

干燥温室与热泵联合系统对胡萝卜的干燥效果

解鸿磊¹, 尚春雨², 王树彬¹, 孙笠维¹, 李彩妮³, 侯毛毛¹, 黄玉吉^{1*}, 钟凤林¹

(1. 福建农林大学园艺学院, 福州 350002; 2. 西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100; 3. 福建农林大学食品科学学院, 福州 350002)

摘要:为了解决传统蔬菜干燥技术成本高、能耗大的问题, 该研究提出了一种干燥温室与热泵联合系统, 基于试验地环境设计了干燥温室, 采用三级串联的方式构建了组合式热泵机; 测定了干燥温室内外太阳辐射和温度变化情况, 以胡萝卜为试验材料, 测定了联合系统性能指标, 对比了独立热泵机组与联合系统的制热系数 (Coefficient Of Performance, COP) 变化情况, 研究了系统参数设定对胡萝卜干燥品质指标的影响。研究结果表明: 干燥温室白天室内温度比室外温度平均高 6.4℃, 夜间室内温度比室外温度平均高 4℃; 在较优干燥工艺温度为 60℃、风速为 2 m/s、装载量为 2 000 kg 的条件下, 系统由静止状态进入运行状态后, 总温升 43.14℃, 总温降 17.5℃, 对比独立热泵机组, 联合系统总 COP 提高 26%~29%, 鲜胡萝卜处理量 80 kg/h, 产出干胡萝卜 18.8 kg/h, 消耗电量 53.5 kW, 生产干胡萝卜成本 2.25 元/kg; 对干胡萝卜品质指标的检测表明, 其色泽 (a^* 值) 均值为 31.27、复水比均值为 5.42、维生素 C 均值为 1.51 mg/g、总糖均值为 12.36%、胡萝卜素均值为 0.68 mg/g。研究结果可为大宗蔬菜干燥加工后供应于食品领域的技术研究提供理论基础和科学依据。

关键词:干燥; 品质控制; 温室; 热泵; 胡萝卜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.036

中图分类号: TS255.52

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0314-07

解鸿磊, 尚春雨, 王树彬, 等. 干燥温室与热泵联合系统对胡萝卜的干燥效果[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 314-320.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.036 <http://www.tcsae.org>

Xie Honglei, Shang Chunyu, Wang Shubin, et al. Drying effect of carrot in drying greenhouse combined with heat pump system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 314-320. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.036 <http://www.tcsae.org>

0 引言

大宗蔬菜干燥后可广泛应用于食品行业的各个领域, 是推动蔬菜产业高速发展的主要驱动力之一^[1-2], 也是食品产业供给侧结构性改革的重要方向。胡萝卜是世界主产蔬菜之一^[3], 现有蔬菜干燥加工方式较为多样, 如热风干燥技术^[4]、微波真空干燥技术^[5]、红外干燥技术^[6]、真空冷冻干燥技术^[7]、变温压差膨化干燥技术^[8]、高压电场干燥技术^[9]、喷雾干燥技术^[10]; 现有胡萝卜干燥技术主要有真空冷冻干燥技术, 热风干燥技术、微波真空干燥技术和红外干燥技术也有少量应用, 但由于鲜胡萝卜含水率较高、干燥加工过程易发生褐变^[4], 对于如何降低加工成本、提高加工效率仍需进一步完善。

中国热泵技术的发展始于 20 世纪 50 年代, 目前已广泛应用于粮食、果蔬、茶叶的干燥加工中, 因其可吸收环境热量用于加热而成本较低, 并且环保节能^[11-12], 应用领域日益广泛, 但也因干燥效率较低而受限^[13-15]。在生产上, 利用温室干燥农产品的方式也十分常见。随着中国农业的发展, 设施温室逐渐普及, 农户经常利用

设施温室的休作期晾干农产品, 成本更低、更节能环保, 但加工周期较长。温室可为热泵提供较高温度的工作环境, 提高热泵工作效率, 近两年, 干燥温室与热泵结合的干燥技术逐渐兴起, 如乔玲敏等^[16]设计了一种温室型多压缩机热泵烘干装置及分段干燥方法, 李美成等^[17]设计了一种用于温室大棚的光伏光热一体化循环系统, 朱烨等^[18-19]的研究结果表明阳光棚与热泵联合系统比独立热泵更节能、高效, 但干燥温室与热泵联合系统的工作参数及其对干燥物品品质影响的研究仍需进一步完善。

本文拟对干燥温室主结构参数进行分析, 对组合式热泵机性能进行测定, 对胡萝卜干燥后的品质进行分析, 以期对大宗胡萝卜干燥加工后应用于食品加工领域提供新的研究思路。

1 干燥温室主要结构参数

1.1 干燥温室性能要求

为了能够接收更多日光, 使干燥温室充分采光集热, 干燥温室宜采取坐北朝南。干燥温室为拱形钢桁架结构, 室内无支柱, 北墙高度为 4.5 m, 净跨度 8 m, 长度 30 m。要求干燥温室具有胡萝卜干燥保温、避雨的环境, 白天干燥温室采光面的光透过率高, 热辐射效果好, 为热泵机提供较高温度的工作环境, 满足新鲜胡萝卜干燥的需要; 夜晚干燥温室具有阻止红外长波辐射透出功能, 保持干燥室内温度高于室外; 雨天防止雨水淋湿物料^[20]。

收稿日期: 2020-12-25 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家青梗菜良种重大科研联合攻关项目 (111821301354052283); 福州市科技项目 (2018-G-37)

作者简介: 解鸿磊, 研究方向为智慧农业。Email: 932606636@qq.com

*通信作者: 黄玉吉, 博士, 讲师, 研究方向为园艺植物生物技术。

Email: yjhuang2004@163.com

1.2 干燥温室的朝向设计

干燥室的朝向影响透光率和热环境^[21]。该干燥温室建在福建省泉州市, 位于北回归线以北, 中午太阳光线均从其天顶南面入射。在实际生产中, 干燥温室需进行适当的偏角设计, 以使干燥温室采光角和太阳高度角的峰值相错开, 延长最佳采光时间, 干燥温室设计朝向宜为南偏西 6° ^[21]。

干燥温室覆盖材料为上海劲诺塑料制品有限公司提供的 PC (聚碳酸酯) 板, 厚度 6 mm, 透光率 89% 以上, 可在温度 $-40 \sim 120^\circ\text{C}$ 条件下长期使用, 使用寿命 6 a 左右。

1.3 干燥室的屋面设计

1.3.1 干燥温室的屋面结构

屋面倾角影响干燥温室的采光性能^[22-23]。为了最大限度地使日光透过 PC 板屋面进入干燥温室, 并降低干燥温室造价, 干燥温室的屋面采用单坡面采光。

1.3.2 干燥温室的屋面倾角计算

干燥温室的屋面倾角与当地的太阳高度有关。当地太阳高度角^[24]计算公式如下:

$$h_s = 90^\circ - (\phi - \delta_s) \quad (1)$$

式中 h_s 为太阳高度角, ($^\circ$); ϕ 为地理纬度, ($^\circ$); 干燥温室建于福建省泉州市, 地理纬度为 24.54° ; δ_s 为太阳赤纬角, ($^\circ$)。

胡萝卜加工季节主要在春分前后, 太阳赤纬角 $\delta_s = 0^\circ$, 则春分日中午的太阳高度角为 65.46° 。

干燥温室屋面倾角指干燥温室与水平面之间夹角^[21]。

$$\text{屋面倾角} = 90^\circ - (\gamma + h_s) \quad (2)$$

式中 γ 为日光入射角, ($^\circ$); 取 $\gamma = 0^\circ \sim 10^\circ$, 在该范围内的日光透射率较高; 则屋面倾角为 $15^\circ \sim 25^\circ$ 。

根据计算结果, 干燥温室屋面倾角取均值为 20° 。

1.4 干燥温室通风系统设计

根据温室通风技术要求^[21], 在干燥温室的南北两面各设置 4 扇开窗, 每扇窗户长 2.3 m, 高 1.4 m, 组成自然通风系统; 萎凋房东面的 3.2 m 高度位置并列安装上海应达风机股份有限公司的 ST35-11-3.15 型双向低噪声轴流风机 1 台, 转速为 2 900 r/min, 风量为 $4\,545\text{ m}^3/\text{h}$, 组成进气通风系统强制通风, 并散发水蒸汽。

2 组合式热泵干燥机

2.1 组合式热泵干燥机

组合式热泵干燥机系统原理如图 1 所示。工作原理: 组合式热泵干燥机运行过程中, 高温干燥的空气进入烘干区干燥仓并在烘干区内部等焓吸收胡萝卜水分, 干空气变为湿空气。从烘干区干燥仓回风室排出的湿空气经除尘器除杂净化后进入三级蒸发区, 经各级蒸发器逐级降温除湿后变为低温干燥的空气, 与此同时, 各级蒸发器冷凝的水分被排出。随后, 低温干燥的空气与烘干区冷却仓排出的空气混合后一并进入三级冷凝区, 经各级冷凝器逐级加热后变为高温干燥的空气, 并被送入烘干区, 进入下一个循环。系统主要由热泵机组、热管回热

器、烘干区、风道管路、除尘器、风机、电控柜组成。其中, 热泵机组共有 3 台, 每台机组都由压缩机、蒸发器、冷凝器、油分离器等部件组成; 三级蒸发区安装于室外, 包括蒸发器 1、蒸发器 2、蒸发器 3; 三级冷凝区和烘干区安装于室内, 三级冷凝区包括冷凝器 1、冷凝器 2、冷凝器 3。如图 2 所示, 烘干区盖板为透光 PC 板, 其包括预热仓、干燥仓、冷却仓 3 部分, 容量大小为 3 t; 风道管路由回风管道、送风管道及旁通风管道组成; 除尘器由圆形过滤网转盘、吸尘头、吸尘管、吸尘风机及除尘布袋组成^[25]; 风机包括离心式热风风机 (1 台) 和离心式冷却风机 (1 台), 系统总风量为 $22\,860\text{ m}^3/\text{h}$; 压缩机型号为 XS-50、功率为 50 kW, 蒸发器、冷凝器和烘干区均为自制。

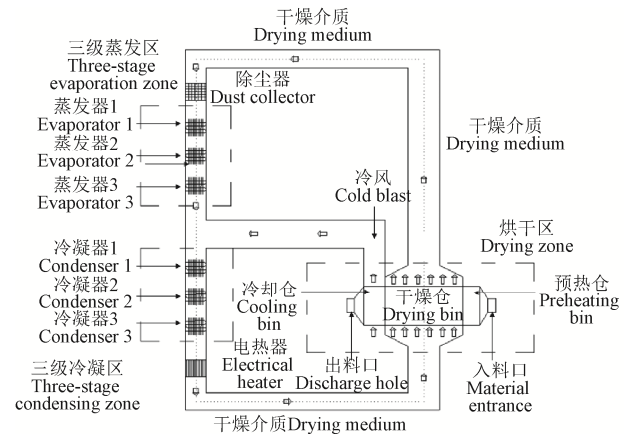


图 1 组合式热泵干燥机系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of combined heat pump dryer system

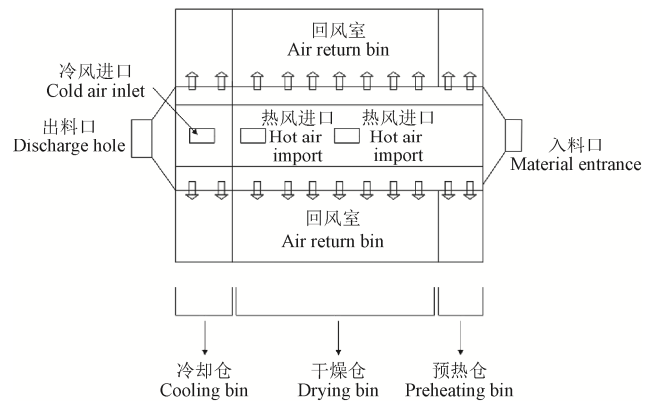


图 2 烘干区结构示意图

Fig.2 Structural diagram of drying area

2.2 热泵主要性能指标

2.2.1 热泵的制热系数

制热系数 (Coefficient Of Performance, COP) 是评价热泵性能的参数。^[25-26]

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} = \frac{\int_0^t P_c dt}{W} \quad (3)$$

$$P_c = m_a c_{pa} (T_{lo} - T_{li}) \quad (4)$$

式中 Q_c 为热泵的制热量, kW; W 为热泵的消耗功率,

kW; P_c 为热泵冷凝器制热功率, W; m_a 为空气流进冷凝器的质量流量, kg/h; c_{pa} 为空气定压比热容, kJ/(kg·°C); T_{lo} 为冷凝器出口的空气温度, °C; T_{li} 为冷凝器进口的空气温度, °C; dt 为干燥过程中的某时刻。

2.2.2 热泵的除湿能耗比

除湿能耗比 (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) 是反映热泵干燥装置综合性能的主要指标^[26-27]。

$$SMER = \frac{M_{de}}{W_{tot}\tau} \quad (5)$$

式中 M_{de} 为从物料中除去的水分质量, kg; W_{tot} 为总功率, kW; τ 为干燥时间, h。

3 材料与方法

3.1 试验材料与仪器

供试材料为晋江市东石梅塘农业综合场提供的胡萝卜, 品种为坂田七寸, 含水率 85.3%~92.7%。

试验时间为 2019 年 3 月 25 日—4 月 25 日, 试验地点: 福建农林大学设施蔬菜种业实验室。

测定仪器: HOBO 温湿度自动记录仪 (美国 Onset 公司), 太阳全辐射记录仪 MP200 (美国 Apogee Instrument 公司), UV-1800 紫外分光光度计 (岛津企业管理有限公司), 3K15 高速旋转离心机 (德国 Sartorius 公司), Color Flex Ez 45/0 型分光测色仪 (上海韵鼎国际贸易有限公司), JYL-B060 九阳料理机 (九阳股份有限公司), DHG-9123A 恒温鼓风干燥箱 (广东省南海市德丰电热设备厂), CNWB-3ZKP 微波真空干燥箱 (上海精宏实验设备有限公司), STC 中短波红外干燥设备 (德国 Memert 公司), FD-1A-50 低温真空干燥机 (江苏天翎仪器有限公司)。

3.2 试验方法

3.2.1 干燥温室内外太阳辐射和温度的测定

试验时间中随机选取 15 d, 测定干燥温室内部和外部水平地表面所接收的太阳辐射能, 以及干燥温室内东部、中部、西部及温室外面的温度, 每小时采集 1 次, 每天相同时间点所测数据统计其平均值。

3.2.2 组合式热泵机性能指标的测定

参考李伟钊等^[11]的研究方法, 将胡萝卜用切丁机切成 5 mm×5 mm×5 mm 的胡萝卜丁, 投入组合式热泵机入料口; 预热仓内部空气温度提升至 60 °C, 烘干区内置传送装置将胡萝卜丁输运至干燥仓, 胡萝卜丁干燥至含水率为 13% 时进入冷却仓。烘干区内置前、后感应器, 胡萝卜丁运输过程中, 传送装置和前、后感应器联动, 当前、后感应器都无感应时, 传送装置开始启动运输胡萝卜丁; 当前、后感应器全部感应时, 传送装置停止输运, 从而保证烘干区始终满仓。除尘器每隔 30 min 对除尘网上的杂质清除一次, 以保证回风流动的畅通。

每隔 0.5 h 在出料口取 3 个样品, 每个样品质量为 500 g, 将样品混合均匀后测量平均含水率, 根据出料含水率大小实时调节排料速度, 保持出料含水率达 13%。压缩机的吸、排气口布置有温度传感器和压力传感器,

三级蒸发区、三级冷凝区的迎风侧及出风侧布置有温湿度传感器, 烘干区的进风口、出风口以及其干燥仓和冷却仓的回风室布置有温湿度传感器, 数据采集仪每秒采集 1 次数据, 耗电量每小时记录 1 次, 单项数据取一个加工周期 (25 h) 内的平均值。

另外设置处于室外的相同的独立热泵机组, 按照上述试验规范进行操作, 以公式 (3)、(4) 计算独立热泵机组、干燥温室与热泵联合系统在一日内的不同时间段的总 COP。

3.2.3 独立热泵机组与联合系统 COP 测定

为验证干燥温室与热泵联合系统运行的稳定性与高效性, 设置其与独立热泵机组的对照试验, 即在装载量为 2 000 kg、干燥温度为 60 °C、风速为 2 m/s 条件下, 分别测定每日早晨 (8:00—9:00)、中午 (12:00—13:00)、下午 (18:00—19:00) 的 COP。

3.2.4 干燥温室与热泵联合系统对胡萝卜干燥效果测定

1) 干燥温室与热泵联合系统参数对胡萝卜品质的影响

参考聂波^[4]的研究, 干燥温度、装载量和风速均对胡萝卜干燥效果有影响; 根据本系统设计方案, 装载量设置为 2 000 kg 时, 不易产生焦糊现象, 也不易阻碍胡萝卜丁水分散失。因此, 试验采用裂区设计, 主区因素为干燥温度, 设 50、60 和 70 °C 3 个温度水平, 裂区因素为干燥风速, 设 1、2 和 3 m/s 3 个风速水平。每处理重复 3 次, 直至胡萝卜丁含水率在 13% 以下, 停止干燥。

2) 胡萝卜品质指标测定

①胡萝卜丁色泽: 取 10 g 干胡萝卜丁, 使用分光测色仪, 参考陈瑞娟^[28]等的研究方法, 基于 $L^*a^*b^*$ 表色系测定绿/红值 a^* (负值为绿色, 正值为红色), 重复测定 3 次取平均值 (胡萝卜的主导颜色是红色, a^* 值越大越好)。

②复水比: 采用刘美娟等^[29]的方法, 测定复水比。取 10 g 干胡萝卜丁放入 45 °C 恒温蒸馏水中, 静置 35 min 后, 取出置于筛网上沥干 20 min, 并用吸水纸轻拭表面水分, 称取复水后质量。复水性采用复水比 (%) 作为评价指标, 用公式 (6) 计算为

$$\text{复水比} = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中 m_1 为复水后的质量, g; m_2 为复水前的质量, g。

为测定干胡萝卜丁维生素 C 含量、总糖含量和胡萝卜素含量, 利用 JYL-B060 九阳料理机粉碎不同处理条件下的干胡萝卜丁各 500 g, 每次粉碎时间 15 s, 每次间隔 2 min, 共粉碎 2 次。

③维生素 C 含量: 根据 GB6195—1986《水果、蔬菜维生素 C 含量测定法》中 2,6-二氯酚法测定^[30]。

④总糖含量: 参考陈瑞娟等^[28]的方法测量总糖含量。精确称量胡萝卜粉 0.5 g 于烧杯中, 加入 100 mL 蒸馏水和 2 mL 6 mol/L 的 HCL 溶液, 在 96 °C 的水浴锅中水浴 2 h, 冷却后加入 2 mL 6 mol/L 的 NaOH 溶液进行抽滤后用蒸馏水定容至 200 mL, 得到待测样品。吸取 2.0 mL 待测样品, 然后加入 1.0 mL 质量分数 6% 的苯酚及 5.0 mL

98%的浓硫酸，摇匀冷却室温放置 30 min 后于 490 nm 波长测光密度。每次测定取双样对照。以标准曲线计算待测样品的总糖质量分数，以公式（7）计算。

$$Y = \frac{nm_3V_1}{m_4V_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中 Y 为总糖的质量分数，%； n 为溶液的稀释倍数； m_3 为标准曲线所得葡萄糖质量，mg； m_4 为样品的质量，mg； V_1 为提取液总体积，mL； V_2 为测定时所取样液的体积，mL。

⑤胡萝卜素含量：参考陈瑞娟等^[29]的方法测量胡萝卜素含量。精确称量胡萝卜粉 3.0 g 于烧杯中，按 1:10 加入体积比为 2:1 的无水乙醇和氯仿提取液，充分混合 30 min，在 10 000 r/min 条件下离心 10 min，沉淀后再提取 2 次，将上清液合并，并定容。分别测定波长为 440 nm 处的吸光度。以每克胡萝卜（鲜质量）在 400 nm 处的吸光度值表示胡萝卜素含量，干胡萝卜粉中胡萝卜素含量以公式（8）计算得到^[28]

$$\text{胡萝卜素含量} = \frac{20 \times 0.05AV}{m} \quad (8)$$

式中 A 为吸光度值， V 为上清液总体积，mL， m 为胡萝卜的质量，g。

3.2.5 不同干燥方式的成本计算

为对比其他常见的干燥方式的生产成本，取相同鲜胡萝卜丁分别用热风干燥技术、微波真空干燥技术、红外干燥技术和真空冷冻干燥技术加工，均干燥至含水率为 13%，以生产每千克干胡萝卜丁所耗电能（电价均为 0.79 元/(kW·h)）计算最终成本。

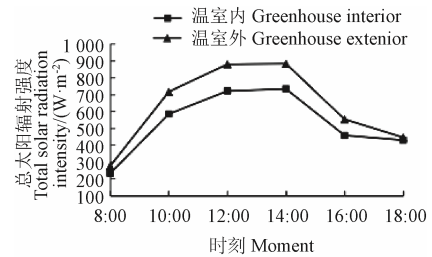
根据胡萝卜含水率特点及干燥设备技术要求，热风干燥技术^[29]的试验条件为：干燥温度 70 ℃，风速 2.5 m/s；微波真空干燥技术的试验条件为：干燥温度 70 ℃，真空度 76 kPa，微波功率 1.5 kW；红外干燥技术的试验条件为：干燥温度 70 ℃，风速 2.1 m/s、功率 1 125 W，干燥时间 50 min；真空冷冻干燥技术的试验条件：-20 ℃条件下冷冻柜预冻 12 h，然后在真空度 10 kPa，温度 -50 ℃条件下冷冻干燥；干燥温室与热泵联合系统的试验条件为：干燥温度 60 ℃、风速 2 m/s、装载量 2 000 kg。

4 结果与分析

4.1 干燥温室内外太阳辐射强度与温度

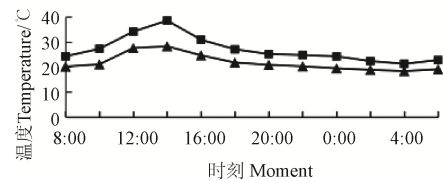
干燥室内热量受太阳辐射和热泵机工况的影响。干燥温室的覆盖材料具有较好的透光效果，如图 3a 所示，室内太阳总辐射强度在 231~733 W/m² 范围变化，随时间呈现“低—高一低”变化趋势，与太阳入射角变化“高一低—高”有关^[21]；室内太阳总辐射强度平均值为 526 W/m²，室外平均值为 625 W/m²。如图 3b 所示，白天（8:00—18:00）干燥室内温度在 38.5~24.3 ℃ 范围变化，平均温度 30.4 ℃，比室外温度平均高 6.4 ℃；夜间干燥室内温度在 21.3~25.2 ℃ 范围变化，平均温度 30.4 ℃，比室外温度平均高 4 ℃，干燥温室具有较好的保温效果，并且具有防雨、挡风作用，为热泵机提供

了较高的工作温度。



a. 干燥温室内外总太阳辐射强度

a. Total solar radiation intensity inside and outside dry greenhouse



b. 干燥温室内外温度变化

b. Temperature change inside and outside the drying greenhouse

图 3 干燥温室内外太阳辐射强度与温度

Fig.3 Solar radiation intensity and temperature inside and outside drying greenhouse

4.2 组合式热泵机性能指标

4.2.1 湿空气温度变化情况

如图 4 所示，湿空气经过第一级、第二级、第三级蒸发器时的温降分别为 7.7、9.8 ℃，总温降 17.5 ℃，温度由 33.1 ℃降为 15.6 ℃；湿空气经过第三级、第二级、第一级冷凝器时的升温为 21.5、21.6 ℃，总升温 43.1 ℃，温度由 16.2 ℃升为 59.3 ℃。

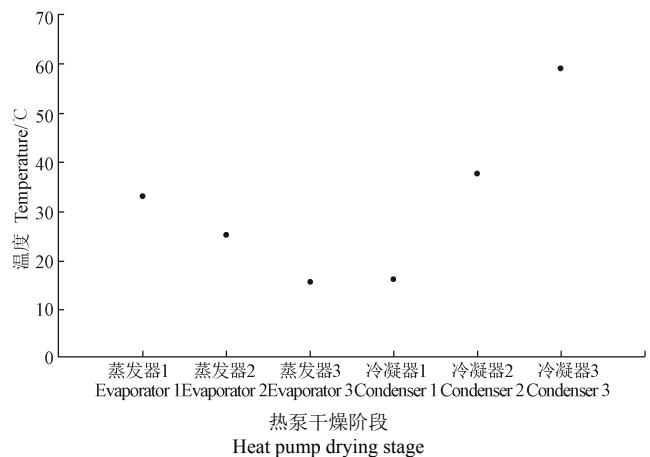


图 4 湿空气温度变化情况

Fig.4 Change of wet air temperature

4.2.2 各级热泵机性能情况

试验过程中，如表 1 所示，第一级至第三级机组的蒸发温度分别为 20.3、13.6 和 5.2 ℃，冷凝温度分别为 60.6、51.1 和 38.4 ℃，从第一级到第三级热泵机组，各级热泵机组的蒸发温度和冷凝温度差值逐渐减小。第一级至第四级机组的蒸发压力分别 0.46、0.38 和 0.51 MPa，冷凝压力分布为 1.91、1.67 和 1.42 MPa，从第一级到第三级热泵机组，压比（排气压力与吸气压力之比）逐渐减小。第一级机组功率最大，第三级机组功率最小，第一级至第三级热泵机组的功率分别为 12.3、10.8、

10.4 kW。第一级至第三级热泵机组的除水速率分别为 72.7、61.2、49.7 kg/h，热泵系统每小时的除水量为 183.6 kg。第一级至第三级热泵机组的 COP 逐渐增大，第一级至第三级热泵机组的 COP 分别为 3.1、3.3 和 4.2。

表 1 各级热泵机组运行工况和性能特性
Table 1 Operating conditions and performance characteristics of heat pump units at all levels

序号 No.	温度 Temperature/℃		压力 Pressure/MPa		功率 Power /kW	除水速率 Water removal rate /(kg·h ⁻¹)	制热系数 Coefficient of performance
	蒸发器 Evaporator	冷凝器 Condenser	蒸发器 Evaporator	冷凝器 Condenser			
1	20.3	60.6	0.46	1.91	12.3	72.7	3.1
2	13.6	51.1	0.38	1.67	10.8	61.2	3.3
3	5.2	38.4	0.51	1.42	10.4	49.7	4.2

4.2.3 独立热泵机组和干燥温室与热泵联合系统的 COP
如表 2 所示，8:00—9:00 室外温度为 20.2℃，室内温度为 24.3℃，独立热泵机组 COP 为 2.7，干燥温室与热泵联合系统 COP 为 3.4；12:00—13:00 室外温度为 27.6℃，室内温度为 34.1℃，独立热泵机组 COP 为 3.2，干燥温室与热泵联合系统 COP 为 3.7；18:00—19:00 室外温度为 21.8℃，室内温度为 27.1℃，独立热泵机组 COP 为 2.8，干燥温室与热泵联合系统 COP 为 3.6。

表 2 独立热泵机组和干燥温室与热泵联合系统的制热系数(COP)
Table 2 COP of independent heat pump unit and combined system with drying greenhouse

指标 Index	时间 Time		
	8:00—9:00	12:00—13:00	18:00—19:00
室外温度 Outdoor temperature/℃	20.2	27.6	21.8
室内温度 Room temperature/℃	24.3	34.1	27.1
独立热泵机 COP Independent heat pump machine COP	2.7	3.2	2.8
联合热泵机 COP Combined heat pump machine COP	3.4	3.7	3.6

干燥温室为热泵机组提供了较好的工作环境，联合系统总体 COP 高于独立热泵机组，即制热性能更优。在较低温度时，联合系统 COP 高于单独热泵机组 26%~29%，当工作环境一日内温差较大(日变化大于 7℃)时，干燥温室使得热泵能够稳定、高效地运行，对于提高胡萝卜干燥效率和胡萝卜品质具有重要作用。

4.3 干燥温室与热泵联合系统对胡萝卜干燥效果的影响

如表 3 所示，干燥温室与热泵联合系统运行参数设定为温度 60℃、风速 2 m/s 时，干胡萝卜品质较好。其色泽(*a**值)均值为 31.27、复水比均值为 5.42、维生素 C 均值为 1.51 mg/g、总糖均值为 12.36%、胡萝卜素均值为 0.68 mg/g，与聂波^[4]的研究结果相一致，可以较好地供应于食品领域，满足食品所添加的胡萝卜营养品质的要求。

干燥温室与热泵联合系统工艺对胡萝卜干燥效果有影响。在一定范围内，提高干燥温度和风速，利于胡萝卜色泽和糖分的保留，但温度和风速过高易导致胡萝卜

丁出现褐变，与聂波^[4]的研究结果稍有不同，这可能是因选择的胡萝卜品种不同。胡萝卜含水率较高，在一定范围内，提高干燥温度和风速均导致胡萝卜丁复水比较高，这可能是因为干燥速率较快，水分快速散失，能够减少物料组织的坍塌和皱缩，具有较好的多孔结构^[4]；但温度过高易导致胡萝卜丁出现焦糊，风速过高可能导致胡萝卜丁表面失水过快，细胞皱缩严重，降低复水比。维生素 C 和胡萝卜素对温度和氧气较敏感，在一定范围内，提高干燥温度和风速加快了干燥速度，使整体干燥加工时间缩短，有利于二者保留；但过高的温度和风速易使二者流失。

表 3 干燥温室与热泵联合系统对胡萝卜干燥效果
Table 3 The effect of the combined system of drying greenhouse and heat pump system on carrot drying

温度 Temperature /℃	风速 Wind speed /(m·s ⁻¹)	<i>a</i> *值 <i>a</i> * value	复水比 Water imbibition	维生素 C Vitamin C /(mg·g ⁻¹)	总糖 Total sugar content/%	胡萝卜素 Carotene content /(mg·g ⁻¹)
50	1	27.45±0.26d	3.23±0.21d	1.12±0.02d	9.73±0.17d	0.42±0.002e
	2	29.16±0.12b	4.94±0.02b	1.44±0.01ab	11.86±0.14b	0.57±0.004b
	3	24.32±0.51e	2.84±0.11e	0.73±0.06f	7.52±0.43g	0.32±0.024g
60	1	29.14±0.36b	4.83±0.37b	1.26±0.01c	10.83±0.18c	0.51±0.027c
	2	31.27±0.23a	5.42±0.07a	1.51±0.04a	12.36±0.27a	0.68±0.016a
	3	27.32±0.08d	4.31±0.21c	0.92±0.03e	9.26±0.11e	0.38±0.002f
70	1	27.17±0.14d	3.18±0.32d	1.19±0.01c	8.71±0.16f	0.45±0.001d
	2	28.42±0.33c	5.06±0.28ab	1.40±0.07b	11.18±0.23c	0.56±0.007b
	3	26.43±0.21e	4.82±0.14b	0.87±0.04e	8.95±0.12def	0.41±0.011e

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: The different lowercase in the same column indicates significant differences between treatments ($P<0.05$).

4.4 干燥温室与热泵联合系统经济性分析

温室结合热泵机组成的干燥系统具有较好的经济效益，这与朱烨等^[18-19]的研究结果一致。本研究中，对干燥温室与热泵联合系统经济性指标的测定结果表明，每小时的鲜胡萝卜丁处理量为 80 kg，每小时排出的干胡萝卜丁为 18.8 kg；系统每小时的除湿量为 61.2 kg，每小时消耗电量 53.5 kW·h，除湿能耗比 SMER 为 1.14 kg/(kW·h)，即每消耗 1kW·h 电量可以从胡萝卜丁中除去 1.14 kg 水分。

经试验测定，热风干燥技术生产每千克干胡萝卜丁成本为 22.4 元，微波真空干燥技术生产每千克干胡萝卜丁成本为 18.4 元，红外干燥技术生产每千克干胡萝卜丁成本为 16.3 元，真空冷冻干燥技术生产每千克干胡萝卜丁成本为 20.4 元。而干燥温室与热泵联合系统生产每千克干胡萝卜丁成本为 2.25 元，经济效益较好。

5 结 论

干燥温室较好地利用了太阳能，为组合式热泵机提供了较好的工作环境，有利于热泵机稳定、高效地运行；热泵机采用了多级串联的方式，实现了梯次吸热、放热，干燥过程中胡萝卜丁分段散失水分，有利于湿热空气的排放；对比独立热泵机组，干燥温室与热泵联合系统总 COP 提高 26%~29%。

干燥温室与热泵联合系统的参数设定对胡萝卜丁的

品质均有影响, 在系统设定较优干燥温度 60℃、风速 2 m/s、装载量 2 000 kg 的条件下, 干胡萝卜丁品质指标最好, 色泽 (a^* 值) 均值为 31.27、复水比均值为 5.42、维生素 C 均值为 1.51 mg/g、总糖均值为 12.36%、胡萝卜素均值为 0.68 mg/g, 可满足大宗胡萝卜应用于食品领域的品质需求。

干燥温室与热泵联合系统每小时鲜胡萝卜丁处理量为 80 kg, 每小时排出干胡萝卜丁 18.8 kg, 每小时消耗电量 53.5 kW·h, 生产每千克干胡萝卜丁成本为 2.25 元; 对比传统干燥技术, 经济效益较好。

[参 考 文 献]

- [1] Cozzolino R, De Giulio B, Pellicano M P, et al. Volatile, quality and olfactory profiles of fresh-cut polignano carrots stored in air or in passive modified atmospheres[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137, 110408
- [2] Lv W, Li D, Jin X, et al. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 59-67.
- [3] 刘玉辉, 王相友, 魏忠彩. 胡萝卜微观区室结构对红外干燥效率和水分迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23):293-300
Liu Yuhui, Wang Xiangyou, Wei Zhongcai. Effects of carrot microstructure on infrared drying efficiency and moisture transfer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23):293-300 (in Chinese with English abstract)
- [4] 聂波. 胡萝卜干燥特性及超微粉碎粉体性质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
Nie Bo. Research on the Drying Characteristics and Property of Superfine Grinding Powder of Carrot[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [5] Chen J L, Zhang M, Xu B G, et al. Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 251-260.
- [6] 魏忠彩, 孙传祝, 张丽丽, 等. 红外干燥技术在果蔬和粮食加工中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 217-220.
Wei Zhongcai, Sun Chuanzhu, Zhang Lili, et al. Progress of infrared drying technology applied in processing of fruits and vegetables and grain[J]. Food & Machinery, 2016, 32(1): 217-220.
- [7] 邢云霞, 冯云龙, 董文舒. 浅谈真空冷冻干燥技术在食品加工中的应用与前景[J]. 食品安全导刊, 2020(33): 177.
- [8] Lien S, Dima C, Cedric R, et al. In-line solid state prediction during pharmaceutical hot-melt extrusion in a 12 mm twin screw extruder using Raman spectroscopy. [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2014, 87(3): 606-615.
- [9] Wang Q J, Li Y F, Da-wen Sun, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(13): 2285-2298.
- [10] Albert K, Vatai G, Koris A. Microencapsulation of vegetable oil: Alternative approaches using membrane technology and spray drying[J]. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 2017, 45(2): 29-33.
- [11] 李伟钊, 盛伟, 张振涛, 等. 热管联合多级串联热泵玉米干燥系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 278-284.
- [12] 姬长英, 蒋思杰, 张波, 等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 296-302.
Ji Zhangying, Jiang Sijie, Zhang Bo, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 296-302. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张容鹤, 高元能, 冯建成, 等. 热泵干燥槟榔中试工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 241-247.
Zhang Ronghu, Gao Yuanneng, Feng Jiancheng, et al. Technologic parameter optimization in pilot-scale process of heat pump drying of Areca catechu L. [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 241-247. (in Chinese with English abstract)
- [14] 赵海波, 杨昭. 热泵间歇干燥白菜种子内部含水率变化规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 261-267.
Zhao Haibo, Yang Zhao. Variation of moisture content in cabbage seeds with heat pump intermittent drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 261-267. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨先亮, 谢英柏, 靳光亚. 热泵干燥枣的方案改进和试验对比[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 329-332.
Yang Xianliang, Xie Yingbo, Jin Guangya. Improved scheme and test comparison of drying jujube date using heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 329-332. (in Chinese with English abstract)
- [16] 乔玲敏, 张静峰, 赵海波, 等. 一种温室型多压缩机热泵烘干装置及分段干燥方法 CN111879072A. [P]: 2020-11-03.
- [17] 李美成, 王恬悦, 崔梦其, 等. 一种用于温室大棚的光伏光热一体化循环系统 CN106613531B. [P]: 2020-10-09.
- [18] 朱烨, 江涛, 张现广, 等. 海带自然晾晒与热泵烘干级联干燥自动控制系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 298-305.
Zhu Ye, Jiang Tao, Zhang Xiangguang, et al. Development of automatic control system for natural drying and heat pump drying of kelp cascade drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(19): 298-305. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱烨, 江涛, 洪扬, 等. 海带太阳能辅热耦合干燥系统的设计与试验[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 63-68.
Zhu Ye, Jiang Tao, Hong yang, et al. Design and test of solar-thermal coupled drying system for kelp[J]. Fishery Modernization 2018, 45(5): 63-68. (in Chinese with English abstract)
- [20] 佟国红, 李保明, David M C, 等. 用 CFD 方法模拟日光温室温度环境初探[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 178-185.
Tong Guohong, Li Baoming, David M C, et al. Preliminary study on temperature pattern in China solar greenhouse using

- computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007(7): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈济斌, 金心怡, 郝志龙, 等. 节能日光萎凋设施及其对白茶萎凋效果研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 171-177.
- Chen Jibin, Jin Xinyi, Hao Zhilong, et al. Research of sunlight withering room and its withering effect on white tea[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 171-177. (in Chinese with English abstract)
- [22] Harmanto H J, Tantau V M, Salokhe. Microclimate and Air exchange rates in greenhouses covered with different nets in the humid tropics[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(2): 239-253.
- [23] Tong G, Christopher D M, Li B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129-139.
- [24] 苗香雯, 马承伟. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [25] 陈东, 谢继红. 热泵干燥装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [26] 张璧光, 伊松林. 太阳能及热泵干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [27] 吕君, 魏娟, 张振涛, 等. 热泵烤烟系统性能的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 63-67.
- Lv Jun, Wei Juan, Zhang Zhentao, et al. Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp1): 63-67. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈瑞娟, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜粉品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 48-53.
- Chen Ruijuan, Bi Jinfeng, Chen Qinqin, et al. Effects of different drying methods on carrot powder quality[J]. Food Science, 2014, 35(11): 48-53. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘美娟, 吴本刚, 潘忠礼, 等. 不同干燥技术下胡萝卜丁的干燥特性及品质研究[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 158-163.
- Liu Meijuan, Wu Bengang, Pan Zhongli, et al. Study on the drying characteristics and quality of carrot dices with different drying methods[J]. Food Industry, 2018, 39(1): 158-163. (in Chinese with English abstract)
- [30] Abdul-Hamid Z, Luan Y S. Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran[J]. Food Chemistry, 2000, 68(1): 15-19.

Drying effect of carrot in drying greenhouse combined with heat pump system

Xie Honglei¹, Shang Chunyu², Whang Shubin¹, Sun Liwei¹, Li Caini³, Hou Maomao¹, Huang Yuji^{1*}, Zhong Fenglin¹

(1. College of Horticulture of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Horticulture of Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Food Science of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Vegetables are more popular to be added into food after drying. But the cost of vegetable drying technology is relatively high, failing to meet the needs of the food industry at present. In this study, a combined system of drying greenhouse and heat pump was designed to dry vegetables at a low cost. Some structural parameters were designed in the dry greenhouse, according to the actual working environment of test sites, including the deviation angle, roof structure, roof inclination angle, and ventilation system. A three-stage heat pump was developed to combine the drying greenhouse. Specifically, the three condensers were taken as a whole, where the low-temperature air was heated to a high temperature through three stages, and then put into the drying area for vegetable drying. In three evaporators, the high-temperature air was cooled to a low temperature for the next cycle in the condenser. Carrots were selected as experimental materials, aiming to determine the performance index and drying effect of the system. A field experiment was carried out in Quanzhou City, Fujian Province, China from March 25, 2019 to April 25, 2019. The solar radiation intensity and the temperature inside and outside the drying greenhouse were firstly measured, then the performance indexes of the heat pump were evaluated, and finally, the quality indexes of the carrot were collected during the test. The experimental results showed that the dry greenhouse provided a better thermal insulation performance than before. Specifically, the average solar radiation indoor was 526 W/m², the average temperature in the daytime was 6.4°C (higher than that in the outdoor), and the average temperature at night was 4°C (higher than that in the outdoor). Furthermore, the COP of the system increased by 26%-29%, compared with the heat pump individually. In system parameters, the drying temperature, loading capacity, and wind speed posed significant effects on the quality of dried carrots. Under the conditions of drying temperature of 60°C, wind speed of 2 m/s, and loading capacity of 2 000 kg, the quality indexes of dried carrots were better, with the average color (*a* * value) of 31.27, the average rehydration ratio of 5.42, the average vitamin C of 1.51 mg/g, the average total sugar of 12.36 %, and the average carotenoid of 0.68 mg/g. The economic indicators showed that the processing capacity of fresh carrots was 80 kg/h, the discharge of dry carrots was 18.8 kg/h, while the power consumption was 53.5 (kW·h)/h, and the production cost of dry carrots was 2.25 yuan/kg. In the whole, an attempt was made to explore new technology of vegetable drying during this time, particularly combining the greenhouse and heat pump. A better performance was achieved for the higher quality of carrots than before. The subsequent investigation can be focused on how to better retain the nutrients of vegetables, such as the updated drying medium of the heat pump unit for faster heat transmission during drying. The findings can provide an insightful theoretical idea and scientific support to the technical exploration on the food supply of bulk carrot after drying.

Keywords: drying; quality control; greenhouse; heat pump; carrot pudding