

热泵干燥温度对柿子片干燥特性及品质的影响

Effects of heat pump drying temperature on drying characteristics and quality of persimmon slices

唐小闲^{1,2}郑 静^{1,2}任爱清^{1,2}段振华^{1,2}TANG Xiao-xian^{1,2} ZHENG Jing^{1,2} REN Ai-qing^{1,2} DUAN Zhen-hua^{1,2}韦珍珍³覃焱婷³傅海萍^{1,2}WEI Zhen-zhen³ QIN Yan-ting³ FU Hai-ping^{1,2}

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西 贺州 542899; 2. 贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899; 3. 大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034)

(1. College of Food and Biological Engineer, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China;

2. Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China;

3. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

摘要:目的: 探明热泵干燥温度对柿子片干燥特性和品质的影响。方法: 以柿子为原料, 研究干燥温度对柿子片干燥时间、干燥速率, 以及干制品色泽、硬度、复水率、单宁、总糖、维生素 C 和总酸的影响。结果: 当热泵干燥温度为 65 ℃ 时, 柿子片干燥速度快, 干燥时间短, 此时干燥产品色泽鲜艳, 与鲜果色泽相近, 复水性能好, 硬度最低, 口感最好, 总酸和维生素 C 含量最高, 总糖等营养成分含量适中。结论: 柿子片的最适热泵干燥温度为 65 ℃。

关键词: 柿子; 热泵干燥; 温度; 干燥特性; 品质

Abstract: **Objective:** In order to explore the effect of heat pump drying temperature on the drying characteristics and quality of persimmon slices; **Methods:** Taking persimmon as the raw material, the effects of different drying temperatures were compared, on the drying time, drying rate, color, hardness, rehydration rate, tannin content, total sugar, vitamin C and total acid content of dried persimmon slices. **Results:** when the heat pump drying temperature was 65 ℃, the drying rate was higher and the drying time was shorter. The dried persimmon slices dried at 65 ℃ had bright color, similar to fresh fruit color, good rehydration performance, the lowest hardness, the best taste, the

highest content of total acid and vitamin C, and moderate content of total sugar and other nutrients. **Conclusion:** The drying temperature of 65 ℃ is better than other drying temperatures when using heat pump to dry persimmon slices.

Keywords: persimmon; heat pump drying; temperature; drying characteristics; quality

柿属柿科(Ebenaceae)柿属(Diospyros L.f.), 其果实营养丰富, 含有大量的糖类、维生素、氨基酸和矿物质等营养成分^[1], 此外, 其可溶性单宁含量较高^[2], 具有很高的营养价值、药用价值和经济价值。2017 年, 中国的柿子栽培面积和产量分别占世界总栽培面积和总产量的 91.34% 和 73.28%^[3]。但现有柿果果品加工程度和产品技术含量较低^[4]。Romild 等^[5]采用 Osmo 对流干燥方法建立了柿子干燥动力学数学模型; 贾洋洋等^[6]探究了包装方式对热风—微波联合干燥柿子脆片品质的影响; 张丽等^[7]研究发现真空冷冻干燥制备的鲜柿脆片产品品质较好, 但干燥时间较长, 运转成本高, 限制了其在柿子干燥上的应用^[8-9]。

热泵干燥技术具有节省能源、传热效率高、除湿速度快、干燥环境良好、对物料品质有一定的保证等优点^[10]。陈佳歆等^[11-12]采用较低温度研究了柿子片的热泵干燥特性及产品品质, 并建立了干制模型。果蔬干制产品的营养物质及色泽、复水性、硬度均是衡量和评价干燥方式、干燥条件及产品品质的重要标准。柿子除了含有单宁、酚类物质, 还富含糖、酸、维生素 C 等, 而目前有关柿子热泵干燥对其产品品质的影响研究尚未见报道。文章

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(编号: 2020GXNSFAA259012); 广西高校中青年教师基础能力提升项目(编号: 2019KY0719); 广西自治区级大学生创新创业训练计划项目(编号: 202111838055)

作者简介: 唐小闲, 女, 贺州学院助理研究员, 硕士。

通信作者: 段振华(1965—), 男, 贺州学院教授, 博士。

E-mail: dzh65@126.com

收稿日期: 2021-06-09

拟以柿子为原料,研究不同热泵干燥温度对柿子片干燥特性及其色泽、复水性、硬度、单宁、维生素 C、总糖、总酸等营养品质的影响,以期对柿子加工业的发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验与试剂

柿子:广西恭城脆柿,市售;

无水碳酸钠、一水合没食子酸、酚酞、草酸、碳酸氢钠、2,6-二氯酚酞、亚甲蓝、酒石酸钾钠、亚铁氰化钾:分析纯,广东光华科技股份有限公司;

氢氧化钠、高岭土、磷酸、乙酸锌、盐酸、冰乙酸、浓硫酸:分析纯,西陇科学股份有限公司;

95%乙醇、葡萄糖、甲基红:分析纯,成都市科隆化学制品有限公司;

福林酚:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

硫酸铜:分析纯,广东省化学试剂工程技术研究开发中心;

苯酚:分析纯,广东光华科技股份有限公司;

L(+)抗坏血酸标准品:广东光华科技股份有限公司。

1.2 主要仪器

热泵干燥机:ZWH-KFY-BT 型,广东威而信实业有限公司;

水分测定仪:MX-50 型,日本 AND 公司;

物性测定仪:TA.XT PLUS 型,英国 Stable Micro System 公司;

色差仪:CR-400 型,日本 konica Minolta 公司;

分析天平:BSA 124 S 型,德国赛多利斯公司;

可见分光光度计:722 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

电炉:DK-98-II 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

高速台式冷冻离心机:TgL-16M 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 热泵干燥柿子片试验 将新鲜柿子去皮、清洗干净,采用切片机按柿子横切面切片,切片厚度 3 mm,取 600 g 柿子片平铺于物料框,热泵干燥温度分别为 50,55,60,65,70 °C,当热泵干燥机预热温度达到指定温度时,将带有样品的物料框置于热泵干燥机中,样品每干燥 20 min 称重 1 次,当样品水分含量≤6%(干基计)时停止干燥。

1.3.2 水分测定 采用 MX-50 型快速水分测定仪,柿子片湿基平均初始含水率为 79.72%。按式(1)计算柿子片干基含水率^[13]。

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0}, \quad (1)$$

式中:

M_t ——柿子片热泵干燥到 t 时刻的干基含水率, g/g;

m_t ——柿子片干燥至 t 时刻的质量, g;

m_0 ——柿子片干物质质量, g。

1.3.3 干燥速率 按式(2)计算干燥速率^[14]。

$$R_D = \frac{\Delta m}{m \times \Delta t}, \quad (2)$$

式中:

R_D ——干燥速率, g/(g · min);

Δm ——物料在干燥过程中 Δt 时间内迁移出去的水分质量, g;

m ——绝干物质质量, g;

Δt ——干燥时间段的值, min。

1.3.4 水分比测定 参考文献^[15]。

1.3.5 色泽测定 采用色差仪,并按式(3)计算总色差 ΔE ^[16]。

$$\Delta E = [(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中:

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——新鲜柿子片的色度值;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥后柿子片的色度值。

按式(4)和式(5)计算柿子片干的褐变度(B_1)^[17]。

$$B_1 = 100 \times \left(\frac{X - 0.31}{0.17} \right), \quad (4)$$

$$X = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)}。 \quad (5)$$

1.3.6 硬度测定 采用物性测定仪,return to start 测试模式,P2/E 圆柱型探头,测前速度 1.00 mm/s,测中、后速度 2.00 mm/s,触发力 5.0 g,测试距离 10 mm。每组平行测试 7 次,取平均值。

1.3.7 复水率测定 参考文献^[18]。

1.3.8 可溶性单宁含量测定 按 NY/T 1600—2008 执行。

1.3.9 维生素 C 含量测定 按 GB 5009.86—2016 执行。

1.3.10 总糖含量测定 采用苯酚—硫酸比色法^[11]。

1.3.11 总酸含量测定 按 GB/T 12456—2008 执行。

1.3.12 试验数据处理 采用 SPSS 26.0 软件进行差异显著性分析,Origin 8.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 对柿子干干燥特性的影响

由图 1(a)可知,热泵干燥时,柿子片达到平衡含水率所需时间受热泵干燥温度的影响,热泵干燥温度越高,柿子片干燥到指定水分含量所需时间越短。不同温度下干燥时间为 $T_{50}^{\circ}\text{C}$ (360 min) > $T_{55}^{\circ}\text{C}$ (300 min) > $T_{60}^{\circ}\text{C}$ (220 min) > $T_{65}^{\circ}\text{C}$ (200 min) > $T_{70}^{\circ}\text{C}$ (160 min)。说明一

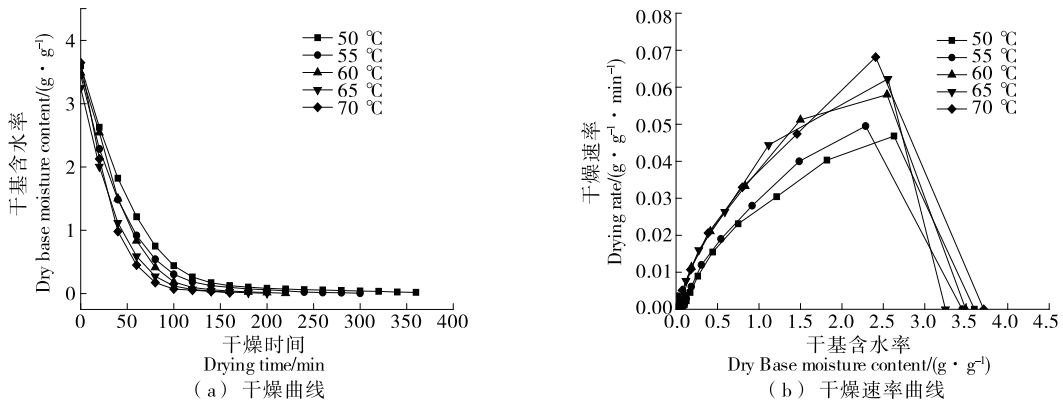


图1 柿子片热泵干燥曲线及干燥速率曲线

Figure 1 Heat pump drying curve and drying rate curve of dried persimmon slices

定条件下,适当提高热泵干燥温度可以有效减少物料干燥时间。同一热泵干燥时间下,热泵干燥设定的温度越高,柿子片干基含水率越低,因为随着热泵干燥温度的升高物料表面水分迅速蒸发,空气中相对湿度降低,柿子片表面湿度与空气介质湿度相差较大,使柿子片表面水分向干燥气体的扩散动力增加,柿子片水分散失越快,进而缩短物料干燥时间^[19]。由图1(b)可知,柿子片的干燥过程其干燥速率先升高后降低,该过程无干燥速率恒定阶段。柿子片的干燥速率随热泵干燥温度的升高而增大,70 °C下的干燥速率明显高于50 °C的。因此,在一定条件下,可通过提高热泵干燥温度来加快柿子片的干燥速率。

2.2 对柿子干色泽的影响

由图2可知,不同热泵干燥温度下,65 °C下的 L^* 值最高为67.2,高于新鲜样品的,50 °C下的最低,是因为新鲜柿子片中水分较多,对亮度有一定影响,经干燥脱水后,样品亮度提高;此外,物料的干燥过程往往伴随着褐变反应,干燥温度过低,则干燥时间长会增加物料褐变程度,从而导致干制品明亮度下降,色泽差异显著^[20]。

不同热泵干燥温度下,柿子干的 a^* 值大小为 a_{65}^* (31.75) > a_{60}^* (21.86) > a_{55}^* (21.47) > a_{50}^* (17.87) > a_{70}^* (15.69)。当热泵干燥温度为65 °C时,柿子干的 a^* 值最大,褐变度最低, a^* 值与 L^* 值指向相对应。当热泵干燥温度为65 °C时, b^* 值较大为62.02,样品呈较为鲜亮的黄色。不同干燥温度下,柿子干 ΔE 值大小为 ΔE_{60}^* (80.96) > ΔE_{55}^* (75.15) > ΔE_{70}^* (71.31) > ΔE_{65}^* (70.12) > ΔE_{50}^* (68.37),50 °C下的总色差最小,表明此温度干燥的样品与新鲜柿子片颜色最接近,其次是65 °C干燥的样品。综上,当热泵干燥温度为65 °C时,柿子片干制品色泽更好。

2.3 对柿子干硬度的影响

由图3可知,当热泵干燥温度为50~70 °C时,柿子干的硬度呈先降后升的趋势,其中60 °C下的硬度值最小,65 °C下的硬度值与其较接近,硬度适中,咀嚼性及口

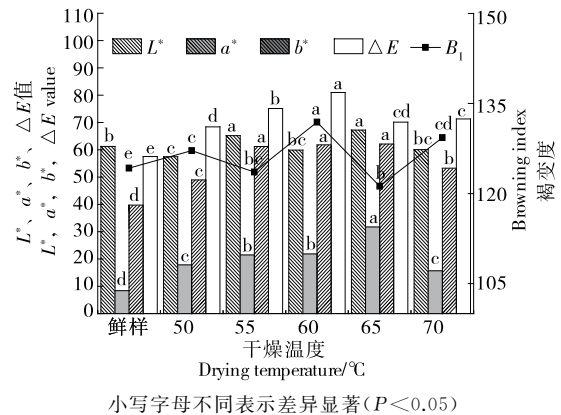
小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图2 热泵干燥温度对柿子干色泽的影响

Figure 2 Effect of heat pump drying temperature on persimmon color

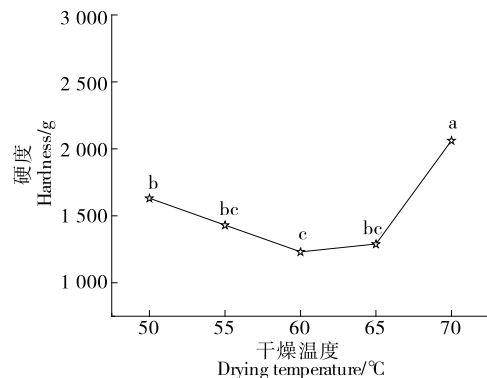
小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

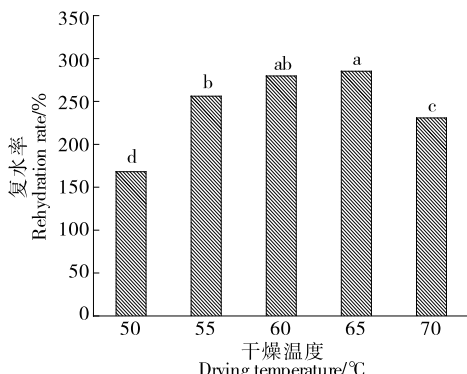
图3 热泵干燥温度对柿子干硬度的影响

Figure 3 Effect of heat pump drying temperature on drying hardness of persimmon

感较好;70 °C下的硬度值最大,较坚硬,增加了咀嚼难度。热泵干燥过程中,果干表面温度较高,表面水分散失较快,果干表面形成一层硬膜,硬度增大^[16],故70 °C下的样品硬度值偏大。

2.4 对柿子干复水率的影响

由图 4 可知,当热泵干燥温度为 50~70 ℃时,柿子干复水率随热泵干燥温度的升高先上升后下降,其中 50 ℃下的复水率最小,是因为干燥温度较低,物料水分迁移缓慢,干燥速率小,干燥耗时较长,导致物料组织结构被严重破坏,样品复水率降低^[18];60 ℃和 65 ℃下的复水率差异不明显,且值较高,说明复水性能最好;而 70 ℃下的复水率显著下降,是因为干燥温度较高,物料水分迅速蒸发对物料组织结构也有一定破坏作用,收缩率增大并形成一层硬膜,复水性降低^[21]。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 热泵干燥温度对柿子干复水率的影响

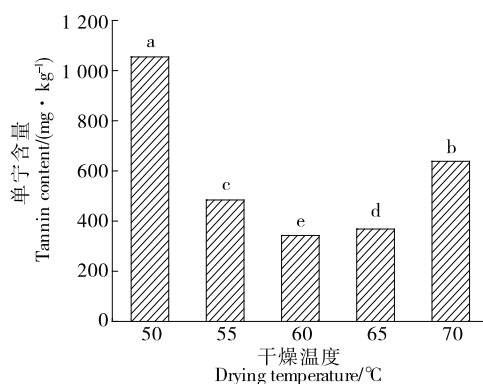
Figure 4 Effect of heat pump drying temperature on the rehydration rate of dried persimmon

2.5 对柿子干单宁含量的影响

由图 5 可知,与新鲜柿子片相比,当热泵干燥温度为 50~70 ℃时,柿子干单宁含量先下降后升高,不同热泵干燥温度下单宁含量大小为 $X_{50\text{℃}} (1\ 054.23\ \text{mg/kg}) > X_{70\text{℃}} (638.67\ \text{mg/kg}) > X_{55\text{℃}} (484.4\ \text{mg/kg}) > X_{65\text{℃}} (378.3\ \text{mg/kg}) > X_{60\text{℃}} (342.57\ \text{mg/kg})$ 。55~70 ℃下干燥所得柿子干单宁含量较新鲜柿子下降,是因为柿子中的单宁在较高温度作用下由可溶态聚合为不溶态,可溶性单宁含量降低^[22]。而 50 ℃下的单宁含量增加,是因为柿子片干燥过程中受湿、热度等物理因素影响,导致柿子片返涩,与白冬红等^[23]的研究结果一致。当热泵干燥温度为 60 ℃时,柿子干单宁含量最低,其热泵干燥温度相对其他温度而言,柿子干口感较好。

2.6 对柿子干营养品质的影响

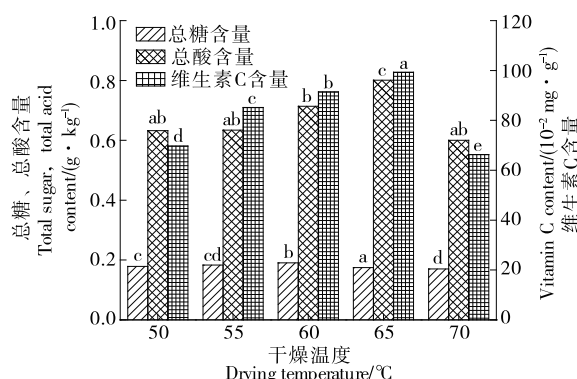
由图 6 可知,不同热泵干燥温度下,柿子干样品总糖含量为 $R_{60\text{℃}} (0.190\ 7\ \text{g/kg}) > R_{55\text{℃}} (0.183\ 3\ \text{g/kg}) > R_{50\text{℃}} (0.179\ 0\ \text{g/kg}) > R_{65\text{℃}} (0.174\ 9\ \text{g/kg}) > R_{70\text{℃}} (0.170\ 3\ \text{g/kg})$,是因为柿子片干燥过程通常存在美拉德反应,而糖类是其主要的反应原料,该反应与温度、氧气、水分及金属离子等环境因素的影响有关。当热泵干燥温度为 60 ℃时,柿子干总糖含量最高,此时温度适中且干



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 热泵干燥温度对柿子干单宁含量的影响

Figure 5 Effect of heat pump temperature on dry tannin content of persimmon



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 6 热泵干燥温度对柿子干营养品质的影响

Figure 6 Effect of heat pump drying temperature on dry nutritional quality of persimmon slices

燥时长相对较短,减少了干燥过程空气中氧气及温度对柿子片的影响,一定程度上抑制了美拉德反应,减少了柿子干糖类物质的损失。

柿子干维生素 C 含量随热泵干燥温度的升高呈先升高后降低的趋势,其中 65 ℃下的含量最高,60 ℃的次之,分别为 99.3,91.7 mg/100 g;而 70 ℃下的最低。柿子干总酸与维生素 C 含量的变化规律较相似,均随热泵干燥温度的升高而先升高后降低,65 ℃下的总酸含量最高,70 ℃下的最低。维生素属于酸类物质,对温度和氧气较敏感,物料干燥温度较高或温度较低但干燥时间较长、长时间与氧气接触均会导致物料维生素 C 保存量下降,同时降低干制品总酸含量^[24]。综上,当热泵干燥温度为 65 ℃时,柿子干总糖、维生素 C 及总酸含量保持较高,营养品质较好。

3 结论

研究表明,当热泵干燥温度为 65 ℃时,柿子片干燥时间总体上较短,比热泵干燥温度为 70 ℃时的延长了

40 min,但较热泵干燥温度为 50 ℃时的缩短了140 min。65 ℃下的柿子干颜色与鲜样最接近、色泽明亮,硬度最低,复水性能较好,总酸和维生素 C 含量最高,总糖等营养成分含量适中。综上,柿子片的最适热泵干燥温度为 65 ℃。试验仅就热泵干燥温度对柿子片干燥特性及品质影响进行了初步研究,对其货架期品质方面未有涉及,后续可结合加工和货架期方面进一步研究,以更好地探寻最合适的干燥温度。

参考文献

- [1] 刘佳,李喜宏,张姣姣,等.响应面法优化红柿协同脱涩工艺研究[J].食品工业,2016(12): 112-117.
LIU Jia, LI Xi-hong, ZHANG Jiao-jiao, et al. Optimization of the synergy de-astringency conditions for persimmon by response surface analysis[J]. The Food Industry, 2016(12): 112-117.
- [2] 施宝珠,段旭昌,吴焯婷,等.自控热泵臭氧杀菌柿饼干燥房建设与柿饼生产技术[J].食品工业,2017,38(2): 141-145.
SHI Bao-zhu, DUAN Xu-chang, WU Ye-ting, et al. Construct of auto-controlling drying room for dried persimmon with heat pump and ozone sterilizer and production technology for dried persimmon[J]. The Food Industry, 2017, 38(2): 141-145.
- [3] 覃焱婷,段振华,韦珍珍,等.柿子干燥技术的研究进展[J].食品科技,2020,45(12): 53-58.
TAN Yan-ting, DUAN Zhen-hua, WEI Zhen-zhen, et al. Research progress in drying technology of persimmon[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(12): 53-58.
- [4] 陈超锋.柿饼干燥中脱水脱涩及无损检测技术研究[D].南宁:广西大学,2019: 2-13.
CHEN Chao-feng. Study on remove of moisture soluble tannin and nondestructive testing technology of dried persimmon[D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 2-13.
- [5] SAMPAIO Romildomartins, NETO Josépiresmonteles, PEREZ Victorhaber, et al. Mathematical modeling of drying kinetics of persimmon fruits (Diospyros kaki cv. Fuyu) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(1): 1-7.
- [6] 贾洋洋,周诗晶,李春美.不同包装方式对恒温贮藏柿子脆片品质影响的比较[J].现代食品科技,2018,34(10): 196-204.
JIA Yang-yang, ZHOU Shi-jing, LI Chun-mei. Comparison of different packaging methods on the quality of persimmon chips stored at constant temperature[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(10): 196-204.
- [7] 张丽,刘腾飞,薛妍君,等.冷冻干燥温度对荠菜挥发性成分的影响[J].江苏农业学报,2015,31(4): 915-923.
ZHANG Li, LIU Teng-fei, XUE Yan-jun, et al. Effect of freeze-drying temperature on volatile components of Capsella bursa-pastoris[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2015, 31(4): 915-923.
- [8] WORKNEH T, RAGHAVAN V, GARIEPY Y. Microwave assisted hot air ventilation drying of tomato slices[C]// International Conference on Food Engineering and Biotechnology. [S.l.]: IC FEB, 2011: 150-160.
- [9] YAN C, CHEN Y. Experimental study on litchi microwave drying characteristics and its effects on the quality of litchi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 192-195.
- [10] 陈坤杰,李娟玲,张瑞合.热泵干燥技术的应用现状与展望[J].农业机械学报,2000(3): 109-111.
CHEN Kun-jie, LI Juan-ling, ZHANG Rui-he. Status and prospect of heat pump drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2000(3): 109-111.
- [11] 陈佳歆.柿片热泵干燥特性与贮藏期褐变机制研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019: 8-16.
CHEN Jia-yin. Study on characteristics of heat pump drying and mechanism of browning during storage of persimmon slices[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 8-16.
- [12] 李骅,尹文庆.柿子热泵干制实验及其干制模型的研究[J].食品工业科技,2007(7): 57-59.
LI Hua, YIN Wen-qing. Experiments on persimmon heat pump drying and its drying model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007(7): 57-59.
- [13] 麦馨允,黄斌,黄娇丽,等.白玉菇远红外干燥工艺优化及其对品质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(14): 150-157.
MAI Xin-yun, HUANG Bin, HUANG Jiao-li, et al. Optimized far-infrared drying of white Hypsizygus marmoreus and effects on quality [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45 (14): 150-157.
- [14] 李定金,段振华,刘艳,等.调味山药片真空微波干燥特性及其动力学模型[J].食品科技,2018,43(3): 86-92.
LI Ding-jin, DUAN Zhen-hua, LIU Yan, et al. Vacuum microwave drying characteristics and kinetics model of flavored yam chips[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(3): 86-92.
- [15] 唐小闲,段振华,任爱清,等.即食慈姑片微波干燥特性及动力学模型研究[J].食品与机械,2020,36(10): 177-182.
TANG Xiao-xian, DUAN Zhen-hua, REN Ai-qing, et al. Study on microwave drying characteristics of instant arrowhead slices and kinetic model[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 177-182.
- [16] 姚隆洋.芒果干燥过程品质变化及贮藏稳定性研究[D].无锡:江南大学,2020: 7-18.
YAO Long-yang. Study on the quality of mango during drying and storage stability of dried mango slices[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 7-18.
- [17] CECLU Lilianaseremet, NISTOR Oana-viorela, ANDRONOIU Doinageorgeta, et al. Development of several hybrid drying methods used to obtain red beetroot powder[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 1-7.
- [18] 余洋洋,唐道邦,温靖,等.热泵温度对白萝卜干燥速率及品质的影响[J].食品与机械,2020,36(2): 211-214.
YU Yang-yang, TANG Dao-bang, WEN Jing, et al. Effect of different heat pump temperatures on drying rate and quality of white radish[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 211-214.

(下转第 216 页)