

不同热泵干燥温度对柑橘果皮品质的比较分析

杨婉如¹, 余洋洋², 陈树鹏¹, 余元善², 傅曼琴², 卜智斌^{1,2}

(1. 广东佳宝集团有限公司, 广东潮州 515638) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 为了探究热泵干燥温度对柑橘果皮品质的影响, 以新鲜的柑橘果皮为原料, 分别对日晒(对照)和不同热泵温度(40 °C、50 °C、60 °C、70 °C、80 °C)条件干燥获得的柑橘果皮的色泽、复水比、精油含量、总黄酮含量和抗氧化活性进行了测定。结果表明: L 值随着温度的升高先增大后降低, a 值在 40 °C、50 °C、60 °C 热泵干燥和日晒干燥无显著差异 ($p>0.05$), 在温度高于 60 °C 时呈下降趋势, b 值随着温度的升高而增大, 60 °C 热泵干燥 ΔE 值最小; 当复水达到平衡时, 日晒干燥、40 °C、50 °C、60 °C 热泵干燥柑橘果皮的复水比没有显著的差别 ($p>0.05$), 且显著高于 70 °C 和 80 °C 干燥的柑橘果皮 ($p<0.05$); 精油和总黄酮的含量随着温度的升高先增大后降低, 其中在 60 °C 时, 精油和总黄酮含量最高, 分别为 2.04% 和 13.46%; DPPH 和 ABTS⁺ 的清除能力也是 60 °C 最高, 分别为 54.16% 和 37.13%。综合各项指标, 热泵干燥温度为 60 °C 时, 可以较大的保持柑橘果皮的色泽、黄酮和抗氧化性等品质指标, 为柑橘果皮热泵干燥的实际应用提供技术指导。

关键词: 柑橘果皮; 热泵干燥; 色泽; 总黄酮; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2021)06-237-243

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.6.0003

Quality of Citrus Peels Dried at Different Temperatures using Heat Pump

YANG Wan-ru¹, YU Yang-yang², CHEN Shu-peng¹, YU Yuan-shan², FU Man-qin², BU Zhi-bin^{1,2}

(1. Guangdong Jiabao Group Co. Ltd., Chaozhou 515638, China) (2. Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Sericultural and Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: To understand the effect of drying temperature on the quality of citrus peels dried using a heat pump, the colors, rehydration ratios, essential oil contents, total flavonoid contents, and antioxidant activities of the sun-dried, fresh citrus peels (control) and those dried at different temperatures (40, 50, 60, 70, and 80 °C) using a heat pump are compared. The L value first increases and then decreases with an increase in the drying temperature. The a values of the citrus peels dried using a heat pump at 40, 50, and 60 °C and those of the sun-dried peels show no significant differences ($p>0.05$). However, the a value decreases with an increase in temperature to >60 °C. In contrast, the b value increases with an increase in the drying temperature. The lowest ΔE value is obtained when the citrus peels are dried using heat pump at 60 °C. At equilibrium, the rehydration ratios of sun-dried citrus peels and the peels dried using a heat pump at 40, 50, and 60 °C exhibit insignificant differences ($p>0.05$), but these are significantly higher than those of the peels dried using a heat pump at 70 and 80 °C ($p<0.05$). The essential oil and total flavonoid contents of the peels first increase and then decrease as the drying temperature increases. At 60 °C, the highest essential oil and total flavonoid contents of 2.04% and 13.46%, respectively, are obtained. The highest DPPH and ABTS⁺ scavenging capacities of 54.16% and 37.13%, respectively, are also observed at 60 °C. Therefore, drying using a heat pump at 60 °C can allow the preservation of the quality of citrus peels, including the color, total flavonoid content, and antioxidant activity of the peels. This finding can facilitate the practical application of heat pumps in drying citrus peels.

引文格式:

杨婉如, 余洋洋, 陈树鹏, 等. 不同热泵干燥温度对柑橘果皮品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(6): 237-243

YANG Wan-ru, YU Yang-yang, CHEN Shu-peng, et al. Quality of citrus peels dried at different temperatures using heat pump [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 237-243

收稿日期: 2021-01-03

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B020225006); 广东省扬帆计划引进创新创业团队项目 (2017YT05H045); 广州市科技计划项目 (201803050010)

作者简介: 杨婉如 (1975-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 食品工程

通讯作者: 余元善 (1983-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品科学与工程

Key words: citrus peels; heat pump drying; color; total flavonoids; antioxidant

柑橘为芸香科柑橘属植物的果实,是世界上产量最大的水果^[1]。2018年我国柑橘年产量高达4138.14万t,位居世界首位,约有55%被鲜食,另外约有35%~40%被加工为柑橘罐头、柑橘汁、果冻、蜜饯^[2]。而柑橘的果皮是柑橘加工过程中产生的重要副产物,柑橘皮中富含精油、黄酮(橙皮苷、柚皮苷、苷橘皮素等)和生物碱等多种活性物质^[3,4],具有抗氧化^[5]、抗炎^[6]、抗致癌^[7]及抗动脉粥样硬化^[8]等功效。新鲜的柑橘果皮易腐烂,经过干燥加工,能降低其水分含量,抑制微生物生长繁殖和钝化酶活性,延长货架期^[9],而且可以成为我国传统中药材“陈皮”,具有“理气健脾、燥湿化痰”的功效,临床用于治疗消化不良和炎症综合征^[10];同时也是传统的食用香料,受到消费者喜爱^[11]。柑橘果皮干燥加工可以实现副产物的利用,提高经济价值。

不同的干燥工艺会对柑橘果皮在营养品质及感官特性产生不同的影响。目前,柑橘果皮的干燥多采用传统的日晒干燥,存在干燥速率慢,易受天气条件影响等问题。热泵干燥是一种新型的干燥技术,主要利用回收干燥室排出高温气体用于加热被干燥介质,可以减少热量损失和气体的排放污染^[12]。热泵干燥不仅具有“高效节能、环境友好”优势;同时,能较好地保留物料中的热敏性物质,提高干燥对象的感官品质和营养品质^[13],在蔬菜加工领域得到了迅速推广。龚丽等^[14]研究了不同条件热泵干燥对陈皮干燥特性和外观品质的影响,优化了热泵干燥的工艺参数,而缺少热泵对陈皮的生物活性影响的研究。目前,热泵干燥对柑橘果皮品质影响的研究还较少。本研究通过设置日晒干燥(对照)和不同热泵温度(40℃、50℃、60℃、70℃、80℃)对鲜柑橘果皮进行干燥处理,进而分析热泵干燥温度对柑橘果皮的感官和营养品质的影响,以期对柑橘果皮热泵干燥工艺的改造升级提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜柑橘采摘于广东省潮州市,挑选无斑点、颜色和大小基本一致的柑橘为试验原料,清洗,擦干表面水分,八分切,手工去皮。

芦丁(纯度≥95%)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐

(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS) 购于国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇购于天津市天新精细化工开发中心。

1.2 仪器与设备

热泵干燥设备(型号WRH-100TB1S),广东威而信实业有限公司;UV-1800型紫外分光光度计,日本岛津公司;Ultra Scan VIS型全自动色差仪,美国Hunter Lab公司;DL-800B型智能超声清洗机,上海之信仪器有限公司;台式高速冷冻离心机,赛默飞世尔科技公司;ALC-210.4型分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 橘皮干燥

传统晒干:将橘皮平铺在纱网上,置于阳光直射下,温度20~25℃之间。热泵干燥:称取500.00g橘皮均匀平铺于热泵燥箱的加热板上,风速0.2m/s,分别控制干燥温度在40℃、50℃、60℃、70℃、80℃,每隔15min快速取出称重(精确至0.01g)并做记录。当橘皮水分含量达到0.05(g/g d.w.)停止干燥,样品密封避光保存,以备指标测定;每组试验重复三次。

1.3.2 色泽

采用色差仪对柑橘果皮进行色泽测量,分别用L值、a值、b值和ΔE值表示。其中L值为亮度值,a值为红绿值,b值为黄蓝值,ΔE值为总色差值,ΔE值越大说明干燥过程中橘皮色泽变化越大,ΔE根据公式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 - (a - a_0)^2 - (b - b_0)^2} \quad (1)$$

式中: L_0 、 a_0 、 b_0 指新鲜橘皮的色泽值; L 、 a 、 b 指干燥橘皮的色泽值。

1.3.3 复水性

复水比(rehydration ratio, RR)的测试参考徐明月等^[15]人的方法。精确称取5g左右的干燥橘皮于烧杯中,置于100mL的蒸馏水中,在30℃恒温条件下进行复水试验。每隔20min称重样品一次,称重前需用滤纸轻轻吸去表面水分,复水2h后停止试验。每组试验重复三次,取平均值。复水比计算公式(2)计算比:

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \quad (2)$$

式中: m_r 为干燥橘皮复水后的质量(g); m_d 为干燥橘皮

质量 (g)。

1.3.4 精油含量

精油含量的测定参考邢颖等^[16]人的方法。准确称取不同热泵温度干燥后的柑橘果皮样品 20~25 g, 切碎, 装入 500 mL 蒸馏瓶中, 加适量的玻璃珠, 加入 250 mL 的蒸馏水, 混匀, 连接挥发油提取器和冷凝管, 连续提取 2 h, 油水动态分离, 蒸馏结束, 收集精油。精油的含量得(C)根据公式(3)计算。

$$C/\% = \frac{M_2}{M_1(1-W)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: C 为精油含量, %; M_1 为不同方法干燥后样品的质量, g; M_2 为精油的质量, g; W 为样品的含水率, %。

1.3.5 总黄酮含量

总黄酮的测定参考 Osa Richard 等^[17]人的方法。精确称取干燥柑橘皮粉末 2 g, 加入 20 倍的 70% 乙醇, 在超声波功率 400 W 下提取 30 min, 过滤, 滤渣在同样条件下再提取一次, 合并两次滤液于 50 mL 容量瓶中, 定容。以芦丁为标准品, 制出标准曲线。柑橘果皮中总黄酮的含量以 mg (芦丁当量) / g (柑橘果皮干质量) 表示, 根据公式 (4) 计算:

$$\text{总黄酮含量} / (\text{mg} / \text{g}) = \frac{c \times V_1 \times V_2}{m \times (1-X) \times V_3} \quad (4)$$

式中: C: 从标准曲线中得出的总黄酮浓度, mg/mL; V_1 : 稀释体积, mL; V_2 : 样液体积, mL; V_3 : 取样体积, mL; X: 湿基含水率, %; m: 样品质量, g。

1.3.6 抗氧化

样品制备: 准确称取 2 g 柑橘果皮加入 20 mL 80% 甲醇混合均匀, 超声提取 30 h, 然后于 5000 r/min 下离心 10 min, 取上清液过滤, 滤渣用 20 mL 80% 甲醇重复提取、离心、过滤, 用少量 80% 甲醇洗涤滤渣并过滤, 合并提取液用 80% 甲醇定容至 50 mL, 用于抗氧化能力分析。

1.3.6.1 DPPH 自由基清除实验

采用 DPPH 法测定柑橘果皮的抗氧化能力, 参考

Sokół-Lętońska Anna 等^[18]的方法并稍作修改。制备 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 工作液, 置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 、棕色瓶避光储存。移取 0.5 mL 待测样品, 加入 2.5 mL DPPH 工作液, 涡旋振荡混匀, 避光 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min, 在 517 nm 波长处测吸光度。以无水乙醇作为空白对照。按照公式 (5) 计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率} / \% = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: A_0 为 0.5 mL 无水乙醇和 2.5 mL DPPH 工作液的吸光度; A_1 为 0.5 mL 样品溶液和 2.5 mL DPPH 工作液的吸光度; A_2 为 0.5 mL 样品溶液和 2.5 mL 无水乙醇的吸光度。

1.3.6.2 ABTS⁺自由基清除实验

参考楚文靖等^[19]人的方法并作适当修改。取 440 μL 过硫酸钾溶液 (140 mM) 加入 25 mL ABTS⁺ (7 mM) 溶液混合, 制备 ABTS⁺ 自由基储备液, 室温避光反应 16 h。使用前用无水乙醇稀释 ABTS⁺ 储备液, 使其在 734 nm 波长处的吸光度为 0.700 \pm 0.002。取样品溶液 0.3 mL, 加入 2.7 mL ABTS⁺ 稀释液, 在室温避光反应 10 min, 于 734 nm 波长下测定吸光度。ABTS⁺ 自由基清除率如式 (6) 所示计算。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率} (\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: A_0 为 0.3 mL 蒸馏水和 2.7 mL ABTS⁺ 稀释液的吸光度; A_1 为 0.3 mL 样品溶液和 2.7 mL ABTS⁺ 稀释液的吸光度。

1.4 数据分析

所有试验均采用 3 个重复, 数据均以平均值 \pm 标准差表示。利用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。并用 Duncan 显著性分析, 当 ($p < 0.05$) 时认为差异显著。

2 结果与讨论

2.1 色泽

表 1 不同干燥温度对柑橘果皮色泽的影响

Table 1 Effects of different drying temperatures on color of dried citrus peels

| | 新鲜 | 日晒 | 40 $^{\circ}\text{C}$ | 50 $^{\circ}\text{C}$ | 60 $^{\circ}\text{C}$ | 70 $^{\circ}\text{C}$ | 80 $^{\circ}\text{C}$ |
|------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| L | 43.56 \pm 2.86 ^a | 34.26 \pm 1.53 ^{bc} | 31.26 \pm 2.06 ^{bc} | 32.16 \pm 1.81 ^c | 35.06 \pm 1.34 ^b | 31.62 \pm 2.09 ^{bc} | 29.16 \pm 1.87 ^c |
| a | 23.34 \pm 1.91 ^a | 20.01 \pm 1.08 ^b | 19.91 \pm 1.27 ^b | 20.29 \pm 1.58 ^b | 19.71 \pm 0.95 ^b | 16.81 \pm 1.16 ^c | 14.26 \pm 1.31 ^c |
| b | 8.26 \pm 0.61 ^b | 7.84 \pm 0.86 ^b | 6.346 \pm 1.02 ^b | 7.12 \pm 0.97 ^b | 8.64 \pm 0.67 ^{ab} | 9.26 \pm 0.34 ^a | 10.73 \pm 0.73 ^a |
| ΔE | / | 9.83 \pm 0.91 ^{cd} | 12.91 \pm 0.76 ^{cb} | 11.85 \pm 1.04 ^c | 9.25 \pm 0.69 ^d | 13.64 \pm 1.28 ^b | 17.20 \pm 1.32 ^a |

注: 同行不同的字母表示显著性差异 ($p < 0.05$)。

色泽直接决定了消费者的接受程度, 是柑橘果皮干燥的一个重要指标。如表 1 所示, 日晒和不同热泵温度干燥的柑橘果皮色泽与鲜柑橘果皮相比均发生了

明显变化。随热泵干燥温度的升高, 柑橘果皮亮度 (L^*) 值, 整体呈先增加后减小的趋势, 热泵温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 柑橘果皮的亮度值最大, 达到 35.06, 且与

其它处理差异显著 ($p<0.05$), 然后亮度值随着热泵温度升高而降低, 可能是因为高温提高了美拉德反应和多酚类物质的氧化程度所致^[20]; 红度 (a) 值方面, 日晒干燥、40 °C 热泵干燥、50 °C 热泵干燥、60 °C 热泵干燥的柑橘果皮红色值没有显著差别 ($p<0.05$), 然而, 当干燥温度大于 60 °C (70 °C、80 °C) 时红度值显著降低 ($p<0.05$), 80 °C 干燥时红度值最低为 10.73, 可能是高温影响了色素的降解以及聚合^[21]; 黄度 (b) 值方面, 黄色值随着热泵温度的升高而升高。以新鲜柑橘果皮为参考, ΔE 值随着温度的升高呈先降低后升高趋势, 60 °C 热泵干燥的柑橘果皮 ΔE 值最小, 为 9.25, 且与其它处理差异显著 ($p<0.05$), 说明该温度下柑橘果皮的色泽与柑橘果皮相比差异最小。龚丽等^[14]研究了不同热泵干燥条件对陈皮干燥特性的影响, 但综合干燥效率、能耗和产品品质等因素, 同样认为热泵温度为 60 °C 为柑橘果皮干燥的最佳条件。

2.2 复水比

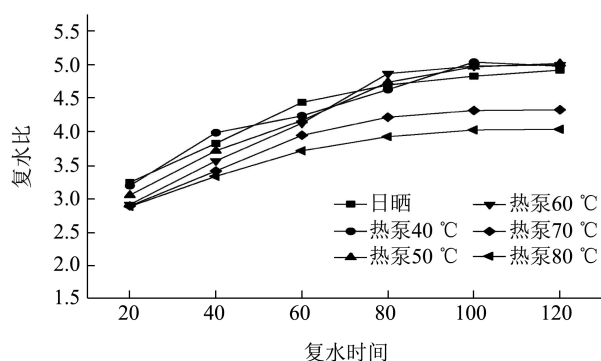


图1 不同干燥温度对柑橘果皮复水比的影响

Fig.1 Effect of different drying conditions on the rehydration of citrus peels

复水性能能够反映柑橘果皮的结构特征, 复水比越大, 其吸水能力性能越好, 表示干燥过程中对其结构的破坏程度越小。如图1所示, 柑橘果皮的复水比均随复水时间的增加而增加。日晒和不同温度热泵干燥柑橘皮在复水 80 min 时复水比增加趋于平缓, 即不同条件下干燥柑橘皮的复水平衡时间没有显著的差别。同时, 当复水达到平衡时, 80 °C 干燥的样品复水比最小为 4.03, 而 60 °C 干燥的样品复水比最大为 4.98。但日晒干燥、40 °C、50 °C、60 °C 热泵干燥柑橘果皮的复水比没有显著的差别, 且显著高于 70 °C 和 80 °C 干燥的柑橘果皮 ($p<0.05$)。有研究表明柑橘果皮收缩率虽热泵温度的升高而升高^[14], 样品的收缩率升高, 组织结构变致密, 从而影响水分的吸收。导致这一现象的可能原因是柑橘果皮表面的水分随着温度的升高而快速蒸发, 其表面组织结构受到部分破坏, 逐渐变

硬, 阻止了水分的进入, 因而复水能力降低。相似地, 吕朝燕等^[22]对热风干燥方竹笋的研究表明, 随着温度升高, 方竹笋的复水性呈先增大后减小的趋势, 与本实验结果一致。

2.3 精油含量

精油是柑橘果皮中重要的风味物质组成成分。由图2可知, 与新鲜柑橘皮相比, 不同条件干燥均显著降低了柑橘果皮精油的含量 ($p<0.05$)。在干燥后的橘皮中, 随着干燥温度升高, 柑橘皮中精油的含量呈现先增后减的趋势, 60 °C 热泵干燥条件下精油含量最高, 达到 20.04, 显著高于 40 °C 和 50 °C 条件下的含量, 可能是在较低的温度条件下, 需要较长的干燥时间, 柑橘果皮中的精油大量地挥发; 而在高于 60 °C 热泵温度条件下精油含量呈现降低趋势, 80 °C 热泵干燥条件下精油含量最高, 为 1.51。主要原因是柑橘果皮在高温干燥过程中精油会随着原料中水分的向外迁移而快速挥发, 导致柑橘果皮精油在干燥过程中损失较多, 从而精油的含量降低^[23], 其次, 高温破坏了柑橘果皮的组织结构, 导致其精油的含量降低^[24]。王月月等^[25]对洋葱的研究同样发现, 温干燥度对其精油含量的影响较大。日晒干燥的柑橘果皮精油含量和 60 °C 热泵干燥的精油含量没有显著区别。因此, 采用 60 °C 热泵干燥的柑橘果皮中精油含量最高。

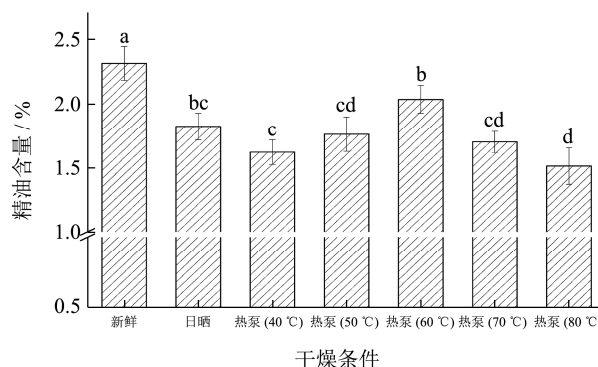


图2 干燥温度对柑橘果皮精油含量的影响

Fig.2 Effects of different drying temperatures on the content of essential oils of citrus peels

注: 图中不同小写字母表示显著性差异 ($p<0.05$), 下同。

2.4 总黄酮含量

黄酮是柑橘果皮中的重要活性成分。由图3可知, 新鲜柑橘皮中总黄酮的含量为 15.34 mg/g, 经过干燥之后橘皮中的总黄酮含量均显著降低 ($p<0.05$)。不同条件干燥的柑橘皮中黄酮含量从大到小依次为: 60 °C 热泵 > 50 °C 热泵 > 40 °C 热泵 > 日晒 > 75 °C 热泵 > 55 °C 热泵。日晒、40 °C 热泵、50 °C 热泵干燥所

得的柑橘皮中黄酮含量没有显著差别 ($p < 0.05$), 而热泵 60 °C 条件下所得到的黄酮含量最高, 达到 13.46 mg/g。然而, 当热泵温度大于 60 °C 时 (70 °C、80 °C), 柑橘皮黄酮含量显著小于 60 °C 热泵干燥。这可能是由于随着温度的升高促进植物组织细胞破碎和共价键的断裂, 促进更多黄酮类物质的释放^[26]; 但当温度过高时, 高温加速了黄酮类物质发生了分解或聚合反应, 破坏了黄酮的化学结构, 导致其含量降低^[27]。因此, 建议柑橘果皮的热泵干燥温度为 60 °C, 能够较大程度地减少总黄酮的损失。

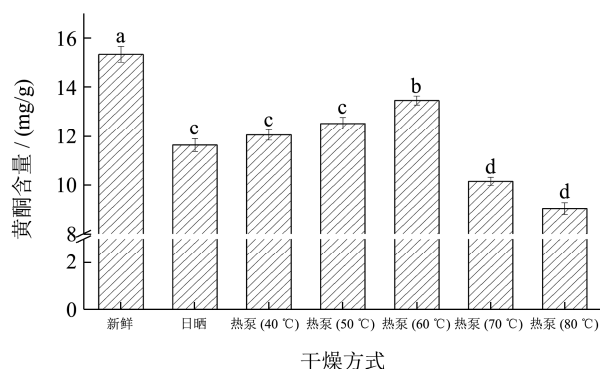


图3 不同干燥温度对柑橘果皮总黄酮含量的影响

Fig.3 Effects of different drying temperatures on the content of flavonoids of dried citrus peels

2.5 抗氧化活性

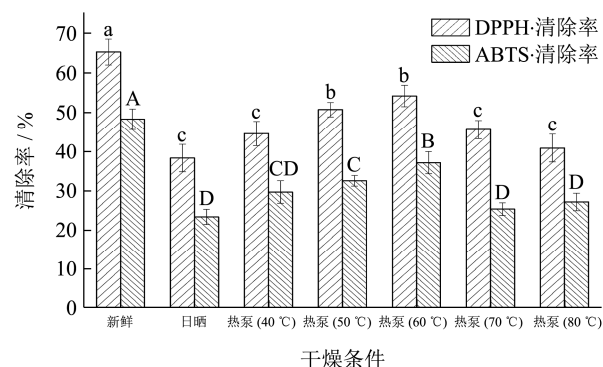


图4 干燥温度对柑橘果皮抗氧化活性的影响

Fig.4 Effects of different drying temperatures on antioxidant activity of citrus peels

DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除率是最常见的抗氧化活性的评价方法。由图 4 可知, 新鲜柑橘皮的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除率分别为 65.26% 和 48.26%, 均显著高于干燥后的柑橘皮 ($p < 0.05$), 本次 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除试验结果的变化趋势较一致。日晒干燥柑橘皮的 DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率最低, 分别为 38.32% 和 23.34%; 60 °C 热泵干燥柑橘皮的抗氧化 (DPPH、ABTS⁺) 能力最强, 分别为 54.16% 和 37.13%, 显著

高于其它干燥温度的柑橘皮 ($p < 0.05$)。随着干燥温度的升高 (75 °C、85 °C), 柑橘果皮清除 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺清除率能力逐渐升高, 当干燥温度高于 60 °C 时, 柑橘果皮抗氧化能力开始下降。同时, 不同热泵干燥温度下, 柑橘果皮的抗氧化 (DPPH、ABTS⁺) 能力与总黄酮和精油含量变化趋势相同, 说明柑橘果皮的抗氧化活性与其中的总黄酮和精油含量相关。相似地, 邓俊琳等^[28]研究了不同干燥温度对余甘子抗氧化活性的影响, 随着温度的升高, 其抗氧化活性先升高后降低, 且抗氧化活性与黄酮含量有极大相关性。

3 结论

本文研究了不同热泵干燥温度对柑橘皮干燥品质的影响, 在 60 °C 热泵干燥温度条件下, 柑橘皮色泽与鲜果相比变化最小, 精油和总黄酮含量最高, 抗氧化性最强, 是柑橘果皮热泵干燥的最佳温度条件, 为柑橘果皮热泵干燥工艺的改造升级提供理论支持。然而, 本实验仅就热泵干燥温度对柑橘果皮加工产品品质的影响进行了初步研究, 有关不同热泵干燥温度对柑橘皮黄酮单组分、抑菌性、生物活性等影响的机理有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 李勋兰,洪林,杨蕾,等.11个柑橘品种果实营养成分分析与品质综合评价[J].食品科学,2020,41(8):228-233
LI Xun-lan, HONG Lin, YANG Lei, et al. Analysis of nutritional components and comprehensive quality evaluation of citrusfruit from eleven varieties [J]. Food Science, 2020, 41(8): 228-233
- [2] 李绮丽,孙俊杰,单杨,等.不同柑橘品种全果制汁适宜性分析[J].食品科学,2019,40(13):36-44
LI Qi-li, SUN Jun-jie, SHAN Yang, et al. Suitability evaluation of different citrus varieties for whole fruit juice processing [J]. Food Science, 2019, 40(13): 36-44
- [3] Ko H C, Jang M G, Oh J M, et al. Changes in chemical composition and antioxidant activity of dried citrus unshiu peel after roasting [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 131: 109612
- [4] 刘洋,方迅,胡爽,等.高效液相色谱法检测不同品种柑橘类果皮多甲氧基黄酮[J].食品研究与开发,2020,41(15):123-128
LIU Yang, FANG Xun, HU Shuang, et al. Determination of polymethoxy flavonoids in different varieties of citrus peel by high performance liquid chromatography [J]. Food Research and Development, 2020, 41(15): 123-128

- [5] 张东峰,陈家豪,郭静,等.7种柑橘多酚、黄酮含量及其抗氧化活性比较研究[J].食品研究与开发,2019,40(6):69-74
ZHANG Dong-feng, CHEN Jia-hao, GUO Jing, et al. Comparative study on the polyphenol, flavonoid and antioxidant activity of seven varieties of citrus [J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 69-74
- [6] Zheng G, Chao Y, Liu M, et al. Evaluation of dynamic changes in the bioactive components in citri reticulatae pericarpium (*Citrus reticulata* 'Chachi') under different harvesting and drying conditions [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 130: 549-556
- [7] Fu M, Xu Y, Chen Y, et al. Evaluation of bioactive flavonoids and antioxidant activity in pericarpium citri reticulatae (*Citrus reticulata* 'Chachi') during storage [J]. Food Chem, 2017, 230: 649-656
- [8] Ko H C, Jang M G, Oh J M, et al. Changes in chemical composition and antioxidant activity of dried citrus unshiu peel after roasting [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 131: 109612
- [9] Li L, Zhang M, Chitrakar B, et al. Effect of combined drying method on phytochemical components, antioxidant capacity and hygroscopicity of Huyou (*Citrus changshanensis*) fruit [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 123: 109102
- [10] 傅曼琴,肖更生,吴继军,等.广陈皮促消化功能物质基础的研究[J].中国食品学报,2018,18(1):56-64
FU Man-qin, XIAO Geng-sheng, WU Ji-jun, et al. Studies on chemical basis of digestion promoting function of pericarpium citri reticulatae (*Citrus reticulata* 'Chachi') [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(1): 56-64
- [11] 黄睿,沈淑好,陈虹霖,等.柑橘类黄酮的生物学活性及提高生物利用度技术研究进展[J].食品科学,2019,40(1):319-326
HUANG Rui, SHEN Shu-yu, CHEN Hong-lin, et al. Recent advances in bioactivities and technologies for bioavailability improvement of citrus flavonoids [J]. Food Science, 2019, 40(1): 319-326
- [12] 张荔喆,张学军,范誉斌,等.热泵干燥技术研究进展及其在香菇干燥中的应用[J].制冷与空调,2019,19(7):77-83
ZHANG Li-zhe, ZHANG Xue-jun, FAN Yu-bin, et al. Research progress of heat pump drying technology and its application in drying of shiitake mushrooms [J]. Refrigeration Air-conditioning, 2019, 19(7): 77-83
- [13] 黄燕芬,肖默艳,王东伟,等.荔枝果肉热泵干燥及其储藏特性研究[J].保鲜与加工,2020,20(6):44-50
HUANG Yan-fen, XIAO Mo-yan, WANG Dong-wei, et al. Study on drying and storage characteristics of litchi aril by heat pump drying [J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 44-50
- [14] 龚丽,龙成树,刘清化,等.广陈皮热泵干燥工艺参数优化[J].食品工业科技,2015,17(36):85-88
GONG Li, LONG Cheng-shu, LIU Qing-hua, et al. Optimization of heat pump drying technology parameters of pericarpium citri reticulatae [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 17(36): 85-88
- [15] 徐明月,钟耀广,毕金峰,等.干燥条件对橘皮颜色与结构性能的影响[J].现代食品科技,2016,32(8):197-203
XU Ming-yue, ZHONG Yao-guang, BI Jin-feng, et al. Effect of different drying conditions on color and texture of citrus peels [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 197-203
- [16] 邢颖,王瑞芳,邓随胜.不同干燥方式对橘皮精油和黄酮的影响[J].食品工业科技,2018,39(6):77-81
XING Ying, WANG Rui-fang, DENG Sui-sheng. Effects of different drying methods on essential oils and flavonoids from orange peels [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 77-81
- [17] Richard Osae, ZHOU Cun-shan, XU Bao-guo, et al. Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(5): 128-132
- [18] Sokol-Letowska A, Kucharska A Z, Winska K, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs [J]. Food Chemistry, 2014, 157(15): 533-539
- [19] 楚文靖,盛丹梅,张楠,等.红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J].食品科学,2019,40(17):150-155
CHU Wen-jing, SHENG Dan-mei, ZHANG Nan, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: kinetic modelling and quality changes [J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155
- [20] Sasongko S B, Hadiyanto H, Djaeni M, et al. Effects of drying temperature and relative humidity on the quality of dried onion slice [J]. Heliyon, 2020, 6(7): e4338
- [21] Argyropoulos D, Müller J. Effect of convective-, vacuum- and freeze drying on sorption behaviour and bioactive compounds of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) [J]. Journal of Applied Research on Medicinal & Aromatic Plants, 2014, 1(2): 59-69
- [22] 吕朝燕,高智席,马秀情,等.不同热风干燥温度对方竹笋品质的影响[J].食品工业科技,2020,13(40):8-12
LYU Chao-yan, GAO Zhi-xi, MA Xiu-qing, et al. Effect of different hot air drying temperatures on quality of

- Chimonobambusa quadrangularis* shoots [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 13(40): 8-12
- [23] 周菲菲,肖更生,林羨,等.干燥条件对茶枝柑果皮黄酮和精油成分的影响[J].食品工业科技,2015,36(11):287-291
ZHOU Fei-fei, XIAO Geng-sheng, LIN Xian, et al. Effect of different drying conditions on flavonoids and essential oils of *Citrus reticulata* cv. chachiensis peel [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(11): 287-291
- [24] Rahimmalek M, Goli S A H. Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymys daenensis* subsp. *daenensis*. Celak leaves [J]. Industrial Crops & Products, 2013, 42(none): 613-619
- [25] 王月月,段续,任广跃,等.干燥方法对洋葱精油提取率及DPPH自由基清除活性的影响[J].食品与机械,2019,35(10): 112-116
WANG Yue-yue, DUAN Xu, REN Guang-yue, et al. Effects of different drying methods on extraction rate of onion essential oil and its DPPH radical scavenging activit [J]. Food and Machinery, 2019, 35(10): 112-116
- [26] 李照莹,黄晓兵,周伟,等.不同热风干燥温度对高良姜片品质特性的影响[J].热带作物学报,2020:1-11
LI Zhao-ying, HUANG Xiao-bing, ZHOU Wei, et al. Effect of hot air drying temperature on the quality of *Alpinia officinarum* hance slices [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020:1-11
- [27] Wojdylo A, Figiel A, Oszmianski J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(4): 1337-1343
- [28] 邓俊琳,李晚谊,于丽娟,等.干燥温度对醇提余甘子多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2019,40(24): 57-61
DENG Jun-lin, LI Wan-yi, YU Li-juan, et al. Effect of drying temperature on phenolic contents and its antioxidant activity of *Phyllanthus emblica* L. [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 57-61

(上接第 143 页)

- [29] 袁芳,邱诗铭,李丽.不同保鲜剂复合处理对鲜切芒果活性氧代谢、细胞膜透性和褐变的影响[J].食品科学,2020, 41(3): 218-223
YUAN Fang, QIU Shi-ming, LI Li. Effects of compound treatment with different preservatives on active oxygen metabolism, cell membrane permeability and browning of fresh-cut mangoes [J]. Food Science, 2020, 41(3): 218-223
- [30] 胡迎芬.冬枣黄酮的提取分离及抗氧化、抑瘤活性研究[D].青岛:青岛大学,2009
HU Ying-fen. Extraction and isolation of flavonoids from Dongzao and their anti-oxidant and anti-tumor activities [D]. Qingdao: Qingdao University, 2009
- [31] S Y Kim, S M Jeong, W P Park, et al. Effect of heating conditions of grape seeds on the antioxidant activity of grape seed extracts [J]. Food Chemistry, 2006, 97(3): 472-479
- [32] T Nagai, N Suzuki. Isolation of collagen from fish waste material - skin, bone and fins [J]. Food Chemistry, 2000, 68(3): 277-281
- [33] Wang S, Y Lin H. Antioxidant activity in fruits and leaves of blackberry, raspberry, and strawberry varies with cultivar and developmental stage [J]. J Agric Food Chem, 2000, 48: 140-146
- [34] Prior R L, Cao G Matin. Antioxidant capacity as influenced by total phenolic and anthocya-nin content, maturity, and variety of *Vaccinium* species [J]. J Agric Food Chem, 1998, 46: 2686-2693
- [35] 张玲,杨春,丁卫英,等.不同品种枣的黄酮含量及其体外抗氧化性特征[J].贵州农业科学,2018,46(10):119-121
ZHANG Ling, YANG Chun, DING Wei-ying, et al. The flavonoid content of different varieties of jujube and their *in vitro* antioxidant properties [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 119-121
- [36] Koushesh M, Arzani K, Barzegar M. Impact of postharvest calcium treatments on storage life, biochemical attributes and chilling injury of apricot [J]. Journal of Agricultural ence & Technology, 2018, 18(5): 1355-1366
- [37] Wang Z, Ma L, Zhang X, et al. The effect of exogenous salicylic acid on antioxidant activity, bioactive compounds and antioxidant system in apricot fruit [J]. Entia Horticulturae, 2015, 181: 113-120