

超声强化方式对热泵干燥莲藕品质特性的影响

Effects of different ultrasonic enhancement methods on the quality characteristics of dried lotus root in heat pumps

李旭好 钟靖涵 李芳 刘云宏

LI Xuhao ZHONG Jinghan LI Fang LIU Yunhong

(河南科技大学食品与生物工程学院,河南 洛阳 417000)

(School of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 417000, China)

摘要:目的:探明适宜的莲藕超声强化干燥方式,提高莲藕加工品质。**方法:**将超声(US)、直触超声(CU)、超声渗透脱水(USOD)3种超声处理方式与热泵干燥(HPD)进行串并联处理,研究US、CU和USOD对莲藕HPD过程中干燥特性、外观色泽、微观结构、质构、营养成分及抗氧化特性等指标的作用规律,并采用变异系数法对不同超声强化方式干燥的莲藕品质进行综合评价。**结果:**US、CU和USOD均能提升莲藕的HPD干燥速度;USOD-HPD所得到莲藕的亮度(L^*)、多糖含量和羟自由基清除率最好,分别为77.98、51.68 mg/g和45.94%;US-HPD处理可较好地保留莲藕中的黄酮和维生素C含量;HPD莲藕的多酚含量和DPPH自由基清除率最高;变异系数法综合评价结果表明USOD-HPD的综合评分最高(0.422)。**结论:**USOD-HPD可以有效提升莲藕的干燥品质。

关键词:莲藕;超声;预处理;干燥

Abstract: Objective: This study aimed to explore the effect of different ultrasonic enhancement methods on the quality characteristics of dried lotus root in heat pumps. Methods: The effects of US, CU, and USOD on the drying characteristics, appearance color, microstructure, texture characteristics, nutritional quality and antioxidant characteristics of the lotus root heat pump during the drying process were investigated. Ultrasonic (US), direct contact ultrasound (CU), USOD and heat pump drying (HPD) were treated in series and parallel. The coefficient of variation method was used to comprehensively evaluate the quality of lotus root dried by different ultrasonic enhancement methods. Results: US, CU and USOD treatments

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:212102110080,232102321122)

作者简介:李旭好,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘云宏(1975—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail:beckybin@haust.edu.cn

收稿日期:2023-07-19 **改回日期:**2023-12-11

had positive effects on the HPD speed of lotus roots. The brightness (L^*), polysaccharide content, and hydroxyl radical scavenging rate of lotus root obtained by USOD-HPD were the best, which were 77.98, 51.68 mg/g, and 45.94%, respectively. US-HPD treatment can better retain the content of flavonoids and vitamin C in lotus root. HPD lotus root had the highest polyphenol content and DPPH radical scavenging. The comprehensive evaluation results of the coefficient of variation method showed that the USOD-HPD lotus root had the best quality. Conclusion: The combined drying method of USOD-HPD can effectively improve the quality of lotus root.

Keywords: lotus root; ultrasound; pretreatment; drying

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn)又名荷藕,属于药食同源的多年生宿根性草本植物^[1]。莲藕含有大量的活性成分如生物碱、黄酮、没食子酸、儿茶素、香豆酸、芸香苷和鞣质等功能性成分^[2-3]。但在贮藏生产过程中,莲藕由于自身的生化代谢反应,极易引起组织损伤和腐败变质,降低营养价值。

热泵干燥(heat pump drying, HPD)是热泵系统和对流干燥设备的集成应用,具有高效率、高品质和环保等优点,被广泛应用于农业和食品工业^[4]。Tao等^[5]研究超声波对豌豆种子HPD干燥特性的影响,发现种子活力随着超声功率的增大而提高,随着干燥温度的升高而降低。超声波.ultrasound, US)作为一种非热预处理技术,因其具有强化传热传质的特点,故往往与其他食品加工技术联用来提升产品品质^[6]。研究^[7]表明,对菠萝进行超声预处理有利于其品质的提升。An等^[8]发现超声渗透脱水(ultrasound osmotic dehydration, USOD)可以抑制生姜褐变。同时,也有研究^[9]将直触超声强化热泵干燥(contact ultrasound enhanced heat pump drying, CU-HPD)用于猕猴桃干燥过程中,发现其能改善物料内部传质传热,能显著缩短猕猴桃的干燥时间。近年来,虽然有

一些超声联合干燥的相关研究,但缺乏通过多维度的串联及并联等方式来探究超声对莲藕品质影响的研究,不同超声强化方式对 HPD 品质特性影响的研究也鲜见报道。

变异系数法是通过执行统计来计算和评估各项指标权重的方法,具有客观和可靠的优点,已被成功应用于果蔬加工品质的综合评价^[10-11]。研究拟以莲藕为试验材料,探究 US、CU 和 USOD 对莲藕 HPD 过程中干燥特性、外观色泽、微观结构、质构特性、营养品质及抗氧化特性等指标的作用规律,以期探明适宜的莲藕超声强化干燥方式,并为超声强化技术在莲藕生产上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜莲藕:市售;

芦丁、没食子酸、1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)、Folin-Ciocalteu 试剂:标准品,上海源叶生物科技有限公司;

无水葡萄糖、2,6 二氯靛酚钠:标准品,合肥巴斯夫生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

热泵干燥设备和直触超声强化设备:河南科技大学自制,具体结构和参数见文献[12];

超声波清洗机:KQ3200DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

电子天平:Scout SE 型,美国 OHAUS 公司;

扫描电镜:TM3030Plus 型,日本日立高新技术公司;

低场核磁共振分析仪:NMI120-015V-1 型,上海纽迈电子科技有限公司;

色差仪:Color i5 型,美国 X-Rite 公司;

紫外可见分光光度计:UV-4800 型,尤尼柯上海仪器有限公司;

质构仪:TA. XT EXPRESS 型,英国 SMS 公司。

1.2 方法

1.2.1 原料处理 挑选粗细均匀、整体完整、无霉变虫蛀的新鲜莲藕,清洗去皮,用切片机切成(4.0±0.1) mm 的薄片备用。

1.2.2 处理方法

(1) HPD:将 50 g 莲藕放入热泵干燥设备中进行干燥。热泵干燥温度和风速分别设定为 60 °C 和 1.5 m/s, 干燥 6 h 停止试验。

(2) US-HPD:将 50 g 莲藕放置于盛有 500 mL 蒸馏水的烧杯中,超声 30 min(功率 105 W,频率 49 Hz),然后进行干燥脱水,干燥条件同 HPD 组一致。

(3) USOD-HPD:将 50 g 莲藕放入装有复配渗透液

(蔗糖质量分数 40%,氯化钠质量分数 5%,柠檬酸质量分数 1%,植酸质量分数 0.1%)的烧杯中,料液比($m_{\text{莲藕}} : V_{\text{渗透液}}$)为 1:10 (g/mL),超声 30 min(功率 105 W,频率 49 Hz),干燥条件同 HPD 组一致。

(4) CU-HPD:将超声强化系统的超声换能器置于 HPD 干燥室内,超声发生器安放在干燥室外,两者通过电缆连接,即可进行 CU-HPD 试验。将 50 g 新鲜莲藕直接放置在 CU-HPD 设备中的超声辐射盘上,同时开启热泵和超声设备开关进行干燥,设定超声功率 60 W,热泵干燥温度 60 °C,风速 1.5 m/s,干燥 6 h 停止试验。

1.2.3 指标测定

(1) 水分损失率和固形物增加率:根据文献[13]的方法测定 US 和 USOD 预处理后莲藕的水分损失率(water loss, WL)和固形物增加率(solids gain, SG)。由于 WL 和 SG 是渗透处理后样品的主要处理指标,而 CU 预处理未进行渗透,因此未测定 WL 和 SG。

(2) 失重率:记录莲藕 US、USOD 和 CU(将莲藕放在直触式超声设备上超声 30 min)预处理前后的重量变化,并根据文献[14]的方法计算样品的失重率。

(3) 低场核磁共振分析:根据文献[10]的方法,修改如下:采样点数 250 002,回波时间 0.5 ms,回波个数 5 000,累加次数 4。

(4) 干基含水率:根据文献[10]。

(5) 微观结构:用导电胶将干燥后的莲藕片固定在样品台上,用扫描电镜对其观察,设置放大倍数为 300。

(6) 色度值:采用色差仪^[10]。

(7) 质构:使用质构分析仪(TA)测定干制莲藕的硬度和脆度。根据文献[15]的方法,修改如下:用 P/2 探针进行穿刺,设置测试中速度 0.5 mm/s,测试后速度 1 mm/s。

(8) 黄酮和多酚:干制莲藕中黄酮和多酚提取根据文献[16]的方法,修改如下:1 g 莲藕粉(粉碎后过 100 目筛)与 8 mL 80%乙醇水溶液混匀后,超声提取 30 min,然后以 8 000 r/min 转速离心 10 min,残渣重复提取 2 次,合并上清液备用。黄酮含量采用亚硝酸钠—硝酸铝比色法测定^[17];多酚含量采用福林酚比色法测定^[16]。

(9) 维生素 C 含量:采用 2,6-二氯靛酚滴定法^[18]。

(10) 多糖含量:采用蒽酮—硫酸法^[19]。

(11) DPPH 自由基清除率:根据文献[20]。

(12) 羟自由基清除率:根据文献[21]。

1.2.4 权重分析 采用变异系数法对莲藕的 L*、硬度值、多酚、黄酮、维生素 C、多糖含量和羟自由基清除率 7 个指标进行权重分析。根据式(1)~式(3)对莲藕各项指标进行标准化处理并计算权重和变异系数。

$$V_i = \frac{\sigma_i}{x_i}, \quad (1)$$

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (2)$$

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad (3)$$

式中:

V_i ——第 i 项指标的变异系数;

σ_i ——第 i 项指标的标准差;

\bar{x}_i ——第 i 项指标的平均值;

W_i ——第 i 项指标的权重;

Z_{ij} ——标准化处理后的各指标的数值;

x_{ij} ——各指标的试验测量值。

由于硬度值越小莲藕品质越好,因此在硬度值的 Z_{ij} 前面添加负号。然后将每个指标的 Z_{ij} 与 W_i 相乘,计算并统计出不同处理方式下莲藕的综合评分。

1.3 数据处理

采用 Origin 2021 统计软件进行数据分析与处理,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较,显著性差异水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 对莲藕失重率、水分损失率和固形物增加率的影响

如表 1 所示,US 处理组莲藕的失重率、WL 和 SG 均为负值;USOD 处理组莲藕失重率、WL 和 SG 最高。US 预处理组失重率和 SG 呈负值,可能是因为 US 组长时间的超声处理,使莲藕细胞的孔隙度增大,导致莲藕内部物质的流出和自由水的渗入,而 WL 由失重率和 SG 构成,因此导致 WL 也为负值。USOD 处理造成失重率、水分损失率和可溶性固形物含量增加,可能是由于在超声渗透的过程中,超声波产生的海绵效应超过了毛细管内部水分的表面张力,使水分更易通过孔隙进行迁移,促进渗透脱水过程的质量交换。同时 CU 预处理也造成莲藕的失重率增加,这可能是因为超声所具有的空化效应扩大了莲藕细胞孔隙,使水分更易蒸发,造成部分水分损失,该过程中外界物质并未进入莲藕内部,即不存在固形物含量的增加,只有水分损失,此时的失重率等于水分损失率,所以 CU 预处理 30 min 后莲藕质量降低。

2.2 对莲藕水分状态的影响

图 1 为不同预处理后的样品水分 T_2 反演图谱。弛豫时间范围在 0.01~10 ms 的为结合水,在 10~100 ms 的

表 1 不同预处理下莲藕鲜样的失重率、WL 和 SG

Table 1 Weight loss rate, WL and SG of fresh lotus root under different pretreatments

处理方式	失重率/%	水分损失率/%	固形物增加率/%
US	-4.067 ± 0.103	-4.483 ± 0.085	-0.417 ± 0.024
USOD	25.250 ± 0.552	29.017 ± 0.429	3.767 ± 0.131
CU	4.483 ± 0.636	—	—

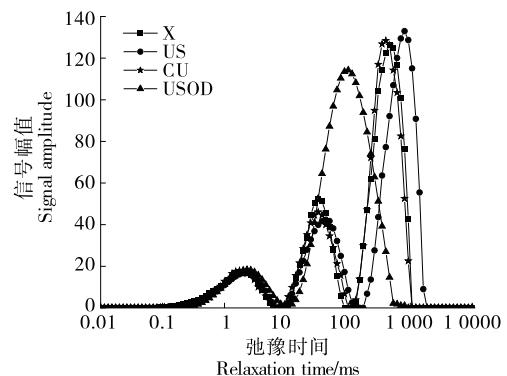


图 1 不同预处理下莲藕鲜样的横向弛豫时间(T_2)曲线

Figure 1 Transverse relaxation time (T_2) curves of fresh lotus root under different pretreatments

为半结合水, >100 ms 的为自由水,分别用 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 表示。研究^[22]表明,弛豫时间代表着不同水的自由度及流动性,其中结合水与细胞骨架、酶及其他分子化合物结合最为紧密,半结合水又称为不易流动水,而自由水则是存在于液泡、原生质和细胞间隙中的体积水和结构水,自由度最大,流动性最强。由图 1 可知,鲜样莲藕中水分主要存在 3 种形态的水,超声渗透预处理后,3 种状态水分改变为两种状态的水。一方面是因为在渗透压的作用下自由水向外部迁移,另一方面也可能是液泡中的自由水转变为半结合水^[23]。而 US 预处理与未处理的莲藕(X)相比, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 右移可能是因为超声使莲藕的微观孔道扩大,有利于外部水分子通过细胞壁扩散至莲藕细胞内部,导致莲藕细胞组织间水分含量增加,所以使测得的莲藕内各部分水的横向弛豫时间发生改变。

2.3 对热泵干燥莲藕干燥特性的影响

如图 2 所示,在整个干燥过程中,随着干燥时间延长,干燥曲线整体呈下降趋势,干燥前期干基含水率下降迅速,但后期下降速度变慢,趋于平缓。这是由于干燥过程中物料内部干燥介质吸收能量,使自由水在热能的作用下快速气化,由莲藕内部向外面迁移,从而完成干燥过程。在 90 min 前干燥速度 USOD-HPD > CU-HPD > HPD > US-HPD,而在 150 min 后,干燥速度 CU-HPD > US-HPD > HPD > USOD-HPD。这是因为经过超声渗透预处理的莲藕细胞结构发生改变,表面产生微孔,加快物料内部水分子向外扩散,导致莲藕细胞内部的水分快速流失,初始干基含水率降低。而在干燥后期 USOD-HPD 干燥速率变慢,是因为干燥后期莲藕内部多糖、蛋白质及淀粉所占比例升高,水分子与其结合较为紧密,因此在相同的时间内需要吸收更多能量才能使水分扩散出来^[24]。

2.4 对热泵干燥莲藕微观结构的影响

如图 3 所示,经不同处理方式干燥后,莲藕的微观特性差异显著,经 HPD 处理样品的多孔状结构完全被破坏,细胞发生破裂现象,而经 USOD-HPD、US-HPD 和

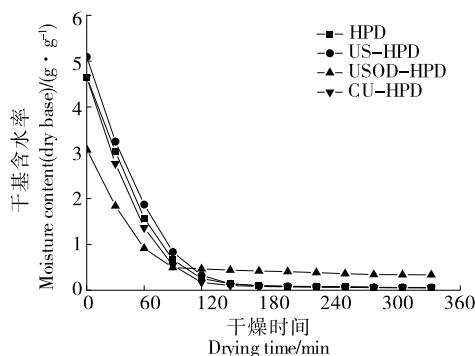


图 2 不同处理方式下热泵干燥莲藕的干燥特性曲线

Figure 2 Drying characteristics curve of lotus root dried by heat pump under different treatment methods

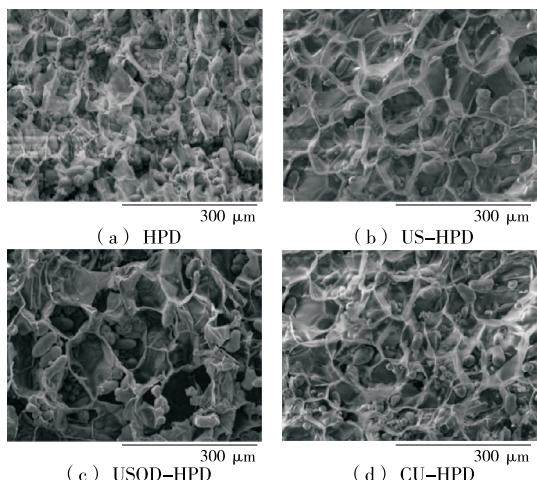


图 3 不同处理方式下热泵干燥莲藕表面的 SEM 图

Figure 3 SEM diagram of dried lotus root surface by heat pump with different treatment methods

CU-HPD 处理的样品出现了疏松的微观结构, 细胞孔隙扩大。与 HPD 组莲藕的微观结构相比, US-HPD 和 CU-HPD 处理使莲藕的组织更加疏松, 细胞孔道更加致密和均匀。这主要是由于超声的空化效应强化了水流的湍动, 扩张了物料表面的微细管道, 从而增加了微孔道数量^[25]。USOD-HPD 处理的莲藕的细胞孔径比 US-HPD 和 CU-HPD 处理的大, 但部分细胞壁产生皱缩和破裂现象。这主要是由于 USOD 所产生的渗透压加快了物质交换, 糖液渗入组织内部, 使细胞孔道扩大产生破裂现象^[26]。综上可知, 施加超声处理具有改善莲藕组织细胞的微孔道及保持细胞形态的作用, 而渗透液的加入在一定程度上不利于细胞形态的维持。

2.5 对热泵干燥莲藕色泽的影响

由表 2 可知, 经过干燥后的莲藕 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值显著增加 ($P < 0.05$), 这是因为在莲藕的干燥过程中, 随着温度的升高, 物料中的抗坏血酸容易发生氧化反应,

表 2 不同处理方式下热泵干燥莲藕的颜色值[†]

Table 2 Color value of lotus root dried by heat pump under different treatment method

处理方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜	69.76 ± 0.02^e	1.33 ± 0.02^d	7.55 ± 0.03^d	—
HPD	77.98 ± 0.35^b	2.46 ± 0.06^b	11.92 ± 0.18^c	9.38 ± 0.22^b
US-HPD	73.43 ± 0.19^d	4.04 ± 0.03^a	12.38 ± 0.02^b	6.65 ± 0.09^c
USOD-HPD	78.78 ± 0.08^a	1.65 ± 0.45^c	14.07 ± 0.06^a	11.13 ± 0.07^a
CU-HPD	75.66 ± 0.58^c	4.03 ± 0.18^a	14.12 ± 0.16^a	9.25 ± 0.20^b

[†] 同列字母不同代表具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

以及羰基类化合物和氨基类化合物发生美拉德反应形成棕色复合物, 发生了褐变, 颜色变深, 从而使 ΔE 值增大。 ΔE 值与鲜样颜色相关, ΔE 值越小, 干制莲藕脆片颜色与鲜样颜色越接近。对比 ΔE 值发现, US-HPD 对样品色泽的影响最小, 与鲜样颜色最接近; 而经过 USOD 处理的莲藕 ΔE 值最高。USOD 处理组色差值较高主要归因于 L^* 和 b^* 值的显著增加, b^* 值表示黄蓝值, b^* 为正值, 说明样品色度偏黄, 这可能是因为超声渗透处理导致莲藕内部含糖量增加, 干燥过程中发生焦糖化反应, 形成着色化合物; L^* 值代表样品的亮度, 也是莲藕最主要的颜色, L^* 显著增加可能与干燥后糖对光的吸收和折射有关^[27]。

2.6 对热泵干燥莲藕质构特性的影响

如表 3 所示, 不同处理方式在硬度和脆度方面都存在显著差异 ($P < 0.05$)。US-HPD 和 CU-HPD 处理下的硬度值与 HPD 组相比, 分别减少了 5.08% 和 9.72%, 脆度分别增加了 36.97% 和 52.76%, 可能是因为超声的空化效应有利于物料表面形成孔道结构, 细胞结构更加疏松, 从而导致硬度值降低, 脆度值提高。USOD-HPD 处理下的硬度值与 HPD 组相比, 分别增加了 26.89%, 脆度值分别减少了 42.02%, 可能是因为超声渗透脱水过程进入莲藕细胞组织结构内的糖液与羟基相互作用, 使莲藕组织结构联系更加紧密, 产品硬度增大, 脆度降低^[28]; 其次, 由于样品在干燥过程中水分由内向外迁移带动了物料内部糖分的移动, 使莲藕表面糖的质量分数增加, 形成了致密的晶体结构, 最后导致硬度增加^[27]。

表 3 不同处理方式下热泵干燥莲藕的硬度和脆度值[†]

Table 3 The hardness and brittleness value of lotus root dried by heat pump under different treatment methods

处理方式	硬度/N	脆度/个
HPD	30.12 ± 0.32^b	6.33 ± 0.58^b
US-HPD	28.59 ± 0.44^c	8.67 ± 0.58^a
USOD-HPD	38.22 ± 0.38^a	3.67 ± 0.58^c
CU-HPD	27.19 ± 0.38^d	9.67 ± 0.58^a

[†] 同列字母不同代表具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.7 对热泵干燥莲藕黄酮含量的影响

由图 4 可知,经 HPD、US-HPD、USOD-HPD 和 CU-HPD 处理后的样品黄酮含量分别为 1.62, 2.60, 2.07, 2.067 mg/g, 其中对照组黄酮含量最低, US-HPD 处理的黄酮含量最高, 是对照组的 1.6 倍。这可能是因为对照组的样品直接进行热泵干燥, 过高的温度导致黄酮类物质丧失活性, 而经过超声处理的降低了莲藕溶解氧含量, 减少黄酮类物质氧化的可能性。从图 4 中还发现, USOD-HPD 和 CU-HPD 黄酮含量不具有显著差异, 这是因为蔗糖本身就具有一定的抗氧化能力, 具有减弱酮类化合物氧化降解的作用, 进而说明蔗糖和超声处理能有效保护莲藕的活性成分。

2.8 对热泵干燥莲藕维生素 C 含量的影响

由图 4 可知, 不同处理方式下干燥莲藕片维生素 C 的含量不同, 与对照组相比, US-HPD、USOD-HPD 和 CU-HPD 处理的莲藕片维生素 C 含量增加。其中 CU-HPD 处理组莲藕维生素 C 含量最高, US-HPD 处理与 CU-HPD 处理莲藕维生素 C 含量不具有显著差异 ($P > 0.05$)。这是因为超声波可以降低物料中的闭塞氧, 提高莲藕内维生素 C 的稳定性; 同时维生素 C 是水溶性维生素, 它会随水分的蒸发而流失, 从而造成维生素 C 含量降低, 而 US 预处理提高了莲藕组织的初始干基含水率, 因而有利于维生素 C 的保留; USOD-HPD 处理相对于对照组维生素 C 含量增加是因为渗透液中所含的植酸具有一定的抗氧化能力, 能够螯合金属离子, 它能有效抑制果实中维生素 C 的氧化^[29]。而 USOD-HPD 处理相对于 US-HPD 组维生素 C 含量降低, 可能是因为超声渗透破坏了细胞结构, 使组织中的抗坏血酸氧化酶与空气接触, 加速维生素 C 的氧化作用。

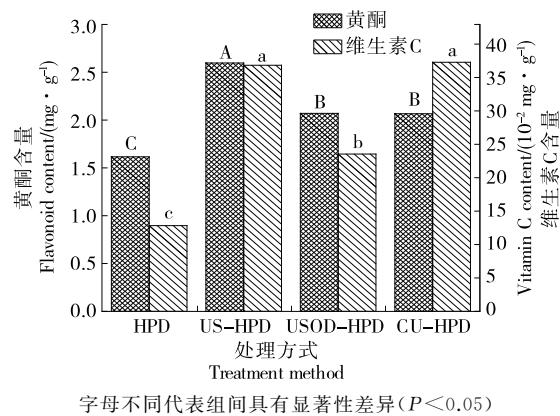


图 4 不同处理方式下热泵干燥莲藕黄酮和维生素 C 的含量

Figure 4 The content of lotus root flavonoids and Vc dried by heat pump under different treatment methods

2.9 对热泵干燥莲藕多糖含量的影响

从图 5 可以看出, USOD-HPD 组的多糖含量最高, US-HPD 组多糖含量最低, 分别为 51.68, 20.10 mg/g, 比对照组分别提高和减少了 80.86%, 29.64%。这是由于在渗透的过程中发生了物质交换, 糖液大分子进入莲藕细胞, 导致莲藕多糖含量提高; US 处理组低于对照组可能是由于在超声处理中, 莲藕中的一些多糖等活性成分与水分子发生物质交换, 从而导致多糖含量降低。

2.10 对热泵干燥莲藕多酚含量的影响

如图 5 所示, 与对照组相比, 经过 USOD-HPD 和 CU-HPD 处理所得多酚含量均显著降低。而 US-HPD 处理组的多酚含量与对照组相比不具有显著性 ($P > 0.05$), 说明水解式超声处理 (105 W) 对莲藕组织中多酚含量无显著影响。CU-HPD 处理多酚含量最低, 这是由于超声会增强传质及扩大细胞间隙, 酚类物质从莲藕细胞中的析出速率加快, 从而导致莲藕片中多酚含量降低。USOD-HPD 莲藕的多酚保留率与对照组相比也较低, 可能是由于在 USOD 预处理中的传质过程中, 固形物流失较多, 导致莲藕组织中酚类物质减少。

2.11 对热泵干燥莲藕抗氧化特性的影响

如图 6 所示, 对照组 DPPH 自由基清除率最高, US-HPD、USOD-HPD 次之, CU-HPD 组 DPPH 自由基清除率最低, 这与多酚的变化趋势相同, 且 US-HPD、USOD-HPD 和 CU-HPD 处理 DPPH 自由基清除能力无显著差异 ($P > 0.05$)。有研究^[18]发现, 单个酚类物质并不能决定莲藕总体抗氧化能力, 而是由多种酚类物质共同决定的, 单酚含量、种类和结构对 DPPH 自由基清除率也起着重要作用。对照组莲藕的羟自由基清除率为 34.74%, 经 USOD-HPD 处理后的莲藕羟自由基清除率得到显著提高 ($P < 0.05$), 其对羟自由基清除率为 45.94%, 与 DPPH

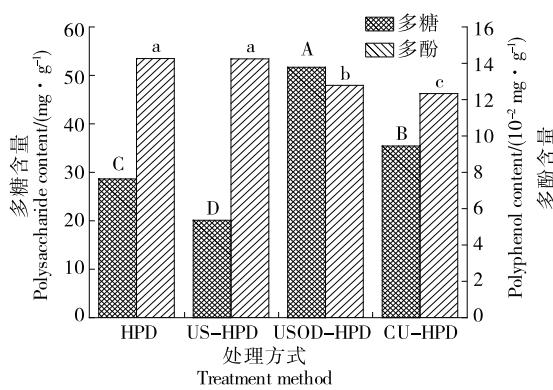
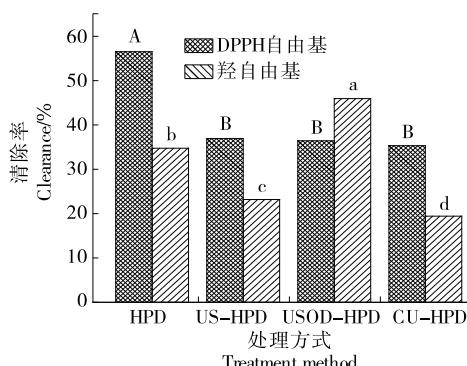


图 5 不同处理方式下热泵干燥莲藕多糖和多酚的含量

Figure 5 The content of lotus root polysaccharides and polyphenols dried by heat pump under different treatment methods



字母不同代表组间具有显著性差异 ($P < 0.05$)

图 6 不同处理方式下热泵干燥莲藕的抗氧化特性

Figure 6 Antioxidant characteristics of lotus root dried by heat pump under different treatment methods

自由基清除率呈相反趋势。这可能是因为莲藕中的一些生物活性成分,如维生素 C、多酚、黄酮和其他亲水或疏水性抗氧化剂等可以通过还原作用将自由基转化为更稳定的产物来终止自由基链反应^[30-31]。综上可知,USOD 能提高干燥莲藕对羟自由基的清除率,而对 DPPH 自由基清除率不具有积极作用。

2.12 热泵干燥莲藕的综合评分

如表 4 所示,黄酮、维生素 C、多糖和羟自由基清除率 4 个指标对莲藕品质影响较大,分别占 0.12, 0.26, 0.24, 0.23; L^* 、硬度值和多酚含量所占比值较小,分别为 0.02, 0.10, 0.04。

如表 5 所示,综合评分由高到低依次为 USOD-HPD、CU-HPD、US-HPD、HPD。由此可见 USOD-HPD 处理综合评分最高,HPD 综合评分最低,说明 USOD-HPD 有利于莲藕品质的提升,对莲藕深加工具有积极作用。

3 结论

超声强化方式处理热泵干燥莲藕会对莲藕的脱水时间、微观结构、色泽、营养成分、质构特性和抗氧化特性产

表 4 不同处理方式下热泵干燥莲藕各品质指标的权重
Table 4 The weight of each quality index of dried lotus root by heat pump under different treatment methods

评价指标	平均值	标准差	变异系数	权重
L^*	76.46	2.42	0.03	0.02
硬度	31.03	4.94	0.16	0.10
黄酮	2.09	0.40	0.19	0.12
维生素 C	27.34	11.62	0.43	0.26
多糖	33.95	13.38	0.39	0.24
多酚	13.41	1.00	0.07	0.04
羟自由基清除率	30.82	12.00	0.39	0.23

表 5 不同处理方式下热泵干燥莲藕的标准化数据及综合评分

Table 5 Standardized data and comprehensive score of dried lotus root by heat pump under different treatment methods

处理方式	HPD	US-HPD	USOD-HPD	CU-HPD
L^*	0.014	-0.028	0.021	-0.007
硬度	0.020	0.055	-0.161	0.086
黄酮	-0.157	0.169	-0.006	-0.007
维生素 C	-0.371	0.231	-0.102	0.242
多糖	-0.110	-0.283	0.362	0.030
多酚	0.044	0.043	-0.032	-0.055
羟自由基清除率	0.088	-0.172	0.340	-0.256
综合评分	-0.471	0.016	0.422	0.033

生影响。超声渗透脱水联合热泵干燥处理可提高莲藕的硬度、多糖、维生素 C 含量以及羟自由基清除率,但对莲藕的多酚含量和 DPPH 自由清除率有不利影响。同时基于变异系数法对 L^* 、硬度值、黄酮、维生素 C、多糖、多酚和羟自由基清除率 7 个指标进行综合评分,发现黄酮、维生素 C、多糖和羟自由基清除率 4 个指标所占权重较大。综合评分结果表明,超声渗透脱水联合热泵干燥处理的莲藕品质最好。超声渗透脱水可以作为莲藕热泵干燥的有效预处理手段,具有显著提高莲藕综合品质的作用。对于超声渗透处理莲藕热泵干燥工艺的能耗及成本等问题还需进一步研究探讨。

参考文献

- [1] 冯向阳, 谢君, 王宏勋, 等. 真空包装通过调节酶活性抑制鲜切莲藕酶促褐变[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 210-214.
- [2] FENG X Y, XIE J, WANG H X, et al. Vacuum packaging inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating enzyme activity [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 210-214.
- [3] ALI S, KHAN A S, ANJUM M A, et al. Effect of postharvest oxalic acid application on enzymatic browning and quality of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn) root slices [J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126051.
- [4] XIE J, ZHOU B X, MIN T, et al. Analysis of phenolic substances of different polarity in lotus root and evaluation of antioxidant activity [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17): 189-192.
- [5] ZHU Z Z, ZHAO Y, ZHANG Y X, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the drying kinetics, water status and distribution in scallop adductors during heat pump drying [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(15): 6 239-6 247.

- [5] TAO Z C, YANG Z, YU F, et al. Effect of ultrasound on heat pump drying characteristics of pea seeds[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(11/12): 20180204.
- [6] RODRIGUEZ Ó, GOMES W, RODRIGUES S, et al. Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant activity, organic acids and drying kinetics of pineapple [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 35: 92-102.
- [7] RANI P, TRIPATHY P P. Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56: 4 911-4 924.
- [8] AN K J, TANG D B, WU J H, et al. Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7 (8): 2 537-2 545.
- [9] LIU Y H, ZENG Y, HU X Y, et al. Effect of ultrasonic power on water removal kinetics and moisture migration of kiwifruit slices during contact ultrasound intensified heat pump drying[J]. Food and Bioprocess Technology: An International Journal, 2020, 13: 430-441.
- [10] 薛扬, 刘恩宠, 耿鸣阳, 等. 铁棍山药超声强化热泵干燥的品质特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 234-242.
- XUE Y, LIU E C, GENG M Y, et al. Quality characteristics of *Dioscorea opposita* by ultrasound-enhanced heat pump drying[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 234-242.
- [11] 孟灵旭, 张静, 张洪涛, 等. 基于变异系数法评价不同干燥方式人参的品质差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(10): 246-253.
- MENG L X, ZHANG J, ZHANG H T, et al. Evaluation of the quality of *Panax ginseng* at different drying methods based on the coefficient of variation method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(10): 246-253.
- [12] 刘云宏, 苗帅, 孙悦, 等. 接触式超声强化热泵干燥苹果片的干燥特性[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 228-236.
- LIU Y H, MIAO S, SUN Y, et al. Drying characteristics of apple slices during contact ultrasound reinforced heat pump drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 228-236.
- [13] 宋悦, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助渗透处理对热风干燥及真空冷冻干燥黄桃片品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 177-185.
- SONG Y, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on the quality characteristics of hot air dried and vacuum freeze dried yellow peach chips[J]. Food Science, 2020, 41 (15): 177-185.
- [14] 刘云宏, 吴建业, 刘建学, 等. 超声渗透脱水—热风干燥梨的研究[J]. 食品科学, 2014, 35(3): 23-28.
- LIU Y H, WU J Y, LIU J X, et al. Ultrasonic-assisted osmotic dehydration and subsequent hot-air drying of pear slices[J]. Food Science, 2014, 35(3): 23-28.
- [15] 石晓微, 刘云宏. 超声—远红外辐射干燥对香蕉片品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 204-209.
- SHI X W, LIU Y H. Effects of ultrasound combined far-infrared radiation drying on the quality of banana slices [J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 204-209.
- [16] 刘珮, 王建辉, 吴佳丽, 等. 莲藕脆片组合干燥过程中的抗氧化性变化研究[J]. 天津农学院学报, 2016, 23(3): 6-10.
- LIU P, WANG J H, WU J L, et al. Changes in antioxidant activity of lotus root chips during combination drying[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2016, 23(3): 6-10.
- [17] 李志锐, 乐粉鹏, 王娟, 等. 超声微波协同萃取柚皮总黄酮及其抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(5): 60-63.
- LI Z R, LE F P, WANG J, et al. The extraction of total flavonoids from pomelo peel and antioxidant activity of ultrasonic microwave synergistic [J]. Food Research and Development, 2018, 39 (5): 60-63.
- [18] 张良英, 刘林, 于立杰, 等. 软枣猕猴桃果实发育期品质指标及抗氧化能力的变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 157-164.
- ZHANG L Y, LIU L, YU L J, et al. Changes of quality characteristics and antioxidant capacities during fruit development of hardy kiwifruit[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 157-164.
- [19] 温文娟, 刘珊, 黄远丽. 苯酚硫酸法与蒽酮硫酸法测定香菇多糖含量比较[J]. 现代食品, 2020(21): 177-179.
- WEN W J, LIU S, HUANG Y L, et al. Comparison of phenol sulfuric and anthrone sulfuric method for determination of Lentilan[J]. Modern Food, 2020(21): 177-179.
- [20] 康志敏, 郭东旭, 何梦影, 等. 不同干燥工艺对鲜玉米粉品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 58-63, 69.
- KANG Z M, GUO D X, HE M Y, et al. Effect of different drying methods on the quality and flavor profiles of fresh corn flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 58-63, 69.
- [21] 王玉婷, 陈奕, 李雨波. 干燥方式对香蕉片总多酚含量及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 113-117.
- WANG Y T, CHEN Y, LI Y B, et al. Effects of different drying methods on the content and antioxidant activity of total polyphenol from banana slices[J]. Food Science, 2013, 34(23): 113-117.
- [22] 张绪坤, 祝树森, 黄俭花, 等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (22): 282-287.
- ZHANG X K, ZHU S S, HUANG J H, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 282-287.
- [23] 张鹏飞, 吕健, 毕金峰, 等. 超声及超声渗透预处理对红外辐射干燥特性研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 197-202.
- ZHANG P F, LU J, BI J F, et al. Effect of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration on infrared radiation drying characteristics of peach slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(11): 197-202.

(下转第 89 页)

- spheroid fruits or ting[J]. Agri Engineering, 2020, 2(4): 596-606.
- [6] 徐玉恒. 油茶果动态称重及其尺寸实时测量技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020: 2-6.
- XU Y H. Research on dynamic weighing of camellia fruit and its real-time measurement technology logy [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020: 2-6.
- [7] 毛华先, 莫建灿, 方连发, 等. 水果品质智能化实时检测和分级系统研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(10): 95-97.
- MAO H X, MO J C, FANG L F, et al. Research on an intelligent real-time system for fruits quality inspection and sorting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(10): 95-97.
- [8] ZHOU Z, ZAHID U, MAJEEED Y, et al. Advance mentin artificial intelligence for on-farm fruits or ting and transportation [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1082860.
- [9] CHAKRABORTY S K, SUBEESH A, POTDAR R, et al. AI-enabled farm-friendly automatic machine for washing, image-based sorting, and weight grading of citrus fruits: Design optimization, performance evaluation, and ergonomic assessment[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 120(4): 105826.
- [10] 蔡文. 水果动态称重与自动分选控制系统研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 25-28.
- CAI W. Research and development of the control system for fruit dynamic weighing and automatic sorting lines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 25-28.
- [11] 武海军. 水果食品称重分选机控制系统设计[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 224-226.
- WU H J. Design of control system for fruit food weighing and sorting machine[J]. Food Industry, 2021, 42(3): 224-246.
- [12] GOLPIRA H, GOLPÍRA H. Application of signal processing technique for the modification of a fruit sorting machine [J]. International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 2013, 5 (2): 122-128.
- [13] 张剑一. 动态称重数据处理算法及其在禽蛋和类球形水果分选中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 92-95.
- ZHANG J Y. Dynamic weighing data processing algorithm and its applications to poultry egg and spherical fruits sorting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 92-95.
- [14] 韩乔生, 芦金石, 陶学恒, 等. 高效高精度动态静态组合块状食品称重分选系统[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 89-93.
- HAN Q S, LU J S, TAO X H, et al. Efficient high-precision dynamic and static combination of bulk food weighing sorting system[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 89-93.
- [15] 赵卓. 全自动水果分拣系统的设计与开发[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020: 46-50.
- ZHAO Z. Design and development of automatic fruit sorting system[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020: 46-50.
- [16] 黄珏. PLC 自动控制技术的应用[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52 (2): 96-98.
- HUANG Y. The application of PLC automatic control technology [J]. Papermaking Equipment and Materials, 2023, 52(2): 96-98.

(上接第 33 页)

- [24] KROEHNKE J, SZADZINSKA J, RADZIJEWSKA-KUBZDELA E, et al. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) -The influence of ultrasound on process kinetics and product quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 71: 105377.
- [25] 张振亚, 韩碌丛, 金听祥, 等. 超声预处理对热泵干燥菠萝品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 111-116.
- ZHANG Z Y, HAN L C, JIN T X, et al. Experimental study the effect of ultrasonic pretreatment on the quality of pineapple dried by heat pump[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(12): 111-116.
- [26] ALLAHDAD Z, NASIRI M, VARIDI M, et al. Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 202-211.
- [27] 李卓豪, 毕金峰, 易建勇, 等. 不同小分子糖渗透草莓的传质动力学及对真空冷冻干燥草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 95-104.
- LI Z H, BI J F, YI J Y, et al. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of strawberries with various small molecule sugars and their effect on the quality of freeze-dried strawberries[J]. Food Science, 2022, 43(17): 95-104.
- [28] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 117-123.
- CHEN L M, JIN X, BI J F, et al. Effect of ultrasonic-assisted sugar osmotic pretreatment on quality and hygroscopicity of vacuum freeze-dried peach chips[J]. Food Science, 2022, 43(17): 117-123.
- [29] 高原军, 张亚晓, 周婧琦, 等. 抗氧化剂处理对秋葵微波干燥过程中 V_c 变化的影响[J]. 食品科技, 2015, 40(2): 333-336.
- GAO Y J, ZHANG Y X, ZHOU J Q, et al. Effect of antioxidants on the V_c of okra in microwave drying [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(2): 333-336.
- [30] SUVARNAKUTA P, CHAWEERUNGRAT C, DEVAHASTIN S. Effects of drying methods on assay and antioxidant activity of xanthones in mangosteen rind[J]. Food Chemistry, 2011, 125(1): 240-247.
- [31] 张莉会, 廖李, 汪超, 等. 超声和渗透预处理对干燥草莓片品质及抗氧化活性影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(12): 196-203.
- ZHANG L H, LIAO L, WANG C, et al. Effects of ultrasonic and osmotic pretreatment on quality and antioxidant activity of dried strawberry slices[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(12): 196-203.