DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260423005
引用格式: 张宏, 李会珍, 张嘉, 等. 青枣果浆加工工艺优化及其活性成分与抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 41–50.
ZHANG H, LI HZ, ZHANG J, *et al*. Study on the optimization of processing technology for green jujube pulp and its active ingredient and antioxidant activities [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 41–50. (in Chinese with English abstract).

青枣果浆加工工艺优化及其活性成分与抗氧化活性研究

张 宏[1,2], 李会珍[1,2*], 张 嘉[3], 康振奎[3], 张志军[1,2], 郭彩蓉[1,2], 牛培蓉[1,2], 段佩君[1,2]

(1. 中北大学化学与化工学院, 太原 030051; 2. 山西大健康生物产业技术研究院, 太原 030100;
3. 山西天娇红生物科技有限公司, 吕梁 033000)

摘 要: 目的 优化青枣果浆加工工艺, 并探究其活性成分含量及抗氧化活性。**方法** 以山西板枣为原料, 以直接打浆为传统工艺对照, 比较直接打浆、微波辅助打浆和超声辅助打浆对果浆黄酮和多酚物质含量的影响, 确定最佳打浆方式; 采用单因素结合正交试验优化超声-酶解复合工艺, 测定果浆活性成分含量及抗氧化活性变化; 在此基础上, 比较工艺优化前后山西 9 种青枣果浆的活性成分含量及抗氧化性, 并通过标准化相对值热图分析筛选优质品种。**结果** 超声辅助打浆可显著提升果浆多酚含量, 为最佳打浆方式; 优化得到的超声-酶解复合工艺参数为: 超声功率 450 W、料液比 1:20 (*m*:*V*)、酶添加量 0.7%。在此条件下, 板枣果浆总黄酮含量达到(392.46±5.43) mg/100 g, 对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), $ABTS^{+}$]自由基清除能力的半数抑制浓度分别为 4.51 mg/mL 和 15.90 mg/mL, 总维生素 C、总膳食纤维含量提高了 25.23%和 0.88%。通过热图分析, 筛选出板枣、油枣和屯屯枣 3 个综合品质最优的青枣品种。**结论** 本研究优化确立了青枣果浆的最佳制备工艺, 可有效提升青枣果浆的活性成分含量与抗氧化活性, 为青枣果浆加工工艺优化与品种选择提供了理论支撑, 具备一定的应用价值及推广前景。

关键词: 青枣; 黄酮; 多酚; 维生素 C; 膳食纤维; 抗氧化; 工艺优化

Study on the optimization of processing technology for green jujube pulp and its active ingredient and antioxidant activities

ZHANG Hong[1,2], LI Hui-Zhen[1,2*], ZHANG Jia[3], KANG Zhen-Kui[3], ZHANG Zhi-Jun[1,2], GUO Cai-Rong[1,2], NIU Pei-Rong[1,2], DUAN Pei-Jun[1,2]

收稿日期: 2026-04-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1600100); 山西省科技创新人才团队专项(2024D151000140530104307820880 24); 山西省乡村产业融合发展项目(SXDJK202506002); 山西省重点研发计划项目(2024021406013)
第一作者: 张宏(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物活性成分与产品开发。E-mail: 2806685985@qq.com
***通信作者:** 李会珍(1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为植物活性成分与产品开发。E-mail: hzli@nuc.edu

(1. *School of Chemistry and Chemical Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *China*; 2. *Shanxi Institute of Biotechnology for Great Health Industry*, *Taiyuan* 030100, *China*; 3. *Shanxi Tianjiaohong Biotechnology Co*., *Ltd*., *Lüliang* 033000, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the processing technology of green jujube pulp and investigate its change s in active substances and antioxidant activity. **Methods** Shanxi Banzao was used as the raw material, with direct pulping as the traditional process reference, and the effects of direct pulping, microwave-assisted pulping, and ultrasonic-assisted pulping on the flavonoids and polyphenols content in the pulp were compared to determine the optimal pulping method. A single-factor and orthogonal experimental design was employed to optimize the ultrasonic-enzymatic hydrolysis composite process, and the content of active components and antioxidant activity in the pulp were measured. Subsequently, the active component content and antioxidant properties of 9 kinds of Shanxi green jujube pulps were compared before and after process optimization, and high-quality varieties were selected through standardized relative value heat map analysis. **Results** Ultrasonic-assisted pulping significantly increased the polyphenol content in the pulp and was identified as the optimal method. The optimized ultrasonic-enzymatic hydrolysis parameters were determined as follows: Ultrasonic power 450 W, feed-to-pulp ratio 1:20 (*m*:*V*), and enzyme addition rate 0.7%. Under these conditions, the total flavonoid content in Banzao pulp reached 392.46±5.43 mg/100 g, while the half maximal inhibitory concentration values for 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid ($ABTS^+$) scavenging capacities were as low as 4.51 mg/mL and 15.9 mg/mL, respectively. The total vitamin C and dietary fiber contents increased by 25.2% and 0.8%, respectively. Heat map analysis identified 3 green jujube varieties-Banzao, Youzao and Tuntun-as those with the highest overall quality. **Conclusion** This study optimized and established the optimal production process for green jujub pulp, and the content of its active ingredients and antioxidant activity are effectively enhanced. The findings provide theoretical support for optimizing the processing techniques and selecting suitable varieties of green jujube pulps, which demonstrate significant practical value and potential for widespread application.

KEY WORDS: green jujube; flavonoids; polyphenols; vitamin C; dietary fiber; antioxidant activity; process optimization

0 引 言

我国枣类资源丰富，其中，山西作为北方枣主产区，拥有太谷壶瓶枣、交城骏枣等 9 种特色品种。青枣作为我国重要的药食同源果品[1]，富含多糖、总酚、总黄酮、维生素等多种功能因子，具有抗氧化、调节肠道等多种生理活性[2]。然而，青枣在白熟期发育到脆熟期的过程中，常因裂果问题，造成资源浪费[3]。因此，在白熟期开展枣果加工利用，对延长枣产业链、助力乡村振兴具有重要现实意义。

白熟期枣功能成分突出，相关提取工艺与活性研究已成为热点[4]。但该原料极易褐变，且对加工条件敏感，限制了其深加工产品的开发[5]。目前研究多集中于传统蜜枣加工，而针对不同品种白熟期枣果在果浆加工过程中活性成分的释放规律及工艺优化研究仍较薄弱[6]。随着大健康产业发展，天然功能性食品需求攀升，本研究通过优化加工工艺保留功能因子，既能提升山西青枣附加值、减少产后损失，也能为市场提供多元化健康食品。

将青枣制备成果浆可较好保留多酚、黄酮、维生素 C 等功能成分，但果肉中纤维素、果胶、淀粉及多糖-蛋白质复合物会制约制浆过程，直接打浆难以充分破壁，易造成活性成分溶出率低、果浆品质不佳[3]。果蔬打浆深加工是影响产品最终品质的关键预处理环节，目前常用方法包括直接打浆、超声辅助打浆和微波辅助打浆[7]，其中超声辅助可通过空化效应破碎细胞、促进胞内活性物质释放，微波辅助能快速升温加速功能成分溶出[8]。同时，酶解技术可定向降解枣果中淀粉、蛋白质等大分子物质，提升果浆中有效成分的溶出[9−10]。现有研究多以单一酶作用或双酶同步添加为主，将超声技术与分步酶解相结合应用于青枣果浆加工的研究仍相对较少。超声-酶解协同打浆技术凭借空化效应与酶解作用的协同优势，可有效破碎植物细胞壁，促进功能成分溶出，兼具高效、高选择性及绿色环保的优势。基于此，本研究以 9 种山西常见青枣为研究对象，对比不同打浆方式的加工效果，通过单因素试验与正交试验优化超声-酶解协同打浆工艺参数，对比优化前后青枣果浆活性成分的含量与抗氧化活性，旨在为青枣打浆加工的工艺改进、品种筛选提供理论依据，以期推动山西乃至全国枣果深加工产业的技术升级与产品多元化发展。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验以山西 9 种常见青枣品种为材料，包括骏枣、壶

瓶枣、冬枣、梨枣、木枣、油枣、郎枣、屯屯枣及板枣。所有果实均直接从产地采收, 选择成熟度一致、无病虫害及机械损伤的新鲜果实, 采收后于 48 h 内完成处理, 未即时处理的样品置于 4 ℃低温冷藏保存, 以保证原料品质均一。

芦丁标准品、没食子酸标准品、Trolox 标准品、*D*-葡萄糖标准品、抗坏血酸标准品(纯度≥99%, 上海阿拉丁生化科技有限公司); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH, 纯度≥98%)、2,2'-联氮双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), $ABTS^{+}$, 纯度≥98%]、食品级 *α*-淀粉酶、碱性蛋白酶(酶活力≥20000 U/g)(美国 Sigma 公司); 亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、福林酚试剂、碳酸钠、草酸、2,6-二氯酚靛酚、十六烷基三甲基溴化铵、浓硫酸、苯酚、乙醇(分析纯, 天津市科秘欧化学试剂有限公司)。

1.2　仪器与设备

SD25-12DTD 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); HH-S 数显恒温磁力搅拌水浴锅(湖南前沿科技有限公司); JJ-1A 数显电动搅拌器(金坛市杰瑞尔电器有限公司); SHA-BA 双功能水浴恒温振荡器(江苏杰瑞尔电器有限公司); TG20.5 高速离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司); GZX-9146MBE 电热鼓风干燥箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); JL-4500A 电动食品加工机(多功能粉碎机)(永康市速锋工贸有限公司); ZYCGF 常规分析型超纯水机(四川卓越水处理设备有限公司); HZK-FA210 电子天平(精度 0.01 mg, 华志电子科技有限公司); P4PC 型紫外可见分光光度计(上海美谱达仪器有限公司); Super Max 2500F 型酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司)。

1.3　试验方法

1.3.1　打浆方式筛选

以板枣为试材, 经清洗、去核、切 1 cm×1 cm 小块后, 分别采用直接打浆、超声辅助打浆和微波辅助打浆(超声时间设 10、15、20、25、30 min, 微波时间设 5 min)处理, 每组 3 次重复。打浆完成后测定果浆中的黄酮和多酚含量, 确定最优打浆方式。不同打浆方式均在相同料液比条件下进行: 直接打浆组加入超纯水后, 利用高速组织捣碎机将果块打浆至浆液细腻无明显颗粒; 超声辅助打浆和微波辅助打浆均在超声和微波处理一定时间后, 再进行捣碎打浆。

1.3.2　酶解工艺

采用 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》方法并稍作修改, 酶解工艺流程设计如下: 青枣果浆的酶解采用分步双酶法。首先, 选取成熟度一致、无病虫害的青枣, 经清洗、去核后, 按料液比 1:15 (g:mL, 下同)加入蒸馏水, 利用超声辅助打浆 20 min 得到均匀果浆。调节果浆 pH 至 5~6, 加入 0.2%(以果浆质量计)的 *α*-淀粉酶(酶活力≥20000 U/g), 在 70 ℃下恒温振荡酶解 60 min 以进行淀粉液化并降低黏度。反应结束后加热至 90 ℃灭活 10 min。随后, 根据碱性蛋白酶最适条件调节 pH 至 7.5~8.0, 加入 0.2%的碱性蛋白酶酶(活力≥20000 U/g), 在 40 ℃下继续酶解 60 min 以进一步降解大分子蛋白质。酶解结束后, 将果浆置于 90 ℃水浴中加热 10 min 进行灭酶[11]。

1.3.3　单因素试验设计

选择总黄酮作为单因素优化核心指标, 依据前期打浆方式筛选结果: 总黄酮对不同处理条件的响应更灵敏、变化幅度更显著、峰值更突出, 相比总多酚更能精准区分不同工艺的优劣, 适合作为工艺优化的核心评价指标。

分别为因素 A: 超声时间为 10、15、20、25、30 min; 因素 B: 超声温度为 40、50、60、70、80 ℃; 因素 C: 料液比为 1:5、1:10、1:15、1:20、1:25; 因素 D: 超声功率为 350、400、450、500、550 W; 因素 E: 复合酶添加量为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% (*α*-淀粉酶与碱性蛋白酶质量比 1:1, 下同)。各因素的固定水平分别为超声时间 25 min、超声温度 60 ℃、料液比 1:15、超声功率 450 W、复合酶添加量 0.6%。

1.3.4　正交试验设计

根据单因素试验结果, 选取对枣浆品质影响显著的 3 个关键因素超声功率, 酶添加量和料液比, 设计 3 因素 3 水平正交试验, 以总黄酮含量为综合评价指标, 探究各因素对枣浆品质的影响主次顺序, 确定超声-酶解协同辅助打浆的最优工艺参数组合。正交试验的因素和水平见表 1。

表 1　正交试验因素水平表

Table 1　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	A(超声功率) /W	*B*(酶添加量) /%	*C*(料液比) (g:mL)
–1	450	0.5	1:10
0	500	0.6	1:15
1	550	0.7	1:20

1.3.5　指标测定方法

(1)总黄酮含量测定

参考文献方法[12–13]并稍作修改, 分别吸取 0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 mL 芦丁标准溶液(0.1 mg/mL)在 10 mL 棕色比色管内, 先加入体积分数为 5%的亚硝酸钠溶液 0.3 mL, 并在避光条件下反应 6 min; 再加入体积分数为 10%的硝酸铝溶液 0.3 mL, 继续在避光环境中反应 6 min; 准确移取 4 mL 质量分数为 4%的氢氧化钠溶液, 用蒸馏水稀释并定容至 10 mL, 混匀后静置 15 min, 在 510 nm 波长

下测定体系吸光度。以吸光度值为纵坐标(*Y*)、芦丁标准溶液浓度为横坐标(*X*, mg/mL), 经线性拟合绘制标准曲线。方程为 Y=14.107X+0.0077, 决定系数 r^2=0.9958, 黄酮的含量计算如公式(1)所示。

$$W=\frac{C\times V\times a}{m} \tag{1}$$

式中: a 为测定液稀释倍数; C 为测定液中总黄酮质量浓度, mg/mL; V 为提取液体积, mL; m 为果渣质量, g; W 为黄酮含量, mg/g。

(2)总多酚含量测定

总酚含量的测定参照 MA 等[14]并稍做调整。取 0.1 mL 待测样液, 依次加入 0.4 mL 体积分数为 70%的乙醇溶液、2.5 mL 蒸馏水、0.5 mL 福林酚试剂以及 1.5 mL 质量分数为 7.5%的碳酸钠溶液, 混匀后于避光条件下静置 2 h, 随后在 765 nm 波长处测定其吸光度。以没食子酸系列浓度为横坐标(*X*, mg/mL)、对应吸光度为纵坐标(*Y*)绘制标准曲线, 以此计算样品中总酚的含量, 方程为 Y=16.45X+0.0069, r^2=0.9993。

(3)维生素 C 含量测定

维生素 C 含量的测定采用直接滴定法。参照 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》和胡孝贵[15]中的 2,6-二氯靛酚滴定法。取 0.5 g 样品加入 40 mL 的 20 g/L 草酸溶液后放置于低温、避光条件下, 在 9000 r/min 条件下进行离心 4 min, 取 10 mL 上清液置于容器中, 以 2,6-二氯酚靛酚溶液进行滴定, 当溶液恰好出现微红色且维持 30 s 不消退时, 停止滴定并记录所用样液体积, 平行测定 3 次后取平均值, 记为 V_1。取 10 mL 质量浓度为 20 g/L 的草酸溶液, 以相同滴定剂滴定至终点, 记录滴定体积, 记为 V_2。以 2,6-二氯酚靛酚溶液滴定质量浓度为 0.1 mg/mL 的标准抗坏血酸溶液, 当溶液呈现微红色并在 30 s 内不褪色时, 记下滴定所用体积, 定为 V_3。维生素 C 含量的计算如公式(2)所示。

$$V_{\mathrm{C}}=\frac{0.1\times 40\times(V_1-V_2)}{10\times 0.5\times V_3}\times 100 \tag{2}$$

式中: V_{C} 为样品中维生素 C 的含量, mg/100 g; V_1 为滴定样品试液消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; V_2 为滴定空白试液(10 mL 20 g/L 草酸溶液)消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; V_3 为滴定 0.1 mg/mL 标准抗坏血酸溶液消耗 2,6-二氯靛酚溶液的体积, mL; 0.1 为标准抗坏血酸溶液质量浓度, mg/mL; 40 为样品提取液的定容体积, mL; 10 为用于滴定的样品提取液体积, mL; 0.5 为样品称样量, g; 100 为换算为每 100 g 样品含量的系数。

(4)总膳食纤维含量测定

参照 JI 等[16]的方法并稍加修改。按乙醇与试样液体积比 4:1, 加入已预热至 60 °C 的 95%乙醇, 室温下静置沉淀 1 h。随后, 将含沉淀的混合液转移至坩埚中抽滤, 并用 15 mL 78%的乙醇, 15 mL 95%的乙醇及 15 mL 丙酮各洗涤 2 次。将坩埚与残渣于 105 °C 下烘干过夜, 根据烘干后残渣质量进行定量计算, 总膳食纤维含量的计算公式如(3)所示。

$$X/\%=\frac{m_1-m_0}{m}\times 100\% \tag{3}$$

式中: X 为样品中目标沉淀组分含量, %; m_1 为坩埚+烘干后残渣质量, g; m_0 为空坩埚恒重质量, g; m 为样品质量, g。

(5)不溶性、可溶性膳食纤维含量测定

参照邓爱妮等[17]的方法并略作调整。取待测样液过滤, 经洗涤过滤后得到的滤渣即为不溶性膳食纤维, 采用 10 mL 70 °C 热水对其洗涤 2 次, 随后烘干并称量质量。滤液中含有可溶性膳食纤维, 取 4 倍体积的 95%乙醇, 预先加温至 60 °C, 随后加入样品中, 在室温条件下静置沉淀 1 h。过滤后获得可溶性膳食纤维粗品; 再依次用 78%乙醇、95%乙醇及丙酮对残渣进行洗涤, 将带有残渣的坩埚置于 105 °C条件下烘干至恒重, 最终计算样品中残渣质量。

(6) DPPH 自由基清除能力测定

参考文献[18–19]的方法并有所修改, 取 2 mL 青枣果浆提取液, 加入 2 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液, 充分混匀后, 在 37 °C 条件下避光反应 30 min。以维生素 C 作为阳性对照, 在 517 nm 波长下测定吸光度, DPPH 自由基清除率计算如公式(4)所示。

$$M/\%=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \tag{4}$$

式中: M 为 DPPH 自由基清除率, %; A_0 为去离子水代替样品测得的吸光度; A_1 为为样品溶液测得的吸光度; A_2 为无水乙醇代替 DPPH 自由基测得的吸光度。

(7) $ABTS^+$自由基清除能力测定

参考 ZHAO 等[20]的方法略作修改。将浓度为 7 mmol/L 的 ABTS 溶液与 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液按 1:1 的体积比混合, 置于 4 ℃冰箱中反应 12~16 h, 所得产物即为 ABTS 储备液。使用前, 取适量该储备液, 用无水乙醇进行稀释, 直至其在 734 nm 波长处的吸光度达到 0.70, 即得到 ABTS 工作液。移取 0.2 mL 经 20 倍稀释的青枣果浆试液于试管中, 加入 3.8 mL ABTS 工作液, 经漩涡混匀后置于避光条件下静置显色 30 min, 最后在 734 nm 波长处测定其吸光度, 记为 A_s。以无水乙醇替代 ABTS 工作液, 按相同操作测定吸光度, 记为 A_0; 另以无水乙醇替代果浆, 同法测得吸光度, 记为 A_y。$ABTS^+$清除率计算如公式(5)所示。

$$N/\%=(1-\frac{A_s-A_0}{A_y})\times 100\% \tag{5}$$

式中: N 为 $ABTS^+$自由基清除率, %; A_y 为无水乙醇代替样品测得的吸光度; A_s 为样品溶液测得的吸光度; A_0 为无水乙醇代替 ABTS 测得的吸光度。

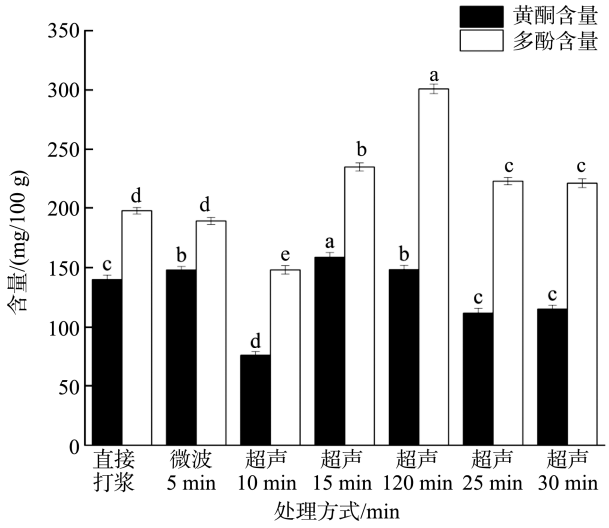
1.4　数据处理

试验结果以平均值±标准偏差表示, 采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析, Tukey 多重比较法进行组间差异显著性分析, 采用 Design-Expert 13 进行正交试验设计与响应面优化分析, 利用 Origin 2024 软件绘制图表。对原始测定数据采用 Z-score 标准化法进行处理, 基于标准化后数据开展相关性分析及综合评价等统计分析, 以 $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。

2　结果与分析

2.1　打浆方式的确定

不同打浆方式对板枣果浆总黄酮和总多酚含量的影响如图 1 所示。直接打浆组仅依靠机械破碎, 未能有效破坏细胞内部结构, 其总多酚和总黄酮显著低于超声 15 min 及 20 min 处理组, 这与 LIU 等[19]在红枣中的报道一致, 表明单纯机械打浆难以充分释放结合于细胞壁的酚类物质。微波 5 min 处理虽可通过热效应促进活性成分溶出, 其总多酚提升效果显著低于超声 15 min 及以上时长的处理组, ALKALTHAM 等[21]在微波处理植物茎秆时同样发现, 热作用会引发多酚氧化酶激活和酚类非酶褐变, 导致部分多酚损失。超声处理对黄酮、多酚的溶出呈现先升后降规律, 总多酚含量随超声时间延长先升高, 在 20 min 达到峰值 300.94 mg/100 g 后开始下降; 总黄酮含量在超声 15 min 达到峰值 158.56 mg/100 g。已有研究表明, 超声处理时长过长会造成植物细胞活性成分结构破坏、发生氧化降解[22], 赵超等[23]在黄酮提取工艺研究中也证实, 表明过长时间的超声会导致黄酮类成分发生严重氧化降解。综合来看, 超声 20 min 可在最大化释放总多酚的同时, 维持较高的黄酮保留率, 是板枣果浆活性成分提取的最优打浆方式。



注: 不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$), 下图同。

图 1　不同提取方法对骏枣黄酮和多酚含量的影响

Fig.1　Effects of different extraction methods on the contents of flavonoids and polyphenols in Jun jujube

2.2　单因素试验结果

2.2.1　超声时间对板枣黄酮含量的影响

由图 2(A)可得, 随超声时间延长, 黄酮含量呈先升高后降低的趋势。10~25 min 内, 黄酮含量持续上升, 25 min 时达到峰值为 248 mg/100 g。这是因为超声空化效应随时间累积, 逐步破碎枣果细胞壁, 促进胞内黄酮溶出, 同时酶解作用协同降解淀粉与蛋白质, 进一步降低传质阻力。值得注意的是, 本研究中黄酮达到峰值的时间(25 min)长于 LIU 等[19]在红枣中报道的 15~20 min, 这可能与原料差异有关, 白熟期青枣细胞壁中果胶和纤维素含量较高[24],

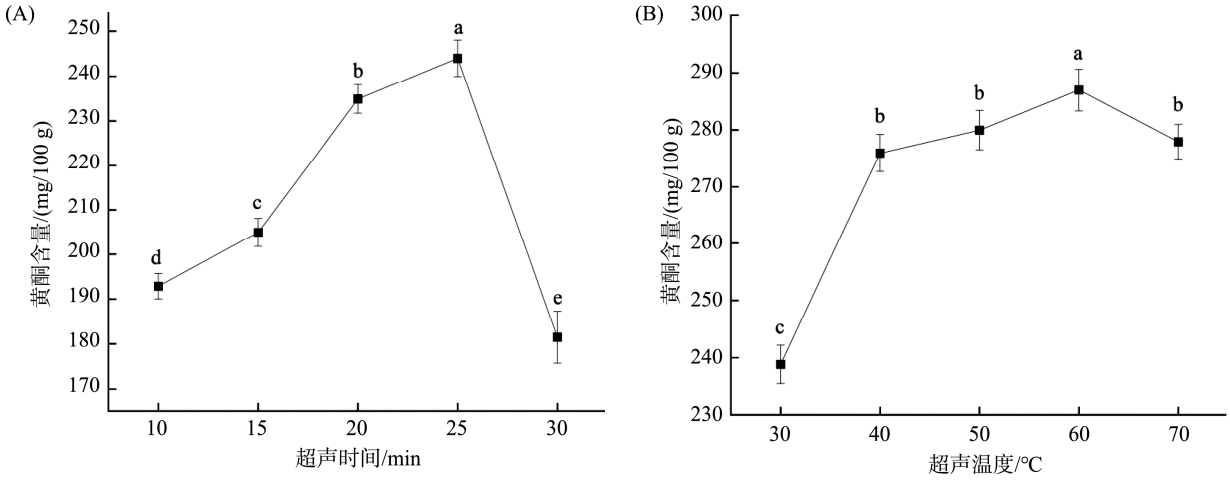


图 2　不同因素对板枣黄酮含量的影响

Fig.2　Effects different factors on the flavonoid content of Ban jujube

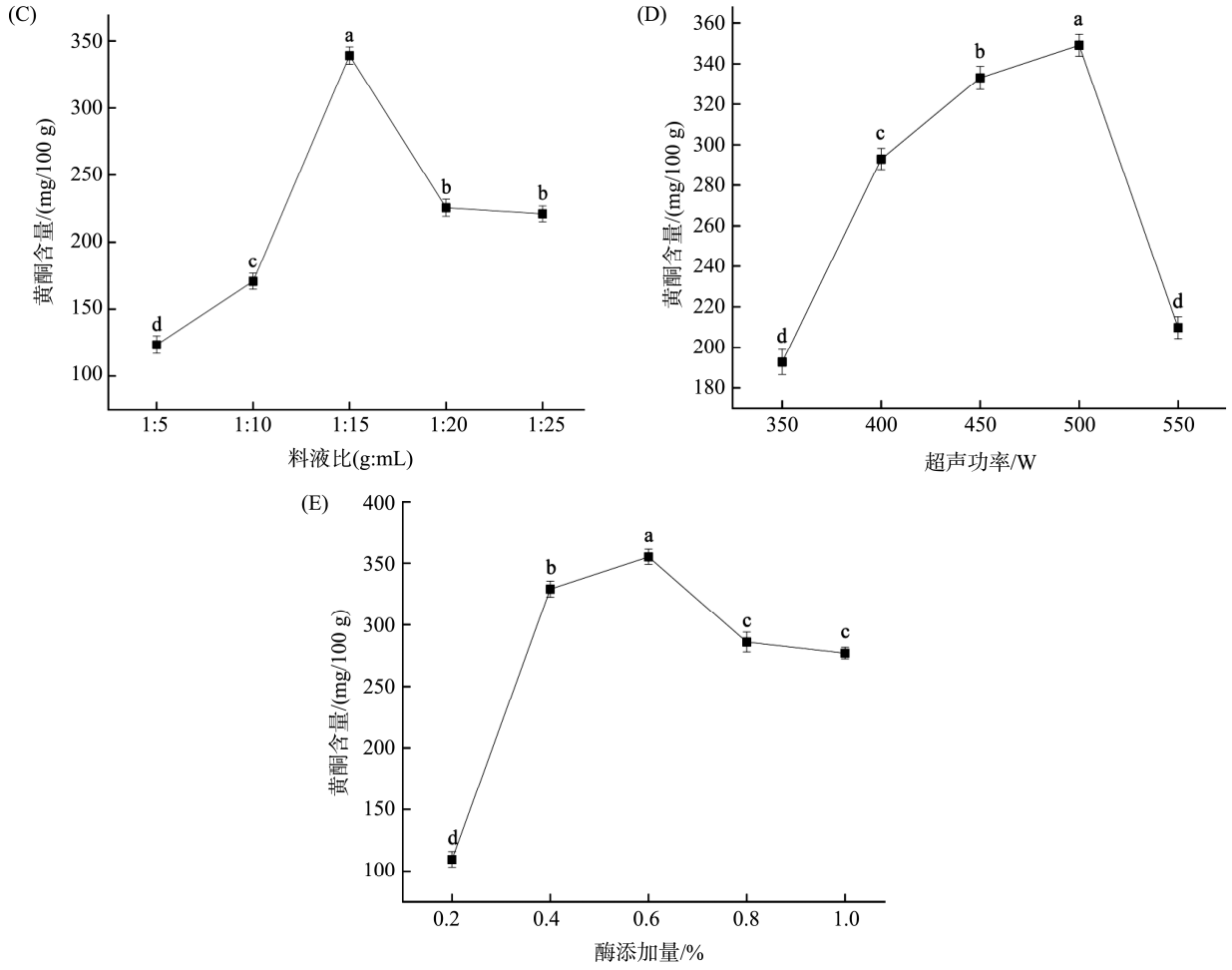


图 2(续) 不同因素对板枣黄酮含量的影响

Fig.2 Effects different factors on the flavonoid content of Ban jujube

需要更长时间的空化作用才能有效破壁。超过 25 min 后，黄酮含量开始显著下降。延长超声处理时间易引发体系局部过热，进而加剧黄酮类物质的氧化降解进程，造成其有效含量显著降低[25]。因此，确定超声时间较优水平为 25 min。

2.2.2 超声温度对板枣黄酮含量的影响

由图 2(B)可得，随超声温度增加，黄酮类物质含量呈先升高后降低趋势。30~60 ℃范围内，黄酮含量逐步上升，60 ℃时达到最高为 286.96 mg/100 g。适宜温度可提升 *α*-淀粉酶和碱性蛋白酶的活性，增强淀粉水解和蛋白水解效率，同时促进黄酮分子的扩散溶出[23]。超过 60 ℃后，黄酮含量显著下降(P<0.05)。高温会导致酶快速失活，同时加剧热敏性黄酮的热降解与氧化损失[26]。与 LIU 等[19]报道的最佳提取温度 55 ℃相比，本研究的最佳温度略高(60 ℃)，可能与白熟期青枣中淀粉含量较高、需要更高温促进淀粉糊化有关[24]。因此，确定超声温度较优水平为 60 ℃。

2.2.3 料液比对板枣黄酮含量的影响

由图 2(C)可得，随料液比增加，黄酮类物质含量呈先升高后降低的趋势。1:5~1:15 范围内，黄酮含量逐步上升，1:15 时达到峰值为 339.10 mg/100 mL。充足溶剂可降低体系黏度，增强传质效率，避免黄酮分子在胞内聚集[26]。ZHU 等[13]在枣皮黄酮超声提取研究中也发现，适度提高料液比可显著改善黄酮溶出效果，而溶剂比例过高会造成活性成分过度稀释。1:15 后，黄酮含量开始下降。过度稀释会降低底物与酶的接触浓度，同时导致黄酮浓度被稀释，检测值下降。因此，确定料液比较优水平为 1:15。

2.2.4 超声功率对板枣黄酮含量的影响

由图 2(D)可得，随超声功率增加，黄酮类物质含量呈先升高后降低趋势。350~500 W 范围内，黄酮含量显著提升，500 W 时达到峰值为 349.13 mg/100 g。功率提升增强了空化效应，细胞破壁效率大幅提高，黄酮溶出量显著增加。超声功率高于 500 W 后黄酮含量开始下降，说明过高功率会产生过度破碎，引发局部过热，导致热敏性黄酮热

降解与氧化分解, 同时增加能耗[27]。SHU 等[27]在超声辅助提取黄酮时也报道了类似的最佳功率范围, 因此, 确定超声功率为 500 W。

2.2.5　酶添加量对板枣黄酮含量的影响

由图 2(E)可得, 随酶添加量增加, 黄酮含量呈先升高后下降并趋于平缓趋势。当酶添加量在 0.2%~0.6% 范围内, 黄酮含量持续上升, 当酶添加量为 0.6%时达到峰值为 355.14 mg/100 g。适宜用量的 *α*-淀粉酶可有效降解淀粉、降低体系黏度, 碱性蛋白酶能够破坏细胞壁结构、解离黄酮与蛋白质结合态复合物, 在超声协同作用下促进胞内黄酮类物质充分溶出[24]。当酶添加量超过 0.6%后, 黄酮含量开始下降。体系可降解的细胞壁底物有限, 继续增加酶用量无法进一步提升破碎效果, 反而增加成本。SHI 等[28]在枣代谢物分析中发现, 碱性蛋白酶处理可使总黄酮得率提高 12%~15%, 归因于黄酮-蛋白复合物的解离。本研究结果与上述报道一致, 验证了蛋白酶在黄酮提取中的辅助价值。因此, 确定酶添加量为 0.6%。

2.3　正交试验结果

本研究选取对黄酮提取效果影响更为显著的超声功率、酶添加量、料液比 3 个关键因素开展正交优化, 超声时间与超声温度采用单因素确定的最优值固定不变。

以超声功率(*A*)、酶添加量(*B*)、料液比(*C*)为关键因素设计正交试验, 结果见表 2, 方差分析见表 3。

表 2　正交试验结果与极差分析

Table 2　Results and range analysis of the orthogonal test

序号	*A*(超声功率)/W	*B*(酶添加量)/%	*C*(料液比)(g:mL)	黄酮含量/(mg/100 g)
1	550	0.5	1:20	289.32
2	450	0.7	1:15	369.01
3	550	0.7	1:10	318.35
4	450	0.6	1:20	354.96
5	500	0.7	1:20	375.12
6	550	0.6	1:15	245.36
7	500	0.5	1:15	287.91
8	500	0.6	1:10	320.0
9	450	0.5	1:10	330.06
K_1	1054.03	907.29	968.41	
K_2	983.03	920.32	902.28	
K_3	853.03	1062.48	1019.40	
k_1	351.34	302.43	322.80	
k_2	327.68	306.77	300.76	
k_3	284.34	354.16	339.80	
R	67.00	51.73	39.04	

表 3　正交试验方差分析

Table 3　Analysis of variance for the orthogonal test

因素	偏差平方和	自由度	均方	*F*	*P*
A(超声功率)/W	6926.947	2	3463.474	52.876	0.019
B(酶添加量)/%	4940.188	2	2470.094	37.710	0.026
C(料液比)(g:mL)	2298.736	2	1149.368	17.547	0.054
误差	131.005	2	65.502		

注: $P<0.01$ 表示差异极显著; $P<0.05$ 表示差异显著。

由表 2 可知, 各因素对板枣黄酮含量的影响主次顺序为: 超声功率(*A*)>酶添加量(*B*)>料液比(*C*), 最佳组合为 $A_1B_3C_3$。正交试验最优组合与单因素试验峰值不完全一致, 可能是由于因素间存在交互作用, 并非单一因素独立影响提取效果。

为进一步明确各因素对黄酮提取效果的影响程度及显著性, 基于正交试验结果进行方差分析, 结果见表 3。

由表 3 可知, 超声功率和酶添加量对板枣果浆黄酮提取效果显著($P<0.05$), 料液比对板枣果浆黄酮提取效果不显著($P>0.05$), 与表 2 中分析结果一致。结合单因素试验结果, 确定超声-酶解协同辅助打浆最优工艺参数为: 超声功率 450 W、酶添加量 0.7%、料液比 1:20。

在最优工艺参数下对板枣进行 3 次重复验证试验, 测得总黄酮平均含量为(392.25±1.52) mg/100 g, 均高于表 2 中的黄酮含量, 说明本工艺条件合理, 稳定性较好。

2.4　工艺优化对青枣果浆的影响

2.4.1　工艺优化对青枣果浆活性成分含量的影响

为系统评价工艺优化效果, 测定了 9 种山西代表性青枣品种在优化前后果浆中总黄酮、总多酚、维生素 C、总膳食纤维及可溶性膳食纤维的含量, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 除油枣、屯屯枣外, 优化后不同品种青枣果浆的总黄酮含量均显著升高($P<0.05$), 这是因为超声波以及酶解均可以更好地使果肉细胞壁遭到破坏, 有利于黄酮类物质浸提及释放, 同时也降低对热敏性营养成分造成的影响[29]。而油枣、屯屯枣总黄酮含量略有下降, 主要受品种特异性影响: 油枣果皮木质化程度高、淀粉含量丰富, *α*-淀粉酶过度降解胞内淀粉会使部分结合态黄酮游离, 在超声空化效应下发生氧化降解, 同时蛋白酶过度水解细胞壁蛋白也会加剧活性成分流失[30], 因此出现含量降低现象, 属于品种对工艺的特异性响应, 与整体工艺提升品质的规律并不冲突。优化后 9 个青枣品种的总黄酮含量由高到低排序为: 板枣>油枣>冬枣>屯屯枣>木枣>郎枣>骏枣>梨枣>壶瓶枣。其中板枣优化后总黄酮、总多酚、总维生素 C、总膳食纤维和可溶性膳食纤维含量分别提升 13.68%、0.65%、0.64%、25.23%、0.88%和 20.70%, 除多酚外, 其它活性成分含量均显著提升($P<0.05$)。相比之下, 油枣为工艺适配性较差品种, 总黄酮含量和总膳食纤维含量显著下

降(P<0.05), 总多酚无明显差异(P>0.05), 仅总维生素 C 和可溶性膳食纤维含量显著提升(P<0.05)。

2.4.2 工艺优化前后对青枣果浆抗氧化性的影响

本研究采用 DPPH 自由基和 ABTS$^+$自由基体外抗氧化模型, 以半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})为评价指标, 具体结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 优化后不同品种青枣果浆的抗氧化活性存在一定差异, 且部分品种间差异达到显著水平(P<0.05)。在 DPPH 自由基清除体系中, IC_{50} 由低到高依次为板枣<冬枣<木枣<油枣<屯屯枣<郎枣<骏枣<梨枣<壶瓶枣; 在 ABTS$^+$自由基清除体系中, IC_{50} 由低到高依次为油枣<板枣<屯屯枣<木枣<冬枣<骏枣<郎枣<梨枣<壶瓶枣。作为 DPPH 体系抗氧化活性的最优品种, 板枣的 IC_{50} 低至(4.51±0.14) mg/mL; 其 ABTS$^+$自由基清除体系中 IC_{50} 为(15.9±0.23) mg/mL, 仅次于油枣。综合两种体外抗氧化评价体系可知, 板枣、油枣和屯屯枣的综合抗氧化能力表现突出, 显著优于其他品种。这可能是由于其果浆中富含多酚和黄酮等活性物质, 具备良好的供氢和提供电子的能力[24]。

表 4 工艺优化前后果浆活性成分对比

Table 4 Comparison of active ingredient content in pulp before and after process optimization

不同种类	对比	总黄酮/(mg/100 g)	总多酚/(mg/100 g)	总维生素 C /(mg/100 g)	总膳食纤维含量/%	可溶性膳食纤维含量/%
骏枣	优化前	185.96±3.24	251.84±4.16	31.25±1.26	6.38±0.14	0.67±0.19
	优化后	206.14±3.56**	289.40±4.78**	43.63±1.57**	6.68±0.15*	1.34±0.19*
屯屯枣	优化前	273.53±4.35	292.10±5.25	92.15±2.33	8.46±0.23	2.05±0.26
	优化后	259.62±3.85*	348.12±6.33**	139.25±3.16**	8.88±0.24*	2.16±0.28
梨枣	优化前	114.44±2.45	187.15±3.65	85.63±2.44	4.35±0.13	1.30±0.17
	优化后	194.18±3.96**	221.43±4.73**	126.45±3.26**	4.66±0.14*	2.22±0.17**
郎枣	优化前	194.65±3.46	272.65±4.71	127.64±2.75	8.48±0.23	3.73±0.26
	优化后	230.95±3.85**	281.65±4.93*	137.43±2.96*	8.90±0.24*	4.69±0.27**
油枣	优化前	344.72±5.33	382.61±6.43	59.68±1.83	9.37±0.25	4.15±0.29
	优化后	332.89±4.65*	381.03±6.26	70.91±2.14**	9.07±0.23*	4.61±0.26**
壶瓶枣	优化前	137.17±2.75	182.12±3.58	28.35±1.43	4.71±0.14	0.69±0.18
	优化后	186.09±3.66**	284.72±5.48**	38.18±1.74**	4.74±0.14	0.72±0.18
木枣	优化前	227.41±3.75	328.43±5.93	40.01±1.63	6.04±0.15	1.75±0.19
	优化后	247.66±4.16**	309.64±5.73*	60.00±2.24**	6.12±0.15*	1.70±0.20
冬枣	优化前	257.15±4.33	301.58±5.33	24.95±1.23	3.47±0.11	1.89±0.14
	优化后	269.38±4.56*	306.56±5.43	35.29±1.76**	3.84±0.12*	2.55±0.14*
板枣	优化前	345.05±5.63	391.17±6.73	71.26±2.43	12.56±0.33	5.35±0.38
	优化后	392.26±5.43**	393.69±6.63	89.24±2.96**	12.67±0.34*	6.46±0.16**

注: 同品种与优化前相比, *表示差异显著(P<0.05), **表示差异极显著(P<0.01), 不区分含量升高或降低。

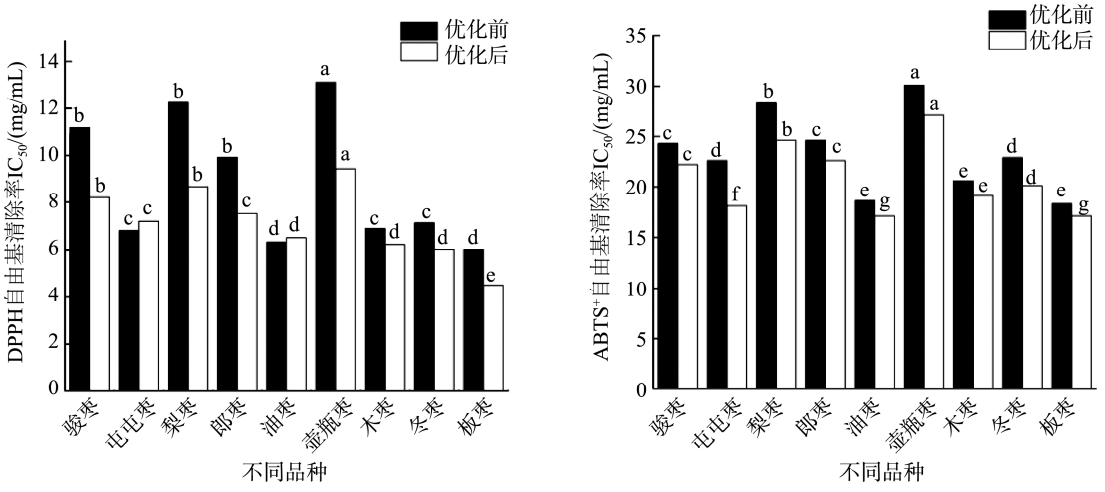


图 3 工艺优化前后不同品种青枣果浆 DPPH 与 ABTS$^+$自由基清除率 IC_{50} 对比

Fig.3 Comparison of IC_{50} values for DPPH and ABTS$^+$ radical scavenging activities of green jujube pulp from different cultivars before and after process optimization

2.4.3　不同品种青枣果浆活性成分与抗氧化活性的相关性分析

为明确不同品种青枣果浆中活性成分含量与抗氧化活性的内在关联，本研究采用 Pearson 相关性分析，绘制了标准化相对值热图[图 4(A)]与相关性气泡图[图 4(B)]，结果如图 4 所示。其中，抗氧化活性指标(DPPH 自由基 IC_{50}、$ABTS^+$自由基 IC_{50})已进行反向归一化处理，即数值越接近 1 代表抗氧化活性越强。

从图 4(A)可知，不同品种青枣果浆中总黄酮、总多酚、总维生素 C、总膳食纤维及可溶性膳食纤维的含量存在显著差异，其中板枣的活性成分含量整体处于较高水平，壶瓶枣的含量相对较低，品种间差异可能与遗传特性、生长环境等因素相关[30]。

从图 8(B)可知，总多酚、总黄酮与抗氧化活性呈极强正相关，气泡大且颜色深红，说明二者是青枣果浆抗氧化能力的主要物质基础。总维生素 C 与抗氧化活性的相关系数较小，未呈现出明显相关性，这并非维生素 C 自身不具备抗氧化能力，而是由于青枣品种间维生素 C 含量差异较小，且青枣果浆中总多酚、总黄酮含量高、抗氧化能力强，在整体抗氧化体系中占据绝对主导地位，维生素 C 的贡献被显著掩盖，因此难以体现出明显相关性[31]。总膳食纤维与可溶性膳食纤维虽与抗氧化活性呈微弱正相关，但相关强度远低于多酚与黄酮，对抗氧化活性的实际贡献有限。综上，青枣果浆的抗氧化能力主要由多酚类和黄酮类物质决定，维生素 C 与膳食纤维并非其抗氧化活性的主要影响因子。

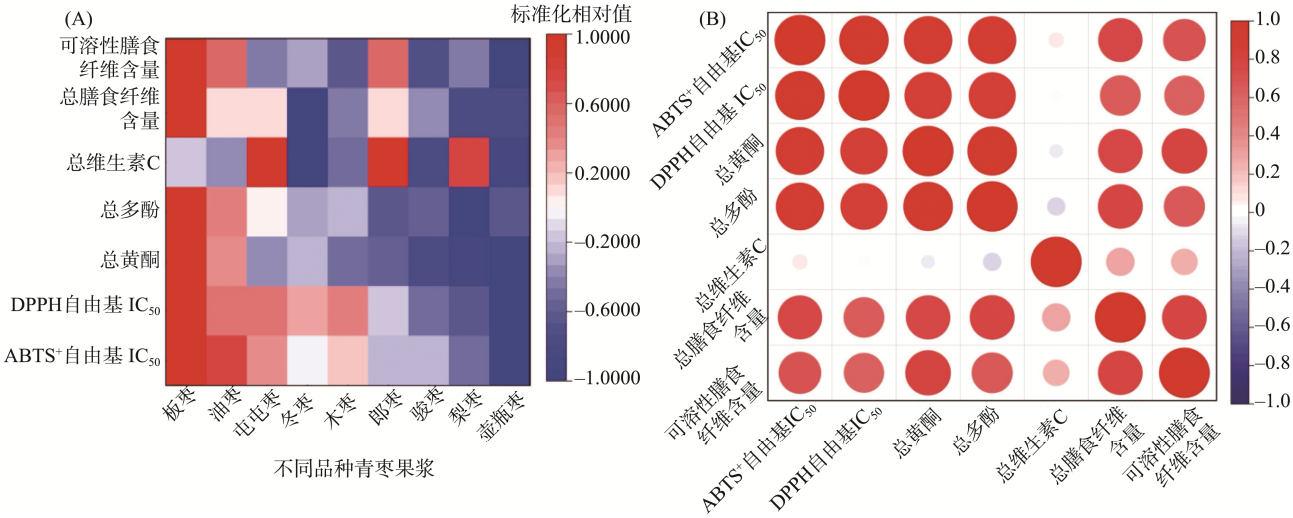


图 4　标准化相对值热图(A)及相关性气泡图(B)

Fig.4　Standardized relative value heat map (A) and correlation bubble chart (B)

3　讨论与结论

本研究通过单因素与正交试验确定了板枣果浆最佳加工工艺为：超声功率 450 W、酶添加量 0.7%、料液比 1:20，在此条件下板枣果浆总黄酮和总多酚含量达到最大值，分别为(392.26±5.43) mg/100 g 和(393.69±6.63) mg/100 g。DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基清除率的 IC_{50} 分别为(4.51±0.14) mg/mL 和(15.9±0.23) mg/mL，表明了超声-酶解协同破壁增效机制对活性成分释放与抗氧化性能提升的关键作用。对山西 9 种青枣果浆总黄酮、总多酚、维生素 C、总膳食纤维及可溶性膳食纤维核心指标进行了测定，并进行标准化相对值热图分析，筛选出板枣、油枣、屯屯枣为综合品质最优的 3 个青枣品种，不同品种对优化工艺的响应差异(如油枣黄酮下降)提示细胞壁结构差异导致的过度敏感，工艺参数需依品种特性调整；Pearson 相关性分析证实，总多酚与总黄酮是青枣果浆抗氧化活性的主要物质基础，需要指出的是，本研究仅对果浆中总酚酸、总黄酮类活性成分进行初步分析，尚未针对各类酚酸单体、黄酮单体开展精准分离鉴定与定量检测。后续研究可采用高效液相色谱-质谱技术，深入分离、鉴定并定量果浆中的关键功能性活性成分，系统明晰其活性物质基础与作用机制，为该果浆的深度开发利用提供更为全面、科学的理论依据。本研究明确了青枣果浆制备的适宜工艺与优质加工品种，这为山西青枣资源的高值化利用及功能性食品开发提供了重要的理论依据。

参考文献

[1] 郭慧. FHM 公司胶原蛋白固体饮料营销策略研究[D]. 上海：上海外国语大学, 2019.
GUO H. Research on the marketing strategy of collagen solid beverage in FHM company [D]. Shanghai: Shanghai International Studies University, 2019.

[2] 赵晶. 蒲公英超微粉粉体特征及抗氧化研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学, 2020.
ZHAO J. Study on powder characteristics and antioxidant of dandelion superfine powder [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020.

[3] 李佳美，刘昱迪，王坤华，等. 黄秋葵浓缩汁加工过程中的品质变化

[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 246–257.
LI JM, LIU YD, WANG KH, *et al*. Quality changes of okra concentrated juice during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 246–257.

[4] 冀晓龙, 尹明松, 侯春彦, 等. 红枣多糖提取、分离纯化及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 346–353, 358.
JI XL, YIN MS, HOU CY, *et al*. Research progress on extraction, separation, purification and biological activity of jujube polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 346–353, 358.

[5] 李文涛, 陈芹芹, 刘海瀛, 等. 不同鲜枣品种蜜枣加工适宜性评价[J]. 现代食品科技, 2025, 41(9): 199–209.
LI WT, CHEN QQ, LIU HY, *et al*. Processing suitability evaluation of candied jujube with different fresh jujube varieties [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(9): 199–209.

[6] 石建春, 王愈, 李志刚, 等. 三种干燥方法对不同采收期木枣干制品质影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 98–106.
SHI JC, WANG Y, LI ZG, *et al*. Effects of three drying methods on drying quality of wood jujube at different harvest periods [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 98–106.

[7] 李毅翔, 陈芋霏, 王艳艳. 超声-微波协同辅助优化酸枣果肉多糖提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国食物与营养, 2023, 29(1): 23–28.
LI YX, CHEN YF, WANG YY. Optimization of ultrasonic-microwave synergistic assisted extraction process and antioxidant activity of sour jujube pulp polysaccharides [J]. Food and Nutrition in China, 2023, 29(1): 23–28.

[8] CERIO DDE, TRIGUEROS E. Evaluating the sustainability of emerging extraction technologies for valorization of food waste: Microwave, ultrasound, enzyme-assisted, and supercritical fluid extraction [J]. Agriculture, 2025, 15(19): 2100.

[9] LIU M, WANG J, WANG L, *et al*. The historical and current research progress on jujube-a superfruit for the future [J]. Horticulture Research, 2020, 7(1): 1–15.

[10] DOU JF, KOU XH, WU CE, *et al*. Recent advances and development of postharvest management research for fresh jujube fruit: A review [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 310: 111769.

[11] GUO YT, NAN SH, QIU CC, *et al*. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides: Extraction efficiency, antioxidant activity, and structure features [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107088.

[12] 丘苑新, 张泽雄, 何娣, 等. 超声波辅助提取柚树叶黄酮及其抗氧化、抑菌能力研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 174–178.
QIU YX, ZHANG ZX, HE D, *et al*. Ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from pomelo leaves and its antioxidant and antibacterial activities [J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 174–178.

[13] ZHU J, KOU X, WU C, *et al*. Enhanced extraction of bioactive natural products using ultrasound-assisted aqueous two-phase system: Application to flavonoids extraction from jujube peels [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133530.

[14] MA YJ, GUO XD, LIU H, *et al*. Cooking, textural, sensorial, and antioxidant properties of common and tartary buckwheat noodles [J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22: 153–159.

[15] 胡孝贵. 2,6-二氯靛酚法测赣南脐橙中 VC 含量的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
HU XG. Study on determination of VC content in gannan navel orange by 2,6-dichloroindophenol method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.

[16] JI X, PENG Q, YUAN Y, *et al*. Isolation, structures and bioactivities of the polysaccharides from jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.): A review [J]. Food Chemistry, 2017, 227: 349–357.

[17] 邓爱妮, 周聪, 赵敏, 等. 海南 15 种野生蔬菜膳食纤维含量的测定[J]. 热带作物学报, 2017, 38(8): 1560–1564.
DENG ANI, ZHOU C, ZHAO M, *et al*. Determination of dietary fiber content in 15 kinds of wild vegetables in hainan [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(8): 1560–1564.

[18] JIE X, LI L, QIN WZ, *et al*. Enhanced *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* by enzymatic degradation [J]. Journal of Food Biochemistry, 2016, 40(3): 275–283.

[19] LIU X, LIU Y, SHAN C, *et al*. Effects of five extraction methods on total content, composition, and stability of flavonoids in jujube [J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100287.

[20] ZHAO HF, CHEN WF, LU J, *et al*. Phenolic profiles and antioxidant activities of commercial beers [J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 1150–1158.

[21] ALKALTHAM SM, HAYAT K, SALAMATULLAH MA, *et al*. Effect of microwave and conventional heat treatment on total phenolic compounds, HPLC phenolic profile, and antioxidant activity of *Leptadenia pyrotechnica* (Forssk.) Decne stem [J]. Applied Sciences, 2023, 13(24): 1–12.

[22] 王鹏旭, 成传香, 马亚琴, 等. 超声声学效应在果蔬酚类化合物提取中的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 338–347.
WANG PX, CHENG CX, MA YQ, *et al*. Research progress of ultrasonic acoustic effect on extraction of phenolic compounds in fruits and vegetables [J]. Food Science, 2019, 40(17): 338–347.

[23] 赵超, 张鑫, 高晓娟, 等. 响应面法优化白酒酒糟总黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(12): 205–210.
ZHAO C, ZHANG X, GAO XJ, *et al*. Response surface methodology to optimize extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from distiller's grains [J]. China Brewing, 2024, 43(12): 205–210.

[24] KUMAR P, PANDEY A, SINGH AK. Polyphenols, flavonoids and vitamin C contribute to high radical scavenging activity of *Ziziphusmauritiana* (Indian jujube) fruit pulp [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(2): 1123–1131.

[25] QIAO L, SUN Y, CHEN R, *et al*. Sonochemical effects on 14 flavonoids common in citrus: Relation to stability [J]. PLoS ONE, 2017, 9(2): e87766.

[26] MADRIGAL SÁM, GUERRA AAC, PIZARRO MOC, *et al*. Optimization of enzyme-assisted ultrasound extraction of polysaccharides from wild sotol (*Dasylirion wheeleri*) plants using response surface methodology [J]. Applied Food Research, 2026, 6(1): 101901.

[27] SHU P, LIU S, WANG N, *et al*. Efficient extraction of flavonoids from *Cercis chinensis* bark using ultrasound-assisted deep eutectic solvents: Process optimization, characterization, kinetic studies, antioxidant and enzyme inhibition activities [J]. Industrial Crops & Products, 2026, 239: 122536.

[28] SHI Q, LI X, ZHU D, *et al*. Comprehensive analysis of antibacterial and anti-hepatoma activity of metabolites from jujube fruit [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101511.

[29] LU Q, YE Z, YANG C. Optimization of ultrasonic-enzyme synergistic extraction of proanthocyanidins from jujube: Purification, characterization, and bioactivity study [J]. Molecules, 2025, 30(3): 619.

[30] 冯梅, 王晶晶, 张世卿, 等. 不同产地冬枣的果实品质及其与气象因子的相关性分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3): 91–99.
FENG M, WANG JJ, ZHANG SQ, *et al*. Correlation analysis of fruit quality and meteorological factors of winter jujube from different producing areas [J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(3): 91–99.

[31] 刘杰超, 张春岭, 陈大磊, 等. 不同品种枣果实发育过程中多酚类物质、VC 含量的变化及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 94–98.
LIU JC, ZHANG CL, CHEN DL, *et al*. Changes of polyphenols and vc content and antioxidant activity during fruit development of different jujube varieties [J]. Food Science, 2015, 36(17): 94–98.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)