

不同预处理方式对枸杞子远红外干燥特性和品质的影响

万芳新¹, 罗燕¹, 李武强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 缩短枸杞子干燥时间, 增加其货架期, 改善其干制品品质, 以为枸杞子干燥产业的发展提供技术支持。方法 以鲜枸杞子为试验材料, 采用渗透、超声、热烫、超声+渗透和超声+热烫方式对其进行预处理后, 进行远红外干燥试验, 研究不同预处理方式对枸杞子远红外干燥特性的影响规律, 并利用 Weibull 分布函数对其干燥过程进行拟合, 分析其干制品品质和微观结构的变化规律。结果 枸杞子经预处理后能显著减少干燥时间, 增加干燥速率, 其中与无预处理干燥相比, 热烫预处理后的干燥时间缩短了 27.5%, 并且其物料的水分比下降最快, 干燥速率最高; Weibull 分布函数能够较好地模拟不同预处理条件下枸杞子的远红外干燥过程, 其中决定系数 (r^2) 为 0.991 73~0.999 15, χ^2 值 (拟合程度的评价指标) 为 8.1341×10^{-5} ~ 8.84679×10^{-4} , 尺度参数 (α) 和形状参数 (β) 所描述的变化规律与干燥曲线中反映的一致; 超声+渗透后进行干燥所得干制品的色泽 (6.756 4) 与鲜样差别最小, 物料内部的多糖含量 (991.27 mg/g·DW, DW 表示物料干质量) 最高, 预处理可以明显减少干燥过程中物料的甜菜碱损失; 超声+渗透组对其表面的破坏最小, 所得干制品的微观结构空隙最多。结论 干燥前对枸杞子进行超声+渗透预处理, 不仅能缩短干燥时间, 还能改善其干制品品质。

关键词: 枸杞子; 不同预处理; 远红外; 干燥特性; 品质; 渗透; 超声; 热烫; Weibull 分布函数; 干燥速率; 尺度参数; 形状参数; 多糖; 甜菜碱

中图分类号: R283.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2020)16-4183-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2020.16.011

Effect of different pretreatment methods on far-infrared drying characteristics and polysaccharides of *Lycium barbarum*

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

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

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

Abstract: **Objective** To shorten the drying time of *Lycium barbarum*, increase its shelf life, improve the quality of dried *L. barbarum* products, and provide technical support for the development of wolfberry drying industry. **Methods** Using *L. barbarum* as experiment material, after being permeated, ultrasonic treating, blanching, ultrasonic treating + permeation and ultrasonic treating + blanching, far infrared drying test was carried out. The effects of different pretreatment methods on the far-infrared drying characteristics of *L. barbarum* were studied. Weibull distribution function was used to fit the drying process. The quality and microstructure of dried *L. barbarum* products were analyzed. **Results** After being pretreated, the drying time of *L. barbarum* was significantly reduced, the drying rate was increased; Compared with *L. barbarum* without pretreatment before pre-dried, drying time after blanching pretreatment shortened 27.5%, the moisture ratio of the material decreased fastest, and drying rate was the highest. Weibull distribution function can simulate the far infrared drying process of *L. barbarum* under different pretreatment conditions. The range of r^2 and χ^2 was 0.991 73—0.999 15 and 8.1341×10^{-5} — 8.84679×10^{-4} . The drying characteristics described by scale parameter (α) and shape parameter (β) were consistent with those in the drying characteristic curve. The dried product pretreated with ultrasound + permeation had the smallest color difference (6.756 4) compared with the fresh sample. The polysaccharide content inside the material (991.27 mg/g·DW) was the highest; The microstructure of the dry product obtained by the ultrasound + penetration

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 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, 女, 副教授, 研究方向为特色林果生产机械化和农产品加工技术与装备。Tel: 13893163871 E-mail: wanfx@gsau.edu.cn

*通信作者 黄晓鹏, 教授, 研究方向为农产品加工技术与装备。Tel: 13893159327 E-mail: huangxp@gsau.edu.cn

group had the most voids, and the drying treatment had the least damage to its surface. **Conclusion** Ultrasonic and osmotic pretreatment of *L. barbarum* before drying can not only shorten the drying time, but also improve the quality of its dried products.

Key words: *Lycium barbarum* L.; different pretreatment methods; far-infrared; drying characteristics; quality; penetration; ultrasound; blanching; Weibull distribution function; drying rate; scale parameter; shape parameter; polysaccharide; betaine

枸杞子 *Lycium barbarum* L. 为茄科枸杞属植物, 因棘如枸之刺, 茎似杞之条, 故名枸杞^[1]。《山海经》中记载: “其名曰芑, 其汁如血”, 说明枸杞子的价值等同于人的血液, 具有很高的药用价值^[2]。现代研究表明, 枸杞富含多糖等多种功能性化合物, 具有滋补肝肾、抗衰老、抗肿瘤和增强免疫等药理功能, 既可药用, 也可作为营养食品直接食用。成熟新鲜枸杞的含水率高达 80%, 常温放置容易腐败变质, 因此需采用适宜的干制手段延长其货架期。

目前枸杞子最常用的干燥方法主要有自然晾晒和热风干燥等。自然晾晒虽然操作简单, 但需要 4~5 d, 且易受天气影响; 热风干燥技术的设备结构简单、运行成本低, 但是其干燥时间高达 30 h, 所需时间较长, 并且与鲜样枸杞的颜色值相比, 干燥过程中的酶促褐变使所得产品的色差值增加, 美拉德反应使物料所含多糖的损失较大。近年来有学者研究了现代干燥方式对枸杞品质的影响, 并探讨了枸杞子的干燥工艺。李强等^[3]利用真空冷冻干燥技术加工枸杞, 发现所得枸杞干制品的色泽鲜红, 生物活性成分和营养成分保持良好, 但存在干燥设备昂贵和能耗高等不足。马林强等^[4]发现微波干燥技术可以大幅缩短枸杞的干燥周期, 但是由于鲜枸杞易糊化爆裂, 需要寻求更适宜的干燥工艺。吴海华等^[5]利用热风 and 微波真空组合干燥技术加工枸杞, 发现其能极大的缩短干燥时间, 生产效率高, 并且干制品多糖的损失小, 但由于物料特性复杂, 现处于探索阶段, 未能大规模应用。

远红外干燥技术是一种通过使物料内部化学键产生共振而进行加热的干燥方式。由于其传热传质方向一致, 因此干燥效率高, 干制品的质量好, 目前已经在当归^[6]、刺梨^[7]、胡萝卜^[8]、何首乌^[9]和杏鲍菇^[10]等物料的干燥中得到应用。此外, 已有研究表明, 干燥前进行预处理可以缩短干燥时间, 改善干制品品质。常见的预处理主要有超声波^[11]、热烫^[12-13]和渗透^[14-16]等。通过分析枸杞子的干燥方法和其干燥工艺的研究现状, 发现目前鲜有学者系统研究不同预处理方式对枸杞子远红外干燥特性及品质的影响。

干燥特性的数学模型均为经验模型, 适宜的模

型能够可靠地预测干燥过程, 其中 Weibull 分布函数已在干燥技术中得到了较广泛应用^[11,13,17-19]。本实验拟将不同预处理方式(超声、热烫、渗透、超声+热烫、超声+渗透)应用到枸杞子的远红外干燥过程, 研究其对枸杞子干燥特性的影响规律, 通过 Weibull 分布函数拟合物料的干燥过程, 同时分析不同预处理方式对枸杞子干制品品质的影响, 旨在寻求适宜的预处理方式, 以期对枸杞子的产后加工提供一定的理论与实践依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器与设备

YHG-300-S 型远红外快速恒温干燥箱, 上海博泰实验设备有限公司, 额定功率 1.6 kW; S-3400N 型扫描电子显微镜, 日本 Hitachi 公司; Agilent 1100 高效液相色谱仪, 美国安捷伦公司; 超声波清洗机, 昆山市超声仪器有限公司; JM-A 3003 型电子天平, 余姚纪铭称重校验设备有限公司; CR-410 型色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; TS-200 B 型台式恒温摇床, 上海锦玫仪器设备有限公司; 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。

1.2 材料与试剂

枸杞子的品种为宁杞 5 号, 购于甘肃省白银市靖远县东升镇新寨村, 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。当天采收运回后将其置于 4 ℃ 恒温恒湿箱保存备用。

蔗糖、苯酚, 上海沪试实验室器材股份有限公司; 浓硫酸、无水乙醇等化学试剂, 国药集团化学试剂有限公司。

2 方法与结果

2.1 干燥参数的计算

2.1.1 含水率的测定 称取 10 g 新鲜枸杞子, 将其平铺于 HKSF-2 型快速水分仪的料盘, 测得初始含水率为 79.2%。

2.1.2 干基含水率的计算 枸杞子干燥过程中的干基含水率用式(1)求得。

$$M_t = (m_t - m_g) / m_g \quad (1)$$

M_t 为枸杞子 t 时刻的干基含水率; m_t 为 t 时刻枸杞子的质量;

m_g 为枸杞子干物质的质量

2.1.3 水分比的计算 枸杞子干燥过程中的水分比由式 (2) 计算。

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (2)$$

M_0 、 M_e 、 M_t 分别为初始干基含水率、干燥至平衡时的干基含水率、 t 时刻物料的干基含水率

由于 M_e 远小于 M_0 和 M_t ，可近似为 0，因此式 (2) 可以改写成式 (3) [20]。

$$MR = M_t / M_0 \quad (3)$$

2.1.4 干燥速率 (V_R) 的计算 干燥过程中的 V_R 按式 (4) 计算 [21]。

$$V_R = (M_{t_1} - M_{t_2}) / (t_1 - t_2) \quad (4)$$

V_R 为干燥过程中枸杞子的干燥速率； t_1 、 t_2 分别为任意的干燥时刻； M_{t_1} 、 M_{t_2} 为 t_1 、 t_2 时刻枸杞子的干基含水率

2.1.5 模型分析 Weibull 分布函数的表达式如式 (5)。

$$MR = \exp[-(t/\alpha)^\beta] \quad (5)$$

α 为枸杞子干制过程中的速率常数； β 为枸杞子干制过程中与初始阶段传质速率有关的形状参数； t 为干燥时间

利用决定系数 (r^2) 和离差平方和 (χ^2) 检验 Weibull 分布函数的拟合度，其中 r^2 越接近 1、 χ^2 越小，数学模型的拟合度越高。

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^N (MR_{\exp,i} - MR_{\text{pre},i})^2 / \sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{\exp,i} - MR_{\text{pre},i})^2 \quad (6)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (MR_{\exp,i} - MR_{\text{pre},i})^2 / (N - n) \quad (7)$$

$MR_{\exp,i}$ 为任意时刻 i 的水分比； $MR_{\text{pre},i}$ 为任意时刻 i 预测的水分比； N 为试验数据的组数； n 为模型参数的个数

2.1.6 有效水分扩散系数 (calculated moisture diffusion coefficient, D_{eff}) 的计算 枸杞子干制过程中的 D_{eff} 可根据 Fick 第 2 扩散定律得到。其中以 $\ln MR$ 为纵坐标， t 为横坐标进行作图，直线斜率即为 D_{eff} ，计算公式见式 (8) [22]， D_{eff} 与 D_{cal} 之间的关系如式 (9) 所示。

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4r^2} t \quad (8)$$

$$D_{\text{cal}} = r^2 / \alpha \quad (9)$$

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{cal}} / R_g \quad (10)$$

D_{cal} 为干燥过程中估算的水分扩散系数； r 为枸杞子直径，取 $r = 0.0075 \text{ m}$ ； R_g 为与几何尺寸相关的参数

2.2 品质指标测定

2.2.1 色差的测定 取干燥后的枸杞子 5 g，将其磨

碎后利用色差仪测定色泽，每个样品测定 3 次，取平均值。计算公式如下 [23]。

$$\Delta E = [(L - L^*) + (a - a^*) + (b - b^*)]^2 \quad (11)$$

ΔE 表示总色差； L 、 a 、 b 分别表示枸杞子干样的明度值、红绿值、黄蓝值； L^* 、 a^* 、 b^* 分别表示鲜枸杞子的明度值、红绿值、黄蓝值

2.2.2 单位能耗的计算 单位能耗是指蒸发单位质量水分所消耗的电能，计算公式如下。

$$N = WT / G \quad (12)$$

N 表示干燥能耗； W 表示干燥箱的额定功率； T 表示总干燥时间； G 表示去除水分的质量

2.2.3 多糖含量的测定

(1) 提取液制备：准确称取不同预处理条件下的枸杞子干制品 2.00 g (误差 $< 0.01 \text{ g}$)，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、黑暗条件下 120 r/min 旋转振荡提取 4 d；然后在 4 °C、5 000 r/min 条件下离心 10 min，取上清液，用 70% 乙醇定容至 25 mL，将其保存在 4 °C 冰箱，用于多糖组分测定与分析。

(2) 测定步骤：以蔗糖为标准品标定，参考 Dubois 等 [24] 的测定方法，采用硫酸苯酚法。具体方法为吸取稀释 10 倍后的提取液 20 μL ，加入 9.0% 苯酚溶液 (现配现用) 1.0 mL，充分混合均匀后加入 3.0 mL 浓 H_2SO_4 ，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 次取平均值。

(3) 标准曲线的绘制：精确称取蔗糖 0.50 g，用蒸馏水溶解并定容至 50 mL，制得 1.0% 蔗糖母液；吸取 1.0% 蔗糖母液 0.5 mL，加入 50 mL 量瓶并用蒸馏水定容，制得 100 $\mu\text{g/mL}$ 蔗糖标准液。用移液枪分别吸取 0.05、0.10、0.20、0.40、0.60 mL 标准液加入至现配好的 1 mL 9.0% 苯酚溶液中，其他操作同多糖含量测定下的方法，以不加 100 $\mu\text{g/mL}$ 蔗糖标准液为空白对照，依次测定 A 值。以蔗糖的量为纵坐标， A 值为横坐标，绘制标准曲线，多糖标准曲线方程为 $C = 90.91 A - 3.55$ ， $r^2 = 0.9901$ 。从标准曲线上可得多糖质量浓度。

由多糖质量浓度和样品 A 值可得提取液中多糖的含量，其计算公式如下。

$$D = (CV_2) / (V_1 \times M) \quad (13)$$

D 为多糖含量； C 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 为枸杞子干制品重量

2.2.4 甜菜碱含量的测定 按照《中国药典》2015 年版第一部中甜菜碱的测定方法对枸杞子进行前处理, 利用薄层色谱法(通则 0502)对其含量进行测定^[25]。

2.3 预处理对枸杞子远红外干燥特性的影响

2.3.1 试验方法 通过前期预试验, 并参照刘春菊等^[26]、何正斌^[27]、马正强等^[28]、晏志云等^[29]试验方法, 确定预处理参数。首先挑选大小均匀、成熟饱满的枸杞子颗粒, 将干燥设备调整至预设参数(干燥温度 70 ℃、辐照高度 210 mm)进行预热; 然后称取 100 g 新鲜枸杞子, 在 0.4% Na₂CO₃ 溶液中浸泡 5 min 捞出, 用清水冲洗并沥干表面水分, 对其进行预处理(超声: 40 kHz, 60 W, 30 min; 渗透: 30%蔗糖溶液, 30 min; 热烫: 100 ℃蒸馏水, 2 min; 超声+热烫: 超声参数同上, 超声介质为 100 ℃蒸馏水; 超声+渗透: 超声参数同上, 超声介质为 30%蔗糖溶液); 最后将其置于远红外干燥箱内进行干燥处理, 每隔 60 min 将样品取出称定质量, 直至样品水分低于 13%时结束干燥, 每组实验重复 3 次, 取平均值作为结果。

2.3.2 不同预处理对枸杞子远红外干燥特性的影响 不同预处理条件下枸杞子的远红外干燥曲线见图 1。可以直观的看出, 随着干燥时间延长, 水分比曲线整体呈现下降的趋势, 这是因为预处理后物料内

部干燥介质的能量增加, 使自由水由内部向表面不断迁移, 并快速气化完成干燥过程; V_R 曲线的变化趋势分为 2 种, 一种是如热烫、超声、超声+热烫和纯远红外的升速-降速阶段, 一种是如渗透、超声+渗透的升速-恒速-降速阶段。可见, 渗透预处理后整个远红外干燥过程较缓慢, 耗时 13 h 才接近安全含水率。这是因为渗透预处理时溶剂中的蔗糖分子进入枸杞子表层细胞, 增加了物料内部多糖的浓度, 阻碍了自由水的扩散, 使物料在干燥过程中其内部的水分散失较慢, V_R 曲线较平缓。同时可知, 与渗透处理相比, 热烫和超声波预处理是一种较为强烈的热力物理作用^[30], 其中热烫处理可显著缩短枸杞子的干燥时间, 这是由于热烫介质使物料的表层细胞出现质壁分离现象, 加大了细胞壁的通透性, 从而干燥速率加快, 并且超声波的机械效应和空化效应均会使枸杞子表面产生微孔, 有助于物料内部的水分扩散过程。

2.4 Weibull 分布函数的拟合分析

表 1 是 Weibull 分布函数对不同预处理条件下枸杞子干燥过程的拟合结果。可以看出, r^2 的变化区间在 0.991 73~0.999 15, χ^2 在 $8.13\ 41 \times 10^{-5} \sim 8.846\ 79 \times 10^{-4}$, 拟合度较好, 这说明 Weibull 分布函数可以较好地拟合不同预处理条件下枸杞子的远红外干燥过程。

表 1 不同干燥条件下 Weibull 函数的模拟结果

Table 1 Weibull simulation results under different drying conditions

预处理方式	α/h	β	$\chi^2/(\times 10^{-4})$	r^2
渗透	4.985 61	1.270 86	5.094 17	0.994 63
超声	4.233 39	1.296 52	2.035 58	0.998 12
热烫	2.133 23	0.849 51	0.813 41	0.999 15
超声+渗透	3.888 07	1.352 48	2.023 34	0.998 25
超声+热烫	3.533 43	1.158 11	8.846 79	0.991 73
纯远红外	3.847 12	1.044 27	2.647 46	0.997 19

2.4.1 α 的影响因素 α 主要反映干燥过程完成 63.2%所需要的时间。从表 1 中可见, 预处理方式不同, 尺度参数的变化规律也不同, 这说明预处理方式对枸杞子干燥速率具有显著的影响。其中热烫预处理的 α 值最小, 渗透预处理的 α 值最大, 说明热烫预处理能够明显缩短后期的干燥时间, 而渗透预处理对后期干燥时间的影响较小, 结果与图 1-a 一致。

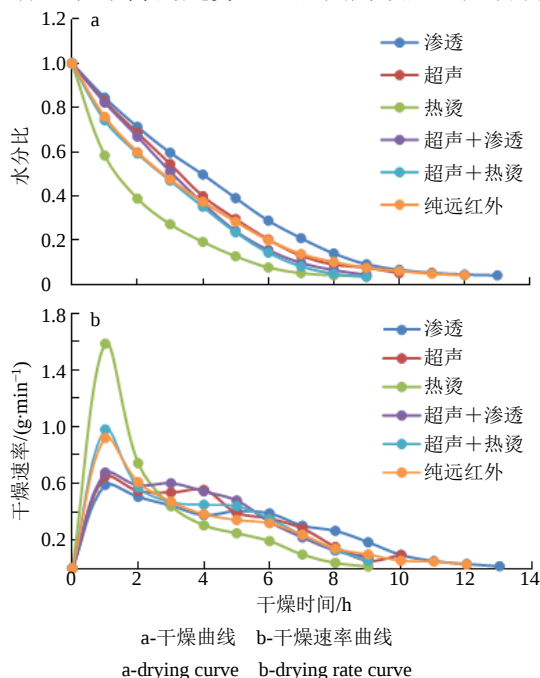


图 1 不同预处理下枸杞子远红外干燥曲线及干燥速率曲线
Fig. 1 Far infrared drying curve and drying rate curve of *L. barbarum* under different pretreatments

2.4.2 β 的影响因素 β 主要与初始阶段的传质速率有关。表 1 中热烫预处理的 β 值为 0.849 51, 在 0.3~1.0, 说明此时枸杞子的干燥过程主要由内部的水分扩散决定^[22]; 其他的几种预处理方式下的 β 值均在 1.158 11~1.352 48, 说明其余几种预处理条件使物料的干燥曲线存在延滞阶段, 结果与图 1-b 所描绘的结果一致。

2.5 D_{eff} 的分析

表 2 表示不同干燥条件下的 D_{eff} 。可见, D_{eff} 、 D_{cal} 和 R_g 反映了水分在枸杞子中的扩散规律以及传递速率的大小。

2.6 不同预处理下的干燥时间和能耗分析

不同预处理条件下枸杞子远红外干燥过程中干燥时间和能耗变化见表 3。由表 3 中数据可得, 超声+热烫、热烫、超声、超声+渗透均可以缩短枸杞子的远红外干燥时间, 分别比无预处理的远红外干燥到达安全含水率的时间缩短了 27.5%、20.8%、16%、15%, 能耗相应节约了 0.073、0.053、0.039、0.037 kW。同时发现, 超声+热烫处理后枸杞子远红外干燥过程的耗时最短, 节约能耗尤为明显, 其次是热烫预处理。而渗透预处理的干燥时间较长, 相比单纯远红外损耗了 8.7%的能耗。说明热烫和超

声预处理能有效节约能耗, 而单独的渗透预处理在节约能耗和缩短干燥时间方面并不占优势。

2.7 不同预处理下的枸杞子色泽分析

表 4 直观地反映了不同预处理条件下枸杞子远红外干制品 ΔE 的变化规律。可以看出, 无预处理远红外干燥条件所得干制品的 L^* 值普遍偏低, 这说明远红外辐射会使物料的色泽偏暗; 而不同预处理方式会明显增加枸杞子的 L^* 值; 5 种预处理方式中超声+热烫组的 b^* 值明显偏低, 这说明超声+热烫的组合预处理会使得枸杞子的色泽偏黄, 呈现出较好的外观; 同时发现, 超声+渗透预处理及自然晾晒所得干制品的色差较小, 其色泽最接近鲜样; 综合比较, 与枸杞子鲜样相比, 自然晾晒组的 ΔE^* 最小, 其次为超声+渗透组, 超声+热烫组的色泽变化 ΔE 最大。这说明自然晾晒组和超声+渗透组所得枸杞子色泽较好, 但由于自然晾晒的干燥周期较长, 受天气情况影响较大, 因而在色泽度上, 选用超声+渗透组作为枸杞子远红外干燥的预处理方式。

表 4 不同预处理下的色泽度

Table 4 Color degree under different pretreatment methods

预处理方式	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
渗透	38.566	37.678	20.396	7.346 7
超声	37.950	36.512	19.402	8.991 8
热烫	37.574	39.348	19.132	7.866 1
超声+渗透	39.700	38.354	20.588	6.756 4
超声+热烫	37.236	39.052	17.901	9.170 8
纯远红外	35.978	39.923	18.136	9.118 5
自然晾晒	40.216	44.970	21.358	5.851 9
鲜枸杞子	39.480	41.941	26.310	—

2.8 不同预处理对枸杞子多糖含量的影响

图 2 考察了 5 种不同预处理方式下枸杞子多糖含量的变化。可见, 与自然晾晒相比, 远红外干燥可显著提高物料的多糖保存率, 这是由于远红外干燥是内外同时进行加热, 其干燥耗时短, 大幅减少了干燥过程中多糖的损耗。超声+渗透预处理后进行干燥所得枸杞子的多糖含量高达 997.28 mg/g, 分别高出渗透、超声、热烫、超声+热烫组 14.7%、77.3%、39.5%、23.8%。这是由于渗透预处理时, 很多蔗糖小分子进入了物料内部, 增加了其多糖的浓度。并且超声预处理的机械效应和空化效应可以增加枸杞子表面的微孔, 为蔗糖小分子进入物料增

表 2 不同干燥条件下的 D_{eff}

Table 2 D_{eff} under different drying conditions

预处理方式	$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-5}$ $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	$D_{\text{cal}}/(\times 10^{-5}$ $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	R_g
渗透	0.521 24	1.128 25	2.164 53
超声	0.627 91	1.328 72	2.116 10
热烫	0.773 92	2.636 85	3.407 15
超声+渗透	0.736 71	1.446 73	1.963 78
超声+热烫	0.798 01	1.591 94	1.994 87
纯远红外	0.562 93	1.462 14	2.597 37

表 3 不同预处理下枸杞子远红外干燥能耗分析

Table 3 Energy consumption analysis of *L. barbarum* far-infrared drying under different pretreatments

预处理方式	干燥时间/h	能耗/kW
渗透	13.0	0.274 03
超声	10.0	0.212 86
热烫	9.5	0.199 45
超声+渗透	10.2	0.215 59
超声+热烫	8.7	0.178 64
纯远红外	18.0	0.252 12

添了通道,提升了枸杞子多糖的含量。但是与未进行预处理进行干燥所得干制品(793.84 mg/g)相比,发现超声预处理和热烫预处理所得枸杞子的多糖含量降低了 77.3%和 39.5%,这是因为预处理过程中枸杞子体内的多糖小分子扩散到外界溶剂中。

2.9 不同预处理对枸杞子甜菜碱含量的影响

图 3 表示不同预处理条件对枸杞子干制品甜菜碱含量的影响。从中可见,远红外干燥技术对物料药性成分的影响显著,这是因为在进行远红外干燥试验前对物料进行了碱液处理,破坏了枸杞子表面的蜡质层,减少了干燥时物料的热质传递阻力,并且由于远红外干燥为辐照传热,明显降低了枸杞子干制品甜菜碱含量的损失^[31]。同时发现不同预处理可以降低枸杞子干制品的甜菜碱的损失,这可能是由于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^[32]。

2.10 不同预处理条件下微观结构的分析

为考察不同预处理对枸杞子干制品微观组织结构的影响,本研究对比了不同处理条件所得干制品的 SEM 图。可以看出,纯远红外(图 4-f)干制品的孔隙组织边界清晰,组织细胞排列规则,形态结构完整,这是远红外干燥对枸杞子适用性的进一步验证;与未经预处理(图 4-f)的图像相比,渗透预

处理(图 4-a)的表组织平整,细胞形态结构未发生改变,对枸杞子的微观结构影响主要表现在表皮细胞外有一层胶状体,这是由于蔗糖分子吸附在表皮组织细胞上;热烫(图 4-c)后干燥所得干制品的孔隙均匀,表皮面光滑,但表皮细胞有破损状,说明热烫预处理会破坏细胞的生物膜结构,这与马正

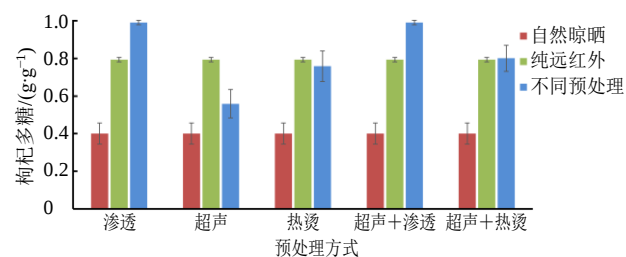


图 2 预处理方式对枸杞子多糖含量的影响

Fig. 2 Effects of pretreatment methods on content of *L. barbarum* polysaccharides

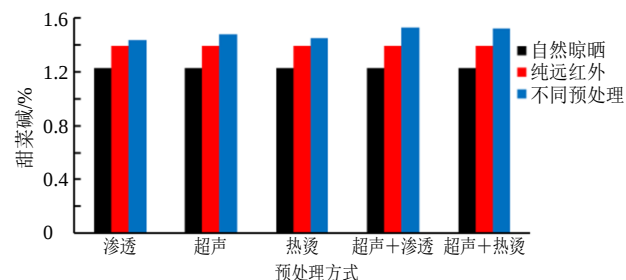
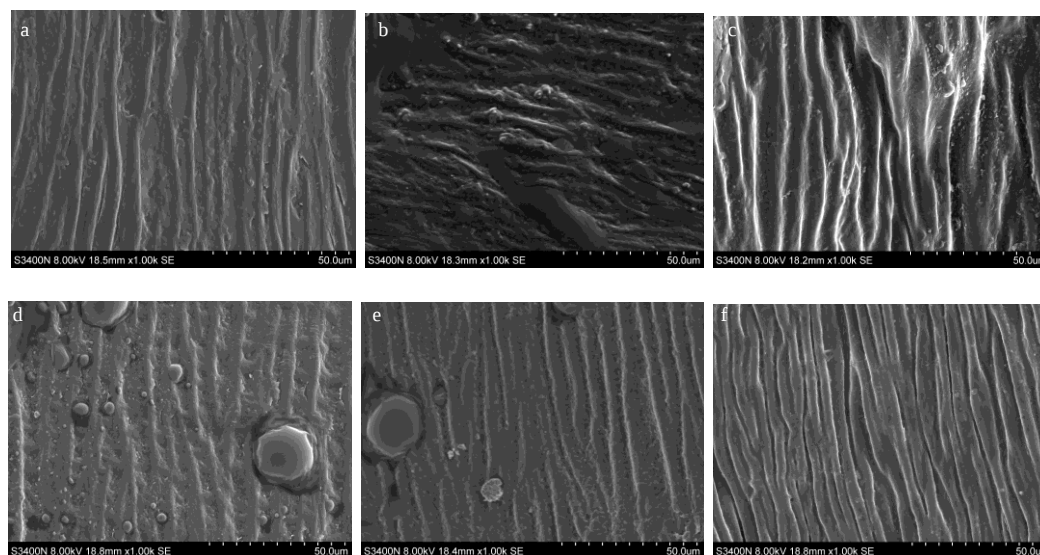


图 3 预处理条件对枸杞子甜菜碱含量的影响

Fig. 3 Effects of pretreatment conditions on betaine content in *L. barbarum*



a-渗透预处理 b-超声预处理 c-热烫预处理 d-超声+渗透 e-超声+热烫 f-纯远红外干燥
a-osmotic pretreatment b-ultrasound pretreatment c-blanching pretreatment d-ultrasound & penetration e-ultrasound & blanching f-pure far infrared drying

图 4 不同预处理方式下枸杞子的微观结构

Fig. 4 Microstructure of *L. barbarum* under different pretreatment methods

强等^[17]的研究结果类似；超声+热烫、超声+渗透组的表组织形态呈现类似状态，表组织细胞排列规整，但开始产生气泡和微孔，且超声+渗透组的微孔数量明显多于超声+热烫组。这主要是因为超声波空化效应和机械效应使得枸杞子表面形成大量微孔，微孔聚集便形成气泡，干燥过程中促使细胞内的自由水向外扩散，加快干燥速率。并且可见，超声+渗透（图 4-e）干制品的微孔数相对较少，这是由于一部分超声处理后形成的气泡和微孔在之后的热烫预处理过程中被高温反噬而破裂，均匀地平铺于表面，使得可见微孔数量减少，表面相对平整。

3 讨论

通过研究不同预处理条件下枸杞子的远红外干燥特性，探究枸杞子干制品多糖含量、色差和微观结构的影响规律。结果显示，热烫、超声、超声+热烫和纯远红外的干燥过程呈现先升速后降速的变化趋势，而渗透、超声+渗透的干燥过程有升速期、恒速期、降速期，表明热烫、超声预处理可加速枸杞子表层细胞自由水的扩散；渗透预处理使得枸杞子内部糖分增多，一定程度阻碍了自由水的迁移和扩散；超声+渗透预处理可以弥补渗透预处理的缺陷，同时缩短了干燥时间。

Weibull 分布函数模型能够较好地拟合枸杞子的远红外干燥过程，并且发现 r^2 的区间为 0.991 73~0.999 15， χ^2 的区间为 $8.13\ 41 \times 10^{-5} \sim 8.846\ 79 \times 10^{-4}$ ， α 和 β 所描述的变化规律与干燥特性曲线中的干燥特征一致。

ΔE^* 值反映了不同预处理条件下枸杞子色泽的变化指标， ΔE^* 越小表明物料色泽与鲜样的差别越小；能耗反映了不同预处理条件下得到枸杞子干制品所损耗的能量；多糖是枸杞子中最主要的营养成分，也是评价其干制品品质的重要指标。研究结果显示，超声+渗透预处理方式所得干制品的总色差 ΔE^* 值最小；与自然晾晒相比，预处理可以明显减少其干制品的甜菜碱含量；5 种预处理中，超声+渗透预处理条件所得枸杞子的多糖含量（991.27 mg/g）最高，比超声预处理所得干制品的多糖含量高 305.23 mg/g；综合色差和能耗分析，超声+渗透预处理能够较多地保留枸杞子所含的多糖。

通过比较不同预处理条件下干燥所得干制品的 SEM 图片，发现超声预处理条件下枸杞子表面有明显的微孔和气泡；热烫预处理条件下物料的表面光滑平整，但细胞组织有破损；渗透预处理对枸杞子

细胞组织的破坏较小，但过多的蔗糖分子会阻碍其内部细胞中自由水的扩散，超声+渗透预处理可以增加表面结构中的微孔数量，其既可以增加枸杞子内多糖的含量，还能促进物料内部自由水的迁移和扩散。

参考文献

- [1] Donno D, Beccaro G L, Mellano M G, *et al.* Goji berry fruit (*Lycium* spp.): Antioxidant compound fingerprint and bioactivity evaluation [J]. *J Funct Foods*, 2015, 20(18): 1070-1085.
- [2] 张琪, 赵宗阁, 叶晨, 等. 枸杞子粉碎前几种预处理方法的比较研究 [J]. *中草药*, 2018, 49(24): 5812-5816.
- [3] 李强, 唐虎利. 枸杞子冷冻干燥和热风干燥的品质比较 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(26): 14779-14780.
- [4] 马林强, 慕松, 李明滨, 等. 枸杞的微波干燥特性及其对品质的影响 [J]. *农机化研究*, 2015, 37(5): 208-211.
- [5] 吴海华, 韩清华, 杨炳南, 等. 枸杞热风微波真空组合干燥试验 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(S1): 178-181.
- [6] 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.
- [7] 陈思奇, 顾苑婷, 王霖岚, 等. 刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析 [J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 47-54.
- [8] 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.
- [9] 郭盛, 段金彪, 吴达维, 等. 干燥方法对何首乌块根中多元功效物质转化的影响 [J]. *中草药*, 2014, 45(4): 498-503.
- [10] 张苗青, 程菲儿, 常明昌, 等. 不同干燥方法对非硫护色后杏鲍菇干制产品质量的影响 [J]. *现代食品科技*, 2017, 33(12): 162-169.
- [11] 刘英. 胡萝卜远红外干燥特性及品质的研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [12] 毕秀芳, 谢玲, 刘晓翠, 等. 热烫处理对鲜切根茎菜品质的影响 [J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2019, 38(4): 45-49.
- [13] Vishal K, Manish K, Sanjay K. 热烫温度和时间对魔芋片干燥动力学和品质的影响 (摘选) [J]. *农业工程*, 2012, 2(4): 72-75.
- [14] Simal S, Deyá E, Frau M, *et al.* Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes [J]. *J Food Eng*, 1997, 33(1/2): 139-150.
- [15] Falade K O, Akinwale, T O, Adedokun O O. Effect of drying methods on osmotically dehydrated cashew apples

- [J]. *Eur Food Res Technol*, 2003, 216(6): 500-504.
- [16] Azarpazhooh E, Ramaswamy H S. Optimization of microwave-osmotic pretreatment of apples with subsequent air-drying for preparing high-quality dried product [J]. *Int J Micro Sci Technol*, 2011, 20(5): 1-12.
- [17] 李波, 王明伟, 强正泽, 等. 基于低温与回潮条件的当归干燥 Weibull 函数模拟及其干燥特性研究 [J]. *中草药*, 2019, 50(13): 3052-3057.
- [18] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages [J]. *J Food Process Preserv*, 2010, 34(6): 993-1008.
- [19] 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.
- [20] Krishnamurthy K, Khuranah K, Soojin J, et al. Infrared heating in food processing: An overview [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2008, 7(1): 2-13.
- [21] Xiao H, Gao Z, Lin H, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes [J]. *J Food Process Eng*, 2010, 33(4): 646-665.
- [22] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析 [J]. *中国食品学报*, 2018, 18(3): 114-124.
- [23] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 不同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*, 2017, 39(15): 197-206.
- [24] Du B, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Anal Chem*, 1956, 28(3): 350-356.
- [25] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [26] 刘春菊, 王海鸥, 牛丽影, 等. 蔗糖调控对气流膨化黄桃片微观结构及品质的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 38(9): 1-12.
- [27] 何正斌. 木材超声波-真空协同干燥热质传递规律研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [28] 马正强, 崔灵绸, 张贝贝, 等. 热烫处理对香椿叶绿素及颜色的影响 [J]. *中国食品学报*, 2017, 17(1): 179-185.
- [29] 晏志云, 赵谋明, 彭志英, 等. 干制和保藏过程中枸杞 β -胡萝卜素保存率的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 1998, 24(4): 35-49.
- [30] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同护色预处理对牛蒡片真空冷冻干燥特性的影响 [J]. *食品科学*, 2017, 38(1): 86-91.
- [31] 艾百拉·热合曼, 王璇, 赵亮, 等. 干燥方法对枸杞营养和功能成分的影响 [J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 138-142.
- [32] 赵丹丹. 枸杞加工特性及热泵干燥系统理论分析与应用研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2016.