

超声预处理对枸杞远红外真空干燥特性及品质的影响

万芳新¹, 李武强¹, 罗燕¹, 韦博², 黄晓鹏^{1*}

1. 甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070

2. 酒泉奥凯种子机械股份有限公司, 甘肃 酒泉 735000

摘要:目的 以枸杞为实验材料, 探讨超声波技术对远红外真空干燥过程的影响。方法 将超声波技术应用于枸杞的远红外真空干燥试验, 利用自主研发的远红外真空辐射干燥设备, 研究在不同超声频率、超声功率和超声处理时间条件下, 枸杞的远红外真空干燥特性和品质的变化规律, 并用 Weibull 函数对干燥过程进行动力学模拟。结果 随着超声频率、超声功率和超声处理时间的增加, 干燥时间明显缩短, 干燥速率显著增加; Weibull 分布函数可以较好地模拟不同超声处理条件下枸杞的远红外真空干燥过程 ($r^2=0.993\ 9\sim0.999\ 2$, $\chi^2=0.000\ 1\sim0.000\ 6$), 尺度参数 α 随着超声频率、超声功率和超声处理时间的增大总体呈现增加的趋势, 形状参数 β 均大于 1; 与远红外真空干制品相比, 进行超声处理不仅能减少枸杞的有效成分损失, 还能缩短其干燥时间, 其中超声频率为 40 kHz 对应单因素试验所得干制品的多糖 (812.846 mg/g) 最高, 当超声功率为 80 W 时, 其对应单因素试验所得枸杞干制品的总黄酮含量最高上升了 28.69%, 当超声频率为 60 kHz 时, 其对应单因素试验所得枸杞干制品的总酚含量提高了 10.11%, 当超声处理时间为 25 min 时, 其对应单因素试验所得枸杞干制品的 DPPH 值提高了 14.33%; 通过对比不同处理条件下的微观结构图, 发现超声波不仅能增加物料表面微孔数量, 还能降低对枸杞表皮细胞的损伤。结论 将超声波技术应用于枸杞的远红外真空干燥, 强化了枸杞内部的热质传递过程, 改善了枸杞干果的品质, 可以为枸杞干燥技术的发展提供技术指导。

关键词: 枸杞; 超声波; 远红外真空; 干燥特性; 品质

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2020)18-4654-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.18.008

Effects of ultrasonic pretreatment on far infrared vacuum drying properties and quality of *Lycium barbarum*

WAN Fang-xin¹, LI Wu-qiang¹, LUO Yan¹, WEI Bo², HUANG Xiao-peng¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Jiuquan Okay Seed Machinery Co., Ltd., Jiuquan 735000, China

Abstract: Objective To investigate the effect of ultrasonic technology on the far infrared vacuum drying process by using *Lycium barbarum* as the test material. **Methods** The far-infrared vacuum drying test of *L. barbarum* was performed by ultrasonic technology. Using the independently developed far-infrared vacuum radiation drying equipment to study the far-infrared vacuum drying characteristics and quality change law of *L. barbarum* under different ultrasonic frequency, ultrasonic power and ultrasonic treatment time; And the Weibull function was used to simulate the drying process dynamically. **Results** With the increase of ultrasonic frequency, ultrasonic power and ultrasonic treatment time, the drying time was significantly shortened, and the drying rate was significantly increased. The Weibull distribution function could better simulate the far-infrared vacuum drying process of *L. barbarum* under different ultrasonic treatment conditions ($r^2 = 0.993\ 9\sim0.999\ 2$, $\chi^2 = 0.000\ 1\sim0.000\ 6$), the scale parameter α generally increased with the increase of ultrasonic frequency, ultrasonic power and ultrasonic processing time, and the shape parameter β was greater than 1; Compared with far-infrared vacuum dried products, ultrasonic treatment can not only reduce the loss of active ingredients of *L. barbarum*, but also shorten its drying time. Among them, the polysaccharides (812.846 mg/g) of the dried products obtained by the single factor test under the condition of 40 kHz ultrasonic frequency was the highest. When the ultrasonic power was

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51765003); 甘肃省科技重大专项 (2060404); 甘肃农业大学科技创新基金-学科建设基金项目 (GSAU-XKJS-2018-187)

作者简介: 万芳新 (1976—), 女, 副教授, 研究方向为特色林果生产机械化和农产品精深加工。Tel: 13893163871 E-mail: wanfx@gsau.edu.cn

*通信作者 黄晓鹏 (1975—), 男, 教授, 研究方向为农业机械装备研究。Tel: 13893159327 E-mail: huangxp@gsau.edu.cn

80 W, the total flavone content of *L. barbarum* after drying increased up to 28.69% in the single factor test. When the ultrasonic frequency was 60 kHz, the total phenol content of the dried *L. barbarum* products obtained by the single factor test increased by 10.11%. When the ultrasonic treatment time was 25 min, the corresponding DPPH value of dried *L. barbarum* producta obtained by the single factor test increased by 14.33%; By comparing the microstructure diagrams under different processing conditions, it was found that ultrasonic waves can not only increase the number of micropores in the surface of materials, but also reduce the damage to *L. barbarum* epidermal cells. **Conclusion** The application of ultrasonic technology to the far-infrared vacuum drying of *L. barbarum* strengthens the heat and mass transfer process inside and improves the quality of *L. barbarum* dried fruit, which can provide technical guidance for the development of *L. barbarum* drying technology.

Key words: *Lycium barbarum* L.; ultrasonic; far-infrared vacuum; drying characteristics; quality

枸杞 *Lycium barbarum* L. 为茄科多年生落叶灌木, 其浆果是我国著名的药食同源中药, 在宁夏、新疆和甘肃等地区广泛种植^[1-3]。枸杞含有多糖、黄酮和总酚等, 具有促进免疫、抗衰老、抗肿瘤和保肝等多种生物活性和保健功能^[4-5]。枸杞鲜果具有很高的含水率, 不易保存, 鲜果直接食用受季节限制, 在市场上通常以干果的形式销售。目前枸杞的干燥多为产地自然晾晒, 虽方法简单且成本低, 但存在卫生条件差和易受天气影响等不足^[6], 直接影响着枸杞干果的品质。随着枸杞产业的不断扩大, 改革产地干燥方法技术成为亟待解决的问题。

目前已有采用热风、微波、远红外和真空冷冻等用于枸杞干燥的研究报道和部分应用。王鹤等^[7]将微波热风联合干燥技术应用于枸杞的初加工中, 发现微波功率对枸杞的联合干燥特性具有重要的影响。吴中华等^[8]为了提高枸杞的干燥品质, 对其分段式变温热风干燥工艺进行了试验研究, 结果表明其最佳的分段变温干燥工艺条件为 40 °C (6 h) → 50 °C (6 h) → 60 °C, 物料厚度为 8 mm, 干燥湿度为 40%。赵丽娟等^[9]采用远红外真空干燥技术对枸杞进行了干燥试验, 结果表明其最佳的干燥条件为: 操作温度 60 °C, 操作压力 5 kPa, 干燥时间 10.7 h。丁昌江等^[10]在相同的温度和湿度条件下研究了不同直流高压电场下枸杞的干燥特性, 并比较了干燥后枸杞营养成分的变化, 结果表明物料的干燥速率和单位能耗随着直流电压的增加而增加, 同时发现该技术能很好的保持枸杞内部的营养成分。

近年来, 在物料干燥前采用热烫、渗透和超声波等技术对其进行预处理受到越来越多学者的关注, 由于超声波技术具有独特的空化效应、机械效应和热效应, 该技术在干燥领域受到越来越多的应用^[11]。有学者利用超声波技术对荔枝、红枣、苹果和胡萝卜等农产品进行预处理, 发现超声波技术能够改变物料的细胞结构, 有效缩短其干燥时间^[12-15]。

未见远红外真空干燥前利用超声波技术进行预处理的相关报道, 并且远红外真空干燥技术对热敏性物料的破坏小, 能够最大程度减少其有效成分的损失。故本研究将超声波技术应用于枸杞的远红外真空干燥, 探索枸杞的干燥特性, 建立枸杞的干燥模型, 并对不同处理条件下的干果品质与微观结构进行比较, 以期对枸杞的工业化提供技术依据。

1 材料与方法

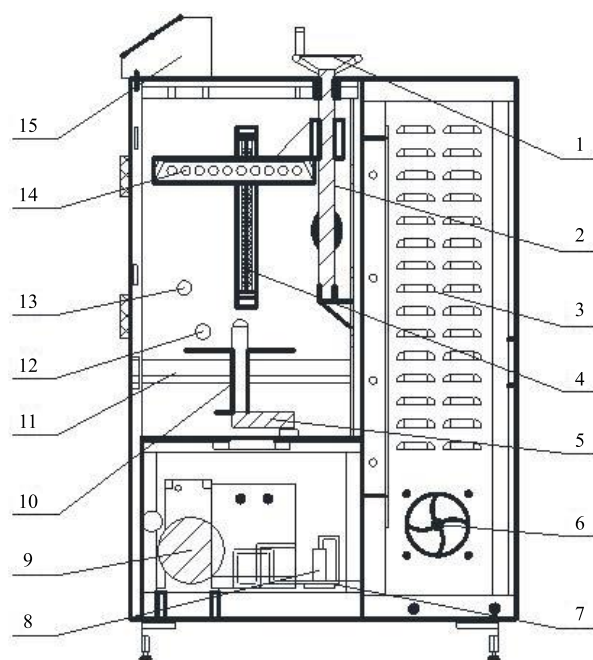
1.1 试验材料

枸杞品种为宁杞 5 号, 产自宁夏中宁枸杞种植园, 经甘肃农业大学机电工程学院黄晓鹏教授鉴定为茄科枸杞属植物宁夏枸杞 *Lycium barbarum* L. 的成熟果实, 平均湿基含水率为 (83.62±0.50) %, 将枸杞购回后及时置于 2~4 °C 的冰箱中冷藏。

1.2 试验仪器

本研究所用的远红外真空辐射干燥设备是由甘肃农业大学机电工程学院与天水盛华微波技术有限公司联合研制, 其结构如图 1 所示。干燥设备主要包括干燥箱主体、远红外辐射系统、和控制系统等, 其中干燥室的尺寸为 800 mm×450 mm×1 300 mm, 远红外辐射系统主要由手摇调节轮、红外加热管和操控箱等组成。手摇调节轮与红外加热管联结, 红外加热管的最大功率为 3 kW, 最高温度为 200 °C, 其位置可通过手动调节轮进行调节, 可调范围为 100~500 mm。控制系统是由湿度传感器、温度传感器、称重传感器、托盘和真空泵等构成, 其中温度传感器分布于料盘中心位置和干燥腔体的侧壁, 可通过温度传感器所检测的温度对远红外辐射管的温度进行调节, 湿度传感器分布于干燥箱腔壁, 可通过调节风速和真空度对腔体内的湿度进行控制, 物料托盘下装有精度为 0.001 g 的称重传感器, 可以在干燥过程中监测物料重量的变化规律。

其他仪器与设备: KQ-300VDE 型三频数控超声波清洗机, 昆山市超声仪器有限公司; YQ101-0A



1-手摇调节轮 2-升降丝杠 3-电控箱 4-滑道 5-称重模块 6-风机 7-循环风机 8-气路系统 9-真空泵 10-测温传感器 11-保温层 12-测温传感器 2 13-测温传感器 3 14-红外加热管 15-操控面板
1-hand-cranked adjustment wheel 2-lifting screw 3-electric control box 4-chute 5-weighing module 6-fan 7-circulating fan 8-pneumatic system 9-vacuum pump 10-temperature sensor 11-thermal insulation layer 12-temperature sensor 2 13-temperature sensor 3 14-infrared heating tube 15-control panel

图1 远红外真空辐射干燥设备

Fig. 1 Far-infrared vacuum radiation drying equipment

型数显电热鼓风干燥箱, 北京宇勤腾达制药设备有限公司; AUW220D 型电子天平, 日本岛津公司; S-3400N 型扫描电子显微镜, 日本 Hitachi 公司; TS-200 B 型台式恒温摇床, 上海锦玟仪器设备有限公司; TG22-WS 型台式高速离心机, 长沙湘锐离心机有限公司; V-5100 型分光光度计, 上海元析仪器有限公司。

2 方法与结果

2.1 干燥参数的计算

2.1.1 干基含水率的计算 干燥过程中干基含水率的测定参照 GB 5009.3-2016, 其计算公式为

$$M_i = (m_i - m_0) / m_i \quad (1)$$

M_i 表示干燥过程中枸杞的湿基含水率, m_i 表示 i 时刻枸杞的质量, m_0 表示枸杞的初始质量

2.1.2 模型分析 Weibull 分布函数的表达式为^[16]

$$MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad (2)$$

α 表示尺度参数, β 表示形状参数, t 表示干燥时间

通常用决定系数与离差平方和表示数学模型拟

合的优劣程度, 其公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 / (N - n) \quad (4)$$

$MR_{\text{exp},i}$ 表示第 i 个试验所测得的水分比, $MR_{\text{pre},i}$ 表示第 i 个预测的水分比, N 表示数据的组数, n 为模型常数的个数

2.2 品质指标的测定

2.2.1 提取液的制备 准确称取 2.0 g (误差 < 0.01 g) 干燥后的枸杞样品, 加液氮研碎后分别将其置于含 80 mL 70% 乙醇具塞三角瓶中, 在室温黑暗的条件下 120 r/min 旋转振荡 4 d, 在 4 °C、5 000 r/min 条件下离心 10 min, 取其上清液, 并将其置于 4 °C 冰箱中保存, 用于抗氧化能力、总黄酮和总酚类含量的测定与分析。

2.2.2 多糖含量的测定 采用硫酸苯酚法测定多糖的含量^[17], 具体操作步骤为吸取稀释 10 倍后的“2.2.1”项中的提取液 20 μ L, 加入 9.0% 的苯酚溶液 (现配现用) 1.0 mL, 充分混合均匀后加入 3.0 mL 浓硫酸, 振荡混匀, 在室温放置 30 min; 以不加样品溶液作为空白对照, 按照上述操作在 485 nm 下测定样品的吸光度 (A) 值, 重复 3 次取均值。多糖标准曲线方程为 $C = 90.91 A - 3.55$, $r^2 = 0.990 1$ 。

由多糖质量浓度和样品 A 值得提取液中多糖的含量, 其计算公式为

$$D = C_1 V_2 / V_1 M \quad (5)$$

D 为多糖含量, C_1 为多糖质量浓度, V_1 为吸取样品溶液的体积, V_2 为提取液的体积, M 为枸杞干制品质量

2.2.3 总黄酮含量的测定 采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠法测定总黄酮化合物的含量^[17], 具体步骤为吸取提取液 2.0 mL 置于试管中, 依次加入 2.0 mL 蒸馏水和 0.3 mL 5% NaCO_3 , 混合振荡 5 min 后, 加入 0.3 mL 10% AlCl_3 , 混合振荡 1 min 后, 加入 2.0 mL 1 mol/L NaOH , 充分混合后, 在 510 nm 下测定反应液的 A 值, 以不加样品溶液的为空白对照。每个实验重复 3 次, 总黄酮化合物的含量以儿茶素为对照品标定。标准曲线方程为 $C_2 = 0.029 3 A - 0.030$, $r^2 = 0.985 4$ 。

$$\text{总黄酮含量} = V_2 C_2 / V_1 M \quad (6)$$

C_2 表示儿茶素的质量浓度, V_1 表示吸取样品溶液的体积, V_2 表示提取液的体积, M 表示枸杞干物质的质量

2.2.4 总酚含量的测定 采用福林酚 (Folin-

Ciocalteu) 试剂法测定总酚类化合物的含量, 测定方法参照葛莉等^[17]的报道, 具体步骤为吸取提取液 70 μL 置于试管, 依次加入 2.0 mL 10% Folin-Ciocalteu 和 1.0 mL 7.5% NaCO_3 , 混合振荡 5 min 后, 置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中避光反应 1 h, 取出后在 760 nm 下测定反应液的 A 值, 以不加样品溶液的为空白对照, 重复 3 次。总酚类化合物的含量以没食子酸为对照品标定。标准曲线方程为 $C_3 = 25.380 \ 7 A - 0.096 \ 4$, $r^2 = 0.998 \ 1$ 。

$$\text{总酚含量} = V_2 C_3 / V_1 M \quad (7)$$

C_3 表示没食子酸的质量浓度, V_1 表示吸取样品溶液的体积, V_2 表示提取液的体积, M 表示枸杞干物质的质量

2.2.5 抗氧化能力的测定 采用 DPPH 法测定有机活性物质的抗氧化能力, 参考葛莉等^[17]的方法操作。具体步骤为吸取提取液 80 μL , 加入到提前制备好的 3.0 mL 10~4 mol/L DPPH 甲醇溶液中, 在室温、黑暗、120 r/min 的振荡条件下反应 30 min, 取出后在 515 nm 下测定反应液的 A 值。以不加样品的溶液为参比对照; 以 70% 无水乙醇为空白对照; 以 500 $\mu\text{mol/L}$ 90% 抗坏血酸的甲醇溶液为阳性对照。每个实验重复 3 次。

$$\text{抑制率} = (A_0 - A) / A_0 \quad (8)$$

A_0 表示不加样品溶液的吸光度值

2.2.6 甜菜碱含量的测定 按照《中国药典》2015 年版一部中甜菜碱的测定方法对枸杞进行前处理, 利用薄层色谱法 (通则 0502) 对其含量进行测定。

2.3 超声参数对枸杞远红外真空干燥特性的影响

本研究超声强化枸杞远红外真空干燥试验是在前期试验的基础上进行, 其中枸杞远红外真空干燥实验的最佳参数是: 干燥温度 70 $^{\circ}\text{C}$ 、辐照高度 210 mm、真空度 -20 kPa。

干燥试验前, 挑选大小均匀、成熟饱满的枸杞颗粒, 将其作为实验材料, 将干燥设备调整到预设参数进行预热, 同时设定好超声清洗器的参数。将初次挑选的枸杞置于质量分数为 2% NaCO_3 溶液中浸泡 3 min, 然后将其倒入超声波清洗机中进行预处理, 选取超声处理时间、超声频率和超声功率为试验因素, 其中超声频率的水平为 20、40、60 kHz, 超声功率的水平为 40、50、60、70、80 W, 超声处理时间的水平为 20、25、30、35、40 min, 达到设定的处理时间后将枸杞取出, 晾干表面的水分, 然后将其平铺在筛盘中, 关闭箱门进行干燥试验, 干燥过程中, 每隔 60 min 从控制面板中读取一次称重

数值, 物料含水率降至安全含水率 (《中国药典》2015 年版规定枸杞子含水率降至 13% 以下) 时结束实验。每组实验重复 3 次, 将其平均值作为实验结果。

2.3.1 超声频率对枸杞远红外真空干燥特性的影响 超声功率为 60 W、超声处理时间为 30 min 时, 不同超声频率对枸杞远红外真空干燥特性的影响见图 2。由图可以直观地看出, 超声频率为 60 kHz 时, 枸杞经超声处理后的远红外真空干燥时间最短, 干燥速率最快。这是因为随着超声频率增大, 枸杞内部由于空化作用产生的气泡增加, 则物料内部产生微爆现象时容易产生较大的冲击力, 从而造成细胞间隙增加和表面微孔增加的现象, 有利于物料内部水分逸出。同时可见, 枸杞干燥过程中的干燥速率呈现先增加后减小的趋势, 这是由于随着枸杞远红外真空干燥过程进行, 枸杞内部的自由水明显减少, 可溶性糖和总黄酮等成分的浓度增加^[18], 水分迁移困难, 干燥速率明显减少。

2.3.2 超声功率对枸杞远红外真空干燥特性的影响 超声频率为 40 kHz、超声处理时间为 30 min 时, 不同超声功率对枸杞远红外真空干燥特性的影响见图 3。由图可知, 随着超声功率的增加, 枸杞经超声预处理后干燥至 13% 含水率的时间明显减少, 这是因为超声功率越大, 物料内部的机械作用越强, 使枸杞受到反复的挤压, 从而增加了其内部的水分湍流, 提高了水分子的能量, 增大了枸杞表皮水分的迁移量^[19]。同时从图 3-b 可知, 超声功率为 50 W 时, 干燥初期的干燥速率最快, 降速干燥阶段最短, 这可能是由于 50 W 是较适合的超声功率, 使枸杞内部因为空化效应和机械效应产生了更多的微孔道, 减少了水分子的表面传质阻力和内部水分扩散阻力, 使枸杞在干燥过程中其水分的逸出率更高。

2.3.3 超声处理时间对枸杞远红外真空干燥特性的影响 超声频率为 40 kHz、超声功率为 60 W 时, 不同超声处理时间对枸杞远红外真空干燥特性的影响见图 4。由图可知, 超声处理时间为 30 min 时, 枸杞的远红外真空干燥时间相对较短, 其干燥前期的干燥速率最大, 这可能是由于随着超声介质与物料的接触时间增加, 物料表面的湍流运动增多, 这有利于水分对其表面的微孔进行扩张, 以增加枸杞的热质迁移速率。并且增加超声处理时间可以大大增加枸杞内部的蒸汽压力, 使细胞组织快速膨胀, 增多了毛细孔径的数量, 同时超声波对物料具有热效应, 使细胞内水分能够转化为水蒸气, 实现了水

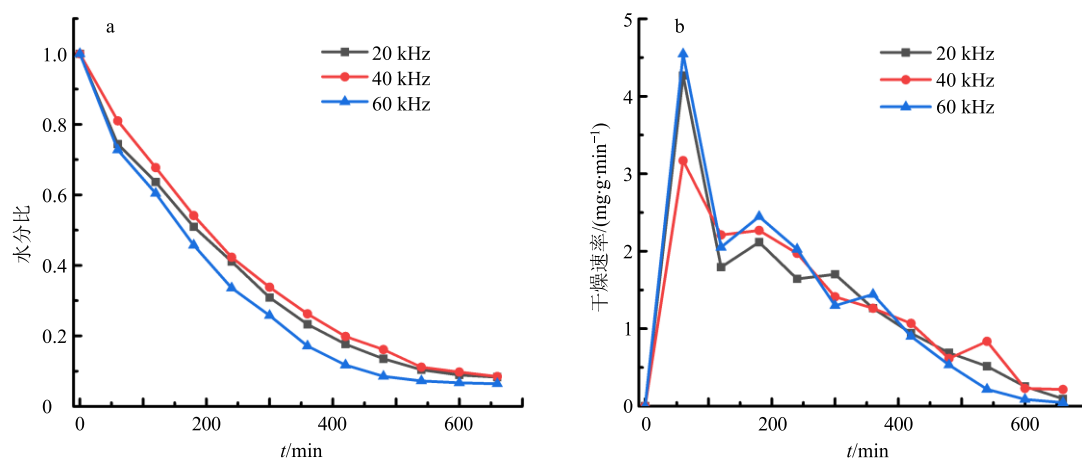


图2 不同超声频率条件下枸杞的干燥曲线 (a) 和干燥速率曲线 (b)

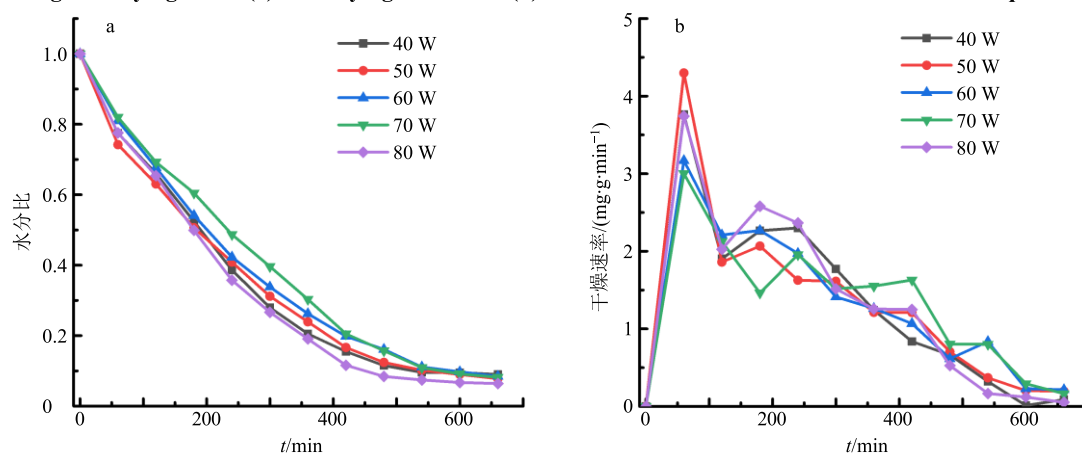
Fig. 2 Drying curve (a) and drying rate curve (b) of *L. barbarum* under different ultrasonic frequencies

图3 不同超声功率条件下枸杞的干燥曲线 (a) 和干燥速率曲线 (b)

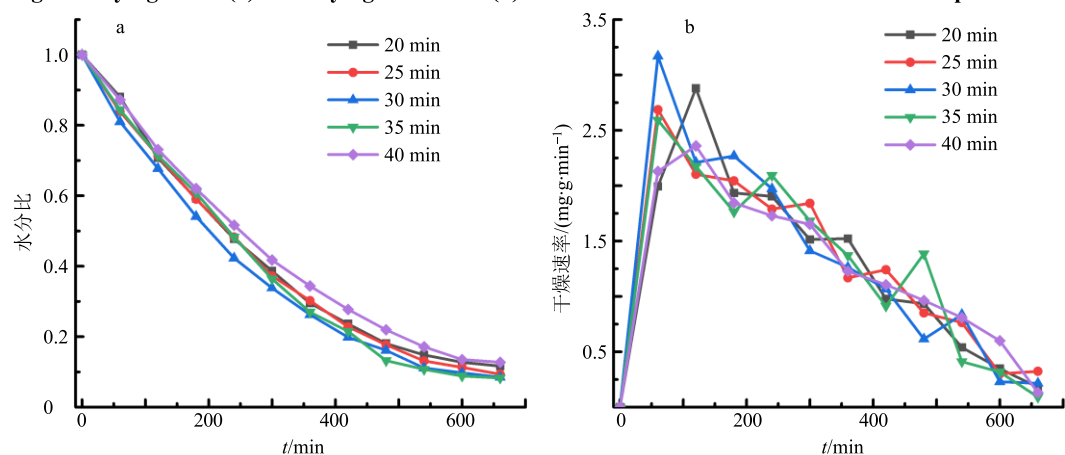
Fig. 3 Drying curve (a) and drying rate curve (b) of *L. barbarum* under different ultrasonic power conditions

图4 不同超声处理时间条件下枸杞的干燥曲线 (a) 和干燥速率曲线 (b)

Fig. 4 Drying curve (a) and drying rate curve (b) of *L. barbarum* under different sonication time conditions

分迁移^[20]。另外, 由于利用 NaCO₃ 溶液对枸杞进行前处理可以消解枸杞表皮的蜡质层, 因此过长的超声处理时间会破坏其表面的水分迁移通道, 对枸杞后期的干燥过程具有很大的影响。

2.4 基于 Weibull 分布函数的干燥过程模拟

表 1 为不同超声处理条件下 Weibull 分布函数模拟结果。可知, 决定系数 (R^2) 的区间为 0.993 9~0.999 2, 离差平方和 (χ^2) 的区间为 0.000 1~0.000 6。

因此, 本研究可以用 Weibull 分布函数较好地模拟超声处理条件下枸杞的远红外真空干燥过程。

2.4.1 尺度参数 α 的影响因素 尺度参数 α 表示枸杞远红外真空干燥过程完成了 63% 时所用的时间, 其可以用来描述干燥速率的快慢。由表 1 可知, 不同超声处理条件下 Weibull 分布函数尺度参数 α 的变化规律不同, 其中 α 值随着超声频率、超声功率和超声处理时间的增大总体呈现增加的趋势。由此可知, 利用超声波技术对枸杞进行预处理, 可以明显减少其后期干燥处理所用的时间, 提高干燥速率。

2.4.2 形状参数 β 的影响因素 形状参数 β 一般与物料干燥过程的水分迁移机制有关。由表 1 可以看出, 形状参数 β 均大于 1, 并且随着超声参数的变化, 形状参数 β 并无明显的规律, 同时各个超声工艺参数所对应形状参数的极差较小, 这是因为枸杞含有多糖等成分, 因此在后期干燥过程中, 物料收缩量的变化量较小, 并且内部的水分不能较快实现迁移^[21]。

2.4.3 Weibull 模型的求解 Weibull 分布函数的尺度参数 α 和形状参数 β 用超声频率 H 、超声功率 W 和超声处理时间 T 之间的关系通过逐步回归分析来确定, 其中干燥常数通过拟合一次多项式来确定, 多项式如 (9) 和 (10)。

$$\alpha = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln W + a_3 \ln T \quad (9)$$

$$\beta = b_0 + b_1 \ln H + b_2 \ln W + b_3 \ln T \quad (10)$$

a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待定模型系数

表 1 不同超声处理条件下 Weibull 函数的拟合结果

Table 1 Fitting results of Weibull function under different sonication conditions

超声处理条件	α/min	β	R^2	χ^2
超声频率	20 kHz	217.135	1.003	0.995 6
	40 kHz	252.524	1.029	0.999 1
	60 kHz	275.766	1.095	0.995 6
超声功率	40 W	249.323	1.088	0.994 5
	50 W	250.549	1.004	0.995 1
	60 W	275.766	1.092	0.999 2
	70 W	300.289	1.193	0.993 9
超声处理时间	80 W	234.986	1.152	0.995 8
	20 min	311.091	1.156	0.998 4
	25 min	304.867	1.092	0.998 9
	30 min	296.545	1.157	0.999 1
	35 min	283.765	1.259	0.996 7
	40 min	337.703	1.155	0.999 5

采用多元线性回归方法, 求解 Weibull 方程中参数 α 和 β 的回归方程, 得:

$$\alpha = -58.343 4 + 63.958 8 \ln H + 25.230 9 \ln W - 0.891 1 \ln T \quad (11)$$

$$\beta = -0.261 2 + 0.109 5 \ln H + 0.178 8 \ln W + 0.071 7 \ln T \quad (12)$$

α 和 β 回归方程的决定系数分别为 0.982 7、0.983 5, 均在水平 $P=0.05$ 情况下显著, 说明 Weibull 分布函数的拟合效果好, 其模型方程为

$$MR = \exp \{ -[t / (-58.343 4 + 63.958 8 \ln H + 25.230 9 \ln W - 0.891 1 \ln T)]^{(-0.261 2 + 0.109 5 \ln H + 0.178 8 \ln W + 0.071 7 \ln T)} \} \quad (13)$$

2.4.4 Weibull 模型的验证 验证试验工艺参数为超声频率 40 kHz, 超声功率 50 W, 超声处理时间 30 min。通过比较进行验证试验时枸杞水分比的试验值与 Weibull 函数的模型预测值 (图 5), 可知, 试验值和模型预测值的一致性较好。因此, Weibull 模型能够较好地反映枸杞经超声处理后其远红外真空干燥过程中水分比的变化规律。

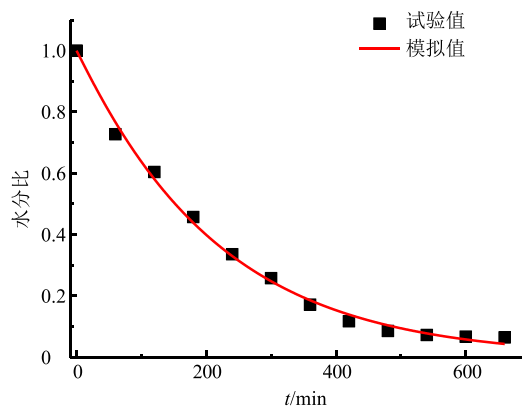


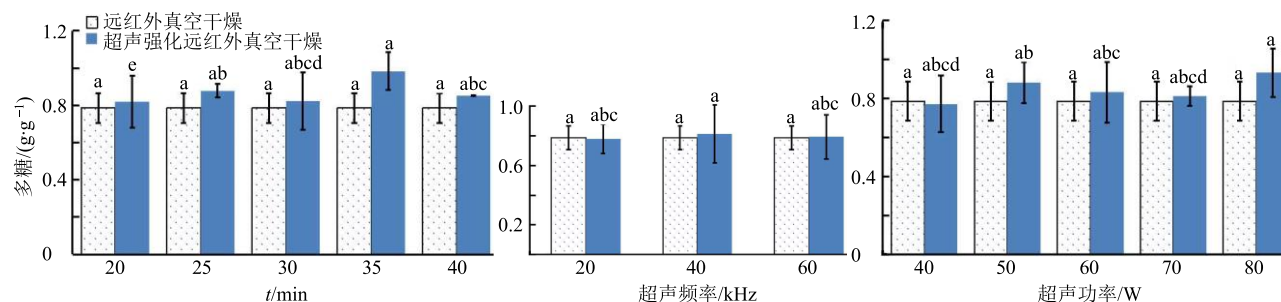
图 5 Weibull 模型的验证

Fig. 5 Weibull model validation

2.5 超声预处理对枸杞品质指标的影响

2.5.1 不同干燥条件对枸杞多糖含量的影响 图 6 考察了不同超声参数对枸杞多糖含量的影响。由图可见, 与单纯远红外真空干燥所得干制品的多糖含量 (785.59 mg/g) 相比, 超声预处理技术能够明显提高干制品的多糖含量, 这是由于在超声波的机械效应和空化效应作用下, 干制品的远红外真空干燥时间明显减少, 缩短了干燥过程中多糖的损耗。同时可知, 通过对比不同超声参数对远红外真空干制品的影响, 发现超声频率对干制品多糖含量的影响最大, 超声频率为 40 kHz (超声功率 60 W、超声处理时间 30 min) 对应单因素试验所得干制品的多糖 (812.846 mg/g) 最高, 比单纯远红外真空所得

干制品的多糖提高了 3.7%，这是因为该参数条件下物料的远红外真空干燥速率最高，会有更多的单糖合成多糖分子，提高了物料的有效成分含量。



不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$), 图 7~10 同
different letters indicate significant differences ($P < 0.05$), same as Fig. 7~10

图 6 不同超声参数下枸杞多糖含量的变化

Fig. 6 Variation of polysaccharide in *L. barbarum* under different ultrasound parameters

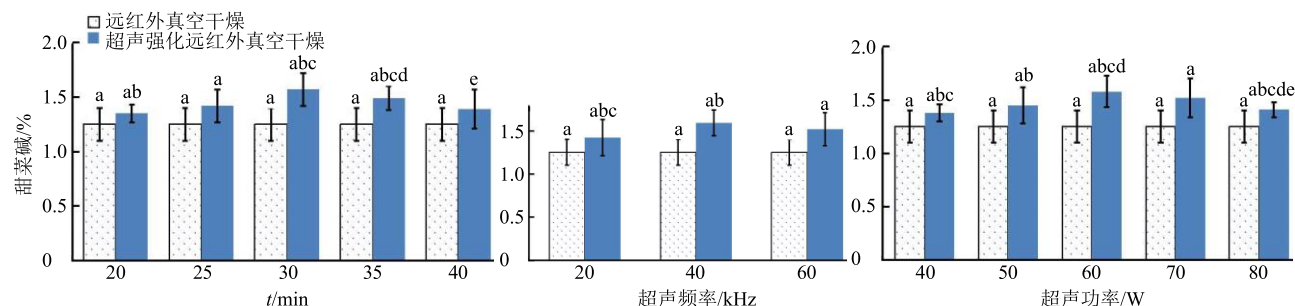


图 7 不同超声参数下枸杞甜菜碱含量的变化

Fig. 7 Variation of betaine in *L. barbarum* under different ultrasound parameters

干果中甜菜碱的含量，这是因为甜菜碱是一种类似于氨基酸的两性离子，不稳定并且易分解，而预处理可以明显减少物料的干燥时间，因此干燥时间越短，物料中甜菜碱的损失越小。同时由图可知，超声频率、超声功率和超声处理时间对枸杞干制品的影响程度大致相同，并且与单纯远红外真空所得干制品的甜菜碱含量 (1.21%) 相比，超声频率为 40 kHz (超声功率 60 W、超声处理时间 30 min) 对应单因素所得干制品的甜菜碱含量相对较高，这可能是由于该参数条件下物料表面的孔隙最多，远红外真空干燥速率最快。

2.5.3 不同干燥条件对枸杞总黄酮含量的影响 枸杞的黄酮类化合物是一种具有广泛活性的物质，为探讨超声处理对其含量的影响，将超声处理后干燥的干果与单纯远红外真空干燥的枸杞进行对比。不同超声处理条件下枸杞干果的总黄酮含量如图 8 所示。可以直观地看出，超声处理后进行干燥的枸杞的总黄酮含量与远红外真空干制品 (1.017 mg/g) 基本相同，这表明将超声波技术应用于枸杞远红外

2.5.2 不同干燥条件对枸杞甜菜碱含量的影响 不同超声处理条件下枸杞干果甜菜碱含量的变化如图 7 所示。可见，超声波技术能够最大程度保留枸杞

真空干燥试验，不仅能改善枸杞干果品质，还能缩短干燥时间。同时可见，超声频率为 60 kHz、超声功率为 60 W、超声处理时间为 30 min 时，枸杞的总黄酮含量 (1.219 mg/g) 稍有上升，这是因为超声波技术使枸杞的细胞壁破碎，促使更多的黄酮类化合物溶解于提取剂，增加了枸杞内黄酮化合物的含量^[22]。并且当超声频率为 40 kHz、超声功率为 80 W、超声处理时间为 30 min 时，干燥后枸杞的总黄酮含量上升了 28.69%，这是因为枸杞内部的孔径增多，后期干燥时物料因吸收更多远红外线而使温度升高，高温和失水促使枸杞内合成更多的黄酮类化合物。

2.5.4 不同干燥条件对枸杞总酚含量的影响 枸杞的酚类化合物是一种重要的抗氧化剂，为探讨超声处理对其含量的影响，将超声处理后干燥的干果与远红外真空干燥的枸杞进行对比。不同超声处理条件下枸杞干果的总酚含量如图 9 所示。可见，单一远红外真空干燥技术所得物料的总酚含量 (6.678 mg/g) 与超声处理后进行干燥所得的干制品有较大

的差别。并且可知, 超声频率为 60 kHz (超声功率 60 W、超声处理时间 30 min), 超声功率为 50 W (超声频率 40 kHz、超声处理时间 30 min) 和超声处理时间为 20 min (超声频率 40 kHz、超声功率 60 W) 对应单因素试验所得枸杞干制品的总酚含量分别提高了 10.11%、7.6%和 8.5%, 这可能是因为该参数条件使枸杞内部的多酚氧化酶失活, 使枸杞在后期干燥过程中保留更多的多酚类物质^[23]。

2.5.5 不同干燥条件对枸杞抗氧化能力的影响 抗氧化能力是指通过酚类化合物等抗氧化剂提供氢供体或自由基受体来抑制氧化连锁反应, 枸杞中具有抗氧化的组分有多糖、类胡萝卜素、抗坏血酸、氨基酸和黄酮类等。本研究用 DPPH 评价枸杞的抗氧化能力, 为探讨超声处理对其抗氧化能力的影响,

将超声处理后干燥所得枸杞干果的抗氧化能力与远红外真空干燥的枸杞进行对比。不同超声处理条件下枸杞干果的抗氧化能力如图 10 所示。可知, 经超声处理后, 干燥所得枸杞的抗氧化能力部分稍高于未进行超声处理进行远红外真空干燥的枸杞 (31.357 mg/g), 其中超声频率为 40 kHz, 超声功率为 80 W 和超声处理时间为 25 min 对应单因素试验所得枸杞干制品的 DPPH 值分别提高了 6.43%、7.56%和 14.33%, 这是因为在对应的参数条件下进行超声处理后, 干燥对物料中具有 DPPH 自由基清除能力的物质影响较小, 因此超声所得的枸杞可以表达出更多的抗氧化能力^[24]。

2.6 超声预处理对枸杞微观结构的影响

为探究超声波和远红外真空技术对枸杞微观结

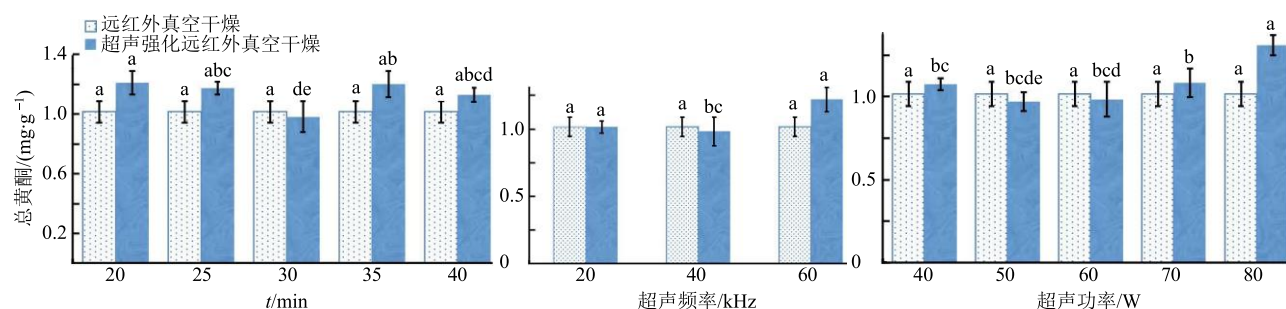


图 8 不同超声参数下枸杞总黄酮含量的变化

Fig. 8 Variation of total flavonoids in *L. barbarum* under different ultrasound parameters

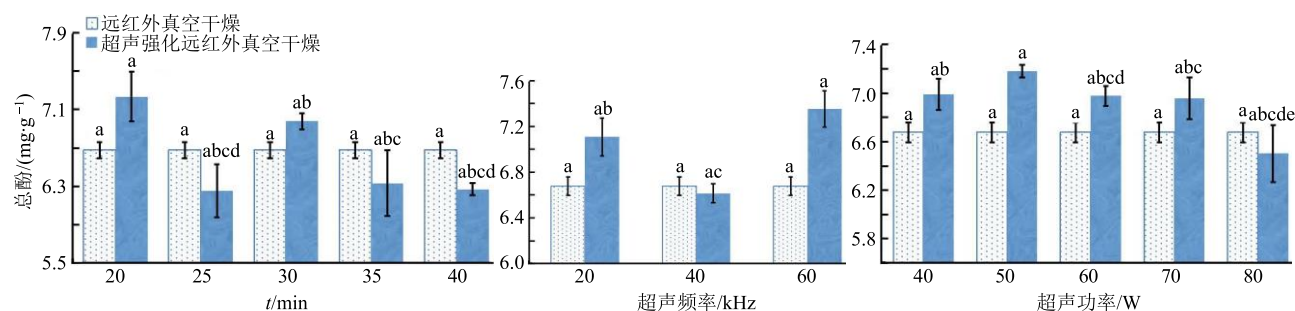


图 9 不同超声参数条件下枸杞总酚含量的变化

Fig. 9 Variation of total phenol content in *L. barbarum* under different ultrasound parameters

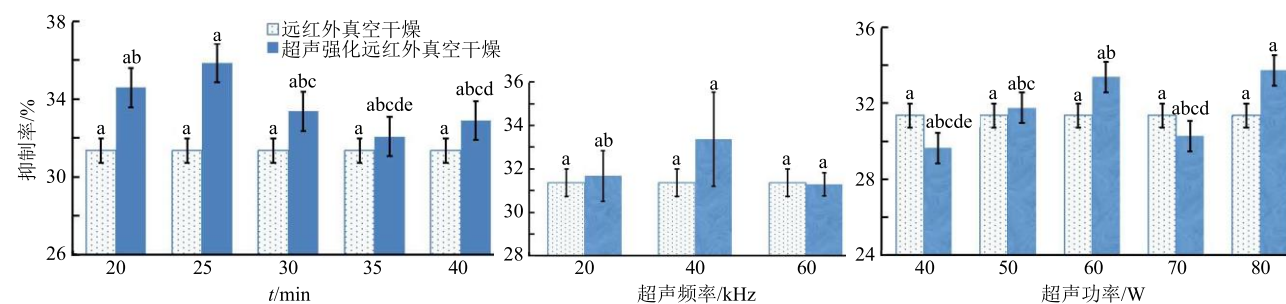
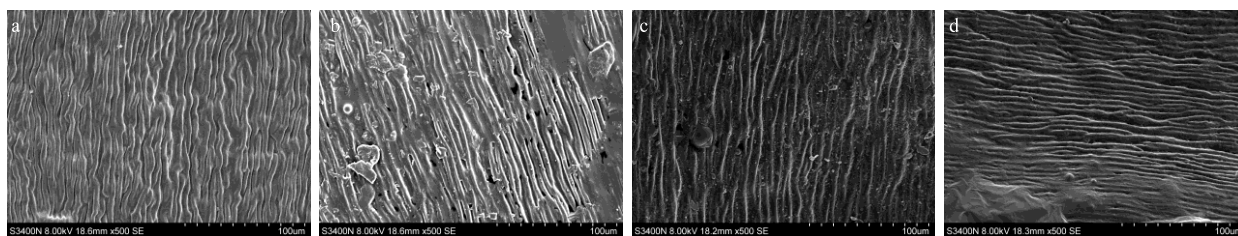


图 10 不同超声参数条件下枸杞抗氧化能力的变化

Fig. 10 Changes in antioxidant capacity of *L. barbarum* under different ultrasound parameters

构的影响,利用扫描电镜对其干制品表皮的微观结构进行了检测。不同处理条件下枸杞表皮的微观结构如图 11 所示。由图 11-a 与图 11-d 可知,表面细胞均排列整齐,并且发现图 11-d 中枸杞表皮细胞的微孔数量增加,这说明超声技术处理对枸杞的表皮细胞基本无破坏,还可增加物料后期的干燥速率,这是因为超声波技术的空化效应和机械效应对物料具有反复的冲击力,扩张了细胞间隙^[25],因此枸杞进行远红外真空干燥时能够吸收更多远红外的辐射能量,以促使更多的自由水转化为水蒸气,从而增加了枸杞内部的蒸汽压力,导致组织细胞快速的膨胀,增多表面微孔,缩短干燥时间。从图 11-a~c 可以直观地看出,自然晾晒对枸杞表面的微观结构

破坏较大,利用远红外真空干燥技术能够较好的保护枸杞表面的微观结构,这是由于新鲜枸杞表面的褶皱较多,在进行自然晾晒时,物料表面的自由水排除后不能均匀蒸发,对其表面会产生一定的烫伤,并且由于枸杞表面局部温度升高,会使物料产生美拉德反应,从而对其感官品质具有显著的影响(图 12-a)。而在进行远红外真空干燥过程中,物料内部由于蒸汽压力排出的水分能够及时由真空泵抽出,使枸杞表面受热均匀,无发黑现象(图 12-b)^[26]。因此,将超声波技术应用于枸杞干燥过程的前处理,不仅能强化物料的远红外真空干燥的热质传递过程,还能最大程度减少由于受热不均对物料表面造成的损伤,提高枸杞干制品的经济价值。



a-新鲜枸杞 b-自然晾晒 c-远红外真空干燥 d-超声+远红外真空干燥
a-fresh wolfberry b-air drying c-far infrared vacuum drying d-ultrasound + far infrared vacuum drying

图 11 不同干燥条件下枸杞的微观结构图

Fig. 11 Microstructure of *Lycium barbarum* under different drying conditions



a-自然晾晒 b-远红外真空干燥 c-超声+远红外真空干燥
a-air drying b-far infrared vacuum drying c-ultrasound + far infrared vacuum drying

图 12 不同干燥条件下枸杞的宏观结构图

Fig. 12 Macro structure of *L. barbarum* under different drying conditions

3 讨论

本实验以枸杞为实验材料,利用自主研发的远红外真空辐射干燥设备,探究了不同超声频率、超声功率和超声处理条件对其远红外真空干燥特性的影响规律。研究发现随着超声参数的增加,物料到达安全含水率的时间越短,干燥速率增加。这说明将超声波预处理技术应用于枸杞的远红外真空干燥,不仅有利于缩短干燥时间,还可以有效增加传

热传质速率。

利用 Weibull 分布函数模型对不同超声处理条件下枸杞的远红外真空干燥曲线进行拟合,求得决定系数 r^2 的区间为 0.993 9~0.999 2,离差平方和 χ^2 的区间为 0.000 1~0.000 6,尺度参数随着超声频率、超声功率和超声处理时间的增大总体呈现增加的趋势。通过对工艺参数进行验证试验,发现试验值和模拟值的一致性较好,表明 Weibull 模型能够

较好地模拟枸杞经超声处理后其远红外真空干燥过程中水分比的变化规律。

通过分析超声处理后干燥所得枸杞营养成分变化,结果表明,与远红外真空干燥技术所得枸杞相比,利用超声技术处理枸杞,对其多糖含量、甜菜碱含量、总黄酮含量、总酚含量和 DPPH 值均有较大的影响,其中超声频率为 40 kHz(超声功率 60 W、超声处理时间 30 min)对应单因素试验所得干制品的多糖(812.846 mg/g)最高;各个超声参数均能够显著保留枸杞干果的甜菜碱含量;超声功率为 80 W(超声频率为 40 kHz、超声处理时间 30 min)对应单因素试验所得枸杞干制品的总黄酮含量上升了 28.69%;超声频率为 60 kHz(超声功率 60 W、超声处理时间 30 min)对应单因素试验所得枸杞干制品的总酚含量提高了 10.11%;超声处理时间为 25 min(超声频率为 40 kHz、超声功率 60 W)对应单因素试验所得枸杞干制品的 DPPH 值提高了 14.33%。这说明超声波预处理技术不仅能缩短后期干燥的时间,还可以使物料积累更多的营养成分,改善枸杞干制品的品质。

通过比较不同处理条件下枸杞表皮的微观结构,发现自然晾晒对枸杞表皮细胞的损伤较大,破坏其平整度。同时发现利用超声波技术处理枸杞,不仅能增加其表面的微孔,还能缩短其后期的干燥时间,减少后期干燥处理对表皮细胞的损伤,改善干制品的品质,提高其经济价值。

参考文献

- [1] 滕园园,李菁,张崇燕,等.我国特色农产品枸杞标准体系现状研究[J].中国标准化,2019,537(1): 100-104.
- [2] 中国药典[S].一部.2015.
- [3] Yang J, Wei Y Q, Ding J B, et al. Research and application of *Lycii Fructus* in medicinal field [J]. *Chin Herb Med*, 2018, 10(4): 339-352.
- [4] Suna S. Effects of hot air, microwave and vacuum drying on drying characteristics and *in vitro* bioaccessibility of medlar fruit leather (Pestil) [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2019, 28(5): 1465-1474.
- [5] 刘伟东,顾欣,郭君钰,等.微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J].农业工程学报,2019,35(20): 296-302.
- [6] 蒋兰,杨毅,江荣高.枸杞的药理作用及其加工现状[J].食品工业科技,2018,39(14): 330-334.
- [7] 王鹤,慕松,吴俊,等.基于 Weibull 分布函数的枸杞微波干燥过程模拟及应用[J].现代食品科技,2018,34(1): 141-147.
- [8] 吴中华,李文丽,赵丽娟,等.枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J].农业工程学报,2015,31(11): 287-293.
- [9] 赵丽娟,王丹丹,李建国,等.枸杞真空远红外干燥特性及品质[J].天津科技大学学报,2017,32(5): 17-22.
- [10] 丁昌江,杨茂生.直流高压电场中枸杞的干燥特性与数学模型研究[J].农业机械学报,2017,48(6): 302-311.
- [11] 李武强,万芳新,吴劲锋,等.声学干燥在农产品加工中的应用现状[J].中国农机化学报,2019,40(5): 85-90.
- [12] 严小辉,余小林,胡卓炎,等.超声预处理对半干型荔枝干干燥时间的影响[J].农业工程学报,2011,27(3): 351-356.
- [13] 陈文敏,彭星星,马婷,等.超声处理对中短波红外干燥红枣时间及品质的影响[J].食品科学,2015,36(8): 74-80.
- [14] 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.
- [15] 万芳新,李武强,杜小龙,等.胡萝卜切片的超声强化远红外干燥特性及动力学模拟[J].中国农业大学学报,2019,24(8): 147-156.
- [16] 李武强,万芳新,罗燕,等.当归切片远红外干燥特性及动力学研究[J].中草药,2019,50(18): 4320-4328.
- [17] 葛莉,姚园园,康天兰,等.不同收获期贯叶连翘花中抗氧化能力、主要活性物质变化及挥发性组分分离鉴定[J].草业学报,2017,26(9): 66-74.
- [18] 宋慧慧,陈芹芹,毕金峰,等.干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响[J].食品科学,2018,39(15): 197-206.
- [19] 刘云宏,孙畅莹,曾雅.直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响[J].农业工程学报,2018,34(19): 284-292.
- [20] 李武强,万芳新,韦博,等.胡萝卜切片超声远红外干燥工艺的优化[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(2): 110-118.
- [21] 巨浩羽,赵士豪,赵海燕,等.基于 Weibull 分布函数的枸杞真空脉动干燥过程模拟及动力学研究[J].中草药,2018,49(22): 5313-5319.
- [22] 李朋亮.枸杞干制中黄酮类化合物变化规律及其抗氧化活性研究[D].银川:宁夏大学,2014.
- [23] 张霞,张芳,高晓娟,等.不同干燥方法对黑果枸杞中活性成分含量及其抗氧化活性的影响[J].中国中药杂志,2017,42(20): 3926-3931.
- [24] 宋慧慧.枸杞干燥与制粉技术及品质分析研究[D].北京:中国农业科学院,2018.
- [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.
- [26] 谢龙.枸杞真空脉动干燥特性及干燥品质的研究[D].北京:中国农业大学,2017.