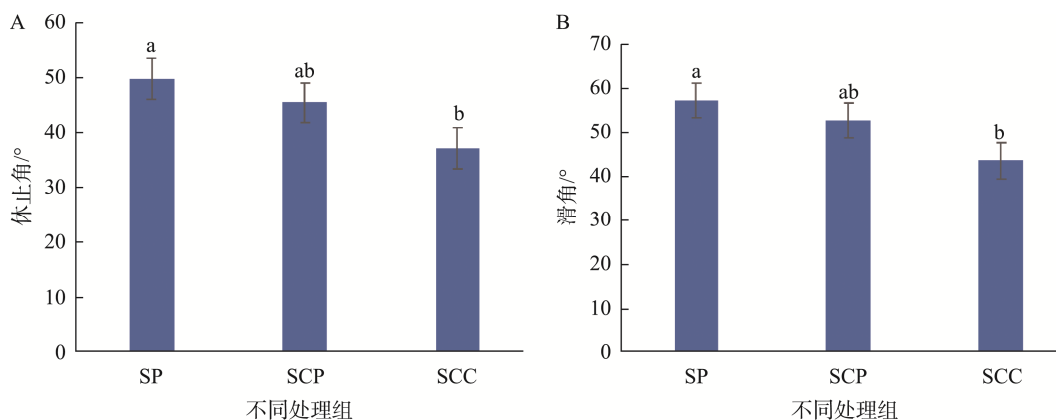
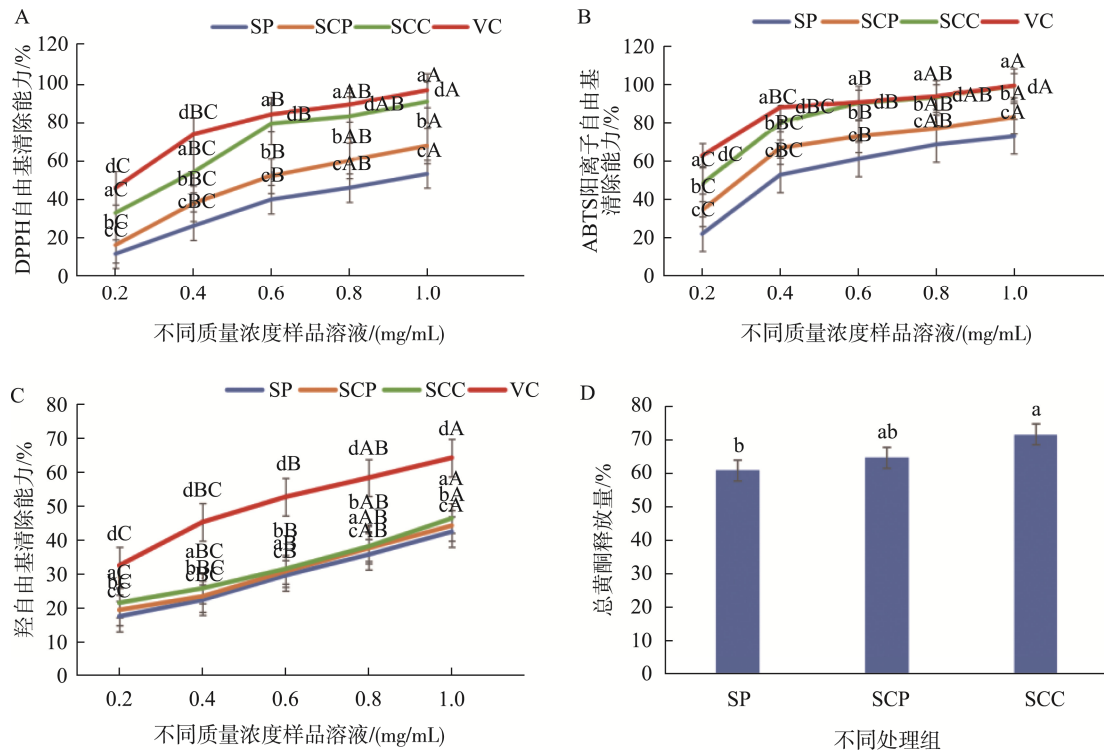


图 4 不同处理对山楂核粉流变学特性的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the rheological properties of *Crataegus pinnatifida* kernel powder



注: 不同小写字母表示不同处理组具有显著性, 不同大写字母表示同一组间具有显著性, $P < 0.05$ 。

图 5 不同处理对山楂核粉抗氧化性和黄酮释放量的影响

Fig.5 Effects of different treatments on the antioxidant properties and flavonoid release of *Crataegus pinnatifida* kernel powder

3 讨论

超微粉碎不仅提高了粉体的比表面积, 还可能通过物理和化学作用改变了细胞壁的完整性, 使得黄酮类化合物更易于提取^[44]。山楂是很好的中药材, 具有促进消化吸收、散结、催生的特点^[45], 而山楂核属于山楂在加工过程中的主要副产物, 由于生产加工难点, 而被大量丢弃。山楂核通常被加工成粉末作为辅助原料使用, 粉末的粒度和状态成为功效成分释放的关键。超微粉碎技术在一定程度上会改变原料的物化性质和内部功能结构, 使感官品质和功能特性得到很大的改善, 进而增加原料利用率, 拓展市场价值^[46]。由于颗粒大小的变化, 也可能会导致食品成分发生变化, 对山楂核粉的粉体持水力、溶解性和吸附特性具有促进作用^[47-48]。单纯的超微粉碎对于坚硬的山楂果核效果并不好, 炒制技术在某种情况下可以提高药效成分的释放。

本研究发现山楂核经过炒制-超微粉碎处理后, 粉体粒径较小, 粉质更细腻均匀, 其细微的结构改变使其持水力、持油力、水溶性和膨胀力均得到相应的改善。伴随着粉碎颗粒的细化, 山楂超微核粉的流动性越来越稳定, 主要表现在休止角和滑角的下降。

本研究发现炒制-超微粉碎联合处理后, 山楂核粉的抗氧化性显著提高, 表现为 DPPH 自由基清除率、ABTS 阳离子自由基清除率和羟自由基清除力的提高,

AKYILDIZ 等^[49]研究发现超微粉碎技术可以改善太子参的理化性质, 促进太子参环肽 B 的溶出。DU 等^[50]发现低温超微粉碎可以获得粒径更小, 颗粒更均匀茶枝柑果肉粉, 并且在一定程度上能提高了其活性成分的溶出和抗氧化性, 与本研究实验结果一致。同时黄酮释放量和种类也明显提高。这是因为炒制处理的糊化效果导致了山楂纤维结构的松散, 形成了若干细小的空隙, 使得粉粒与外界接触的面积增加, 其水溶性、持水力和膨胀力改善使黄酮的种类和释放量都有所增加。这些黄酮类化合物已被证实具有多样的生物活性, 包括抗菌、维护心血管健康、抗氧化以及抗炎作用等^[51]。

4 结论

综上所述, 炒制-超微粉碎联合处理能够有效改变核粉颗粒的水合性质, 使滑角和休止角减小, 使粉体流动稳定。同时经炒制-超微粉碎处理的山楂核粉, 颗粒对水的束缚能力增大, 膨胀力和持油性增强。由此山楂核粉的黄酮释放率由 60.47%提高至 71.48%, 抗氧化性提高了近 20%, 表现为 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基和羟自由基清除率有所提高。本研究为山楂核的高值化利用提供科学依据和技术支持, 进而为山楂核资源的可持续化利用和高值化开发指明了方向。但超微粉碎处理是否对山楂核粉的营养品质有影响, 并且超微粉碎处理在果实的应用上也有较

大空白, 因此希望此处理能在其余果实应用中有相关的具体研究。

参考文献

- [1] 曹培杰. 桑葚籽黄酮的提取、纯化及生物活性研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020.
CAO PJ. Extraction, purification and bioactivity research of anthocyanins from mulberry seed [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [2] HU LY, YU YS, XU YJ, *et al.* Study on the fermentation characteristics of citric acid by a lactobacillus fermentum [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(8): 109–114.
- [3] 代红飞, 傅茂润, 邵秀芝. 超微粉碎石榴皮粉的理化性质和抗氧化活性[J]. *中国果菜*, 2015, 35(6): 21–25.
DAI HF, FU MR, SHAO XQ. Physicochemical properties and antioxidant activity of ultrafine-Milled pomegranate peel powder [J]. *China Fruits & Vegetables*, 2015, 35(6): 21–25.
- [4] WANG JL, YAN YC, LI QY, *et al.* Research progress of biodegradable citric acid and its influencing factors [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(02): 347–357, 312.
- [5] NILAY S, DENIZ K, BUKET B, *et al.* Hawthorn vinegar in health with a focus on immune responses [J]. *Nutrients*, 2024, (12): 1868–1868.
- [6] 葛青, 李杭庆, 李鹏, 等. 不同粒径竹笋粉的理化性质和功能特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(11): 143–149.
GE Q, LI HQ, LI P, *et al.* Study on physicochemical properties and functional characteristics of bamboo shoot powder with different particle sizes [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(11): 143–149.
- [7] 谢晓敏. 沙棘籽黄酮提取物及其主要活性成分改善 C2C12 肌细胞胰岛素抵抗的作用及机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
XIE XM. Study on the effect and mechanism of flavonoid extract from sea buckthorn seed and its main active components in improving insulin resistance of C2C12 muscle cells [D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [8] WANG T, AN JH, CHAI MN, *et al.* Volatile metabolomics reveals the characteristics of the unique flavor substances in oats [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 101000.
- [9] 郭妍婷, 黄雪, 陈曼, 等. 超微粉碎技术在食品加工中的应用[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2017, 30(3): 60–64.
GUO YT, HUANG X, CHEN M, *et al.* Application of ultrafine grinding technology in food processing [J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2017, 30(3): 60–64.
- [10] 寇福兵, 夏晓霞, 薛艾莲, 等. 超微粉碎对板栗粉理化特性及结构特征的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(13): 155–162
KOU FB, XIA XX, XUE AIL, *et al.* Effect of ultrafine grinding on physicochemical properties and structural characteristics of chestnut powder [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(13): 155–162.
- [11] HU LY, YU YS, XU YJ, *et al.* Study on the fermentation characteristics of citric acid by a lactobacillus fermentum [J]. *Modern Food Science & Technology*, 2016, 32(8): 109–114
- [12] 李永丽, 赵佳丽. 红树莓籽黄酮提取工艺及成本分析[J]. *中国调味品*, 2022, 47(5): 147–149, 154.
LI YL, ZHAO JL. Extraction process and cost analysis of flavonoids from red raspberry seeds [J]. *China Condiments*, 2022, 47(5): 147–149, 154.
- [13] ZHU DS, RE XJ, WEI LW, *et al.* Collaborative analysis on difference of apple fruits flavor using electronic nose and electronic tongue [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 260(C): 108879.
- [14] 杨智超, 曹阳, 沈超怡, 等. 基于高压静电场处理的樱桃番茄果实贮藏期生理品质及其代谢[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 168–176.
YANG ZC, CAO Y, SHEN CY, *et al.* Physiological quality and metabolism of cherry tomato fruit during storage based on high-voltage electrostatic field treatment [J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 168–176.
- [15] KWAW E, MA YK, TCHABO W, *et al.* Ultrasonication effects on the phytochemical, volatile and sensorial characteristics of lactic acid fermented mulberry juice [J]. *Food Bioscience*, 2018, 24: 17–25.
- [16] 江润生, 刘梦虎, 易香羽, 等. 干燥方式对银杏全粉品质及抗氧化能力分析[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 79–84.
JIANG RS, LIU MH, YI XY, *et al.* Analysis of drying method on the quality and antioxidant capacity of ginkgo biloba whole powder [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(12): 79–84.
- [17] MAGNI C, MENDOZA DD, KONINGS WN, *et al.* Mechanism of citrate metabolism in lactococcus lactis: Resistance against lactate toxicity at low pH [J]. *Journal of Bacteriology*, 1999, 181(5): 1451.
- [18] 刘荣, 刘永旭, 郑志强. 热风干燥对甘蓝粉持水力、持油力及抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(12): 67–74.
LIU R, LIU YX, ZHENG ZQ. Effect of hot air drying on water-holding capacity, oil-holding capacity and antioxidant activity of cabbage powder [J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(12): 67–74.
- [19] NAN LJ, LI YS, TAO F, *et al.* Effects of different methods on reducing acid of papaya juice and papaya wine [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 559: 012016.
- [20] 江润生, 刘梦虎, 易香羽, 等. 干燥方式对银杏全粉品质及抗氧化能力分析[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 79–84
JIANG RS, LIU MH, YI XY, *et al.* Analysis of drying method on the quality and antioxidant capacity of Ginkgo biloba whole powder [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(12): 79–84.
- [21] CIRLINI M, RICCI A, GALAVERNA G, *et al.* Application of lactic acid fermentation to elderberry juice: Changes in acidic and glucidic fractions [J]. *LWT*, 2020, 118: 108779.
- [22] 李状, 朱德明, 李积华, 等. 振动超微粉碎对毛竹笋干物化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 259–263.
LI Z, ZHU DM, LI JH, *et al.* Effect of vibratory ultrafine grinding on physicochemical properties of bamboo shoots [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(3): 259–263.
- [23] 孙小晶, 李丹丹, 李莹, 等. 山楂果实提取物抗氧化能力[J]. *食品工业*, 2022, 43(12): 11–15.
SUN XJ, LI DD, LI Y, *et al.* Antioxidant capacity of hawthorn fruit extract [J]. *Food Industry*, 2022, 43(12): 11–15.
- [24] OUATTARA HD, OUATTARA HG, DROUX M, *et al.* Lactic acid bacteria involved in cocoa beans fermentation from ivory coast: Species diversity and citrate lyase production [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 256: 11–19.
- [25] 厉盈颖, 陈鑫, 张俊杰. 山楂酒发酵残渣利用工艺的研究[J]. *酿酒科技*, 2019(1): 105–109.
LI YY, CHEN X, ZHANG JJ. Research on the utilization process of fermentation residue of hawthorn wine [J]. *Liquor Science and Technology*, 2019(1): 105–109.

- [26] 卫子颜, 谢勇, 王滕滕, 等. 超微粉碎对米糠多酚的组成及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 138–144.
WEI ZY, XIE Y, WANG MM, *et al.* Effect of ultrafine grinding on the composition and antioxidant activity of phenolic compounds in rice bran [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 138–144.
- [27] YU YS, XIAO GS, XU YJ, *et al.* Changes of quality in the fruits of *Prunus mume* during deacidification by fermentation with *Lactobacillus fermentum* [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(2): 12769.
- [28] 刘战永. 超微粉碎对玫瑰花理化性质的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2016.
LIU ZY. Effect of ultrafine grinding on the physicochemical properties of roses [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2016.
- [29] ZHANG SY, SHANG ZX, LIU ZJ, *et al.* Flavor production in fermented chayote inoculated with lactic acid bacteria strains: Genomics and metabolomics based analysis [J]. Food Research International, 2023, 163: 112224.
- [30] WANG HY, LI L. Comprehensive evaluation of probiotic property, Hypoglycemic ability and antioxidant activity of lactic acid bacteria [J]. Foods, 2022, 11(9): 1363.
- [31] ZHANG Y, LIU WP, WEI ZH, *et al.* Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* [J]. LWT, 2020, 139: 110590.
- [32] CUI M, CHEN L, ZHOU, Z, *et al.* Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and safety concerns of hawthorn (*Crataegus genus*): A comprehensive review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 319(2): 117229.
- [33] YAN YH, ZHANG F, CHAI ZY, *et al.* Mixed fermentation of blueberry pomace with *L. rhamnosus* GG and *L. plantarum*-1: Enhance the active ingredient, antioxidant activity and health-promoting benefits [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 131: 110541.
- [34] HE YX, HU MW, HE WW, *et al.* Volatile compound dynamics during blueberry fermentation by lactic acid bacteria and its potential associations with bacterial metabolism [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103639.
- [35] 戚国伟, 于宁, 杨仕明, 等. 代谢组学技术在噪声性聋研究中的应用[J]. 中华耳科学杂志, 2022, 20(2): 242–246.
QI GW, YU N, YANG SM, *et al.* Application of metabolomics technology in the study of noise-induced deafness [J]. Chinese Journal of Otolaryngology, 2022, 20(2): 242–246.
- [36] UYENO Y, KONAKA R, SHIROTA M, *et al.* Ensiling fruit byproducts with inoculum of lactic acid bacteria strains [J]. Animal Nutrition and Feed Technology, 2016, (3): 515–519.
- [37] 由璐. 山楂超微粉对高脂膳食诱导的 C57BL/6J 小鼠肥胖的调控作用及素食营养餐粉研制[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2019.
YU L. Regulatory effect of hawthorn ultrafine powder on high-fat diet-induced obesity in C57BL/6J mice and the development of vegetarian nutritious meal powder [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology, 2019.
- [38] WANG H, HUANG Y, ZHU C. Effects of lactic acid bacteria fermentation on organic acids, volatile aroma components, and sensory quality of hawthorn pulp [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019.
- [39] YANG XZ, LIN, X, WEI QJ, *et al.* Understanding the influence of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid and melatonin treatments on the sweet and acidic flavors and citric acid metabolism of ‘Olinda’ orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 304: 111287.
- [40] LI T, FU S, HUANG X, *et al.* Biological properties and potential application of hawthorn and its major functional components: A review [J]. Journal of Functional Foods, 2022, 90: 104988.
- [41] 史资, 陈新, 刘梁. DPPH 法测定茄叶斑鸠菊不同极性部位的抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(9): 19–21.
SHI Z, CHEN X, LIU L. Determination of antioxidant activity of different polar parts of spotted dove by DPPH method [J]. Food Research and Development, 2017, 38(9): 19–21.
- [42] 唐毓, 李丽, 周平和, 等. 天然植物中黄酮类化合物的研究进展[J]. 现代畜牧兽医, 2016(5): 45–50.
TANG Y, LI L, ZHOU PH, *et al.* Research progress on flavonoids in natural plants [J]. Modern Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2016(5): 45–50.
- [43] 时羽杰, 邬晓勇, 糜加轩, 等. 核桃内种皮苦涩味品质代谢组学分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 54–64.
SHI YJ, WU XY, MI JX, *et al.* Metabolomics analysis of bitter and astringent taste quality of walnut seed coat [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(6): 54–64.
- [44] DI CAGNO, FILANNINO, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 248: 56–62.
- [45] ZHONG W, CHEN T, YANG H, *et al.* Isolation and selection of non-saccharomyces yeasts being capable of degrading citric acid and evaluation Its effect on kiwifruit wine fermentation [J]. Fermentation, 2020, 6(1): 25.
- [46] FUENTE BDL, LUZ C, PUCHOL C, *et al.* Evaluation of fermentation assisted by *Lactobacillus brevis* POM, and *Lactobacillus plantarum* (TR-7, TR-71, TR-14) on antioxidant compounds and organic acids of an orange juice-milk based beverage [J]. Food Chemistry, 2020, 343, 128414.
- [47] 夏丽琼, 徐长琼, 任秋芸, 等. 基于 UPLC-MS/MS 技术的张氏消肿定痛膏物质基础研究[J]. 湖南中医药大学学报, 2021, 41(11): 1705–1710.
XIA LQ, XY CQ, REN QY, *et al.* Research on the material basis of Zhang’s swelling and pain relief ointment based on UPLC-MS/MS technology [J]. Journal of Hunan University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 41(11): 1705–1710.
- [48] WEI M, WANG SY, GU P, *et al.* Comparison of physicochemical indexes, amino acids, phenolic compounds and volatile compounds in bog bilberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* under different pH conditions [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018(6): 2240–2250.
- [49] AKYILDIZ A, KARACA E, AGÇAM E, *et al.* Changes in quality attributes during production steps and frozen-Storage of pomegranate juice concentrate [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 92: 103548.
- [50] DU HX, WANG XP, YANG HG, *et al.* Effects of mulberry pomace polysaccharide addition before fermentation on quality characteristics of yogurt [J]. Food Control, 2023, 153: 109900.
- [51] EICHER C, COULON J, FAVIER H, *et al.* Citrate metabolism in lactic acid bacteria: Is there a beneficial effect for *Oenococcus oeni* in wine? [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 14: 1283220.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)