

干燥方式对百香果皮理化、功能及抗氧化特性的影响

The influence of drying methods on the physicochemical, functional, and antioxidant properties of passion fruit peel

刘钊含¹ 杨同香^{1,2} 许韩山³ 李雪静¹

LIU Zhaohan¹ YANG Tongxiang^{1,2} XU Hanshan³ LI Xuejing¹

陈俊亮¹ 任广跃^{1,4} 段 续^{1,4}

CHEN Junliang¹ REN Guangyue^{1,4} DUAN Xu^{1,4}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南省食品绿色加工与质量

安全控制国际联合实验室, 河南 洛阳 471023; 3. 杭州市临平区质量计量监测中心,

浙江 杭州 311199; 4. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. Food and Biology Engineering College, Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Food Processing and Quality Safety Control, Luoyang, Henan 471023, China; 3. Linping District, Hangzhou of Supervising Testing Center for Quality and Meterology, Hangzhou, Zhejiang 311199, China; 4. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Henan Province, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:探讨干燥方式对百香果皮的影响。方法:分别采用微波真空冷冻干燥、真空冷冻干燥、热泵干燥和远红外辐射干燥处理百香果皮,并分别测定其干燥特性、复水比、色差、膳食纤维、功能特性、微观结构、总酚含量、总黄酮含量及抗氧化性等指标。结果:热泵干燥百香果皮复水比、功能特性等较差;与远红外辐射干燥相比,微波真空冷冻干燥缩短了 53% 的干燥时间,且微波真空冷冻干燥处理的百香果皮具有较高的复水比(7.45)、总酚含量(13.45 mg GAE/g DW)和抗氧化活性(DPPH 自由基清除率为 38.53%,FRAP 为 1.14 mmol/L);真空冷冻干燥处理的百香果皮获得了较高的持水力[(21.64±0.21) g/g]、持油力[(6.09±0.71) g/g]、溶胀性[(25.00±1.00) g/g],以及更高的总黄酮含量(7.84 mg RT/g DW);经不同方式干燥后果皮的复水比、膳食纤维、功能特性、总酚含量、总黄酮含量、抗氧化活性等存在显著性差异($P<0.05$)。结论:干燥方式对百香果皮品质具有显著影响,其中微波

真空冷冻干燥是较佳干燥方式。

关键词:百香果皮;微波真空冷冻干燥;真空冷冻干燥;热泵干燥;远红外辐射干燥;理化性质;抗氧化活性

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the effects of drying methods on passion fruit peels. Methods: Passion fruit peels were treated with microwave vacuum freeze-drying, vacuum freeze-drying, heat pump drying, and far-infrared radiation drying. The drying characteristics, rehydration ratio, color difference, dietary fiber, functional properties, microstructure, total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant properties were measured and determined respectively. Results: Heat pump-dried passion fruit peels had poor rehydration ratio and functional properties. Microwave vacuum freeze drying reduced the drying time by 53% when compared to far-infrared radiation drying, and the microwave vacuum freeze-dried treated passion fruit peels had a higher rehydration ratio (7.45), total phenolic content (13.45 mg GAE/g DW) and antioxidant activity (DPPH was 38.53%, FRAP was 1.14 mmol/L). Additionally, the passion fruit peels were vacuum freeze-dried with treatment to increase their water holding capacity [(21.64±0.21) g/g], oil holding capacity [(6.09±0.71) g/g], swelling [(25.00±1.00) g/g], and total flavonoid content (7.84 mg RT/g DW). Different drying techniques led to higher rehydration ratios, and

基金项目:国家自然科学基金(编号:32172352);河南省引进国外智力专项(编号:HNGD2021040)

作者简介:刘钊含,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:杨同香(1984—),女,河南科技大学副教授,博士。

E-mail:txyamy@163.com

收稿日期:2023-02-04 **改回日期:**2023-06-22

they also significantly differed ($P < 0.05$) in terms of dietary fiber, functional properties, total phenolic content, total flavonoid content and antioxidant activity of the peels.

Conclusion: The quality of passion fruit peel can be greatly affected by the drying process, and microwave vacuum freeze-drying is the most preferred technique.

Keywords: passion fruit peel powder; microwave vacuum freeze-drying; vacuum freeze-drying; heat pump drying; far-infrared radiation drying; physicochemical properties; antioxidant activity

近年来,百香果汁和果肉在食品工业中的应用越来越兴盛,但占全果质量 50%~55% 的果皮却被当作加工副产物抛弃。百香果皮含有丰富的膳食纤维和天然活性物质如黄酮、多酚、花色苷等^[1],干燥后的百香果皮常被用于乳品、肉制品或面制品的加工中,是一种很有潜力的食品加工原料。然而,在干燥过程中可能会造成百香果皮营养成分损失,因此,选择合适的干燥方法是提高产品质量的关键。

热泵干燥(HPD)是通过空气对流的方式进行干燥,热泵干燥机能够除湿并且回收废气中的蒸发潜能,比传统的烘干更加节能高效^[2]。远红外辐射干燥(FIRD)以电磁辐射的方式将能量传递至样品内部,这种辐射能够渗透到距物料表明约 3 mm 的深度,内外同时加热激发水分子向表面运动,这就使 FIRD 产品干燥得更加均匀,干燥后的样品在结构上也更加疏松^[3]。真空冷冻干燥(VFD)是通过三相点的原理使材料中的水分直接升华,在 VFD 之前需要对样品进行预处理,此时样品体积膨胀,水分升华后就会留下具有高质量的生物质孔结构,有利于产品的快速复水。微波真空冷冻干燥(MVFD)同样需要预冻及真空环境,并辅以微波处理。MVFD 除与 VFD 一样对样品微观结构的损伤较小外,其加热更均匀、速度更快且能耗更低,所以营养成分损失更少^[4]。

目前百香果皮常使用的干燥方法是热风干燥,但热风干燥不仅时间长、能耗高,而且制品营养损失较大。关于开展微波真空冷冻干燥(MVFD)、冷冻干燥(VFD)、热泵干燥(HPD)、远红外辐射干燥(FIRD)对百香果皮理化特性影响研究尚未见相关报道。研究拟采用 MVFD、VFD、HPD、FIRD 处理新鲜百香果皮,探索 4 种干燥方式对百香果皮复水性、色泽、微观结构、膳食纤维、总酚、总黄酮含量、抗氧化性等的影响,以期为百香果皮综合开发利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 原材料

新鲜百香果购自洛阳大张超市,在 4℃ 环境下贮藏备用。新鲜百香果皮的初始含水率为 $(87.75 \pm 0.07)\%$ (湿基)。新鲜百香果取皮洗净后切成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的方块。一部分用于 HPD 和 FIRD。其余的于 -25°C 下冷冻

12 h 以上, 然后进行 VFD 和 MVFD。

1.2 试剂

盐酸、甲醇、无水乙醇:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

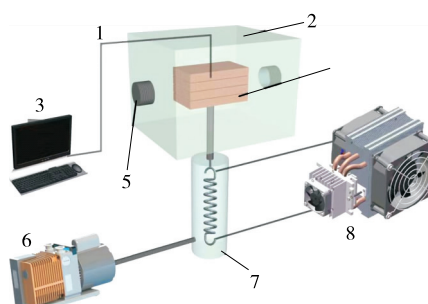
Folin-酚:标准品,上海蓝季科技发展有限公司;

没食子酸、芦丁、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸(ABTS)、三吡啶基三嗪(TPTZ)、抗坏血酸(V_C)；标准品，上海源叶生物有限公司。

1.3 设备

真空微波冷冻干燥机(如图 1 所示):实验室自行设计;

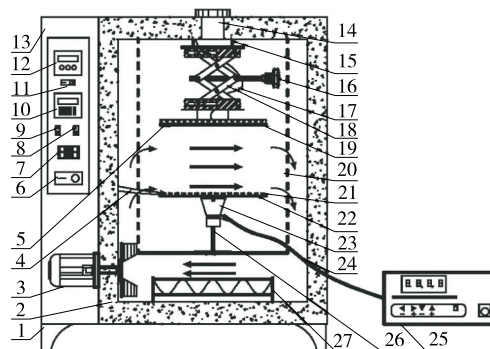
远红外辐射干燥设备(如图 2 所示):河南科技大学
自制:



1. 光纤温度传感器 2. 微波谐振腔 3. 控制系统 4. 干燥腔和料盘 5. 微波输入 6. 真空泵 7. 冷阱 8. 制冷设备

图 1 微波冷冻干燥设备示意图

Figure 1 Schematic diagram of microwave vacuum freeze drying equipment



1. 干燥箱支架 2. 隔热层 3. 风机 4. 热电偶 5. 温度传感器
6. 电源开关 7. 物料温度显示面板 8. 辅助加热开关 9. 风机
控制器 10. 干燥箱温度调节面板 11. 远线外辐射板开关 12. 射
板温度显示调节面板 13. 箱体 14. 排气孔 15. 伸缩架紧固
螺钉 16. 旋钮 17. 辐射板电缆线 18. 伸缩架 19. 远红外辐
射板 20. 干燥室 21. 物料 22. 超声振动盘 23. 换能器 24. 电
缆线 25. 超声波发生器 26. 换能器支架 27. 电加热器

图 2 远红外干燥设备示意图

Figure 2 Schematic diagram of far infrared radiation drying equipment

真空冷冻干燥机:GIPP-5000 型,上海继谱电子科技有限公司;

热泵干燥机:GHRH-20 型,广东省农业机械研究所干燥设备制造厂;

电热鼓风干燥箱:101 型,北京市永光明医疗机械厂;

电子分析天平:JA2003N 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

色差仪:XT-15 D-110 型,美国爱色丽公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,上海龙尼柯仪器有限公司;

日立台式电镜:TM3030Plus 型,日本株式会社;

高速万能粉碎机:QE-200 型,浙江屹立工贸有限公司。

1.4 干燥方法

将 200 g 百香果皮样品通过 4 种方式干燥。除了 VFD 外,在干燥过程中,每 30 min 对样品称量,直至恒重时停止干燥,VFD 当其温度探头显示温度曲线趋于平缓时停止干燥。每组试验均重复 3 次。干燥方法描述如下。

(1) MVFD:将微波真空冷冻干燥机冷阱温度设置为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,真空度设置为 110 Pa,微波功率为 $1.5\text{ W/g}^{[5]}$ 。

(2) VFD:将真空冷冻干燥机隔板温度设置为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,使其以 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速度升温^[6]。真空度设置为 5 Pa。

(3) HPD:将热泵干燥机温度设置为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 1.5 m/s ,气流相对湿度为 $8\%^{[7]}$ 。

(4) FIRD:将远红外干燥设备的辐射温度设置为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,辐射距离为 10 cm,空气流速为 $1.5\text{ m/s}^{[8]}$ 。

1.5 测定方法

1.5.1 湿基含水率测定 参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法,按式(1)计算湿基含水率。

$$M = \frac{m - m_d}{m}, \quad (1)$$

式中:

M ——百香果皮的湿基含水率, g/g;

m ——百香果皮的质量, g;

m_d ——干物质质量, g。

1.5.2 干燥特性指标测定 参照文献[9],按式(2)、式(3)计算百香果皮干燥过程中的干基含水率、干燥速率。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d}, \quad (2)$$

$$D_r = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_1 - t_2}, \quad (3)$$

式中:

M_t ——百香果皮干燥至 t 时的干基含水率, g/g;

m_t ——干燥至 t 时的质量, g;

m_d ——干物质质量, g;

D_r ——干燥速率, g/(g · h);

M_{t_1} ——干燥 t_1 时刻的百香果皮干基含水率, g/g;

M_{t_2} ——干燥 t_2 时刻的百香果皮干基含水率, g/g。

1.5.3 复水比 将约 $(2.00 \pm 0.01)\text{ g}$ 干燥产物加入 200 mL 蒸馏水中。在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中水浴 2 h 后取出沥水,用滤纸擦拭干样品表面的水分,称重。设计 3 次平行试验,按式(4)计算复水比^[10]。

$$R_r = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

R_r ——复水比, %;

m_2 ——百香果皮干制品复水后的质量, g;

m_1 ——百香果皮干制品复水前的质量, g。

1.5.4 色差 采用全自动色差仪在自然光下测量新鲜和干燥百香果皮的色度,每次试验前使用标准的白板校准仪器。测量新鲜百香果皮和干燥百香果皮的 L^* (明度/暗度)、 a^* (红色/绿色) 和 b^* (黄色/蓝色) 值。每组取 3 个样品,每个样品测量 3 次。根据式(5)~式(6)计算总色差和褐变指数^[11]。

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

$$B_i = \left[100 \times \left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \right) \right] / 0.172, \quad (6)$$

式中:

ΔE ——总色差;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥百香果皮的色度;

L_0 、 a_0 、 b_0 ——新鲜百香果皮的色度;

B_i ——褐变指数。

1.5.5 膳食纤维组分的测定 准确称取 $(2.00 \pm 0.01)\text{ g}$ 百香果皮粉末,加入一定量的 α -淀粉酶搅拌均匀,加盖铝箔,置于 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴箱中持续震荡 35 min,冷却至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时加入蛋白酶,震荡反应 30 min。反应后加入 3 mol/L 的乙酸,于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下调节 pH 为 4.5 ± 0.2 ,添加糖化酶震荡反应 30 min。对反应后的样品进行抽滤,使用 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热水洗涤残渣,收集滤液用于制备可溶性膳食纤维(SDF),再分别用 78% 乙醇、 95% 乙醇和丙酮洗涤残渣,于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干过夜得到不可溶性膳食纤维(IDF),冷却称量并按式(7)计算 IDF 含量。将抽滤产生的滤液加入 4 倍体积预热至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 95% 乙醇,室温下沉淀 1 h 后进行抽滤,分别用 78% 乙醇、 95% 乙醇和丙酮洗涤残渣,于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干过夜得到 SDF,冷却称量并按式(8)计算 SDF 含量。最后通过式(9)计算总膳食纤维(TDF)^[12]。

$$A = \frac{m_1}{m} \times 100\%, \quad (7)$$

$$B = \frac{m_2}{m} \times 100\%, \quad (8)$$

$$C = \frac{m_1 + m_2}{m} \times 100\%, \quad (9)$$

式中:

A——IDF 的得率, %;

B——SDF 的得率, %;

C——TDF 的得率, %;

m_1 ——IDF 的重量, g;

m_2 ——SDF 的重量, g;

m ——百香果皮粉末的重量, g。

1.5.6 功能特性

(1) 持水力: 称取 (0.10 ± 0.01) g 样品置于 20 mL 离心管中, 加蒸馏水 10 mL, 搅拌均匀后于室温下放置 24 h。5 000 r/min 离心 15 min, 取沉淀物称重^[13], 按式(10)计算持水力。

$$W_h = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \quad (10)$$

式中:

W_h ——样品持水力, g/g;

m_1 ——样品吸水后的质量, g;

m_2 ——样品吸水前的质量, g。

(2) 持油力: 称取 (0.10 ± 0.01) g 样品置于 20 mL 离心管中, 加精炼大豆饱和油 10 mL 浸泡样品 18 h, 每隔 5 min 搅拌 1 次。5 000 r/min 离心 15 min, 取出沉淀物称重^[14], 按式(11)计算持油力。

$$O_h = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \quad (11)$$

式中:

O_h ——样品持油力, g/g;

m_1 ——样品吸油后的质量, g;

m_2 ——样品吸油前的质量, g。

(3) 溶胀性: 称取 (0.10 ± 0.01) g 样品, 用带刻度的试管装取, 观察并记录体积。向试管中加 10 mL 蒸馏水, 常温下静置 24 h, 读取试管中样品的自由膨胀体积, 计算每克纤维的膨胀体积(mL/g)^[15], 按式(12)计算溶胀。

$$S_p = \frac{v_1 - v_0}{m}, \quad (12)$$

式中:

S_p ——样品溶胀性, mL/g;

v_1 ——样品吸水膨胀后的体积, mL;

v_0 ——样品吸水膨胀前的体积, mL;

m ——样品吸水膨胀前的质量, g。

1.5.7 微观结构 将不同干燥方式制得的百香果皮磨粉并过 200 目筛, 将样品固定于样品台上, 用扫描电镜进行

观察, 比较分析不同粉体之间的表面形貌特点^[16]。

1.5.8 总酚含量 采用 Folin-Ciocalteu 法。将一定质量的没食子酸标准品(质量浓度范围为 $0.0 \sim 5.4 \mu\text{g/mL}$)与 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂混合, 在室温下静置 5 min。然后加入 3 mL 7.5% 的碳酸钠溶液, 加蒸馏水定容至 10 mL 于 25 °C 下避光水浴 60 min 后, 用紫外分光光度计测量 760 nm 处的吸光度, 获得没食子酸的标准曲线($y = 0.0008x + 0.0009, R^2 = 0.9941$)。再用同样的方法, 利用 0.5 mL 质量浓度为 0.05 g/mL 的提取物测定出各样品的吸光度。样品的活性以每单位重量的没食子酸当量毫克数(mg GAE/g DW)表示^[17]。

1.5.9 总黄酮含量 将一定质量的芦丁标准品(质量浓度范围为 $0 \sim 30 \mu\text{g/mL}$)与 0.4 mL 的 5% 亚硝酸钠混合放置 6 min, 再加入 0.4 mL 的 10% 硝酸铝放置 6 min, 最后加 4 mL 的 4% 氢氧化钠, 用 90% 的乙醇定容至 10 mL, 在室温下黑暗中放置 15 min, 使用分光光度计在 510 nm 下测量吸光度, 获得芦丁的标注曲线($y = 0.0001x - 0.0305, R^2 = 0.9929$)以计算样品中芦丁含量。再用同样的方法, 利用 0.5 mL 质量浓度为 0.1 g/mL 的提取物测定出各样品的吸光度。样品的活性以每单位重量的芦丁当量毫克数(mg RT/g DW)表示^[15]。

1.5.10 抗氧化能力

(1) DPPH 自由基清除能力: 将 5 mL 质量浓度为 0.1 g/mL 的提取物与 5 mL DPPH 溶液混合均匀, 避光反应 20 min。通过分光光度计在 517 nm 的波长下测量吸光值, 试验重复 3 次。按式(13)计算 DPPH 自由基清除率^[18]。

$$B = \left(\frac{1 - A_s}{A_0} \right) \times 100\%, \quad (13)$$

式中:

B——DPPH 自由基清除率, %;

A_s ——添加样品待测液的 DPPH 混合溶液的吸光值;

A_0 ——DPPH 与乙醇溶液的吸光值。

(2) ABTS 自由基清除能力: 将 3 mL 质量浓度为 0.1 g/mL 的提取物与 6 mL ABTS 工作溶液混合均匀, 在室温下保持 6 min。通过分光光度计在 734 nm 的波长下测量吸光值, 试验重复 3 次。按式(14)计算 ABTS 自由基清除率^[19]。

$$C = \left(\frac{1 - A_s}{A_0} \right) \times 100\%, \quad (14)$$

式中:

C——ABTS 自由基清除率, %;

A_s ——添加样品待测液的 ABTS 混合溶液的吸光值;

A_0 ——ABTS 与乙醇溶液的吸光值。

(3) 铁还原抗氧化能力(FRAP): 将一定质量的 V_C 标

准溶液(浓度范围为 $0 \sim 50 \mu\text{g/mL}$)与 6 mL 的 FRAP 溶液混合均匀,避光反应 30 min。使用分光光度计在 593 nm 下测量吸光度,获得 V_c 的标注曲线($y=0.0193x+0.0382, R^2=0.9740$)以计算样品的 FRAP 值。再将 3 mL 质量浓度为 0.1 g/mL 的提取物与 6 mL FRAP 溶液混合避光反应 30 min 测定出各样品的吸光度。样品的 FRAP 值以每单位重量的 V_c 当量毫克数(mg TEAC/g DW)表示^[20]。

1.6 统计分析

数据采用 Excel 软件处理,试验设置 3 个平行,结果以平均值±标准差表示,采用 Origin 2022 软件作图,采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。采用 Duncan 多重检验进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 含水率和干燥速率

VFD 由于干燥过程中无法取样而未绘制干燥曲线和干燥速率曲线。MVFD、HPD 和 FIRD 干燥百香果皮的干基含水率变化曲线如图 3 所示。MVFD、VFD、HPD 和 FIRD 到达恒重所需的干燥时间分别为 240, 420, 480, 510 min。其中 FIRD 的干燥时间最长且到达恒重时的干基含水率最高, MVFD 的干燥时间最短且到达恒重时干基含水率最低。

图 4 显示了不同干燥方法下百香果皮的干燥速率与干基含水率的关系,干燥初期 HPD 的干燥速率较高,而后期 MVFD 的干燥速率更高。初期 HPD 干燥速率更高的原因可能是,HPD 可以给样品带来更高的温度且 HPD 的空气湿度较低,有利于 HPD 空气与样品之间的能量和水分交换,但在干燥过程中,HPD 无法给百香果皮样品留下良好的孔道,导致后期样品的脱水受阻,因而干燥速率下降^[21]。FIRD 通过远红外辐射板将辐射能传递至物料中从而引起样品中水分子的热效应,实现干燥,但效果

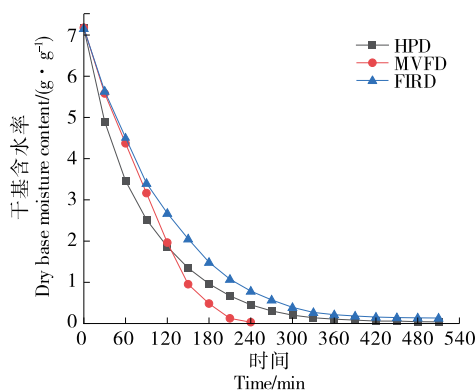


图 3 不同干燥方式下百香果皮的干燥曲线

Figure 3 Drying curves of passion fruit peels under different drying methods

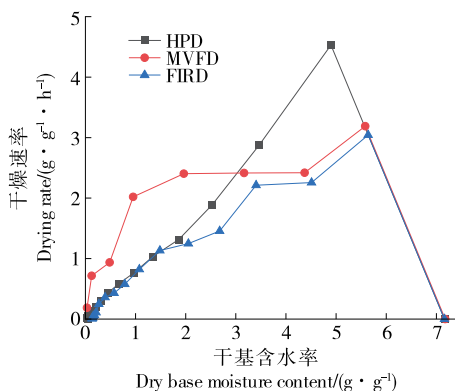


图 4 不同干燥方式下百香果皮的干燥速率

Figure 4 Drying rate of passion fruit peel under different drying methods

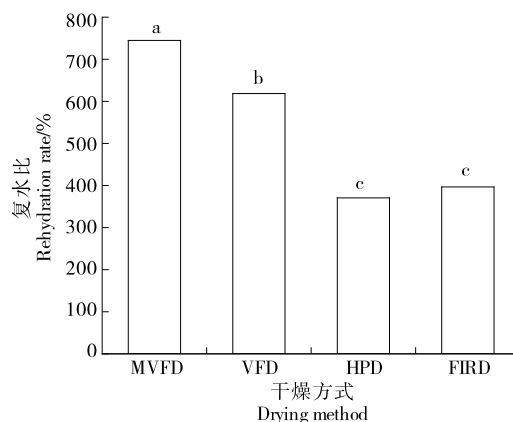
不如 HPD,可能是由于 FIRD 并未给样品提供较低的空气湿度。在 MVFD 过程中,设备给预冻样品提供了真空环境并加以微波辅助,样品中的冰晶直接升华,并留下了良好的孔道,因此干燥后期干燥速率大于 HPD 和 FIRD。与普通 VFD 相比, MVFD 不仅保留了 VFD 干燥样品品质高的特点,还显著缩短了干燥速率。

2.2 复水比

由图 5 可知, MVFD 和 VFD 的复水比显著高于 HPD 和 FIRD,可能是由于 MVFD 和 VFD 都是通过冰晶在真空环境下直接升华的方式对样品进行干燥的,会为样品保留海绵状多孔结构,提高样品的复水性。

2.3 色差

由表 1 可知, VFD 样品显示出最小的 ΔE 值, VFD 和 MVFD 处理所得样品显示出较低的褐变指数(BI)。说明 VFD 更能保持百香果皮的色泽。样品在干燥过程中发生颜色变化可能是由酶促褐变、非酶促褐变、过热氧化、叶绿素和类胡萝卜素氧化所引起的^[22]。低温环境可



小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)

图 5 不同干燥方式下百香果皮的复水比

Figure 5 Rehydration rate of passion fruit peel under different drying methods

表 1 不同干燥方式下百香果皮粉色泽[†]

Table 1 Passion fruit peel powder color under different drying methods

干燥方法	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	ΔE	BI
MVFD	55.40±3.16	11.13±0.47 ^a	0.81±0.23 ^b	26.06±0.59	15.30±1.30 ^b
VFD	55.63±1.24	11.11±0.78 ^a	2.39±0.72 ^b	25.59±0.89	18.12±1.00 ^{ab}
HPD	58.00±1.63	9.00±0.41 ^b	5.60±0.77 ^a	27.57±1.43	20.82±1.52 ^a
FIRD	56.87±1.26	8.99±0.48 ^b	5.55±1.62 ^a	26.67±1.56	21.12±2.63 ^a

† 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

以减少样品中的蛋白质和碳水化合物等热敏成分的非酶褐变和糖分的美拉德反应。此外,低温处理还可以减少叶绿素和类胡萝卜素的分解^[23]。

2.4 膳食纤维组分含量

由表 2 可知,MVFD 和 HPD 样品 TDF 含量较高,VFD 和 FIRD 样品 TDF 含量较低。高品质的膳食纤维要求 $SDF\geq 10\%$ ^[24]。研究中,不同干燥方式得到的百香果皮膳食纤维均满足要求。4 种干燥方式处理过的百香果皮中 SDF、IDF 含量差别不大,可能是因为膳食纤维的成分(非淀粉多糖、纤维素、半纤维素和果胶)中除去纤维素和半纤维素容易被细菌分解外,在其他环境条件如高温、红外辐射或微波下均较为稳定,不宜被破坏,因此 SDF 和 IDF 并无显著差异。

2.5 功能特性

由表 3 可知,VPD 制备的百香果皮的持水力、持油力

表 2 不同干燥方式下百香果皮粉膳食纤维含量[†]

Table 2 Dietary fiber content of passion fruit peel powder under different drying methods

干燥方法	IDF/%	SDF/%	TDF/%	IDF/SDF
MVFD	0.67±0.03	0.18±0.04	0.85±0.05 ^{ab}	3.81±0.97
VFD	0.61±0.06	0.18±0.07	0.78±0.01 ^c	4.04±2.40
HPD	0.64±0.01	0.23±0.03	0.87±0.02 ^a	2.78±0.41
FIRD	0.65±0.02	0.16±0.02	0.81±0.01 ^{bc}	4.33±0.79

† 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

和溶胀性均显著大于其他干燥方式的。这可能是因为样品经过 VFD 处理后,内部呈现网状结构且孔隙增加,使得样品对水和油的物理截流力也随之增加。持油力更高的百香果皮粉与油脂之间的相互作用也更强,能够吸附脂肪,可能有利于降低血清胆固醇水平^[25]。

表 3 不同干燥方式下百香果皮粉及百香果皮膳食纤维的功能特性[†]

Table 3 Functional properties of passion fruit peel powder and dietary fiber of passion fruit peel under different drying methods

干燥方法	持油力/($g\cdot g^{-1}$)		持水力/($g\cdot g^{-1}$)		溶胀性/($mL\cdot g^{-1}$)	
	果皮粉	膳食纤维	果皮粉	膳食纤维	果皮粉	膳食纤维
MVFD	3.26±0.13 ^b	3.72±0.74	11.06±0.76 ^c	7.22±0.51 ^b	11.00±1.00 ^c	11.67±1.52 ^{ab}
VFD	6.09±0.71 ^a	3.22±0.15	21.64±0.21 ^a	11.90±0.73 ^a	25.00±1.00 ^a	14.00±2.00 ^a
HPD	2.88±0.11 ^b	3.39±0.71	15.32±0.65 ^b	4.71±0.48 ^c	15.67±1.53 ^b	10.00±2.00 ^b
FIRD	3.09±0.07 ^b	4.19±0.49	16.24±0.49 ^b	6.45±0.31 ^b	13.00±1.00 ^c	6.33±1.53 ^c

† 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

经过不同干燥方式处理的样品所得的膳食纤维持水力大小为:VFD>MVFD>FIRD>HPD;持油力大小为:FIRD>MVFD>HPD>VFD;溶胀性大小为:VFD>MVFD>HPD>FIRD。VPD 百香果皮的持水力和溶胀性高可能是由于 VPD 百香果皮 SDF 含量较高,分子链通过氢键持有的水分子更多。且 HPD 和 FIRD 长时间的热处理降低了膳食纤维的持水力^[26]。

2.6 微观结构

如图 6 可知,4 种方式干燥的样品中,粒径接近于1~5 μm 的微小颗粒附着于大颗粒之上。在 HPD 条件下,百香果皮粉表面非常粗糙,外观品质差;FIRD 的百香果

皮颗粒表面较为粗糙;这两种方式干燥的百香果皮粉结构被破坏得比较严重,粒度分布不均。MVFD 的百香果皮表面较粗糙;VFD 百香果皮颗粒较为完整,表面也较为光滑。MVFD 和 VFD 的百香果皮颗粒形状较不规则,能够很好地保持百香果皮颗粒的结构特性。这可能是因为真空系统中,隔离空气使得物料能够更好地保持原有特性。综合来看,VFD 的样品微观结构最佳。

2.7 总酚含量

由表 4 可知,MVFD 和 HPD 样品的总酚含量显著高于 VFD 和 FIRD 样品的。VFD 属于低温干燥,而 HPC 和 FIRD 的处理温度分别为 60,70 $^{\circ}C$ 。由于 60 $^{\circ}C$ 左右的

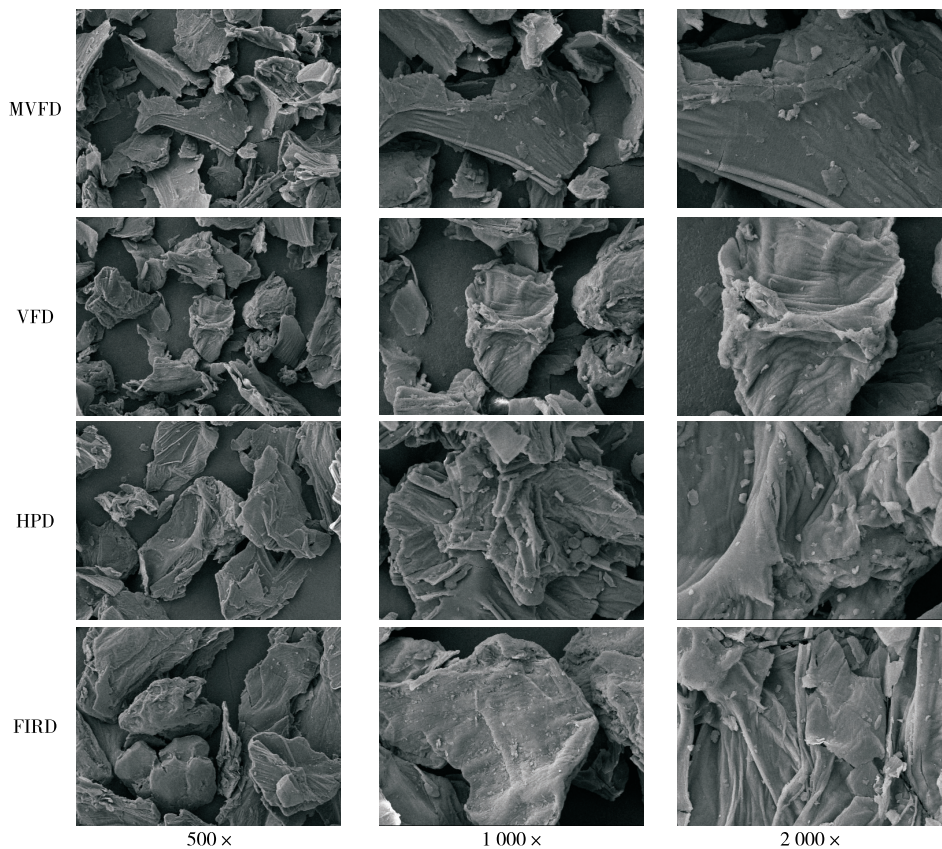


图 6 不同干燥方式下百香果皮粉 SEM 图

Figure 6 SEM images of passion fruit peel powder under different drying methods

表 4 不同干燥方式下百香果皮粉总酚、总黄酮及抗氧化[†]

Table 4 Total phenols, total flavonoids and antioxidants of passion fruit peel powder under different drying methods

干燥方法	总酚/ (mg GAE · g ⁻¹ DW)	总黄酮/ (mg RT · g ⁻¹ DW)	DPPH 自由基 清除率/%	ABTS 自由基 清除率/%	FRAP 值/ (mg TEAC · g ⁻¹ DW)
MVFD	13.45±0.37 ^a	5.94±0.38 ^b	38.67±5.77 ^a	12.33±2.52 ^b	1.34±0.16 ^a
VFD	8.31±0.30 ^b	7.84±0.84 ^a	26.00±2.00 ^b	13.00±0.00 ^b	1.24±0.05 ^a
HPD	13.87±1.37 ^a	6.13±0.33 ^b	16.33±2.08 ^c	16.00±0.00 ^a	0.85±0.03 ^c
FIRD	9.21±0.46 ^b	3.78±0.66 ^c	11.00±1.73 ^c	16.67±0.58 ^a	1.05±0.04 ^b

[†] 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

温度有利于结合态酚酸的释放,70℃以上的高温会导致酚类物质受热降解。因此,在干燥时间相同的情况下 VFD 和 FIRD 处理的样品中 TPC 低而 HPD 处理的样品中 TPC 高。忻晓庭等^[27]和尚红梅等^[28]的研究结果也都显示酚类物质的含量会随着样品干燥温度的上升而呈先上升后下降的趋势。虽然微波处理在一定程度上也会导致酚类的降解,但微波处理时间较短,并且真空环境下的样品比常压环境下有更少的氧化作用,因此 MVFD 百香果皮的 TPC 较高。

2.8 总黄酮含量

由表 4 可知,VFD 样品的黄酮含量最高,HPD 和

MVFD 样品的次之且二者无显著差异,而 FIRD 样品的最低。这是因为黄酮受温度影响很大,有研究^[27]表明,当温度超过 40℃时,黄酮就会被破坏。

2.9 抗氧化能力

由表 4 可知,MVFD 和 VFD 样品有较高的抗氧化活性,而 FIRD 和 HPD 的抗氧化能力则略低。MVFD 在维持样品 DPPH 自由基清除能力方面发挥了积极的作用,这是由于较高的干燥温度和较长的干燥处理时间都可能导致 DPPH 自由基清除能力的下降。这与对桑叶^[20]和藜麦^[29]的研究结论一致。MVFD 和 VFD 样品都表现出了较高的 FRAP 值,可能是由于高温处理导致了 FRAP

的下降,Iasnaia 等^[30]在对葡萄汁的研究中,同样温度上升也导致了 FRAP 的下降。然而,MVFD 和 VFD 样品的 ABTS 值却略小于 HPD 和 FIRD 样品的,具体原因尚不清晰。综合考虑 DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 三项指标,MVFD 处理效果最好,最适合处理百香果皮。

3 结论

在研究范围内,不同的干燥方式对百香果皮干的功能特性、营养特性有着显著的影响。与真空冷冻干燥、热泵干燥和远红外辐射干燥相比,微波真空冷冻干燥的干燥速度最快,并且能够更好地保持样品的复水、膳食纤维、总酚和抗氧化性能。真空冷冻干燥的样品具有更高的黄酮含量和功能特性。综合分析,微波真空冷冻干燥是干燥百香果皮的最佳方法。在未来的研究中,可以将质量与能耗之间的平衡纳入研究范围或进一步讨论干燥方式对百香果皮生物可及性的影响。此外,还可以利用联合干燥技术干燥百香果皮,以进一步提高干燥速率。

参考文献

- [1] 张帅, 程昊. 百香果壳粗多糖的提取及其抑菌性检测[J]. 中国食品添加剂, 2018(11): 182-187.
ZHANG S, CHENG H. Extraction and antimicrobial activities detection of crude polysaccharides from passion fruit husk[J]. China Food Additives, 2018(11): 182-187.
- [2] PERERA C O, RAHMAN M S. Heat pump dehumidifier drying of food[J]. Trends in Food Science & Technology, 1997, 8(3): 75-79.
- [3] ZENG Y, LIU Y H, ZHANG J Y, et al. Effects of far-infrared radiation temperature on drying characteristics, water status, microstructure and quality of kiwifruit slices[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3 086-3 096.
- [4] LAO Y Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. Drying Technology, 2019, 38(5/6): 1-13.
- [5] 段柳柳, 段续, 任广跃. 怀山药微波冻干过程的水分扩散特性及干燥模型[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 23-30.
DUAN L L, DUAN X, REN G Y. Water diffusion characteristics and microwave vacuum freeze-drying modelling of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) tubers[J]. Food Science, 2019, 40(1): 23-30.
- [6] 赵梦月, 段续, 任广跃, 等. 山茱萸微波冻干动力学及品质变化分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 111-117, 129.
ZHAO M Y, DUAN X, REN G Y, et al. Drying kinetics and quality changes analysis of *comus officinalis* dried by microwave freeze-drying[J]. Food & Machinery, 2021, 37(11): 111-117, 129.
- [7] 姜佳惠. 草莓微波冻干过程及品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 61.
JIANG J H. Study on microwave freeze-drying process and quality control of strawberry[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 61.
- [8] 罗磊, 支梓鉴, 刘云宏, 等. 苹果片气调热泵干燥特性及数学模型[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 13-17.
- LUO L, ZHI Z J, LIU Y H, et al. Drying characteristics and mathematical modeling of heat pump drying of apple slices by filling nitrogen and lowering oxygen[J]. Food Science, 2014, 35(5): 13-17.
- [9] DOYMAZ I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices[J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760-766.
- [10] WEI Q, HUANG J P, ZHANG Z Y, et al. Effects of different combined drying methods on drying uniformity and quality of dried taro slices[J]. Drying Technology: An International Journal, 2019, 37(3): 322-330.
- [11] DUAN X, LIU W C, REN G Y, et al. Effects of different drying methods on the physical characteristics and flavor of dried hawthorns (*Crataegus* spp.) [J]. Drying Technology, 2017, 35(11): 1 412-1 421.
- [12] ZENG Y, LIU Y, ZHANG J, et al. Effects of far-infrared radiation temperature on drying characteristics, water status, microstructure and quality of kiwifruit slices[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3 086-3 096.
- [13] 李依娜, 余元善, 李璐, 等. 不同脱糖方式下荔枝果渣膳食纤维的理化特性比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 94-103.
LI Y N, YU Y S, LI L, et al. Comparison of the physicochemical properties of dietary fiber from lychee pomace treated with different desugarization methods [J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(2): 94-103.
- [14] 刘鸿斌, 樊红秀, 赵鑫, 等. 改性处理对绿豆皮膳食纤维结构及功能特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 82-91.
LIU H C, FAN H X, ZHAO X, et al. Effects of modification on the structure and functional properties of dietary fiber in mung bean skin [J]. Journal of Chinese institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 82-91.
- [15] 王司琪, 王佳佳, 李泊铮, 等. 提取方法对玉米耳膳食纤维结构特征和功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 93-101.
WANG S Q, WANG J J, LI B Z, et al. Effects of extraction methods on the structural and functional characteristics of dietary fiber from *Auricularia cornea* var. *Li*[J]. Food Science, 2022, 43(24): 93-101.
- [16] 吴婧, 刘祚祚, 吴杰, 等. 滇橄榄果渣膳食纤维的提取及其体外吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 174-181.
WU J, LIU Z Z, WU J, et al. Extraction and *in vitro* adsorption properties of dietary fiber from *Phyllanthus emblica* Linn. pomace [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 174-181.
- [17] SILVA N C, SANTANA R C, DUARTE C R, et al. Impact of freeze-drying on bioactive compounds of yellow passionfruit residues[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 40(4): 1-9.
- [18] DUDONNÉ S, VITRAC X, COUTIÈRE P, et al. Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP,

- SOD, and ORAC assays[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(5): 1 768-1 774.
- [19] GUO C Y, ZHANG N, LIU C Q, et al. Qualities and antioxidant activities of lotus leaf affected by different drying methods[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(2): 1-8.
- [20] SIDDHURAJU P, MOBAN P S, BECKER K. Studies on the antioxidant activity of Indian Laburnum (*Cassia fistula* L.): A preliminary assessment of crude extracts from stem bark, leaves, flowers and fruit pulp[J]. Food Chemistry, 2002, 79(1): 61-67.
- [21] 张铭铭, 江用文, 滑金杰, 等. 干燥方式对绿茶栗香的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 115-123.
- ZHANG M M, WANG G H, SUN F X, et al. Effect of drying methods on chestnut-like aroma of green tea[J]. Food Science, 2020, 41(15): 115-123.
- [22] 彭钰航, 王广红, 孙飞雪, 等. 胡萝卜热泵干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 211-216.
- PENG Y H, WANG G H, SUN F X, et al. Optimization of carrot heat pump drying process by response surface methodology[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 211-216.
- [23] NAHIMANA H, ZHANG M. Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot[J]. Drying Technology, 2011, 29(7): 836-847.
- [24] CHOONG C O, CHUA B L, FIGIEL A, et al. Hybrid drying of *Murraya koenigii* leaves: Energy consumption, antioxidant capacity, profiling of volatile compounds and quality studies[J]. Processes, 2020, 8(2): 240.
- [25] 李来好. 海藻膳食纤维的提取、毒理和功能特性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 151.
- LI L H. Study on extraction, toxicology and functional properties of dietary fibers from seaweeds[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005: 151.
- [26] 闫巧珍. 马铃薯全粉理化性质和消化特性的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017, 73.
- YAN Q Z. Study on physicochemical properties and digestibility of potato granules[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2017, 73.
- [27] 忻晓庭, 刘大群, 郑美瑜, 等. 热风干燥温度对冰菜干燥动力学、多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 148-156.
- XIN X T, LIU D Q, ZHENG M Y, et al. Effect of hot air drying temperature on drying kinetics, polyphenol content and antioxidant activity of ice plant[J]. Journal of Chinese institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 148-156.
- [28] 尚红梅, 郭玮, 潘丹, 等. 干燥方式对菊苣根多酚含量和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 84-88.
- SHANG H M, GUO W, PAN D, et al. Effect of drying method on polyphenol content and antioxidant activity of chicory root[J]. Food Science, 2015, 36(1): 84-88.
- [29] ANTONIO V G, KONG A H, MARCELO C, et al. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices[J]. Food Chemistry, 2011, 132(1): 51-59.
- [30] IASNAIA M C T, MAURÍCIO B M C, MARIA M, et al. BRS Violeta (BRS Rúbea × IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124971.
-
- (上接第 149 页)
- [6] 岳新丽, 王春珍, 梁秀芝, 等. 新疆奇台县马铃薯新品种引进及筛选[J]. 山西农业科学, 2019, 47(1): 53-55, 60.
- YUE X L, WANG C Z, LIANG X Z, et al. Introduction and screening of new potato varieties in Qitai County of Xinjiang[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 53-55, 60.
- [7] 何文, 张秀芬, 郭素云, 等. 基于主成分分析和聚类分析对 22 份马铃薯种质的综合评价[J]. 种子, 2021, 40(3): 80-86.
- HE W, ZHANG X F, GUO S Y, et al. Comprehensive evaluation of 22 potato germplasms based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Seed, 2021, 40(3): 80-86.
- [8] 邹淑萍, 赵婷, 邵晓亮, 等. 新疆主栽品种马铃薯品质及其聚类分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 295-298.
- ZOU S P, ZHAO T, TAI X L, et al. Quality and cluster analysis of potato varieties mainly grown in Xinjiang [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(11): 295-298.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- GAO J F. Plant physiology laboratory instruction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [10] 崔辉梅, 石国亮, 安君和. 马铃薯还原糖含量测定方法的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2006(19): 4 821-4 823.
- CUI H M, SHI G L, AN J H. Comparison study on the testing method of the content of reduced sugar in potato[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006(19): 4 821-4 823.
- [11] 张治安, 陈展宇. 植物生理学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2009: 51-54.
- ZHANG Z A, CHEN Z Y. Plant physiology[M]. Changchun: Jilin University Press, 2009: 51-54.
- [12] 魏珂萍, 刘宗云, 刘敏, 等. 用 2 种紫外分光光度法测定新鲜蔬菜硝酸盐的比较[J]. 安徽农业科学, 2006(4): 619, 638.
- WEI K P, LIU Z Y, LIU M, et al. Comparison of two UV spectrophotometric methods for the determination of nitrate in fresh vegetables[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006(4): 619, 638.
- [13] 桂敏, 龙洪进, 钟秋月, 等. 引进辣椒种质资源果实性状的多元统计分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(2): 772-776.
- GUI M, LONG H J, ZHONG Q Y, et al. Multivariate statistical analysis of fruit characters of hot pepper germplasm resources[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(2): 772-776.