

干燥方式对紫薯全粉水合特性及抗氧化能力的影响

文 玉¹, 刘 嘉¹, 彭 珍¹, 王福强², 赵国华^{1,3,4,*}

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715;

2.四川省广元市旺苍县农业局, 四川广元 628200;

3.重庆市农产品加工技术重点实验室, 重庆 400715;

4.重庆市甘薯工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要:以紫薯“万紫56”为原料,研究了热风干燥、冷冻干燥、微波干燥和喷雾干燥对其全粉的水合特性及抗氧化能力的影响。结果表明,冷冻干燥制备紫薯全粉的水合特性和复水性均高于热风干燥、微波干燥和喷雾干燥,但溶水力最差。干燥使紫薯全粉中花色苷损失了27.64%~52.66%,冷冻干燥和喷雾干燥紫薯粉中花色苷的保留量最大,并显著($p < 0.05$)高于其他两种干燥方式;喷雾干燥制备紫薯粉的DPPH自由基清除力及还原力最强,而冷冻干燥紫薯粉的脂质过氧化抑制力最强。

关键词:紫薯全粉,干燥方式,水合特性,抗氧化能力

Effect of different drying sorts on the hydration and antioxidant properties of purple sweet potato flours

WEN Yu¹, LIU Jia¹, PENG Zhen¹, WANG Fu-qiang², ZHAO Guo-hua^{1,3,4,*}

(1.College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.Agricultural Bureau of Wangcang County, Guangyuan 628200, China;

3.Chongqing Key Laboratory of Agricultural Product Processing, Chongqing 400715, China;

4.Chongqing Sweet Potato Engineering and Technology Centre, Chongqing 400715, China)

Abstract: Influence of hot air drying, freeze drying, microwave drying and spray drying on hydration and antioxidant properties of purple sweet potato flours (PSPFs) was studied using a commercial cultivar of PSP (wanzhi 56) as a raw material. Compared with other drying methods, PSPFs prepared with freeze drying exhibited the highest water binding and water reabsorbing capacity, but the lowest solubility. Drying treatment caused an decrease (27.64%~52.66%) in the anthocyanins content of PSP. PSPFs prepared by freeze drying and spray drying exhibited a highest retention rate of total anthocyanins, and significant higher than the other drying methods ($p < 0.05$). The highest DPPH radical scavenging activity and reducing power was found in PSPFs prepared by spray drying. In addition, the lipid peroxidation inhibition activity was highest in PSPFs prepared by freeze drying.

Key words: purple sweet potato; drying method; hydration properties; antioxidant properties

中图分类号: TS215

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2014)06-0119-06

紫薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是栽培甘薯中的一种新类型,其薯肉呈深紫色,又被称为紫心甘薯、紫肉甘薯、紫甘薯或紫色甘薯。紫薯不同于一般的甘薯品种,其营养成分含量明显高于普通的红薯。紫薯的市场开发主要集中在色素提取、鲜食、全粉和休闲食品加工等几个方面^[1]。紫薯去皮烘干粉碎后加工成全粉,色泽美观,营养丰富,主要用作面包、馒头、膨化

食品、汤料、冲服剂等制品的原辅料,并且在方便食品、冷冻食品以及调理食品的加工制造中具有广泛的应用。但目前国内外在紫薯全粉的生产实践中,没有较为一致的、先进的干燥工艺技术,干燥工艺技术很不成熟。本实验考察并比较了紫薯全粉在不同干燥方式处理下的水合特性及抗氧化能力,以期食品工业中紫薯全粉的加工提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫薯 品种为万紫56,西南大学实验农场基地;麦芽糊精 山东西王食品有限公司;氢氧化钠、甲醇、三氯乙酸、硝酸铝、铁氰化钾、无水乙醇 成都科

收稿日期:2013-07-30 * 通讯联系人

作者简介:文玉(1988-),女,在读硕士研究生,主要从事碳水化合物化学与营养方面的研究。

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-11-C-20)。

龙化工厂,均为分析纯;1,1-二苯基-2-苦肼基 日本和光纯药试剂公司,分析纯。

YC-015型喷雾干燥器 上海雅程仪器设备有限公司;ALPHA 1-4 LSC型冷冻干燥机 河南兄弟仪器设备有限公司;G80D23CN2P-T7 (B0)型微波炉 佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司;XW-80A型混合器 上海精科实业有限公司;DHG-9140型电热恒温鼓风干燥箱 上海齐欣科学仪器有限公司;UltraSan PRO型色差仪 上海信联创作电子有限公司;SHZ-ⅢD型循环水真空泵 上海亚荣生化试剂厂;BS223S型电子天平 北京塞多利斯仪器系统有限公司;HH-2型数显恒温水浴锅 金坛市富华仪器有限公司;2000E型激光粒度分析仪 英国马尔文仪器有限公司;5810型台式高速离心机 德国Eppendorf公司。

1.2 实验方法

1.2.1 紫薯全粉制备与干燥

1.2.1.1 工艺流程 将新鲜紫薯清洗干净后,加入蒸馏水在锅中蒸煮(蒸馏水:紫薯=6:1,蒸煮温度100℃,蒸煮时间25min),煮熟后取出去皮,将去皮后的紫薯捣碎成泥,放在室温下冷却,分别采取热风、冷冻、微波、喷雾四种干燥方式对其进行干燥,将干燥后的样品粉碎后包装。

1.2.1.2 干燥方法 具体操作如下:

a.热风干燥:取200g干燥紫薯泥放入电热恒温鼓风干燥箱中,于50℃条件下干燥10h,将干燥后的样品粉碎后过80目筛。

b.冷冻干燥:取200g干燥紫薯泥,先在冰箱中预冻12h,放入真空冷冻干燥机中冷冻干燥30h,粉碎后过80目筛。

c.微波干燥:取200g干燥紫薯泥放入微波干燥器中,在800W、50Hz的条件下进行干燥,每隔10s将样品翻一次,共干燥10min左右,粉碎后过80目筛。

d.喷雾干燥:取200g紫薯泥于胶体磨中,加入助干剂后于30MPa条件下均质2次,均质得到的乳液用离心式喷雾干燥机进行喷雾干燥(喷雾条件为:入料浓度17g/100g,进风温度200℃,出风温度100℃,入料流量50mL/min)后收集粉体。

1.2.2 紫薯粉基本成分的测定 水分的测定:直接干燥法;灰分的测定:高温灼烧法;粗蛋白的测定:凯氏定氮法;粗脂肪的测定:索氏抽提法,具体操作参照AOAC方法^[2];淀粉的测定:酸水解-高锰酸钾滴定法^[3];粗纤维的测定:GB/T 5009.10-2003植物类食品中粗纤维的测定。

1.2.3 干燥能耗的测定 能耗从在单相电度表上读取。仪器开始工作时,记下电表读数,当工作结束后,再读取电表读数,与前面读数的差值即为解析干燥能耗。

单位水分能耗(kJ/kg)=干燥能耗(kJ)/除去水分质量(kg)

1.2.4 紫薯粉粒度的测定 准确称取紫薯粉样品2.0g,在50℃分别采用热风、冷冻、微波、喷雾等四种方式干燥12h。将样品用无水乙醇作为分散介质,加入到400mL的样品分散池中,采用仪器自带的超声

分散系统对样品进行充分分散180s后,而后在搅拌系统和循环系统以及超声波的同时作用下测定不同甘薯淀粉样品的粒径及分布,每隔2s记录一次数据,测定时间120s,统计平均值,得出粒径分布数据。

1.2.5 紫薯粉水合特性的测定

1.2.5.1 持水力的测定 根据Zhao等^[4]的方法稍加改动。准确称取紫薯粉0.5g置于20mL离心管中,加蒸馏水10mL,振荡均匀,在60℃下分别水浴10~60min后用自来水冷却30min,6000r/min离心15min,小心弃去上清液,称重。

$$\text{持水力}(\text{g/g干基})=[M_2-(M_1+M)]/M$$

式中: M_1 :离心管重量,g; M_2 :离心管+沉淀物的重量,g; M :样品重量,g。

1.2.5.2 溶水指数和复水性的测定 溶水指数和复水性的测定根据Ahmed等^[5]的方法稍加改动。准确称取紫薯粉0.5g置于20mL离心管中,加蒸馏水10mL,振荡均匀,分别在25、30、40、50、60、70、80℃下水浴30min,6000r/min离心15min后,将上清液倾倒入已称重的培养皿中,在105℃下烘12h后称重并称沉淀物。

$$\text{溶水指数}(\text{g/g干基})=[M_2-(M_1+M)]/M;$$

$$\text{复水性}(\text{g/g干基})=M_2/M$$

式中: M_1 :上清液重量,g; M_2 :沉淀物的重量,g; M :样品重量,g。

1.2.6 紫薯粉抗氧化成分的测定

1.2.6.1 花色苷测定 花色苷的测定根据Hosseinian等^[6]的pH示差法并稍加改动。准确称取紫薯粉0.5g于50mL离心管中,加入7.5mL 1mol/L酸化甲醇(HCl:甲醇=15:85,v/v),摇匀,在60℃水浴1h后用离心机8000r/min下离心15min,收集上清液。将上清液置于100mL的圆底烧瓶,在40℃下旋转蒸发至上清液全部蒸干,然后加入5mL甲醇。准确量取此溶液0.3mL,分别用pH为1.0、浓度为0.025mol/L的盐酸-氯化钾缓冲液和pH为4.5、浓度为0.4mol/L的盐酸-醋酸钠缓冲液稀释至9mL,在25℃下放置15min后,然后在530nm和700nm分别测定其吸光度,且以蒸馏水为空白对照。

$$A=(A_{530\text{nm}}-A_{700\text{nm}})_{\text{pH}1.0}-(A_{530\text{nm}}-A_{700\text{nm}})_{\text{pH}4.5}$$

$$\text{花色苷}(\text{mg}/100\text{g,干基})=A \times M_w \times D_f \times V \times 100 \times 1000 / (\epsilon \times W)$$

式中: A :吸光度; M_w :氯化-3-葡萄糖苷的分子量,449.2g/mol; D_f :稀释倍数,30; V :样品初始体积,0.3mL; ϵ :摩尔吸光系数,26900; W :样品重量,g。

1.2.6.2 类黄酮测定 具体方法如下:

a.芦丁标准曲线的绘制 参考万利秀等^[7]的方法得到标准曲线为 $Y=11.94X+0.0028$, $R^2=0.9978$ 。

b.类黄酮的提取 参考Andarwulan等^[8]的方法并稍加修改。准确称取紫薯粉1.0g,用30mL 95%(v/v)的甲醇溶液在60℃下提取3h后8000r/min离心15min,收集上清液并冷却。然后,用95%(v/v)的甲醇溶液将上清液定容至100mL备用。类黄酮含量的测定参考Ahmed等^[4]的方法。准确量取提取液1.0mL于10mL的棕色容量瓶中,分别加入4.0mL的30%(v/v)的甲醇溶液和0.4mL的5%(w/v)的亚硝酸钠溶液,摇匀后放置

6min, 再加入0.4mL的10% (w/v) $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液, 摇匀后放置6min, 最后加入4mL的4% (w/v) NaOH 溶液并用30% (v/v) 的甲醇溶液定容至10mL, 振荡均匀后静置15min, 然后在510nm处测定其吸光度, 根据标准曲线计算类黄酮含量。

1.2.6.3 总酚含量测定 具体步骤如下:

a. Folin-ciocalten试剂的配制 参考文献[9]。

b. 没食子酸标准曲线的制定 参考文献[10], 得到标准曲线 $Y=173X+0.0018$, $R^2=0.9994$ 。

c. 总酚的测定 总酚提取与测定根据Malkeet等^[11]的方法并稍加改动。准确称取紫薯粉1.0g, 用8mL 80% (v/v) 的甲醇溶液在80℃水浴10min, 重复提取两次后在8000r/min离心15min, 收集两次的上清液并用80% (v/v) 甲醇溶液稀释至50mL。此提取液保存于棕色容量瓶中并放置在-18℃下, 用于总酚和抗氧化力的测定。准确量取提取液0.25mL于50mL的棕色容量瓶中, 加入1.0mL 1.0mol/L福林酚溶液, 摇匀静置3min后, 加入2mL 15% (w/v) Na_2CO_3 溶液, 摇匀, 用蒸馏水定容至50mL。室温下反应2h后在760nm处测定吸光度 $A_{760\text{nm}}$, 根据标准曲线计算总酚含量。

总酚含量(g/100g, 干基) = $(C \times 50 \times N) / W \times 10$

式中: C: 查标准曲线值, 为测量时样品液的浓度, mg/mL; 50: 测量时样品液定容的体积, mL; N: 稀释倍数; W: 样品重量, g。

1.2.7 紫薯粉抗氧化力的测定^[12]

1.2.7.1 DPPH自由基清除力的测定 准确称取紫薯粉2~10mg (干基), 加入4mL现配制的0.1mmol/L DPPH甲醇溶液。漩涡振荡2min, 避光摇晃20min, 10000r/min离心10min, 测定其上清液吸光度 $A_{517\text{nm}}$ 。

DPPH自由基清除率(%) = $[A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100$

式中: A_0 : 80% 甲醇溶液代替样品的吸光度; A_1 : 样品的吸光度; A_2 : 80% 甲醇溶液代替DPPH溶液的吸光度。

1.2.7.2 还原力的测定 准确称取紫薯粉1~5mg (干基), 加入1mL浓度为0.2mol/L、pH为6.6的磷酸盐缓冲液和1% (w/v) 的铁氰化钾1mL, 摇匀后在50℃下水浴20min, 冷却, 再加入1mL 10% (w/v) 的三氯乙酸, 然后在3000r/min下离心10min, 取上清液1mL, 加蒸馏水2mL和1mL 0.1% (w/v) 三氯化铁, 混匀静置10min后在700nm处测定其吸光度。吸光值越高表示样品的还原力越大。

1.2.8 脂质过氧化抑制力的测定 称取40mg亚油酸和400mg吐温40, 加到2.5mL β -胡萝卜素溶液中(2mg β -胡萝卜素溶解于10mL氯仿), 制备出 β -胡萝

卜素/亚油酸乳液。旋转蒸发氯仿后, 加100mL蒸馏水并振荡均匀。准确称取紫薯粉10~50mg (干基), 加入4mL乳液, 在50℃下水浴60min后在470nm处测定其吸光度。以蒸馏水为空白对照。

脂质过氧化抑制率(%) = $(\Delta A_1 - \Delta A_2) / \Delta A_1 \times 100$

式中: ΔA_1 : 对照组吸光度(t=0min)-对照组吸光度(t=60min); ΔA_2 : 样品吸光度(t=0min)-样品吸光度(t=60min)。

2 结果与分析

2.1 干燥方式对紫薯粉基本成分的影响

表1为各种干燥紫薯粉的基本成分。紫薯粉经冷冻干燥、热风干燥、微波干燥和喷雾干燥后, 其含水量在6.95%~8.68%范围, 都达到甘薯粉贮藏安全水分要求($\leq 14\%$)。冷冻、热风和微波干燥(95~105℃)产品的粗纤维含量较高, 这可能是粗纤维化学成分本身稳定性较好, 常规温度下加工不易造成损失^[13]。而喷雾干燥(100~200℃)产品的纤维含量较低, 这可能是其干燥温度较高, 对纤维有破坏作用^[14]。总的来说, 冷冻干燥温度低, 对紫薯粉粗蛋白和淀粉保护最好; 其次是喷雾干燥, 虽然它的温度高, 但干燥时间很短; 微波干燥对紫薯粉营养成分破坏最大, 可能由于其干燥温度高, 时间较长。从单位水分能耗来看, 能耗由小到大的顺序依次为: 微波干燥、喷雾干燥、热风干燥和冷冻干燥。

2.2 干燥方式对紫薯粉粒度的影响

表2中D0.1、D0.5、D0.9分别表示累计分布10%、50%、90%所对应的粒径, 径距 = $(D0.9 - D0.1) / D0.5$ 。其中D0.5是代表粉体粘结度的平均直径。径距表示粒度大小分布的跨度, 其值越小表示粒度大小分布值越小和粒度大小越均一。由表2可知, 喷雾干燥所得样品的D0.5显著低于其他三种干燥方式, 这是由于喷雾干燥是通过加压雾化形成的液滴, 而其他三种干燥方式的紫薯粉造粒方式一样, 因此粒度差异不大。此外, 微波干燥组的径距值显著小于其他组, 说明其粒度大小较均一, 而喷雾干燥得到的紫薯粉径距最大, 说明经过喷雾干燥后虽能达到较小粒度, 但粒度均一性较差。

2.3 干燥方式对紫薯粉持水力和复水性的影响

由图1可知, 不同方式干燥的紫薯粉持水力(图1A)随浸泡时间的延长而逐渐上升。对于复水性(图1B), 不同干燥样品随着时间的延长逐渐上升, 最后达到平衡。不同干燥方式之间的持水力和复水性都存在显著差异。冷冻干燥、热风干燥和微波干燥得到的紫

表1 干燥方式对紫薯粉的基本成分的影响及能耗评价

Table 1 Effect of drying methods on proximate composition of purple sweet potato flours and estimation of energy consumption

干燥方式	水分 (g/100g)	淀粉 (g/100g)	粗蛋白 (g/100g)	粗脂肪 (g/100g)	粗纤维 (g/100g)	灰分 (g/100g)	单位水分能耗 (kJ/kg)
冷冻干燥	6.95±0.37c	75.98±0.65a	5.28±0.44a	0.64±0.04a	4.45±0.22bc	2.35±0.29a	(1.34±0.05)×10 ⁶ a
热风干燥	7.75±0.12b	72.75±0.33b	4.99±0.32a	0.68±0.03a	4.92±0.13a	2.23±0.49a	(9.76±0.03)×10 ⁶ b
微波干燥	7.44±0.14b	70.63±0.21c	4.91±0.12a	0.69±0.03a	4.74±0.20ab	2.19±0.06a	(6.48±0.02)×10 ³ d
喷雾干燥	8.68±0.06a	75.21±0.03a	5.09±0.07a	0.71±0.05a	4.13±0.09c	2.30±0.21a	(4.61±0.02)×10 ⁴ c

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异($p < 0.05$), 表2~表4同; 水分以湿基表示, 其他基本成分指标以干基表示。

表2 不同干燥方式对紫薯粉粒度的影响

Table 2 Effect of drying methods on the particle size of purple sweet potato flours

干燥方式	体积粒径			
	D0.1 (μm)	D0.5 (μm)	D0.9 (μm)	径距span
冷冻干燥	46.407 $\pm$ 0.135a	147.270 $\pm$ 1.255b	344.073 $\pm$ 10.875b	2.021 $\pm$ 0.027c
热风干燥	28.845 $\pm$ 0.121b	165.430 $\pm$ 2.203a	448.670 $\pm$ 12.346a	2.538 $\pm$ 0.033b
微波干燥	27.587 $\pm$ 0.112c	104.925 $\pm$ 1.043c	235.987 $\pm$ 10.882c	1.986 $\pm$ 0.015d
喷雾干燥	3.711 $\pm$ 0.022d	13.707 $\pm$ 0.108d	163.581 $\pm$ 3.243d	11.663 $\pm$ 0.087a

薯粉持水力较高,喷雾干燥最低,这可能与纤维素、淀粉含量以及淀粉内部束水的位置不同有关^[15]。冷冻干燥的紫薯粉由于质地疏松、多孔,所以复水性最好。马先英等^[16]在不同干燥方法对胡萝卜复水性及品质影响的研究中发现,当样品在高功率微波下(>340W)持续干燥时,样品本身升温过高,导致样品内部组织遭到严重破坏,因而影响物料的复原能力。同时,通过对喷雾干燥所得紫薯全粉的电镜图也可以得出相似结论^[17]。本实验微波干燥的功率(800W)较高,所以产品复水性小于热风干燥。

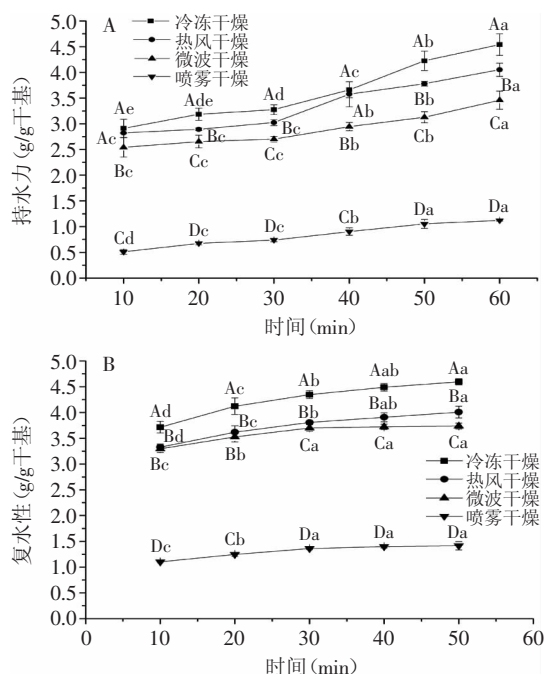


图1 干燥方式对紫薯粉持水力(A)和复水性(B)的影响

Fig.1 Effect of drying methods on the water holding capacity (A) and water absorption index (B) of purple sweet potato flours

注:a~d同一处理不同时间之间有显著性差异($p<0.05$);A~D表示同一时间不同处理之间有显著性差异($p<0.05$)。

2.4 干燥方式对紫薯粉溶水指数的影响

溶水指数是指紫薯粉的溶水能力。由图2可知,不同干燥的紫薯粉的溶水指数,在25~50℃内,上升缓慢,从60℃开始显著升高。不同干燥方式对紫薯粉的溶水指数有显著差异。其中喷雾干燥的紫薯粉水溶性最好,其次是微波干燥、热风干燥,而冷冻干燥最差。溶水指数与淀粉颗粒结构有关,可能由于喷雾干燥高温导致淀粉结构破坏,低分子量的直链淀粉

溶解并通过非结晶区溶出^[18-19]。也有可能和喷雾干燥紫薯粉粒度最小有关^[20]。

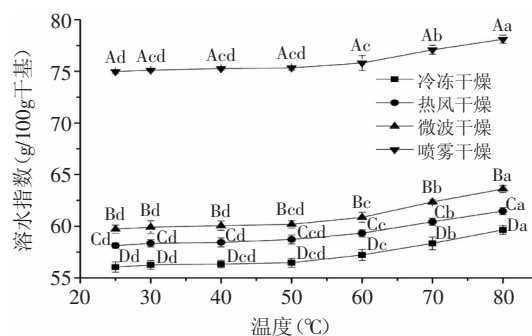


图2 干燥方式紫薯粉溶水指数的影响

Fig.2 Effect of drying methods on the water solubility index of purple sweet potato flours

注:a~d表示同一干燥处理不同温度之间有显著性差异($p<0.05$);A~D表示同一温度不同干燥处理之间有显著性差异($p<0.05$)。

2.5 干燥方式对紫薯粉抗氧化成分的影响

由表3可知,不同干燥方式对紫薯的各抗氧化成分有显著影响,花色苷损失率为27.64%~52.66%,类黄酮损失率为44.95%~56.45%,总酚损失了44.09%~63.26%。喷雾干燥和冷冻干燥紫薯粉花色苷含量最高,这可能由于前者是瞬间高温干燥而后者是低温干燥,对花色苷破坏程度较小。干燥后紫薯全粉中类黄酮和总酚含量顺序为:喷雾干燥>微波干燥>冷冻干燥>热风干燥。由此可见,喷雾干燥过程中紫薯粉的抗氧化物质损失较少。由于微波干燥温度(95~105℃)高于冷冻干燥(-20℃)和热风干燥(50℃),导致细胞结构被破坏,从而利于更多类黄酮和总酚的释放与提取^[21]。冷冻干燥是非热处理,利于成分的保留,且形成的冰晶使细胞破裂也利于抗氧化物质的

表3 干燥方式对紫薯粉的花色苷、类黄酮和总酚含量(干基)的影响

Table 3 Effect of drying methods on the content of anthocyanins, flavonoids and total phenolics of purple sweet potato flours

样品	花色苷含量 (mg/100g)	类黄酮含量 (g/100g)	总酚含量 (g/100g)
紫薯	44.28 $\pm$ 0.03a	1.22 $\pm$ 0.03a	2.50 $\pm$ 0.02a
冷冻干燥粉	32.04 $\pm$ 0.07b	0.58 $\pm$ 0.02d	1.01 $\pm$ 0.02d
热风干燥粉	20.96 $\pm$ 0.06d	0.53 $\pm$ 0.01e	0.92 $\pm$ 0.02e
微波干燥粉	27.61 $\pm$ 0.05c	0.62 $\pm$ 0.01c	1.13 $\pm$ 0.01c
喷雾干燥粉	31.99 $\pm$ 0.07b	0.67 $\pm$ 0.01b	1.40 $\pm$ 0.01b

提取,热风干燥过程中可能由于酶或热降解而导致抗氧化成分损失^[22]。

2.6 干燥方式对紫薯粉抗氧化力的影响

目前,抗氧化力的测定主要是对提取物中可溶性抗氧化成分进行测定。据Rumbaoa等^[23]报道,87.1%的酚类物质属于结合态,且提取较困难。本实验采用Serpen等^[12]研究报道的固体粉末抗氧化力测定法。固体粉末的抗氧化测定包括可溶性成分的直接测定和不可溶性成分的表面反应测定。由图3可知,经不同干燥的紫薯粉的DPPH自由基清除力(图3A),还原力(图3B)和脂质过氧化抑制力(图3C)都随着紫薯固体粉末量的增加而显著提高。由表4可知,喷雾干燥紫薯粉的DPPH自由基清除力最强,其次是冷冻干燥。不同干燥的紫薯粉的还原力大小为:喷雾干燥>微波干燥>冷冻干燥>热风干燥。紫薯固体粉末的脂质过氧化抑制力大小为:冷冻干燥>喷雾干燥>微波干燥>热风干燥,此顺序与不同干燥紫薯粉中花色苷含量结果一致。结合表5可得出,花色苷含量与紫薯固体粉末的脂质过氧化抑制力之间的相关

系数达到0.92,因此经不同干燥的紫薯固体粉末的脂质过氧化抑制力主要取决于花色苷含量。

表4 干燥方式对紫薯粉半最大抗氧化效应浓度的影响

Table 4 Effect of drying method on the concentration for 50% of maximal antioxidant effect (EC_{50}) of purple sweet potato flours

干燥方式	半最大抗氧化效应浓度 (EC_{50} , mg/mL)		
	DPPH自由基清除率	还原力	脂质过氧化抑制率
冷冻干燥	6.27±0.02c	4.00±0.03b	18.20±0.06d
热风干燥	8.20±0.04a	4.22±0.02a	42.15±0.34a
微波干燥	7.41±0.01b	3.26±0.01c	35.69±0.45b
喷雾干燥	2.99±0.01d	3.06±0.01d	31.08±0.31c

表5 紫薯粉抗氧化成分含量与紫薯粉抗氧化力的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of bioactive components and antioxidant properties of purple sweet potato flours

指标	DPPH自由基清除力	还原力	脂质过氧化抑制力
花色苷含量	0.89	0.49	0.92
类黄酮含量	0.85	0.93	0.39
总酚含量	0.86	0.87	0.30

3 结论

本文研究了干燥方式对紫薯全粉基本成分、水合特性及抗氧化能力及抗氧化能力的影响。经干燥后,紫薯全粉的粗蛋白与粗脂肪差异不显著,而淀粉、粗纤维、总酚含量以及抗氧化物质的含量差异显著。四种干燥方式的单位水分能耗从大到小依次为:冷冻干燥、热风干燥、喷雾干燥、微波干燥;从持水力和复水性看从大到小依次为:冷冻干燥、热风干燥、微波干燥、喷雾干燥,而溶水指数依次升高。喷雾干燥所得紫薯固体粉末的DPPH自由基清除力和还原力最高,说明喷雾干燥能够尽可能地保持紫薯营养、结构的完整性,从而表现出较好的品质,使其以后在食品原料或辅料加工方面应用具有更好的加工性能,而热风干燥所得产品的DPPH自由基清除力和还原力最低。从这两种抗氧化模型看,类黄酮和总酚是主要的抗氧化物质。而脂质过氧化抑制力的大小顺序依次为冷冻干燥、喷雾干燥、微波干燥、热风干燥,主要是由于真空冷冻干燥对起抑制脂质过氧化作用的花色苷破坏程度较小。从紫薯全粉品质角度出发,冷冻和喷雾干燥较好;从能耗节约的角度而言,微波与喷雾干燥较好。综合考虑,喷雾干燥效果较好。

参考文献

- [1] Osundahunsi O F, Fagbemi TN, Kesselman E, *et al.* Comparison of the physicochemical properties and pasting characteristics of flour and starch from red and white sweet potato cultivars [J]. Journal Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51 (8): 2232-2236.
- [2] AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International [S]. Gaithersburg: Patricia C, 16th ed, 1995.
- [3] 吴谋成. 食品分析与感官评定[M]. 北京: 中国农业出版社,

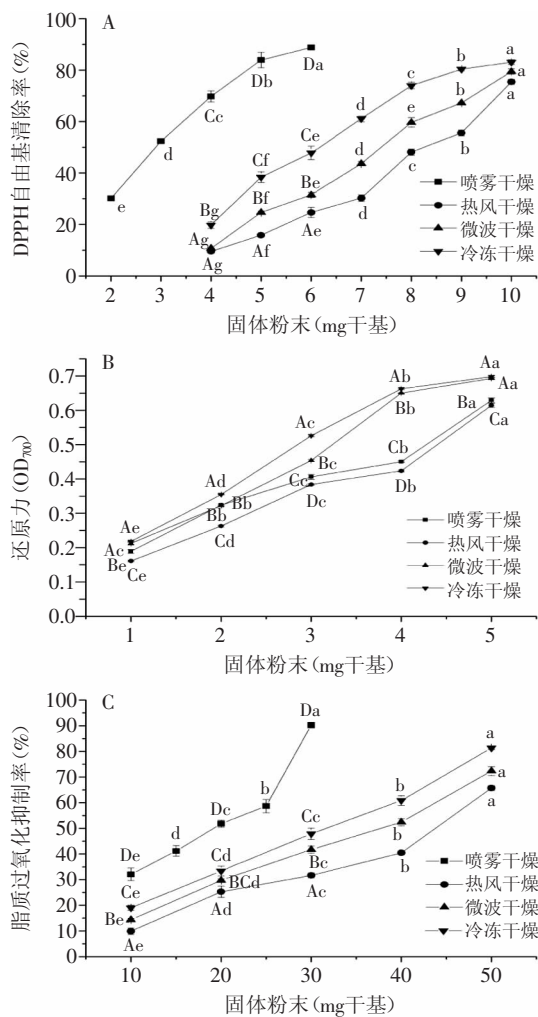


图3 干燥方式对紫薯粉抗氧化力的影响

Fig.3 Effect of drying methods on antioxidant properties of purple sweet potato flours

注:a~g同一处理不同克数之间有显著性差异($p < 0.05$); A~D表示同一克数不同处理之间有显著性差异, $p < 0.05$ 。

2006:79-80.

- [4] Zhao Xiaoyan, Yang Zaibin, Gai Guosheng, *et al.* Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(9):217-222.
- [5] Ahmed M, Akter MS, Lee JC, *et al.* Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9):1307-1312.
- [6] Hosseinian FS, Li W, Beta T. Measurement of anthocyanins and other phytochemicals in purple wheat[J]. Food Chemistry, 2008, 109(4):916-924.
- [7] 万利秀, 肖更生, 徐玉娟, 等. 甲醇提取柑橘皮总黄酮的工艺优化[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(27):15087-15089.
- [8] Andarwulan N, Batari R, Sandrasari DA, *et al.* Flavonoid content and antioxidant activity of vegetables from Indonesia[J]. Food Chemistry, 2010, 121(4):1231-1235.
- [9] 于亚莉, 高峰, 刘静波, 等. 超声波法提取花生壳众多酚类物质的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(11):257-261.
- [10] 李巨秀, 王柏玉. 福林-酚比色法测定桑椹中总多酚[J]. 食品科学, 2009(30):292-295.
- [11] Malkeet S P, David H P. Quantification of phenolic acids and antioxidant activity in sweetpotato genotypes[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 119(1):17-20.
- [12] Serpen A, Gokmen V, Karagoz A, *et al.* Phytochemical quantification and total antioxidant capacities of emmer(*Triticum dicoccon* Schrank) and einkorn(*Triticum monococcum* L.) wheat landraces[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(16):7285-7292.
- [13] 王璋, 许时婴, 江波, 等译. 食品化学[M]. 第三版. 北京: 中

国轻工业出版社, 2003, 632.

- [14] 常虹, 李远志, 张慧敏. 不同干燥方式制备菠萝粉的效果比较[J]. 农产品加工, 2009(3):135-137.
- [15] 张钟, 刘晓明. 不同干燥方法对生姜粉物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11):186-188.
- [16] 马先英, 赵世明, 林艾光. 不同干燥方法对胡萝卜复水性及品质的影响[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(2):158-161.
- [17] Peng Zhen, Li Jing, Zhao Guohua, *et al.* Effect of carriers on physicochemical properties, antioxidant activities and biological components of spray-dried purple sweet potato flours[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1):348-355.
- [18] Nwokocha LM, Williams PA. New starches: Physicochemical properties of sweetsop(*Annona squamosa*) and soursop(*Annona muricata*) starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3):462-468.
- [19] Nwokocha LM, Williams PA. Some properties of white and yellow plantain (*Musa paradisiaca*, *normalis*) starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(1/2):133-138.
- [20] 宫元娟, 曾程, 王强, 等. 胡萝卜微粉物理特性和营养成分的影响因素[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11):124-128.
- [21] Yang Jing, Chen Jinfeng, Zhao Yuying, *et al.* Effects of drying processes on the antioxidant properties in sweet potatoes[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(10):1522-1529.
- [22] Chan EWC, Lim YY, Wong SK, *et al.* Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1):166-172.
- [23] Rumbaoa RGO, Cornago DF, Geronimo IM. Phenolic content and antioxidant capacity of Philippine sweet potato (*Ipomoea batatas*) varieties[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4):1133-1138.

(上接第118页)

参考文献

- [1] 王宝臣, 王文珍, 王振东, 等. 山桃稠李育苗技术探讨[J]. 绿色科技, 2012(2):93.
- [2] 刘晓平. 癌症预防中的Nrf2-Keap1-ARE通路[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2008, 13(6):712-716.
- [3] 江刚, 戴爱国, 胡瑞成. Nrf2调控C-谷氨酰半胱氨酸合成酶表达与慢性阻塞性肺疾病[J]. 国际呼吸杂志, 2007, 27(4):265-269.
- [4] Bertram J, Peacock JW, Tan C, *et al.* Inhibition of the phosphatidylinositol 3'-kinase pathway promotes auto-crine Fas-induced death of phosphatase and tensin homologue-deficient prostate cancer cells[J]. Cancer Res, 2006, 66(9):4781-4788.
- [5] 王以美, 彭双清, 董延生, 等. 丁烯酸内酯对HepG2细胞抗氧化功能的影响[J]. 毒理学杂志, 2008, 22(4):252-254.
- [6] Mosmann T. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays[J]. Immunol Methods, 1983, 65(1-2):55-63.
- [7] 张婷, 陈倩, 汤树生, 等. 喹乙醇对HepG2细胞抗氧化系统的影响[J]. 癌变·畸变·突变, 2010, 22(5):361-365.
- [8] 闵翠丽. 谷胱甘肽转移酶P1在肿瘤诊治中的研究进展[J].

中国现代药物应用, 2009, 3(14):203-204.

- [9] Dinkova-Kostova AT, Holtzclaw WD, Cole RN *et al.* Direct evidence that sulfhydryl groups of Keap1 are the sensors regulating induction of phase 2 enzymes that protect against carcinogens and oxidants[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99(18):11908-11913.
- [10] 刘荣, 辛越, 何娇. 山桃稠李果实花色苷对HepG2细胞抗氧化系统的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9):348-351.
- [11] Cullinan B, Zhang D, Hannink M, *et al.* Nrf2 was a direct PERK substrate and effector of PERK-dependent cell survival[J]. Mol Cell Biol, 2003, 23(20):7198-7209.
- [12] Nguyen T, Yang CS, Pickett CB. The pathways and molecular mechanisms regulating Nrf2 activation in response to chemical stress[J]. Free Radic Biol Med, 2004, 37(4):433-441.
- [13] Itoh K, Tong KI, Yamamoto M. Molecular mechanism activating Nrf2-Keap1 pathway in regulation of adaptive response to electrophiles[J]. Free Radic Biol Med, 2004, 3(10):1208-1213.
- [14] Motohashi H, Yamamoto M. Nrf2-Keap1 defines a physiologically important stress response mechanism[J]. Trends Mol Med, 2004, 10(11):549-557.