

脉冲超声对灰枣片理化及超声液特性的影响

王凤昭, 吕明月, 吕健, 陈芹芹, 毕金峰*

(中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工重点实验室 北京 100193)

摘要 为探究脉冲超声持续时间对枣片理化及超声液特性的影响,以灰枣为原料,设置脉冲超声持续时间为 15,30,60 s,并分别于 1,2,3,4,5 h 对灰枣片和超声液进行取样分析。追踪检测灰枣片的色泽、水分状态、质构和微观结构,以及超声液可溶性固形物(TSS)、色泽、浊度和电导率的变化。结果表明,随着脉冲超声处理时间的延长,灰枣片中的主要水分由结合水转变为自由水,灰枣片组织吸水膨胀,色泽 L^* 值(42.88~50.71)和 ΔE 值(3.69~9.85)呈显著增加的趋势, a^* 值(由 19.88 降至 14.70)和 b^* 值(由 22.39 降至 19.03)呈显著降低的趋势。脉冲超声处理可诱导灰枣片组织内微通道的形成,随着循环次数的增加和脉冲时间的延长,微通道发生扩张,数量增加,同时伴随咀嚼性、弹性和回复性降低。超声液分析结果表明,高强度脉冲持续时间(30 s 和 60 s)可使灰枣片与超声液在处理前期(1~2 h)发生快速传质,超声液色泽(ΔE 值:0~26.69)、TSS(0~6.1 °Brix)、电导率(0~257.54 $\mu\text{s}/\text{cm}$)、浊度(0~8.81 NTU)等显著增加,处理后期(3~5 h),15 s 处理组超声液特性呈现出最显著的特性变化;至处理完成,各处理组超声液色泽 L^* 值均达到 100, a^* 值与 b^* 值接近于原始状态;同时 30 s 和 60 s 处理组超声液中 TSS 为 0 °Brix,传质趋于平衡。结论:可根据灰枣片和超声液特性的改变来判断传质的程度,从而适应不同的加工需求。

关键词 脉冲超声; 灰枣; 超声液; 持续时间; 可溶性固形物

文章编号 1009-7848(2024)07-0297-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.07.030

枣(*Ziziphus jujuba* Mill),属蔷薇目鼠李科,是我国最古老,也是近年来最具发展潜力的水果之一。灰枣具有丰富的营养价值,含有丰富的糖类、氨基酸、维生素 C 和微量元素等^[1],其为食药同源食品^[2-3],具有养气补血、抗疲劳等功效^[4-5]。糖类是枣中含量最丰富的物质,鲜枣中糖类物质含量可达 29.4%,其中还原糖占总糖的 70.8%~95.0%;灰枣中糖类物质含量范围为 53.58%~85.35%^[5]。糖分子中过多的游离羰基会导致枣在干制热加工中发生严重的羰氨反应(美拉德反应)和焦糖化反应,对其色泽、风味均会产生不良影响^[6]。此外,由于糖较低的玻璃化转变温度和较强的吸湿性,是导致高糖含量的枣干制品在贮藏过程中品质劣变的重要原因之一,如枣片脆性降低,黏度增加,枣粉吸湿结块等,因此,优化调控加工用枣果实中的糖含量是改善干制枣精深加工产品品质的一种有效方式。笔者所在团队前期研究发现,利用超声波技术可有效去除灰枣中的糖组分^[7],然而,对超声波去糖过程中灰枣果肉理化性质的变化并不清晰。

超声波为一种非热处理加工技术,在食品加工领域被广泛应用,可提高产品质量并降低生产能耗^[8]。超声波系统中的电能通过超声波换能器转化为振动能,使周围的介质振动并将能量传递给其它相邻的粒子,从而产生空化、振动等综合效应^[9]。超声波在液体介质中产生连续的压缩-稀薄循环,空化气泡也随频率的变化而变化;而到达临界尺寸的气泡继续在超声波作用下发生破裂和坍塌,同时伴随强烈冲击波和微射流的产生^[10],由此易在样品内部形成微通道或改变内部组织结构,实现加速内部物质的扩散和传质。研究表明,超声波处理可促进黄木薯组织结构中微通道的形成,进而提升其干燥速率^[11]。超声波空化效应对细胞壁的破坏作用,可提高枸杞多糖提取率并缩短提取时间^[12]。此外,超声波的操作参数,如频率、功率、时间和温度等都会影响物质组分的传质速率。Inguglia 等^[13]发现高频超声处理有助于提升钠盐的吸收速度,提高腌制效率。此外,高频率、长时间的超声波预处理产生的空化效应和机械作用,能够显著提升杏片微波干燥后期的有效水分扩散系数,进而提升传质效率^[14]。超声波预处理还可诱导菠萝组织内部形成更多的孔隙结构,缩短干燥时

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 新疆兵团财政科技计划项目(2021BC007)

第一作者: 王凤昭,女,博士生

通信作者: 毕金峰 E-mail: bjfcaas@126.com

间,有效抑制褐变产物的积累,且褐变指数随超声频率的升高而降低^[15-16]。

由此可见,超声波处理作为食品加工广泛应用的一种预处理方式,可显著改变原料的组织结构、水分分布、理化特性等,因此有必要探明超声波处理过程中灰枣片理化特性等方面的变化,以更好地优化和调控枣加工技术。本试验以灰枣为原料,设定不同脉冲持续时间(15,30,60 s)处理5 h,每1 h为1个循环,从灰枣片的色泽、水分分布、质构、微观结构和超声溶液的特性变化探究传质过程中脉冲超声持续时间对灰枣理化特性和组织结构的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

原料为阿克苏灰枣,湿基含水量为25.57%,采自新疆阿克苏地区,试验开始前贮藏于4℃冷库备用。要求果实颜色、大小相近,无明显病虫害和机械损伤。

1.2 仪器与设备

WKS900B/3S 三频超声波反应器,江苏江大五棵松生物科技有限公司;WZB45 数显折光仪,上海精密科学仪器有限公司;TA.XTC-18 质构仪,上海保圣实业发展有限公司;2100N 浊度仪,美国 HACH 公司;PQ001 核磁共振分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;S-570 扫描电子显微镜,日本日立公司;Nikon D700 数码相机,尼康 Nikon 公司;1.5.5.0 Digieye 色彩分析系统,美国 Lens Eye-NET 公司;S479-uMix 梅特勒多参数测定仪,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;CM-5 分光测色仪,日本 KONICA MINOLTA 公司。

1.3 方法

1.3.1 超声处理 灰枣经去核后切分成5 mm厚的圆片,分别按以下3种脉冲超声方式处理:1)超声处理持续60 s,间隔5 s;2)超声处理持续30 s,间隔5 s;3)超声处理持续15 s,间隔5 s;功率为300 W,温度为25℃,上述处理均每隔1 h取1次样,并换1次水,超声处理总时长为5 h。以未进行超声处理的枣片为对照组。

1.3.2 枣片理化特性测定

1.3.2.1 色泽 枣片色泽采用 Digieye 测定,依据

CIELAB 表色系统测量灰枣片的色泽指数 L^* , a^* 和 b^* 。其中 L^* 为明暗度, a^* 表示红绿值, b^* 表示黄蓝值, ΔE 为色差值,每个处理6次平行。计算公式^[17]如式(1):

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

式中: L_0 , a_0 和 b_0 分别表示对照组枣片的明暗度、红绿值和黄蓝值。

1.3.2.2 水分分布状态测定 应用 PQ001 型核磁共振分析仪,主频为21 MHz,磁体温度为32℃,线圈直径为25 mm,磁场强度为0.5 T。采用核磁共振软件中的 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 脉冲序列测定不同超声处理后的枣片中水分弛豫时间 T_2 。CPMG 脉冲序列参数为:等待时间1000 ms,累加次数8次,回波时间1 ms,回波个数12000。将灰枣片放入永磁场中心位置的射频线圈中心,进行 T_2 采集,利用核磁共振分析软件得到的信号反演成 T_2 图谱。

1.3.2.3 质构 采用 TA.XTC-18 质构仪测定灰枣片质构品质。测定模式为全质构模式,探头型号为 TA/2,测试前、测试中和测试后速度分别为2,1,1 mm/s,触发力为5 g,压缩距离为样品高度的50%,每个样品测定10个平行。

1.3.2.4 微观结构 参考 Rastogi 等^[18]的方法,稍作修改。将对照组和不同超声处理的灰枣片样品切成2 mm×2 mm×2 mm大小,浸入3%植物固定液中固定24 h,依次经梯度乙醇(35%,50%,70%,90%,95%和无水乙醇)脱水后,置于超临界 CO_2 干燥设备中至完全干燥,固定在粘有导电胶的载物台上,喷金处理后,在室压为100 Pa,电压为10 kV 的扫描电子显微镜下观察并拍照。

1.3.3 超声液理化特性测定 采用 CM-5 分光测色仪测定溶液的 L^* , a^* 和 b^* 值,并以蒸馏水为对照计算其色差值 (ΔE),蒸馏水色泽参数分别为 $L^*=100$, $a^*=0$ 和 $b^*=0$ 。溶液的可溶性固形物含量用数显折光仪测定,结果表示为°Brix;浊度和电导率分别采用校正好的浊度仪和梅特勒多参数测定仪测定。

1.4 数据分析

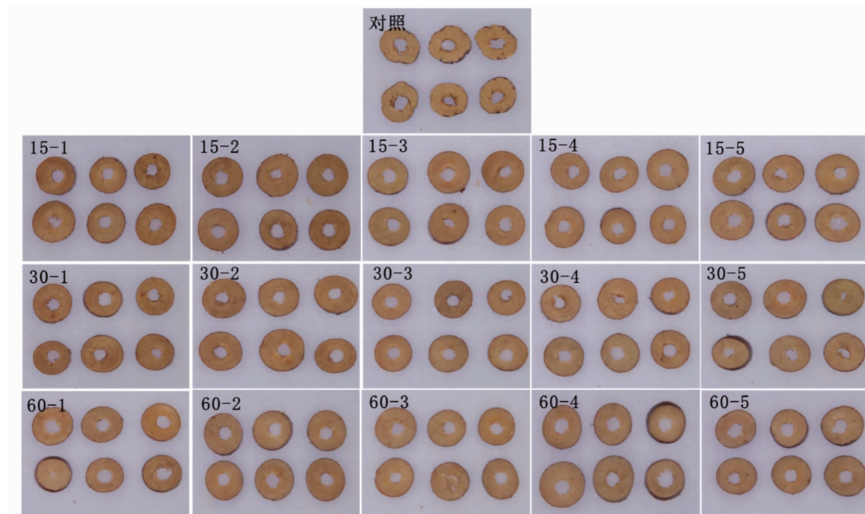
数据采用“平均值±标准差”表示。用 SPSS 23.0 软件进行数据统计和方差分析,用 Origin 2021 软件绘图。每个样品测定3个平行。

2 结果与分析

2.1 脉冲超声对灰枣片表观形态及色泽的影响

灰枣片经不同脉冲超声处理后样品形态如图 1 所示。对照组样品的水分含量低(25.57%),组织皱缩严重。随着脉冲超声循环次数增加及持续时间延长,灰枣片细胞内、外物质发生传递及交换,溶液中的水分子渗入果肉组织中,液泡吸水膨胀致使其体积逐渐增加,灰枣片皱缩度逐渐减小,形态趋于饱满;同时灰枣片颜色逐渐变淡。与对照组

相比,脉冲超声处理可显著提高灰枣片的明亮度(L^*),且随着处理时间的延长, L^* 值和 ΔE 值呈现显著增加的趋势; a^* 值(红蓝值)和 b^* 值(黄绿值)随超声时间的延长呈下降趋势(表 1)。可能是因为灰枣片组织细胞内的呈色物质在超声波产生的微射流作用下扩散并转移到水溶液中,同时大量水分子渗入枣果肉组织,诱导细胞膨胀,同时稀释了组织内的呈色物质浓度,导致与对照组样品色泽差异逐渐增大。



注:分图标注的 15,30,60 分别表示脉冲持续时间为 15,30,60 s;1,2,3,4,5 表示循环次数,下同。

图 1 不同脉冲超声处理后灰枣片表观形态

Fig.1 Apparent state of Huizao slices treated by pulsed ultrasonic with different durations

表 1 不同脉冲超声处理对灰枣片色泽的影响

Table 1 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the color of Huizao slices

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
对照	42.88 ± 0.31 ^f	19.88 ± 0.37 ^a	22.39 ± 0.57 ^a	—
15-1	44.16 ± 1.04 ^e	16.50 ± 0.56 ^b	21.65 ± 1.00 ^a	3.69 ± 0.26 ^b
15-2	45.16 ± 1.35 ^{de}	16.11 ± 0.51 ^{bcd}	20.73 ± 1.22 ^{ab}	4.71 ± 0.98 ^{fg}
15-3	46.14 ± 1.30 ^d	15.91 ± 1.44 ^{bcd}	22.67 ± 0.94 ^a	5.14 ± 0.03 ^{efg}
15-4	47.48 ± 0.56 ^{cd}	15.75 ± 0.45 ^{bcd}	20.36 ± 0.81 ^{ab}	6.51 ± 0.11 ^c
15-5	49.62 ± 0.54 ^{abc}	15.27 ± 0.48 ^{cd}	20.29 ± 1.16 ^{ab}	8.43 ± 0.15 ^b
30-1	45.65 ± 0.75 ^{def}	16.76 ± 0.48 ^b	21.93 ± 0.66 ^a	4.20 ± 0.69 ^{gh}
30-2	47.30 ± 0.81 ^{cd}	16.57 ± 0.35 ^{bc}	22.46 ± 0.48 ^a	5.52 ± 0.66 ^{def}
30-3	47.45 ± 1.26 ^{cd}	15.94 ± 0.75 ^{bcd}	22.35 ± 0.89 ^b	6.03 ± 0.89 ^{cd}
30-4	48.77 ± 2.06 ^{bc}	15.25 ± 1.07 ^{cd}	20.77 ± 0.92 ^{ab}	7.67 ± 0.38 ^b
30-5	50.71 ± 0.78 ^a	14.70 ± 1.07 ^d	19.41 ± 0.75 ^{ab}	9.85 ± 0.76 ^a
60-1	47.11 ± 1.36 ^d	16.88 ± 0.88 ^{bc}	22.18 ± 0.57 ^a	5.19 ± 0.30 ^{ef}
60-2	47.60 ± 0.33 ^{cd}	15.86 ± 0.84 ^{bcd}	22.17 ± 0.84 ^a	6.20 ± 0.28 ^{cd}
60-3	48.36 ± 0.48 ^c	15.25 ± 0.25 ^{cd}	19.08 ± 0.28 ^{ab}	7.90 ± 0.06 ^b
60-4	49.38 ± 0.43 ^{abc}	15.07 ± 0.51 ^d	20.24 ± 1.04 ^{ab}	8.37 ± 0.34 ^b
60-5	50.64 ± 0.78 ^{ab}	15.00 ± 0.59 ^d	19.03 ± 0.93 ^{ab}	9.76 ± 0.83 ^a

注:同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 脉冲超声处理对灰枣片水分分布状态的影响

如图 2a 所示, T_{21} (0.1~10 ms) 表示通过氢键与细胞壁多糖等大分子物质紧密结合的结合水^[19], 是对照组样品水分的主要成分; T_{22} (10~100 ms) 表示不易流动水, 通过弱化学键结合在大分子网络或毛细管中^[20]; T_{23} (100~1 000 ms) 表示自由水, 主要存在于液泡或细胞外的水, 具有高度流动性^[21]。经脉冲超声处理后, 水分大量进入灰枣片果肉中, 自由水代替结合水成为主要的水组分 (占比约为

87.71%~97.13%)。随着脉冲超声循环次数的增加, 3 种状态水分的弛豫时间均显著右移, 表明灰枣片中水分的流动性增加 (图 2b~2d)。脉冲超声处理 5 h 后发现, T_{23} 峰面积大小排序为 15 s 处理组 > 30 s 处理组 > 60 s 处理组 (图 2a), 表明随着脉冲持续时间的延长, 自由水的比例呈下降趋势, 可能是由于长时间的脉冲超声使灰枣片组织结构破坏严重, 导致其持水力减弱, 部分自由水重新扩散至超声溶液中。

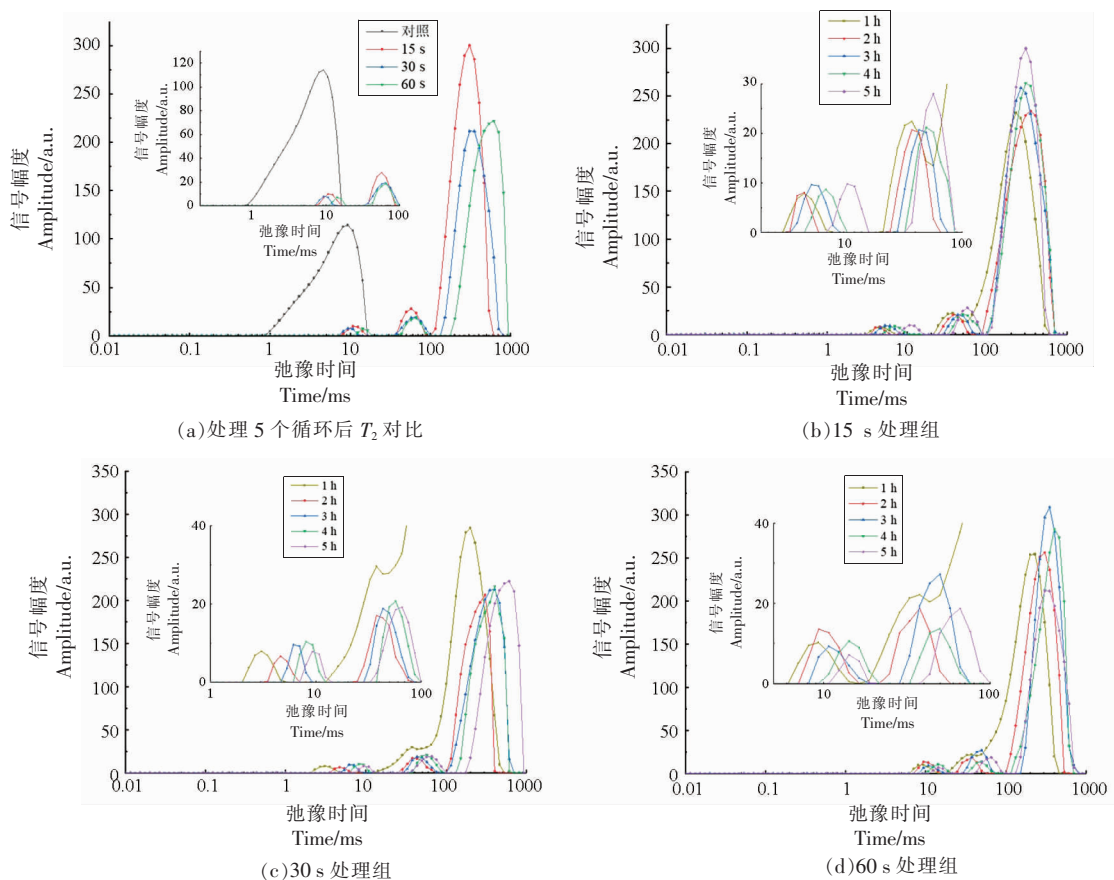


图 2 不同脉冲超声处理对灰枣片水分横向弛豫时间 (T_2) 的影响

Fig.2 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on transverse relaxation time (T_2) of water in Huizao slices

2.3 脉冲超声处理对灰枣片质构的影响

与对照组相比 (表 2), 灰枣片经脉冲超声处理后咀嚼性、弹性和回复性均显著降低; 随着脉冲超声循环次数的增加, 弹性和回复性呈现逐渐降低的趋势。灰枣片经过第一次压缩后恢复到原始高度的程度表示为弹性, 其数值大小与水分含量

成反比^[22], 随着超声处理时间的延长, 灰枣片组织内部自由水含量增加, 可能是导致其弹性下降的原因。灰枣片硬度、内聚性和咀嚼性整体呈先降低后升高的趋势, 可能是由于超声处理过程中, 灰枣片果肉中液泡吸水, 细胞膨压升高, 组织间隙减小, 细胞排列更紧密, 组织对外界的抵抗力增加,

从而使硬度变大;然而长时间的超声处理,一方面诱导产生的微射流增加了微通道的形成,另一方面,长时间的空化作用伴随机械剪切力使细胞组织结构遭到破坏,细胞排列更为松散,咀嚼性和内聚性随之降低^[23]。

对比脉冲持续时间发现,15 s 处理组的灰枣片内聚性随处理时间的延长呈逐渐升高的趋势,而 30 s 和 60 s 处理组则呈先升高后降低的趋势,

可能是持续时间越长,产生的空化作用和剪切作用越强烈,对细胞的破坏作用越明显。脉冲超声处理次数相同时,15 s 处理组的弹性和回复性最高,其次为 30 s 处理组,60 s 处理组的最低。可能是因为超声处理前期(1~2 h),60 s 处理组的灰枣片内部传质速率更快,细胞快速吸水导致其弹性下降;超声处理后期(3~5 h),超声波产生长时间的机械应力,破坏了细胞结构的完整性使其回复性下降^[24]。

表 2 不同脉冲超声处理对灰枣片质构的影响

Table 2 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the texture of Huizao slices

样品	硬度/N	内聚性	咀嚼性/N	弹性	回复性
对照	0.50 ± 0.02 ^{ef}	0.55 ± 0.01 ^{ab}	0.36 ± 0.02 ^a	0.62 ± 0.04 ^{def}	0.68 ± 0.05 ^a
15-1	0.50 ± 0.03 ^{ef}	0.30 ± 0.05 ^f	0.07 ± 0.01 ^{ef}	0.57 ± 0.04 ^b	0.62 ± 0.06 ^b
15-2	0.53 ± 0.03 ^{de}	0.38 ± 0.02 ^e	0.10 ± 0.01 ^{cde}	0.50 ± 0.05 ^{bc}	0.51 ± 0.02 ^c
15-3	0.54 ± 0.03 ^{cde}	0.42 ± 0.03 ^{de}	0.12 ± 0.04 ^{bcd}	0.46 ± 0.02 ^{cd}	0.50 ± 0.01 ^c
15-4	0.58 ± 0.01 ^c	0.43 ± 0.04 ^{de}	0.15 ± 0.03 ^b	0.42 ± 0.03 ^e	0.41 ± 0.03 ^{df}
15-5	0.50 ± 0.02 ^{ef}	0.51 ± 0.04 ^{bc}	0.10 ± 0.02 ^{cde}	0.41 ± 0.02 ^{def}	0.39 ± 0.02 ^{df}
30-1	0.55 ± 0.02 ^{cd}	0.39 ± 0.03 ^e	0.10 ± 0.01 ^{cde}	0.45 ± 0.02 ^{ef}	0.54 ± 0.05 ^c
30-2	0.58 ± 0.02 ^c	0.53 ± 0.05 ^{ab}	0.12 ± 0.01 ^{bcd}	0.39 ± 0.03 ^{gh}	0.50 ± 0.03 ^c
30-3	0.65 ± 0.01 ^b	0.54 ± 0.02 ^{ab}	0.13 ± 0.04 ^{bc}	0.34 ± 0.02 ^{hi}	0.41 ± 0.02 ^{df}
30-4	0.56 ± 0.02 ^{cd}	0.55 ± 0.02 ^{ab}	0.15 ± 0.04 ^b	0.30 ± 0.02 ^{ij}	0.38 ± 0.01 ^f
30-5	0.45 ± 0.01 ^g	0.46 ± 0.01 ^{cd}	0.07 ± 0.02 ^{de}	0.28 ± 0.01 ^a	0.37 ± 0.02 ^{fg}
60-1	0.64 ± 0.01 ^b	0.40 ± 0.01 ^{de}	0.11 ± 0.02 ^{cde}	0.41 ± 0.03 ^{fg}	0.51 ± 0.03 ^c
60-2	0.67 ± 0.04 ^{ab}	0.43 ± 0.04 ^{de}	0.14 ± 0.01 ^{bc}	0.37 ± 0.01 ^{hi}	0.44 ± 0.02 ^d
60-3	0.69 ± 0.03 ^a	0.53 ± 0.06 ^{ab}	0.16 ± 0.01 ^{bcd}	0.30 ± 0.02 ^j	0.35 ± 0.01 ^{gh}
60-4	0.48 ± 0.01 ^{fg}	0.58 ± 0.06 ^a	0.10 ± 0.01 ^{cd}	0.29 ± 0.01 ^j	0.32 ± 0.04 ^{gh}
60-5	0.45 ± 0.02 ^g	0.51 ± 0.04 ^{bc}	0.04 ± 0.01 ^f	0.24 ± 0.03 ^{cd}	0.31 ± 0.02 ^h

注:同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.4 脉冲超声处理对灰枣片微观结构的影响

从图 3(放大倍数为 40)可以看出,对照组灰枣片组织结构均匀且呈现致密状态。经超声处理后,可观察到微通道的形成;且随着脉冲超声循环次数的增加,灰枣片结构中微通道的数量和褶皱增多。这可能是因为超声波的空化效应产生空化气泡,气泡破裂对样品造成冲击而产生微通道,同时引起搅拌和震动,使灰枣片组织结构发生形变并形成褶皱^[25-26]。对比脉冲超声持续时间发现,处理前期(1~2 h),灰枣片组织均出现较为均匀的微通道和轻微的褶皱情况;处理后期(3~5 h),灰枣片组织结构不再呈现均匀性变化,部分组织结构出现坍塌和畸变。其中,15 s 处理的样品在超声处

理前期(1~2 h),组织中出现少许微通道,组织结构相比较对照组发生轻微改变;超声处理后期(3~5 h),可观察到较为明显的微通道,组织的均匀性保持较好,这也可能是灰枣片维持较好弹性和回复性的原因。特别的是,超声处理后期(4~5 h),30 s 处理组和 60 s 处理组织结构畸变严重,且有不均匀的大孔洞形成。这是因为超声波长时间连续的空化效应作用下,空化气泡的破裂对灰枣片组织产生了压迫和损伤,且在超声微射流连续的压缩和释放下,微通道逐渐扩张导致大孔洞形成^[27],这可能也是导致枣片在超声处理后期硬度和内聚性下降的原因。

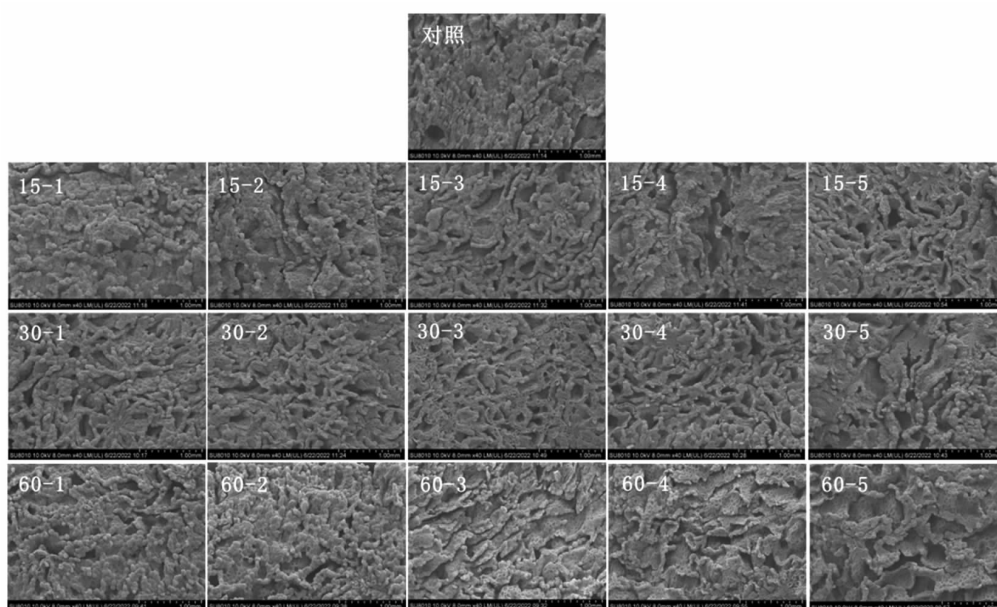


图3 不同脉冲超声处理对灰枣片微观结构的影响(40×)

Fig.3 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the microstructure of Huizao slices (40×)

2.5 脉冲超声处理对超声液色泽的影响

超声液的状态及 L^* , a^* , b^* 和 ΔE 变化如表 3 所示。随着脉冲超声处理时间的延长,每个循环处理后溶液颜色逐渐变浅, L^* 值逐渐增加, a^* , b^* 和 ΔE 值逐渐降低;在处理结束时(5 h),各处理组的 L^* 值均为 100 与超声液原始状态(蒸馏水)相同,同时表现出极低的 a^* , b^* 和 ΔE 值。表明灰枣片组织中的内容物向溶液中的扩散量逐渐减少,可能仅存在少量无色粒子。对比脉冲持续时间发现,处理前期(1~2 h),15 s 处理组溶液 L^* 值最高, ΔE 值最小,其次为 30 s 处理组,60 s 处理组溶液 L^* 值最低, ΔE 值最大。处理后期(3~5 h),60 s 处理组溶液的 ΔE 值最小,其次为 30 s 处理组,15 s 处理组 ΔE 值最大。表明超声处理前期,60 s 处理组因脉冲持续时间长,所产生的较强超声作用导致灰枣片中的可溶性物质(如色素类物质等)快速扩散至溶液中,超声液亮度迅速下降;而在较为温和的超声处理条件下,灰枣片与超声液之间的传质速率较低,超声液色泽变化程度较小。至超声处理后期,灰枣片与超声液之间传质基本达到平衡,超声液色泽基本不再发生变化。

2.6 脉冲超声处理对超声液可溶性固形物含量的影响

超声液的可溶性固形物含量 (Total soluble

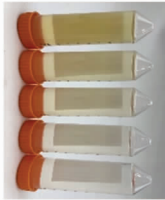
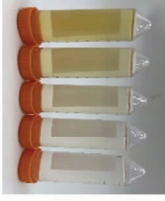
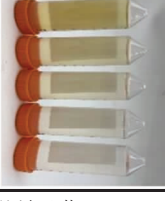
solids, TSS) 变化如图 4 所示。随着超声循环次数的增加, TSS 含量呈先逐渐降低后趋于稳定的趋势。超声处理前期(1~2 h), 超声液中 TSS 含量显著增加, 即 $60\text{ s} > 30\text{ s} > 15\text{ s}$; 超声处理后期(3~5 h), TSS 含量逐渐减少, 每组处理超声液中 TSS 含量大小为 $15\text{ s} > 30\text{ s} > 60\text{ s}$ 。短时间、高强度的脉冲超声处理, 促使灰枣片组织内可溶性物质与低渗透压的超声液进行快速交换与扩散; 随着脉冲超声处理时间延长, 大量的可溶性固形物溶出, 灰枣片组织内、外的化学势差降低, 驱动力减小, TSS 降低缓慢。脉冲超声处理 5 h 后, 15 s 处理组仍能检测到少量 TSS 的存在; 而 30 s 和 60 s 处理组溶液中未检测到 TSS, 表明灰枣片与超声液之间物质交换达到平衡, 可以推断此时灰枣片中的 TSS 或可溶性糖已经被完全去除^[28]。

2.7 脉冲超声处理对超声液电导率的影响

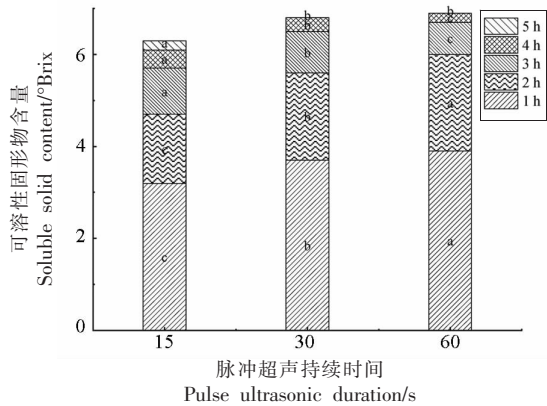
超声液电导率变化如图 5 所示。随着脉冲超声循环次数的增加, 超声液电导率呈先降低后持续稳定的趋势。电导率主要取决于超声处理过程中从灰枣片组织中转移至超声液中的可溶性物质的种类和浓度^[29], 且电导率呈现出与 TSS 含量相似的变化趋势。对比不同处理组发现, 超声处理前期(1~2 h), 60 s 处理组的电导率最高, 其次为 30 s 处理组, 15 s 处理组电导率最低。超声处理后期

表 3 不同脉冲超声处理对超声液色泽的影响

Table 3 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the color of ultrasonic solution

样品	样品状态	L^*	a^*	b^*	ΔE
15-1		97.84 ± 0.10^j	-1.38 ± 0.01^k	11.47 ± 0.06^e	11.76 ± 0.06^c
15-2		99.02 ± 0.03^f	-0.93 ± 0.0^h	6.27 ± 0.05^f	6.41 ± 0.05^f
15-3		99.33 ± 0.01^d	-0.67 ± 0.01^f	4.05 ± 0.01^h	4.16 ± 0.01^h
15-4		99.65 ± 0.0^e	-0.36 ± 0.01^c	2.03 ± 0.01^j	2.09 ± 0.01^j
15-5		100.0 ± 0.01^a	-0.23 ± 0.01^b	0.23 ± 0.01^m	1.16 ± 0.0^m
30-1		97.11 ± 0.0^e	-1.45 ± 0.0^l	13.67 ± 0.07^b	14.05 ± 0.07^b
30-2		98.41 ± 0.01^g	-1.13 ± 0.01^i	8.35 ± 0.04^c	8.57 ± 0.04^e
30-3		99.23 ± 0.01^e	-0.66 ± 0.01^e	3.95 ± 0.04^i	4.07 ± 0.04^i
30-4		99.70 ± 0.0^b	-0.35 ± 0.01^c	1.89 ± 0.01^l	1.95 ± 0.01^l
30-5		100.0 ± 0.0^a	-0.20 ± 0.0^a	0.99 ± 0.01^n	1.01 ± 0.01^n
60-1		97.02 ± 0.0^k	-1.65 ± 0.01^m	13.78 ± 0.04^a	14.79 ± 0.04^a
60-2		98.03 ± 0.0^b	-1.33 ± 0.01^j	9.30 ± 0.04^d	9.60 ± 0.04^d
60-3		99.0 ± 0.01^f	-0.82 ± 0.02^g	4.80 ± 0.04^j	4.97 ± 0.03^e
60-4		99.72 ± 0.01^b	-0.44 ± 0.01^d	1.92 ± 0.01^k	1.99 ± 0.01^k
60-5		100.0 ± 0.0^a	-0.22 ± 0.01^b	0.68 ± 0.0^o	0.72 ± 0.0^o

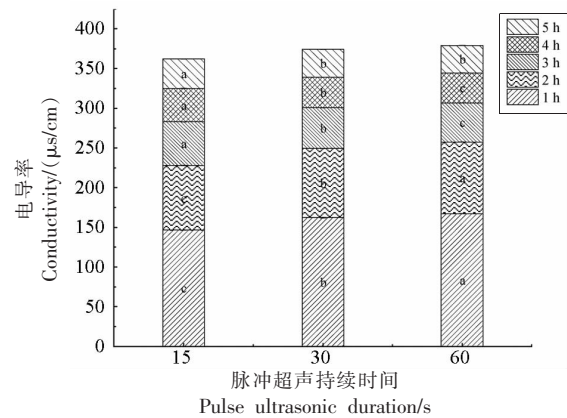
注:同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。



注:不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同脉冲超声处理对超声液可溶性固形物含量的影响

Fig.4 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the total soluble solids content of ultrasonic solution



注:不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同脉冲超声处理对超声液电导率的影响

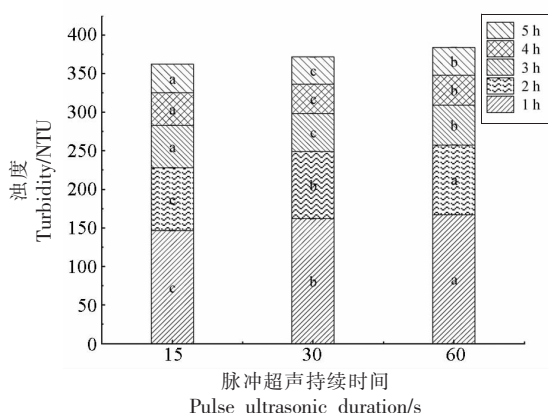
Fig.5 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the conductivity of ultrasonic solution

(3~5 h), 15 s 处理组超声液的电导率显著高于 30 s 和 60 s 处理组; 超声处理 5 h 后, 30 s 处理组和 60 s 处理组电导率未呈现显著性差异, 可能是由于此时灰枣片与超声液之间传质趋于平衡状态, 且不存在大量的可溶性固形物, 仅残留少部分的导电粒子; 而处理前期, 灰枣片组织中的 TSS 和可导电粒子大量溶出至超声液中, 使超声液具有

较高的电导率。

2.8 脉冲超声处理对超声液浊度的影响

超声液浊度变化如图 6 所示。随着脉冲超声循环次数的增加, 超声液浊度呈现先快速下降后缓慢下降的趋势, 可能是因为超声处理前期, 灰枣片组织内、外渗透压差较大, 在超声的协同作用下, 组织中的糖、酸、维生素 C、矿物质等扩散到溶



注:不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

图6 不同脉冲超声处理对超声液浊度的影响
Fig.6 Effect of pulsed ultrasonic with different durations on the turbidity of ultrasonic solution

液中^[30],导致溶液浊度迅速增加。而随着脉冲超声循环次数的增多,灰枣片内部与溶液之间的物质交换处于相对平衡状态,超声液中的物质组分大幅减少,因此溶液浊度不再发生显著变化。对比不同脉冲持续时间发现,处理前期(1~2 h),60 s处理组浊度最高[1 h:(167.37 ± 0.06)NTU,2 h:(90.17 ± 0.25)NTU],其次为30 s处理组和15 s处理组。这可能是因为60 s超声脉冲处理产生的较为强烈的空化作用对细胞间黏结性破坏更严重,并可能诱使部分细胞壁物质降解,细胞间隙及细胞膜通透性增强^[31],从而导致枣片中更多内容物转移到超声液中,使其浊度增加。处理后期(3~5 h),15 s处理组浊度显著高于30 s和60 s处理组,这与TSS、电导率等变化趋势相一致。

3 结论

本研究分别从灰枣片和超声液两个角度出发,探究了脉冲超声过程中二者特性的变化。试验结果表明,脉冲超声循环处理前期(1~2 h)可以诱导灰枣片与超声液发生快速且显著的传质反应;随着脉冲超声循环次数的增加,灰枣片组织与超声液之间的传质逐渐减缓;至处理末期(5 h),传质处于平衡阶段,自由水成为灰枣片组织中的主要成分;灰枣片因吸水组织膨胀,形态饱满,色泽变淡;因超声的空化和剪切作用,组织结构中出现微通道,细胞排列更为疏松,质构特性发生显著变化。处理前期(1~2 h),超声液由初始的蒸馏水状

态因传质的发生,其色泽、可溶性固形物、电导率、浊度等大幅度增加;处理后期超声液的特性变化逐渐降低至保持平稳,表明此时灰枣片组织与超声液之间的传质达到平衡。相比较不同脉冲持续时间的处理组,60 s处理组因持续时间长而产生更为强烈的空化效应和机械剪切效应,导致灰枣片组织结构受到破坏,诱导更大或更多微通道的形成,传质速率更快;随着脉冲超声循环次数的增加,15 s处理组灰枣片和超声液的变化更显著,可能是由于15 s处理组中灰枣片与超声液之间的传质相对缓和,持续时间也较长。在超声脉冲处理完成后(5 h),15 s处理组中超声液依然含有一定量的可溶性固形物,表明可以利用超声液中可溶性固形物的含量来推断灰枣片传质的程度。同时,值得注意的是,在利用脉冲超声处理的过程中,灰枣片和超声液的特性均发生了显著改变,因此可以依据二者特性的改变而确定适于科研和生产的工艺参数。

参 考 文 献

- [1] 傅力, 胡丽红, 古丽娜孜, 等. 红枣醋生产中醋酸发酵阶段最佳工艺条件的研究[J]. 中国调味品, 2009, 34(8): 72-75.
FU L, HU L H, GU L N Z, et al. The effect of fermentation technology of acetic acid in Chinese jujube vinegar production[J]. China Condiment, 2009, 34(8): 72-75.
- [2] CHEN D Y, WANG Y K, WANG X, et al. Effects of branch removal on water use of rain-fed jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) plantations in Chinese semiarid Loess Plateau region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178: 258-270.
- [3] ZHU Q Y, ZHANG Q Y, CAO J, et al. Cyclodextrin-assisted liquid-solid extraction for determination of the composition of jujube fruit using ultrahigh performance liquid chromatography with electrochemical detection and quadrupole time-of-flight tandem mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2016, 213(15): 485-493.
- [4] SHEN X C, TANG Y P, YANG R H, et al. The protective effect of *Zizyphus jujube* fruit on carbon tetrachloride-induced hepatic injury in mice by anti-

- oxidative activities[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2009, 122(3): 555–560.
- [5] 毕平, 来发茂. 枣果实的含糖量变化[J]. *果树科学*, 1995(3): 173–175.
BI P, LAI F M. Variation of sugar content in jujube fruit [J]. *Journal of Fruit Science*, 1995 (3): 173–175.
- [6] 王桂欣. 枣粉干燥过程美拉德反应程度及相关品质变化与控制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
WANG G X. Changes and control of milliard reaction extent and related quality in drying process of jujube powder[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016.
- [7] 侯皓男. 基于玻璃化转变理论的枣片外观品质调控技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
HOU H N. Appearance quality control of jujube slices during drying based on glass transition theory [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2020.
- [8] 张迎敏, 任广跃, 屈展平, 等. 超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(12): 194–201.
ZHANG Y M, REN G Y, QU Z P, et al. Effect of ultrasound and blanching pretreatment on hot air drying of sweet potato leaves[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(12): 194–201.
- [9] WEN C, ZHANG J X, ZHANG H H, et al. Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 48: 538–549.
- [10] SUSLICK K S, EDDINGSAAS N C, FLANNIGAN D J, et al. Extreme conditions during multibubble cavitation: Sonoluminescence as a spectroscopic probe[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 842–846.
- [11] OLADEJO A O, EKPENE M M, ONWUDE D I, et al. Effects of ultrasound pretreatments on the drying kinetics of yellow cassava during convective hot air drying[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): e15251.
- [12] SONG J T, SHI D Q, SU H, et al. Optimization of ultrasonic extraction of *Lycium barbarum* polysaccharides using response surface methodology[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2020, 16(11): 20200153.
- [13] INGUGLIA E S, BURGESS C M, KERRY J P, et al. Ultrasound-assisted marination: Role of frequencies and treatment time on the quality of sodium reduced poultry meat[J]. *Foods*, 2019, 8(10): 473–484.
- [14] 靳力为, 任广跃, 段续, 等. 超声预处理对杏片微波冻干过程中水分迁移的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(8): 15–21, 81.
JIN L W, REN G Y, DUAN X, et al. Effect of ultrasound pretreatment on water migration of apricot slices during microwave freeze-drying [J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(8): 15–21, 81.
- [15] XU B G, SYLVAIN T E, WEI B X, et al. Multi-frequency power ultrasound as a novel approach improves intermediate-wave infrared drying process and quality attributes of pineapple slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 88: 106083.
- [16] SUNIL C K, KAMALAPREETHA B, SHARATH-CHANDRA J, et al. Effect of ultrasound pre-treatment on microwave drying of okra[J]. *Journal of Applied Horticulture*, 2017, 19(1): 58–62.
- [17] VEGA G A, KONG A, CHACANA M, et al. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, color, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices[J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(1): 51–59.
- [18] RASTOGI N K, NGUYEN L T, BALASUBRAMANIAM V M. Effect of pretreatments on carrot texture after thermal and pressure-assisted thermal processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88(4): 541–547.
- [19] LI L, ZHANG M, YANG P. Suitability of LF-NMR to analysis water state and predict dielectric properties of Chinese yam during microwave vacuum drying[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2019, 105: 257–264.
- [20] SACCHETT G, NERI L, LAGHI L, et al. Multi-disciplinary approach to study the effect of water status and mobility on the activity of peroxidase in solution[J]. *Food Chemistry*, 2014, 144: 36–43.
- [21] XU F F, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. *Food Research International*, 2017, 96: 191–197.
- [22] MARTYNENKO A, JANASZEK M A. Texture

- changes during drying of apple slices [J]. *Drying Technology*, 2014, 32(5): 567–577.
- [23] PIECZYWEK P M, KOZIOL A, KONPACKA D, et al. Changes in cell wall stiffness and microstructure in ultrasonically treated apple [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 197: 1–8.
- [24] 宋璐瑶, 刘东红. 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(11): 231–238, 230.
- SONG L Y, LIU D H. Mass transfer kinetics and quality analysis of mango under vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(11): 231–238, 230.
- [25] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 277–286.
- LIU Y H, LI X F, MIAO S, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 277–286.
- [26] 田伏锦, 刘云宏, 黄隽妍, 等. 马铃薯超声强化冷风干燥及品质特性[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 85–94.
- TIAN F J, LIU Y H, HUANG J Y, et al. Drying characteristics and quality of potato slices subjected to ultrasound assisted cold air drying[J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 85–94.
- [27] RASHID M T, MA H L, JATOI M A, et al. Influence of ultrasonic pretreatment with hot air drying on nutritional quality and structural related changes in dried sweet potatoes[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2019, 15(8): 1–14.
- [28] 周民生, 李莹莹, 路志芳. 超声渗透处理对香菇脱水复水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(18): 55–59.
- ZHOU M S, LI Y Y, LU Z F. Effect of ultrasonic infiltration on dehydration and rehydration of letinous edodes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(18): 55–59.
- [29] PEIRO R, DIAS V M C, CAMACHO M M, et al. Micronutrient flow to the osmotic solution during grapefruit osmotic dehydration [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 74(3): 299–307.
- [30] YISSLEEN N M, MARIO P W, ELSA U, et al. Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*) [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2013, 52(2): 151–156.
- [31] RAHAMAN A, ZENG X A, KUMARI A, et al. Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on texture, bioactive compounds and metabolites analysis of plum[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 58: 104643.

Effect of Pulsed Ultrasound on Physicochemical Properties of Huizao Tablets and Ultrasonic Liquid Properties

Wang Fengzhao, Lü Mingyue, Lü Jian, Chen Qinqin, Bi Jinfeng*

(*Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193*)

Abstract In order to investigate the effect of pulse ultrasonic (PU) duration on the physicochemical properties of jujube slices and the characteristics of ultrasonic liquid, Huizao was selected as the test materials. Huizao slices were treated by PU with different durations (15, 30, 60 s) for 5 h, which were sampled and analyzed at 1, 2, 3, 4, 5 h, respectively. The color, water status, texture and microstructure of Huizao slices were measured, as well as the total soluble solids (TSS), color, turbidity and conductivity of ultrasonic solution. Results showed that with the increasing in PU time, free water instead of bond water was considered as the most important water for Huizao slice. Huizao was expanded by water adsorption, with a significant increase trend in L^* (42.88 to 50.71) and ΔE (3.69 to 9.85) and a remarkably decrease in a^* (19.88 to 14.70) and b^* (22.39 to 19.03). The microchannel was produced by the PU, with the increase in processing cycles and pulsed duration, the microchannel became bigger and more, accompanied with the decreased chewiness,

springiness and resilience. It was found that in the initial phase (1–2 h) the color (ΔE : 0–26.69), total soluble solids (TSS, 0–6.1 °Brix), conductivity (0–257.54 $\mu\text{s}/\text{cm}$) and turbidity (0–8.81 NTU) gradually decreased because of the fast mass transfer resulted from the PU with long duration (30 s and 60 s). In the later phase (3–5 h), the most obvious changes were shown in 15 s group. At the end, all the L^* values were 100, while a^* values and b^* values were approached to the initial phase of ultrasonic solution. Along with the transfer balance, the TSS in the 30 s and 60 s group was 0 °Brix. Therefore, the degree of mass transfer could be evaluated by the changes in characteristics of Huizao slices and ultrasonic solution, which could adapt to different needs in the food industry.

Keywords pulsed ultrasound; Chinese cv. Huizao; ultrasonic solution; duration; total soluble solids