淮山片真空冷冻干燥工艺的优化

马丽娜, 阮传清, 周先治, 陈 阳*

(福建省农业科学院农业生物资源研究所, 福州 350001)

摘 要: 目的 改进淮山片真空冷冻干燥工艺的参数。**方法** 以鲜切淮山片为材料, 采用电阻法测量淮山的共晶点和共熔点温度。通过汁液流失率、复原率、中心温度和含水量检测, 研究预冻和升华干燥工艺。通过正交试验和复原率、口感测定, 确定淮山鲜切片的浸护处理方案。**结果** 鲜切片在 95 ℃水浴锅中烫漂 60 s 后, 采用"NaCl 5%+麦芽糊精 10%+葡萄糖 15%"浸护液浸泡 30 min, 其真空冷冻干燥产品复原率可达 83.27%, 复水后口感较好, 产品在整个加工过程中未变色。厚度为 5~6 mm 的淮山鲜切片共晶点为-20 ℃, 共熔点为-18 ℃, 淮山片升华干燥时间耗时 16 h。**结论** 本试验建立的方法得到的淮山片复原率高, 口感好, 为淮山片的加工工艺提供技术支持。

关键词: 淮山; 真空冷冻干燥; 共晶点; 共熔点; 口感

Optimization of the vacuum freeze drying process of Chinese yam slices

MA Li-Na, RUAN Chuan-Qing, ZHOU Xian-Zhi, CHEN Yang*

(*Agricultural Bio-resources Research Institute*, *Fujian Academy of Agricultural Sciences*, *Fuzhou* 350001, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimum technology parameters of vacuum freeze drying of Chinese yam slices. **Methods** Fresh cut yam slices were used as materials, the eutectic point and co-melting point of the yam slices were determined by electric resistivity method. Through determination of juice leakage, recovery rate, center temperature and moisture content, the pre freezing and sublimation drying process were studied. Through the orthogonal experiment and determination of the recovery rate and taste as indexes, fresh yam slices soaking treatment was established. **Results** The fresh slices were heated in 95 ℃ water bath for 60 s, then soaked with '5% NaCl+10% maltodextrin+15% glucose' for 30 min. Under these conditions, the recovery rate of vacuum freeze drying products was up to 83.27%. After rehydration, the taste was better, and the yam slices did not change color during the whole process. The eutectic points of 5~6 mm yam slices was -20 ℃, and the co-melting point was -18 ℃. It took 16 h to complete sublimation drying of yam slices. **Conclusion** The Chinese yam slices prepared by the established method have high recovery rate and good taste, which provides technical support for the processing of Chinese yam slices.

KEY WORDS: Chinese yam slices; vacuum freeze drying; eutectic point; co-melting point; taste

基金项目: 福建省属公益类科研项目(2015R1018-6)、福建省区域发展项目(2016N3003)

Fund: Supported by Commonweal Project of Fujian Province (2015R1018-6) and Regional Development Project of Fujian Province (2016N3003)

***通讯作者:** 陈阳, 副研究员, 主要从事蔬菜新品种选育与栽培技术研究。E-mail: cyang2@163.com

***Corresponding author:** CHEN Yang, Associate Professor, Agricultural Bio-resources Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350001, China. E-mail: E-mail:cyang2@163.com

1　引　言

淮山(*Dioscorea opposita*)又名淮山药, 是山药的成品名。为薯蓣科多年生草本植物薯蓣的块根。我国每年种植收获的淮山的产量在几千万吨以上, 采集后的淮山块根水分含量高导致其易霉变腐烂, 大量的淮山资源被浪费, 淮山干制处理是一种有效的解决途径[1]。Hsu 等[2]比较了冷冻干燥、热风干燥和鼓风干燥 3 种工艺对山药粉的化学成分、物理性质和抗氧化活性的影响, 发现 3 种工艺对化学成分和物理性质的影响无显著差异, 而只有冷冻干燥可最大限度地保留抗氧化活性成分, 并达到很低的水分含量使得产品具有较长的保质期[2]。冷冻干燥是目前最为先进的食品干燥方法, 其冻结后升华脱水的方式可以最大限度地保持食品原料的营养成分和外观品质[3]。

目前, 针对山药片的相关研究报道不多, 而且采用的加热干燥方式不同。徐成海等[4]较早地将真空冷冻干燥技术应用于山药片加工, 但未研究如何防止山药片的褐变。陈红兵等[5]研究了山药片的冻干工艺, 发现 2 mm 厚的山药片经 80 ℃烫漂、预冻和升华干燥, 产品复水性好, 不易褐变。Lin 等[6]将远红外干燥技术应用于山药片的真空冷冻干燥处理中, 确定了远红外加热器的距离、加热温度、切片厚度等对加工时间和产品品质的影响。任广跃等[7]采用正交试验研究了山药片厚度、真空度、微波功率对复原率、多糖得率及色泽明度的影响。然而, 人们对山药片真空冷冻干燥的预处理、冻结和真空干燥等环节尚未进行系统的研究。

高温烫漂可以很好地防止山药褐变[5], 但会导致食材细胞壁收缩和细胞膜破裂, 还造成粘合细胞的果胶聚糖降解, 最终使果蔬质地软化[8]。通常使用麦芽糊精等结构支撑剂处理烫漂后的果蔬, 麦芽糊精渗进果蔬组织和细胞后, 在干制时可阻止细胞快速收缩, 防止塌陷; 复水时, 因其亲水性强, 促进水分对冻干品的渗透, 提高复原率[9]。在预处理后的预冻环节, 预冻温度影响能耗和干制品品质, 一般是低于物料共晶点 5~10 ℃[10]。物料共熔点则可为预冻后的物料进行升华干燥提供参考[10]。为进一步提高淮山药的真空冷冻干燥工艺, 本实验通过正交试验和干品复原率、口感的测定, 确定淮山片在真空冷冻干燥预处理阶段的浸护液配方。另外, 测定淮山药片的共晶点和共熔点, 观察不同预冻工艺和升华干燥工艺对冻干品的影响。

2　材料与方法

2.1　材料与设备

芹峰淮山, 2016 年 11 月从福建省泉州市德化县英山珍贵农民合作社淮山基地现场挖取, 选择粗细均匀、无损伤且肉质洁白的用于试验。

NaCl(食品级, 福建省福州盐业有限责任公司); 葡萄糖(食品级, 南京忠来果品食杂有限公司); 麦芽糊精(食品级, 河南兴旺生物科技有限公司生产)。

GZ-50 型真空冷冻干燥设备(沈阳北冰洋食品工程有限公司); SL-728 型蓉城电子秤; HH-4 型数显恒温水浴锅(江苏省金坛市友联仪器研究所); MASTECH MY-64 型数字式万用表(深圳华谊仪表有限公司); TES-1306 数字式温度计(台湾泰仕电子有限公司); MDF-U74V 型松下超低温冰箱(日本松下健康医疗器械株式会社)。

2.2　真空冷冻干燥工艺流程

原料选择-清洗-去皮-切片-清水烫漂-冰水淋洗-浸护液处理-冰水淋洗-沥干-预冻-摆盘-升华干燥-解板干燥-干品检测。

2.3　浸护液正交试验

试验设计: 在预试验的基础上, 以 NaCl、麦芽糊精和葡萄糖为因素, 设置 3 种水平(表 1), 按 $L_9(3^4)$正交试验表配制 9 种浸护液。

表 1　正交试验因素水平表
Table 1　Factors and levels of orthogonal design

水平	因素		
	A/NaCl (%)	*B*/麦芽糊精(%)	*C*/葡萄糖(%)
1	5	10	10
2	0	0	0
3	3	15	15

淮山片浸护处理: 将洗净的淮山用不锈钢刀去皮, 切成厚度为 5~6 mm 的淮山片, 准确称取新鲜淮山片样品, 先在 95 ℃水浴锅中烫漂 60 s, 然后浸泡在 30 ℃浸护液中 30 min, 迅速转入冷水中, 之后淋洗, 沥干表面水分。将浸护处理的山药片分别进行冷冻干燥及复水性测定。

真空冷冻干燥: 将浸护处理、沥干的淮山片放在超低温冰-45 ℃冻结 3 h, 即预冻; 再摆盘进行真空冻干, 真空度操持在 20~40 Pa 范围, -25 ℃保持 2 h; -5 ℃保持 4 h; 5 ℃保持 4 h。

淮山片干制品复原率测定: 准确称取真空冷冻干燥后所得的淮山片测定复水性能。将称取的样品快速放在盛有 60 ℃、100 mL 蒸馏水的三角瓶中, 然后 60 ℃水浴 2 h, 水浴后在室温下沥干表面水分, 并称量质量, 按下式计算复原率。每个实验做 3 个平行, 以平均值计算。

$$K_f = \frac{m_x}{m_f} \times 100\%$$

式中: K_f为复原率, %; m_x为复水后沥干的质量, g; m_f为干燥前新鲜淮山片质量, g。

口感评价: 参考王晓青等[11]的方法, 将新鲜淮山片和 9 种处理复水沥干后的产品编号为 1~10。以新鲜淮山片的口感(松软程度及味道)为满分 10 分, 将淮山片冻干品复水后的样品口感分成 5 级: 1 级 0~2 分(松软、明显粘重), 2 级 3~4 分(松软、稍粘重), 3 级 5~6 分(绵软、轻微粘重), 4 级 7~8 分(稍绵软、无杂味), 5 级 9~10 分(绵软、无杂味, 与新鲜淮山片接近)。请 10 名评判员首先观察、试食新鲜样品, 之后开始品偿冻干品复水沥干后的样品口感, 给每一冻干品打分。

2.4 预冻工艺研究

2.4.1 共晶点测定

参考曹峰等[12]测定共晶点方法, 采用万用表作为电阻计, 热电偶作为测温元件, 在超低温冰箱中冷冻完成。将万用表的 2 个电极头从淮山片的两侧平行插入到中心位置, 再将热电偶温度计的探头插入到山药片中, 与电极头接近而不接触。之后放置在温度为-45 ℃的超低温冰箱中, 进行冻结, 记录电阻值和温度变化。进行 3 次平行实验, 取平均值。

2.4.2 预冻时间的测定

采用超低温箱作预冻设备。预冻温度一般设定低于共晶点 5~10 ℃, 本文测得的共晶点为 20 ℃, 所以预冻温度设为 30 ℃。冻结时间间隔 0.5 h。最长冻结 3 h。比较经不同时间冻结的山药片汁液流失率和复原率。

汁液流失率检测方法: 将预冻后的山药片置于常温下解冻 1 h, 滤纸吸去表面液体, 计算流失率:

$$M = \frac{m_a - m_b}{m_a}$$

M—汁液流失率, %; m_a—冻结前山药片的质量, g; m_b—山药片预冻后再解冻的质量, g。

冻干后的复原率检测: 将预冻后的山药片摆盘进行真空冻干, 真空度操持在 20~40 Pa 范围, -25 ℃保持 2 h; -5 ℃保持 4 h; 5 ℃保持 4 h。之后在 20 ℃保持 2 h, 在置于 30 ℃的水中复水 30 min, 计算复原率(K_f):

$$K_f = \frac{m_x}{m_f} \times 100\%$$

m_x—复水后沥干质量, g; m_f—干燥前新鲜山药片质量, g。

2.5 升华干燥工艺研究

2.5.1 共熔点测定

参考曹峰等[12]测定共熔点方法, 采用万用表作为电阻计, 热电偶作为测温元件, 在超低温冰箱中冷冻完成。将已在超低温冰箱中完全冻结的淮山片转移到室温中(约 20 ℃), 并且记录电阻值和温度的变化, 进行 3 次平行实验, 取平均值。

2.5.2 升华干燥工艺的观察

对预冻好的山药片进行升华干燥时, 加热板温度应尽量设置高些, 但要保证物料不超过共熔点。通过测定山药片中心温度的变化、冻干后的复原率、色泽确定加热板温度。

山药片中心温度测定上: 准确称取山药片 500 g, 平铺于托盘上, 插入热电偶温度计的探针, 预冻。再将探针连接到热电偶温度计上, 一起放入到冻干机中, 将冻干机加热板温度设为共溶点温度进行升华干燥, 当山药片含水量降为 10%, 加热板温度调为 25 ℃解析干燥 4 h。实时记录山药片在冻干过程的温度、含水量变化, 并评定冻干品的复原率和色泽。

冻干过程中含水量的变化: 在山药片升华干燥过程中, 每隔 2 h 取样, 测定含水量, 当含水量降到 10%时, 可认为升华干燥结速。

冻干品复原率: 同 2.4.2 中复原率测定方法。

2.3 数据处理

采用 DPS 数据处理系统[13]分析、检验正交试验结果。

3 结果与分析

3.1 浸护液正交试验

按正交表 $L_9(3^4)$配制的 9 种浸护液处理烫漂后的淮山片, 其冻干片颜色加工过程中, 均未变色。各组合的淮山片冻干片复原率 65.7%~85.5%(表 2)。分析结果表明, 因素 A(NaCl)含量为 5%(即第 1 水平)时较好; 因素 B(麦芽糊精)含量为 10%(第 1 水平)或者 15%(第 2 水平)时, 两者组合的复原率无显著差异, 但都比不添加时好, 即比第二水平好; 因素 C(葡萄糖)含量为 15%即第 3 水平, 复原率较好。从表 2 可以看出, 产品复原率较好的浸护液理论组合是: NaCl 5%, 麦芽糊精 10%, 葡萄糖 15%, 或者 NaCl 5%, 麦芽糊精 15%, 葡萄糖 15%。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

序号	*A*/NaCl (含量)	*B*/麦芽糊精 (含量)	*C*/葡萄糖 (含量)	复原率(%)
1	1(5%)	1(10%)	1(10%)	81.7^{a}
2	1(5%)	2(0%)	2(0%)	71.6^{bc}
3	1(5%)	3(15%)	3(15%)	85.5^{a}
4	2(0%)	1(10%)	2(0%)	65.7^{c}
5	2(0%)	2(0%)	3(15%)	70.6^{bc}
6	2(0%)	3(15%)	1(10%)	72.9^{b}
7	3(3%)	1(10%)	3(15%)	81.6^{a}
8	3(3%)	2(0%)	1(10%)	73.8^{b}
9	3(3%)	3(15%)	2(0%)	72.2^{b}
k_1	79.60^{a}	76.33^{a}	76.13^{b}	
k_2	69.73^{c}	72.00^{b}	69.83^{c}	
k_3	75.87^{b}	76.87^{a}	79.23^{a}	
R	9.87	4.87	9.40	

注: 同列不同小写字母代表具有显著性差异, $P < 0.05$。

各组的淮山片冻干片口感如表 4 所示。在所试验的 3 个水平中, 浸护液中 *A* 因素(NaCl)为第 1 和第 3 水平的产品, 其口感相似, 且显著好于第 2 水平的产品。*B* 因素(麦芽糊精含量)为第 1 和第 2 水平的产品, 口感分值相似, 显著好于第 3 水平。浸护液中 *C* 因素(葡萄糖含量)为第 1 水平的, 口感 分值显著高于第 3 水平; 而第 3 水平又显著高于第 2 水平。就口感考虑, 本试验中浸护液的最佳配方是: *A* 因素(NaCl)3%(第 1 水平)或 5%(第 3 水平), *B* 因素(麦芽糊精) 10%(第 1 水平)或 0%(第 2 水平), *C* 因素(葡萄糖)10%(第 1 水平)。

表 3　正交试验方差分析表

Table 3　Results of variance analysis of orthogonal experiment

因素	偏方平方和	自由度	均方	*F* 值	*P* 值
NaCl	148.91	2	74.45	333.37	0.00299
麦芽糊精	42.75	2	21.37	95.70	0.01034
葡萄糖	137.66	2	68.83	308.19	0.00323
误差	0.45	2	0.22		
总和	329.76				

表 4　正交试验结果

Table 4　Results of orthogonal experiment

序号	*A*/NaCl (含量)	*B*/麦芽糊精 (含量)	*C*/葡萄糖 (含量)	口感指数
1	1(5%)	1(10%)	1(10%)	8.6^{a}
2	1(5%)	2(0%)	2(0%)	6.3^{b}
3	1(5%)	3(15%)	3(15%)	5.6^{b}
4	2(0%)	1(10%)	2(0%)	5.4^{b}
5	2(0%)	2(0%)	3(15%)	6.2^{b}
6	2(0%)	3(15%)	1(10%)	5.6^{b}
7	3(3%)	1(10%)	3(15%)	8.2^{a}
8	3(3%)	2(0%)	1(10%)	8.7^{a}
9	3(3%)	3(15%)	2(0%)	5.2^{b}
k_1	6.8^{a}	7.4^{a}	7.6^{a}	
k_2	5.7^{b}	7.1^{a}	5.6^{c}	
k_3	7.4^{a}	5.5^{b}	6.7^{b}	
R	1.6	1.9	2.0	

注: 不同小写字母代表具有显著性差异, $P < 0.05$。

综合考虑淮山鲜切片冻干品的复原性和口感, 设置 6 个浸护液配方, 进行复原性和口感的再次评价。结果如表 6 所示, 虽然浸护处理后冻干品复原性最好的是浸护液 2, 其次是浸护液 1。但产品复原后口感较好的是浸护液 1。所以选浸护液 1, 即配方 NaCl 5%, 麦芽糊精 10%和葡萄糖 15%的溶液, 处理淮山鲜切片, 再进行真空冷冻干燥, 所获得的干品具有较高的复原率和较好的口感。

表 5　正交试验方差分析表

Table 5　Results of variance analysis of orthogonal experiment

因素	偏方平方和	自由度	均方	*F* 值	*P* 值
A/NaCl (%)	4.16222	2	2.08111	144.0769	0.00689
B/麦芽糊精(%)	6.40889	2	3.20444	221.8462	0.00449
C/葡萄糖(%)	6.00222	2	3.00111	207.7692	0.00479
误差	0.02889	2	0.01444		
总和	16.60222				

表 6　正交试验中各因素水平最佳组合的筛选

Table 6　Screening of optimum combination factors in orthogonal experiment

序号	*A*/NaCl (%)	*B*/麦芽糊精(%)	*C*/葡萄糖(%)	复原率(%)	口感
1	5	10	15	83.27 ± 0.5364^{b}	7.81 ± 0.0660^{b}
2	5	15	15	87.50 ± 0.5131^{a}	4.90 ± 0.0997^{d}
3	3	10	10	74.17 ± 0.6119^{d}	7.59 ± 0.0938^{b}
4	5	10	10	79.53 ± 0.4096^{c}	8.55 ± 0.0289^{a}
5	3	0	10	66.30 ± 0.5507^{f}	6.23 ± 0.0333^{c}
6	5	0	10	69.30 ± 0.4619^{e}	6.33 ± 0.0333^{c}

注: 同一列不同小写字母代表具有显著性差异, $P < 0.05$。

3.2 预冻工艺

3.2.1 共晶点

淮山片降温电阻变化曲线如图 1，可将曲线分为 3 个阶段：在-16~0 ℃阶段内，是晶核形成阶段，电阻值基本不变，样品中还含有大量的水分；在-18~-16 ℃阶段内，是冰晶成长阶段，电阻值开始有明显的变化，样品中的水分开始冻结；在-22~-18 ℃阶段内，是共晶区阶段，电阻值在此阶段骤增，此为共晶点范围，共晶点为-20 ℃；当温度低于-34 ℃时，电阻值基本不发生变化。

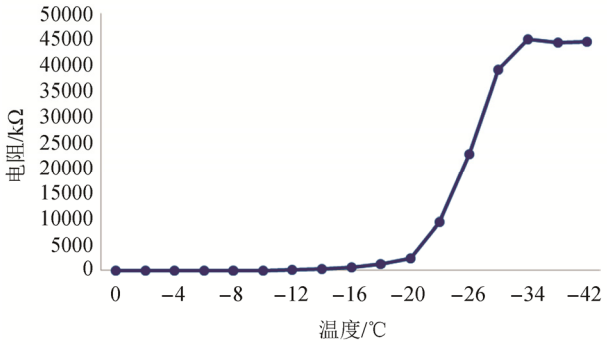


图 1 淮山片降温电阻变化曲线

Fig. 1 Curve of resistance changed with falling temperature

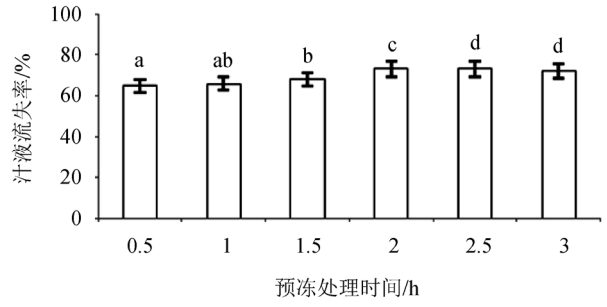
3.2.2 预冻时间

当预冻温度设为 30 ℃时，淮山片预冻 2.5 h 后的汁液流失率显著高于预冻 2 h；而预冻 2 h 的汁液流失率显著高于预冻 1.5 h(图 2)。在复原率方面，预冻 2 h 时后的淮山片复原率显著高于预冻时间少于或等于 1.5 h 的淮山片冻干品(图 3)。综合考虑汁液流失率和复原率，预冻 2 h 较好。

3.3 升华干燥的加热板温度

3.3.1 共熔点

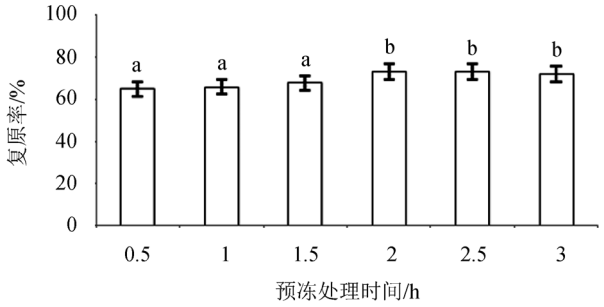
淮山片共熔点测定结果如图 4，在-38~-20 ℃温度范围内，电阻值发生骤减。当淮山片温度上升至-18 ℃以后，电阻值趋于稳定，故取-18 ℃为共熔点。



注：不同小写字母代表具有显著性差异，$P < 0.05$。

图 2 淮山片在-30 ℃预冻不同时间后的汁液流失率(n=3)

Fig. 2 Juice leakage of yam slices after being frozen for different time at -30 ℃ (n=3)



注：不同小写字母代表具有显著性差异，$P < 0.05$。

图 3 淮山片在-30 ℃预冻不同时间后的冻干品复原率(n=3)

Fig. 3 Recovery rate of frozen-dried yam slices after being frozen for different time at -30 ℃ (n=3)

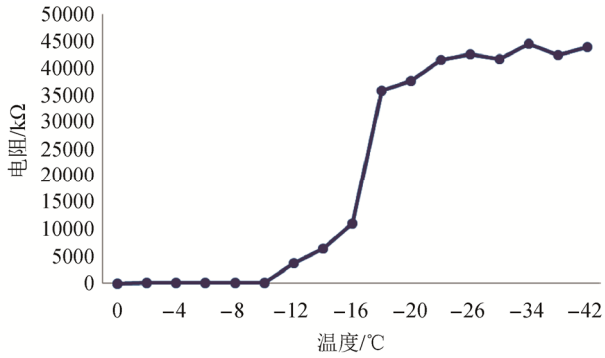


图 4 淮山片升温电阻变化曲线

Fig. 4 Curve of resistance changed with increasing temperature

3.3.2 升华干燥工艺的观察

真空干燥条件下，当加热板温度不超过淮山片共熔点-18 ℃时，需耗时 16 h 才将淮山片水含量降至 9.6%，完成淮山片的升华干燥过程。此后在 25 ℃烘干 4 h，可将淮山片含水量降至 4%以下。冻干品色泽洁白，复原率达 84%。

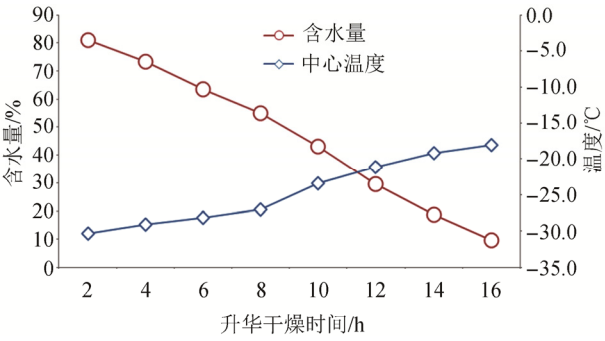


图 5 淮山片在升华干燥过程中的物料温度和含水量变化

Fig. 5 Changes of center temperature and moisture content of yam slices during sublimation drying

4 结论与讨论

本研究发现采用 NaCl、葡萄糖和麦芽糊精配制浸护

液, 可以获得较好的干品复水性, 且配方简单。范文广等[3]将山药鲜切后迅速在 45 ℃热水中烫漂 10 min, 可以缓解山药褐变。Noel 等[15]将山药在 60 ℃热水中烫 20 min, 可以保证加工的山药粉有较好的色泽。龚吉军等[16]研究表明山药在 90 ℃热水中烫漂 1 min 即可防止褐变。本研究将鲜切的山药片在 95 ℃水浴锅中烫漂 1 min, 护色效果良好。但烫漂会破坏细胞结构, 还使细胞内的果胶聚合糖溶解度增大, 进而使细胞间的结合力降低, 细胞分离, 最终导致果蔬质地软化[8]。通常会采用些结构支撑剂对烫漂后的果蔬进行处理。麦芽糊精是常用的结构支撑剂[9]。它易溶于水, 具有一定粘性, 渗入果蔬组和细胞后, 在干制时, 可阻止果蔬细胞急速收缩; 复水时, 因其具有较好的亲水性, 有利于提高复水性[9]。

本研究测定的淮山药片的共晶点是-20 ℃, 在超低温冰箱-30 ℃条件下预冻 2 h 可满足真空干燥要求。淮山药片的共熔点-18 ℃, 在物料温度低于此共熔点时, 真空干燥时间为 16 h, 冻干品颜色洁白, 复原率较高(83.27%)。多数果蔬的共熔点温度比共晶点温度偏高些。“乌叶”荔枝果肉的共晶点是-26 ℃, 共熔点是-17 ℃; 其中共熔点高于共晶点[17], 与本试验所测的淮山药片的共熔点相似。季阿敏等[18]测定的沙棘果的共晶点为-22 ℃, 比研究所测定的淮山药片共晶点低 2 ℃。丁薇等[19]测定的海红果共晶点是-32 ℃, 而共熔点是-28 ℃, 共晶点比共熔点偏低, 但都低于淮山药片的值。共晶点和共熔点受测定方法影响, 电阻法和差示扫描量热法(DSC)测定结果常差异很大, 从而影响真空冷冻干燥工艺的设计, 进而影响冻干成本。所以共晶点和共熔点需用另一方法进一步研究[14]。

参考文献

[1] 孙慧, 江敏, 朱兆娜, 等. 提高冻干山药片品质的工艺优化[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 92–96.
Sun H, Jiang M, Zhu ZN, *et al*. Optimal process for quality improvement of freeze-dried Yam slices [J]. Food Sci, 2011, 32(10): 92–96.

[2] Hsu CL. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods [J]. Food Chem, 2003, 83: 85–92.

[3] 范文广, 王庆国. 山药切割生理生化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2008, 34(8): 72–74.
Fan WG, Wang QG. Studies of biochemistry and physiology of fresh-cut Yams [J]. Food Res Dev, 2008, 34(8): 72–74.

[4] 徐成海, 张世伟, 胡天玉. 山药真空冷冻干燥的实验研究[J]. 真空科学与技术, 1996, 16(6): 449–452.
Xu CH, Zhang SW, Hu TY. Experimental study on vacuum freeze drying for the Chinese Yam [J]. Vacuum Sci Technol, 1996, 16(6): 449–452.

[5] 陈红兵, 高金燕. 食用山药片的冻干工艺探讨[J]. 食品与机械, 2001, 6: 32–33.
Chen HB, Gao J. The Freeze-drying of edible slices of Chinese Yam [J]. Food Mach, 2001, 6: 32–33.

[6] Lin YP. Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying [J]. J Food Eng, 2007, 79: 1295–1301.

[7] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12–16.
Ren GY, Ren LY, Zhang W, *et al*. Optimizing microwave-assisted vacuum freeze-drying of dioscorea opposite by orthogonal array design [J]. Food Sci, 2015, 36(12): 12–16.

[8] 韩涛, 李丽萍, 艾启俊. 漂烫对蔬菜果实质地的影响及低温漂烫作用的机理[J]. 食品工业科技, 2008, 28(2): 89–92.
Han T, Li LP, Ai QJ. The effect and mechanism of firming of fruits and vegetables by low-temperature-blanching [J]. Sci Technol Food Ind, 2003, 28(2): 89–92.

[9] 王浩, 薛文通. 麦芽糊精在新疆脱水番茄复水中应用的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 4: 84–85.
Wang H, Que WT. Research on utilization of maltodestrin in the recovery of flied tomato [J]. Sci Technol Food Ind, 2004, 4: 84–85.

[10] 魏庆瑞, 宋继林. 食品真空冷冻干燥技术研究[J]. 科技论坛, 2009, 4: 34.
Wei QR, Song JL. The technology of vacuum freeze-drying technology of food [J]. Forum Sci Technol, 2016, 4: 34.

[11] 王晓青, 杨森, 张琛, 等. 整粒冻干龙眼复水条件研究[J]. 广东化工, 2015, 42(24): 38–39.
Wang XQ, Yang S, Zhang C, *et al*. Studies on recovery technology for lyophilized Longan [J]. Guangdong Chem Ind, 2015, 42(24): 38–62.

[12] 曹峰, 王俊凤, 亓振, 等. 电阻法测量纳豆菌微生态制剂共晶点及共熔点[J]. 山东食品发酵, 2013, 2: 30–32.
Cao F, Wang JF, Qi Z, *et al*. Research on co-crystal temperature and co-crystal temperature of *Bacillus natto* microecologics by resistance method [J]. Shandong Food Ferment, 2013, 2: 30–32.

[13] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Tang QY. DPS data processing system [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[14] 徐艳阳, 张慜, 檀亦兵 等. 真空冷冻干燥工艺中物料共晶点共融点的测定[J]. 食品工业科技, 2005, (5): 56–57.
Xu YY, Zhang M, Tan YB, *et al*. Determination of eutectic and co-melting point of different materials [J]. Sci Technol Food Ind, 2005, (5): 56–57.

[15] Noel A, Joseph H. How blanching and drying affect the colour and functional characteristics of yam (*Dioscorea cayenensis-rotndata*) flour [J]. Food Chem, 2003, 82: 257–264.

[16] 龚吉军, 李忠海, 钟海雁. 速冻山药预处理工艺研究[J]. 冷饮与速冻食品工业, 2006, 12(4): 19-21.
Gong JJ, Li ZH, Zhong HY. Study on blanching technology for quick freezing of Yam [J]. Bever Fast Frozen Food Ind, 2006, 12(4): 19–21.

[17] 陈仪男, 郭树松, 郭建辉, 等. 荔枝真空冷冻干燥关键技术[J]. 中国农学通报, 2011, 27(4): 356–360.
Chen YN, Guo SS, Guo JH, *et al*. The key technologies of vacuum freeze-drying of Litch fruits [J]. Chin Agric Sci Bull, 2011, 27(4): 356–360.

[18] 季阿敏, 杨梅梅, 张庆钢, 等. 真空冷冻干燥工艺中沙棘果共晶点测定与分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2008, 24(6): 752–754.
Ji AM, Yang MM, Zhang QG, *et al*. Determination and analysis on eutectic point of sea buckthorn fruit in vacuum freeze-drying technology [J]. J Harbin Univ Commer (Nat Sci Ed), 2008, 24(6): 752–754.

[19] 丁薇, 赵丽芹. 真空冷冻干燥工艺中海红果共晶点与共熔点的测定[J]. 内蒙古农业科技, 2011, (3): 69–70.
Ding W. The determination of eutectic point and co-melting point of *Malus prunifolia* Borkh in vacuum freeze drying technology [J]. Inner Mongolia Agric Sci Technol, 2011, (3): 69–70.

(责任编辑: 姜 姗)

作者简介

马丽娜, 农艺师, 主要研究方向为蔬菜良种选育与栽培技术推广。
E-mail: 136845925@qq.com

陈阳, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为蔬菜新品种选育与栽培技术研究。
E-mail: cyang2@163.com