

网络出版时间:2018-02-26 08:48

DOI10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.06.017

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20180226.0847.034.html>

干燥方式对红薯叶粉品质特性的影响

司金金, 辛丹丹, 王晓芬, 寇莉萍

(西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】筛选出红薯叶粉最佳干燥方式, 为丰富红薯叶产品种类、延长货架期提供依据。【方法】采用热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥 4 种方式对红薯叶进行干燥并制粉, 研究干燥方式对红薯叶粉物理特性、微观结构和成分含量的影响, 并采用变异系数权重法对不同干燥方式得到的红薯叶粉进行综合评分。【结果】真空冷冻干燥和喷雾干燥红薯叶粉色差值较小, 分别为 3.98 和 3.86, 均呈现较好的色泽; 热风干燥红薯叶粉的堆积密度最大, 为 0.76 g/mL; 喷雾干燥红薯叶粉吸湿性最小, 为 10.05%; 真空冷冻干燥和喷雾干燥红薯叶粉均具有较小的中位径。喷雾干燥红薯叶粉的总糖和蛋白质含量分别为 218.71 及 27.85 mg/g, 显著高于其他 3 种干燥方式下的红薯叶粉 ($P < 0.05$); 真空冷冻干燥红薯叶粉的总酚含量和黄酮含量最高, 分别为 52.22 和 48.46 mg/g。热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥 4 种干燥方式下红薯叶粉综合评分分别为 -0.684, -0.275, 0.450 和 0.508, 可知喷雾干燥红薯叶粉品质最好, 其次为真空冷冻干燥红薯叶粉。【结论】红薯叶粉干燥建议选择喷雾干燥方式。

【关键词】 红薯叶粉; 干燥方式; 品质; 综合评分

【中图分类号】 TS255.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2018)06-0129-08

Effect of drying methods on quality characteristics of sweet potato leaf powder

SI Jinjin, XIN Dandan, WANG Xiaofen, KOU Liping

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This paper selected the best drying method for sweet potato leaf powder to provide basis for enriching the products of sweet potato leaves and extending the shelf life. 【Method】 The sweet potato leaves were dried by hot air drying, microwave drying, vacuum freeze drying and spray drying methods. The effects on physical properties and nutritional components of sweet potato leaf powder were studied, and the variation coefficient weight method was used to calculate comprehensive scores of sweet potato leaf powder. 【Result】 The color of sweet potato leaf powder prepared by spray drying and vacuum freeze drying were better with the color difference values of 3.98 and 3.86, respectively. The bulk density of sweet potato leaf powder prepared by hot air drying was the largest of 0.76 g/mL. Sweet potato leaf powder prepared by spray drying had the lowest hygroscopicity of 10.05%. Particle size of sweet potato leaf powder prepared by vacuum freeze-drying and spray drying was small. Total sugar content and protein content of sweet potato leaf powder by spray drying were 218.71 and 27.85 mg/g, significantly higher than that of the other methods ($P < 0.05$). The total phenol content and flavonoids content of sweet potato leaf powder by vacuum freeze-drying were the highest of 52.22 and 48.46 mg/g. The comprehensive scores of sweet potato leaf powder by hot air drying, microwave drying, vacuum freeze drying and spray drying were

【收稿时间】 2017-04-05

【基金项目】 陕西省农业科技攻关项目(K3310216125)

【作者简介】 司金金(1991—), 女, 河南开封人, 在读硕士, 主要从事果蔬贮藏与加工研究。E-mail: sijinjin1991@163.com

【通信作者】 寇莉萍(1972—), 女, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 主要从事果蔬贮藏与加工研究。E-mail: kouliping@nwsuaf.edu.cn

-0.684, -0.275, 0.450 and 0.508, respectively. The quality of sweet potato leaf powder prepared by spray drying was the best, followed by vacuum freeze drying. 【Conclusion】 Spray drying was recommended for drying sweet potato leaf powder.

Key words: sweet potato leaf powder; drying methods; quality; comprehensive score

红薯叶又名地瓜叶、甘薯叶、番薯叶,即红薯地上秧茎顶端的嫩叶。红薯叶生长速度快、再生能力强,同时含蛋白质、淀粉、维生素、铁、钙、黄酮、绿原酸等物质^[1],具有提高人体免疫力、促进代谢、延缓衰老、保护视力、预防夜盲等良好的保健功能^[2]。红薯叶生长过程中病虫害发生较少,因此农药和化肥用量很少,是天然的绿色食品。红薯叶作为一种安全性高的绿色蔬菜,在生活中具有较好的食疗作用。美国曾将红薯叶列为“航天食品”,日本称红薯叶为“长寿菜”,香港称红薯叶为“抗癌蔬菜”^[3]。目前我国红薯叶大部分作为饲料处理,少部分用于红薯叶保健酒、保健茶、罐头等的制作^[4]。但以上对红薯叶贮藏、加工、运输等条件要求较高,容易造成红薯叶原料变质、损失,因此开发便于加工贮藏、营养丰富、风味优良的红薯叶产品至关重要。

果蔬经脱水制粉,不仅能延长贮藏期,还可以减少运输、包装等费用^[5]。红薯叶干燥制粉,所得产品可以保留其大部分营养成分,便于贮藏运输,同时还可以将红薯叶粉作为原料添加到面条、糕点、固体饮料等食品中,使人们日常摄入的营养更加均衡。果蔬粉干燥方式一般有热风干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、喷雾干燥、气流膨化等^[5],每种干燥方式各有其优缺点,果蔬粉干燥方式的选择要根据物料性质来确定。目前有关红薯叶粉制备方法的研究较多,而不同干燥方法对红薯叶粉综合品质影响的相关研究并不多。宋振等^[6]曾研究热风干燥、喷雾干燥、真空冷冻干燥对红薯叶粉物理特性的影响,并筛选出红薯叶粉的最佳干燥方式为喷雾干燥,但此研究并未结合红薯叶粉干燥过程中营养成分的变化进行分析。因此,本研究以红薯叶为试材,采用热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥 4 种方式制备红薯叶粉,研究不同干燥方式对红薯叶粉物理特性、微观结构及营养成分与含量的影响,以期筛选出红薯叶粉干燥的最佳方式,为红薯叶粉商业化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器设备

1.1.1 供试材料 秦薯 5 号红薯叶,由杨凌金薯种

业科技有限公司提供。红薯叶颜色鲜绿,无机械损伤、黄叶、冷害和病虫害。

1.1.2 主要试剂 葡萄糖标准品,西安天丰科技有限公司;蒽酮,上海信裕生物科技有限公司;芦丁,国药集团化学试剂有限公司;没食子酸,上海同田生物技术股份有限公司;福林酚,郑州新锐生物科技有限公司;牛血清蛋白质,南京奥多福尼生物科技有限公司;考马斯亮蓝 G-250,上海沪宇生物科技有限公司。

1.1.3 仪器设备 数显电热鼓风干燥箱(CS101-1EBN),东莞市爱佩试验设备有限公司;真空冷冻干燥机(LGJ-10D),北京四环仪器公司;实验型喷雾干燥机(SP-1500),上海顺仪实验设备有限公司;微波干燥设备(Galanx G80F20CN2L-B8(R0)),广东格兰仕微波炉电器制造有限公司;组织捣碎机(JJ-2BS),温州标诺仪器有限公司;色差仪(CM-5),柯尼卡美达能有限公司;双光束紫外可见分光光度计(UV-1900),海佑科仪器仪表有限公司;电子分析天平(ME104E),上海天平仪器厂;激光粒度仪(MS-200),英国马尔文公司;差示扫描量热仪(Q2000),美国 TA 公司;钨灯丝扫描电子显微镜(JMS-6360LV),日本电子。

1.2 试验方法

1.2.1 红薯叶共结晶点与共熔点的测定 采用差示扫描量热(DSC)法^[7]测定红薯叶共结晶点和共熔点,为真空冷冻干燥过程中预冻温度和升华温度的确定提供依据。准确称取新鲜红薯叶 3 mg,剪成 1 mm×1 mm 小块,置于液体坩埚内,扫描温度设置为-40~20 ℃,扫描速度 5 ℃/min,扫描结果见图 1。由图 1 可知,红薯叶共熔点为 5.4 ℃(图 1-a),共结晶点为-12.9 ℃(图 1-b)。

1.2.2 制备红薯叶粉的工艺流程 红薯叶挑选→热烫(90 ℃, 50 s)→冷却沥水→干燥→粉碎→筛分→红薯叶粉样品。

红薯叶热烫参数由预试验结果确定。红薯叶不同干燥方式前处理操作有些许差异,热风干燥和微波干燥在红薯叶沥干后直接进行干燥;真空冷冻干燥红薯叶需提前预冻处理;喷雾干燥红薯叶需加适量水均质。

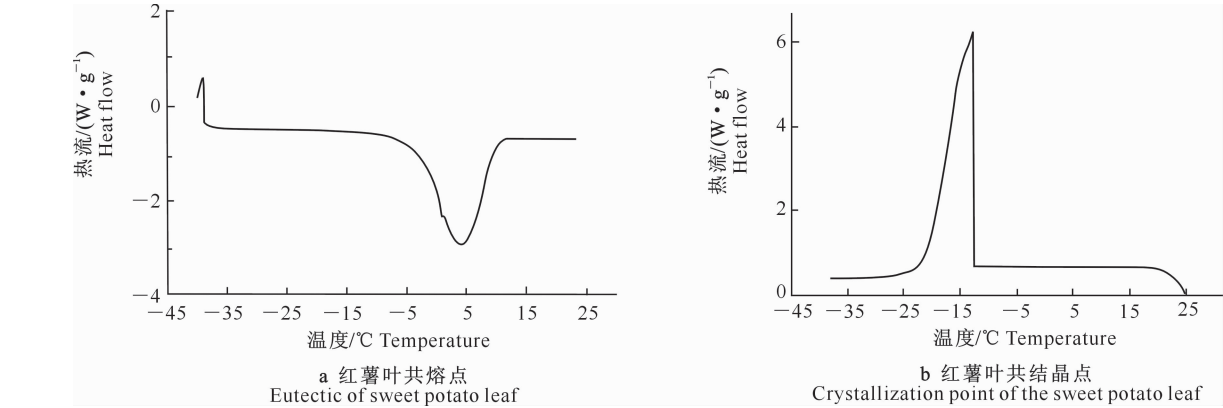


图 1 红薯叶的 DSC 曲线
Fig. 1 DSC of sweet potato leaves

1.2.3 干燥工艺 红薯叶 4 种干燥方式的干燥参数参考果蔬干燥相关研究^[8-10]和预试验较优结果确定。热风干燥参数设置为:温度 60 ℃,时间 6.5 h,物料厚度 80 mm;微波干燥参数设置为:功率 320 W,时间 15 min,物料厚度 80 mm;真空冷冻干燥参数设置为:预冻温度-20 ℃,预冻时间 10 h,物料厚度 80 mm,真空度 0.1 kPa,冷阱温度-60 ℃,升华干燥温度和时间分别为-10 ℃和 10 h,解析干燥温度和时间分别为 15 ℃和 4 h;喷雾干燥参数设置为:进、出口温度分别为 160 和 68 ℃,进料流速 500 mL/h。经过热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥的红薯叶在万能粉碎机中粉碎;经喷雾干燥的红薯叶已经被粉碎,故不再进行粉碎处理。4 种干燥方式制备的红薯叶粉利用孔径为 0.90 mm(80 目)的筛子进行筛分,然后密封保存。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 红薯叶粉色泽的测定 采用色差计测定红薯叶粉明度指数 L (黑暗→明亮,数值对应 0→100)及彩度指数 a (绿色→红色,值越小颜色越偏绿,越大则越偏红)和 b (蓝色→黄色,值越小颜色越偏蓝,越大则越偏黄)的值,并计算色差值 ΔE ^[11]。试验中色差值表示红薯叶粉色泽与新鲜红薯叶($L^* = 43.15, a^* = -9.49, b^* = 24.79$)色泽的差值, ΔE 采用式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2} \quad (1)$$

1.3.2 红薯叶粉堆积密度与吸湿性的测定 红薯叶粉堆积密度的测定参照 Sowbhagya 等^[12]的方法,将一定量红薯叶粉置于 10 mL 量筒中,使红薯叶粉体积读数在 10 mL 刻度处,红薯叶粉的堆积密度按式(2)计算:

$$\text{堆积密度 (g/mL)} = \frac{m_2 - m_1}{10} \quad (2)$$

式中: m_1 为量筒的质量(g), m_2 为量筒与红薯叶粉的质量(g)。

红薯叶粉吸湿性测定参考 Zhao 等^[13]的方法,将 1.00 g 红薯叶粉置于玻璃培养皿中,红薯叶粉平铺均匀放置,然后将培养皿置于盛有饱和氯化钠溶液的干燥器中,放置 7 d。红薯叶粉吸湿性按式(3)计算:

$$\text{吸湿性 (\%)} = \frac{m_0 / (M + m_1)}{1 + m_0 / M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_0 为红薯叶粉吸湿前后质量的改变量(g), M 为红薯叶粉的初始质量(g), m_1 为干燥后红薯叶粉中的水分含量(g)。

1.3.3 红薯叶粉粒度的测定 采用激光粒度仪测定红薯叶粉的粒径,并统计 $D_{0.1}, D_{0.5}, D_{0.9}$ 和体积平均粒径,其中 $D_{0.1}, D_{0.5}, D_{0.9}$ 分别表示有 10%, 50%, 90% 的红薯叶粉粒径小于某一值时对应的粒径值, $D_{0.5}$ 表示中位径^[14]。然后按式(4)计算红薯叶粉的跨度,跨度表示红薯叶粉颗粒大小的均匀程度,跨度值越小,表示红薯叶粉分布越均匀^[15]。

$$\text{跨度} = \frac{(D_{0.9} - D_{0.1})}{D_{0.5}} \quad (4)$$

1.3.4 红薯叶粉微观结构的观察 红薯叶粉经喷金处理,在电子显微镜 300 倍与 1 500 倍下,观察红薯叶粉的微观结构^[16]。

1.3.5 红薯叶粉成分的测定 分别取 4 种干燥方式的红薯叶粉进行下列成分的测定,每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。红薯叶粉中水分含量参照 GB/T 5009.3-2010 的方法测定,总酚含量采用福林酚试剂法^[17]测定,总糖含量采用蒽酮比色法^[18]测定,蛋白质含量采用考马斯亮蓝染色法^[19]测定,黄酮含量采用芦丁比色法^[20]测定。

1.3.6 红薯叶粉综合评分 红薯叶粉综合评分采

用变异系数权重法^[21]。首先计算红薯叶粉 13 项指标的算术平均值和标准差,然后计算变异系数,再计算红薯叶粉 13 项指标的权重和标准化数据,进而计算红薯叶粉的综合评分,具体计算过程如下。

指标的变异系数按式(5)计算:

$$R_i = S_i / \bar{X}_i。$$
 (5)

式中: R_i 、 S_i 、 $\bar{X}_i$ 分别表示红薯叶粉第 i 项指标的变异系数、标准差和算数平均值。

各项指标权重按式(6)计算:

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}。$$
 (6)

式中, W_i 表示第 i 项指标的权重。

采用 Z-score 标准化法^[21] 将红薯叶粉 13 个指标进行标准化处理,标准化数据按式(7)计算得到:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{S_i}。$$
 (7)

式中: Z_i 、 X_i 、 $\bar{X}_i$ 、 S_i 分别表示红薯叶粉第 i 项指标的标准化数据、实际测量值、算数平均值和标准差。

衡量红薯叶粉品质优劣时,试验指标中有 6 项逆指标,分别为 a 值、 ΔE 值、体积平均粒径、吸湿性、跨度、水分含量,该 6 项指标数值越小红薯叶粉的品质越好,因此需要将其标准数据正负号对调。红薯叶粉各项指标标准化数据分别与对应的权重相乘,然后再相加,就可以得到 4 种干燥方式下红薯叶

粉的综合得分。

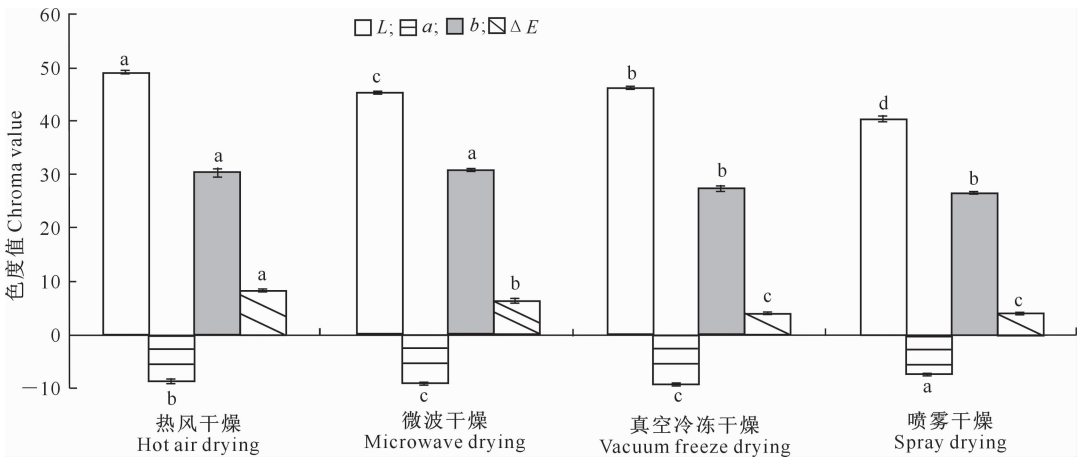
1.4 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSSV 20 进行分析,采用 Duncan’s 新复极差法进行多重比较,显著性水平为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 干燥方式对红薯叶粉色泽的影响

色泽是果蔬粉重要的品质指标之一,果蔬色泽以接近新鲜果蔬本身颜色较为理想^[22]。由图 2 可以看出,不同干燥方式对红薯叶粉色差值(ΔE)具有显著影响, ΔE 由小到大依次为喷雾干燥<真空冷冻干燥<微波干燥<热风干燥,其中真空冷冻和喷雾干燥红薯叶粉的色差值分别为 3.98 及 3.86,两者差异不显著,均呈现较好色泽,李昌文等^[8] 在研究干燥工艺对菠菜粉品质的影响时也得到了类似的结果。热风干燥和微波干燥的红薯叶粉颜色比较相似,均为黄绿色,热风干燥与微波干燥红薯叶粉对应的彩色指数 b 值也显著高于真空冷冻干燥和喷雾干燥($P<0.05$), b 值越大表示红薯叶粉颜色越发黄。因为热风干燥加热时间长,而微波干燥温度较高,2 种干燥方式均对红薯叶中叶绿素破坏较大,因此红薯叶粉颜色呈现黄绿色。



同一指标图柱上标不同小写字母表示不同干燥方式间差异显著($P<0.05$),下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below

图 2 干燥方式对红薯叶粉色泽的影响

Fig. 2 Effect of different drying methods on color parameters of sweet potato leaf powder

2.2 干燥方式对红薯叶粉堆积密度和吸湿性的影响

堆积密度是表现红薯叶粉内部结构特性的重要品质指标。由图 3 可以看出,不同干燥方式红薯叶

粉堆积密度的大小表现为热风干燥>微波干燥>真空冷冻干燥>喷雾干燥,其中微波干燥与热风干燥间红薯叶粉堆积密度差异不显著,喷雾干燥的红薯叶粉堆积密度显著低于其他 3 种干燥方式($P<$

0.05)。热风干燥的红薯叶粉表面具有硬化现象,且红薯叶粉组织内部不能形成大量微孔,因而热风干燥的红薯叶粉堆积密度较大;喷雾干燥和真空冷冻干燥比热风干燥和微波干燥的红薯叶粉堆积密度小,这可能是因为喷雾干燥和真空冷冻干燥的红薯叶粉疏松,单位体积内质量比较小的原因。此现象与 Caparino 等^[23]对不同干燥方式下芒果粉品质的

研究结果一致。

吸湿性是指果蔬粉在贮藏过程中吸收周围环境中水分的能力,其大小直接决定果蔬粉货架期的长短^[24]。由图 3 可知,不同干燥方式下红薯叶粉吸湿性的大小表现为热风干燥>真空冷冻干燥>微波干燥>喷雾干燥,喷雾干燥红薯叶粉的吸湿性显著低于其他 3 种干燥方式($P<0.05$)。

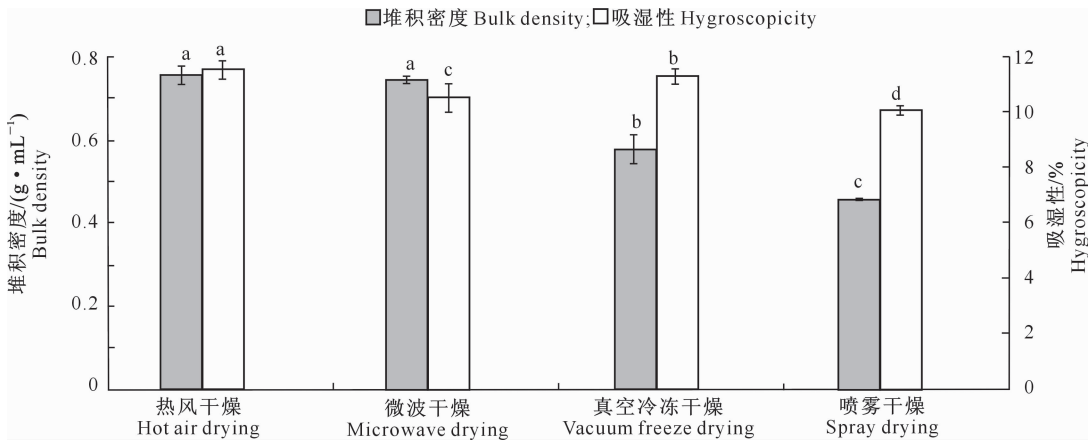


图 3 干燥方式对红薯叶粉堆积密度和吸湿性的影响

Fig. 3 Effect of different drying methods on bulk density and hygroscopicity of sweet potato leaf powder

2.3 干燥方式对红薯叶粉粒径的影响

由表 1 可知,不同干燥方式对红薯叶粉粒径具有显著影响,真空冷冻干燥和喷雾干燥红薯叶粉具有较小的中位径和体积平均粒径;喷雾干燥红薯叶

粉粒径跨度为 0.899 μm ,显著($P<0.05$)低于其他 3 种干燥方式,此现象表明喷雾干燥红薯叶粉中过大和过小的颗粒较少,粒径分布比较集中。

表 1 干燥方式对红薯叶粉粒径的影响

干燥方式 Drying methods	$D_{0.1}/\mu\text{m}$	$D_{0.5}/\mu\text{m}$	$D_{0.9}/\mu\text{m}$	体积平均粒径/ μm Volume mean diameter	跨度 Span
热风干燥 Hot air drying	8.778 c	69.230 b	194.539 a	86.130 a	2.683 a
微波干燥 Microwave drying	9.199 c	72.259 a	182.537 a	83.829 a	2.399 b
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	10.097 b	27.678 c	75.650 b	36.218 b	2.368 c
喷雾干燥 Spray drying	12.086 a	26.038 d	35.490 c	36.571 b	0.899 d

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters in each column indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

2.4 干燥方式对红薯叶粉微观结构的影响

不同干燥方式红薯叶粉电镜扫描照片如图 4 所示。将红薯叶粉在电子显微镜下放大 300 倍时可观察到,热风干燥、微波干燥和真空冷冻干燥红薯叶粉颗粒大小分布不均一,具有无定形结构,分布不规则,其中真空冷冻干燥红薯叶粉大颗粒相对较少(图 4a-c),这是因为真空冷冻干燥的红薯叶组织较疏松,容易被研磨打碎;喷雾干燥红薯叶粉外形圆滑细小,均匀一致(图 4-d)。红薯叶粉在电子显微镜下放大 1 500 倍时可观察到,热风干燥使红薯叶粉出现组织变形、干缩、表面不平整的现象(图 4-e);微波干

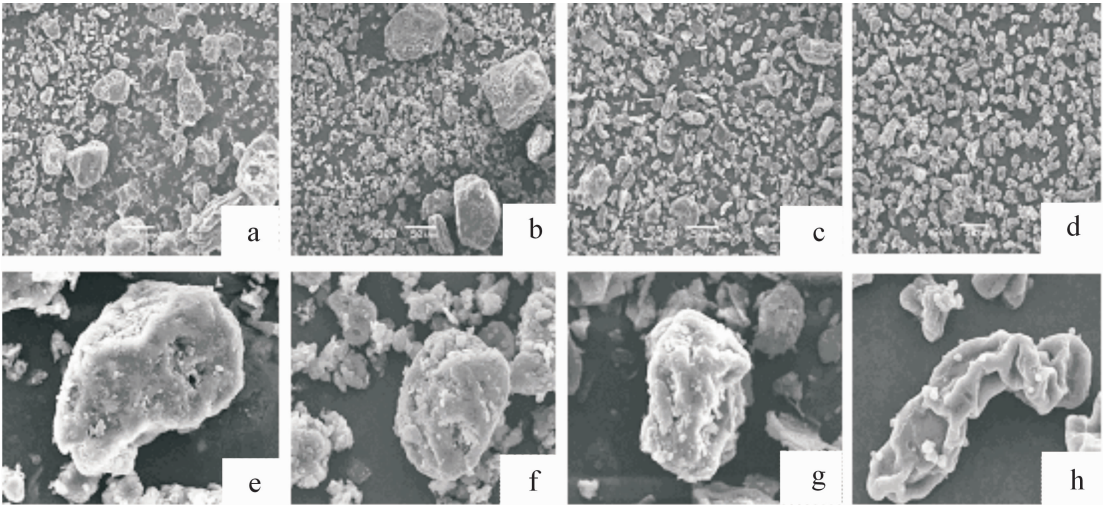
燥是一种由内及外迅速的干燥方式,水分在蒸发过程中使红薯叶粉表面具有孔洞结构,呈现一种无规则形状(图 4-f);真空冷冻干燥时红薯叶细胞间冰晶直接升华,使红薯叶粉干缩现象较少、质地疏松,组织整体结构较完整,但局部有明显的塌陷现象(图 4-g);喷雾干燥红薯叶粉结构完整,但局部有塌陷现象(图 4-h)。

2.5 干燥方式对红薯叶粉成分的影响

水分含量的高低直接影响蔬菜粉的品质和货架期,蔬菜粉水分含量过高,贮藏过程中容易结块,增加了贮藏难度。由表 2 可知,干燥方式对红薯叶粉

水分含量具有显著影响($P<0.05$),红薯叶粉水分含量从低到高依次为微波干燥<热风干燥<真空冷冻干燥<喷雾干燥,可知微波干燥红薯叶粉水分含

量最低。4 种干燥方式下红薯叶粉水分含量均在 8% 以下,符合粉体贮藏安全的水分要求^[25]。



a—d. 依次为热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥($\times 300$);e—h. 依次为热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥($\times 1\,500$)
a—d are hot air drying,microwave drying,vacuum freeze drying,spray drying ($\times 300$);e—h are hot air drying,
microwave drying,vacuum freeze drying,spray drying ($\times 1\,500$)

图 4 不同干燥方式红薯叶粉的电镜扫描结果

Fig. 4 Effect of different drying methods on scanning electron micrographs of sweet potato leaf powder

表 2 干燥方式对红薯叶粉成分的影响

Table 2 Effects of different drying methods on composition of sweet potato leaf powder

干燥方式 Drying methods	水分含量/% Moisture content	总酚含量/(mg·g ⁻¹) Total phenol content	总糖含量/ (mg·g ⁻¹) Total sugar content	蛋白质含量/ (mg·g ⁻¹) Protein content	黄酮含量/ (mg·g ⁻¹) Flavonoids content
热风干燥 Hot air drying	5.43±0.070 7 c	20.68±9.37 c	139.93±5.13 c	15.01±0.820 d	32.72±2.01 b
微波干燥 Microwave drying	5.08±0.063 6 d	32.83±3.15 b	131.42±5.19 c	15.94±0.142 c	44.13±0.99 a
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	5.60±0.001 0 b	52.22±14.28 a	161.83±10.01 b	26.22±0.144 b	48.46±2.23 a
喷雾干燥 Spray drying	5.98±0.042 4 a	33.11±11.94 b	218.71±10.03 a	27.85±0.036 a	33.72±5.29 b

不同干燥方式的红薯叶粉总酚含量表现为热风干燥<微波干燥<喷雾干燥<真空冷冻干燥,其中真空冷冻干燥红薯叶粉中总酚含量显著($P<0.05$)高于其他 3 种红薯叶粉,这是因为红薯叶在真空低温条件下热敏感和抗氧化成分保留较多。

不同干燥方式的红薯叶粉总糖含量表现为微波干燥<热风干燥<真空冷冻干燥<喷雾干燥,其中热风干燥和微波干燥红薯叶粉总糖含量显著低于其他 2 种红薯叶粉($P<0.05$),可能是微波干燥和热风干燥温度高,消耗糖类物质多,而真空低温环境可以减少红薯叶中糖类的分解,喷雾干燥则是因为时间短,因此喷雾干燥总糖含量最高,其次为真空冷冻干燥。

不同干燥方式的红薯叶粉中蛋白质含量表现为热风干燥<微波干燥<真空冷冻干燥<喷雾干燥,由此可知喷雾干燥红薯叶粉中蛋白质含量显著($P<0.05$)高于其他 3 种干燥方式。

不同干燥方式的红薯叶粉黄酮含量表现为热风干燥<喷雾干燥<微波干燥<真空冷冻干燥,黄酮类物质化学性质不稳定,在加热条件下极易分解,因此热风干燥的红薯叶粉黄酮损失最严重。

2.6 不同干燥方式红薯叶粉的综合评分

4 种干燥方式红薯叶粉 13 项指标的变异系数和权重见表 3。由表 3 可知,红薯叶粉 13 个指标中,色差、体积平均粒径、跨度、总酚含量、蛋白质含量权重较大,分别为 0.134,0.168,0.140,0.136 和

0.115,可知这 5 项指标在评价红薯叶粉品质时占有重要地位。综合评分,红薯叶粉 13 项指标的标准化数据及 4 种干燥方式红薯叶粉的综合评分见表 4。

根据红薯叶粉各项指标,计算其标准化数据与

表 3 不同干燥方式红薯叶粉的各项指标和权重

Table 3 Weights of various indicators for comprehensive evaluation of sweet potato leaf powder by different drying methods

干燥方式 Drying methods	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE	吸湿性/% Hygroscopicity	堆积密度/ (g·mL ⁻¹) Bulk density	体积平均 粒径/ μm Volume mean diameter
热风干燥 Hot air drying	49.07	−8.68	30.37	8.18	11.54	0.76	86.13
微波干燥 Microwave drying	45.17	−9.19	30.81	6.36	10.53	0.74	83.83
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	46.18	−9.47	27.36	3.98	11.28	0.58	36.22
喷雾干燥 Spray drying	40.38	−7.48	26.58	3.86	10.05	0.46	36.57
平均值 Average	45.20	−8.71	28.78	5.59	10.85	0.63	60.69
标准差 Standard deviation	3.61	0.88	2.12	2.07	0.68	0.14	28.07
变异系数 Variation coefficient	0.080	−0.101	0.074	0.370	0.063	0.226	0.462
权重 Weight	0.029	−0.037	0.027	0.134	0.023	0.082	0.168

干燥方式 Drying methods	跨度 Span	水分含量/% Moisture content	总酚含量/ (mg·g ⁻¹) Total phenol content	总糖含量/ (mg·g ⁻¹) Total sugar content	蛋白质含量/ (mg·g ⁻¹) Protein content	黄酮含量/ (mg·g ⁻¹) Flavonoids content
热风干燥 Hot air drying	2.68	5.43	20.69	139.93	15.01	32.72
微波干燥 Microwave drying	2.40	5.08	32.83	131.42	15.94	44.13
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	2.37	5.60	52.22	161.83	26.22	48.46
喷雾干燥 Spray drying	0.90	5.98	33.11	218.71	27.85	33.72
平均值 Average	2.09	5.52	34.71	162.97	21.26	39.76
标准差 Standard deviation	0.80	0.37	13.03	39.30	6.72	7.76
变异系数 Variation coefficient	0.386	0.068	0.375	0.241	0.316	0.195
权重 Weight	0.140	0.025	0.136	0.088	0.115	0.071

表 4 不同干燥方式红薯叶粉各项指标的标准化数据及综合评分

Table 4 Standardized data and scores of quality evaluation indices of sweet potato leaf powder by different drying methods

干燥方式 Drying methods	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔE	吸湿性 Hygroscopicity	堆积密度 Bulk density	体积平均粒径 Volume mean diameter
热风干燥 Hot air drying	1.070	−0.025	0.749	−1.247	−1.009	0.858	−0.907
微波干燥 Microwave drying	−0.008	0.550	0.957	−0.370	0.468	0.767	−0.825
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	0.272	0.869	−0.669	0.781	−0.629	−0.389	0.872
喷雾干燥 Spray drying	−1.335	−1.394	−1.037	0.836	1.170	−1.236	0.860

干燥方式 Drying methods	跨度 Span	水分含量 Moisture content	总酚含量 Total phenol content	总糖含量 Total sugar content	蛋白质含量 Protein content	黄酮含量 Flavonoids content	综合评分 Comprehensive score
热风干燥 Hot air drying	−0.740	0.247	−1.054	−0.586	−0.930	−0.906	−0.684
微波干燥 Microwave drying	−0.387	1.183	−0.142	−0.803	−0.791	0.563	−0.275
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	−0.349	−0.207	1.316	−0.029	0.739	1.121	0.450
喷雾干燥 Spray drying	1.477	−1.223	−0.120	1.418	0.982	−0.778	0.508

由表 4 可知,4 种不同干燥方式红薯叶粉综合评分从小到大依次为热风干燥<微波干燥<真空冷

冻干燥<喷雾干燥,对应的综合评分分别为-0.684,-0.275,0.450 和 0.508。

3 结 论

1)真空冷冻干燥和喷雾干燥红薯叶粉色差值较小,分别为 3.98 和 3.86,两者均呈现较好的色泽;喷雾干燥红薯叶粉的吸湿性显著低于其他 3 种干燥方式($P<0.05$);真空冷冻干燥和喷雾干燥红薯叶粉具有较小的中位径和体积平均粒径;热风干燥红薯叶粉堆积密度最大,为 0.76 g/mL。

2)热风干燥红薯叶粉组织变形、表面不平整,有硬化现象;微波干燥红薯叶粉表面有空洞结构,呈现一种无规则形状;真空冷冻干燥红薯叶粉干缩现象较少、质地疏松,组织整体结构较完整,但局部有明显的塌陷现象;喷雾干燥红薯叶粉结构完整,但局部也有塌陷现象。

3)4 种干燥红薯叶粉均符合粉体贮藏安全水分要求,其中微波干燥红薯叶粉水分含量最低;喷雾干燥红薯叶粉总糖和蛋白质含量分别为 218.71 和 27.85 mg/g,显著($P<0.05$)高于其他 3 种红薯叶粉;真空冷冻干燥红薯叶粉总酚和黄酮含量最高,分别为 52.22 和 48.46 mg/g。

4)热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥 4 种红薯叶粉综合评分分别为-0.684,-0.275,0.450 和 0.508。因此红薯叶粉干燥方式建议选择喷雾干燥。

[参考文献]

[1] Ishida H,Suzuno H,Sugiyama N,et al. Nutritive evaluation on chemical components of leaves,stalks and stems of sweet potatoes [J]. Food Chemistry,2000,68(3):359-367.

[2] Jeng T L,Chiang Y C,Lai C C,et al. Sweet potato leaf extract inhibits the simulated *in vitro* gastrointestinal digestion of native starch [J]. Journal of Food and Drug Analysis,2015,23(3):399-406.

[3] 张 彧,吴伟南,陈 莉,等. 红薯茎叶化学组成的研究进展 [J]. 食品科学,2006,27(3):252-256.

Zhang Y,Wu Y N,Chen L,et al. Reviews on research advances on chemical composition of sweet potato vines and leaves [J]. Food Science,2006,27(3):252-256.

[4] 孟爱丽,刘晓博,司辉清. 红薯茎叶的产品开发及其功能成分研究进展 [J]. 食品工业,2012,33(10):133-136.

Meng A L,Liu X B,Si H Q. Research progress of product development and function ingredients in sweet potato stems and leaves [J]. Food Industry,2012,33(10):133-136.

[5] 毕金峰,陈芹芹,刘 璇,等. 国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望 [J]. 中国食品学报,2013,13(3):8-14.

Bi J F,Chen Q Q,Liu X,et al. Research on techniques and industry situation and prospect for fruit-vegetable powder processing in domestic and aboard [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2013,13(3):8-14.

[6] 宋 振,木泰华,孙红男,等. 不同干燥方法对甘薯茎叶粉物化特性的影响 [J]. 现代食品科技,2015,31(5):255-261.

Song Z,Mu T H,Sun H N,et al. Effect of different drying methods on physical properties of sweet potato leaf powder [J]. Modern Food Science and Technology,2015,31(5):255-261.

[7] 徐艳阳,檀亦兵,孙金才,等. 真空冷冻干燥工艺中物料共晶共融点的测定 [J]. 食品工业科技,2005,26(5):56-57.

Xu Y Y,Tan Y B,Sun J C,et al. Determination of the eutectic point communion vacuum freeze-drying process materials [J]. Science and Technology of Food Industry,2005,26(5):56-57.

[8] 李昌文,纵 伟,陈俊锋. 不同干燥工艺对菠菜粉品质的影响 [J]. 北方园艺,2013(23):152-154.

Li C W,Zong W,Chen J F. Effects of different drying methods on quality of spinach powder [J]. Northern Gardening,2013(23):152-154.

[9] 孙 莉,蒲传奋,姜文利,等. 真空冷冻干燥紫甘薯叶的工艺研究 [J]. 食品科技,2012,37(3):108-112.

Sun L,Pu C F,Jiang W L,et al. Vacuum freeze-drying progress of purple sweet potato leaves [J]. Food Science and Technology,2012,37(3):108-112.

[10] Nunes J C,Lago M G,Castelo-Branco V N,et al. Effect of drying method on volatile compounds,phenolic profile and antioxidant capacity of guava powders [J]. Food Chemistry,2016,197(Part A):881-890.

[11] 钱婧雅,张 茜,王 军,等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响 [J]. 农业工程学报,2016,32(17):259-265.

Qian J Y,Zhang Q,Wang J,et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(17):259-265.

[12] Sowbhagya H B,Suma P F,Mahadevamma S,et al. Spent residue from cumin:a potential source of dietary fiber [J]. Food Chemistry,2007,104(3):1220-1225.

[13] Zhao X,Yang Z,Gai G,et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder [J]. Journal of Food Engineering,2009,91(2):217-222.

[14] 刘素稳,常学东,李航航,等. 不同粉碎方法对杏鲍菇超微粉体物化性质的影响 [J]. 现代食品科技,2013,29(11):2722-2727.

Liu S W,Chang X D,Li H H,et al. Effects of micronization methods on physicochemical properties of pleurotus eryngii powders [J]. Modern Food Science and Technology,2013,29(11):2722-2727.

[15] Islam M Z,Kitamura Y,Yamano Y,et al. Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties,water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder [J]. Journal of Food Engineering,2015,169(1):130-141.

[27] 林剑艺,程春田,陈 艳. 基于自适应模糊推理系统模型的径流中长期预报 [J]. 水电能源科学,2005(6):25-27.
Lin J Y,Cheng C T,Chen Y. Long-term prediction of discharges using adaptive-network-based fuzzy inference systems models [J]. Hydroelectric Energy,2005(6):25-27.

[28] 马细霞,胡铁成. 基于 ANFIS 的水库年径流预报 [J]. 水力发电学报,2008,27(5):33-36.
Ma X X,Hu T C. Reservoir annual runoff forecast based on ANFIS [J]. Journal of Hydrology,2008,27(5):33-36.

[29] 马细霞,穆浩泽,郭慧芳. 基于小波-ANFIS 的水库月径流预报模型 [J]. 水电能源科学,2008,26(1):26-29.
Ma X X,Mu H Z,Guo H F. Reservoir monthly runoff forecast model based on wavelet-ANFIS analysis [J]. Hydroelectric Energy,2008,26(1):26-29.

[30] 马细霞,陈 鑫,郭慧芳. 基于小波-ANFIS 的水库年径流组合预报模型 [J]. 中国农村水利水电,2008(7):12-14,23.
Ma X X,Chen X,Guo H F. Runoff prediction model and its application based on wavelet analysis and support vector machine [J]. China Rural Water and Hydropower,2008(7):12-14,23.

[31] 路剑飞,陈子桑,王扬圣. 基于 MI-ANFIS 的中长期水文预报方案优选研究 [J]. 水力发电学报,2013,32(2):48-53.

Lu J F,Chen Z S,Wang Y S. Optimization selection of mid and long-term hydrologic forecast schemes based on MI-ANFIS [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(2):48-53.

[32] Jang J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system [J]. IEEE Transactions on Systems,Man, and Cybernetics,1993,23(3):665-685.

[33] 杜富慧,王晓丽,郝振纯. 基于 ANFIS 的黄河灵口流域水文预报模型 [J]. 人民黄河,2012,34(6):41-42,44.
Du F H,Wang X L,Hao Z C. Flood forecasting model based on ANFIS in Lingkou catchment of the Yellow River [J]. Yellow River,2012,34(6):41-42,44.

[34] Badrzadeh H,Sarukkalige R,Jayawardena A W. Hourly runoff forecasting for flood risk management: application of various computational intelligence models [J]. Journal of Hydrology,2015(529):1633-1643.

[35] 张小静. 函数系数自回归模型在水文预报中的应用[D]. 西安:西安理工大学;2007.
Zhang X J. Application of the functional-coefficient autoregressive model in hydrologic forecast [D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2007.

(上接第 136 页)

[16] Zhao X,Ao Q,Du F,et al. Surface characterization of ginger powder examined by X-ray photoelectron spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. Colloids and Surfaces B: Biointer Faces,2010,79(2):494-500.

[17] 张天财,陈朝银,赵声兰,等. 核桃种皮中多酚的测定及种皮对核桃贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技,2013,34(20):65-69.
Zhang T C,Chen C Y,Zhao S L,et al. Determination of total polyphenol from walnut kernel pellicle and the effect of walnut kernel pellicle on walnut storage quality [J]. Science and Technology of Food Industry,2013,34(20):65-69.

[18] 文赤夫,董爱文,李国章,等. 萘酚比色法测定紫花地丁中总糖及还原糖含量 [J]. 现代食品科技,2005,21(3):122-123.
Wen C F,Dong A W,Li G Z,et al. Determination of total sugar and reducing sugar in viola philippicassp mundaw becker by anthrone colorimetry [J]. Modern Food Science and Technology,2005,21(3):122-123.

[19] 邓丽莉,潘晓倩,生吉萍,等. 考马斯亮蓝法测定苹果组织微量可溶性蛋白含量的条件优化 [J]. 食品科学,2012,33(24):185-189.
Deng L L,Pan X Q,Sheng J P,et al. Optimization of experimental conditions for the determination of water soluble protein in apple pulp using coomassie brilliant blue method [J]. Food Science,2012,33(24):185-189.

[20] 王 玫,张泰铭,熊运海. 超声波法提取紫甘薯叶总黄酮的工艺研究 [J]. 广州化学,2010,35(2):13-18.
Wang M,Zhang T M,Xiong Y H. Study on ultrasonic extrac-

tion technology of total flavonoid in purple sweet potato leaves [J]. Guangzhou Chemistry,2010,35(2):13-18.

[21] 周禹含,毕金峰,陈芹芹,等. 不同干燥方式对枣粉品质的影响 [J]. 食品科学,2014,35(11):36-41.
Zhou Y H,Bi J F,Chen Q Q,et al. Effect of drying methods on quality characteristics of jujube powder [J]. Food Science,2014,35(11):36-41.

[22] 刘华敏,解新安,丁年平. 喷雾干燥技术及在果蔬粉加工中的应用进展 [J]. 食品工业科技,2009,30(2):304-308.
Liu H M,Xie X A,Ding N P. Study progress of spray drying technology and application in the fruit and vegetable powder production [J]. Science and Technology of Food Industry,2009,30(2):304-308.

[23] Caparino O A,Tang J,Nindo C I,et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango powder [J]. Journal of Food Engineering,2012,111(1):135-148.

[24] Kim S H,Choi Y J,Lee H,et al. Physicochemical properties of jujube powder from air,vacuum, and freeze drying and their correlations [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry,2012,55(2):271-279.

[25] 李翠丽,冀晓龙,许芳溢,等. 干燥方式对梨枣粉品质特性的影响 [J]. 中国食品学报,2014,14(12):121-127.
Li C L, Ji X L,Xu F Y, et al. Effect of drying treatment methods on the quality properties of pear jujube powder [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2014,14(12):121-127.