

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.055

枸杞热泵干燥室系统设计与应用

赵丹丹¹ 彭郁² 李茉² 倪元颖²

(1. 河北科技大学生物科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据枸杞热风干燥失水规律, 设计了满足干燥 1 t 枸杞鲜果的热泵干燥室, 并对热泵干燥室进行应用试验。本批次干燥量为 1 000 kg 鲜枸杞, 结果表明: 热泵干燥系统供热充裕, 升温灵敏, 温湿度控制精准, 能够满足枸杞干燥工艺的需求, 压缩机的蒸发温度、冷凝温度均在其正常工作范围内; 比较了干燥室内不同位置的枸杞间的品质, 并与同批次燃煤干燥室产品进行对比, 表明热泵干燥室后部枸杞总酚、总黄酮、·DPPH 清除率、铁离子还原能力均显著高于燃煤干燥枸杞, 前部枸杞总酚、总黄酮、·DPPH 清除率、铁离子还原能力与其相当, 且热泵干燥枸杞总胡萝卜素含量均显著高于燃煤干燥枸杞; 本批次干燥总耗电为 416 kW·h, 单位能耗除湿量为 1.57 kg/(kW·h), 总费用为 208 元, 按照干果干燥量核算成本为 0.81 元/kg, 相对于燃煤干燥成本降低了 19%。

关键词: 枸杞; 热泵干燥; 能耗; 试验

中图分类号: S226.6; TK173 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)S0-0359-07

Design and Application of Wolfberry Heat Pump Drying System

Zhao Dandan¹ Peng Yu² Li Mo² Ni Yuanying²

(1. College of Bioscience and Bioengineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China

2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the former research on heat pump drying characteristics of wolfberry, a large heat pump drying room was designed and established, and then 1 000 kg of wolfberry fruit was dried. The result showed that the heat pump drying room could supply abundant heat and control temperature and humidity precisely, which could meet the needs of wolfberry drying process. During the drying process, the temperature was gradually increased and humidity was decreased, it was reasonable to set 1.0 as a turning point at the drying stage, namely the moisture content could be detected when temperature was risen to 52°C, if the moisture content on dry basis was higher than 1.0, the set temperature should be maintained, if the moisture content was arrived at or below 1.0, the temperature could continue to be risen, the highest temperature was not higher than 64°C. The quality of dried wolfberry in different positions of heat pump drying room was measured, which showed that the total phenol content was between (5.92 ± 0.3) mg/g and (8.12 ± 0.18) mg/g, the total ketone content was between (70.99 ± 1.68) mg/g and (113.88 ± 0.26) mg/g, the total phenol content and total ketone content of the samples in the back of the room were significantly higher than those in the front. From the point of antioxidant properties, samples in the back of the room had higher ·DPPH scavenging activity and ferric ion reducing antioxidant power than those in the front. Compared with the wolfberry dried in the coal chamber, samples dried by heat pump drying room had higher overall quality (total phenol, total ketone, ·DPPH clearance, iron ion reduction ability), and the drying time was reduced by 20% and drying costs was reduced by 19%, hence heat pump drying process was reasonable and heat pump drying room could be applied to production practice.

Key words: wolfberry; heat pump drying; energy consumption; experiment

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-21

基金项目: 公益性行业科研专项经费项目(201501342)和枸杞新型制干与保鲜技术研发及示范项目(ZNNFKJ2015-03)

作者简介: 赵丹丹(1989—), 女, 博士, 主要从事果蔬加工研究, E-mail: zdd6364@126.com

通信作者: 倪元颖(1960—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事果蔬加工研究, E-mail: niyuany@163.com

引言

枸杞是宁夏的特色农林产品,种植历史悠久,品种丰富、技术成熟、品质上佳、地域与品牌优势明显^[1]。2015年,宁夏枸杞种植面积达5.8万hm²,年产干果13万t,产值50亿元,是宁夏重要的经济支柱产业之一。随着枸杞精深加工和产品多元化的发展,枸杞干制作为枸杞加工重要的环节,对于产后减损和绿色供应有着重要的意义。传统的枸杞干燥方法中,存在干燥参数难以精准控制,产品品质差,污染严重等问题^[2]。而微波干燥、真空干燥以及太阳能热风联合干燥等方法,成本过高,难以产业化发展。热泵干燥具有节能、产品品质高、环境友好、应用范围较广等优点,已成功应用于粮食种子、中药材、烟草和果蔬等干燥作业当中^[3-6]。

本文在前期优化枸杞热泵干制工艺的基础上,设计大型热泵干燥室,将热泵干制工艺应用于大型热泵干燥室,对枸杞干燥过程热泵系统运行状况、枸杞干燥特性、产品品质及整体能耗进行评价和分析,为枸杞热泵干燥产业化应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 枸杞热泵干燥室设计

根据前期小型热泵干燥枸杞干燥特性研究,从干燥速率和干燥时间来看,后期干燥阶段可分为2段,即快速干燥阶段和慢速干燥阶段,而慢速干燥阶段(即干基含水率在0.5~1.0之间)时间占了总共干燥时长的47.05%~55.56%,在设计大型热泵干燥室(干燥量1000kg枸杞鲜果)时,采用快速干燥阶段平均除湿量进行热量核算,通过对前期9组正交试验快速干燥阶段进行平均失水百分比速率计算,得到干燥1000kg鲜枸杞(按含水率80%计算)平均失水速率范围为39.71~45.60kg/h,故取45.60kg/h,计算方法^[7]如下:

枸杞水分蒸发所需热量 Q_w 计算式为

$$Q_w = G_w \gamma = \frac{45.6 \times 2400}{3600} = 30.4 \text{ kW} \quad (1)$$

式中 G_w ——失水速率,kg/h

γ ——水分平均气化潜热,kJ/kg

干燥期间大气平均干球温度 $t_a = 15^\circ\text{C}$,相对湿度 $\varphi = 30\%$,在最大排湿阶段的排湿空气的温度取 $t_w = 45^\circ\text{C}$,相对湿度40%,新风量 G_d 计算式为

$$G_d = \frac{G_w}{d_w - d_a} = \frac{45.6}{0.033 - 0.002} = 1470 \text{ kg/h} \quad (2)$$

式中 d_a ——新风的含湿量,kg/kg

d_w ——排湿空气的含湿量,kg/kg

加热空气所需热量 Q_a 计算式为

$$Q_a = c_p G_d (T_w - T_a) = \frac{1.1 \times 1470 \times (50 - 15)}{3600} = 15.72 \text{ kW} \quad (3)$$

式中 c_p ——空气的定压比热容,取1.1kJ/(kg·K)

T_w ——最大排湿阶段的排湿空气温度, $^\circ\text{C}$

T_a ——干燥期间大气平均干球温度, $^\circ\text{C}$

加热物料所需热量 Q_j 为

$$Q_j = c_p G_w (T_w - T_a) = \frac{4.2 \times 45.6 \times (50 - 15)}{3600} = 1.8 \text{ kW} \quad (4)$$

维护结构散热 Q_h ,包括聚氨酯维护结构散热和地面散热,取3kW,则热泵需要提供的总热量 Q_c 计算公式为

$$Q_c = Q_w + Q_a + Q_j = 47.92 \text{ kW} \quad (5)$$

此环境温度、干燥温度下YW132型压缩机热量约为12.5kW,需要4台,即2台主机组,具体参数如表1所示。干燥室内布置3行2列共6车;干燥室内风道采用平送风、顶部回风方式,为保证送风均匀性,布置2个循环风机,工程图与实物图如图1所示。

表1 热泵干燥室选型参数

Tab.1 Parameters of heat pump drying room

参数	数值
干燥室内尺寸/(m×m×m)	5×3.2×2.6
热泵主机型号(数量/台)	FWR-16×2/Z(2)
干燥室内最高干燥温度/ $^\circ\text{C}$	75
热泵主机运行安静温度范围/ $^\circ\text{C}$	10~45
额定电压/V	380
额定制热量/kW	64
额定输入功率/kW	27
制冷剂名称(注入量/kg)	R134a(19.2)
循环风机型号(数量/台)	GKF/7-4(2)
单个循环风机风量/(m ³ ·h ⁻¹)	18000
单个循环风机功率/kW	2.2
单个循环风机全压/Pa	230

1.2 试验材料

干燥试验在宁夏中宁县大地生态枸杞基地进行,试验所用原料为宁杞7号,选用此基地新鲜枸杞,湿基含水率为(78.95±2.05)%,试验前枸杞置于4 $^\circ\text{C}$ 冷库不超过2d。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理

取新鲜枸杞1000kg,分批次用清水清洗,然后在25 $^\circ\text{C}$ 下,用3%Na₂CO₃溶液浸泡60s(工业生产常用碱液质量分数为3%),平均分散平铺在6列干燥室内小车上,每个小车上下共12层,每层2m×1m,平均装载量为6.94kg/m³。

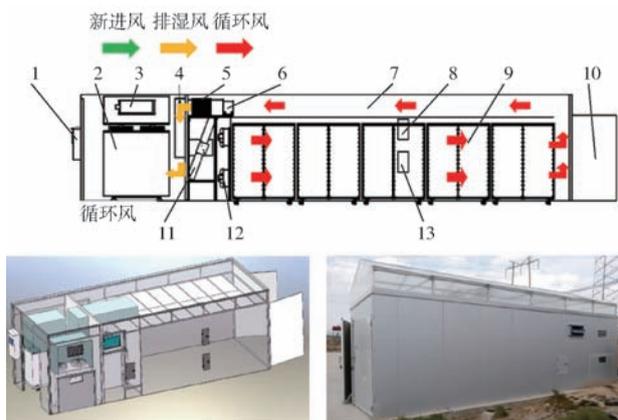


图1 热泵干燥室工程图与实物图

Fig. 1 Pictures of heat pump drying room

1. 控制柜 2. 主机组 3. 风门 4. 排湿风道 5. 换热器 6. 排湿风机 7. 回风道 8. 观察窗 9. 干燥小车 10. 大门 11. 冷凝器 12. 循环风机 13. 摸料窗

1.3.2 测定方法

(1) 干燥动力曲线

在干燥过程中,枸杞的干基含水率和水分比计算公式为

$$M_t = m_1 / m_2 \quad (6)$$

$$M_r = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (7)$$

式中 M_t —— t 时刻的干基含水率

M_r ——水分比

M_0 ——初始时刻的干基含水率

M_e ——物料的平衡含水率

m_1 ——湿物料中水分的质量

m_2 ——湿物料中绝对干料质量

相对于 M_0 而言, M_e 可以忽略不计^[8-9], 所以, 式(7)可以简化为

$$M_r = M_t / M_0 \quad (8)$$

干燥速率计算公式为

$$D_t = \Delta M_t / T_t \quad (9)$$

式中 D_t ——干燥速率, $g / (g \cdot h)$

ΔM_t ——第 t 个时间段内失水量, g/g

T_t ——第 t 个时间段的时间, h

(2) 干燥模型——Weibull 分布函数

Weibull 分布函数^[10]表示为

$$M_r = \exp \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right) \quad (10)$$

式中 α ——枸杞干燥过程中的速率常数, h

β ——形状参数

该值与物料在干燥过程中开始阶段的传质速率有关,其值越小表示开始的干燥速率越大。

(3) 总酚含量的测定

总酚的提取:准确称取枸杞干制品粉末 1.0 g, 置于 50 mL 离心管中,加入 80% 甲醇水溶液 25 mL,

30℃ 下超声提取 30 min, 4℃ 10 000 g 离心 10 min, 收集上清液,滤渣重复提取 2 次,合并上清液,用 80% 甲醇定容至 100 mL。

总酚的测定:采用 Folin - Ciocalteu 比色法^[11]。准确取各提取液 0.8 mL, 分别加入稀释 10 倍的 Folin 酚试剂 4.0 mL, 混匀,加入质量分数为 10% 的 Na_2CO_3 溶液 6.0 mL, 混合均匀。常温下避光反应 2 h 后,以 80% 甲醇做空白对照,于 765 nm 波长处测定其吸光度。

以没食子酸绘制标准曲线,计算样品中的总酚含量,结果以 1 g 干制样品中含有相当没食子酸的毫克数表示(单位:mg/g)。

(4) 总黄酮含量的测定

总黄酮提取:同总酚提取方法。

总黄酮的测定:采用 $\text{NaNO}_2 - \text{Al}(\text{NO}_3)_3 - \text{NaOH}$ 方法测定^[11]:取 4 mL 提取液转至 10 mL 离心管,加入 0.4 mL 5% NaNO_2 溶液,摇匀,常温下反应 6 min,加入 0.4 mL 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液,常温下反应 6 min,加入 4% NaOH 溶液 4 mL,常温下反应 15 min,蒸馏水定容至 10 mL。以 80% 甲醇为对照,测定在 510 nm 处的吸光度。以芦丁为标准物质,绘制标准曲线,样品中的总黄酮含量以 1 g 枸杞干制品相当于含芦丁的毫克数(单位:mg/g)。

(5) 抗氧化性(\cdot DPPH 清除能力和铁离子还原能力)的测定

\cdot DPPH 清除能力测定^[12]:准确称取 0.04 g \cdot DPPH 用 80% 甲醇定容到 1 000 mL,即浓度为 0.01 mmol/L。采用分光光度计进行样品测定,取 400 μL 的提取液加入 7 mL \cdot DPPH 溶液,混匀后于室温下避光静置 30 min,测定其在 517 nm 处的吸光度。以 400 μL 的 80% 甲醇与 7 mL \cdot DPPH 溶液反应做对照。清除率计算公式为

$$I = (A_1 - A_2) / A_1 \times 100\% \quad (11)$$

式中 I ——清除率, %

A_1 ——对照样的吸光度

A_2 ——待测样的吸光度

采用 80% 甲醇配制不同浓度的 Trolox 标准溶液,绘制标准曲线。样品中清除 \cdot DPPH 的能力以每 1 g 干制品中相当 Trolox 的毫克数表示(单位:mg/g)。

铁离子还原(Ferric reducing ability of power, FRAP)能力的测定参照 ALJADI 等^[13]的研究方法,采用铁离子还原法(FRAP)测定样品的铁还原能力,并略作修改。其基本原理是: Fe^{3+} -三吡啶-三吡啶(TPTZ)可被试样中还原物质还原为 Fe^{2+} 而呈现蓝色,并于 593 nm 处有最大吸收值,根据吸光度,计算出试样抗氧化活性的强弱。以维生素 C 标准溶

液 100 μL 与 4 mL TPTZ 工作液在相同条件下反应,测定 593 nm 处的吸光度,绘制标准曲线,样品中 FRAP 值以每 1 g 干制品中相当维生素 C 的毫克数表示(单位:mg/g)。

(6) 总类胡萝卜素的测定

取冻干枸杞粉 1 g,加入 30 mL 丙酮(0.1% BHT)中,超声(360 W)提取 15 min,重复 2 次合并提取液,并定容至 100 mL。取 50 mL 提取液,不需要皂化,于旋转蒸发器上在 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下蒸至近干,用正己烷溶解残渣并转移至 10 mL 容量瓶中定容。剩余 50 mL 提取液需要皂化:将 50 mL 10% KOH 甲醇溶液加入到剩余 50 mL 提取溶液中,混匀,25 $^\circ\text{C}$ 条件下震荡 24 h,避光,将皂化液移入 250 mL 分液漏斗,加入 100 mL 的石油醚震荡 1 min 萃取后静置分层,水相按上述方法再提取 1 次,合并有机相,用水洗至近中性。有机相经过加有无水硫酸钠的砂芯漏斗过滤脱水,滤液收入 250 mL 烧瓶中,于旋转蒸发器上在 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的条件下蒸至近干,用正己烷溶解残渣并转移至 10 mL 容量瓶中定容,溶液用于总胡萝卜素的测定。准确称取 β -胡萝卜素 10 mg 用正己烷溶解定容到 100 mL 的棕色容量瓶中,作为母液备用。以 β -胡萝卜素标准溶液,用分光光度计测定在 450 nm 下样品的吸

光度,绘制标准曲线,样品中总类胡萝卜素含量以每 1 g 干制品中相当 β -胡萝卜素的毫克数表示(单位:mg/g)。

(7) 感官评定方法

选取本实验室 15 位嗅觉灵敏、对枸杞干制品无特别喜好和厌恶的感官评定人员对干燥后枸杞进行感官评定,综合考虑枸杞干制品的外观(形状、表面糖分溢出情况和色泽)以及口感为指标,满分 100 分,采用平均法计分,如表 2 为具体的感官评分标准。

(8) 热泵干燥系统的单位能耗除湿量

用单位能耗除湿量表示反映热泵干燥系统综合性能的指标^[14],计算公式为

$$S_{mer} = \frac{M_{de}}{W_{tot}} = \frac{G_w}{P} \quad (12)$$

式中 S_{mer} ——单位能耗除湿量,kg/(kW·h)

M_{de} ——从干燥物料中除去的水分质量,kg

W_{tot} ——总耗电量,kW·h

P ——系统功率,kW

(9) 数据分析

采用 Origin 8.0 软件进行数据处理及相关性。所有试验均重复 3 次,试验过程测定的结果以平均值 \pm 标准偏差表示。

表 2 枸杞干制品的感官评分标准

Tab.2 Sensory score criteria of dried wolfberry

指标及总分	评分标准	分数
形状 20	整体呈类纺锤形,略扁、皱缩均匀、饱满	15~20
	整体呈类纺锤形、皱缩不均,纹理较为明显	10~15
	整体果粒变形明显,皱缩非常不均	0~10
外观 60	无糖分溢出	9~10
	少许果粒糖分溢出	5~9
	果粒糖分溢出明显	0~5
色泽 30	果皮鲜红、呈紫红色枣红色;有光泽	25~30
	果皮暗红、局部略微褐变	15~25
	褐变严重、出现焦糊	0~15
口感 40	肉厚、甘甜	30~40
	整体甘甜,略有苦味	20~30
	焦糖味道较为明显,酸味、苦味、涩味明显	0~20

2 结果与讨论

2.1 干燥室干燥系统性能

2.1.1 干燥室内温湿度

本次枸杞干燥共用时 32 h,干燥工艺按照前期小型热泵干燥枸杞干燥特性研究所得最佳工艺,并稍作改进,具体工艺操作为:干燥前期以每 2 h 为一段,在第 1 个小时以线性速度升高 3 $^\circ\text{C}$,然后保持温度 1 h,当设定温度到达 52 $^\circ\text{C}$ 后,通过摸料窗对枸杞

称量,同时计算干基含水率,当干基含水率到达 1.0 时,再继续升高温度,在本次干燥过程当中,52 $^\circ\text{C}$ 恒温段维持了 6 h,当干基含水率到达 1.0 时,整个干燥过程经过了 16 h,后期干燥以 4 h 为一个阶段,在第 1 个小时使温度以线性速度升高 4 $^\circ\text{C}$,维持 3 h,最高温度设定为 64 $^\circ\text{C}$ (图 2)。设定温湿度工艺参数为:40 $^\circ\text{C}$ (60%)、43 $^\circ\text{C}$ (55%)、46 $^\circ\text{C}$ (50%)、49 $^\circ\text{C}$ (45%)、52 $^\circ\text{C}$ (40%)、56 $^\circ\text{C}$ (35%)、60 $^\circ\text{C}$ (30%、25%)、62 $^\circ\text{C}$ (25%、20%)、64 $^\circ\text{C}$ (15%、10%)。

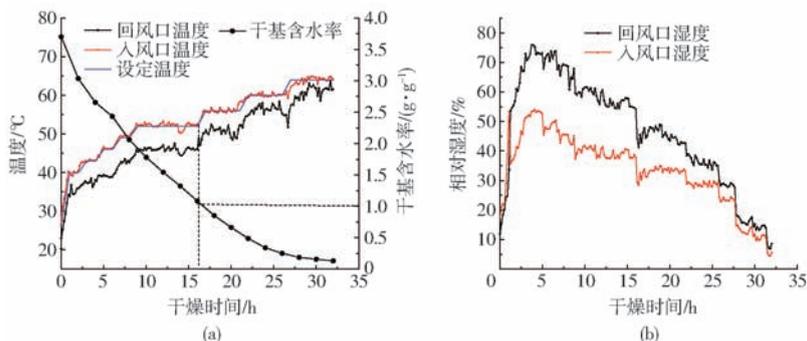


图2 干燥室内入风口、回风口温湿度

Fig.2 Temperature and humidity of inlet and outlet in heat pump drying room

由图2a可以看出,比较实际温度与设定曲线值,整个干燥过程热泵按照设定的干燥曲线运行,温度的偏移量在 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$,说明温度控制精确,进风口温度有回风口温度相差在 5°C 以内,当干燥时间大于16 h之后,即干基含水率小于1.0之后,进风口与回风口温度相差越来越小。由图2b可以看出,与温度变化趋势相一致,随着干燥进行,进风口与回风口湿度相差越来越小。

如图3所示,通过比较干燥室内前后不同位置

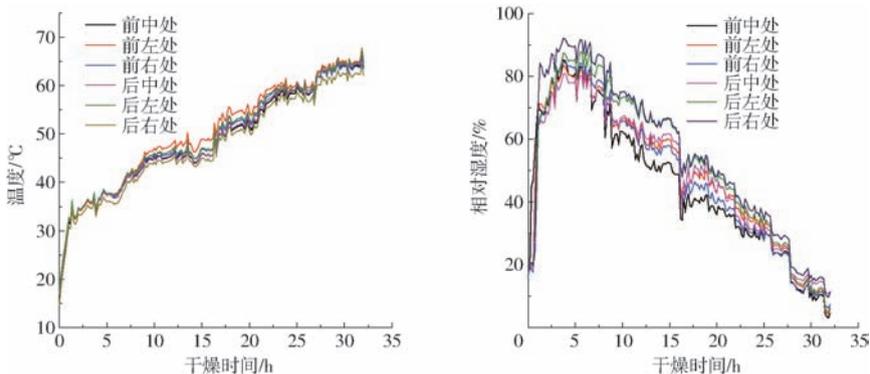


图3 干燥室内前、后部温度、湿度分布

Fig.3 Temperature and humidity distributions of back and front in heat pump drying room

2.1.2 系统耗电情况及能耗分析

干燥过程中的主要用电设备为压缩机、蒸发器侧风机和冷凝器侧风机,其中压缩机和蒸发器风机联动,冷凝器侧风机在干燥过程中一直运转。图4为热泵干燥系统在干燥过程中每小时耗电量及系统总耗电量随干燥时间的变化关系,耗电量等于间隔为1 h的电表值之差,干燥按照图2所示的设定温湿度曲线进行,平均耗电量从4 h之后快速上升,在8~16 h之间耗电量较大,16 h之后,耗电量降低。这是因为,刚开始时,设定相对湿度较高,温度较低,所以耗电量较小,而随着温度增高,排湿速率加快,设定湿度降低,系统内部有大量新风的引入,而增加了热泵的负荷,系统耗电量明显增大,最大值达到16.38 kW,当干燥时间为16 h时,此时干基含水率为1.0,整个干燥过程进入到快速降速干燥阶段,新

风引入减少,系统耗电量相对较低。

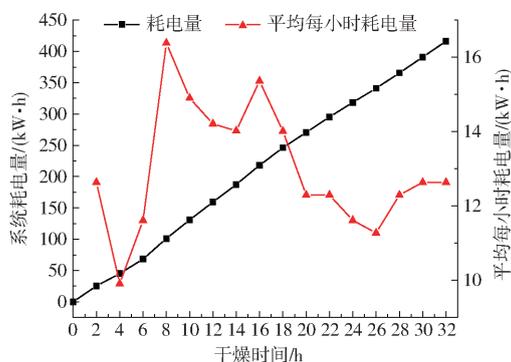


图4 干燥室内耗电情况

Fig.4 Energy consumption in heat pump drying room

本批次干燥量为1 000 kg鲜枸杞,除水量745 kg,得到干果质量为255 kg,系统总耗电为416 kW·h,所以单位能耗除湿量为 $1.57 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。工业用

电按照每度电 0.5 元计算,总费用为 208 元,核算干燥成本为 0.81 元/kg (以干果质量计)。而中宁县当地企业采用燃煤干燥室,每干燥鲜果 1 000 kg,平均需要消耗 300 kg 煤,费用为 255 元,按照干果干燥量核算成本为 1.00 元/kg。相对于燃煤干燥,采用热泵系统干燥成本降低了 0.19 元/kg。

2.1.3 压缩机工作性能

蒸发温度和冷凝温度是衡量压缩机能力的一个重要指标,整个干燥过程中蒸发温度、冷凝温度及主机室温度的变化关系如图 5 所示。

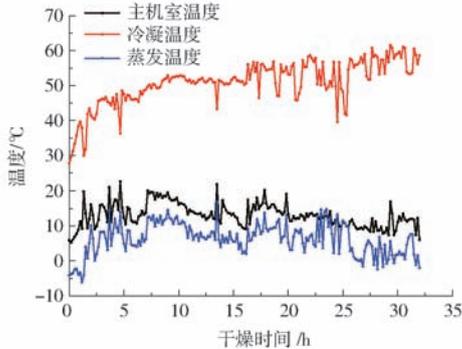
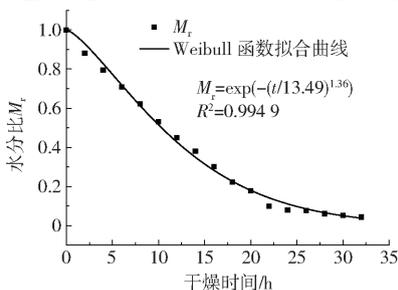


图 5 干燥室内冷凝温度、蒸发温度和主机室温度
Fig. 5 Condensation and evaporation temperatures in drying room and temperature in main engine host room

整个干燥过程中热泵系统的冷凝温度从开机时刻的 29℃逐步升高到 58℃,在压缩机能够提供的冷凝温度范围内。蒸发温度受环境温度、风速和昼夜温差的影响,波动较大,从最开始 -4℃升至 10℃左右,干燥后期又降至 0℃。主机室温度变化趋势与蒸发温度相同,二者温差范围为 5~10℃。

2.2 枸杞干燥动力学及品质

此次干燥枸杞至安全水分所用时间为 32 h,如图 6 所示,对水分比与干燥时间进行 Weibull 函数拟合,均方根误差为 8.44×10^{-4} ,离差平方和 χ^2 为 0.012 66, R^2 为 0.994 9,说明 Weibull 函数可以较好地模拟二者之间的关系。经过计算,速率常数 α 为 13.49 h,占总干燥时长 42.16%,形状参数 β 大于 1,为 1.36,说明物料在干燥前期存在延滞阶段,即在干燥前期出现干燥速率先升高而后降低的形态^[15]。



如图 6 所示,随着干燥的进行,含水率降低,枸杞干燥可以分为 2 个阶段,转折点为 1.0,当干基含水率高于 1.0 时,为快速干燥阶段,低于 1.0 时,为快速降速阶段,当干基含水率为 1.0 时,在本次干燥工艺当中,设定温度由 52℃开始上升至 56℃,这也说明了干燥工艺较为合理。因此,在实际生产实践当中,因为枸杞品种不同、季节不同,其初始含水率不同、含糖量不同,干制工艺的不同对不同品种枸杞干制产品品质有很大的影响,可以在干燥前期遵循本工艺,并将干基含水率 1.0 作为干燥阶段的转折点,当温度升至 52℃时,检测干基含水率,如若高于 1.0 时,则维持温度不变,已经到达或低于 1.0 即可继续升温,最高温度不得高于 64℃。

为了考察干燥室内部产品品质均匀性,分别采集 6 个小车正中间的枸杞,并与同批次燃煤干燥室干制的枸杞进行对比,燃煤干燥室所采集枸杞是经过当地工作人员凭借感官、经验分级而筛选出的色泽、品相最好的一批枸杞干制品。如表 3 所示,热泵干燥室内部枸杞总酚含量在 $(55.92 \pm 0.3) \sim (8.12 \pm 0.18)$ mg/g 之间,后部枸杞总酚含量显著高于前部,这是因为前部温度高于后部,后部枸杞总酚含量之间差异不显著,而前部枸杞总酚含量之间有显著性差异,这是因为干燥室前部温、湿度相差较大,而后部温湿度分布比较均匀。热泵干燥枸杞总黄酮含量在 $(70.99 \pm 1.68) \sim (113.88 \pm 0.26)$ mg/g 之间,后部枸杞总黄酮含量显著高于前部,且前部和后部的不同位置枸杞之间总黄酮含量均有差异,这可能是因为总黄酮对温、湿度变化较为敏感。从抗氧化特性来看,热泵干燥枸杞后部枸杞的·DPPH 清除率和铁离子还原能力均显著高于前部,且干燥室后部枸杞铁离子还原能力之间没有显著性差异,这说明热泵干燥室干燥枸杞前部产品品质有差异,而后部较为均匀。从总胡萝卜素含量来看,热泵干燥枸杞不同位置之间胡萝卜素含量没有显著差异。与燃煤干燥室所采集枸杞相比,热泵干燥室后部干燥枸杞总酚、总黄酮、·DPPH 清除率、铁离子还原能力均显著高于燃煤干燥室干燥枸杞,前部干燥枸杞总酚、总

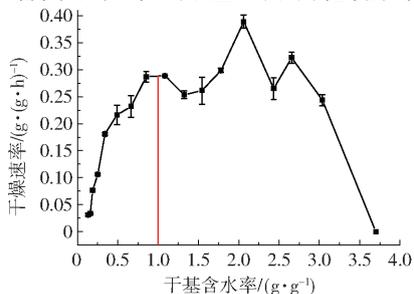


图 6 枸杞干燥动力学曲线

Fig. 6 Drying kinetics curves of wolfberry

表3 不同位置枸杞总酚、总黄酮、·DPPH清除率、FARP、总胡萝卜素含量(质量比)及感官评价总分与燃煤干燥室对比

Tab.3 Comparison of total phenol, total ketone, ·DPPH scavenging activity, FARP, total carotene content and sensory evaluation scores of wolfberry in heat pump drying room with those in coal combustion chamber

类别	总酚含量/ (mg·g ⁻¹)	总酮含量/ (mg·g ⁻¹)	·DPPH清除率/ %	FARP/ (mg·g ⁻¹)	总胡萝卜素含量/ (mg·g ⁻¹)	感官评价 总分	
热泵干燥	前部左边	6.56 ± 0.08 ^b	76.93 ± 7.89 ^a	3.58 ± 0.22 ^b	6.97 ± 0.06 ^c	2.55 ± 0.09 ^b	80.95 ± 4.63 ^b
	前部中间	5.92 ± 0.31 ^a	70.99 ± 1.68 ^a	3.01 ± 0.01 ^a	5.50 ± 0.01 ^a	2.77 ± 0.26 ^b	81.86 ± 3.25 ^b
	前部右边	7.15 ± 0.34 ^c	98.91 ± 2.18 ^{bc}	3.63 ± 0.11 ^{bc}	7.05 ± 0.18 ^c	2.76 ± 0.02 ^b	82.37 ± 4.21 ^b
	后部左边	8.12 ± 0.18 ^d	97.37 ± 8.40 ^b	3.80 ± 0.11 ^{bc}	7.92 ± 0.45 ^d	2.61 ± 0.24 ^b	86.53 ± 5.21 ^a
	后部中间	7.93 ± 0.07 ^d	99.03 ± 9.60 ^{bc}	3.92 ± 0.01 ^{bc}	7.70 ± 0.02 ^d	2.56 ± 0.16 ^b	85.76 ± 2.33 ^a
	后部右边	7.74 ± 0.03 ^d	113.88 ± 0.26 ^e	4.07 ± 0.26 ^e	7.82 ± 0.01 ^d	2.90 ± 0.22 ^b	86.92 ± 2.58 ^a
燃煤干燥	6.70 ± 0.33 ^{bc}	73.37 ± 6.03 ^a	3.08 ± 0.27 ^a	5.97 ± 0.07 ^b	1.61 ± 0.47 ^a	80.35 ± 3.64 ^b	

注:同一类指标在单因素方差分析多重比较,*t*检验;表中不同字母表示有显著差异($p < 0.05$)。

黄酮、·DPPH清除率、铁离子还原能力与其相当,且热泵干燥室干燥枸杞总胡萝卜素含量均显著高于燃煤干燥室干燥枸杞。从感官评价总分来看,干燥室后部的枸杞之间没有显著性差异,并显著高于前部枸杞和燃煤干燥室的枸杞。综合来说,热泵干燥室干燥枸杞整体品质高于燃煤干燥室,且相对于燃煤干燥室,干制时间缩短了20%,且工艺制定合理,可应用于生产实践。

3 结论

(1)根据前期小型热泵干燥枸杞干燥特性研究,从能量的高效利用角度出发,设计大型热泵干燥室(1 000 kg鲜果),该系统由热泵供热系统、排湿系统、电控系统组成,供热系统为2个相同的热泵系

统组成。热泵干燥系统供热充裕,升温灵敏,智能化自控系统操作简便,温湿度控制精准,能够满足枸杞干燥工艺的需求,压缩机的蒸发温度、冷凝温度均在压缩机正常工作范围内。

(2)通过对枸杞干燥速率进行分析,表明在干燥过程当中,采用温度逐步升温,湿度逐渐下降,将干基含水率1.0作为干燥阶段的转折点,比较合理,当温度升至52℃时,检测干基含水率,如若高于1.0时,则维持温度不变,已经到达或低于1.0即可继续升温,最高温度不得高于64℃。

(3)热泵干燥室干燥枸杞整体品质高于燃煤干燥室,且相对于燃煤干燥室,干制时间缩短了20%,能源成本降低了19%,可以应用于生产实践。

参 考 文 献

- 郭学峰,王华,侯瑾.宁夏特色农产品枸杞产业化趋势探讨[J].宁夏农林科技,2012,53(11):150-151.
GUO X F, WANG H, HOU J. A study of industrialization trend of Ningxia's specialized agricultural product: wolfberry[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2012, 53(11):150-151. (in Chinese)
- 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(增刊):178-181.
WU H H, Han Q H, YANG B N, et al. Experiment on combining hot air and microwave vacuum to dry Lyeium[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):178-181. (in Chinese)
- SAHOO N R, PAL U S, DASH S K, et al. Drying kinetics and quality aspects during heat pump drying of onion (*Allium cepa* L.) [J]. International Journal of Food Studies, 2012, 1(2):159-167.
- 国德宏,杨志国,王双林,等.玉米袋式干燥试验研究[J].粮食储藏,2015,44(6):33-36.
GUO D H, YANG Z G, WANG S L, et al. Study on in-bag drying of corn[J]. Grain Storage, 2015, 44(6):33-36. (in Chinese)
- 彭宇,王刚,马莹,等.热泵型太阳能密集烤房干燥节能途径探讨[J].河南农业科学,2011,40(8):215-218.
PENG Y, WANG G, MA Y, et al. Discussions on energy saving ways of heat pump and solar energy bulk curing barn[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(8):215-218. (in Chinese)
- 李海峰,李勇,代彦军,等.太阳能辅助热泵综合就仓干燥系统实验研究[J].农业机械学报,2010,41(7):109-113.
LI H F, LI Y, DAI Y J, et al. Experiment on hybrid solar drying system assisted by heat pump for grain in store drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):109-113. (in Chinese)
- 魏娟.热泵干燥特性研究及在农产品干燥中的应用[D].北京:中国科学院大学,2014.
WEI J. Study on characteristics of heat pump dryer and application on drying agricultural products[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- ZHAO D D, AN K J, DING S H, et al. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(8):2308-2318.

- Crops, 2010(4): 1-4. (in Chinese)
- 3 赵春明. 农产品质量安全含义探析[J]. 农产品加工, 2005(1): 26-27.
 - 4 CHANG, LOUIS W. Toxicology of metals[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1996.
 - 5 LOVLEY D R. Environmental microbe-metal interactions[M]. Washington DC: ASM Press, 2000.
 - 6 SILVIA Díaz, ANA Martín-González, JUAN Carlos Gutiérrez. Evaluation of heavy metal acute toxicity and bioaccumulation in soil ciliated protozoa[J]. Environment International, 2006, 32(6): 711-717.
 - 7 ROSSINI OLIVA S, FERNÁNDEZ ESPINOSA A J. Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources[J]. Microchemical Journal, 2007, 86(1): 131-139.
 - 8 申广荣, 黄丹枫. 基于 HACCP 的出口蔬菜安全生产智能决策支持系统研究[J]. 农业网络信息, 2005(11): 18-20.
SHEN Guangrong, HUANG Danfeng. Intelligent decision support system of export vegetable safety production based on HACCP [J]. Agriculture Network Information, 2005(11): 18-20. (in Chinese)
 - 9 PETER Loos. Gozinto graphs for by-products and cyclic production: an approach for ERP system application[C]//7th Americas Conference on Information Systems, 2001: 111-1117.
 - 10 VAN DORP C A. A traceability application based on Gozinto graphs[C]//EFITA 2003 Conference, 2003: 280-285.
 - 11 VAN DORP C A. Induction of a reference data model for tracking and tracing[C]//8th Americas Conference on Information Systems, 2002: 945-957.
 - 12 MASSIMO Bertolini, MAURIZIO Bevilacqua, ROBERTO Massini. FMECA approach to product traceability in the food industry [J]. Food Control, 2006, 17(2): 137-145.
 - 13 李丹. 基于 SD 模型的汾河灌区水资源合理配置预测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
 - 14 VAN DER AALST W M P. The application of Petri nets to workflow management[J]. Journal of Circuits, Systems and Computer, 1998, 8(1): 21-66.
 - 15 VAN DER AALST W M P, VAN HEE K. 工作流管理——模型、方法和系统[M]. 王建民, 闻立杰, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.
 - 16 宋贤钧, 王炳鹏, 郭佳计. 基于 WF-net 的工作流建模技术及应用[J]. 计算机科学, 2006, 33(4): 134-136.
SONG Xianjun, WANG Bingpeng, GUO Jiaji. Workflow modeling technology and application based on WF-net[J]. Computer Science, 2006, 33(4): 134-136. (in Chinese)

(上接第 365 页)

- 9 ZHAO D D, ZHAO C P, TAO H Y, et al. The effect of osmosis pre-treatment on hot-air drying and microwave drying characteristics of chilli (*Capsicum annuum* L.) flesh[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2013, 48: 1589-1595.
- 10 CORZO O, BRACHO N, PEREIRA A, et al. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices[J]. LWT—Food Science and Technology, 2008, 41(10): 2023-2028.
- 11 ZHANG F, DONG P, FENG L, et al. Textural changes of yellow peach in pouches processed by high hydrostatic pressure and thermal processing during storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(8): 3170-3180.
- 12 丁胜华. 生长成熟与干制对枣果品质特性及其果胶多糖的形成规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
DING S H. Effects of growth stages and dehydration on the metabolic rules of physico-chemical properties and pectic polysaccharides in jujube fruits[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 13 ALJADI A M, KAMARUDDIN M Y. Evaluation of the phenolic contents and antioxidant capacities of two Malaysian floral honeys [J]. Food Chemistry, 2004, 85(4): 513-518.
- 14 NESLIHAN C, HEPBASLI A. A review of heat pump drying: Part 1- Systems, models and studies [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2180-2186.
- 15 BANTLE M, KOLASAKER K, EIKEVIK T M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. Drying Technology, 2011, 29(10): 1161-1169.