DOI:10.12441/spyswjs.20250822002 [文章编号] 1673-1689(2026)06-0082-10

超高压预处理对桑葚热风干燥特性及品质变化的影响

张莉会[1,2] 乔 宇[1*] 肖家喜[1] 陈学玲[1] 曹金花[3]

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所,湖北 武汉 430064; 2. 湖北中医药大学药学院,湖北 武汉 430065; 3. 新疆金桑湾生物科技有限公司,新疆 博尔塔拉蒙古自治州 833300)

摘要:【目的】提高热风干燥桑葚的品质与干燥效率。**【方法】**采用不同压力(0~300 MPa)的超高压预处理桑葚,通过低场核磁共振(LF-NMR)、显微结构观察、细胞壁组分定量、活性成分测定及电子鼻主成分分析等方法,系统研究其对干燥特性、水分分布、细胞结构和活性成分的影响。**【结果】**150 MPa为关键压力阈值,该条件下自由水比例达到峰值(T_{23}峰面积占比47.3%),细胞壁-膜系统发生选择性破裂并形成贯通腔隙,孔隙率显著提高。纤维素质量分数随着压力的升高逐渐下降,达到250 MPa后趋于稳定(10.28 mg/g),原果胶持续降解(300 MPa时降至10.25 mg/g),可溶性果胶质量分数逐渐上升至11.81 mg/g(300 MPa),表明高压会诱导果胶降解,进而引起细胞壁结构的变化。超高压预处理使干燥时间缩短38.5%,活性成分保留率显著提高(黄酮质量分数1.01 mg/g,总酚质量分数0.32 mg/g)。电子鼻分析显示,300 MPa时风味变化最大。**【结论】**综合品质与干燥效率,150 MPa为最佳预处理条件,通过细胞结构重组、水分状态转化及细胞壁组分降解的协同作用优化干燥过程,为桑葚高值化加工提供理论依据。

关键词:桑葚;超高压;热风干燥;微观结构;活性成分

Effect of Ultra-high Pressure Pretreatment on the Hot Air Drying Characteristics and Quality of Mulberries

ZHANG Lihui[1,2] *QIAO Yu*[1*] *XIAO Jiaxi*[1] *CHEN Xueling*[1] *CAO Jinhua*[3]

(1. Institute for Farm Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2. School of Pharmacy, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China; 3. Xinjiang Jinsang Bay Biotechnology Co., Ltd., Bortala Mongol Autonomous Prefecture 833300, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to improve the quality and drying efficiency of hot air-dried mulberries. [**Method**] Mulberries were pretreated with different pressure levels (0~300 MPa). The effects on drying characteristics, water distribution, cellular structure, and active components were systematically investigated through low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), microscopic structural observation, quantitative analysis of cell wall components, active compound determination, and principal component analysis of electronic nose data. [**Result**] The key pressure threshold was identified at 150 MPa. Under this condition, the free water ratio reached its peak (T_{23} peak area accounted for 47.3%). Selective rupture of the cell wall-membrane system formed interconnected cavities, significantly increasing porosity. The mass fraction of cellulose gradually decreases as pressure increases, stabilizing at 250 MPa (10.28 mg/g). The protopectin kept degrading (down to 10.25 mg/g at 300 MPa), and that of soluble pectin gradually increased to 11.81 mg/g, indicating that pectin degradation induced by high pressure dominated structure changes in the cell wall. Ultra-high pressure pretreament resulted in a reduction of 38.5% in drying time and significantly improved the retention of active

基金项目:湖北省科技计划项目(2025BBB066)。

通信作者:乔宇(1981—),女,博士,研究员,主要从事农产品加工与贮藏研究。E-mail:qiaoyu412@sina.com

收稿日期:2025-08-22 **修回日期:**2025-09-20

compounds (mass fraction of flavonoid: 1.01 mg/g; mass fraction of total phenols: 0.32 mg/g). Electronic nose analysis revealed the greatest flavor change occurred at 300 MPa. [**Conclusion**] Considering both quality and drying efficiency, 150 MPa was selected as the optimal pretreatment condition. It exerts the synergistic effects of cellular structural reorganization, water state transformation, and degradation of cell wall components in improving the drying process. This study provides a theoretical basis for the high-value processing of mulberries.
Keywords: mulberry; ultra-high pressure; hot air drying; microstructure; active compound

桑葚作为一种药食同源的水果，因富含花青素、白藜芦醇、维生素、矿物质及膳食纤维等生物活性物质而备受关注[1]。然而，桑葚果实采后生理活动旺盛、含水量高、组织脆弱，极不耐贮藏与运输且采后损失率居高不下[2]。热风干燥因设备简单、操作方便、成本相对低廉，是当前桑葚规模化加工中延长货架期、提升附加值的主导方式[3]。但传统热风干燥过程中伴随着高温长时热处理，会对桑葚中的热敏性活性成分造成不可逆破坏，导致活性成分降解以及品质劣变，显著降低干制品的营养、感官与商品价值[4]。

为缓解热风干燥对桑葚品质的负面影响，预处理技术的研究与应用尤为关键。目前，常见的物理预处理方法（如热水烫漂、微波、超声波等）虽能在一定程度上缩短干燥时间或改善部分品质，但在酶活性的有效调控、色泽保持及活性成分保护方面仍存在局限，且可能带来新的热损伤或能耗问题[5]。近年来，非热加工技术因可最大限度保持果蔬品质的独特优势而迅速发展[6]。超高压处理作为代表性技术之一，其原理是利用100~1 000 MPa的静水压力，瞬时均匀地作用于物料[7]，利用压力改变蛋白质（包括酶）的空间构象与氢键等非共价键，可钝化多酚氧化酶、过氧化物酶等导致果蔬褐变的关键内源酶，从而有效抑制干燥过程中的酶促褐变[8]。同时，超高压处理可诱导细胞膜通透性改变，形成微孔通道，有利于细胞内部水分迁移，理论上可加速后续干燥进程[9]。已有研究表明，超高压预处理在蓝莓、草莓、胡萝卜等果蔬的热风干燥或联合干燥中展现出提高干燥效率、提升色泽稳定性、保留抗氧化能力等积极作用。

然而，将超高压预处理技术应用于桑葚热风干燥体系的研究仍相对匮乏且缺乏系统性。目前的研究多聚焦于超高压预处理对桑葚汁或鲜果品质的影响，关于其对桑葚切片或整果在后续热风干燥过程中的动力学行为及综合品质的系统性影响规律鲜有报道。基于此，作者从干燥动力学、物理品质、营养功能成分及水分迁移机制4个层面展开研究：1）分析不同超高压预处理参数下桑葚的热风干燥特性；2）评估超高压预处理对干燥后桑葚色泽、质地及微观结构等物理品质的调控作用；3）探讨超高压预处理对总酚、总花青素、维生素C等活性成分及抗氧化活性的保留效应；4）结合低场核磁共振等技术揭示超高压预处理诱导的水分分布与迁移规律及其与干燥行为的关联机制。旨在系统阐明超高压预处理对桑葚热风干燥特性及其干制品综合品质的影响机制，为高品质桑葚干制品的开发提供技术支持，推动超高压技术在果蔬干燥加工中的创新应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桑葚：采摘于湖北省农业科学院经济作物研究所；芦丁、福林酚试剂、没食子酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS）、半乳糖醛酸：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；咔唑：分析纯，美国西格玛奥德里奇公司。

1.2 仪器与设备

超高压实验机：HPPL2-600MPa/2L型，天津华泰森淼生物工程技术股份有限公司；低场核磁共振分析仪：PQ-001型，苏州纽迈分析仪器股份有限公司；质构仪：TA.XT 2i/50型，英国Stable Micro Systems公司；电热恒温鼓风干燥箱：DHG-9123A型，上海精宏实验设备有限公司；紫外分光光度计：UV-3802型，尤尼柯（上海）仪器有限公司；便携式电子鼻：PEN-3型，德国AIRSENSE公司。

1.3 方法

1.3.1 超高压预处理

选取成熟度为8~9成、大小均匀、色泽深红、无损伤的新鲜桑葚为原料。4 ℃冷藏后分装于聚乙烯密封袋（12 cm×15 cm）中，热封。随后在室温

下分别施加 0、50、100、150、200、250、300 MPa 压力，处理 5 min。

1.3.2 水分分布的测定

预处理后的样品置于永久磁场中心射频线圈处。采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）脉冲序列测定横向弛豫时间（T_2），参数如下：谱宽 100 kHz，接收增益 3，扫描次数 32 次，90°脉冲宽度 17 μs，180°脉冲宽度 3 400 μs，采集点数 1 120 160，等待时间 1 000 ms，回波时间 0.300 ms，回波数 2 000。使用 PQ001 软件采集 T_2 信号，每组样品平行测定 3 次。

桑葚样品的纵向弛豫时间（T_1）和 T_2 加权图像通过自旋回波成像序列获取。图像参数如下：视场 200 mm×300 mm，层厚 5.0 mm，矩阵大小为 256×192。T_1 加权图像参数：回波时间 20 ms，重复时间 700 ms。T_2 加权图像参数：回波时间 50 ms，重复时间 3 000 ms。

1.3.3 桑葚干燥特性的测定

参照文献[10-11]的方法测定干燥特性。7 组经不同超高压预处理的样品在 60 ℃下同步进行热风干燥。干燥前称量各组样品质量，随后将样品平铺于纱布包裹的托盘上（保证样品间距，使热风均匀接触），并置于热风干燥箱中。干燥过程保持恒温，每 0.5 h 取出各组中对应编号的 6 个样品，称质量后立即放回。干燥至样品水分质量分数约 8% 时终止。根据质量变化计算物料水分比并绘制干燥曲线，同时计算干燥速率。干燥速率指单位时间内样品的水分损失量[11]，按式（1）计算。

$$R=\frac{\omega_1-\omega_2}{t_2-t_1} \quad (1)$$

式中：

R——样品干燥速率，g/(g·h)；

t_1——干燥过程中的取样时间，h；

t_2——干燥过程中对应的下一次取样时间，h；

ω_1——t_1 时样品的干基含水率，g/g；

ω_2——t_2 时样品的干基含水率，g/g。

1.3.4 组织结构分析

桑葚组织块（2 mm^3）经质量分数 4% 的多聚甲醛固定 24 h 后修整，用梯度乙醇脱水、石蜡包埋。包埋块于−20 ℃冷却后再次修整，切成 4 μm 厚切片，经摊片机展平后于 60 ℃烘箱烘烤。随后进行番红−固绿染色，染色流程为番红染色、水洗/脱色、固绿染色、梯度脱水透明、中性树胶封片。放大倍数为 10×，最后在显微镜下观察组织结构。

1.3.5 硬度测定

选取大小相近的样品，采用质构仪（配备 P2 剪切探头）进行测定。参数设置如下：采用压缩模式，目标应变模式（return to start），触发方式为力触发，等待时间 0 s，速度分别为测试前 5.00 mm/s、测试中 1.00 mm/s、测试后 5.00 mm/s，测试距离 8.00 mm。硬度由仪器软件直接输出。每组样品平行测定 10 次，剔除最大值和最小值后取平均值。

1.3.6 细胞壁多糖成分的测定

1）纤维素的测定：参照文献[12]中的硫酸−蒽酮法并加以修改。准确称取桑葚果肉 2.00 g，加入 30 mL 体积分数 95% 的硫酸，充分混匀。将混合液置于沸水浴中加热消化 30 min。将消化完成的溶液定量转移至 50 mL 容量瓶中，用体积分数 95% 的硫酸定容至刻度。将此溶液过滤，收集滤液。待滤液冷却至室温后，用蒸馏水将其稀释至 100 mL。最后，采用硫酸−蒽酮法对稀释后的滤液进行显色反应，并根据标准曲线计算纤维素质量分数。

2）果胶的测定：参照李祥昀[13]的方法，首先从桑葚样品中分别提取原果胶和可溶性果胶，得到果胶提取液。将 1.0 mL 备用的果胶提取液置于 25 mL 试管中，随后严格按照参照方法中的操作步骤建立果胶标准曲线，并测定样品中的果胶。每个样品均独立重复测定 3 次。

1.3.7 活性成分和抗氧化活性的测定

参照文献[14]的方法测定样品的活性成分和抗氧化活性。称取 5 g 桑葚，加入 25 mL 体积分数 70% 的乙醇溶液进行均质，然后将匀浆在超声下提取 1 h，离心后得到的上清液即为提取液。

1）总酚和黄酮质量分数测定：采用福林酚法测定桑葚中总酚质量分数，以没食子酸为标准品，根据标准曲线计算桑葚中总酚质量分数。以芦丁为标准品，根据标准曲线计算桑葚中黄酮质量分数。

2）DPPH 自由基清除率测定：分别设置 4 种反应体系：对照管为 3.5 mL 6.5×10^{-5} mol/L 的 DPPH 溶液+0.5 mL 体积分数 70% 乙醇，混匀，静置 20 min；样品管为 3.5 mL 6.5×10^{-5} mol/L 的 DPPH 溶液+0.5 mL 样品提取液，立即混匀测定；样品背景管为 3.5 mL 体积分数 70% 乙醇+0.5 mL 样品提取液，混匀测定；空白参照管为 3.5 mL 无水乙醇+0.5 mL 体积分数 70% 乙醇。测定所有体系在 517 nm 处的吸光

度。每组样品平行测定3次。DPPH自由基清除率按式(2)计算。

$$R=\frac{A_s-A_r}{A_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

R——DPPH自由基清除率，%；

A_s——样品管吸光度；

A_r——样品背景管吸光度；

A_0——对照管吸光度。

3)$ABTS^+$自由基清除率测定：将ABTS试剂溶于2.45 mmol/L过硫酸钾溶液，配制成7 mmol/L $ABTS^+$自由基储备液，室温避光静置16 h。用10 mmol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.4)稀释上述储备液，使其在734 nm处的吸光度为0.680~0.720，即为$ABTS^+$自由基工作液。取4 mL工作液，加入40 μL样液，振荡混匀30 s，静置15 min，于734 nm处测定吸光度。每组样品平行测定3次。$ABTS^+$自由基清除率按式(3)计算。

$$R_1=(1-\frac{A_z}{0.700})\times 100\% \quad (3)$$

式中：

R_1——$ABTS^+$自由基清除率，%；

0.700——$ABTS^+$自由基工作液的吸光度；

A_z——被测样品吸光度。

1.3.8 花色苷测定

花色苷质量分数采用pH示差法测定[15]。分别取2.0 mL样品提取液置于2支25 mL比色管中，一支用pH 1.0的缓冲液(0.2 mol/L的KCl+0.2 mol/L的HCl)稀释至10 mL；另一支用pH 4.5的缓冲液(1 mol/L NaAc+1 mol/L的HCl+H_2O)稀释至10 mL。随后，于510 nm处分别测定2管溶液的吸光度。

1.3.9 色泽测定

采用HunterLab-D25LT型色差仪，测定样品的L^*(明暗值)、a^*(红绿值)、b^*(黄蓝值)，根据式(4)计算ΔE。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0)^2+(a^*-a_0)^2+(b^*-b_0)^2} \quad (4)$$

式中：

ΔE——色差；

L^*——桑葚干燥产品的明暗值；

a^*——桑葚干燥产品的红绿值；

b^*——桑葚干燥产品的黄蓝值；

L_0——新鲜桑葚的明暗值；

a_0——新鲜桑葚的红绿值；

b_0——新鲜桑葚的黄蓝值。

1.3.10 风味测定

称取2.00 g桑葚样品置于20 mL顶空瓶中捣碎。依次加入0.5 g NaCl和2.0 mL蒸馏水，密封后于40 ℃水浴平衡30 min[16]。电子鼻测试参数：检测时间120 s，采样间隔1 s，清洗时间100 s，载气流量600 mL/min。每组样品平行测定3次。

1.4 数据处理及分析

所有数据均为3次独立重复测定的平均值。采用SPSS 2024进行单因素方差分析(One-way ANOVA)，显著性水平设定为$P<0.05$(显著)和$P<0.01$(极显著)。采用Origin 8.5制图。

2 结果与讨论

2.1 超高压预处理对桑葚水分分布的影响

如图1所示，桑葚的T_2谱存在3个特征峰：T_{21}(0~10 ms)归属细胞壁结合水，T_{22}(11~100 ms)表征细胞质及细胞外间隙的不易流动水，T_{23}(>100 ms)则代表液泡内自由水[17]。超高压预处理后，桑葚的T_2弛豫曲线整体向左偏移(弛豫时间缩短)，原因是高压处理引发了渗透压失衡，导致水分渗出以及细胞壁-膜系统损伤，细胞结构完整性遭到破坏。上述变化强化了细胞壁多糖羟基与水分子间的结合作用，加速了质子交换过程，从而降低了水分迁移性[18]。超高压150 MPa处理组中T_{23}峰面积显著增大，表明自由水占比高于其他压力条件。这种特殊现象源于适度高压对细胞结构的定向调控作用，150 MPa压力可能达到结构损伤阈值，通过改变液泡膜通透性或致使其破裂，促使液泡内自由水向细胞质迁移[19]，同时优化细胞壁孔隙结构并形成高效水分通道[20]。自由水比例的增加直接提升了后续热风干燥效率，因为自由水更易脱除，可显著缩短干燥周期。该发现为超高压协同干燥技术的参数优化提供了关键理论依据。

低场核磁共振伪彩成像技术在食品科学领域应用广泛，其通过表征水分子空间分布状态来评估食品组成、结构与品质[21]。伪彩图中颜色变化遵循从红色到黄色再到蓝色的过渡规律，其中红色区域代表最高质子密度，即高水分区，蓝色区域则指示最低质子密度，即低水分区。未经预处理的桑葚整体呈现均一黄绿色(中等水分区域)，内

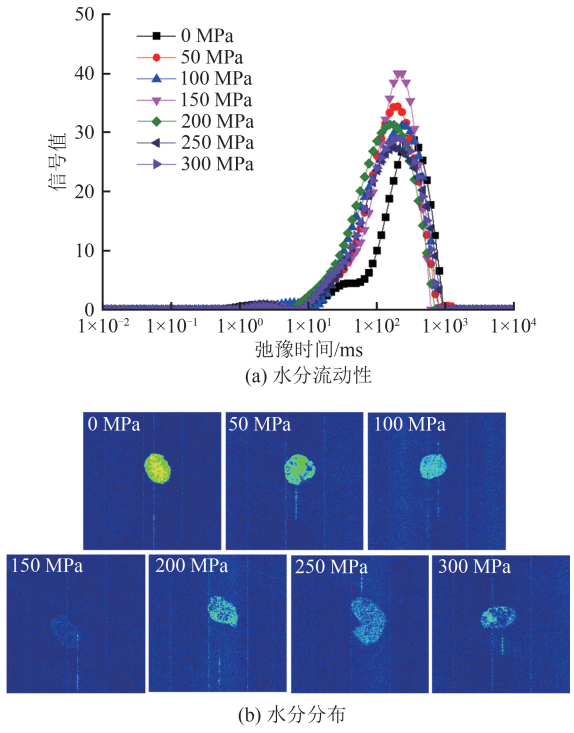


图 1 超高压预处理对桑葚水分分布的影响

Fig. 1 Effects of ultra-high pressure pretreatment on water distribution of mulberries

部部分区域显示红色。经超高压预处理后，样品内部水分分布呈现显著异质性，表现为绿色区域减少并出现蓝色斑块。当压力达到 150 MPa 时，蓝色区域覆盖面积达到最大值，表明该处理组水分损失最为明显，见图 1(b)。伪彩成像结果与 T_2 弛豫数据相互验证，共同证实超高压预处理可降低桑葚水分质量分数。这种水分结合状态与空间分布的改变对干燥特性具有关键调控作用，具体表现为自由水比例升高与水分迁移通道的形成[22]，为后续热风干燥速率提升奠定基础。

2.2 超高压预处理后桑葚干燥曲线变化

如图 2(a)所示，桑葚水分质量分数随干燥时间延长呈下降趋势，且超高压预处理可显著缩短干燥周期。对照组需 13 h 完成干燥，而 50~300 MPa 处理组的干燥时间分别降至 10 h(50 MPa)、9 h(100 MPa)、8 h(150 MPa)、9 h(200 MPa)、9 h(250 MPa)和 10 h(300 MPa)。其中 150 MPa 处理组干燥效率最为突出，干燥时间较对照组缩短 38.5%。从图 2(b)中可以看出，超高压预处理能显著提高桑葚的干燥速率。这种干燥加速现象主要源于超高压引发的多级结构重组：高压处理会破坏细胞壁-膜系统完整性，导致组织破裂并形成微通道，直接促进水分扩散[23]；同时细胞渗透性增强，优化了水分传递路径[24]。本研究结果与显微结构观察高度吻合，150 MPa 处理组细胞破裂程度最大。细胞物理结构损伤是核心驱动力，150 MPa 压力使液泡膜选择性破裂并释放自由水，同时细胞壁孔隙重组形成高效扩散微通道；水分状态转化提供动力学优势，自由水比例升高显著降低蒸发能耗；酶活性调控可以发挥协同作用，导致多酚氧化酶失活，从而减少膜脂质过氧化，维持通道畅通[25]。值得注意的是，压力存在明确阈值效应，低于 100 MPa 时膜通透性改变有限，超过 200 MPa 则因细胞壁凝胶化导致通道阻塞，这解释了 150 MPa 时出现干燥速率峰值的现象。

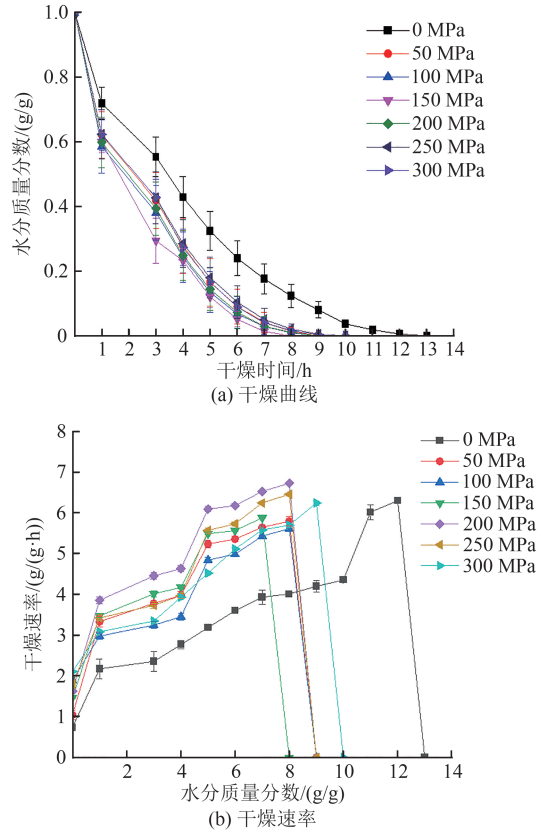


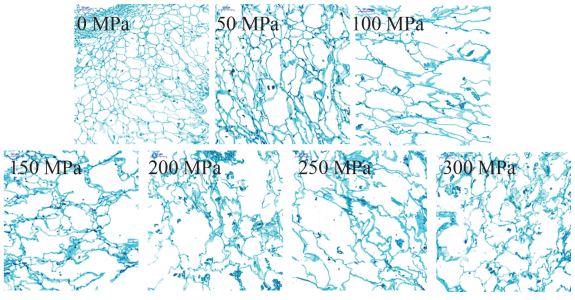
图 2 超高压预处理对桑葚干燥特性的影响

Fig. 2 Effects of ultra-high pressure pretreatment on the drying characteristics of mulberries

2.3 超高压预处理对桑葚组织结构的影响

果蔬质构特性主要由细胞壁及胞间层结构决定，构成细胞壁基质的核心组分是纤维素与果胶。如图 3 所示，显微结构分析表明，超高压预处理对

桑葚细胞组织具有压力依赖性影响。未处理样品（0 MPa）呈现完整薄壁组织与致密细胞膜；50 MPa处理引发局部细胞壁断裂和胞间隙微增；当压力升至100~300 MPa时，细胞壁破裂、细胞分离及胞间空隙扩展等渐进性损伤显著增加。150 MPa压力触发多细胞融合，形成贯通性腔隙结构。此现象源于高压对细胞壁组分的协同破坏效应：静水压力诱导纤维素微纤丝氢键断裂，削弱机械强度，同时激活果胶甲酯酶，促使胞间层果胶脱酯化和溶解，导致细胞间黏附力降低[26]，这种结构重组直接建立了高效水分迁移通道。研究表明，细胞壁退化可使水分迁移阻力降低73%（依据孔隙率测算），从而解释150 MPa组干燥速率峰值（较对照组提升38.5%）的形成机制。值得注意的是，超过200 MPa的压力会引发细胞壁组分凝胶化，导致通道阻塞。该结果证实存在150 MPa的压力阈值，该阈值下形成的贯通腔隙使水分扩散路径缩短，为优化联合干燥工艺提供了细胞学基础。



番红-固绿染色，放大倍数10×。

图3 超高压预处理对桑葚组织结构的影响

Fig. 3 Effects of ultra-high pressure pretreatment on the tissue structure of mulberries

2.4 超高压预处理对桑葚硬度和细胞壁多糖的影响

桑葚硬度随超高压压力升高呈非线性降低，见图4。硬度在150 MPa后进入稳定态，表明存在压力饱和点，超过该值后组织压缩应变达到极限，硬度变化显著减缓。这种软化效应源于高压对细胞壁组分的协同解构作用，静水压力破坏纤维素微纤丝的氢键网络，导致机械强度衰减，同时通过激活果胶甲酯酶触发β消除反应，促使原果胶持续解聚[27]。可溶性果胶质量分数增加，证实高压诱导果胶分子链断裂而非溶出。当压力大于100 MPa时，纤维素降解呈现停滞现象，对应纤维素结晶区破坏后的结构稳定性丧失；而原果胶的单调递减则与PME酶活性的压力依赖性激活直接相关[28]。细胞壁结构崩解导致多细胞融合腔隙形成，胞内物质渗入胞间隙使组织持水力下降、硬度降低。此外，细胞壁孔隙率提升显著降低水分迁移阻力，提高了有效水分扩散系数，直接缩短了干燥时间。

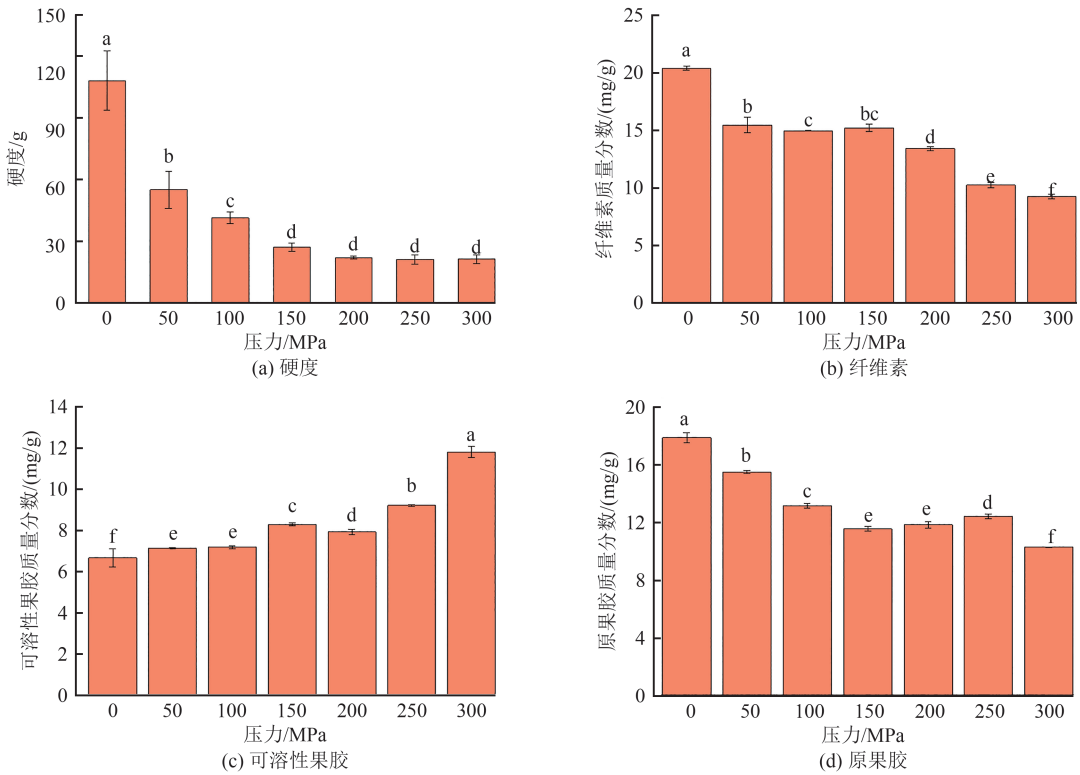
2.5 超高压预处理对桑葚活性成分及抗氧化活性的影响

桑葚中酚类物质作为关键次生代谢物，通过清除活性氧自由基在抗氧化过程中发挥核心作用。超高压预处理可显著影响这些活性成分的保留率。如图5所示，对照组（0 MPa）总酚与黄酮质量分数最低，分别为0.15 mg/g和0.62 mg/g。随着压力升至150 MPa，两者质量分数达到峰值，分别为0.32 mg/g和1.01 mg/g。这种富集效应源于三重协同机制：一是高压破坏细胞壁-膜屏障，促进酚类物质溶出；二是100~300 MPa可有效钝化多酚氧化酶，减少酶促降解；三是高压诱导苯丙烷代谢途径关键酶（PAL、C4H）活化，促进次生代谢物的生物合成[29]。

同步测定的抗氧化活性结果显示，150 MPa处理组的$ABTS^+$自由基与DPPH自由基清除率最高（97.37%和86.60%），分别较对照组（84.90%和70.67%）增加12.47%与15.93%。值得注意的是，压力大于150 MPa时抗氧化活性未同步升高，表明存在成分-活性的非线性关联。研究表明，当压力超过一定值时，尽管酚类物质仍高于对照组，但高压引发的抗坏血酸氧化及美拉德反应加剧，部分抵消了酚类物质的抗氧化效能[15]。这种阈值效应证实150 MPa为酚类物质保留率与抗氧化活性的协同优化点，该压力下细胞结构损伤程度与酶失活水平形成最佳平衡，最大限度保留了抗氧化活性[21]。

2.6 超高压预处理对桑葚花色苷和色泽的影响

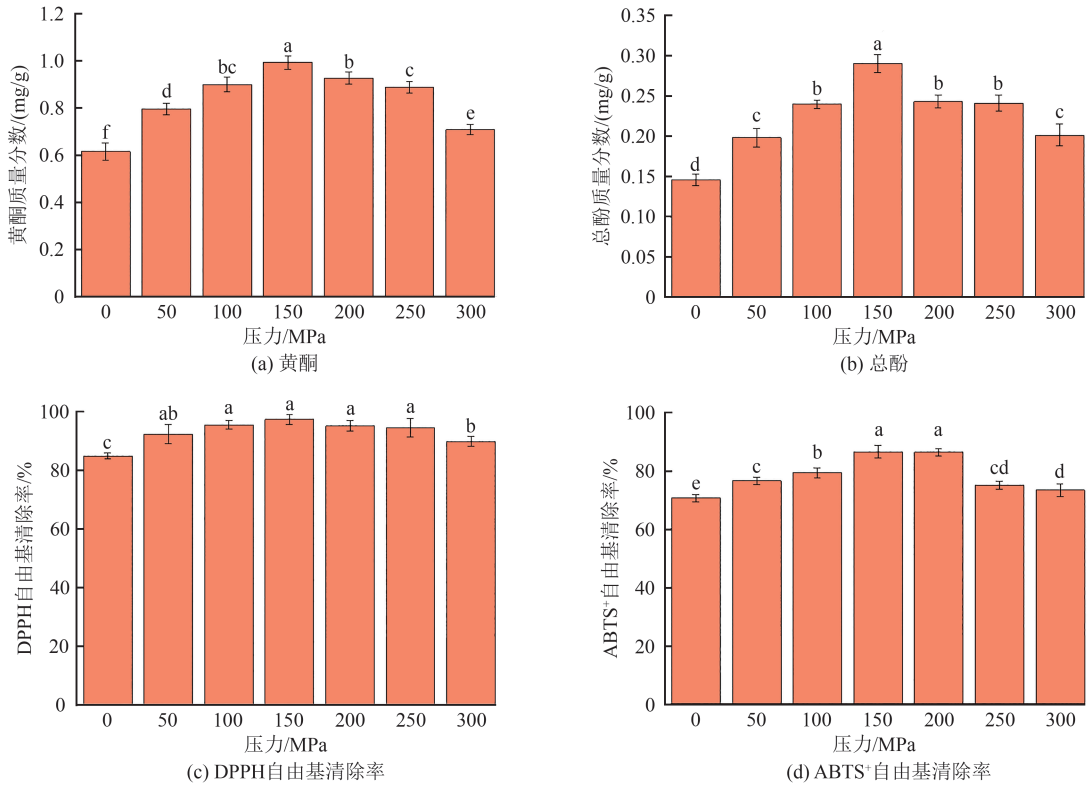
色泽作为原料与加工产品的核心品质指标，直接影响消费者接受度。如图6所示，超高压预处理通过双重机制显著提升桑葚花色苷保留率。新鲜桑葚花色苷质量分数为3.75 mg/g（干基），经超高压预处理后普遍升高，150 MPa组达到峰值5.83 mg/g。这主要源于高压环境有效降低了活性氧浓度，抑制生物活性物质降解[29]；同时高压处理可同步阻断多酚氧化酶催化的酶促褐变与非酶褐变反应，减少色素分解[30]。色泽分析进一步佐证



不同字母表示组间存在显著差异（$P<0.05$）。

图 4　超高压预处理对桑葚硬度和细胞壁多糖质量分数的影响

Fig. 4　Effects of ultra-high pressure pretreatment on the mulberry hardness and mass fraction of cell wall polysaccharides

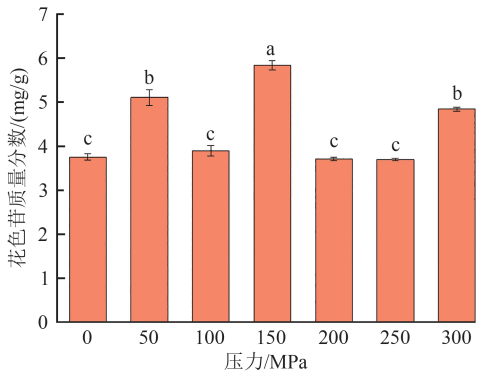


不同字母表示组间存在显著差异（$P<0.05$）。

图 5　超高压预处理对桑葚活性成分和抗氧化活性的影响

Fig. 5　Effects of ultra-high pressure pretreatment on the mass fractions of active compounds and antioxidant activity of mulberries

该效应（见表1），处理组L^*与a^*显著增加（$P<0.05$），其中100 MPa组色差ΔE达8.56±4.42，与未处理组（$\Delta E=0$）呈现最显著的视觉差异。这种色度学特征变化与细胞结构改变直接相关：高压破坏了液泡膜，促使花色苷溶出，增强色素显色强度；而氧化应激缓解则维持了色素稳定，协同提升色泽饱和度。



不同字母表示组间存在显著差异（$P<0.05$）。

图6　超高压预处理对桑葚花色苷质量分数的影响

Fig. 6　Effects of ultra-high pressure pretreatment on the mass fraction of anthocyanins in mulberries

表1　超高压预处理后桑葚色泽的变化

Table 1　Changes in color parameters of mulberries after ultra-high pressure pretreatment

组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
0 MPa	19.64±1.23^{a}	11.28±3.86^{a}	5.77±1.80^{ab}	0^{a}
50 MPa	22.83±2.70^{bc}	10.69±3.64^{a}	4.56±2.68^{ab}	5.76±1.91^{ab}
100 MPa	24.49±2.33^{c}	17.96±3.67^{b}	7.66±1.61^{b}	8.56±4.42^{b}
150 MPa	23.17±2.03^{bc}	13.17±4.02^{a}	5.79±1.48^{a}	5.36±1.54^{ab}
200 MPa	23.96±2.33^{bc}	16.93±2.24^{b}	7.25±1.11^{ab}	4.35±2.86^{a}
250 MPa	21.10±1.79^{ab}	11.65±4.17^{a}	5.87±1.80^{ab}	4.21±1.88^{a}
300 MPa	24.65±1.46^{c}	16.50±4.34^{b}	7.40±2.00^{b}	8.21±3.18^{b}

注：同列右肩不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

2.7　超高压预处理对桑葚风味的影响

如图7所示，电子鼻主成分分析（PCA）结果表明，第一主成分（PC1）贡献率达89.85%，第二主成分（PC2）贡献率为5.77%，累计贡献率95.62%，证实两者可充分表征桑葚挥发性组分的特征变异。超高压预处理引发显著的挥发性组分轮廓重构，不同压力组在PCA空间呈非重叠分布模式，显示明确的风味分化。具体而言，100 MPa作为临界响应压力，与对照组（0 MPa）发生显著风味分离；当压力升至300 MPa时，处理组位于PC1轴最远端，表明风味转变程度达到峰值。通过电子鼻和PCA解析技术有效捕捉到超高压诱导的挥发性组分谱演变，为风味品质调控建立量化判别模型。

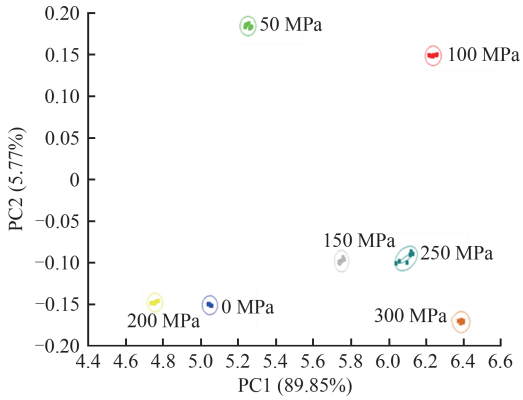


图7　超高压预处理对桑葚风味的影响

Fig. 7　Effects of ultra-high pressure pretreatment on the flavor of mulberries

3　结论

超高压预处理通过调控桑葚细胞微结构、水分分布与细胞壁组分相变，显著提高了热风干燥效率并改善了干制品品质。结果表明：在150 MPa条件下，超高压预处理诱导细胞壁-膜系统形成微孔通道，自由水比例显著增加（T_{23}峰面积占比达47.3%），干燥时间缩短38.5%，纤维素和果胶等细胞壁组分发生压力依赖性降解与转化，影响组织通透性和水分迁移行为，该处理条件有效保留了桑葚的活性成分（总酚、黄酮）及抗氧化能力，风味特征则随压力升高呈现独立变化趋势。以上结果深化了对超高压-热风联合干燥中物料响应机制的理解，尤其在细胞与分子层面揭示了水分迁移与成分保留的协同机制，对前人研究中仅关注单一品质指标而忽视结构-功能关联的结果形成了有效补充。本研究存在一定局限性，如未全面考察不同品种桑葚对超高压的响应差异，也未开展中试规模下的工艺验证。后续研究可围绕多品种适配性、能耗经济性评估以及风味调控机制等方面进一步展开。

参考文献

[1] 刘书晶，吴彩娥，范龚健，等. 桑葚酒发酵期间花色苷及抗氧化活性变化[J]. 食品与生物技术学报，2018，37(6)：624-631.

Liu S J, Wu C E, Fan G J, et al. Research on changes of anthocyanin and antioxidant activity of mulberry wine during fermentation [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(6): 624-631. (in Chinese)

[2] 黄子建. 超声辅助渗透处理对真空冷冻干燥桑葚品质的影响[J]. 福建轻纺, 2021(11): 2-7, 12.
Huang Z J. The effect of ultrasound-assisted penetration treatment on the quality of vacuum freeze-dried mulberries [J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2021(11): 2-7, 12. (in Chinese)

[3] 王瑞颖, 赵亚, 石启龙. 干燥方式对桑葚粉热力学特性与贮藏稳定性影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 247-255.
Wang R Y, Zhao Y, Shi Q L. Effects of drying methods on the thermodynamic properties and storage stability of mulberry powders[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(2): 247-255. (in Chinese)

[4] 郭朔, 李玥, 隋茜茜, 等. 桑葚热风-微波联合干燥动力学模型建立及风味分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 38-48.
Guo S, Li Y, Sui Q Q, et al. Establishment of kinetic mathematical model and flavor analysis of mulberry by hot air-microwave puffing drying [J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 38-48. (in Chinese)

[5] 蒋黎艳, 张艳东, 李若楠, 等. 预处理与干燥方式对生姜品质及风味影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(20): 351-357.
Jiang L Y, Zhang Y D, Li R N, et al. Research progress on impact of pretreatment and drying methods on quality and flavor of ginger[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(20): 351-357. (in Chinese)

[6] Anjos O, Seixas N, Antunes C A L, et al. Quality of bee pollen submitted to drying, pasteurization, and high-pressure processing: a comparative approach [J]. Food Research International, 2023, 170: 112964.

[7] 安可婧, 魏来, 唐道邦, 等. 蔬干燥前处理技术的应用及研究进展[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 314-321.
An K J, Wei L, Tang D B, et al. Application and research progress of pretreatment technology for drying of fruits and vegetables [J]. Modern Food Science & Technology, 2019, 35(6): 314-321. (in Chinese)

[8] 郝启栋, 乔旭光, 郑振佳, 等. 超高压和超声波预处理对蒜片热风干燥过程及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 278-286.
Hao Q D, Qiao X G, Zheng Z J, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on hot-air drying process and quality of garlic slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 278-286. (in Chinese)

[9] Liu M, Gao J, Sun T, et al. Effect of ultra-high-pressure synergistic different drying methods on storage quality of *Cistanche deserticola* [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2025, 80(1): 58.

[10] Zhao C F, Li T, Zhang C N, et al. Drying methods affect nutritional value, amino acids, bioactive compounds, and *in vitro* function of extract in mulberry leaves[J]. Food Chemistry, 2025, 481: 144018.

[11] Zhang L H, Qiao Y, Wang C, et al. Influence of high hydrostatic pressure pretreatment on properties of vacuum-freeze dried strawberry slices[J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127203.

[12] 孙晓玲. 蒽酮-硫酸法测定秋葵多糖条件的优化[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(9): 154-158.
Sun X L. Optimization of polysaccharide determination in okra by anthrone-sulfuric acid method[J]. China Food Additives, 2019, 30(9): 154-158. (in Chinese)

[13] 李祥昀. 黄杨叶果胶提取工艺及含量测定[J]. 河南中医, 2019, 39(6): 947-950.
Li X Y. Extraction technology and content determination of pectin from yellow poplar leaves [J]. Henan Traditional Chinese Medicine, 2019, 39(6): 947-950. (in Chinese)

[14] 赵慧芳, 马丽, 刘洪霞, 等. 树莓叶茶和嫩尖茶抗氧化活性成分研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(23): 7921-7925.
Zhao H F, Ma L, Liu H X, et al. Analysis on the antioxidant components of raspberry leaf and tender tip tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(23): 7921-7925. (in Chinese)

[15] 张莉会, 乔宇, 汪超, 等. 超高压结合超声预处理对真空冷冻干燥草莓片品质和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 157-167.
Zhang L H, Qiao Y, Wang C, et al. Effect of ultra high pressure combined with ultrasonic pretreatment on the quality and antioxidant activity of vacuum freeze-dried strawberry slices [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 157-167. (in Chinese)

[16] 谭宏渊, 凌玉钊, 黄丽琪, 等. 不同预处理对热风干燥山药片品质特性及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 43-52.
Tan H Y, Ling Y Z, Huang L Q, et al. Effects of different pretreatment on the quality characteristics and microstructure of hot air dried yam slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 43-52. (in Chinese)

[17] Zhang L H, Liao L, Qiao Y, et al. Effects of ultrahigh

pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying[J]. Food Chemistry，2020，303：125386.

[18] Wang L，Xu B G，Wei B X，et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices：effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying [J]. Ultrasonics Sonochemistry，2018，40(Pt A)：619-628.

[19] Zhang L H，Ran Y S，Liu D H，et al. Modification of the microstructure and cell wall polysaccharides alters drying behavior and biological activities of *Gastrodia elata* by high hydrostatic pressure pretreatment[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2025，104：104093.

[20] Zhao S N，Lv J T，Li Y，et al. Effects of ultrasonic and high-pressure processing pretreatment on drying characteristics and quality attributes of *Angelica keiskei* slices prepared by vacuum-freeze drying[J]. LWT-Food Science and Technology，2025，225：117901.

[21] Shi D F，Yin C M，Fan X Z，et al. Effects of ultrasound and gamma irradiation on quality maintenance of fresh *Lentinula edodes* during cold storage [J]. Food Chemistry，2022，373：131478.

[22] Sun Z X，Deng L Z，Dai T T，et al. Steam blanching strengthened far-infrared drying of broccoli：effects on drying kinetics，microstructure，moisture migration，and quality attributes[J]. Scientia Horticulturae，2023，317：112040.

[23] Peng J，Lu J H，Zhu J N，et al. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on physicochemical properties，bioactive components and antioxidant activities of dehydrated yam slices [J]. LWT-Food Science and Technology，2024，198：115954.

[24] Li D T，Deng L Z，Dai T T，et al. Ripening induced degradation of pectin and cellulose affects the far infrared drying kinetics of mangoes[J]. Carbohydrate Polymers，2022，291：119582.

[25] Patras A，Brunton N P，Da Pieve S，et al. Impact of high pressure processing on total antioxidant activity，phenolic，ascorbic acid，anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2009，10(3)：308-313.

[26] Turksever C，Gurel D B，Sahiner A，et al. Effects of green extraction methods on antioxidant and antimicrobial properties of artichoke (*Cynara scolymus* L.) leaves[J]. Food Technology and Biotechnology，2024，62(3)：279-291.

[27] Vega-Gálvez A，Uribe E，Perez M，et al. Effect of high hydrostatic pressure pretreatment on drying kinetics，antioxidant activity，firmness and microstructure of *Aloe vera* (*Aloe barbadensis* Miller) gel [J]. LWT-Food Science and Technology，2011，44(2)：384-391.

[28] Cano M P，Gómez-Maqueo A，Fernández-López R，et al. Impact of high hydrostatic pressure and thermal treatment on the stability and bioaccessibility of carotenoid and carotenoid esters in astringent persimmon (*Diospyros kaki* Thunb. var. *Rojo Brillante*)[J]. Food Research International，2019，123：538-549.

[29] Wang W X，Yang P Q，Rao L，et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on the structure，functionality，and nutritional properties of food proteins：a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2022，21(6)：4640-4682.

[30] Wang C，Zhang L H，Qiao Y，et al. Effects of ultrasound and ultra-high pressure pretreatments on volatile and taste compounds of vacuum-freeze dried strawberry slice[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，160：113232.