

5种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影响

林 萍, 姚娜娜, 车凤斌, 马 燕, 张 婷

Effects of Five Different Drying Methods on Drying Characteristic and Quality of *Hippophae rhamnoides*

LIN Ping, YAO Nana, CHE Fengbin, MA Yan, and ZHANG Ting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050261>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

预处理方式及干燥温度对养心菜热风干燥特性与品质的影响

Effects of Physical Pretreatment Methods and Hot Air Temperatures on the Hot Air Drying Characteristics and Quality of Yangxincai (*Sedum aizoon* L.)

食品工业科技. 2021, 42(13): 210–215

成熟度对柿子片干燥特性及品质影响

Effect of Maturity on Drying Characteristics and Quality of Dried Persimmon Slices

食品工业科技. 2021, 42(20): 69–75

不同干制条件对金针菇品质及抗氧化酶活性的影响

Effect of drying methods on the quality and antioxidant enzyme activities of *Flammulina velutipes*

食品工业科技. 2017(15): 59–62

不同香菇干燥方式的干燥特性和干品品质对比研究

Comparative study of drying characteristics and dried product quality of several mushroom drying modes

食品工业科技. 2017(04): 175–179

中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响

Effects of Short- and Medium-wave Infrared Radiation Drying on Drying Characteristics, Nutritional Quality and Antioxidant Activity of Mulberry

食品工业科技. 2021, 42(12): 39–45

不同干制方式对香菇挥发性成分的影响

Effects of Different Drying Methods on Volatile Flavor Compounds in *Lentinus edodes*

食品工业科技. 2018, 39(18): 224–229



关注微信公众号，获得更多资讯信息

林萍, 姚娜娜, 车凤斌, 等. 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 41–48. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050261

LIN Ping, YAO Nana, CHE Fengbin, et al. Effects of Five Different Drying Methods on Drying Characteristic and Quality of *Hippophae rhamnoides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 41–48. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050261

· 研究与探讨 ·

5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影响

林 萍¹, 姚娜娜², 车凤斌³, 马 燕^{1,4}, 张 婷^{1,3,4,*}

(1.新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;

2.新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052;

3.新疆沙棘工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830091;

4.新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要: 以新鲜的阿勒泰大果沙棘为材料, 采用自然阴干 (NSD)、自然晒干 (ND)、热风干燥 (HAD)、热泵干燥 (HPD) 和真空冷冻干燥 (VFD) 对其进行处理, 分析 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影响。结果表明: 5 种干燥方式中, 热风干燥和热泵干燥时间较短, 分别为 118 和 124 h, 干燥率为 100%, 干燥时间较自然阴干和自然晒干缩短 3 倍以上, 干燥速率提高 5 倍以上, 真空冷冻干燥 120 h 后, 大果沙棘干燥率仅为 27.67%, 继续增加干燥时间, 其干燥效率基本保持不变, 冻干效率低。与鲜样对比, 真空冷冻干燥大果沙棘品质较好, 可使果实色泽鲜艳, 呈现出亮黄色, 褐变度低, 能够保持果实 V_C 和总酚含量。可见, 在干燥效率方面, 热风干燥和热泵干燥适于大果沙棘干制, 但在干燥产品品质上, 真空冷冻干燥效果较好。

关键词: 大果沙棘, 干制方式, 干燥特性, 品质

中图分类号: TS255.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)04-0041-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050261



本文网刊:

Effects of Five Different Drying Methods on Drying Characteristic and Quality of *Hippophae rhamnoides*

LIN Ping¹, YAO Nana², CHE Fengbin³, MA Yan^{1,4}, ZHANG Ting^{1,3,4,*}

(1. Research Institute of Farm Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

2. College of Pharmacy and Food Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Xinjiang Research Center of Hippophae Rhamnoides Engineering and Technology, Urumqi 830091, China;

4. Research Center of Main Agricultural Products Processing Engineering in Xinjiang, Urumqi 830091, China)

Abstract: Fresh *Hippophae rhamnoides* L. fruits from Altay were used as material, the treatments with shading drying (NSD), natural drying (ND), hot air drying (HAD), heat pump drying (HPD) and vacuum freeze-drying (VFD) were compared for their application to the drying of *Hippophae rhamnoides* L., and effects of the five drying methods on the drying characteristics and quality of *Hippophae rhamnoides* L. were analyzed. The results showed that among the five drying methods, HAD and HPD had short drying times which were 118 and 124 h respectively, and the drying rate was 100%. The drying time was more than 3 times shorter than NSD and ND, and the drying rate increased 5 times more than them. After VFD for 120 h, the drying rate was only 27.67%. If the drying time continued to increase, the drying efficiency

收稿日期: 2021-05-31

基金项目: 新疆精准扶贫项目 (2019-8); 自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目“新疆大果沙棘功效组分浸提关键技术研究及产品研发 (KY2020112)”; 自治区科协“大果沙棘产业延伸科技支撑”项目。

作者简介: 林萍 (1975-), 女, 本科, 副研究员, 研究方向: 农业科研管理, E-mail: 491313682@qq.com。

* 通信作者: 张婷 (1980-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品贮运与加工, E-mail: zhangtingkikie@163.com。

remained basically unchanged, and the freeze-drying efficiency was low. Compared with the fresh samples, *Hippophae rhamnoides* fruits dried by VFD could keep the better quality, and show the brightly yellow color, hold the lower browning, and maintain the higher V_C and total phenols content. In terms of drying efficiency, HAD and HPD were suitable for drying of *Hippophae rhamnoides*. However, in terms of the quality of dried products, VFD had a better effect.

Key words: *Hippophae rhamnoides*; drying method; drying characteristics; quality

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.), 胡颓子科沙棘属灌木植物, 有 7 个种 11 个亚种。我国沙棘总面积约 4000 万亩, 占世界沙棘的 90% 以上^[1]。沙棘含有 428 种营养功能成分, 在植物界实属罕见, 是大健康产业的一匹黑马, 对人体至少具有 16 种以上的治疗和保健作用^[2-3]。大果沙棘是前苏联通过杂交等技术手段筛选的沙棘优良品种, 因其具有果实大、产量高、少刺、易采收等特点, 已在新疆、黑龙江等地广泛栽培, 据统计, 我国大果沙棘种植面积约 150 万亩, 其中新疆种植面积约 40 万亩, 主要分布在阿勒泰、乌什、和田等地, 已成为当地精准脱贫和乡村振兴的新兴产业之一^[4]。然而, 由于大果沙棘属于浆果类, 果实具有质地柔软, 多汁易损、易腐等特点, 生产中大多根据实际条件和生产经验, 以自然晒干、自然阴干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥等方式对其进行干制加工, 产品品质不一。近年来, 张庆钢等^[5]、余善鸣等^[6]、田甜等^[7]对沙棘果实的冷冻干燥工艺进行了研究, Araya-Farias 等^[8]和 Kyriakopoulou 等^[9]也分析了太阳能干燥和热风干燥方式对沙棘果实干燥特性和品质的影响, 以上研究仅获得了某单一干制方式的干燥工艺或参数, 未见几种干制方式系统报道, 尤其是以上干制方式对大果沙棘干燥特性和品质的影响还不清楚。因此, 本研究以新疆阿勒泰大果沙棘为试材, 采用自然阴干(NSD)、自然晒干(ND)、热风干燥(HAD)、热泵干燥(HPD)及真空冷冻干燥(VFD)5 种干制方式, 在生产调研及预实验基础上, 设置不同干制方式工艺/试验参数, 对比分析上述 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影响, 以期筛选出适于我区大果沙棘加工的干制方式, 为生产中大果沙棘干燥技术应用与推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜的阿勒泰大果沙棘 于 2019 年 8 月 15 日

采摘自新疆阿勒泰地区哈巴河阔斯喀巴特试验示范区。试验树龄为 5 年, 长势较好。带果枝采摘, 采摘时果实平均水分质量分数为 $80.69\% \pm 0.41\%$, 可滴定酸含量为 8.02%, 维生素 C 含量为 668.19 mg/100 g, 总黄酮含量 9.17 mg RE/g, 总酚含量为 30.32 mg/g。冷库预冷后当天运回新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所实验室, 选取大小均匀(滤网筛选, 要求果长 15.00 ± 1.00 mm, 果宽 9.00 ± 1.00 mm)、成熟饱满、无机械损伤、无病虫害的果实于 4 ℃ 冷库预冷, 待用。芦丁 德国 LGC 劳务有限公司; 没食子酸 美国 Sigma 公司; 无水碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、福林酚、碳酸氢钠、草酸、抗坏血酸、2,6-二氯酚靛酚钠 天津市福晨化学试剂厂。

101-2ES 电热鼓风干燥箱 北京市永光明医疗仪器有限公司; WHR-100TB1 闭环除湿热泵干燥机

广东威尔信实业有限公司; LGJ-25C 真空冷冻干燥机 北京四环科学仪器厂有限公司; GL-20 G-1 高速冷冻离心机 上海安亭科学仪器厂; YS 6060 台式分光测色仪 深圳市三恩时科技有限公司; UV-2600 紫外可见分光光度计 日本岛津公司; KQ3200DE 数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司; WB-2002 恒温水浴锅 郑州长城科工贸有限公司; AP-01P 真空泵 天津市津南八里台微电子园区; UPw-UP-20 超纯水仪 成都大莘宁科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 干燥条件 挑选后的大果沙棘果实用蒸馏水浸泡清洗干净, 尽快沥干, 准确称取 5 kg 样品, 分别采用自然晒干、自然阴干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥 5 种干制方式对其进行干燥, 按照每隔 8 h 称重, 至湿基含水率在 13% 时, 结束干燥。试验工艺参数在生产调研基础上, 结合相关文献^[5-9]和前期预实验结果进行设置, 具体见表 1。

表 1 5 种大果沙棘干制方式及工艺参数设置

Table 1 Process parameter setting table of the five different drying methods of *Hippophae rhamnoides*

干燥方式	工艺条件或参数
自然阴干(NSD)	单层平铺于带孔托盘中, 使其载物量为 0.5 kg/盘(确保果实不堆叠), 并用纱网罩住, 放置在室内通风处(试验期间监测早、中、晚平均高温为 25 ℃, 平均低温为 15 ℃)
自然晒干(ND)	单层平铺于带孔托盘中, 使其载物量为 0.5 kg/盘(确保果实不堆叠), 白天放置在室外阳光充足的地方, 并用纱网罩住, 晚上和雨天放置在室内通风处(试验期间监测早、中、晚平均高温为 28 ℃, 平均低温为 18 ℃)
热风干燥(HAD)	单层平铺于干燥箱托盘(果实下部平铺纱网), 使其载物量为 0.5 kg/层(确保果实不堆叠), 放 10 层, 温度设置为 50 ℃, 相对湿度为 30%, 风速为 2 m/s
热泵干燥(HPD)	单层平铺于干燥箱托盘(果实下部平铺纱网), 使其载物量为 0.5 kg/层(确保果实不堆叠), 放 10 层, 温度设置为 50 ℃, 相对湿度为 30%, 风速为 2 m/s
真空冷冻干燥(FD)	-80 ℃超低温冰箱预冻后, 单层平铺于冻干托盘内, 使其载物量为 200 粒/层(确保果实不堆叠), 共三层; 冷阱表面温度为 -50 ℃, 真空度 50 Pa 以下, 温度-时间控制程序设置为: -40 ℃, 4 h; -20 ℃, 4 h; 0 ℃, 4 h; 10 ℃, 4 h; 20 ℃, 8 h; 30 ℃, 8 h; 40 ℃, 88 h

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 干燥率 一定时间内干燥样品质量与样品总质量之间的比值:

$$\text{干燥率}(\%) = \frac{\text{干燥样品质量}}{\text{样品总质量}} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.2.2 干燥曲线 水分比(moisture ratio, MR)表示物料水分剩余率。参考姚娜娜等^[10]方法进行测定。具体计算公式如下:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式 (2)}$$

式中: M_0 表示大果沙棘初始干基含水率, 单位为 g/g; M_e 表示大果沙棘干燥平衡时干基含水率, 单位为 g/g; M_t 表示大果沙棘在干燥 t 时刻的干基含水率, 单位为 g/g。由于 M_e 远小于 M_0 和 M_t , 故公式可简化为:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{式 (3)}$$

干燥速率(drying rate, DR)表示物料的脱水速度的快慢, 单位为 g/(g·h)。其计算公式:

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad \text{式 (4)}$$

式中: M_{t1} 和 M_{t2} 分别表示干燥时间 t_1 和 t_2 时大果沙棘的干基含水率, 单位为 g/g。

1.2.2.3 色泽的测定 采用台式分光测色仪进行测定^[11], 指标包括 L^* 值(亮度)、 a^* 值(红/绿色)、 b^* 值(黄/蓝色), 计算物料色泽差别程度的总色差 ΔE 、色泽饱和程度 C 和色调角 h° , 分别按下面公式计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{式 (5)}$$

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad \text{式 (6)}$$

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad \text{式 (7)}$$

式中: L^* 、 L_0^* 值分别为干制样品和鲜样的亮度; a^* 、 a_0^* 值分别是干制样品和鲜样的红绿度; b^* 、 b_0^* 值分别是干制样品和鲜样的黄蓝度; ΔE 为总色差值。

1.2.2.4 褐变度 参照李晓丽等^[12]的方法, 略作修改。取 2.0 g 大果沙棘, 加入 20 mL 蒸馏水, 研磨匀浆后, 放入离心机并在 4 °C 下 10000 r/min 离心 30 min, 褐变度的表示以上清液在 420 nm 波长处的吸光度表示, 数值以干基计。

1.2.2.5 维生素 C 参照陈思奇等^[13]方法进行测定, V_C 含量以干基表示, 单位为 mg/100 g DW。

1.2.2.6 总黄酮 参照姚娜娜等^[10]方法进行测定。黄酮的提取: 准确称取 1.00 g 沙棘, 按照料液比 1:20 加入 20 mL 的 70% 乙醇溶液, 在温度为 50 °C, 功率为 150 W 条件下超声提取 40 min。用 0.45 μm

有机系滤膜抽滤得到提取液, 用 70% 乙醇定容至 25 mL, 取 1 mL 提取液用于测定。按照公式(8)计算:

$$\text{总黄酮含量}(\text{mg RE/g DW}) = \frac{x \times V \times n}{m} \quad \text{式 (8)}$$

式中: x 为测得总黄酮质量浓度, mg/mL; V 为提取液体积, mL; n 为稀释倍数; m 为样品质量, g。

1.2.2.7 总酚的测定 总酚的提取方法与黄酮相同, 提取后取 1 mL, 参照姚娜娜等^[10]方法进行测定。按照公式(9)计算:

$$\text{总酚含量}(\text{mg GAE/g DW}) = \frac{x \times V \times n}{m} \quad \text{式 (9)}$$

式中: x 为测得总酚质量浓度, mg/mL; V 为提取液体积, mL; n 为稀释倍数; m 为样品质量, g。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 20.0 软件进行数据处理, 采用 Duncan's 进行多重比较检验, 用 SigmaPlot 12.5 软件绘制试验图。

2 结果与分析

2.1 5 种干制方式对大果沙棘干燥时间、含水率及干燥率的影响

由表 2 可以看出, 5 种干燥方式对大果沙棘的干燥时间有显著的影响($P<0.05$), 至大果沙棘果干湿基含水率达到 13% 时, 自然阴干大果沙棘所需干燥时间最长, 为 1176 h, 自然晒干时间次之, 为 368 h, 热风干燥时间最短, 为 118 h, 热泵干燥时间为 124 h, 真空冷冻干燥时间为 120 h, 可以看出, 自然阴干、自然晒干、热风干燥和热泵干燥可在不同时间内使大果沙棘的干燥率达到 100%, 其中热风干燥和热泵干燥时间显著低于自然阴干和自然晒干($P<0.05$), 前两者干燥时间相差 6 h; 然而, 预实验和试验结果均反映出真空冷冻干制大果沙棘干燥率较低, 干燥 120 h 后, 干燥率仅为 27.67%, 继续干燥, 其干燥率基本保持不变, 这可能与干燥设备产能有关。可见, 仅从干燥时间、含水率及干燥率方面考虑, 热风干燥和热泵干燥适于大果沙棘干制, 其干燥时间短, 干燥率高。

表 2 5 种干制方式对大果沙棘干燥时间、含水率和干燥率的影响

Table 2 Effects of five different drying methods on drying time, moisture content and drying rate of *Hippophae rhamnoides*

干燥方式	干燥时间(h)	含水率(%)	干燥率(%)
自然阴干(NSD)	1176 ^a	13.58±0.27 ^{ab}	100 ^a
自然晒干(nd)	368 ^b	13.37±0.12 ^b	100 ^a
热风干燥(HAD)	118 ^e	13.88±0.25 ^a	100 ^a
热泵干燥(HPD)	124 ^c	13.92±0.08 ^a	100 ^a
真空冷冻干燥(VFD)	120 ^d	12.86±0.36 ^c	27.67 ^b

注: 同一列相同的小写字母表示差异不显著, $P>0.05$; 不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$; 表 3 同。

2.2 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性的影响

由图 1 可知, 5 种不同干制方式的大果沙棘果实水分比均随着干燥时间呈下降趋势。干燥前 4 d, 自

然阴干、自然晒干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥去除物料水分含量分别为 2.34%、4.82%、45.76%、37.57% 和 20.32%; 中后期随着干燥进行水分比下降趋于平缓, 这是可能与干燥后期传递介质推动力逐渐减小, 导致物料表面物质逐渐变密有关^[13], 这一结果也与 Araya-Farias 等^[8]对沙棘干燥特性的研究较为一致。将大果沙棘干燥至水分比为 0.20 g/g 左右时, 自然阴干、自然晒干、热风干燥和热泵干燥所用时间为 672、272、80 和 92 h, 热风干制时间较自然阴干、自然晒干和热泵干燥显著减少($P < 0.05$), 减幅分别为 88.10%、70.57% 和 13.04%, 而真空冷冻干燥在水分比为 0.3015 g/g 时, 干燥趋势基本处于平稳状态, 此时结束干燥。

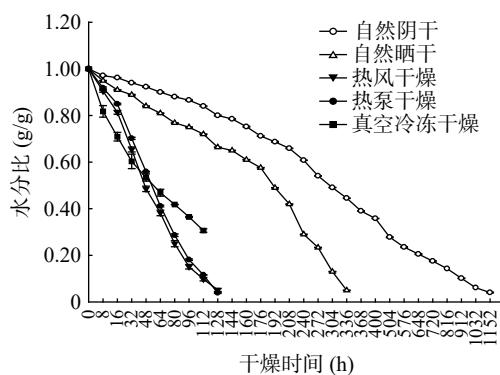


图 1 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性曲线的影响
Fig.1 Effects of five different drying methods on drying characteristic curve of *Hippophae rhamnoides*

由图 2 可以看出, 自然阴干由于干燥条件为室内通风处, 干燥温度低, 干制过程基本处在恒速干燥; 自然晒干受天气影响较大, 由于实际监测过程出现 6 d 阴雨天气, 使整个干燥过程中温度波动较大, 导致干燥速率曲线波动较大, 当含水率大于 2.50 g/g 干基时, 干燥速率整体呈加速干燥阶段, 当含水率小于 2.50 g/g 干基时, 干燥速率整体呈降速干燥趋势。

热风、热泵和真空冷冻干燥速率变化曲线受温度波动影响, 呈现不同的变化规律。当含水率小于 0.50 g/g 时, 也就是干燥初期, 热风干燥由于受前期温度波动的影响, 干燥速率出现两次较大幅度的波动, 热泵干燥速率变化幅度较小; 当含水率大于 0.50 g/g 时, 热风干燥和热泵干燥过程中温度波动较

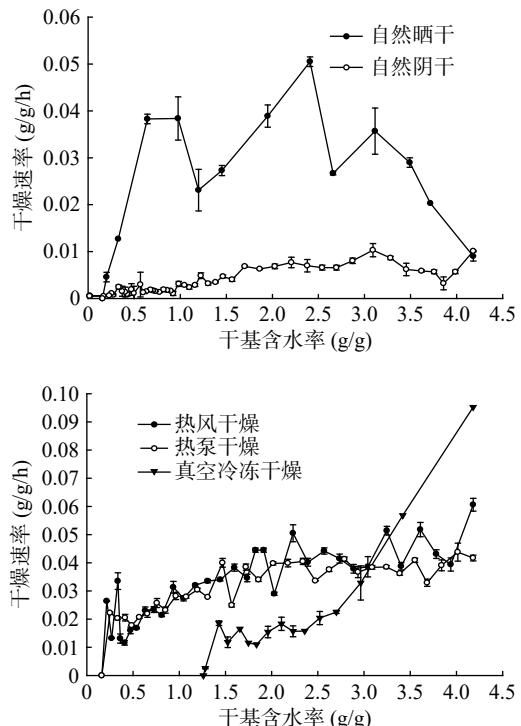


图 2 5 种干制方式对大果沙棘干燥速率曲线的影响
Fig.2 Effects of five different drying methods on drying rate curve of *Hippophae rhamnoides*

小, 呈平缓小幅波动干燥趋势, 而真空冷冻干燥在含水率为 1.26 g/g 干基时, 大果沙棘的干燥速率基本不再变化。整个干燥过程中, 5 种干制方式的干燥速率依次分别为: 热风干燥>热泵干燥>自然晒干>真空冷冻干燥>自然阴干, 热风干燥的平均干燥速率显著大于其它干燥方式($P < 0.05$), 分别为自然阴干、自然晒干、热泵干燥和真空冷冻干燥的 7.06、5.65、2.76 和 1.05 倍。可见, 热风干燥和热泵干燥大果沙棘去除物料水分含量高, 干燥速率较大。

2.3 5 种干制方式对大果沙棘色泽的影响

表 3 反映了自然阴干、自然晒干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥对大果沙棘色泽的影响。由表 3 可知, 5 种干燥方式对大果沙棘的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、C 和 h° 值影响较大。5 种干制方式中, 真空冷冻干燥大果沙棘的 L^* 值最大, 为 64.22, 其次为鲜样, 显著高于其它 4 种干燥方式($P < 0.05$), 自然阴干、自然晒干、热风干燥和热泵干燥的 L^* 值无显著性差异($P > 0.05$), 表明真空冷冻干燥有利于维持大果沙棘果

表 3 5 种干制方式对大果沙棘色泽的影响
Table 3 Effects of five different drying methods on color of *Hippophae rhamnoides*

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE	C	h°
Fresh	62.34±0.97 ^b	28.65±0.87 ^a	57.58±1.63 ^b	—	64.31±1.84 ^b	63.55±0.18 ^b
NSD	40.73±2.73 ^c	23.05±2.53 ^b	30.45±4.13 ^d	32.05±2.62 ^b	38.24±4.42 ^d	52.77±2.91 ^d
ND	41.92±2.99 ^c	22.01±2.23 ^{bc}	34.86±3.98 ^c	31.43±4.26 ^b	41.27±4.10 ^c	57.64±2.84 ^c
HAD	41.07±3.01 ^c	20.49±2.11 ^c	29.57±4.31 ^d	36.25±5.19 ^a	36.06±4.09 ^d	55.05±4.11 ^c
HPD	42.29±1.92 ^c	20.67±2.72 ^c	31.11±2.54 ^d	33.48±3.23 ^{ab}	38.21±3.48 ^d	57.33±1.97 ^c
VFD	64.22±1.67 ^a	20.80±0.66 ^c	67.19±2.06 ^a	12.68±2.00 ^c	70.35±1.92 ^a	72.79±0.80 ^a

注: Fresh、NSD、ND、HAD、HPD 分别表示大果沙棘鲜样、自然阴干、自然晒干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥; 图 3~图 7 同。

实的亮度; a^* 值大小反映了果实的红绿色程度, 沥干后的鲜果 a^* 值最大, 为 28.65, 其次为自然阴干和自然晒干, 热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥 3 种干制方式的大果沙棘 a^* 值较小, 且三者之间无显著差异 ($P>0.05$); b^* 值大小反映产品的黄色程度, b^* 值越大表示颜色越黄, 色泽越好。经过干燥后大果沙棘的 b^* 值依次为真空冷冻干燥>鲜果>自然晒干>热泵干燥>自然阴干>热风干燥, 真空冷冻干燥的大果沙棘 b^* 值最大, 为 67.19, 比鲜样高出 16.69%。色差 ΔE 反映干燥前后物料色泽的差异, 色差值越小, 表明干燥过程中色泽保留越好。在 5 种干燥方式中, 真空冷冻干燥大果沙棘的 ΔE 最小, 为 12.68, 干燥后果实色泽鲜艳, 呈现出亮黄色(见图 2), 其值显著低于其它 4 种干制方式($P<0.05$), 表明真空冷冻干燥可较好保持大果沙棘色泽。

C 值由低到高表示色彩由呆滞到鲜艳, 其值越大表示物料色泽越鲜艳。5 种干制方式干燥的大果沙棘 C 值基本维持在 36.06~70.35, 真空冷冻干燥的大果沙棘 C 值最高, 为 70.35, 显著高于鲜样和其他 4 种干制方式($P<0.05$)。

h^* 值一般在 0°~90° 范围内, 其值越大, 表示大果沙棘颜色越趋于黄色。5 种干制方式干燥的大果沙棘 h^* 值大小依次为: 真空冷冻干燥>鲜样>自然晒干>热泵干燥>热风干燥>自然阴干。可见, 真空冷冻干燥方式有利于维持大果沙棘的色泽(见图 3), 这与 Kyriakopoulou 等^[9] 在沙棘干制、何玉倩等^[14] 在火龙果干制和王海鸥等^[15] 在柠檬片干制的研究结果较为相似; 自然阴干和自然晒干由于干燥时间长, 加之干燥过程全部暴露在空气中, 与氧气充分接触, 导致其色泽发生变化; 热风干燥和热泵干燥方式对大果沙棘的色泽影响较大, 这可能与其干燥过程中与氧气充分接触, 且干燥温度较高, 易发生酶的褐变、色素的分解等有关。

2.4 5 种干制方式对大果沙棘褐变度的影响

不同的干制方式会造成果蔬产品发生不同程度褐变^[16]。由图 4 可知, 大果沙棘沥干后鲜样褐变度最小, 为 0.35 DW。经 5 种干制方式干燥后, 大果沙棘的褐变度依次分别为: 自然晒干>热风干燥>热泵干燥>自然阴干>真空冷冻干燥, 真空冷冻干燥大果沙棘褐变度为 0.41 DW, 与新鲜大果沙棘无显著性差异($P>0.05$)(见图 3), 但显著低于其它 4 种干制方式($P<0.05$), 表明真空冷冻干燥对大果沙棘果实褐变影响较小, 这主要是由于真空冷冻干燥大果沙棘果实的水分在低温真空下升华, 抑制了可能发生的褐变, 从而降低了果实的褐变度, 这一结果与宋慧慧等在枸杞上的报道较为一致^[17]。自然阴干的大果沙棘褐变度为 0.53 DW, 显著低于自然晒干、热风干燥和热泵干燥方式($P<0.05$)(见图 3), 一方面与这 4 种干制方式暴露在空气中加快其氧化褐变有关, 另一方面也与其干制过程中干燥温度高低有关。

2.5 5 种干制方式对大果沙棘维生素 C 含量的影响

研究发现, 沙棘果实中维生素 C 含量基本维持在 580~800 mg/100 g^[18], 经测定, 大果沙棘鲜样中的 V_C 含量为 668.19 mg/100 g。图 5 显示, 经 5 种干制方式干燥后, 大果沙棘的 V_C 含量与鲜样比, 自然晒干、自然阴干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥分别下降了 93.09%、88.88%、85.41%、84.03% 和 44.52%。可以看出, 5 种干制方式干燥后大果沙棘 V_C 含量由高到低依次为: 真空冷冻干燥>热泵干燥>热风干燥>自然阴干>自然晒干。其中, 真空冷冻干燥的样品 V_C 保留较高, 为 370.74 mg/100 g, 主要由于真空冷冻干燥使大果沙棘避免受热和氧化, 从而减少干制品中 V_C 的降解, 这与唐璐璐等^[19] 在丰水梨片冷冻干制过程中的研究相似。热风、热风干燥过程中, 干燥温度较高, 使物料中 V_C 含量受热损失较多。自然阴干和自然晒干不仅干燥时间长, 还容易受

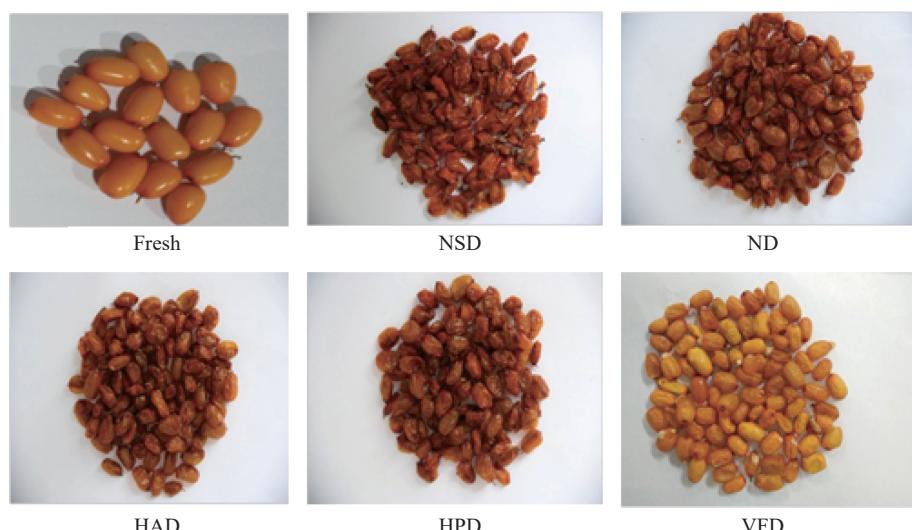


图 3 5 种干制方式对大果沙棘感官品质的影响

Fig.3 Effects of five different drying methods on sensory qualities of *Hippophae rhamnoides*

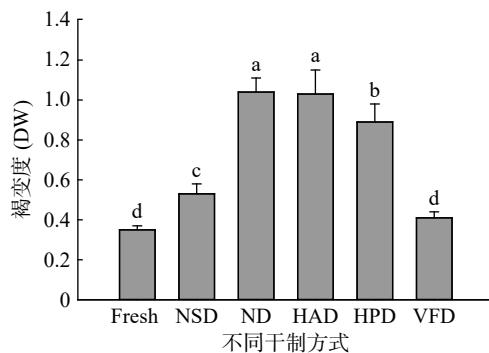
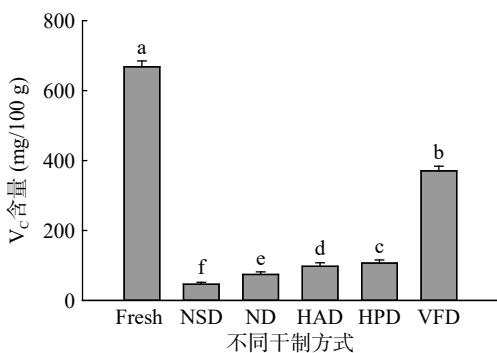


图 4 5 种干制方式对大果沙棘褐变度的影响

Fig.4 Effects of five different drying methods on browning degree of *Hippophae rhamnoides*注: 不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$; 图 5~图 7 同。图 5 5 种干制方式对大果沙棘 V_c 含量的影响Fig.5 Effects of five different drying methods on V_c content of *Hippophae rhamnoides*

到天气因素的影响,且与氧气充分接触,因氧化分解导致 V_c 的大量损失,与张牧心等^[20]的研究结果一致。热风、热泵干燥含量显著高于自然晒干和自然阴干,说明干燥时间对大果沙棘 V_c 含量的影响大于干燥温度,干燥时间越长, V_c 损失越多。

2.6 5 种干制方式对大果沙棘总黄酮含量的影响

图 6 为 5 种干制方式干燥后大果沙棘黄酮含量对比图。经测定,大果沙棘鲜样中总黄酮含量为 9.17 mg RE/g DW, 5 种干制方式干燥后大果沙棘的总黄酮含量依次分别为: 自然晒干>热泵干燥>热风干燥>真空冷冻干燥>自然阴干,除自然阴干外,其它干制方式干燥后,总黄酮含量高于鲜果,这一现象在鼠尾草的干燥中也发现,这可能是由于以上两种干制方式干燥过程中高温破坏了果实细胞壁结构,降低了相关氧化酶和水解酶活性,从而使黄酮类化合物快速释放出来的结果^[21~23],然而热风干燥和冷冻干燥后的大果沙棘总黄酮含量与鲜样差异不显著($P>0.05$),热泵干燥后的大果沙棘黄酮含量显著高于热风干燥($P<0.05$),其原由有待于进一步探索,真空冷冻干燥总黄酮含量较低,可能是由于大果沙棘果实在预冻时形成大量冰晶,细胞膜结构被破坏,造成细胞内物质流出,因羟基基团较多使黄酮类物质被氧化,结果导致真空冷冻干燥后的果实中总黄酮含量较低^[24~25],自然阴干导致其总黄酮含量下降,这主要由于干燥时间

过长导致果实内的黄酮类物质与空气接触后发生了分解反应,从而使其含量降低,这一结果与徐亚飞等^[26]干制核桃试验中得到的结果较为相似。

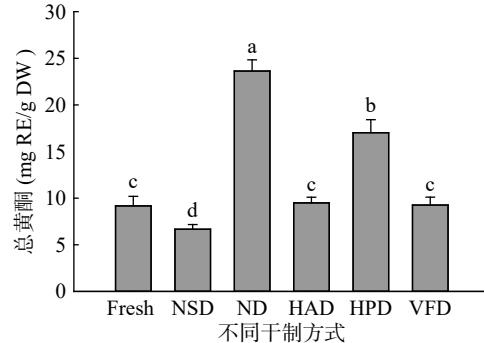


图 6 5 种干制方式对大果沙棘总黄酮含量的影响

Fig.6 Effects of five different drying methods on total flavonoids content of *Hippophae rhamnoides*

2.7 5 种干制方式对大果沙棘总酚含量的影响

由图 7 可知,新鲜大果沙棘总酚含量为 30.32 mg GAE/g DW, 显著高于其它 5 种干制方式处理($P<0.05$)。对比 5 种干制方式,干燥后大果沙棘果干总酚含量依次分别为: 真空冷冻干燥>热泵干燥>自然阴干>自然晒干>热风干燥,其中真空冷冻干燥后大果沙棘果实总酚含量最高,显著高于其它 4 种干制方式($P<0.05$)。表明真空冷冻干燥有助于保留大果沙棘干制后果实中的酚类物质。前人研究发现,果品干制过程中总酚含量的变化可能与干燥过程中多酚氧化酶(PPO)活性和干燥时间有关^[27~29],大果沙棘真空冷冻干燥能有效抑制 PPO 活性,减少酶反应时间;自然晒干和阴干干燥时间长,外界温度为常温,对多酚氧化酶活性影响较低,抑制效果最小,容易与氧气接触,从而延长 PPO 在果实上的作用时间,导致总酚物质因氧化造成大量损失,从而使产品中总酚含量较低,热风干燥在高温条件下进行干燥,干燥温度过高,从而破坏了总酚物质;然而热泵干燥后大果沙棘总酚含量仅低于真空冷冻干燥,且显著高于其它三种干制方式($P<0.05$),这与大果沙棘干制后黄酮含量的变化较为相似,是否与干燥设备空间大小有关,有待于进一步研究。

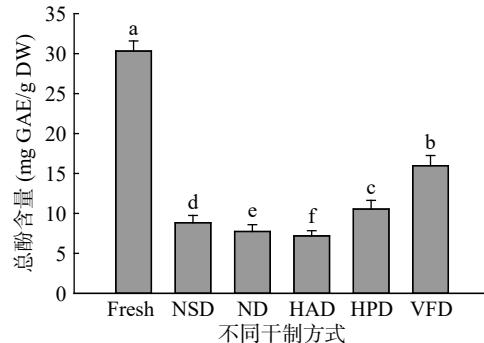


图 7 5 种干制方式对大果沙棘总酚含量的影响

Fig.7 Effects of five different drying methods on total phenols content of *Hippophae rhamnoides*

3 结论

通过对对比分析自然阴干、自然晒干、热风干燥、热泵干燥和真空冷冻干燥 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质指标,结果发现:

在干燥效率方面,热风干燥和热泵干燥干制大果沙棘 118 和 124 h 后,产品干燥率可达 100%,真空冷冻干燥 120 h 后,产品干燥率仅为 27.67%,继续干燥,其干燥率基本保持不变。5 种干制方式干燥大果沙棘的速率依次分别为:热风干燥>热泵干燥>自然晒干>真空冷冻干燥>自然阴干,热风干燥和热泵干燥大果沙棘去除物料水分含量高,干燥速率较大。可见,热风干燥和热泵干燥大果沙棘时间短、效率高,适于生产中规模化干制。

在干燥产品品质方面,真空冷冻干燥可使大果沙棘干果的色泽保持较好,呈现出亮黄色,褐变度较低,使果实维生素 C 和总酚含量维持较高的水平,但对总黄酮含量影响较大;自然晒干和热泵干燥可使大果沙棘总黄酮含量干制后高于鲜果和其它各处理,该结果需要进一步探索与验证。

因此,生产中应综合考虑大果沙棘干燥效率和干燥品质,既要充分利用热风干燥或热泵干燥大果沙棘时间短,效率高的优点,利用大果沙棘产区产地初加工热风或热泵烘干房的设备优势,在其水分含量未达到 13% 且其色泽、维生素 C、总黄酮和总酚含量未达到快速下降期之前对其进行热风干燥或热泵干燥处理,在此基础上,再利用真空冷冻干燥保持大果沙棘品质的特点对其进行干燥处理。建议后续研究可将热风干燥或热泵干燥与真空冷冻干燥技术联合使用,以期提升大果沙棘的干燥效率和品质,为生产中大果沙棘干制技术的应用提供科学依据。

参考文献

- [1] 刘勇, 廉永善, 王颖莉, 等. 沙棘的研究开发评述及其重要意义 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(9): 1547–1552. [LIU Y, LIAN Y S, WANG Y L, et al. Review of development research and significance of sea buckthorn [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(9): 1547–1552.]
- [2] KANAYAMA Y, KATO K, STOBDAN T, et al. Research progress on the medicinal and nutritional properties of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): A review [J]. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2012, 87(3): 203–210.
- [3] ZIELIŃSKA A, NOWAK I. Abundance of active ingredients in sea-buckthorn oil [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2017, 16(1): 95.
- [4] 王威威. 阿勒泰地区沙棘资源分布及种植开发研究 [J]. *乡村科技*, 2019(19): 110–111. [WANG W W. Research on the distribution and planting development of sea buckthorn resources in Aletai area [J]. *Rural Science & Technology*, 2019(19): 110–111.]
- [5] 张庆钢, 赵晶, 邵晶, 等. 沙棘果真空冷冻干燥工艺的研究 [J]. 食品科技, 2009, 34(1): 39–41. [ZHANG Q G, ZHAO J, SHAO J, et al. Research on the freeze-drying technology of *Hippophae rhamnoides* L. [J]. *Food Science and Technology*, 2009, 34(1): 39–41.]
- [6] 余善鸣, 张庆钢, 赵晶. 冻干工艺对沙棘果的品质影响 [J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(1): 65–67. [YU S M, ZHANG Q G, ZHAO J. The influence of the freeze-drying process on the quality of sea buckthorn fruit [J]. *Food Research and Development*, 2011, 32(1): 65–67.]
- [7] 田甜, 王波, 王云鹏, 等. 真空冷冻干燥沙棘果冻干时间模拟与实验研究 [J]. *冷藏技术*, 2020, 43(4): 11–15. [TIAN T, WANG B, WANG Y P, et al. Simulation and experimental on freeze-drying time of sea buckthorn invacuum freeze-drying [J]. *Cold Storage Technology*, 2020, 43(4): 11–15.]
- [8] ARAYA-FARIAS, MONICA, MAKHLOUF, et al. Drying of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berry: Impact of dehydration methods on kinetics and quality [J]. *Drying Technology*, 2015, 29(3): 351–359.
- [9] KYRIAKOPOULOU K, PAPPA A, KROKIDA M, et al. Effects of drying and extraction methods on the quality and antioxidant activity of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berries and leaves [J]. *Drying Technology*, 2013, 31(9): 1063–1076.
- [10] 姚娜娜, 车凤斌, 张婷, 等. 不同预处理对提高大果沙棘热风干燥效果的对比分析 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 211–219. [YAO N N, CHE F B, ZHANG T, et al. Comparative analysis of different pretreatments on improving the effect of hot-air drying of large-fruited sea-buckthorn [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 211–219.]
- [11] 谢龙. 枸杞真空脉动干燥特性及干燥品质的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [XIE L. Study on the vacuum pulsation drying characteristics and drying quality of wolfberry [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]
- [12] 李晓丽, 陈计峦, 范盈盈, 等. 无核白葡萄干制过程中酚类物质的变化及其与褐变的关系 [J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 27–32. [LI X L, CHEN J L, FAN Y Y, et al. Changes of phenolic substances in the process of drying seedless white raisins and their relationship with browning [J]. *Food Science*, 2019, 40(7): 27–32.]
- [13] 陈思奇, 顾苑婷, 王霖嵒, 等. 刺梨不同干燥模型建立及综合品质分析 [J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 47–54. [CHEN S Q, GU Y T, WANG L L, et al. Establishment of different drying models and comprehensive quality analysis of prickly pear [J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 47–54.]
- [14] 何玉倩, 宋晓燕, 刘宝林. 干燥方式对火龙果果皮理化特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(2): 159–165. [HE Y Q, SONG X Y, LIU B L. The effect of drying methods on the physical and chemical properties of dragon fruit peel [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(2): 159–165.]
- [15] 王海鸥, 谢焕雄, 陈守江, 等. 不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 292–299. [WANG H O, XIE H X, CHEN S J, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of lemon slices [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 292–299.]
- [16] 王宸之, 邓自高, 李琳, 等. 热风和微波干燥对龙眼品质的影响 [J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(4): 429–436. [WANG

- C Z, DENG Z G, LI L, et al. The effect of hot air and microwave drying on the quality of longan[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2018, 37(4): 429–436.]
- [17] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(15): 197–206.
- [SONG H H, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effects of drying methods and lye treatment on the drying characteristics and quality of fresh wolfberry[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 197–206.]
- [18] 姚娜娜, 车凤斌, 李永海, 等. 沙棘的营养价值及综合开发利用概述 [J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(2): 226–232. [YAO N N, CHE F B, LI Y H, et al. Overview of the nutritional value and comprehensive development and utilization of seabuckthorn[J]. *Preservation and Processing*, 2020, 20(2): 226–232.]
- [19] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对丰水梨片酚类物质含量及其抗氧化活性的影响 [J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 129–138. [TANG L L, YI J Y, BI J F, et al. Effects of different drying methods and alkali pretreatment on drying characteristics and quality of fresh goji berries (*Lycium barbarum*)[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2017, 17(12): 129–138.]
- [20] 张牧心, 尹少武, 刘传平, 等. 不同干燥方法下枸杞干燥特性及气流床厚层干燥的压降特性 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 103–108. [ZHANG M X, YIN S W, LIU C P, et al. Drying characteristics of *Lycium barbarum* under different drying methods and pressure drop characteristics of entrained thick layer drying[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(12): 103–108.]
- [21] IBTISSEM H S, FATMA Z R, INESS B R, et al. Total phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of sage (*Salvia officinalis* L.) plants as affected by different drying methods[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(3): 806–817.
- [22] 李朋亮. 枸杞干制中黄酮类化合物变化规律及其抗氧化活性研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2014. [LI P L. Study on the variation of flavonoids in dried wolfberry and its antioxidant activity[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.]
- [23] HAYAT K, ZHANG X, CHEN H, et al. Liberation and separation of phenolic compounds from citrus mandarin peels by microwave heating and its effect on antioxidant activity[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, 73(3): 371–376.
- [24] HAGERMAN A E, RIEDL K M, JONES G A, et al. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46(5): 1887–1892.
- [25] 徐亚飞, 雷宏杰, 王瑞珍, 等. 不同干燥方式对核桃青皮品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 212–215, 227. [XU Y F, LEI H J, WANG R Z, et al. Effects of different drying methods on the quality of fresh walnut green[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(9): 212–215, 227.]
- [26] SOGI D S, SIDDIQ M, DOLAN K D. Totalphenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 564–568.
- [27] 徐康, 杜金华. 干燥方法对黄秋葵抗氧化能力的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(5): 120–125. [XU K, DU J H. The effect of drying methods on the antioxidant capacity of okra[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(5): 120–125.]
- [28] 王晓敏, 吕瑞娜, 黄静, 等. 不同干燥方式对金针菇品质及多酚氧化酶活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 77–81. [WANG X M, LU R N, HUANG J, et al. Effects of different drying methods on the quality and polyphenol oxidase activity of *Flammulina velutipes*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(22): 77–81.]
- [29] JIA Y, KHALIFA I, HU L, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, 118: 67–76.