

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.02.039

热泵温度对白萝卜干燥速率及品质的影响

Effect of different heat pump temperatures on drying rate
and quality of white radish

余洋洋^{1,2} 唐道邦^{1,2} 温靖^{1,2} 吴继军^{1,2}

YU Yang-yang^{1,2} TANG Dao-bang^{1,2} WEN Jing^{1,2} WU Ji-jun^{1,2}

余元善^{1,2} 安可婧^{1,2} 邹颖^{1,2}

YU Yuan-shan^{1,2} AN Ke-jing^{1,2} ZOU Ying^{1,2}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东 广州 510610;

2. 广东省农产品加工重点实验室, 广东 广州 510610)

(1. *Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510610, China*; 2. *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou, Guangdong 510610, China*)

摘要:分别以热泵温度 50, 55, 60, 65 °C 对白萝卜进行干燥, 比较不同热泵温度下的白萝卜干燥速率、色泽、营养成分、复水率、微观组织结构等。结果表明: 热泵温度 50, 55, 60, 65 °C 下, 白萝卜含水量降至 $(8 \pm 1)\%$ 分别需 12, 11, 10, 9 h; 热泵温度 55, 60 °C 对白萝卜色泽保持较好; 影响白萝卜干复水率的热泵温度依次为 55 °C > 60 °C > 50 °C > 65 °C, 其中 55, 60 °C 下差异不显著 ($P > 0.05$); 白萝卜干总糖、蛋白质和 V_C 含量以热泵温度 50 °C 干燥的较高, 且随热泵温度的升高而降低; 而热泵温度过低或过高都会对产品品质产生不利影响。综合考虑, 热泵温度 55 °C 可作为白萝卜热泵干燥的最佳干燥温度, 此条件下获得的白萝卜干具有最佳的综合品质。

关键词:白萝卜; 热泵温度; 干燥速率; 品质

Abstract: In order to explore the effects of different heat pump temperatures on the drying rate and quality of white radish during drying, heat pumps at 50, 55, 60, 65 °C were designed to dry white radish. The drying rate, color, nutrition, rehydration ratio and micro-structure of white radish at different heat pump temperatures were compared. The results showed that the moisture content of white radish decreased to $(8 \pm 1)\%$ at 50, 55, 60, 65 °C heat pump temperatures, which required 12, 11, 10, 9 hours respectively. Hot air drying at different temperatures had

certain effects on the physical and chemical properties of white radish. The color of white radish was maintained well by heat pump drying at 55 °C and 60 °C. The rehydration ratio of white radish was 55 °C, 60 °C, 50 °C, 65 °C from large to small, and the difference between 55 °C and 60 °C was not significant. The total sugar, protein and vitamin C content of dried radish was higher by heat pump drying at 50 °C, and increased with the increase of temperature. In general, too low or too high temperature of heat pump will adversely affect the quality of products. Considering the product quality, energy consumption and drying time, it is considered that 55 °C is the best drying temperature for heat pump drying of radish, and the dried radish obtained at this temperature has the best comprehensive quality.

Keywords: white radish; heat pump temperature; drying rate; quality

白萝卜 (*Raphanus sativus*) 又名莱菔、芦菔、土人参等, 原产欧洲, 十字花科萝卜属根菜类蔬菜的主要品种之一^[1]。白萝卜中含有蛋白质、脂肪、多糖、膳食纤维、芥子油苷、胡萝卜素、V_C、V_E、钙、铁、锌等^[2], 具有丰富的营养价值和防病保健功能。新鲜白萝卜水分活度高, 易腐烂、糠心、存放不方便等^[3]。近几年来, 干燥是白萝卜加工的重要方式, 萝卜干风味独特, 深受人们喜爱, 市场前景广阔。而传统的干制方法为自然干制法, 容易受微生物污染、气候变化等多方面的影响; 热风干燥是目前最常用的干燥技术, 具有设备简单、操作容易和成本低廉等优势^[4], 但热风干燥能源消耗较大、干燥不均, 产品品质参

基金项目:广东省科技计划项目(编号:2018B020241003)

作者简介:余洋洋, 男, 广东省农业科学院实习员, 硕士。

通信作者:温靖(1978—), 女, 广东省农业科学院研究员, 硕士。

E-mail: jingw988@163.com

收稿日期:2019-10-09

差不齐^[5];微波干燥具有干燥时间短、热效率高、清洁生产且兼有杀菌作用等特点,但设备成本高,在农产品加工企业运用较少^[6];王鑫等^[7]通过真空远红外干燥设备对白萝卜干燥进行了研究,结果表明:热效率高,干燥时间短,细胞破损、变形少,可以较好地保留新鲜食品中的营养成分,但现在多数干燥设备的研究基于微型企业或实验室,不能满足企业的规模化生产^[8]。

目前,热泵干燥技术(HPD)能够有效利用热源,不仅能较好地保留物料中的热敏性物质,还具有“高效节能、环境友好”优势,在蔬菜加工领域得到了迅速推广^[9]。蓝炎阳等^[10]研究显示,热泵干燥后产品可很好地保持各种营养成分,减少营养损失。秦学磊等^[11]研究发现,热泵干燥的胡萝卜叶绿素保留最多,含量最高,表面孔径较大,收缩程度最小,并认为采用热泵干燥的胡萝卜干制品的综合品质最好。詹歌等^[12]研究表明,热泵干燥的菊花样品抗氧化性(自由基清除能力、脂质过氧化抑制能力)、感官评分显著高于热风干燥的菊花样品。林羨等^[13]研究表明,热泵干燥温度对龙眼的干燥效果影响最显著。热泵温度是影响物料干燥品质的重要因素,目前,关于热泵温度对白萝卜干燥品质影响的研究尚未见报道。

试验拟采用不同热泵温度对白萝卜进行干燥,研究热泵温度对白萝卜干燥速率、营养成分及微观结构等的影响,为热泵干燥技术在白萝卜干加工中的应用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

白萝卜:短叶 13 号,水分含量(95.3±0.8)%,广东省萝卜产业园。

1.2 仪 器 与 设 备

高温热泵干燥箱:GHRH-20 型,广东省农业机械研究所;

紫外分光光度计:UV-1800 型,日本岛津公司;

高效液相色谱仪:LC-20A 型,日本岛津公司;

全自动色差仪:Ultra Scan VIS 型,美国 Hunter Lab 公司;

智能超声清洗机:DL-800B 型,上海之信仪器有限公司。

1.3 干 燥 方 法

将白萝卜均匀切成长度约 60 mm,厚度 5 mm,均匀铺在干燥盘上,热泵干燥条件为风速 1.0 m/s,温度分别为 50,55,60,65 ℃,干燥至水分含量为(8±1)%。

1.4 指 标 测 定

1.4.1 干基含水率 按 GB 5009.3—2010 执行。

1.4.2 脱水速率 按式(1)计算脱水速率。

$$R = (W_0 - W_t) / T, \quad (1)$$

式中:

R ——脱水速率,g/h;

W_0 ——物料初始含水量,g;

W_t ——干燥 t 时刻物料含水量,g;

T ——干燥过程总时间,h。

1.4.3 色泽 采用色差计测定。其中 L^* 表示样品黑白程度; a^* 代表样品红绿程度; b^* 表示样品红蓝程度;以干燥前白萝卜为对照, ΔE 代表干燥前后色泽变化。

1.4.4 总糖 按 GB/T 15672—2009 执行。

1.4.5 蛋白质 按 GB/T 5009.5—2010 执行。

1.4.6 脂肪 按 GB/T 5009.6—2016 执行。

1.4.7 V_c 按 GB/T 6195—1986 执行。

1.4.8 复水率 将干燥后的白萝卜干放入 40 ℃ 去离子水中 2 h,使其充分吸水,然后称量^[14],按式(2)计算白萝卜的复水率。

$$RR = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

RR ——复水率,%;

m_1 ——白萝卜干燥样品质量,g;

m_2 ——复水后白萝卜质量,g。

1.4.9 微观结构 将样品剪切后固定在样品架上,经过黏台离子溅射镀金后,使用环境扫描电镜(ESEM)观察并拍照。

1.4.10 数据分析 试验结果以(平均数±标准差)表示。利用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,显著水平 $P \leq 0.05$,字母不同表示差异显著。

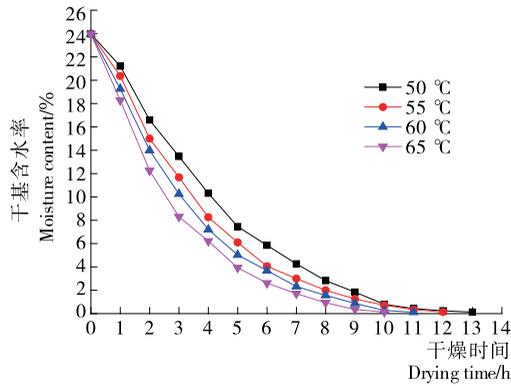
2 结果与分析

2.1 对白萝卜干燥特性的影响

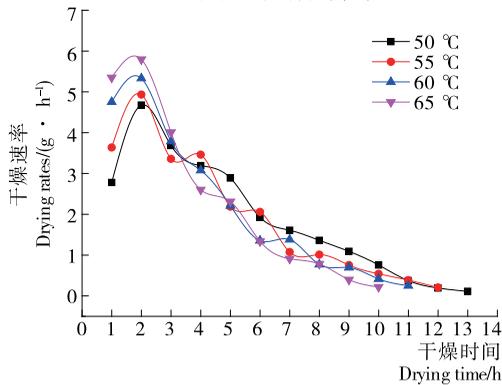
由图 1 可知,热泵温度 50,55,60,65 ℃ 下,白萝卜含水量降至(8±1)%分别需 12,11,10,9 h。白萝卜含水量随干燥时间的增加而降低,且随着热泵温度的升高,干燥时间缩短,热泵温度越高,水分含量下降越快。白萝卜失水速率曲线在初始阶段快速增长,干燥 2 h 后到达峰值进入短暂的恒速干燥阶段,再缓慢下降进入降速干燥阶段至失水速率渐渐变得平缓并趋近于 0。当热泵温度为 50,55,60,65 ℃ 时,最大干燥速率分别为 4.69,4.94,5.35,5.81 g/h。热泵温度增加提高了白萝卜对热能的吸收量,加快了物料中水分蒸发和扩散。

2.2 对白萝卜色泽的影响

由表 1 可知,当热泵温度为 55,60 ℃ 时, L^* 分别为 77.10±2.95,76.32±2.16, a^* 分别为 2.06±0.79,1.88±0.23,均无显著性差异,但与热泵温度 50,65 ℃ 下白萝卜干的差异性显著。这可能是低温干燥过程中干燥时间长、水分高,促进了白萝卜干燥过程中褐变的发生,而高



(a) 干燥特性曲线



(b) 脱水速率曲线

图1 不同热泵温度下白萝卜干燥特性曲线和脱水速率曲线

Figure 1 Drying characteristics and drying rate curves of different heat pump drying temperature

表1 热泵温度对白萝卜色泽变化的影响

Table 1 Effects of different heat pump drying temperature on the color change of white dried turnip

热泵温度/°C	L^*	a^*	b^*	ΔE
50	71.69±1.17 ^b	1.59±0.14 ^b	18.04±1.70 ^a	7.64±0.82 ^{ab}
55	79.10±2.05 ^a	2.06±0.19 ^a	21.43±1.29 ^a	5.35±0.61 ^b
60	77.32±1.06 ^a	1.88±0.23 ^{ab}	19.93±1.09 ^a	6.69±0.91 ^b
65	73.10±1.70 ^b	1.28±0.13 ^b	20.87±1.47 ^a	8.65±0.74 ^a

温干燥促进了白萝卜中美拉德反应的发生^[15]。不同热泵温度下, b^* 差异性不显著。当热泵温度为55 °C 时, ΔE 最小,表明55 °C 热泵干燥前后白萝卜颜色变化最小。杨晓红等^[16] 研究发现干燥温度过低或过高都会使木瓜粉颜色加深。

2.3 对白萝卜营养成分的影响

由表2可知,热泵温度越高,蛋白质、总糖含量越低,可能是高温促进美拉德反应,反应所需的蛋白质、糖越多,白萝卜干中蛋白质、糖含量就越低;热泵温度65 °C 的

表2 热泵温度对白萝卜干营养成分的影响

Table 2 Effects of different heat pump drying temperature on the nutritional quality of white dried turnip

热泵温度/°C	总糖	蛋白质	脂肪	V_C
50	30.35±1.16 ^a	6.14±0.46 ^a	2.56±0.31 ^a	0.28±0.01 ^a
55	27.56±1.29 ^b	5.59±0.31 ^a	2.74±0.24 ^a	0.21±0.03 ^b
60	20.76±1.08 ^c	4.54±0.44 ^b	2.57±0.18 ^a	0.16±0.02 ^b
65	18.65±1.82 ^c	3.86±0.37 ^b	2.03±0.17 ^b	0.10±0.01 ^c

脂肪含量显著低于其他组的; V_C 含量随热泵温度的升高而降低,可能是 V_C 的热敏性高,热的作用造成 V_C 发生热氧化、热裂解。

2.4 对白萝卜复水率的影响

复水是指干制品吸收水分后复原的过程,可以反映物料由干燥引起的结构变化和细胞结构的破坏程度^[17]。复水率越高,说明干燥对产品的结构组织和细胞破坏程度越小,干制品品质越好。由图2可知,热泵温度65 °C 下的产品复水率显著低于55,60 °C 的;而热泵温度55,60 °C 下的产品复水率无显著差异;当热泵温度为55 °C 时,白萝卜组织结构破坏程度轻,具有较好的复水能力;复水能力为55 °C > 60 °C > 50 °C > 65 °C。高温破坏了组织结构,收缩率较大,复水能力降低,而低温热泵干燥形成多孔状组织结构,具有较强的复水能力^[18];50 °C 虽然温度较低,但干燥时间长,水分转移速度受到延缓,同样对白萝卜组织结构破坏严重,降低了产品复水率。

2.5 对白萝卜微观结构的影响

白萝卜干燥是一个水分减少的过程,果肉组织细胞壁结构破坏、胞壁物质皱缩,出现许多波形皱褶,宏观上果实皱缩干瘪;微观上细胞壁微丝排列由紧密有序变得松散无序^[18]。由图3可知,干燥过程中,细胞中水分快速

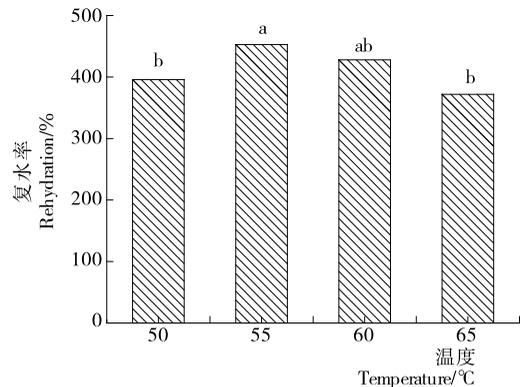


图2 热泵温度对白萝卜干复水率的影响

Figure 2 Effects of different heat pump drying temperature on rehydration rate of white dried turnip

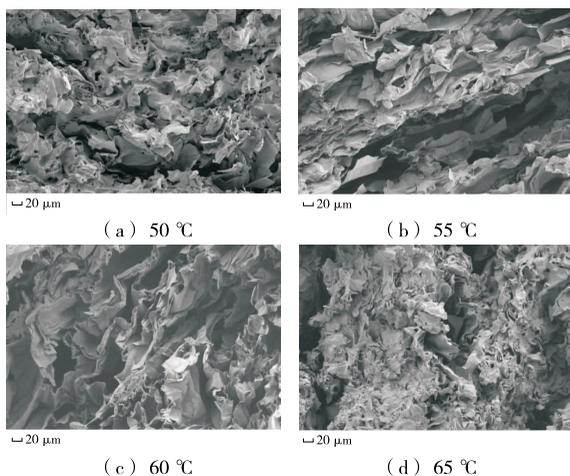


图 3 不同热泵温度下的 ESEM 图

Figure 3 ESEM photos of microstructure of white dried turnip by different heat pump drying temperature (200X)

汽化膨胀,蒸汽压力增强,导致细胞壁扩张,随着水分的脱离,细胞出现卷曲、皱缩或微小的断裂变形^[19]。当热泵温度为 55,60 °C 时,产品细胞组织保存较完整,细胞破损、变形较少,较好地延缓了蔬菜组织的皱缩与干硬,进而保持了组织超微结构的完整性,使得白萝卜干组织完好;当热泵温度为 65 °C 时,产品组织结构变形、皱缩、破损较严重,是因为高温使果皮迅速失水出现皱缩,进而破坏了蔬菜细胞结构和与果肉组织相互交织的网状结构,细胞间分离^[20]。

3 结论

试验结果表明,热泵温度 50,55,60,65 °C 下,白萝卜含水量降至(8±1)% 分别需 12,11,10,9 h;热泵温度对白萝卜理化性状均有一定影响,当热泵温度为 55,60 °C 时,白萝卜色泽保持较好;影响白萝卜干复水率的热泵温度依次为 55 °C>60 °C>50 °C>65 °C,其中 55,60 °C 的差异不显著;当热泵温度为 50 °C 时,白萝卜干总糖、蛋白质和 V_C 含量最高,且随热泵温度的升高而降低;且热泵温度 50 °C 下的白萝卜干细胞破损和变形较少,组织结构破坏较轻。综合考虑,以 55 °C 热泵干燥 11 h 比较合适,此时白萝卜干色泽、营养成分保留程度高,组织结构破坏较轻,产品品质较好。后续还需对热泵干燥过程中切片厚度、铺盘量、能耗等进行研究。

参考文献

[1] 肖志强, 钟卫权, 刘其龙. 白萝卜提取物对大鼠术后早期炎性肠梗阻血清炎症因子及胃肠动力的影响[J]. 中国当代医药, 2018, 25(20): 4-7.
 [2] SOLHI M, MOLAHOSEINI H. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, sunflower and turnip

cultivated in a soil under wastewater irrigation[J]. International Journal of Engineering Research, 2014, 3(4): 289-293.

[3] 黄镜如, 张银肖, 鲁晓翔. 纳他霉素处理对鲜切白萝卜品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(2): 36-40.
 [4] 周爱梅, 王爽, 刘欣, 等. 热泵干燥工艺对佛手凉果色泽及质构的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 135-139.
 [5] 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.
 [6] 周洪梅, 李臻峰, 李静, 等. 不同湿度环境下的胡萝卜微波干燥过程研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(5): 58-65.
 [7] 王鑫, 车刚, 万霖, 等. 白萝卜智能远红外真空干燥设备的参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 267-271.
 [8] 车刚, 王鑫, 万霖, 等. 远红外真空干燥白萝卜的实验研究[J]. 食品科技, 2015, 40(10): 34-38.
 [9] HII C L, LAW C L, SUZANNAH S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276-282.
 [10] 蓝炎阳, 陈毅勇, 林金璇, 等. 不同干燥方法对萝卜品质的影响[J]. 现代化农业, 2015(8): 38-39.
 [11] 秦学磊, 张国治, 聂波, 等. 不同干燥工艺对胡萝卜品质影响的研究[J]. 粮食加工, 2017, 42(6): 49-55.
 [12] 詹歌, 孙艳辉, 严佳慧, 等. 干燥方式对滁菊抗氧化、抑菌活性和挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 193-199.
 [13] 林菱, 邓彩玲, 徐玉娟, 等. 不同高温热泵干燥条件对龙眼干品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 30-34.
 [14] 李莉峰, 叶春苗, 韩艳秋. 不同干燥方式对南果梨干理化指标及质构特性的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 46-49.
 [15] 苟小菊, 刘冬, 杨曦, 等. 热风干燥温度对新疆红肉苹果粉品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 87-93.
 [16] 杨晓红, 赵宏亮, 丁陈, 等. 不同热风干燥温度对番木瓜粉品质与香气成分的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(2): 372-379.
 [17] 许晴晴, 陈杭君, 邵海燕, 等. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.
 [18] 张群, 刘伟, 袁洪燕. 不同温度热风干燥对蓝莓果干品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(6): 79-83.
 [19] VODA A, HOMAN N, WITEK M, et al. The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot[J]. Food Research International, 2012, 49(2): 687-693.
 [20] 张群, 刘伟, 袁洪燕. 不同温度热风干燥对蓝莓果干品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(6): 79-83.