李黎, 郑展, 李书艺, 等. 超声预处理对莲藕汁品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 141−150. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030376

LI Li, ZHENG Zhan, LI Shuyi, et al. Effect of Ultrasound Pretreatment on the Quality of Lotus Root Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 141−150. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030376

· 研究与探讨 ·

超声预处理对莲藕汁品质的影响

李　黎, 郑　展, 李书艺*, 祝振洲, 王雪华

（武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院, 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北武汉 430023）

摘　要: 为探究超声处理对莲藕汁品质的影响规律，采用不同频率（25、33、40、59 kHz）、不同功率（40%、60%、80%、100%）、不同作用时间（0、15、30、45、60 min）处理条件对莲藕汁进行超声预处理。基于莲藕汁可溶性醌、蛋白质、V_C、色度、可溶性固形物、pH 6 个营养品质指标以及藕汁总酚含量、褐变度、多酚氧化酶（Polyphenol oxidase，PPO）和过氧化物酶（Peroxidase，POD）活性 4 个褐变相关品质参数，结合主成分分析和相关性分析，筛选出能有效提升藕汁综合品质和感官特性的超声加工参数，最后通过电子舌分析超声处理前后藕汁滋味的变化程度。结果表明，适度超声处理可以改善莲藕汁品质，筛选出的最佳超声加工参数为时间 30 min、功率 60%、频率 40 kHz。在此工艺条件下藕汁的褐变度降低 28.13%，PPO 和 POD 活性分别降低了 66.67% 和 62.07%，多酚和蛋白质含量增加。同时超声处理还降低了藕汁的苦味，增加酸味。本研究结果可为莲藕产品开发提供一定基础和理论依据。

关键词: 超声处理, 莲藕汁, 品质特性, 感官特性, 主成分分析

中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0141−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030376

本文网刊:

Effect of Ultrasound Pretreatment on the Quality of Lotus Root Juice

LI Li, ZHENG Zhan, LI Shuyi*, ZHU Zhenzhou, WANG Xuehua

（National R & D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China）

Abstract: To investigate the effects of ultrasonic treatment on lotus root juice quality, ultrasonic pretreatment was applied under varying conditions: frequencies (25, 33, 40, 59 kHz), power levels (40%, 60%, 80%, 100%), and treatment durations (0, 15, 30, 45, 60 min). Based on six nutritional quality indicators: soluble quinones, protein, vitamin C, color, soluble solids, and pH, along with four browning-related quality parameters: total phenolic content, browning degree, polyphenol oxidase (PPO) activity, and peroxidase (POD) activity, combined with principal component analysis and correlation analysis, to identify ultrasonic processing parameters that effectively enhance the comprehensive quality and sensory characteristics of lotus root juice. Finally, an electronic tongue analysis was conducted to evaluate the degree of flavor change in lotus root juice before and after ultrasonic treatment. Results indicated that moderate ultrasonic treatment improved lotus root juice quality. The optimal ultrasonic processing parameters identified were 30 min duration, 60% power, and 40 kHz frequency. Under these conditions, lotus root juice browning decreased by 28.13%, PPO and POD activities decreased by 66.67% and 62.07% respectively, while polyphenol and protein contents increased. Simultaneously, ultrasonic treatment reduced bitterness and enhanced acidity in the juice. These findings provide a foundation and theoretical basis for the development of lotus root products.

Key words: ultrasound treatment; lotus root juice; quality characteristics; sensory characteristics; principal component analysis

收稿日期: 2025−03−28

基金项目: 湖北省国际科技合作计划项目: 超声诱导莲藕汁分子间互作及其品质、营养特性研究（2022EHB028）。

作者简介: 李黎（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与应用, E-mail: lili20001115@126.com。

*** 通信作者:** 李书艺（1987−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 特色农副产品活性资源综合利用, E-mail: lishuyisz@sina.com。

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)属于多年水生草本植物,多种植在温暖湿润地区,是我国种植面积及产量第一的水生蔬菜[1]。莲藕富含淀粉、蛋白质、膳食纤维、维生素、多酚等多种营养物质和活性成分[2],极具开发为植物源膳食补充剂的潜力。鲜榨藕汁作为一种特色果蔬饮料不仅能最大限度地保留莲藕的丰富营养成分[3],而且口感清爽甘甜,深受消费者青睐。但藕汁中可溶性固形物(如可溶性糖,有机酸、维生素等)含量较高,在榨汁和储存过程中易出现氧化褐变、沉降分层等品质缺陷[4],产品的物理稳定性和化学稳定性亟待提升。

超声作为一种新兴非热绿色加工技术,在食品加工领域(尤其是果蔬汁加工)具有重要应用价值,能高效实现微生物灭活和酶活性钝化[5]。超声技术可分为低频率高场强(频率为 20~100 kHz,场强为 10~1000 W/cm^2)和高频率低场强(频率为 100 kHz~1 MHz,场强<1 W/cm^2)2 种[6],食品加工中主要应用低频超声[7]。超声可以通过机械和空化效应有效改变果蔬汁的理化性质和品质特性,Gao 等[8] 利用频率 20~25 kHz,强度 87.52 W/cm^2,温度 10 ℃,时间 15 min 的冷超声处理鲜榨番茄汁,其抗坏血酸、总酚、类胡萝卜素含量分别增加 21.08%、16.92%、81.12%。Cheng 等[9] 通过研究发现超声(频率 19 kHz、功率 750 W、温度 50 ℃、时间 36 min)处理柑橘汁使其亮度增加,黄色加深,而抗坏血酸、总酚、总类胡萝卜素含量分别降低 8.69%、26.75%、10.66%。因为超声波技术在食品加工和改性中的应用受到条件和设备的限制,不同频率和能量的超声对食品关键组分及其相互作用的调控呈现较大差异,因此筛选适度的超声处理条件就显得尤为重要。

目前非热技术在莲藕汁加工中应用较少,课题组前期研究发现超声能够改善果蔬汁的稳定性和营养特性[10],但不同超声条件处理的影响规律和机制尚不明晰。因此,本研究运用主成分分析和相关性分析,研究不同超声处理对莲藕汁可溶性醌、蛋白质、V_C、色度、可溶性固形物、pH 以及藕汁总酚含量、褐变度、多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性等品质指标的影响,筛选能有效改善莲藕汁综合品质的超声加工条件,并进行滋味变化分析。以期为莲藕汁产品的进一步开发利用提供理论基础和实践指南。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

八月粉莲藕 湖北省农业科学院;抗坏血酸、邻苯二酚、愈创木酚、没食子酸、Folin-Ciocalteu 试剂、考马斯亮蓝 G-250、2,6-二氯酚靛酚等 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

SB-300DTY 扫频超声波清洗机(功率 360 W) 宁波新芝生物科技股份有限公司;A580 型紫外可见分光光度测量仪 翱艺仪器(上海)有限公司;UltraScanPRO 全自动色差仪 美国 HunterLab 公司;PHS-3C 型 pH 计 上海雷磁仪器厂;TGL-16A 离心机 湖南平凡科技有限公司;AL204 电子天平 梅特勒-托利多国际有限公司;PAL-1 型手持式糖度计 ATAGO(爱拓)中国分公司;WYA-2S 数字阿贝折射仪 上海精密仪器仪表有限公司;cTongue 电子舌 上海保圣实业发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 藕汁的制备和超声处理 选取新鲜莲藕,洗去泥土,选择表面完整无破损的,削皮、切成 0.5 cm 薄片(95% 乙醇消毒所有容器工具),按照料液比 1∶5 加水,根据预实验结果,设定超声频率(25、33、40、59 kHz),超声功率 60%,超声时间 30 min;设定超声功率(40%、60%、80%、100%(360 W)),超声频率 40 kHz,超声时间 30 min;设定超声时间(15、30、45、60 min),超声频率 40 kHz,超声功率 60%,超声处理的同时使用冰水浴控温。随后在打浆机中打浆约 3 min,得莲藕浆液,用 500 目滤布过滤藕渣,收集莲藕汁至干净玻璃瓶中待测。

1.2.2 可溶性醌含量的测定 参考朱莉莉等[11] 的方法并略加修改,取莲藕汁 5 mL,按体积比 1∶1 加入 95% 的乙醇溶液,混合振荡 10 min 后 8000 r/min 离心 10 min,以去除样品中的粗纤维和颗粒。取 10 mL 上清液,于波长 437 nm 测其吸光度。

1.2.3 蛋白质含量的测定 采用考马斯亮蓝 G-250 法[12]。所得牛血清蛋白标准曲线方程为 y=0.0064x+0.0455,R^2=0.9994。取 0.2 mL 粗藕汁,加入 0.8 mL 蒸馏水,5 mL 考马斯亮蓝,充分混匀后在室温下反应 10 min,调零后在波长 595 nm 测定吸光值,根据标准曲线来计算样品中总蛋白含量[13]。

1.2.4 抗坏血酸含量的测定 参考 GB 5009.86-2016《食品中抗坏血酸的测定》中第三法 2,6-二氯靛酚滴定法进行测定。

1.2.5 莲藕汁色度的测定 色差仪开机后,使用标准黑白板进行仪器校正,校正结束后测定样品的 L^*、a^*、b^*值,每个样品测定 3 次,利用 ΔE 值表示样品与标准或参考样品之间的总色差(标准采用蒸馏水)。规定 ΔE 值<1.5 表示差异较小;在 1.5 和 3.0 之间表示存在明显的差异;ΔE 值>3 表示存在极显著差异[14]。

1.2.6 可溶性固形物和酸碱度的测定 可溶性固形物和酸碱度分别采用数字阿贝折光仪和 pH 计测定。

1.2.7 总酚含量的测定 采用福林酚比色法。取 1 mL 藕汁,蒸馏水定容至 10 mL。取 1 mL 稀释后的藕汁于刻度试管内,随后加入 5 mL 福林酚试剂充分混匀,室温下反应 3~8 min,再加入 4 mL 7.5% 碳酸钠溶液,混匀后室温下静置 60 min 使其充分反应,最后测定其 765 nm 波长下的吸光度。总酚含量参照标准曲线以藕汁中没食子酸当量表示(μg/mL)[15−16]。

1.2.8　莲藕汁褐变度的测定　前处理步骤参考 1.2.2，离心后取上清液，用紫外分光光度计测定波长 420 nm 处的吸光度值，以此表示褐变指数，以 $V_{蒸馏水}$∶$V_{95\%\ 乙醇}$=1∶1 的混合液做空白对照。

1.2.9　多酚氧化酶活性的测定　制备 40 mL 0.1 mol/L pH7.0 的磷酸盐缓冲液（phosphate buffered saline，PBS）并加入 1.2 g 聚乙烯吡咯烷酮（polyvinyl pyrrolidone，PVP），取 1.2.1 制得藕汁 2 mL 与 6 mL PBS 混合后在 4 ℃ 静置 1 h，10000 r/min 离心10 min 取上清液，得到莲藕汁 PPO 粗酶液。上述操作均在 4 ℃ 下进行。

向 1 cm 比色皿中加入 1.9 mL PBS（0.1 mol/L，pH7.0），1.0 mL 0.1 mol/L 邻苯二酚（20 mmol/L PBS 配制），25 ℃ 保温 5 min，最后加入 0.1 mL 粗酶液启动反应。立即在波长 420 nm 处测定吸光值，每 10 s 记录 1 次，共 2 min。每毫升酶液每分钟引起吸光值变化 0.001 为 1 个酶活单位[17]。

$$酶活(U\cdot min^{-1}\cdot mL^{-1})=\frac{\Delta A_{420\ nm}}{Vs\times 0.001\times t}$$

式中：Vs 表示测定时所取样品提取液体积，mL；$\Delta A_{420\ nm}$ 表示反应时间内吸光值的变化；t 表示反应时间，min。

1.2.10　过氧化物酶活性的测定　向 1 cm 比色皿中加入 0.3 mL 粗酶液，2.9 mL 0.3% 愈创木酚（用 50 mmol/L PBS 配制，pH7.0），最后加入 0.8 mL 0.3% H_2O_2（用 50 mmol/L PBS 配制，pH7.0），总反应体积为 4 mL。加入 H_2O_2 后开始精确计时，连续测定 $A_{470\ nm}$ 的变化值[18]，每毫升酶液每分钟引起吸光值变化 0.01 为 1 个酶活单位。

1.2.11　电子舌分析　将藕汁倒入电子舌专用测试杯并置于设备中，注意液面低于刻度线 0.5~1.0 mm，机器自动测试 4 次，数据分析时取 4 次实验的平均值，并将数值转化为各味觉的响应值再输出，最后以未超声处理为对照组，用于比较超声对藕汁滋味的影响。响应值的大小对应滋味的差异程度，正值表示该味觉相对于对照组更强，负值则表示相对较弱[19]。

1.3　数据处理

本实验所有测试均重复 3 次，实验结果以“平均值±标准差”表示。使用 SPSS Statistics 26 进行方差分析，使用 Duncan 法比较平均值之间的差异性，通过 Origin 9.0 和 GraphPad Prism 进行相关图表的绘制，P<0.05 表示有显著性差异，P<0.01 表示差异极显著。

2　结果与分析

2.1　不同超声处理对藕汁营养品质指标的影响

不同超声处理对藕汁品质指标的影响如表 1 所示。作为酶促褐变的产物之一，可溶性醌含量一定程度上反映了莲藕汁中黑色素的量[20]。结果表明，除 X_2 组外其余超声处理组均能降低藕汁中可溶性醌含量。在植物组织褐变过程中，多酚氧化酶（PPO）可催化酚类化合物氧化生成醌类物质，随后这些醌类物质通过非酶促氧化聚合反应最终形成褐色色素[13,21]。而超声处理能够有效抑制 PPO 酶活性，从而降低可溶性醌含量。而超声处理后藕汁中的蛋白质含量较未处理组 X_1 均明显升高，这可能是由于超声空化效应及机械振动作用可破坏莲藕细胞壁结构，促进胞内蛋白质的溶出。也有研究表明超声处理可能诱导蛋白质构象变化，使其表面亲水基团暴露，从而增强溶解性，导致检测含量增加[22]。

V_C 也参与非酶褐变反应，研究结果表明超声处理能明显降低 V_C 含量，这是由于超声处理会导致藕汁中自由基形成，空化效应产生的过量·OH 会诱导 V_C 氧化并降低其含量[23]。与此同时，V_C 降解产物聚集也会形成褐色物质从而导致色度值的增大[24]，由表 1 的结果可知除 X_4 组色度值略有降低外，其余超声处理组色度均明显增大。Abid 等[25] 也研究发现超声处理苹果汁会使其色度增加，这可能是由于空化效应产生的高压梯度，使大分子分解为小分子，从而使果汁适当均质化和混合，最终由于较小的颗粒尺寸而形成更稳定的胶体系统，从而增加其混浊度和色

表 1　不同超声处理对莲藕汁品质的影响

Table 1　Effect of different ultrasonic treatments on the quality of lotus root juice

处理方式	超声时间（min）	超声频率（kHz）	超声功率（W）	可溶性醌（OD_{437nm}）	蛋白质（mg/100 mL）	V_C（mg/100 g）	色度（ΔE）	固形物（°Brix）	pH
X_1	0	0	0	0.059±0.005^{ab}	130.39±3.13^{g}	9.08±0.53^{a}	28.57±6.54^{c}	2.00±0.28^{a}	6.57±0.08^{a}
X_2	15	40	60%	0.064±0.006^{a}	150.08±1.41^{ef}	7.48±1.07^{ab}	31.75±2.16^{bc}	2.15±0.35^{a}	6.68±0.16^{a}
X_3	45	40	60%	0.043±0.005^{c}	184.77±8.91^{a}	3.21±1.07^{cd}	31.35±2.33^{bc}	1.90±0.14^{a}	6.69±0.01^{a}
X_4	60	40	60%	0.042±0.003^{c}	182.50±4.30^{ab}	2.67±0.53^{d}	26.60±1.61^{c}	2.00±0.14^{a}	6.72±0.01^{a}
X_5	30	25	60%	0.052±0.001^{abc}	137.97±3.36^{fg}	5.34±1.07^{bcd}	51.71±0.42^{a}	2.45±0.07^{a}	6.92±0.25^{a}
X_6	30	33	60%	0.054±0.005^{abc}	157.11±5.78^{de}	4.81±0.53^{bcd}	49.51±0.17^{a}	2.40±0.14^{a}	6.81±0.02^{a}
X_7	30	40	60%	0.045±0.004^{bc}	177.97±1.02^{abc}	2.67±0.53^{d}	47.76±1.03^{ab}	2.40±0.28^{a}	6.86±0.05^{a}
X_8	30	59	60%	0.046±0.003^{bc}	169.38±3.67^{bcd}	3.21±1.07^{cd}	52.87±1.28^{a}	2.35±0.21^{a}	6.85±0.09^{a}
X_9	30	40	40%	0.051±0.003^{abc}	157.66±10.86^{ef}	9.08±0.53^{a}	41.72±3.10^{abc}	2.05±0.49^{a}	6.88±0.01^{a}
X_{10}	30	40	80%	0.047±0.004^{bc}	167.03±5.70^{cd}	5.88±0.53^{bc}	39.75±2.18^{abc}	2.05±0.35^{a}	6.80±0.10^{a}
X_{11}	30	40	100%	0.044±0.005^{c}	180.31±3.36^{abc}	3.21±1.07^{cd}	42.40±12.20^{abc}	2.05±0.35^{a}	6.86±0.13^{a}

注：同列不同字母表示具有显著性差异（P<0.05）。

度。另外超声处理可能改变蛋白质构象，增强其与多酚类物质的结合能力，形成可溶性或不溶性复合物，进而影响藕汁的透光率和色度表现[26]。

而不同超声处理对藕汁中可溶性固形物含量和 pH 无显著影响，虽然在加工过程中机械加工会破坏大部分细胞的完整性，但可溶性固形物主要成分为小分子糖类和可溶性有机酸等，超声空化能不足以破坏其结构[27]，且莲藕汁体系中天然含磷酸盐和蛋白质两性电解质，营造了很好的缓冲体系，能够维持 pH 稳定。这也与 Cao 等[28] 和 Martínez-Flores 等[29] 研究结果一致。

2.2 超声处理对藕汁总酚含量的影响

酚类化合物是果蔬中关键的生物活性成分，也是重要的抗氧化活性物质，它被认为是非必需次生代谢产物，参与细胞的正常生理活动[30]。不同超声处理时间、频率、功率对藕汁多酚含量的影响如图 1 所示，新鲜藕汁中总酚含量为 26.12±2.2 μg/mL，不同超声处理均能提升藕汁中总酚的含量。在超声时间为 0~30 min 时，总酚含量随着时间的延长而显著增加（P<0.05），30 min 后又略微降低，但仍高于未处理组（图 1A）。与此同时，随着超声频率的增大，总酚含量也呈现出先增大后降低的趋势，并在 40 kHz 处达到最大（图 1B）。这是因为在超声开始时，空化效应破坏细胞壁结构，促进结合态酚类释放，多酚溶出增加；随着时间的延长和频率的增大，藕汁中产生过量自由基攻击酚羟基或多酚氧化聚合生成不溶性沉淀从而降低多酚含量[31]。

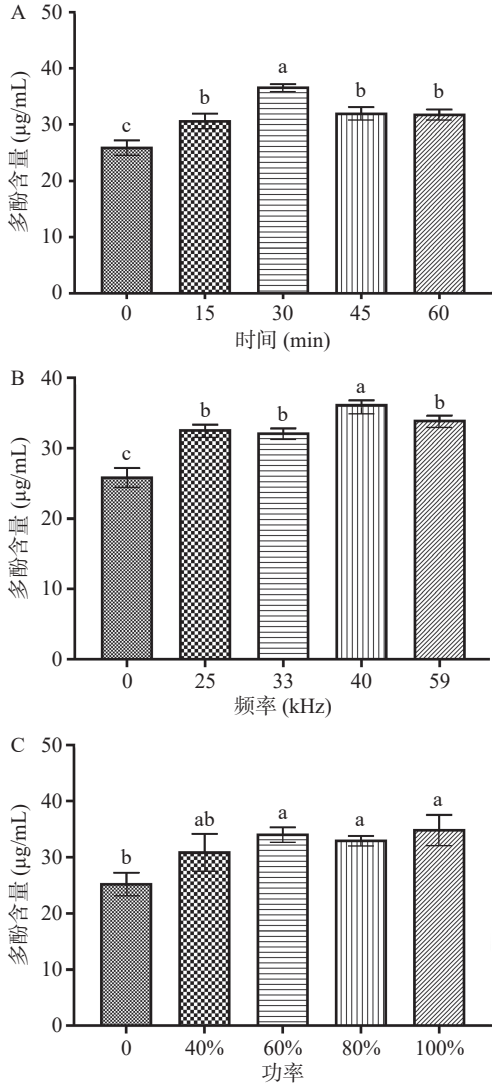


图 1 不同超声处理时间（A）、频率（B）、功率（C）对藕汁多酚含量的影响

Fig.1 Effects of different ultrasonication time (A), frequency (B) and power (C) on the polyphenol content in lotus root juice

注：不同小写字母表示具有显著差异（P<0.05），图 2~图 4 同。

另外低功率和高功率超声对藕汁总酚含量的增加并不显著，但超声后藕汁中的总酚含量仍明显高于未处理组（图 1C）。这是因为超声空化泡破裂产生的微射流作用和声流效应会破坏细胞壁，从而洗出细胞内容物[32]。超声处理促进细胞内容物释放的主要作用机制在于空化效应产生的物理机械力作用。具体而言，当超声波在液体介质中传播时，会产生周期性的压缩和膨胀作用，导致空化泡的形成、生长和剧烈崩溃[33]。这可能也与高功率处理时间较长有关，自由基浓度骤增，多酚氧化速率增快，因此功率变化并未对总酚含量呈现太显著的影响。这也与 Bhat 等[34] 研究超声处理对柑橘类水果多酚含量的影响结果相似。

2.3 超声处理对藕汁褐变度的影响

褐变是果蔬汁产品加工过程中重要的反应，果蔬汁的褐变主要有两种，分别是酶促褐变和非酶促褐变[35]。而在加工过程中鲜藕汁的褐变主要是酶促褐变，这是因为莲藕的组织细胞被机械切割等操作分割破坏，使组织细胞内部的酶和酚类物质暴露在酶反应中，从而生成醌类物质。醌类物质随后与蛋白质、氨基酸等其他物质进一步聚合生成黑色素[36]。图 2 为不同超声处理对藕汁褐变度的影响。由图 2（A）可知，在功率为 60%，频率为 40 kHz 的条件下，当超声时间 15 min 时，褐变度显著增加（P<0.05），这可能是由于短时间的超声处理会加速酶与内容物质的接触，而在超声时间 30 min 后，褐变度显著降低（P<0.05），这可能与超声抑制了褐变所需酶的活性有关[37]。而随着超声频率的增加，藕汁褐变度也得到了不同程度的降低（图 2B）。当超声功率 60%，超声时间 30 min 时（图 2C），随着超声频率的增加，藕汁褐变度的升高与降低呈现非线性变化趋势，这与其酶促反应动力学有关。超声空化效应促进细胞壁破裂内容物流出，褐变酶与酚类底物的接触率提升，与此同时超声又会抑制酶活，从而造成莲藕汁褐变度的非线性变化[38]。但超声处理组的褐变度都明显低于未处理组，这与甘笑静等[39] 的研究结论一致。

2.4 超声处理对藕汁多酚氧化酶的影响

多酚氧化酶（Polyphenol oxidase，PPO）是一类含铜的氧化还原酶，是自然界中分布比较广的一种金属蛋白酶，主要存在于植物、真菌、昆虫的质体内[40]。

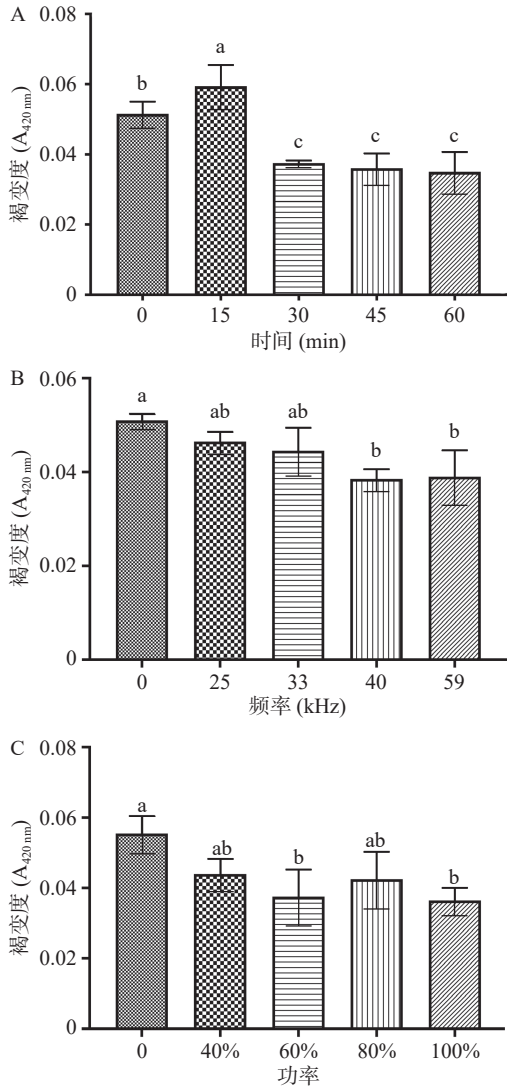


图 2　不同超声处理时间(A)、频率(B)、功率(C)对藕汁褐变度的影响

Fig.2　Effect of different ultrasonication time (A), frequency (B) and power (C) on the browning degree of lotus root juice

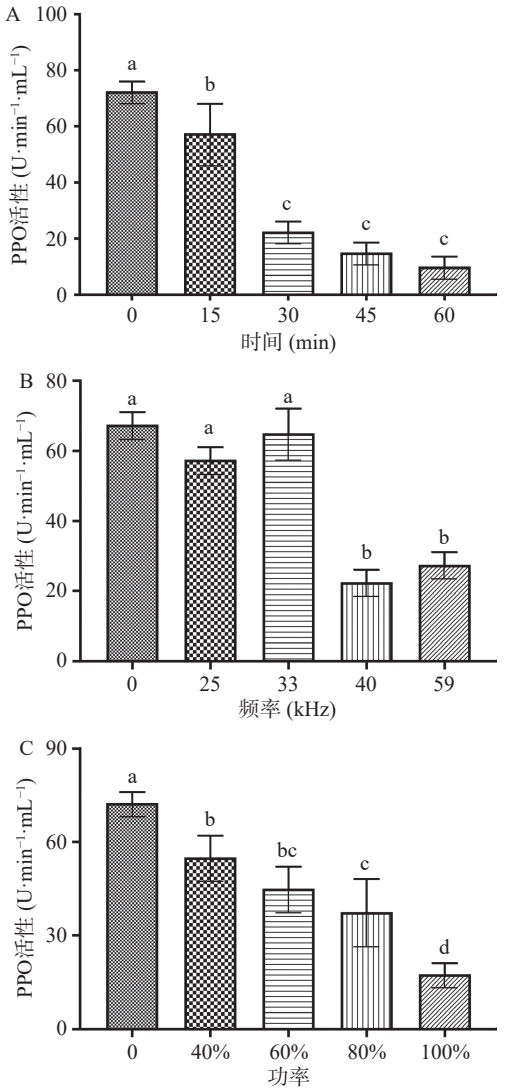


图 3　不同超声处理时间(A)、频率(B)、功率(C)对藕汁 PPO 酶活的影响

Fig.3　Effects of different ultrasonication time (A), frequency (B) and power (C) on the enzyme activity of PPO in lotus root juice

PPO 是造成水果和蔬菜酶促褐变的主要原因，它能催化水果和蔬菜原料中的内源性多酚物质氧化生成黑色素[41−42]。

因此抑制 PPO 活性是抑制藕汁在加工过程中酶促褐变的有效途径。图 3 为不同超声处理对藕汁中 PPO 酶活的影响，结果显示随着超声时间的延长，PPO 酶活受到显著抑制，超声 30 min 时酶活抑制了 68.97%，随后酶活基本稳定不变。这是因为经过长时间超声，酶分子结构形成稳定态。该现象与 PPO 的同工酶组成相关，不稳定型同工酶在超声波产生的高温条件下失活，而稳定型同工酶被保留[43]。

低频率超声对藕汁 PPO 酶活影响不显著，特别是频率为 33 kHz 时，藕汁中 PPO 活力略微增强，这可能是由于超声波产生的热效应和传质作用增强了酶与底物分子的能量，使其碰撞加速，提高了酶促反应速率[44]。而超声频率上升至 40、59 kHz 时，PPO 酶活的抑制率高达 66.67% 和 59.26%(图 3B)。超声波能够钝化酶活的原因在于藕汁中的自由水在超声波的空化作用下产生自由基，迫使酶空间构象发生改变，从而发生酶活的变化[45]。此外，PPO 酶活也会随着超声功率的增加而受到更强的抑制，在 100%(360 W)功率下酶活仅为未处理组的 24.14%(图 3C)。Kabawa 等[43] 研究发现超声空化效应产生的大量活泼自由基会与酶的氨基酸末端发生一系列氧化还原反应，同时强烈的超声波剪切力也会直接作用于酶的结构，从而导致酶的活性位点和空间结构遭到破坏，造成酶失活。杨明冠[46] 也证实超声处理可以显著影响 PPO 的分子结构，使 α-螺旋和 β-转角含量降低，转为无规则卷曲导致酶活降低，与此同时超声对 Trp 和 Tyr 残基有一定程度的破坏致使荧光强度降低，并且发生了红移现象，降低了 PPO 的相对表达量。

2.5　超声处理对藕汁过氧化物酶的影响

过氧化物酶(Peroxisome，POD)是植物中产生的

另外一类氧化还原酶，它在植物体内也发挥着重要的生理作用。POD 催化由过氧化氢(H_2O_2)参与的各种还原剂的氧化反应以及芳香族化合物等物质的氧化反应[47]。图 4 为不同超声处理对藕汁 POD 酶活的影响，由图可以看出，经不同超声处理后，POD 酶活性有不同程度的降低。在固定超声频率 40 kHz，超声功率 60% 的情况下（图 4A），POD 酶活性随着超声时间延长而降低，30 min 时 POD 酶活仅为未处理组的 47.45%，而在此后的更长时间内酶活变化并不显著。这可以归因于 POD 存在 2 种不同热稳定性的同工酶，随着超声波处理时间的增加，不稳定型同工酶在超声波产生的高温条件下失活，而稳定型同工酶被保留[48]。当超声功率和时间保持不变，超声频率增大后（图 4B），POD 活力也受到显著抑制，并在 40 kHz 时达到最低值，相较未处理组降低了 62.07%。但 POD 酶活在 25~59 kHz 范围内变化并不显著，这也说明了在超声时间和频率持续增长后，POD 酶活的钝化效果会达到一定的饱和效应，使其变化不显著。

而由图 4C 可知，超声功率变化对 PPO 酶活的影响是显著的，随着功率的增强酶活性降低，在 100%（360 W）时，POD 酶活被抑制了 56.15%。结果表明在一定时间范围内，超声波功率越高，酶钝化效果越好。这是由于超声强度越大，产生的瞬态空化作用越强，酶活力也越低。Chen 等[49] 研究也发现超声处理对胡萝卜汁中的 POD 既有破坏作用也有萃取作用，高功率、长时间的超声处理主要使酶钝化，而短时低功率的超声处理主要表现为萃取效应。

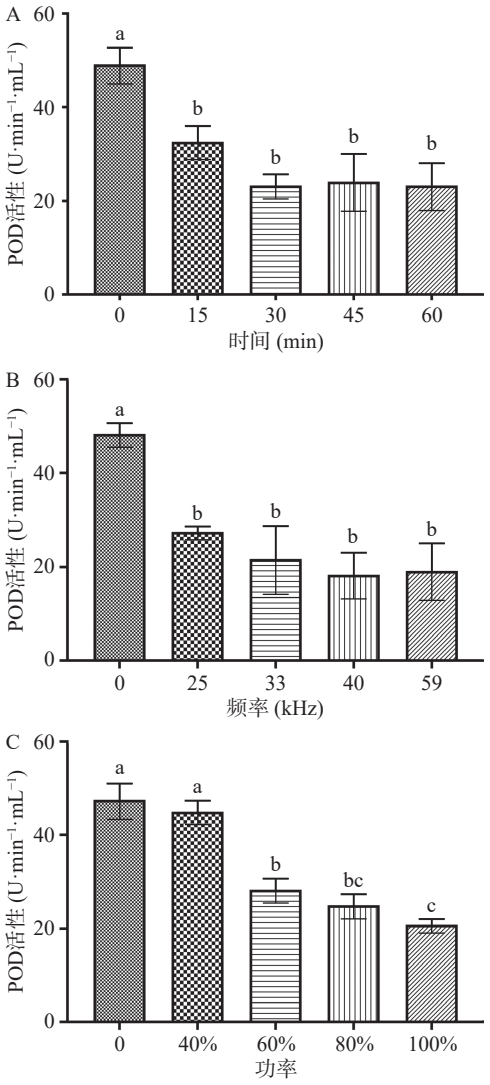


图 4 不同超声处理时间（A）、频率（B）、功率（C）对藕汁 POD 酶活的影响

Fig.4 Effects of different ultrasonication time (A), frequency (B) and power (C) on the enzyme activity of POD in lotus root juice

2.6 相关性分析结果

为了探究所测定的藕汁品质指标间是否存在相关性，运用皮尔逊（Pearson）相关系数进行统计分析。两个指标间的相关性强弱与皮尔逊相关系数 r 的绝对值成正比，绝对值越接近 1 则两个指标间的相关性越强，反之越接近 0 相关性越弱，而正负值分别代表正相关和负相关[50−51]。结果见表 2，11 种不同超声处理条件下所测的 10 个藕汁品质指标之间相关性存在差异，褐变度与可溶性醌含量、V_C 含量、PPO 酶活呈非常显著正相关（P<0.01），相关系数分别为 0.991、0.770、0.825，与蛋白质含量呈非常显著负相关（P<0.01），相关系数为−0.816，可见在藕汁中可溶性醌含量、V_C 含量、PPO 酶活指数越高，褐变度

表 2 不同超声处理藕汁品质的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of the quality of lotus root juice with different ultrasonic treatments

品质	褐变度	可溶性醌	多酚	蛋白质	V_C	PPO	POD	色度	固形物	pH
褐变度	1.000									
可溶性醌	0.991**	1.000								
多酚	−0.596	−0.661*	1.000							
蛋白质	−0.816**	−0.837**	0.680*	1.000						
V_C	0.770**	0.805**	−0.764**	−0.783**	1.000					
PPO	0.825**	0.830**	−0.637*	−0.931**	0.825**	1.000				
POD	0.593	0.670*	−0.860**	−0.689*	0.923**	0.666*	1.000			
色度	−0.154	−0.200	0.603*	−0.054	−0.247	0.104	−0.428	1.000		
固形物	0.121	0.064	0.438	−0.251	−0.214	0.261	−0.397	0.844**	1.000	
pH	−0.369	−0.408	0.740**	0.203	−0.300	−0.168	−0.434	0.832 **	0.583	1.000

注：*表示品质指标间显著相关（P<0.05），**表示品质指标间非常显著相关（P<0.01），***表示品质指标间极显著相关（P<0.001）。

就越高。PPO 酶活与多酚含量呈显著负相关（$P<0.05$）、与蛋白质含量呈非常显著负相关（$P<0.01$），与 V_C 含量呈非常显著正相关（$P<0.01$）。POD 酶活与多酚含量非常显著负相关（$P<0.01$）、与蛋白质含量呈显著负相关（$P<0.05$），与 V_C 含量呈非常显著正相关（$P<0.01$）。由相关性分析结果可以看出，各指标间均存在一定的相关性，表明 11 个超声处理条件测定的指标结果有交叉性，因此需要对 10 项指标进行分类和简化。

2.7　主成分分析结果

主成分分析是一种数据降维方法，可以将多维数据降为一维数据，找出数据的主要特征[52]。利用 SPSS 26 软件对 11 个超声加工参数的 8 项指标进行主成分分析（根据前序相关性分析剔除可溶性固形物和 pH 两个指标），由表 3 主成分方差贡献率可知，前两个主成分的特征值大于 1，累计方差贡献率达到 88.972%[53]，表明这 2 个成分可反映原始 8 个指标的绝大部分信息。

表 3　主成分的特征值和贡献率

Table 3　Eigenvalues and contribution rates of principal components

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累积贡献率(%)
1	5.685	71.068	71.068	5.685	71.068	71.068
2	1.432	17.904	88.972	1.432	17.904	88.972
3	0.513	6.411	95.383			
4	0.242	3.025	98.408			
5	0.076	0.952	99.360			
6	0.034	0.425	99.785			
7	0.016	0.199	99.984			

主成分载荷矩阵反映了 8 项品质指标在各主成分矩阵中的影响力大小，其数值反映原变量对因子影响的大小，正负代表变化方向的差别[54]。由表 4 可知，第 1 主成分主要综合了褐变、可溶性醌含量、多酚含量、蛋白质含量、V_C 含量、PPO 酶活、POD 酶活指标。第 2 主成分综合了色度。因此，使用这两个新的主成分变量代替原有 8 个变量，实现数据降维目的。

表 4　主成分的特征矢量

Table 4　Eigenvectors of principal components

成分	载荷矩阵	
	1	2
褐变度	0.890	−0.202
可溶性醌	0.924	−0.141
多酚	0.844	0.434
蛋白质	0.902	−0.317
V_C	0.937	0.044
PPO	0.897	−0.369
POD	0.869	0.304
色度	0.276	0.923

根据主成分的特征向量和标准化后的数据可得到 2 个主成分的得分函数表达式（F_1、F_2）。

$$F_1=2.123X_1+2.203X_2+2.012X_3+2.150X_4+2.234X_5+2.138X_6+2.037X_7+0.657X_8$$

$$F_2=-0.242X_1-0.169X_2+0.520X_3-0.379X_4+0.053X_5-0.442X_6+0.364X_7+1.105X_8$$

式中：X_1~X_8 分别对应标准化之后的褐变度、可溶性醌含量、多酚含量、蛋白质含量、V_C 含量、PPO 酶活、POD 酶活、色度 8 个指标。

通过以 2 个主成分对应的特征值为权重进行加权，构建了一个主成分综合评价模型，即藕汁品质评价模型。

$$F_{综}=0.799F_1+0.201F_2$$

经过计算后的得分情况如表 5 所示，加工参数 7 综合得分排名第一，因此参数 7（超声时间 30 min，超声频率 40 kHz，超声功率 60%）可以认为是提升藕汁综合品质的最佳加工参数。同时本文发现随着超声时间（X_1、X_2、X_7、X_3、X_4）和功率（X_1、X_9、X_7、X_{10}、X_{11}）的增加，莲藕汁品质综合得分快速上升至最高值，随后出现非线性降低变化；而随着超声频率增大（X_1、X_5、X_6、X_7、X_8），综合得分呈现先上升后下降的趋势，且在 40 kHz 处达到最大值。

表 5　不同超声参数的成分得分和综合评估

Table 5　Component scores and comprehensive assessment of ultrasound parameters for different products

处理方式	超声时间（min）	超声频率（kHz）	超声功率	F_1	F_2	$F_{综}$	排名
X_1	0	0	0	−25.823	−1.607	−20.956	11
X_2	15	40	60%	−17.430	−0.011	−13.929	10
X_3	45	40	60%	10.738	−2.200	8.137	5
X_4	60	40	60%	11.575	−2.833	8.679	3
X_5	30	25	60%	−5.606	2.442	−3.989	8
X_6	30	33	60%	−1.422	1.979	−0.738	7
X_7	30	40	60%	13.880	1.136	11.318	1
X_8	30	59	60%	9.928	1.560	8.246	4
X_9	30	40	40%	−10.868	−0.296	−8.743	9
X_{10}	30	40	80%	1.947	−0.125	1.530	6
X_{11}	30	40	100%	13.082	−0.045	10.444	2

2.8　电子舌分析结果

为了研究超声处理对藕汁滋味的影响，利用电子舌分析超声处理与未超声处理藕汁中酸味、咸味、苦味及其回味、涩味及其回味、鲜味及其回味（丰富性）上的差异。如图 5 藕汁滋味雷达图所示（图中坐标表示滋味的强度）。

以未经超声处理的藕汁为对照组，探讨了超声处理对藕汁滋味特性的影响。结果表明，超声处理对藕汁的滋味丰富性影响不大，但能改善其滋味品质。具体表现为：苦味、苦味回味和咸味等滋味物质含量明显降低，涩味强度略微减弱，使得藕汁整体滋味更趋柔和，有效改善了传统藕汁的一些滋味缺陷。但与

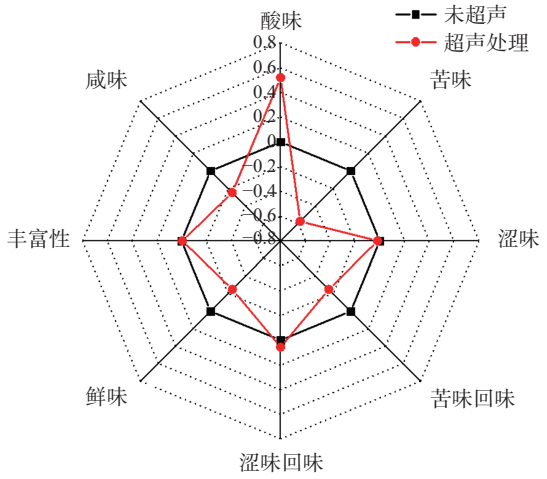


图 5 藕汁的滋味雷达图

Fig.5 Lotus root juice taste radar map

此同时，超声处理还会导致藕汁酸味增强，这可能与超声空化效应产生的强大剪切力和局部高温，导致物质组织结构改变，有机酸溶出增加有关[55−56]。Habinshuti 等[57] 研究不同超声波对酶解甘薯肽的美拉德产物滋味分析也发现相同的结论，超声会提升产物的酸味，减少苦味。后续计划通过进一步的感官评价和挥发性风味物质分析探究其具体变化规律。

3 结论

本文研究了不同超声处理对鲜榨藕汁营养和褐变品质的影响，对其中 8 项指标进行了主成分分析，提取的两个主成分反映原始变量的 88.972% 信息，建立了直观的藕汁品质评价模型 $F_{综}=0.799F_1+0.201F_2$，得出不同超声加工参数的综合评分值排列顺序，得到的最佳超声加工参数为30 min、40 kHz、60%。在此工艺条件下藕汁的品质指标得到改善，相较未超声藕汁褐变度降低 28.13%，PPO 和 POD 酶活分别降低 66.67% 和 62.07%，多酚含量和蛋白质含量分别增加了 36.70% 和 39.41%。最后探究了超声处理对藕汁滋味的影响，结果表明超声能改善藕汁的苦味及苦味回味。本文为莲藕汁绿色加工以及产品的开发利用提供了一定的理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 谢晋, 韩迪, 王靖, 等. 中国莲藕产业发展现状及展望[J]. 农业展望, 2017, 13(12): 42−45,51. [XIE Jin, HAN Di, WANG Jing, et al. Development status quo and prospect of China's *Lotus* root industry[J]. Agricultural Outlook, 2017, 13(12): 42−45,51.]

[2] 程婷婷, 惠小涵, 尚欣欣, 等. 10 个产地莲藕营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 320−325. [CHENG Tingting, HUI Xiaohan, SHANG Xinxin, et al. Nutrient composition analysis and quality comprehensive evaluation of *Lotus* root in 10 producing areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 320−325.]

[3] 吴茜, 刘智勇, 李国文, 等. 莲藕的功能特性及其产品开发前景分析[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(6): 108−112. [WU Qian, LIU Zhiyong, LI Guowen, et al. Functional characteristics of *Lotus* root and analysis of its product development prospects[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2020, 56(6): 108−112.]

[4] 牛丽影, 顾艳阳, 胡丽丽, 等. 莲藕汁饮品研发现状与趋势[J]. 农产品加工, 2021(4): 77−79. [NIU Liying, GU Yanyang, HU Lili, et al. Research development and prospect of *Lotus* root drinks[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2021(4): 77−79.]

[5] NUNES B V, da SILVA C N, BASTOS S C, et al. Microbiological inactivation by ultrasound in liquid products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(10): 2185−2209.

[6] 张超, 邓艳琴, 李书艺, 等. 高场强超声影响葛根淀粉溶解性与冻融稳定性的作用机制[J]. 食品科技, 2022, 47(11): 205−212. [ZHANG Chao, DENG Yanqin, LI Shuyi, et al. Mechanism of action of high field ultrasonic influence on solubility and freeze-thaw stability of kudzu starch[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(11): 205−212.]

[7] LI Mengge, ZHOU Cunshan, WANG Bo, et al. Research progress and application of ultrasonic- and microwave-assisted food processing technology[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(5): 3707−3731.

[8] GAO Ruiping, YE Fayin, WANG Yulin, et al. The spatial-temporal working pattern of cold ultrasound treatment in improving the sensory, nutritional and safe quality of unpasteurized raw tomato juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 56: 240−253.

[9] CHENG Chuanxiang, JIA Meng, GUI Yao, et al. Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (*Citrus unshiu*) juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64: 102425.

[10] 戴芳, 吴宇昊, 祝振洲, 等. 不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 96−105. [DAI Fang, WU Yuhao, ZHU Zhenzhou, et al. Effects of different physical field pretreatment on the quality of kiwifruit Jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 96−105.]

[11] 朱莉莉, 魏骊霏, 杨芳, 等. 蜜枣在烘制过程中褐变相关因素分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 55−61. [ZHU Lili, WEI Lifei, YANG Fang, et al. Correlation analysis of browning of jujube during roasting[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 55−61.]

[12] 谢巧玲, 邱紫婷, 陈燕鸿, 等. 抗菌肽复合膜对藕带品质影响及保鲜作用[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 153−157. [XIE Qiaoling, QIU Ziting, CHEN Yanhong, et al. Effect of antimicrobial peptide composite membrane on the quality and preservation effect of *Lotus* root belt[J]. The Food Industry, 2022, 43(9): 153−157.]

[13] 李彩云, 李洁, 严守雷, 等. 抗坏血酸处理对鲜榨莲藕汁酶促褐变和品质特征的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 151−158. [LI Caiyun, LI Jie, YAN Shoulei, et al. Effects of ascorbic acid treatment on enzymatic browning and quality characteristics of fresh *Lotus rhizome* juice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 151−158.]

[14] WEN Bo, LI Da, DU Xianfeng, et al. Efficiency of ultrasonic incorporated glutathione treatment in preserving the physicochemical quality and preventing the browning of *Lotus rhizome* slices[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(12): 6388−6396.

[15] 李秋瑛, 胡铭文, 王宏勋, 等. 乙烯利处理对去皮莲藕酚类和

活性氧代谢的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2024, 15(8): 1−10. [LI Qiuying, HU Mingwen, WANG Hongxun, et al. Effects of ethephon treatment on phenol and active oxygen metabolism of peeled *Lotus* root[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 1−10.]

[16] 漆欣, 周白雪, 易阳, 等. 莲藕酚类物质的变化及采后贮藏对鲜切莲藕酚类物质的影响[J]. 食品科技，2021, 46(2): 25−32. [QI Xin, ZHOU Baixue, YI Yang, et al. Changes of phenols in *Lotus* root and effects of postharvest storage on phenols in fresh-cut *Lotus* root[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 25−32.]

[17] 袁斌, 周诗雨, 刘昌伟, 等. 多酚氧化酶的提取工艺与活性测定研究[J]. 茶叶通讯，2020, 47(2): 291−296. [YUAN Bin, ZHOU Shiyu, LIU Changwei, et al. Study on extraction process and activity determination of polyphenol oxidase[J]. Tea Communication, 2020, 47(2): 291−296.]

[18] 普红梅, 李宏, 王海丹, 等. 4 种蔬菜氧化酶、过氧化物酶活性测定及其抑制研究[J]. 食品科技，2021, 46(12): 281−287. [PU Hongmei, LI Hong, WANG Haidan, et al. Activity determination and inhibition of 4 kinds of vegetable oxidase and peroxidase[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(12): 281−287.]

[19] BLEIBAUM R N, STONE H, TAN T, et al. Comparison of sensory and consumer results with electronic nose and tongue sensors for apple juices[J]. Food Quality and Preference, 2002, 13(6): 409−422.

[20] DHAKAL S, BALASUBRAMANIAM V M, AYVAZ H, et al. Kinetic modeling of ascorbic acid degradation of pineapple juice subjected to combined pressure-thermal treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 62−70.

[21] 赵莹. 睡莲离体培养及愈伤组织诱导增殖研究[D]. 南京：南京农业大学, 2022. [ZHAO Ying. Study on in vitro culture and callus induction and proliferation of *Nymphaea*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.]

[22] 曹荣安, 张学敏, 刁静静, 等. 超声处理对黑豆蛋白体外消化特性的影响[J]. 食品工业科技，2025, 46(3): 143−150. [CAO Rongan, ZHANG Xuemin, DIAO Jingjing, et al. Effect of ultrasonic treatment on the *in vitro* digestibility properties of black bean protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 143−150.]

[23] ZHU Danshi, ZHANG Yueyi, KOU Chengcheng, et al. Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105975.

[24] WANG Jin, VANGA S K, RAGHAVAN V. High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the ascorbic acid, total phenolics, flavonoids and antioxidant capacity[J]. LWT, 2019, 107: 299−307.

[25] ABID M, JABBAR S, WU Tao, et al. Qualitative assessment of sonicated apple juice during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1299−1308.

[26] GAO Jing, LIU Jian, PANG Xueli. Characterization of the color, physicochemical properties, organic acids, and aroma profiles of kiwifruit wines by different fermentation patterns and fining stages[J]. LWT, 2024, 199: 116097.

[27] JABBAR S, ABID M, HU B, et al. Exploring the potential of thermosonication in carrot juice processing[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(11): 7002−7013.

[28] CAO Xiamin, CAI Chunfang, WANG Yongling, et al. Effects of ultrasound processing on physicochemical parameters, antioxidants, and color quality of bayberry juice[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019(1): 7917419.

[29] MARTÍNEZ-FLORES H E, GARNICA-ROMO M G, BERMÚDEZ-AGUIRRE D, et al. Physico-chemical parameters, bioactive compounds and microbial quality of thermo-sonicated carrot juice during storage[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 650−656.

[30] BHAT R. Impact of ultraviolet radiation treatments on the quality of freshly prepared tomato (*Solanum lycopersicum*) juice[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 635−640.

[31] 高瑞萍, 刘松林, 吴振. UV-C 联合热处理对橙汁品质特性的影响[J]. 食品工业科技，2022, 43(9): 79−86. [GAO Ruiping, LIU Songlin, WU Zhen. Effect of ultraviolet-C combined with heat treatments on the quality properties of orange juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 79−86.]

[32] WANG Libo, LI Tengfei, LIU Fangcheng, et al. Ultrasonic-assisted enzymatic extraction and characterization of polysaccharides from dandelion (*Taraxacum officinale*) leaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 846−856.

[33] 谢佳函, 刘回民, 刘美宏, 等. 红豆皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 中国食品学报，2020, 20(1): 147−157. [XIE Jiahan, LIU Huimin, LIU Meihong, et al. Extraction process optimization and antioxidant activity analysis of polyphenols from azuki bean coats(*Vigna angularis*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(1): 147−157.]

[34] BHAT R, KAMARUDDIN N S B C, MIN-TZE L, et al. Sonication improves kasturi lime (*Citrus microcarpa*) juice quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(6): 1295−1300.

[35] ZHU Yuanyuan, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Application advantages of new non-thermal technology in juice browning control: A comprehensive review[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 4102−4123.

[36] HAN A M, XU X M, YANG N, et al. Application of induced voltage in cloudy apple juice: Enzymatic browning and bioactive and flavouring compounds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(7): 4138−4147.

[37] RAMÍREZ-MELO L M, del SOCORRO CRUZ-CANSINO N, DELGADO-OLIVARES L, et al. Optimization of antioxidant activity properties of a thermosonicated beetroot (*Beta vulgaris* L.) juice and further *in vitro* bioaccessibility comparison with thermal treatments[J]. LWT, 2022, 154: 112780.

[38] 李俊, 卢扬, 刘永翔, 等. 不同品种马铃薯多酚氧化酶酶学特性对比[J]. 食品科技，2020, 45(6): 218−223. [LI Jun, LU Yang, LIU Yongxiang, et al. Comparison of enzymatic characteristics of polyphenol oxidase in different varieties of potato[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 218−223.]

[39] 甘笑静, 陈志周, 李绍振, 等. 超声-抗坏血酸复合处理对新梨 7 号梨汁的褐变及营养品质的影响[J]. 食品科技，2022, 47(11): 51−58,65. [GAN Xiaojing, CHEN Zhizhou, LI Shaozhen, et al. Effect of ultrasound-ascorbic acid combination treatment on browning and nutritional quality of xinli No. 7 pear juice[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(11): 51−58,65.]

[40] 刘爱龙, 赵智慧, 董建方, 等. 白酒浸泡鲜枸杞发酵工艺对枸杞酶促褐变的影响研究[J]. 酿酒，2023, 50(3): 83−87. [LIU Ailong, ZHAO Zhihui, DONG Jianfang, et al. Effect of ffermentation process of fresh *Lycium barbarum* L. soaked in liquor on enzymatic bbrowning of *Lycium barbarum* L[J]. Liquor Making, 2023, 50(3): 83−87.]

[41] ZHANG Song. Recent advances of polyphenol oxidases in plants[J]. Molecules, 2023, 28(5): 2158.

[42] 鄢敏丽. 莲藕多酚氧化酶互作蛋白的筛选及验证[D]. 杨

凌: 西北农林科技大学, 2019. [YAN Minli. Screening and verification of polyphenol oxidase interacting protein in *Lotus*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.]
[43] KABAWA B, SAMPERS I, RAES K. Effect of ultrasonic treatment on enzymes: Decoupling the relation between the ultrasonic driven conformational change and enzyme activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106720.
[44] FONTELES T V, COSTA M G M, de JESUS A L T, et al. Power ultrasound processing of cantaloupe melon juice: Effects on quality parameters[J]. Food Research International, 2012, 48(1): 41−48.
[45] 吴咏, 金建, 付秀丽, 等. 超声波、紫外线、超声波联合紫外线对鲜切香菇多酚氧化酶与过氧化物酶的钝化及其机理研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 20−25,32. [WU Yong, JIN Jian, FU Xiuli, et al. Effects of ultrasound, ultraviolet, ultrasound synchronized ultraviolet on the inactivation of polyphenol oxidase and peroxidase of fresh-cut *Lentinus edodes* and its mechanisms[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 20−25,32.]
[46] 杨明冠. 超声抑制鲜切马铃薯酶促褐变机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015. [YANG Mingguan. Mechanism of ultrasound inhibiting enzymatic browning of fresh-cut potato[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015.]
[47] 高瑞萍, 朱建飞, 周文斌, 等. 超声加工技术对果蔬汁品质影响及其作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 326−338. [GAO Ruiping, ZHU Jianfei, ZHOU Wenbin, et al. Progress in understanding the effect and action mechanism of ultrasound processing on the quality of fruit and vegetable juices[J]. Food Science, 2022, 43(7): 326−338.]
[48] TEREFE N S, YANG Y H, KNOERZER K, et al. High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 52−60.
[49] CHEN Liyi, BI Xiufang, GUO Dandan, et al. The effect of high-power ultrasound on the quality of carrot juice[J]. Food Science and Technology International, 2019, 25(5): 394−403.
[50] 刘文强, 董壮壮, 孙庆, 等. 桑叶茶中多酚、黄酮含量与抗氧化作用的相关性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(2): 239−245. [LIU Wenqiang, DONG Zhuangzhuang, SUN Qing, et al. Correlation between the contents of active substances in mulberry leaf tea and their antioxidant activities[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(2): 239−245.]
[51] 张伟清, 林媚, 王天玉, 等. 基于 PCA 分析和聚类分析的柑橘果实品质综合评价[J]. 果树学报, 2023, 40(5): 902−918. [ZHANG Weiqing, LIN Mei, WANG Tianyu, et al. Comprehensive evaluation of *Citrus* fruit quality based on principal component and cluster analysis[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(5): 902−918.]
[52] 吴晓婷, 闫德勤. 数据降维方法分析与研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 2832−2835. [WU Xiaoting, YAN Deqin. Analysis and research on method of data dimensionality reduction[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(8): 2832−2835.]
[53] GREENACRE M, GROENEN P J F, HASTIE T, et al. Principal component analysis[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2022, 2: 100.
[54] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 243−250. [LIU Wei, ZHANG Qun, LI Zhijian, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids of different cultivars of daylily buds[J]. Food Science, 2019, 40(10): 243−250.]
[55] 宫德晅. 三种催陈方法对威代尔葡萄酒品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. [GONG Dexuan. Effects of three accelerating aging methods on the quality of vidal wine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.]
[56] 孙建霞, 梅洲雄, 白卫滨, 等. 超声空化效应对食品品质影响研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(4): 337−342. [SUN Jianxia, MEI Zhouxiong, BAI Weibin, et al. Research progress on the effects of ultrasonic cavitation on food quality[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2017, 36(4): 337−342.]
[57] HABINSHUTI I, MU Taihua, ZHANG Miao. Structural, antioxidant, aroma, and sensory characteristics of Maillard reaction products from sweet potato protein hydrolysates as influenced by different ultrasound-assisted enzymatic treatments[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130090.