

基于灰色关联分析法综合评价 不同干燥方式对山药脆片品质的影响

高琦^{1,2}, 陈佳男¹, 张建超¹, 刘春菊³, 刘春泉³, 薛友林^{1,3,*}

(1. 辽宁大学轻型产业学院, 辽宁沈阳 110036;

2. 辽宁行政学院, 辽宁沈阳 110161;

3. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 为了比较真空冷冻干燥、变温压差膨化干燥、真空干燥、热风干燥四种干燥方式对山药脆片物理特性、营养成分、微观结构、感官品质的影响, 结合变异系数法和灰色关联分析对不同干燥方式山药脆片进行综合评价。结果表明: 四种不同干燥方式下的山药脆片的物理特性和营养成分的保留均有明显差异, 真空冷冻干燥和变温压差膨化干燥能产生较好的物理特性, 并且较好的保留了营养成分。扫描电镜结果显示, 真空冷冻干燥产品结构最完整; 变温压差膨化干燥产品感官评分最高。综合评价结果: 变温压差膨化干燥 > 真空冷冻干燥 > 真空干燥 > 热风干燥。综合多方面考虑, 变温压差膨化干燥是最适合山药脆片加工的干燥方式。

关键词: 干燥方式, 山药脆片, 微观结构, 灰色关联分析

Comprehensive Evaluation of the Effects of Different Drying Methods on the Quality of Chinese Yam Chips Based on Gray Relational Analysis

GAO Qi^{1,2}, CHEN Jia-nan¹, ZHANG Jian-chao¹, LIU Chun-ju³, LIU Chun-quan³, XUE You-lin^{1,3,*}

(1. College of Light Industry, Liaoning University, Shenyang 110036, China;

2. Liaoning Administrative College, Shenyang 110161, China;

3. Institute of Farm Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to evaluate and compare the effects of four drying methods including vacuum freeze drying, explosion puffing drying, vacuum drying and hot-air drying on physical properties, nutritional components, microstructure, sensory evaluation of Chinese yam chips, this study used the coefficient of variation and gray correlation analysis to evaluate these four drying methods. The results showed that there were significant differences in the physical properties and nutritional components of Chinese yam chips dried by four different methods. Vacuum freeze drying and explosion puffing drying could produce chips with good physical properties and more nutrients. Scanning electron microscopy showed that the structure of vacuum freeze-dried product was well preserved. The sensory score of the explosion puffing dried product was the highest. Comprehensive evaluation resulted: explosion puffing drying > vacuum freeze drying > vacuum drying > hot-air drying. Comprehensive consideration that explosion puffing drying was the most suitable method for the processing of Chinese yam chips.

Key words: drying methods; Chinese yam chips; microstructure; gray correlation analysis

中图分类号: TS255.42

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2018)16-0006-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.002

引文格式: 高琦, 陈佳男, 张建超, 等. 基于灰色关联分析法综合评价不同干燥方式对山药脆片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 6-12.

山药 (*Dioscorea opposita* Thunb.) 又名薯蕷, 属于薯蕷科薯蕷属植物^[1]。山药品种繁多, 仅在中国就发现 93 种^[2]。山药不仅是常见食物, 也是一味中药材,

对治疗糖尿病, 腹泻, 哮喘等疾病具有很好功效^[3]。新鲜山药不易储存, 容易在贮存期间变质, 造成营养流失^[4-5]。因此, 希望开发一种较高保质期的山药产

收稿日期: 2017-10-30

作者简介: 高琦(1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: gaoqi0925@163.com。

* 通讯作者: 薛友林(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xueyoulin@lnu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31201285); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(2013693); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503142); 中国博士后科学基金项目(2017M611752); 辽宁大学大学生创新创业训练计划项目(X201710140238, X201710140239, X201710140247, X201710140250)。

品。干燥技术主要通过降低其水分活度和含水量并降低质量损失来稳定产品^[6-7]。与在夏季只能保存几个星期的新鲜产品相比,干燥产品可以储存数月甚至数年,而不会有明显的营养损失^[8-9]。因此,干燥也可以创造新的产品形式,增加原材料的价值。

目前,国内外对干燥技术的研究有很多。最常见的干燥技术是热风干燥。然而,由于食品材料的低导热性和内部耐潮湿传递性,这种方法导致传热效率低,并且干燥产品的质量通常降低并且通常不令人满意^[10]。Kamilla等^[11]发现了较低浓度糖渍处理及较低温度的真空干燥处理更适用于加工 pequi (巴西水果)脆片,能更好保持其中的抗坏血酸和类胡萝卜素等有益成分。Aneta等^[12]通过对对流干燥、真空微波干燥、对流-真空微波干燥和真空冷冻干燥四种干燥方式对枣的化学成分、抗氧化能力和感官品质的影响研究发现,真空冷冻干燥的总酚类化合物的含量最高,并且硬度最适宜。YI等^[13]研究了微波预干燥和变温压差膨化干燥对火龙果脆片细胞壁多糖的修饰作用,其有助于火龙果脆片形成良好的多孔结构和更脆的质感。变温压差膨化干燥产品由于高品质,备受关注。变温压差膨化干燥是通过预干燥将果蔬处理到较低水分含量,放入膨化罐,通过蒸汽加热使内部水分蒸发,施加外部压力,再打开泄压阀,瞬间抽真空,使果蔬形成多孔结构。

针对这些特点,本实验选取了较为热门的变温压差膨化干燥、传统的真空干燥、热风干燥以及真空冷冻干燥进行非油炸山药脆片的加工,通过变异系数法和灰色关联分析法相结合对不同干燥方式加工的山药脆片的物理性质、营养成分、微观结构、感官评价等品质指标的影响来进行综合评价,为非油炸山药脆片的开发,以及山药深加工提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白玉山药 沈阳十二线蔬菜批发市场;无水亚硫酸钠 分析纯,天津市大茂化学试剂厂;2,6-二氯靛酚 分析纯,合肥博美生物科技有限责任公司;福林酚 分析纯,Solarbio公司。

SCIENTZ-10N型真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司;QDPH1021型变温压差膨化干燥设备 天津市勤德新材料科技有限公司产品;DZF-6050型真空干燥箱 巩义市市华仪器有限责任公司;GZX-BE型电热鼓干燥箱 上海博迅实业有限公司医疗设备厂;BCD-208GT型冷藏冷冻箱 江苏雪龙电器有限公司;NR20XE型精密色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司;CT3-25K型质构仪 美国Brookfield公司;JSM-5610LV型扫描电子显微镜 日本电子公司。

1.2 实验方法

1.2.1 干燥工艺 参考文献^[26,31-32],将新鲜山药经清洗、去皮、切成3 mm薄片,再经过热烫(沸水煮1 min)、护色(浸入0.1%无水亚硫酸钠溶液1 h)、预冻(-18℃冷冻12 h),分别进行真空冷冻干燥、变温压差膨化干燥、真空干燥、热风干燥。

真空冷冻干燥:真空度-60 Pa,温度-40~-45℃,干燥时间14 h,干燥至水分含量8%以下;变温压差膨化干燥:将山药片在70℃条件下热风预干燥50 min后,在温度80~85℃、压力差为0.3 MPa条件下停滞5 min,在温度70~75℃条件下抽空90 min(刚刚开始抽真空的瞬间即为膨化过程),全程干燥时间145 min,干燥至水分含量8%以下;真空干燥:真空度-0.025~-0.03 MPa,温度70℃,干燥时间350 min,干燥至水分含量8%以下;热风干燥:风速2.3 m/s,温度70℃,干燥时间110 min,干燥至水分含量8%以下(注:实验条件经过预实验工艺优化得出,为了比较干燥方式的影响选取干燥温度均为70℃左右,真空冷冻干燥为对照组)。

1.2.2 物理性质的测定

1.2.2.1 色泽的测定 参照Antonio等^[14]的方法进行分析,将色差仪基于CIE L^* , a^* , b^* 模式下,用鲜山药片作为色差衡量标准进行标样测定。通过在每个山药脆片的主轴上的三个等距点进行测定。测得 L^* , a^* , b^* 值, ΔE 。

1.2.2.2 复水率的测定 参照滕建文等^[15]的方法分别测定山药脆片在25℃下的复水率。将一片山药脆片在25℃下水浴不同的时间,每经过一定的时间间隔进行一次测量(在25℃下水浴1~20 min,间隔时间3 min),用纸擦去表面多余水分然后称重,直到前后两次测量质量之差小于0.001 g。复水率按照如下公式计算:

$$RR(\%) = M_t/M_0 \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中,RR表示复水率,%; M_t 表示复水后山药脆片的质量,g; M_0 表示复水前山药脆片的质量,g。

1.2.2.3 体积比和密度的测定 参照YI等^[15]的方法测量山药脆片体积比VR和密度 ρ 。

$$VR(\text{cm}^3/\text{cm}^3) = (V_a - V_b)/V_b \quad \text{式(2)}$$

式中, V_a 和 V_b 分别表示干燥前和干燥后山药脆片的体积, cm^3 。

1.2.2.4 质构的测定 采用CT3-25K型质构仪测定山药脆片的硬度。测试过程中,出现的最大峰为样品硬度 H_1 ,其值越大,产品越硬,单位为g;脆度的测定通过公式(3)计算得出:

$$C(\text{g/g}) = H_1/H_{AV} \quad \text{式(3)}$$

式中,C表示脆度(松脆性),松脆性成为硬度的一个函数; H_1 表示硬度,g; H_{AV} 表示得到的所有峰值平均值,g。得到的峰值平均值与初始硬度有关。比值越高,则表示松脆性越强^[16]。

具体条件:采用质构仪TA7型探头进行测试,探头长度7.0 mm,预测试速度为2.0 mm/s,测试速度为2.0 mm/s,返回速度为2.0 mm/s,触发点负载为10 g,负载单元为25000 g。

1.2.3 营养成分的测定 营养成分的测定包括:淀粉的测定:采用GB 5009.9-2016测定脆片中淀粉的含量^[17];可溶性固形物的测定:采用黄雷松^[18]方法,用手持糖度计测定脆片中可溶性固形物的含量,将脆片粉末配置成5%溶液,过滤,用手持糖度计测定;水分的测定:采用GB 5009.3-2016直接干燥法测定

脆片中水分的含量^[19]；蛋白质的测定：采用 GB 5009.5-2016 凯氏定氮法，测定脆片中蛋白质的含量^[20]；还原糖的测定：采用 GB/T 5009.7-2016 直接滴定法，测定脆片中还原糖的含量^[21]；总酚的测定：采用 GB/T 8313-2008 福林酚法，测定脆片中总酚含量^[22]； V_c 的测定：采用 GB 5009.86-2016 2,6-二氯酚滴定法，测定脆片中 V_c 的含量^[23]。

1.2.4 观察微观结构 取山药脆片样品采用 JFC01600 型镀金仪 5 min 喷金处理，将喷金后山药脆片固定在扫描台上，在 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜放大到 200 倍进行观察。

1.2.5 感官评价 选取 10 名有感官评价培训经验的人员，分别对四种不同方式干燥的山药脆片进行色泽、气味、口感、风味 4 个方面的评价并计算平均分，具体如下表 1 所示。

表 1 山药脆片感官评价表

指标	评分标准	分值
口感	酥脆可口，有独特滋味，无苦味	21~25
	较酥脆，轻微苦涩味	11~20
	无脆性，较硬，有苦涩味	1~10
质地	外表保存完好，无破碎	21~25
	干瘪、严重形变现象	11~20
	外表保存较好，有轻微干瘪	1~10
色泽	破碎干瘪、严重形变	21~25
	色泽乳白色，颜色均匀，无焦糊现象	11~20
	微黄，部分焦糊	1~10
气味	焦糊明显	21~25
	有淡淡香味，无异味	11~20
	香味不明显	1~10
	有糊味	

1.3 综合评价

以变异系数法确定 ΔE 、体积比、密度、硬度、脆度、淀粉、可溶性固形物、水分、蛋白质、还原糖、总酚、 V_c 和感官评价 13 个指标的影响因子权重，再经过灰色关联分析的一系列数据处理计算各因子的加权关联度，将加权关联度作为综合评价的最终结果。

1.3.1 因子权重赋予 采用变异系数法^[24]确定影响因子的权重。何承刚等^[25]发现各评价指标的变异系数越大，所赋予的权重应越大。为了更客观的评价各项指标对品质影响的重要性，需要通过变异系数确定权重来反映相对差异程度^[26]。公式如下：

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad \text{式(4)}$$

表 2 不同干燥方式对山药脆片色泽的影响

Table 2 Effects of different drying methods on the color of Chinese yam chips

指标	真空冷冻干燥	变温压差膨化干燥	真空干燥	热风干燥	鲜样
L^*	93.34 ± 0.11 ^a	81.73 ± 0.73 ^b	77.25 ± 1.04 ^{bc}	78.17 ± 3.05 ^c	85.54 ± 1.17
a^*	0.33 ± 0.05 ^c	1.21 ± 0.36 ^b	1.46 ± 0.32 ^b	2.12 ± 0.26 ^a	0.49 ± 0.06
b^*	6.17 ± 0.35 ^c	12.08 ± 0.76 ^a	9.51 ± 1.32 ^b	15.31 ± 1.00 ^a	7.27 ± 0.15
ΔE	7.89 ± 0.14 ^b	8.56 ± 0.36 ^{ab}	8.82 ± 0.79 ^{ab}	11.28 ± 1.48 ^a	0

注：同一行内标不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，表 3、表 4 同。

$$W_i = \frac{CV_i}{\sum_{i=1}^n CV_i} \quad \text{式(5)}$$

式中， CV_i 表示第 i 项的变异系数； σ_i 表示第 i 项的标准差； μ_i 表示第 i 项的算术平均数； W_i 表示第 i 项的权重。

1.3.2 灰色关联模型分析 参照刘文静等^[27]灰色关联法分析，通过数据无量纲化，参考序列与比较序列间的绝对差值计算，灰色关联系数及李慧等^[28]方法计算加权关联度来进行综合性评价。

1.4 数据分析

色泽、物理性质、营养成分的测定，均重复 3 次，取平均值 ($n=3$)。采用 DPS 7.5 系统进行数据处理，作误差及显著性分析 ($p < 0.05$)。采用 Execl 2007 和 Origin 75 系统作图分析。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对山药脆片物理性质的影响

2.1.1 不同干燥方式对山药脆片色泽的影响 由表 2 可以看出，真空冷冻干燥亮度值 L^* 均高于其他三种。此外，热风干燥脆片的 a^* 和 b^* 明显高于鲜山药片样品，且热风干燥脆片偏暗黄色。由色差值 ΔE 可知，热风干燥脆片色差值 ΔE 显著高于真空冷冻干燥脆片 ($p < 0.05$)，表明热风干燥对山药脆片颜色的改变较大， $\Delta E = 11.28$ ，可能由于热风干燥直接与氧气接触，虽采取了护色处理，但护色效果较差^[29]。真空冷冻干燥脆片色差值 ΔE 最小，这表明真空冷冻干燥温度较低，对山药脆片的原有色泽的损失最小。

2.1.2 不同干燥方式对山药脆片复水率的影响 不同干燥方式对山药脆片 25 °C 的复水率的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出，真空冷冻干燥产品 25 °C 的复水率远高于其他三种干燥产品，这可能是因为真空冷冻干燥会造成脆片微观结构发生变化，并且形成疏松多孔蜂窝状结构^[30]，空隙较大复水性更强，在 8 min 后无明显变化，山药脆片吸水量达到饱和。

2.1.3 不同干燥方式对山药脆片体积比和密度的影响 体积比和密度主要反映了山药脆片的外观形态的变化。由图 2 可知，真空冷冻干燥山药脆片的体积比最大，显著优于其他三种干燥方法 ($p < 0.05$)，表明真空冷冻干燥能更好保持山药脆片的较为完整内部结构，支撑完整的外观形态；另外，热风干燥山药脆片的体积比最小，说明热风干燥对山药脆片的造成了巨大形变，对外观破坏较为明显，干瘪收缩。山药脆片的体积比由大到小排序情况：真空冷冻干燥 > 变温压差膨化干燥 > 真空干燥 > 热风干燥。密度的排序则与体积比的完全相反。

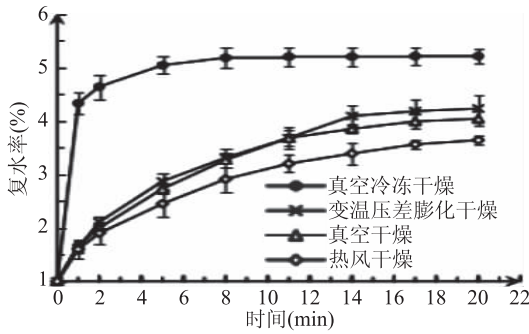


图1 不同干燥方式对山药脆片在 25 °C 下复水率的影响
Fig.1 Effect of different drying methods on the rehydration rate of Chinese yam chips at 25 °C

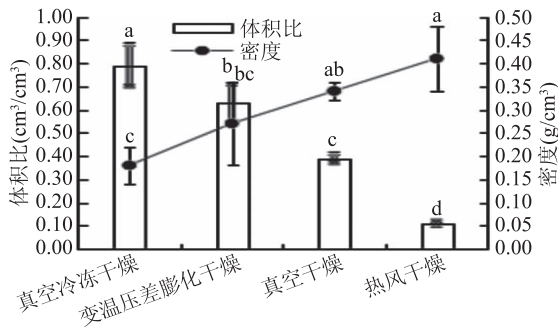


图2 不同干燥方式对山药脆片体积比和密度的影响
Fig.2 Effect of different drying methods on the volume ratio and bulk density of Chinese yam chips
注:同一指标内的点上的不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 图3 同。

2.1.4 不同干燥方式对山药脆片硬度和脆度的影响 脆度是指切断样品时,内部多次断裂产生的阻碍能力。对于山药脆片,脆度越高其产品品质越好。如图3所示,真空冷冻干燥样品的硬度与脆度都最小,可能由于真空冷冻干燥未经过高温处理,更好的保持了内部结构框架,形变较小,抵御外力能力较差。真空干燥样品的硬度最大,长时间的高温及真空处理使样品发生了严重的收缩变形,紧凑的内壁使得抵御外力能力较强,但不易破碎。变温压差膨化干燥的样品脆度最大,这可能内部膨化作用,使孔道扩充,质地更加酥脆^[31]。从图4微观结构可以看出,真空干燥的样品结构紧密,空隙较小,因此,造成了其产品高硬度、低脆度的质构特性。

2.2 不同干燥方式对山药脆片营养成分的影响

如表3所示,真空冷冻干燥对淀粉、还原糖、蛋

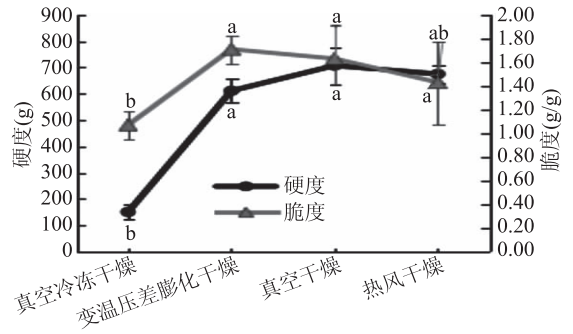


图3 不同干燥方式对山药脆片硬度和脆度的影响
Fig.3 Effect of different drying methods on the hardness and brittleness of Chinese yam chips

白质的保留效果显著优于其他三种 ($p < 0.05$),这可以说明,70 °C 的温度足以使淀粉中的可溶性糖类和可溶性蛋白受热分解,形成水蒸气和氨气一起挥发出去,其中葡萄糖又是美拉德反应的主要物质之一,不稳定的高温和较长时间的处理都会加剧糖类的损失^[32],但对可溶性固形物保持效果最好的是变温压差膨化干燥;真空干燥对总酚和 V_c 的保留效果均最差,说明真空干燥对山药脆片中总酚和 V_c 破坏较大。从营养成分上看,真空冷冻干燥与变温压差膨化干燥优于真空干燥和热风干燥。

2.3 不同干燥方式对山药脆片微观结构的影响

从图4中可以看出真空冷冻干燥和变温压差膨化干燥的山药脆片结构较为相似,比较完整,真空冷冻干燥更均匀一些,有明显蜂窝状空隙。真空干燥和热风干燥产品均干瘪收缩,导致细胞收缩,可以观察到淀粉粒轮廓。真空干燥产品外部虽由真空产生一定空隙,但空隙中有明显粘连,凹凸不平。热风干燥过程中,细胞受压力收缩形成球状结构,有明显粘连,造成了皱缩和坍塌^[33]。

2.4 不同干燥方式山药脆片的品质感官评价

真空冷冻干燥产品颜色偏白,口感偏软,无嚼劲;变温压差膨化产品颜色微黄,口感适中,有酥脆感;真空干燥和热风干燥产品颜色偏黄,口感较硬,脆性较差。如表4所示,山药脆片的感官评价结果由高到低排序是:变温压差膨化干燥 > 真空干燥 > 真空冷冻干燥 > 热风干燥。

2.5 不同干燥方式山药脆片品质影响的综合评价

为了避免等权分配的不客观性,消除各评价指标的量纲差异,采用了变异系数法将13个评价指标

表3 不同干燥方式对山药脆片营养成分的影响

Table 3 Effects of different drying methods on the nutritional components of Chinese yam chips

干燥方式	真空冷冻干燥	变温压差膨化干燥	真空干燥	热风干燥
淀粉(g/100 g)	51.80 ± 1.40 ^a	47.20 ± 0.95 ^b	45.70 ± 1.23 ^b	47.20 ± 0.96 ^b
可溶性固形物(g/100 g)	11.33 ± 0.58 ^b	13.00 ± 1.00 ^a	10.67 ± 0.58 ^b	11.67 ± 0.58 ^b
水分(g/100 g)	7.33 ± 0.57 ^a	6.04 ± 1.53 ^{bc}	7.18 ± 0.82 ^{ab}	6.74 ± 0.18 ^b
蛋白质(g/100 g)	8.31 ± 0.44 ^a	7.49 ± 0.16 ^b	6.90 ± 0.13 ^c	7.38 ± 0.10 ^b
还原糖(g/100 g)	2.15 ± 0.09 ^a	1.38 ± 0.15 ^b	1.22 ± 0.05 ^b	1.32 ± 0.07 ^b
总酚(g/100 g)	0.51 ± 0.05 ^a	0.44 ± 0.02 ^a	0.35 ± 0.02 ^b	0.44 ± 0.04 ^a
V _c (mg/100 g)	3.94 ± 0.20 ^a	3.94 ± 0.08 ^a	2.60 ± 0.14 ^b	2.92 ± 0.25 ^b

表4 不同干燥方式对山药脆片的品质感官评价

Table 4 Sensory evaluation of Chinese yam chips dried by different methods

干燥方式	真空冷冻干燥	变温压差膨化干燥	真空干燥	热风干燥
感官评价	75.00 ± 2.00 ^b	82.00 ± 1.00 ^a	77.00 ± 0.00 ^b	72.00 ± 1.00 ^c

表5 各项指标权重分析

Table 5 Weights of various indicators for comprehensive evaluation of Chinese yam chips

评价指标	ΔE	体积比	密度	硬度	脆度	淀粉	可溶性固形物	水分	蛋白质	还原糖	总酚	V _c	感官评价
均值	9.138	0.480	0.300	536.165	1.460	47.975	11.668	6.823	7.520	1.518	0.435	3.350	76.500
标准差	1.481	0.296	0.098	260.077	0.285	2.646	0.981	0.501	0.586	0.427	0.066	0.694	4.203
变异系数	0.162	0.618	0.328	0.485	0.195	0.055	0.084	0.073	0.078	0.281	0.151	0.207	0.055
权重	0.058	0.223	0.118	0.175	0.071	0.020	0.030	0.026	0.028	0.101	0.054	0.075	0.020

表6 数据无量纲化结果

Table 6 Results of dimensionless method

T _n (i)	ΔE	体积比	密度	硬度	脆度	淀粉	可溶性固形物	水分	蛋白质	还原糖	总酚	V _c	感官评价
T ₀ (i)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T ₁ (i)	1.000	1.000	1.000	0.213	0.626	1.000	0.872	1.214	1.000	1.000	1.000	1.000	0.939
T ₂ (i)	1.085	0.797	1.500	0.864	1.000	0.911	1.000	1.000	0.901	0.642	0.863	1.000	1.000
T ₃ (i)	1.118	0.494	1.889	1.000	0.953	0.882	0.821	1.189	0.830	0.567	0.686	0.660	0.915
T ₄ (i)	1.430	0.139	2.278	0.955	0.836	0.911	0.898	1.116	0.888	0.614	0.863	0.741	0.878

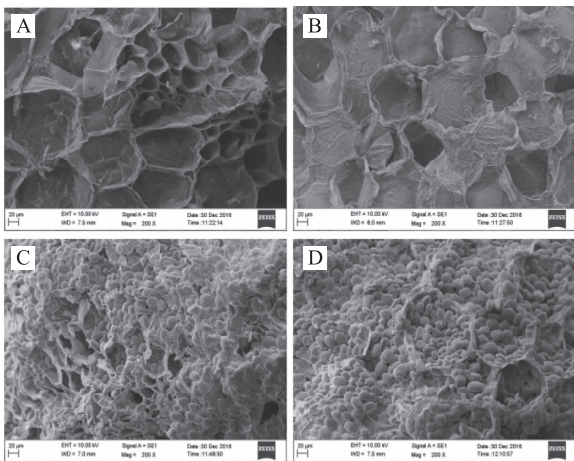


图4 山药脆片扫描电镜结果(×200)

Fig.4 SEM of Chinese yam chips(×200)

注:(A)真空冷冻干燥,(B)变温压差膨化干燥,
(C)真空干燥,(D)热风干燥的。

根据变异系数法确定不同权重,如表5所示。

然后,用灰色关联法根据公式(6)进行无量纲化:

$$T_n(i) = \frac{X_n(i)}{X_0(i)} \quad \text{式(6)}$$

式中,T_n(i)表示X_n的第i项无量纲化值;X_n(i)表示X_n的第i项测量值;X₀(i)表示X₀的第i项标准值。

再根据公式(7),计算出参考数列X₀与比较序列的绝对差值:

$$\Delta_n(i) = |T_n(i) - T_0(i)| \quad \text{式(7)}$$

式中, $\Delta_n(i)$ 表示参考数列X₀第i项无量纲化值与比较序列X_n第i项无量纲化值的绝对差值;T_n(i)

表示X_n的第i项无量纲化值;T₀(i)表示X₀的第i项无量纲化值。

如表7所示,参考序列与比较序列间的绝对差值结果显示: $\Delta_n(i) \max = 3.695$, $\Delta_n(i) \min = 0.000$ 。按公式(8)计算关联系数:

$$\lambda_n(i) = \frac{\Delta_n(i) \min + \delta \Delta_n(i) \max}{\Delta_n(i) + \delta \Delta_n(i) \max} \quad \text{式(8)}$$

式中, $\lambda_n(i)$ 表示X_n中的第i项关联系数; $\Delta_n(i) \min$ 和 $\Delta_n(i) \max$ 分别表示 $\Delta_n(i)$ 在X_n中的最小值和最大值; δ 表示分辨系数,按常规取值0.5。

表8和表9表明,综合关联度由大到小排序是:变温压差膨化干燥 > 真空冷冻干燥 > 真空干燥 > 热风干燥。

3 结论

山药脆片作为休闲食品,口味和口感成为了评价其品质的关键,根据质构特性及感官评价的研究刚好能反映出这两个重要指标。如果能在口味和口感俱佳的基础上具有较高的营养价值,则更能提高产品的品质。食品的外观会影响人的食欲,较好的外观也会增加产品受欢迎度。通过对真空冷冻干燥、变温压差膨化干燥、真空干燥、热风干燥产品的色差变化、体积比等指标的测定,能精确的反映出山药脆片的外型特征的变化情况,结果表明真空冷冻干燥对外型的保持效果最好。

通过微观结构及硬度、脆度值直观的反映了山药脆片的口感。变温压差膨化和真空冷冻干燥的山药脆片微观结构保持的相对完整,真空干燥和热风干燥的山药脆片微观结构破坏较大,会影响口感。

通过干燥方式对营养成分的影响可以发现,真空冷冻干燥对山药脆片营养成分保留较好,淀粉、还

表7 参考序列与比较序列间的绝对差值[$\Delta_n(i)$]

Table 7 Absolute value[$\Delta_n(i)$] between the reference sequence and the comparative sequence

$\Delta_n(i)$	ΔE	体积比	密度	硬度	脆度	淀粉	可溶性固形物	水分	蛋白质	还原糖	总酚	V _c	感官评价
$\Delta_1(i)$	0.000	0.000	0.000	0.787	0.374	0.000	0.128	0.214	0.000	0.000	0.000	0.000	0.061
$\Delta_2(i)$	0.085	0.203	0.500	0.136	0.000	0.089	0.000	0.000	0.099	0.358	0.137	0.000	0.000
$\Delta_3(i)$	0.118	0.506	0.889	0.000	0.047	0.118	0.179	0.189	0.170	0.433	0.314	0.340	0.085
$\Delta_4(i)$	0.430	0.861	1.278	0.045	0.164	0.089	0.102	0.116	0.112	0.386	0.137	0.259	0.122

表8 参考序列与比较序列的灰色关联系数

Table 8 Gray relational coefficient and grey correlation degree between reference sequence and comparative sequence

$\lambda_n(i)$	ΔE	体积比	密度	硬度	脆度	淀粉	可溶性固形物	水分	蛋白质	还原糖	总酚	V _c	感官评价
$\lambda_1(i)$	1.000	1.000	1.000	0.334	0.832	1.000	0.935	0.896	1.000	1.000	1.000	1.000	0.968
$\lambda_2(i)$	0.956	0.901	0.787	0.743	1.000	0.954	1.000	1.000	0.949	0.838	0.931	1.000	1.000
$\lambda_3(i)$	0.940	0.785	0.675	1.000	0.975	0.940	0.912	0.907	0.916	0.810	0.855	0.845	0.956
$\lambda_4(i)$	0.811	0.681	0.591	0.897	0.918	0.954	0.948	0.941	0.943	0.827	0.931	0.877	0.938

表9 加权关联度(r_n)计算结果

Table 9 Results of weighted correlation(r_n)

干燥方式(X_n)	真空冷冻干燥(X_1)	变温压差膨化干燥(X_2)	真空干燥(X_3)	热风干燥(X_4)
加权关联度(r_n)	0.865	0.882	0.859	0.808
关联度排序	2	1	3	4

原糖、蛋白质的保留效果显著($p < 0.05$) 优于其他三种,但是其产品硬度、脆度较差影响口感,并且真空冷冻干燥由于处理时间较长,需耗费大量能源;变温压差膨化干燥处理时间较短,耗能低;综合多方面考虑,得出结论干燥方式对山药脆片的品质会造成不同程度影响,变温压差膨化干燥加工非油炸山药脆片较为适宜。

参考文献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993, 103.
 [2] Chen Y F, Zhu Q, Wu S. Preparation of oligosaccharides from Chinese yam and their antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1107.
 [3] Ju Y, Xue Y, Huang J, et al. Antioxidant Chinese yam polysaccharides and its pro-proliferative effect on endometrial epithelial cells [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 66(5): 81-85.
 [4] Chen X, Lu J, Li X, et al. Effect of blanching and drying temperatures on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant activities of yam flours[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 303-310.
 [5] Kumar C, Karim M A, Joardder M U H. Intermittent drying of food products: A critical review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121(1): 48-57.
 [6] Karunasena H C P, Brown R J, Gu Y T, et al. Application of meshfree methods to numerically simulate microscale deformations of different plant food materials during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 209-226.
 [7] Law C L, Chen H H H, Mujumdar A S. Food technologies: Drying[J]. Encyclopedia of Food Safety, 2014: 156-167.

[8] B Ortiz-garcia-carrasco, E Yanez-mota, F M Pacheco-aguirre, et al. Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 138-147.
 [9] Garcia-alvarado M A, Pacheco-aguirre F M, Ruiz-lopez I I. Analytical solution of simultaneous heat and mass transfer equations during food drying [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 142(6): 39-45.
 [10] Song X, Hu H, Zhang B. Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2016.
 [11] Mendonça K S D, Corrêa J L G, Junqueira J R D J, et al. Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) slices [J]. Food Chemistry, 2017, 224: 212-218.
 [12] Wojdyło A, Figiel A, Legua P, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method[J]. Food Chemistry, 2016, 207: 170-179.
 [13] Yi J, Zhou L, Bi J, et al. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 70: 271-279.
 [14] Vega-galvez A, Ah-hen K, Chacana M, 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, 2012, 132(1): 51-9.

- [15] 滕建文, 韦保耀, 董会龙, 等. 原料成熟度对番木瓜冻干脆片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(17): 78-81.
- [16] 刘成海, 霍俊伟, 郑先哲, 等. 应用微波真空方法膨化蓝靛果脆片的研究[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(11): 116-120.
- [17] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.9-2016 食品中淀粉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 黄雪松. 用手持测糖仪估计山楂原料的含糖量[J]. 食品科学, 1994, 15(8): 46-47.
- [19] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.7-2016 食品中还原糖的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [22] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8313-2008 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.86-2016 食品中 V_c 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

(上接第5页)

声提取时间 30.6 min, 液固比 $11.5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 提取温度 $64.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 提取液 pH8.4, 皂苷得率最大值为 3.28%。

根据实际操作要求即超声提取时间 31 min, 液固比 $11.5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 提取温度 $65 \text{ }^\circ\text{C}$, 提取液 pH8.4, 进行 3 组平行试验, 在最佳提取条件下分别测得三组杏鲍菇皂苷得率, 取平均值得 3.19%, 与理论最大值 3.28% 极为接近, 说明优化方案具有可行性。

3 结论

本试验在单因素的基础上, 运用响应面设计优化原理, 确定杏鲍菇皂苷最佳提取工艺条件为: 超声提取时间 31 min, 液固比 $11.5 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 提取温度 $65 \text{ }^\circ\text{C}$, 提取液 pH8.4, 此时杏鲍菇皂苷得率为 3.19%, 且与预测值较为接近。以超声提取时间(A)、液固比(B)、提取温度(C)和提取液 pH(D)为自变量, 杏鲍菇皂苷得率(Y)为因变量建立二次回归方程。说明了试验可行性的同时, 也为杏鲍菇皂苷的工业化制备提供了理论依据。

参考文献

- [1] 郭美英. 珍稀食用菌杏鲍菇生物学特性的研究[J]. 福建农业学报, 1998, 13(3): 44-49.
- [2] Carbonero E R, Gracher A H P, Smiderle F R, et al. A β -glucan from the fruit bodies of edible mushrooms *Pleurotus Eryngii* and *Pleurotus ostreatus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 66

- [24] 任广跃, 刘亚男, 乔小全, 等. 基于变异系数权重法对怀山药干燥全粉品质的评价[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 53-59.
- [25] 何承刚, 冯彦, 杨燕平. 西双版纳林地景观演变过程及其驱动力分析[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(5): 12-17.
- [26] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 100-106.
- [27] 刘文静, 潘葳. 福建省花生营养品质评价及其食用品质灰色关联法分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(22): 88-92.
- [28] 李慧, 毛胜利, 胡鸿, 等. 不同甜椒品种鲜切加工适宜性评价[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 136-139.
- [29] 彭丹丹, 黄晓兵, 静玮, 等. 干燥方式对高良姜片理化特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 165-170.
- [30] Chen X, Xia L, Mao X, et al. Effects of drying processes on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant properties of yam flours [J]. Food Chemistry, 2017, 224: 224.
- [31] 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.
- [32] 王海, 高月, 王颖, 等. 适宜干燥方法提高干制枸杞品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 271-276.
- [33] Panyawong S, Devahastin S. Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 151-161.

(2): 252-257.

- [3] Dubos t N J, O B, Beelman R B. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 727-735.
- [4] 陈士瑜, 陈海英. 蕈菌医方集成[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社. 2000, 429-430.
- [5] 毛迪锐, 姜贵全, 张卓睿. 文冠果壳总皂苷超声波辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 170-174.
- [6] 孙琼, 张直峰, 李月梅. 响应面法优化超声辅助提取杏鲍菇黄酮类化合物工艺研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 264-268.
- [7] 宁波, 于丽颖, 王晓林, 等. 响应曲面法优化超声波提取玉竹总皂苷的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 234-237.
- [8] 董妙音, 李万武, 孔宝, 等. 响应面法优化超声波辅助提取文冠果种皮总皂苷的工艺[J]. 中国油脂, 2014, 39(11): 74-78.
- [9] 曲正义, 赵景辉, 刘宏群, 等. 比色法测定保鲜人参中人参总皂苷的含量[J]. 人参研究, 2012, 24(1): 13-14.
- [10] Box G E P, Hunter W G. Statistics for experiments an introduction to design, data analysis and model building [M]. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1978, 306-336.