

# 不同干燥方法对甘薯茎叶粉物化特性的影响

宋振<sup>1,2</sup>, 木泰华<sup>1</sup>, 孙红男<sup>1</sup>, 席利莎<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

(2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830091)

**摘要:** 本试验研究了3种干燥方法(热风干燥、真空冷冻干燥及喷雾干燥)对五个品种甘薯茎叶粉(宁紫1号、徐053601、廊薯7-12、福薯2号和冀薯65)物化特性的影响, 并采用主成分分析筛选甘薯茎叶粉物化品质评价指标。结果表明: 不同干燥方法对甘薯茎叶粉的堆积密度、吸水指数、持油性和溶胀能力有显著性影响。经热风干燥的甘薯茎叶粉堆积密度最高, 在0.54~0.67 g/cm<sup>3</sup>范围内; 喷雾干燥后的甘薯茎叶粉吸水指数和持油性显著高于其他两种干燥方法, 分别在13.73~17.40 g/g和3.0~5.0 g/g范围内, 但溶胀能力显著低于另外两种干燥方法, 仅为0.58~3.64 mL/g。主成分分析筛选出甘薯茎叶粉的物化品质评价指标分别为持油性、乳化活性、乳化稳定性和吸水指数; 根据主成分分析结果筛选出最适宜制粉的甘薯茎叶品种为徐053601。综合考虑3种干燥方法对甘薯茎叶粉物化品质方面的影响, 确定喷雾干燥为甘薯茎叶粉的最佳干燥方法。

**关键词:** 热风干燥; 真空冷冻干燥; 喷雾干燥; 甘薯茎叶粉; 物化特性; 主成分分析

文章篇号: 1673-9078(2015)5-255-261

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.040

## Effect of Different Drying Methods on Physical Properties of Sweet Potato Leaf Powder

SONG Zhen<sup>1,2</sup>, MU Tai-hua<sup>1</sup>, SUN Hong-nan<sup>1</sup>, XI Li-sha<sup>1</sup>

(1. Institute of Agro-Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830091, China)

**Abstract:** The effect of three different drying methods (hot-air drying, vacuum freeze-drying, and spray drying) on the physicochemical properties of sweet potato leaf powder from five cultivars (Ningzi No.1, Xu 053601, LangShu 7-12, Fushu No.2, and Jishu 65) were compared. Physicochemical quality evaluation indices for the powder samples were selected by principal component analysis. The results showed that the drying methods had significant influences on bulk density, water absorption, oil-holding capacity, and swelling capacity of sweet potato leaf powder. The highest bulk density was found in hot-air drying method and the values were in the range of 0.54 to 0.67 g/cm<sup>3</sup>. Spray-dried sweet potato leaf powder showed a higher water absorption index and oil-holding capacity, which were in the range of 13.73 to 17.40 and 3.0 to 5.0 g/g, respectively. However, the swelling capacity (only 0.58 to 3.64 mL/g) of spray-dried sweet potato leaf powder was significantly lower than that for the other two drying methods. The typical physicochemical quality evaluation indices for sweet potato leaf powder screened out by principal component analysis were oil-holding capacity, emulsifying activity, emulsion stability, and water absorption index. Xu 053601 was considered as the most suitable cultivar for preparing sweet potato leaf powder. In conclusion, spray drying was found to be the best method to prepare sweet potato leaf powder from those analyzed in this study.

**Key words:** hot-air drying; vacuum freeze-drying; spray-drying; sweet potato leaf powder; physicochemical properties; principal component analysis

甘薯茎叶是甘薯的地上部分, 美国将其列为“航天食品”, 日本尊甘薯茎叶为“长寿菜”, 香港则称甘薯茎叶为“蔬菜皇后”<sup>[1]</sup>。甘薯茎叶产量大, 再生性强, 在大田生产过程中可多次采收形成高的总产量, 生产过程不施用或较少施用化肥和农药, 绿色环保, 是一种优质蔬菜资源。甘薯茎叶具有较高的营养价值, 新鲜茎叶中蛋白质含量为3.80%, 淀粉含量为1.67%, 维生素B<sub>2</sub>为3.5 mg/g, 维生素C为41.07 mg/g, 铁为3.14 mg/100 g, 钙为74.4 mg/100 g<sup>[2]</sup>。中国预防医学

收稿日期: 2014-07-16

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-11-B-19)

作者简介: 宋振 (1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与营养

通讯作者: 木泰华 (1964-), 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养

学

科学院对甘薯茎叶与菠菜、芹菜、胡萝卜等 14 种蔬菜的主要营养成分进行了比较分析, 结果表明在蔬菜的 13 种营养成分中, 除灰分稍低外, 甘薯茎叶的蛋白质、脂肪、纤维素、VB<sub>1</sub>、VB<sub>2</sub>、Vc、钙、磷、铁、烟酸及热量等 12 项均居首位<sup>[3]</sup>。

然而长期以来, 人们较重视甘薯地下部分-块根的利用, 对地上部分的茎叶多作为饲料或肥料, 研究较少。甘薯茎叶采收具有季节性, 且采后呼吸旺盛, 叶片极易腐烂, 很难贮藏, 因此, 对于采收后的甘薯茎叶, 必需尽快进行合理的加工。近年来, 针对甘薯茎叶已开发出一系列产品, 如甘薯茎叶保健饮料、甘薯浓缩茎叶蛋白质以及甘薯茎叶罐头等<sup>[4]</sup>, 但由于上述产品的加工、贮藏及运输条件均受到一定的限制, 容易造成加工原料的损失及营养成分的劣变, 不适宜中小企业生产。因此, 开发适宜中小企业加工、贮藏及运输, 且集营养价值高、保健作用强、口感与风味好、用途广泛等优点于一体的甘薯茎叶加工产品迫在眉睫。利用不同干燥方法结合超微粉碎技术制备甘薯茎叶粉, 既有利于甘薯茎叶的贮藏和运输, 又可以将其添加到糕点、面包、冰激凌、饮料、面条、水饺、凉粉等食品中, 以弥补人们日常生活中蔬菜营养成分摄取的不足。

目前, 常见的干燥方法包括热风干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥。热风干燥属于最传统的干燥技术, 主要利用流动的热风对产品进行加热和干燥, 适合固体物料的干燥, 如谷物、果蔬片、块状食品等。李浩权<sup>[5]</sup>、Peerajit 等<sup>[6]</sup>利用热风干燥制备出具有功能活性的胡萝卜膳食纤维粉和柠檬渣膳食纤维粉, 不仅充分利用了原料, 而且大大提高了原料的附加值。但是热风干燥的产品品质、色泽较差。真空冷冻干燥可消除常压干燥时产生的表层硬化现象, 克服热风干燥产生的溶质失散现象, 避免传统干燥时的热变性, 物料的复水性较佳。然而, 真空冷冻干燥使得加工过程不连续, 而且成本高。喷雾干燥法被广泛用于商业化生产奶粉和果蔬粉<sup>[7]</sup>。这种方法具有干燥速率快、产量高、操作连续等优点, 得到的产品呈粉状、粒状或凝聚体, 流动性好, 粒度分布均匀, 但对热敏性成分影响较大。

本试验采用热风、真空冷冻和喷雾三种干燥方法结合超微粉碎技术制备甘薯茎叶粉, 探讨这三种干燥方法对甘薯茎叶粉物化特性的影响, 以确定甘薯茎叶制粉的最佳干燥方法; 并采用主成分分析筛选甘薯茎叶粉物化品质评价指标, 以期甘薯茎叶制粉提供一定的数据参考。

## 1 材料与设备

### 1.1 材料与试剂

5 个品种甘薯茎叶(宁紫 1 号、徐 053601、廊薯 7-12、福薯 2 号、冀薯 65)均为藤蔓顶端 10~15 cm 的茎叶部分, 由北京大兴农业展示基地提供, 所有品种均采用标准种植模式进行种植, 采集于 2012 年 8 月中旬(甘薯收获前)。挑选新鲜无腐烂、无病斑甘薯茎叶, 洗净晾干, 经不同方法干燥。玉米胚芽油(长寿花): 购于当地超市。

### 1.2 主要仪器与设备

DGG-9203A 电热恒温鼓风干燥箱: 上海森信实验仪器有限公司; LGJ-10 冷冻干燥机: 北京四环科学仪器厂; Mobile Minor-2000 喷雾干燥器: GEA Niro 公司; 万能粉碎机: 北京兴时利和科技发展有限公司; BT9300H 激光粒度分布仪: 丹东市百特仪器有限公司; FJ-200 高速分散均质机: 上海标本模型厂。K550 溅射镀膜机: 英国 EMITECH 公司; S-2400 日立市扫描电子显微镜: 日本茨城。

## 2 方法

### 2.1 干燥方法

热风干燥: 将洗净的甘薯茎叶平铺于搁板上, 物料厚度约为 15 mm, 于 60 °C 的电热鼓风干燥箱中进行干燥。干燥 6 h 后冷却, 万能粉碎机粉碎 1 min 后过 80 目筛, 得甘薯茎叶粉。

真空冷冻干燥: 将晾干的甘薯茎叶置于超低温冷冻机中-30 °C 至少冻结 5 h。当进行干燥试验时, 预冻甘薯茎叶被迅速转移到干燥室。移入干燥室之前, 冷阱温度需达-60 °C, 打开真空泵, 使真空度降至 100 Pa 以下, 进行干燥。干燥 48 h 后取出, 万能粉碎机粉碎 1 min 后过 80 目筛, 得甘薯茎叶粉。

喷雾干燥: 将洗净的甘薯茎叶按新鲜甘薯茎叶: 去离子水=1:4 (m/V) 放入家用打浆机中打浆 1 min, 然后高压均质, 充分剪碎纤维类物质, 进行喷雾干燥。选择进风温度 160 °C、进料流量 20 mL/min 进行喷雾干燥。收集到的甘薯茎叶粉过 80 目筛, 进行后续试验。

### 2.2 分析测定方法

#### 2.2.1 堆积密度

参照陈清香等的方法测定<sup>[8]</sup>。将甘薯茎叶粉从漏斗散落于 10 mL 量筒中, 测定 10 mL 甘薯茎叶粉的质量, 换算出其堆积密度(g/mL)。

#### 2.2.2 粒径分布

于分散器中加入 400 mL 超纯水, 添加少量甘薯茎叶粉于分散器中, 待检测器显示浓度范围控制在 10%~20% ( $m/V$ ) 之间, 室温下循环分散 5 min 后利用 DH-9300 型激光粒度仪对其粒径进行测定。

### 2.2.3 吸水指数

参照美国专利 6461663<sup>[9]</sup>中介绍的方法测定, 即取适当容积的离心管, 称量后加入 2 g 样品和 30 mL 蒸馏水, 充分混匀。将上述混合液在 30 °C 的条件下水浴 30 min, 每 15 min 混合一次后 3000 r/min 离心 15 min, 弃去上清液, 倒置 2 min 后称量。

### 2.2.4 溶胀能力

参照 Sowbhagya 等的方法测定<sup>[10]</sup>: 取 0.2 g 甘薯茎叶粉置于带刻度试管中并记录其初始体积, 加入 10 mL 蒸馏水, 完全混合均匀后在室温条件下静置 18 h, 记录粉吸水后的体积。

溶胀能力( $mL/g$ ) = (溶胀后粉的体积 - 粉的初始体积) / 粉重

### 2.2.5 持油性

参照 Caprez 等<sup>[11]</sup>的方法测定甘薯茎叶粉的持油性: 取 0.5 g 甘薯茎叶粉置于离心管中, 加入 10 mL 玉米胚芽油, 混合均匀后静置 18 h, 2000 r/min 条件下离心 30 min, 弃去上清液后称重。

持油性( $g/g$ ) = (甘薯茎叶粉被油饱和后的重量 - 甘薯茎叶粉的初始重量) / 甘薯茎叶粉的初始重量

### 2.2.6 乳化特性

参照 Chau 等<sup>[12]</sup>的方法测定甘薯茎叶粉的乳化特性: 50 mL 甘薯茎叶粉悬浮液 (7%,  $m/V$ ) 用机械均质机在 11000 r/min 条件下均质 30 s, 加入 50 mL 玉米胚芽油再均质 1 min。取该乳浊液 25 mL 置于离心管中在 1200 r/min 条件下离心 5 min, 测定离心管中乳浊液体积。取该乳浊液 25 mL 于 80 °C 加热 30 min, 冷却至室温后于 1200 r/min 条件下离心 5 min。

乳化活性/% = 离心后乳浊液体积 / 原乳浊液体积 × 100%

乳化稳定性/% = 加热离心后乳浊液体积 / 原乳浊液体积 × 100%

### 2.2.7 扫描电子显微镜

甘薯茎叶粉颗粒形态用扫描电子显微镜观察。将样品安装在铝试样架上, 双面胶带固定, 试样架装载在 K550 溅射镀膜机, 涂上约 15 nm 厚度的金钼, 于 10 kV 加速电压下用扫描电子显微镜进行观察。

## 2.3 统计分析

试验重复三次, 使用 SAS9.1 软件进行统计分析。方法间的显著差异性由邓肯多重比较获得,  $p < 0.05$  被认为具有显著性差异。主成分分析依次计算协方差矩阵的特征根、特征向量、负荷量和主成分得分, 进而筛选出物化特性指标中的代表性评价指标。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同干燥方法对甘薯茎叶粉堆积密度的影响

影响

堆积密度是指甘薯茎叶粉在自然堆积状态下单位体积的质量, 是反映粉体质构的重要参数之一。3种干燥方法对5个不同品种甘薯茎叶粉堆积密度的影响如图1所示。5个品种的甘薯茎叶粉堆积密度变化范围在 0.16~0.70  $g/cm^3$  之间, 且受不同干燥方法影响较大。徐053601和冀薯65甘薯茎叶粉在喷雾干燥条件下堆积密度最小, 热风干燥条件下则最大; 宁紫1号甘薯茎叶粉经热风干燥后堆积密度最大, 而喷雾干燥时堆积密度降低; 廊薯7-12和福薯2号在不同干燥方法下堆积密度变化不大。不同干燥方法对堆积密度的影响差异显著。从图中可知, 真空冷冻干燥和喷雾干燥甘薯茎叶粉的堆积密度显著低于热风干燥, O A Caparino<sup>[13]</sup>等人对芒果粉的干燥研究中也发现类似结果。分析原因可能为: 真空冷冻干燥较好地保持了甘薯茎叶原有组织的疏松多孔结构, 喷雾干燥的甘薯茎叶粉由于经高压均质, 大量纤维已被粉碎, 颗粒变小变细, 从而质地更加疏松。经热风干燥的甘薯茎叶粉堆积密度高是因为热风流量影响了甘薯茎叶粉的平均粒径大小, 相同质量下体积减小, 堆积密度增大。

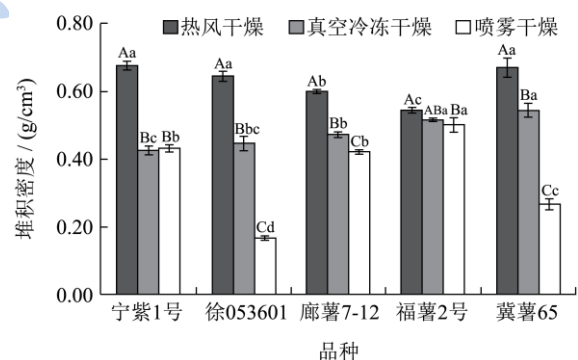


图1 不同干燥方法对甘薯茎叶粉堆积密度的影响

Fig.1 Effect of different drying methods on bulk density of sweet potato leaf powder

注: A~C 表示干燥方法之间差异性, a~e 表示品种之间差异性。

### 3.2 不同干燥方法对甘薯茎叶粉粒径分布的影响

影响

3种干燥方法获得的甘薯茎叶粉的粒径分布见表1。喷雾干燥的甘薯茎叶粉由于经过团聚, 颗粒的粒径

分布较宽,从0.55 μm到94.56 μm均可发现。而真空冷冻干燥产品的粒径分布较窄,最大粒径仅为76.33 μm。原因主要是真空冷冻干燥整个过程中甘薯茎叶形状基本不变,收缩性小,没有团聚现象,但是热风干燥和喷雾干燥过程中由于存在着液滴从湿表面到干表面的过程,这些运动中的液滴或者颗粒之间不可避免地存在碰撞和团聚现象,从而导致颗粒的粒径分布宽,从几微米到近百微米均可以发现。此外,相同质量的甘

薯茎叶,经相同条件下粉碎,因体积大小不同而导致粉碎过程中相互碰撞的颗粒的接触面积不同。由于真空冷冻干燥甘薯茎叶粉水分直接升华,在组织内部形成中空多孔结构,而热风干燥和喷雾干燥热传递方向由表及里,有干缩现象的产生,所以真空冷冻干燥的体积明显大于其它干燥方法,因此粉碎过程中,物料相互接触面积增大,相互碰撞的频率也随之增大,从而使粉碎粒度变得更小。

表 1 不同干燥方法对甘薯茎叶粉粒径分布的影响

Table1 Effect of different drying methods on particle size distribution of sweet potato leaf powder

干燥方法	粒径分布/μm	0~50 μm 粒径段比例/%	51~100 μm 粒径段比例/%	中位径/μm	体积平均径/μm
热风干燥	0.55~84.96	96.06±0.59	3.94±0.58	15.33±1.11 <sup>a</sup>	18.50±0.58 <sup>a</sup>
真空冷冻干燥	0.50~76.33	98.64±0.48	1.36±0.48	13.86±0.54 <sup>a</sup>	16.27±0.72 <sup>b</sup>
喷雾干燥	0.55~94.56	96.78±1.49	3.22±1.49	15.03±0.42 <sup>a</sup>	18.35±1.53 <sup>a</sup>

### 3.3 不同干燥方法对甘薯茎叶粉吸水指数、持油性和溶胀能力的影响

由图2a和b可知,喷雾干燥制得的甘薯茎叶粉的吸水指数和持油性最高,热风干燥和真空冷冻干燥无显著差异。热风干燥和真空冷冻干燥甘薯茎叶粉的溶胀能力较喷雾干燥的高(图2c)。吸水指数和溶胀能力的不同主要是由于淀粉含量和性质的变化,羟基的缔合可在淀粉间形成氢键和共价键,而缔合程度则会影响吸水指数的变化。

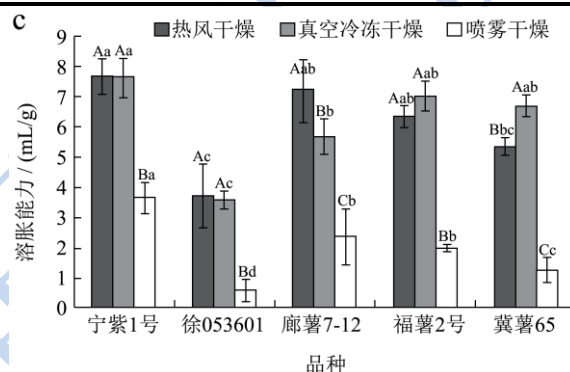
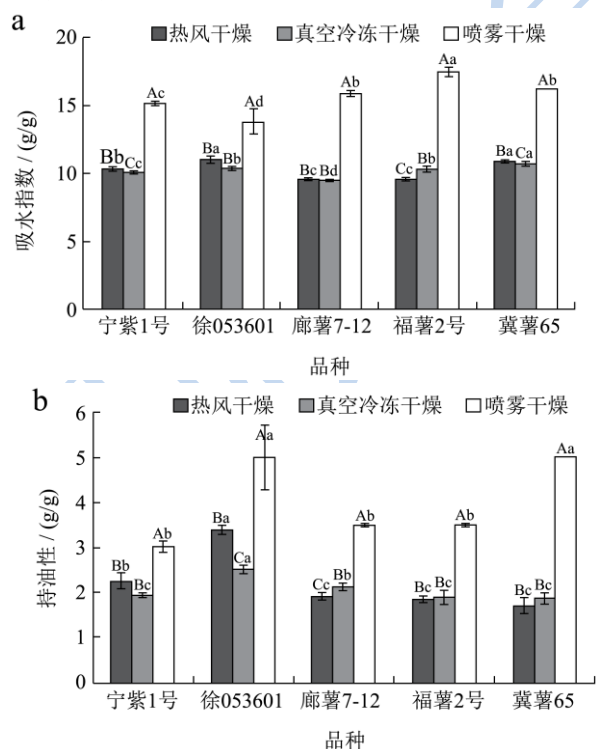


图 2 不同干燥方法对甘薯茎叶粉物化特性的影响

Fig.2 Effect of different drying methods on physicochemical properties of sweet potato leaf powder

注: A~C 表示干燥方法之间差异性, a~d 表示品种之间差异性。

Gunaratne<sup>[14]</sup>通过研究发现,吸水指数的增加是和淀粉结晶结构的损失有一定关系的。此外,当淀粉在一定温度下发生凝胶化时,会使内部颗粒之间、颗粒和水之间的相互作用增加,最终导致溶胀能力增加。持油性受蛋白质组成中亲水和亲油基团暴露数量不同的影响,如含非极性尾端较多的蛋白质的含量增加,则持油性也随之增加。喷雾干燥加工过程中温度较高,有较多的淀粉糊化,破坏了淀粉的结晶结构,因此吸水指数较高;而且高温同时也使较多的亲油基团暴露出来,从而增加了持油性。过高的温度还会破坏内部颗粒之间的相互作用,导致溶胀能力显著下降。5个品种中,吸水指数较高的是冀薯65,持油性较高的是徐053601,溶胀能力较高的是宁紫1号。



### 3.4 不同干燥方法对甘薯茎叶粉乳化特性的影响

影响

乳化活性是指物料能将油水结合在一起，形成乳状液的性能，乳化稳定性是指物料的乳化特性对外界条件的抗应变能力。这两种性质都和蛋白质分子的亲水和亲油基团在分子表面的分布有关，干燥方法不同，蛋白质变性不同，蛋白质内部疏水基团的暴露程度不同，因此，其乳化活性和乳化稳定性不同。

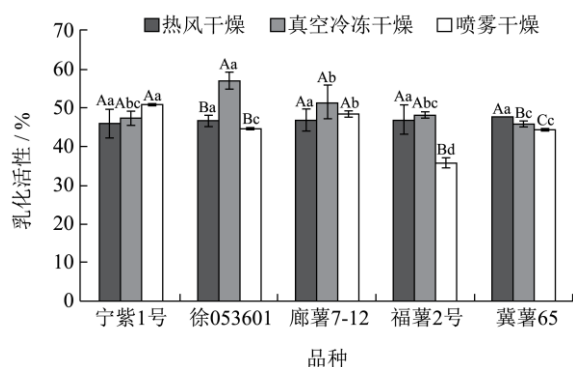


图3 不同干燥方法对甘薯茎叶粉乳化活性的影响

Fig.3 Effect of different drying methods on emulsifying activity of sweet potato leaf powder

注: A-C 表示干燥方法之间差异性, a-d 表示品种之间差异性。

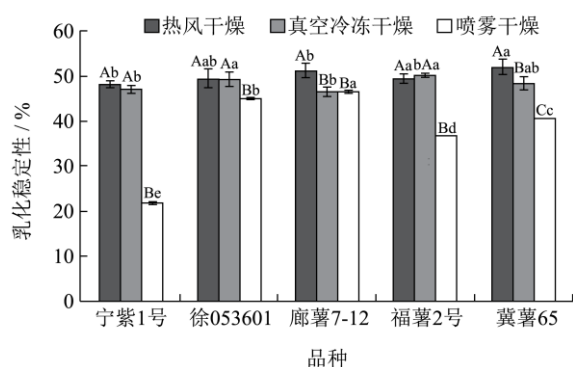


图4 不同干燥方法对甘薯茎叶粉乳化稳定性的影响

Fig.4 Effect of different drying methods on emulsification stability of sweet potato leaf powder

注: A-C 表示干燥方法之间差异性, a-e 表示品种之间差异性。

由图3可知，不同品种的甘薯茎叶粉乳化活性差异显著，真空冷冻干燥的徐 053601 品种乳化活性最高，达 56.83%，喷雾干燥的福薯 2 号品种乳化活性最低，仅为 35.52%。但热风干燥后，5 个品种间差异不显著。不同干燥方法对甘薯茎叶粉的乳化活性影响显著，真空冷冻干燥对甘薯茎叶粉乳化活性的影响小于其他干燥方法。由图4可知，和其余两种干燥方法相比，经喷雾干燥的 5 个品种甘薯茎叶粉乳化稳定性差异显著，表明乳化稳定性受温度影响较大。真空冷冻

干燥作用温度低，对蛋白柔性分子破坏小，而柔性分子的疏水性很大，具有很强的乳化稳定性。热风干燥甘薯茎叶粉的乳化稳定性变化不大，这是因为适度的热处理使蛋白质的溶解度和伸展程度增加，蛋白质之间的排斥力减小，油滴容易吸附在蛋白质界面上，从而提高了蛋白质的乳化能力；而喷雾干燥加热温度较高，会降低吸附在界面上蛋白质膜的黏度和硬度，因而乳化活性和乳化稳定性稍有降低。

### 3.5 不同干燥方法对甘薯茎叶粉微观结构的影响

影响

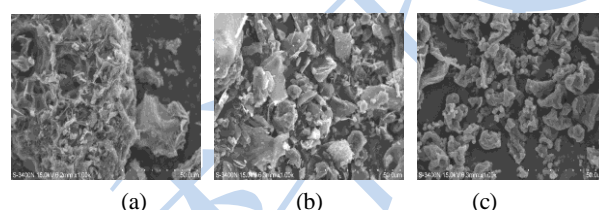


图5 不同干燥方法对甘薯茎叶粉微观结构的影响

Fig.5 Effect of different drying methods on microstructure of sweet potato leaf powder

注: (a)热风干燥; (b)冷冻干燥; (c)喷雾干燥(放大倍数 1000 倍)。

经不同干燥方法制得的甘薯茎叶粉(徐 053601)的微观结构如图5所示。热风干燥属于由表及里的热传导加热方式，使得样品组织发生变形、皱缩，故经热风干燥的甘薯茎叶粉(图5a)颗粒表面不平整，物料干缩现象较严重，组织结构不规则。从真空冷冻干燥甘薯茎叶粉(图5b)的微观结构看，因其细胞间冰晶的直接升华，使结构收缩最小，密度较低，为较大的疏松颗粒，表面较为平整(疏松干燥物易被粉碎)，物料干缩现象较少，粉体质地疏松，但局部有明显的塌陷现象，组织整体结构上较为完整。由于受干燥过程的影响，喷雾干燥的甘薯茎叶粉具有一个非常细小和光滑的表面，且粒子颗粒密度较高，均匀一致(图5c)。

### 3.6 甘薯茎叶粉物化指标的主成分分析

由上述结果可以发现，3 种干燥方法对 5 个品种甘薯茎叶粉物化特性的影响存在差异，为明确不同干燥方法对不同品种甘薯茎叶粉物化品质的影响，同时缩小甘薯茎叶粉物化品质评价指标的范围，使其更具实用性和经济性，采用主成分分析方法，对甘薯茎叶粉的物化特性代表指标进行了筛选和分析。将 5 种甘薯茎叶粉物化指标的测定结果录入 SAS 统计软件，进行主成分分析，得出甘薯茎叶粉物化指标 8 个主分量

的特征值及累计贡献率, 如表 2 所示。

第 1 主分量贡献率为 53.86%, 说明第 1 主分量能解释甘薯茎叶粉物化特性变化的 53.86%, 是最重要的主成分; 第 2 个主成分的方差贡献率为 33.46%, 代表了全部性状信息的 33.46%, 第 3 个主成分的方差贡献率为 8.19%, 其他主成分的贡献率依次明显减少。前 2 个主成分的累积方差贡献率为 87.31%。保留累计方差大于 85% 的前  $n$  个主成分即可保留原资料的大部分信息。因此, 前 2 个主分量就足以有效地解释甘薯茎叶粉物化特性的变化规律。根据统计分析, 进而得出以上 2 个主分量的负荷量见表 3。

在第 1 主分量中, 持油性和乳化活性负荷量最大, 均为 0.55。第 2 主分量中, 负荷量最大的是乳化稳定性, 其次是吸水指数, 负荷量分别为 0.64 和 0.59。因此, 通过主成分分析得出甘薯茎叶粉物化评价指标分别为持油性、乳化活性、乳化稳定性和吸水指数, 采用上述关键性指标筛选出的最适宜制备甘薯茎叶粉的品种为徐 053601, 喷雾干燥制备的甘薯茎叶粉物化特性最好。

表 2 物化特性的主分量特征值及累计贡献率

Table 2 Principal component eigenvectors and cumulative contribution rate of physicochemical properties index

主分量	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.23	53.86	53.86
2	2.01	33.46	87.31
3	0.49	8.19	95.51
4	0.27	4.49	100.00
5	0.00	0.00	100.00
6	0.00	0.00	100.00
7	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	100.00

表 3 物化特性的主成分特征向量

Table 3 Principal component eigenvectors for physicochemical properties

物化指标	第 1 主分量	第 2 主分量
堆积密度	-0.35	0.38
中位径	0.00	0.00
体积平均径	0.00	0.00
吸水指数	-0.19	0.59
持油性	0.55	0.12
溶胀能力	-0.50	-0.25
乳化活性	0.55	0.12
乳化稳定性	-0.02	0.64

## 4 结论

4.1 综上所述, 干燥方法对甘薯茎叶粉的物化特性有显著的影响。将甘薯茎叶粉分别经热风干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥, 使其水分低于 0.05 kg/kg DW, 干燥时间分别为  $6 \pm 0.5$  h,  $48 \pm 0.42$  h 和  $3 \pm 0.5$  s。热风干燥的甘薯茎叶粉的堆积密度高于其他两种干燥方法; 真空冷冻干燥的甘薯茎叶粉保持原物料的良好特性, 呈现较高的乳化活性和乳化稳定性; 喷雾干燥甘薯茎叶粉具有良好的吸水指数和持油性, 但溶胀能力显著低于另外两种干燥方法。微观结构的分析也验证了不同干燥方法对甘薯茎叶粉堆积密度、粒径分布和持油性的影响。

4.2 在分析测试 5 种不同甘薯茎叶粉 8 种物化特性指标的基础上, 通过主成分分析得出甘薯茎叶粉物化特性评价指标分别为持油性、乳化活性、乳化稳定性和吸水指数; 根据主成分分析结果筛选出最适宜制粉的甘薯茎叶品种为徐 053601, 其次为冀薯 65, 福薯 2 号最差。综合考虑热风干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥对甘薯茎叶粉物化特性的影响, 确定喷雾干燥为甘薯茎叶粉的最佳干燥方法。

## 参考文献

- [1] 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 Yu, WU Wei-nan, CHEN Li, et al. Reviews on research advances on chemical composition of sweet potato vines and leaves [J]. Food Science, 2006, 27(3): 252-256
- [2] Ishida H, Suzuno H, Sugiyama N, et al. Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* *poir*) [J]. Food Chemistry, 2000, 68(3): 359-367
- [3] 王文亮, 杜方岭, 徐同成. 甘薯茎叶的营养价值及其开发利用研究[J]. 中国食物与营养, 2009, 7: 29-31  
WANG Wen-liang, DU Fang-ling, XU Tong-cheng. The research on nutritional value and utilization of sweet potato leaf [J]. Food and Nutrition in China, 2009, 7: 29-31
- [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 Ai-li, LIU Xiao-bo, SI Hui-qing. Research progress of product development and functional ingredients in sweet potato stems and leaves [J]. Food Industry, 2012, 33(10): 133-136

- [5] 李浩权,龚丽,陈人人.胡萝卜全粉干燥加工工艺研究[J].现代食品科技,2009,25(4):401-404  
LI Hao-quan, GONG Li, CHEN Ren-ren. Study on drying technology of carrot powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(4): 401-404
- [6] Pichupa P, Naphaporn C, Sakamon D. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1891-1898
- [7] 周爱梅,万艳娟,李少华,等.喷雾干燥及热风干燥对南瓜粉营养特性和感官品质的影响[J].现代食品科技,2011,27(5): 528-533  
ZHOU Ai-mei, WAN Yan-juan, LI Shao-hua, et al. Effect of spray drying and hot air drying on the nutritional and sensory properties of pumpkin powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(5): 528-533
- [8] 陈清香,黄苇,温升南,等.番木瓜粉喷雾干燥工艺研究[J].现代食品科技,2009,25(1):68-72  
CHEN Qing-xiang, HUANG Wei, WEN Sheng-nan, et al. Spray drying processing technology of papaya powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(1): 68-72
- [9] Ooraikul B. Production of potato granules [P]. America: 4110478, 1978, 8, 29, <http://www.google.com/patents/US4110478>
- [10] 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
- [11] Caprez A, Arrigoni E, Amado R, et al. Influence of different types of thermal treatment on the chemical composition and physical properties of Wheat bran [J]. Journal of Cereal Science, 1986, 4(3): 233-239
- [12] Chau C F, Wang Y T, Wen Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1402-1408
- [13] Caparino O A, Tang J, Nindo C I, et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao' var.*) powder [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(1): 135-148
- [14] Gunaratne A, Hoover R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 425-437