

王海鸥,王前菊,姜 英,等. 葡萄糖-柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片品质的影响[J].江苏农业学报,2020,36(2):477-486.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.031

## 葡萄糖-柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片品质的影响

王海鸥<sup>1</sup>, 王前菊<sup>1,2</sup>, 姜 英<sup>3</sup>, 闫秋菊<sup>3</sup>, 华 春<sup>1,4</sup>, 周 峰<sup>1,4</sup>

(1.南京晓庄学院食品科学学院,江苏 南京 211171; 2.沈阳农业大学食品学院,辽宁 沈阳 110161; 3.南京师范大学生命科学学院,江苏 南京 210046; 4.江苏省高校“特殊生物质废弃物资源化利用”重点建设实验室,江苏 南京 211171)

**摘要:** 为了研究葡萄糖和柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片品质的影响,通过单因素试验测定并分析不同质量分数葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理后冻干苹果片的主要品质指标,再用响应面分析法优化浸渍处理的葡萄糖-柠檬酸溶液最佳质量分数组合。单因素试验结果表明,高质量分数(25%)葡萄糖溶液浸渍处理可使冻干苹果片获得较高的色差值、产出率、形变率和硬度;高质量分数(4%)柠檬酸溶液浸渍处理可使冻干苹果片获得相对较高的色差值、复水比、形变率及相对较低的产出率、硬度。通过中心组合响应面试验,利用加权系数法将色差值、形变率、产出率和硬度等4个指标转化成综合指标。结果表明,葡萄糖质量分数越高、柠檬酸质量分数越低,所得冻干苹果片的综合指标越高。响应面优化的最佳浸渍溶液质量分数组合为25%葡萄糖+1%柠檬酸,在该组合溶液浸渍处理下的冻干苹果片色差值为9.67,形变率为14.82%,产出率为17.26%,硬度为4.43 N,获得的综合指标回归模型的决定系数( $R^2$ )=0.95,具有较好的品质预测能力。

**关键词:** 苹果片; 葡萄糖; 柠檬酸; 浸渍; 真空冷冻干燥; 品质

**中图分类号:** TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0477-10

## Effects of immersion treatment with glucose and citric acid solutions on the quality of freeze-dried apple slices

WANG Hai-ou<sup>1</sup>, WANG Qian-ju<sup>1,2</sup>, JIANG Ying<sup>3</sup>, YAN Qiu-ju<sup>3</sup>, HUA Chun<sup>1,4</sup>, ZHOU Feng<sup>1,4</sup>

(1.School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China; 2.School of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 3.College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 4.Jiangsu Provincial Key Construction Laboratory of Special Biomass Waste Resource Utilization, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** In order to study the effects of immersion treatment with glucose and citric acid solutions on the quality of freeze-dried apple slices, the main quality indicators of freeze-dried apple slices were analyzed by single factor test. The combination of glucose and citric acid in immersion treatment was optimized by response surface methodology. The results of single factor test showed that immersion treatment with high mass fraction(25%) of glucose solution could contribute to higher chromatic aberration, yield rate, deformation rate and hardness of freeze-dried apple slices. The freeze-dried apple slices obtained relatively higher chromatic aberration, rehydration ratio and deformation rate, showed relatively lower yield rate and hardness after immersion treatment with high mass fraction(4%) of citric acid solution. In the experiment of central composite design combined with response surface methodology, the comprehensive index was calculated by the four indicators such as chromatic

aberration, deformation rate, yield rate and hardness through using the weighted coefficient method. The results indicated that the higher mass fraction of glucose and the lower mass fraction of citric acid resulted in the higher comprehensive index of freeze-dried apple slices. The optimal combination by response surface method was 25% glucose

收稿日期:2019-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31872901、31301592);江苏省高校重点建设实验室项目[苏教科(2016)8]

作者简介:王海鸥(1978-),男,安徽桐城人,博士,教授,主要从事食品冷冻与干燥技术研究。(E-mail)who1978@163.com

通讯作者:周 峰,(E-mail)zfbcas@163.com

and 1% citric acid. Under this condition, the chromatic aberration, deformation rate, yield rate and hardness of the freeze-dried apple slices were 9.67, 14.82%, 17.26%, 4.43 N, respectively. The determination coefficient ( $R^2$ ) for the regression model of the comprehensive index was 0.95, which showed good ability in quality prediction.

**Key words:** apple slices; glucose; citric acid; immersion; vacuum freeze-drying; quality

近年来,随着人们对食品安全和健康的关注度日益提高,能够极大地保存食品的营养成分,又无需添加防腐剂的真空冷冻干燥(简称冻干)食品正在迎来广阔的发展前景。真空冷冻干燥完全符合绿色、方便、保健的全球食品发展趋势,为中国农产品增值和食品产业升级提供了很好的技术途径,是未来食品行业一个新的发展趋势。应用冻干技术制造果蔬脆片已经是当前果蔬深加工利用研究的热点问题<sup>[1-2]</sup>。苹果被公认是营养程度很高的健康水果之一<sup>[3]</sup>,其加工品冻干苹果脆片在当前休闲食品市场上异常火爆,其体积小,方便携带,营养价值高,以低脂肪含量、高纤维素含量、绿色天然健康的特性受到广大消费者青睐<sup>[4]</sup>。

虽然冻干技术可较好地保持营养物质,但它也是一种高耗能、高成本的加工方法,且干燥制品产出率较低、口感酥绵,在较大程度上限制了其在低附加值果蔬食品加工业中的广泛应用<sup>[4-5]</sup>。近年来,一些国内外学者针对冻干前处理技术展开了研究,试图最大程度缩短耗时,简化工艺过程,提高产出率,降低成本,改进品质。糖渗透浸渍液处理作为果蔬加工中常用的预处理方式,正在受到更多人的关注。对于苹果物料而言,常见的糖渗透浸渍液有蔗糖、麦芽糖、果糖溶液等<sup>[6-8]</sup>。肖敏等<sup>[4,8]</sup>研究了不同聚合度糖渗透浸渍液对苹果片干燥特性及品质的影响,发现单糖、二糖、三糖、四糖溶液均能增加干燥苹果片的硬度,保护其色泽。Simal等<sup>[9]</sup>研究了蔗糖渗透浸渍液对苹果片热风干燥特性的影响。Li等<sup>[10]</sup>研究了微波-渗透对热风干燥苹果片干燥速度及颜色的影响,发现蔗糖渗透浸渍液处理可以防止干燥过程中色泽的变化。葡萄糖是相对分子质量较低的单糖,低浓度的葡萄糖溶液具有相对较高的渗透压,有利于分子通过细胞膜进行质量传递<sup>[11]</sup>,但是目前有关用葡萄糖渗透浸渍液处理冻干果蔬的报道还很少。此外,柠檬酸溶液也是常见的一种果蔬浸渍处理溶液,具有良好的护色作用等。Doymaz等<sup>[12]</sup>研究了柠檬酸溶液预处理对木瓜切片和多花菜豆种子干燥特性的影响,发现用柠檬酸溶液进行预处理可

以提高干燥产品的复水特性。

过多地摄入糖和酸对人们的健康有一定的危害,因此,选择合适浓度的糖、酸溶液,获得较优的冷冻干燥综合品质,是果蔬冻干前进行糖、酸溶液浸渍处理需要考虑的问题。本研究以苹果片为对象,采用葡萄糖、柠檬酸溶液作为冻干前浸渍处理溶液,通过单因素试验分析用不同浓度糖、酸溶液浸渍处理鲜切苹果片后冻干苹果片的色差、形变率、产出率、硬度等主要品质指标,并用响应面分析试验优化葡萄糖、柠檬酸组合溶液浸渍处理的质量分数,以期苹果冻干加工生产实践提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

本试验所用新疆阿克苏苹果购于南京市苏果超市;葡萄糖、柠檬酸为市售食品级。

BLK-0.5型真空冷冻干燥机,江苏博莱客冷冻科技发展有限公司生产;BS224S型电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司生产;NH310型电脑色差仪,深圳市三恩驰科技有限公司生产;TMS-PRO型质构仪,美国FTC公司生产。

### 1.2 试验设计

1.2.1 葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍冻干苹果片的制备  
挑选大小均一、新鲜饱满且表面无明显霉烂、畸形、病虫害及机械损伤的苹果作为试验原料,清洗去皮去核后,沿苹果轴向平面切成厚度约为5 mm的薄片,然后用打孔器冲制成直径为20 mm的圆片备用。

用纯净水配制一定质量分数的葡萄糖、柠檬酸溶液对鲜切苹果片进行浸渍处理,料液比为1:8(g:ml),温度为25℃,浸泡时间为2 h,取出沥干后备用。将上述浸渍处理后的苹果片整齐地摆放在冷冻干燥机料盘中,开启冷冻程序,将物料预冻4 h,使其中心温度降至-40℃以下,然后开启真空冷冻干燥程序,温度、时间设定如下:-30℃、1 h→-25℃、1 h→-20℃、1 h→-15℃、1 h→-10℃、1 h→-5℃、2 h→0℃、2 h→5℃、1 h→10℃、1 h→20℃、1 h→30℃、1 h→40℃、1 h,冻干14 h后卸压出料,使苹果片的含

水量控制在 5% 以下。用真空包装袋密封保存冻干物料,用于相应指标的测定。

1.2.2 单因素试验 在进行单因素试验时,葡萄糖质量分数分别设为 0 (CK)、5%、10%、15%、20%、25%,柠檬酸质量分数分别设为 0 (CK)、1%、2%、3%、4%。

1.2.3 响应面优化试验 在单因素试验的基础上,采用中心组合设计方法进行葡萄糖、柠檬酸组合溶液浸渍处理质量分数的优化设计,以冻干产品的色差、形变率、产出率、硬度 4 个指标为响应值,因素与水平设计见表 1。

表 1 响应面优化试验的因素与水平

Table 1 Coded levels and corresponding actual levels of independent variables used in response surface design

编码水平	$x_1$ (葡萄糖质量分数) (%)	$x_2$ (柠檬酸质量分数) (%)
-1	5	1
0	15	2
1	25	3

### 1.3 测定指标

1.3.1 色差 用 3nh 高品质电脑色差仪测定不同处理的苹果脆片样品色泽,分别获取  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  ( $L^*$  为干制样品明暗度指数, $a^*$  为干制品红绿度指数, $b^*$  为干制样品黄蓝度指数),并按照公式(1)计算色差值 ( $\Delta E$ ),每组样品平行测定 5 次,取其平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中, $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  为鲜切苹果片对应的色泽指标。

1.3.2 产出率 分别称量各个苹果片的初始质量和冻干后质量,按公式(2)计算冻干苹果片的产出率,每个处理重复测试 3 次,取平均值。

$$P_o = m_2 / m_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中, $P_o$  为冻干苹果片产出率(%), $m_1$  为苹果片初始质量(g), $m_2$  为冻干苹果片质量(g)。

1.3.3 形变率 用游标卡尺分别测定鲜切苹果片厚度和冻干后苹果片厚度,按照公式(3)计算冻干苹果片的形变率,每个处理重复测试 3 次,取平均值。

$$T_s = (t_1 - t_2) / t_1 \times 100\% \quad (3)$$

式中, $T_s$  为冻干苹果片形变率(%), $t_1$  为鲜切苹

果片厚度(mm), $t_2$  为冻干后苹果片厚度(mm)。

1.3.4 复水比 将冻干苹果片放入 30 ℃ 左右的蒸馏水中充分吸水 30 min 后捞出沥干,准确称量冻干苹果片复水前后的质量,按照公式(4)计算冻干苹果片的复水比,每组样品平行测定 3 次,取其平均值。

$$R_f = m_h / m_q \quad (4)$$

式中, $R_f$  为冻干苹果片复水比, $m_q$  为冻干苹果片复水前质量(g), $m_h$  为冻干苹果片复水后质量(g)。

1.3.5 硬度 在质构仪上选择“水果果肉-25N-穿刺”测试程序,测试探头是直径为 2 mm 的圆柱探头 P2,设置测试参数如下:起始力为 0.1 N,穿刺距离为 1 mm,穿刺速度为 1 mm/s,回程速度为 1 mm/s。将穿刺过程中的最大力作为苹果片的硬度,每个处理重复测定 10 个冻干苹果片,取平均值。

1.3.6 用扫描电镜观察微观结构 设葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍最优组合组和空白组,对 2 组冻干苹果片分别制取自然断面,用碳导电胶将横断面观察样本粘贴在样品托上,再用离子溅射仪在横断面观察样本上喷金,最后用扫描电子显微镜观察拍照。

### 1.4 数据处理

使用 Excel 2010 和 Design-Expert 7.0 进行试验数据的处理及图表绘制,差异显著性用 SPSS 19.0 的 Duncan's 法进行多重比较分析,显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

2.1.1 葡萄糖和柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片色泽的影响 由表 2 可知,未浸渍对照组与浸渍处理组冻干苹果片的  $L^*$  都显著高于鲜切苹果片 ( $P < 0.05$ ),表明真空冷冻干燥会使苹果片更加洁白,其外观色泽更容易被消费者接受<sup>[13]</sup>;糖、酸溶液浸渍处理组冻干苹果片的  $a^*$  都显著高于未浸渍对照组 ( $P < 0.05$ ),表明冻干苹果片的颜色更偏红;与鲜切苹果片组、未浸渍对照组相比,5% 葡萄糖溶液以及 3% 和 4% 柠檬酸溶液浸渍处理组样品的  $b^*$  下降,颜色更偏蓝。从综合色差指标 ( $\Delta E$ ) 来看,除 3%、4% 柠檬酸溶液浸渍处理组外,其他浸渍处理组冻干苹果片的  $\Delta E$  均显著低于未浸渍组 ( $P < 0.05$ ),且冻干苹果片的  $\Delta E$  大致随着糖、酸溶液质量分数的增加而提高,表明用 5%、10%、15%、20%、25% 葡萄糖溶液或低浓度 (1%、2%) 柠檬酸溶液浸渍可以较好地保持苹果片的原有色泽。



表2 不同质量分数葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片色泽的影响

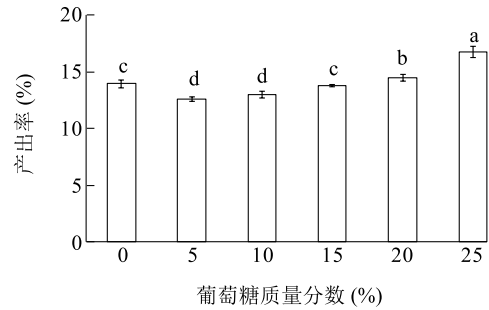
Table 2 Effects of immersion treatment with different mass fractions of glucose and citric acid solutions on the color of freeze-dried apple slices

处理	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
鲜切苹果片	74.53±0.49e	2.84±0.14c	25.23±0.79a	
未浸渍对照	88.53±0.30a	0.76±0.11f	23.81±0.91b	14.27±0.40a
5%葡萄糖	80.48±0.85d	3.54±0.45b	21.76±0.59cd	6.32±0.26f
10%葡萄糖	82.39±0.92c	3.11±0.42b	25.49±0.85a	7.54±0.21e
15%葡萄糖	82.49±0.55c	5.26±0.44a	25.42±0.65a	7.34±0.26e
20%葡萄糖	84.48±0.40b	2.86±0.31c	24.55±0.72ab	10.13±0.34c
25%葡萄糖	84.38±0.97b	3.48±0.10b	25.45±0.96a	10.59±0.41c
1%柠檬酸	83.85±0.96b	5.88±0.27a	25.59±0.94a	9.36±0.42d
2%柠檬酸	88.28±0.37a	1.72±0.18de	23.76±0.75b	13.90±0.31b
3%柠檬酸	88.82±0.62a	1.89±0.27d	21.76±0.69cd	14.75±0.47a
4%柠檬酸	88.29±0.89a	2.13±0.17d	20.51±0.82d	14.70±0.25a

同一列数据后标有不同小写字母的表示差异显著( $P<0.05$ )。

2.1.2 葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片产出率的影响 产出率是一个重要的经济指标,能够反映物料干燥后其总固形物的保留情况。用不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理鲜切苹果片后,冻干苹果片的产出率如图1所示。可以看出,除了未浸渍对照组与15%葡萄糖质量分数处理组间、5%与10%葡萄糖质量分数处理组间冻干苹果片的产出率差异不显著外,其他各组间的冻干苹果片产出率均呈现出显著差异,且葡萄糖质量分数越大,冻干苹果片的产出率就越高(除未浸渍处理)。5%、10%葡萄糖溶液浸渍处理组的产出率明显低于未浸渍对照组,20%、25%葡萄糖溶液浸渍处理组的产出率明显高于未浸渍对照组。浸渍处理实质上是物料与溶液发生物质交换的过程,物料内的水分、可溶性物质及溶液中的葡萄糖溶质在浸渍过程中达到交换平衡状态。葡萄糖质量分数越高,溶液的渗透压越大,可能由于葡萄糖质量分数升高时,对物料的渗透作用越强,从而提高了浸渍时的溶质质量传递速度,使更多葡萄糖溶质进入物料内,增加了物料的固形物含量,进而提高了冻干苹果片的产出率<sup>[4]</sup>。此外,苹果本身也含有一定的可溶性糖、有机酸等可溶物质,当浸渍液中葡萄糖质量分数过低时,溶质渗透压过低,经切片破坏处理的苹果片中的固有可溶性物质会向溶液中迁移流失,导致低质量分数葡萄糖溶液浸渍处理组的产出率反而低于未浸渍处理组。

由图2可见,经不同质量分数柠檬酸溶液浸渍

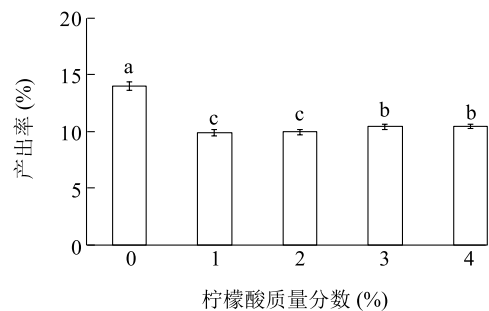


不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著( $P<0.05$ )。

图1 不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理对冻干苹果片产出率的影响

Fig.1 Effects of immersion treatment with different mass fractions of glucose solutions on the yield rate of freeze-dried apple slices

处理的冻干苹果片的产出率明显低于未浸渍对照组,这可能是因为柠檬酸迁移到苹果组织内部,增加了样品细胞的通透性,使样品自身所含可溶性物质更容易向细胞外渗透流失<sup>[14]</sup>,导致冻干苹果片中固形物质减少,产出率下降。



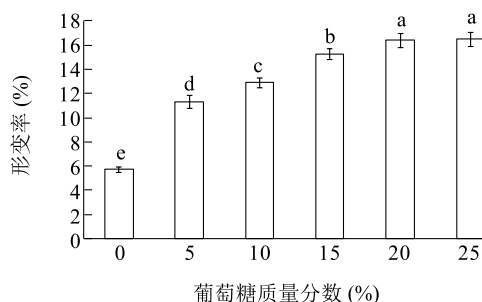
不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著( $P<0.05$ )。

图2 不同质量分数柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片产出率的影响

Fig.2 Effects of immersion treatment with different mass fractions of citric acid solutions on the yield rate of freeze-dried apple slices

2.1.3 葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片形变率的影响 果蔬物料在干燥过程中均会发生不同程度的皱缩变形,而平整饱满的外形是冻干果蔬的外观品质追求<sup>[15]</sup>。用不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理的鲜切苹果片冻干后的形变率如图3所示。20%、25% 2组葡萄糖质量分数处理间的冻干苹果片形变率无显著差异,而其他各组的冻干苹果片形变率之间均差异显著( $P<0.05$ ),整体上呈现葡萄糖溶液质量分数越大,冻干苹果片形变率越高的

变化趋势。在葡萄糖溶液渗透浸渍过程中,物料会发生不同程度的质量损失,这是物料内含物质和葡萄糖溶液发生物质交换的综合结果。当渗透浸渍的溶质相对分子质量大于水相对分子质量时,原料细胞的水分渗出远大于溶质的渗入,物料失水是渗透浸渍处理的必然结果。当物料失水时,细胞组织内外的压力变得不平衡,细胞膨压下降,使组织微观结构变形甚至破坏,从而导致浸渍处理后的样品发生皱缩<sup>[16-17]</sup>。另外,在渗透浸渍过程中会带动物料自身组分的改变,在内部产生一定的机械力,从而降低了细胞壁对组织结构的支撑作用,引起样品皱缩<sup>[18-19]</sup>。葡萄糖溶液浸渍处理造成的鲜切苹果片微观组织结构的变化会在冷冻干燥过程中得以积累和延续,最终影响冻干苹果片的表观形态。



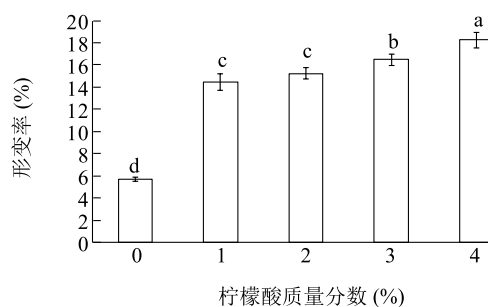
不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理对冻干苹果片形变率的影响

Fig.3 Effects of immersion treatment with different mass fractions of glucose solutions on the deformation rate of freeze-dried apple slices

用柠檬酸溶液浸渍处理鲜切苹果片后冻干苹果片的形变率如图4所示。除1%、2%这2个柠檬酸质量分数处理间的冻干苹果片形变率无显著差异外,其他各组形变率之间均差异显著 ( $P < 0.05$ ),经柠檬酸溶液浸渍处理的冻干苹果片的形变率明显高于未浸渍对照组,冻干苹果片的形变率整体上呈现随柠檬酸质量分数的增加而增大的趋势。这可能是由于高质量分数柠檬酸迁移进入苹果组织内部,改变了细胞膜的渗透性、完整性,催化水解酶作用,引起细胞壁部分降解,使得干燥过程中的细胞组织对多孔结构的支撑作用下降,导致冻干样品产生更大的收缩变形<sup>[20]</sup>。

**2.1.4 葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片复水比的影响** 复水是指外源水重新进入物料组织内部的复原过程,是干燥脱水的逆向过程。如图5



不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

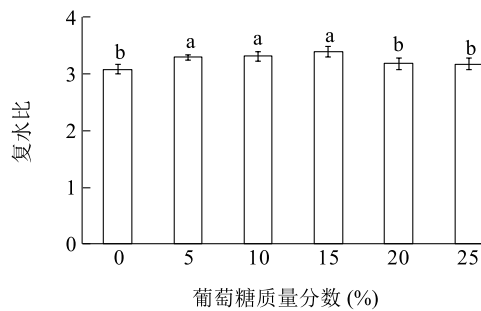
图4 不同质量分数柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片形变率的影响

Fig.4 Effects of immersion treatment with different mass fractions of citric acid solutions on the deformation rate of freeze-dried apple slices

所示,除5%、10%、15%葡萄糖溶液处理组间及未浸渍对照组与20%、25%葡萄糖溶液处理组间冻干苹果片的复水比无显著差异外,其他处理组间的复水比差异显著,5%、10%、15%葡萄糖溶液处理组的复水比稍高于其他组。样品复水性能的好坏与冻干样品组织内部的多孔结构及细胞透性有着密切联系<sup>[21]</sup>。用低质量分数葡萄糖溶液浸渍鲜切苹果片时,迁移进入样品组织内部的葡萄糖溶质有限,且组织中的可溶性物质可能发生了迁移流失。而高质量分数葡萄糖溶液浸渍处理则相反,会有更多葡萄糖溶质渗透进入样品组织,且质量分数越高,其黏度也越大,在冷冻干燥期间,苹果组织中的外源葡萄糖与内源可溶性固形物逐渐脱水浓缩,与细胞壁黏合并表面固化而形成结晶,增加了冻干过程中水分蒸发的阻力,也增加了外源水重新进入样品组织内部的阻力,从而限制了冻干样品在复水过程中的体积扩张和组织形态恢复能力<sup>[22]</sup>。关于糖溶液浸渍处理抑制干燥后的果蔬吸收水分、降低复水性这一现象已有相关报道<sup>[23-24]</sup>。

由图6可以看出,不同质量分数柠檬酸处理组的复水比显著高于未浸渍对照组,且各组复水比整体呈现随柠檬酸质量分数的增加而升高的趋势。可能是因为柠檬酸溶液浸渍处理增加了苹果片组织结构的通透性,提高了水分的扩散能力,从而使冻干苹果片在复水过程中更容易吸收外源水,复水性能较好。

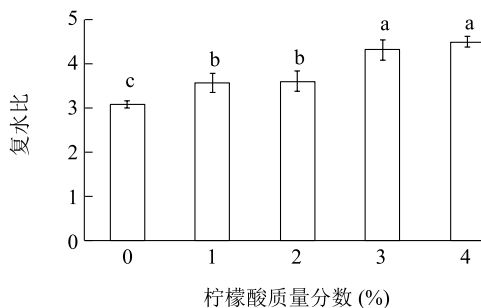
**2.1.5 葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片硬度的影响** 如图7所示,未浸渍对照以及用5%、10%、15%低质量分数葡萄糖溶液处理后,不同处理间的冻干



不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图5 不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理对冻干苹果片复水比的影响

Fig.5 Effects of immersion treatment with different mass fractions of glucose solutions on the rehydration ratio of freeze-dried apple slices



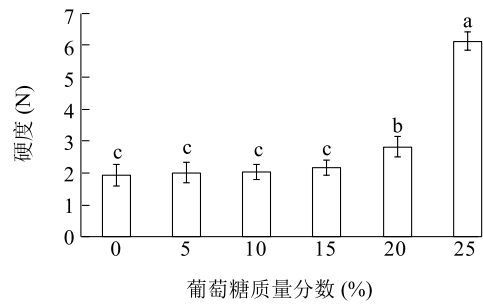
不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图6 不同质量分数柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片复水比的影响

Fig.6 Effects of immersion treatment with different mass fractions of citric acid solutions on the rehydration ratio of freeze-dried apple slices

苹果片硬度未见显著差异,而用20%、25%质量分数葡萄糖溶液处理的冻干苹果片硬度则显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ )。冷冻干燥前,外源葡萄糖迁移进入样品组织内部,干燥后与细胞内其他固形物一起浓缩、黏合于细胞壁,使孔室壁增厚,增加了组织强度和结构密度<sup>[25]</sup>。用高质量分数葡萄糖溶液浸渍处理后,渗透进入苹果片表层的葡萄糖在冻干过程中会因脱水结晶作用在表层形成硬壳,导致其硬度显著增加<sup>[8]</sup>。

用不同质量分数柠檬酸溶液浸渍后的冻干苹果片硬度如图8所示。可以看出,4%柠檬酸溶液处理组的硬度显著低于未浸渍对照组及1%、2%柠檬酸溶液处理组,表明高质量分数柠檬酸溶液浸渍处理可以显著降低冻干苹果片的硬度。在酸性条件下,  $H^+$ 一方面使细胞壁中对酸不稳定的键断裂,另一方面使细胞壁中某些多糖水解酶活化或活性增强,从

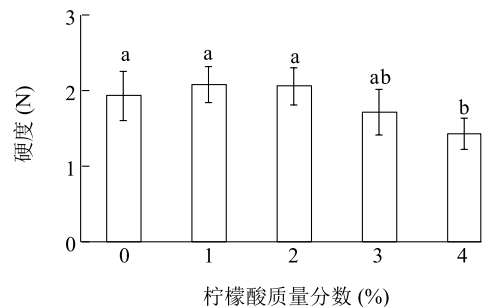


不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图7 不同质量分数葡萄糖溶液浸渍处理对冻干苹果片硬度的影响

Fig.7 Effects of immersion treatment with different mass fractions of glucose solutions on the hardness of freeze-dried apple slices

而使连接细胞壁多糖微纤丝之间的键断裂,细胞壁中果胶、纤维素等分子间松动且组分含量下降,细胞壁松弛,易使干燥后的苹果组织在一定程度上软化<sup>[12]</sup>。



不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图8 不同质量分数柠檬酸溶液浸渍处理对冻干苹果片硬度的影响

Fig.8 Effects of immersion treatment with different mass fractions of citric acid solutions on the hardness of freeze-dried apple slices

## 2.2 响应面优化试验结果

2.2.1 响应面试验组合设计与结果 根据中心组合试验设计原理,采用2因素3水平(表1)共13个试验组合,以色差值、形变率、产出率、硬度为考察指标,每组试验重复3次,取平均值,结果见表3。

2.2.2 综合指标优化(线性功效系数法) 尽可能小的色差与形变率、尽可能高的产出率与硬度是冻干苹果片的品质追求,为了兼顾这4个指标,本研究采用加权系数法<sup>[20]</sup>将单个指标转化为综合指标进行分析。综合指标的计算公式如下:

$$y_i' = (y_i - y_{i_{\min}}) / (y_{i_{\max}} - y_{i_{\min}}) \quad (5)$$

$$Q = \lambda_3 y_3' + \lambda_4 y_4' - \lambda_1 y_1' - \lambda_2 y_2' \quad (6)$$

式中,  $y_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 分别代表色差、形变率、产出率和硬度 4 个指标;  $y_i'$  为去量纲化的指标;  $y_{i_{\min}}$ 、

$y_{i_{\max}}$  分别为试验中各指标的最大值、最小值;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  分别为  $y_1'$ 、 $y_2'$ 、 $y_3'$  和  $y_4'$  的加权系数, 满足  $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 、 $\lambda_3 > 0$ 、 $\lambda_4 > 0$ , 且  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ 。Q 越大, 代表冻干苹果片的品质越好。

表 3 响应面试验组合与结果

Table 3 Experimental design and results for response surface analysis

试验编号	葡萄糖质量分数 ( $x_1$ ) (%)	柠檬酸质量分数 ( $x_2$ ) (%)	色差值 ( $y_1$ )	形变率 ( $y_2$ ) (%)	产出率 ( $y_3$ ) (%)	硬度 ( $y_4$ ) (N)	综合指标 ( $Q$ )
1	0.86	2.00	13.36	15.32	10.12	2.10	-0.18
2	15.00	2.00	11.48	15.69	14.49	2.49	0.04
3	5.00	1.00	8.93	14.87	10.56	2.09	0.03
4	15.00	0.59	8.82	15.35	13.95	2.25	0.13
5	5.00	3.00	13.86	16.84	11.32	1.75	-0.28
6	25.00	1.00	9.67	14.82	17.26	4.43	0.34
7	15.00	2.00	11.12	15.75	14.25	2.52	0.05
8	15.00	3.41	13.21	16.95	14.20	2.28	-0.13
9	25.00	3.00	13.46	17.25	17.82	3.98	0.09
10	15.00	2.00	11.16	15.60	14.57	2.74	0.08
11	29.14	2.00	13.71	18.16	19.26	5.69	0.20
12	15.00	2.00	11.37	15.42	12.36	2.69	0.01
13	15.00	2.00	11.54	15.59	12.61	2.56	-0.01

冻干食品最先应该考虑的是口感或咀嚼性, 这 2 个指标最终反映在产品的硬度上。此外, 产出率也是非常重要的经济指标, 而色泽、形变率等外观特征指标直接影响消费者的购买欲。鉴于以上分析, 分别将  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  设为 0.2、0.2、0.3 和 0.3。

2.2.3 指标的方差分析与回归方程 利用 Design-Expert 7.0 对试验数据进行方差分析和多元回归分析, 获得葡萄糖质量分数 ( $x_1$ )、柠檬酸质量分数 ( $x_2$ ) 对各指标的回归模型。由表 4 可见, 本研究获

得的 5 个指标的回归模型均呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 决定系数 ( $R^2$ ) 均达到较高水平, 但色差值 ( $Y_1$ )、形变率 ( $Y_2$ ) 的回归模型失拟检验结果显著 ( $P < 0.05$ ), 说明该回归模型与实际情况的拟合度不高, 不能用来分析和预测指标; 产出率、硬度、综合指标等 3 个指标回归模型失拟检验结果不显著, 说明这 3 个模型与实际情况的拟合度高, 可以基于葡萄糖质量分数、柠檬酸质量分数对产出率、硬度和综合指标进行分析和预测。

表 4 各指标的回归模型方程及方差分析

Table 4 Regression equations and variance analysis of different indicators

响应指标	回归模型	决定系数 ( $R^2$ )	P 值							
			模型	失拟项	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	
色差值 ( $Y_1$ )	$Y_1 = 7.190\ 00 - 0.200\ 00x_1 + 3.730\ 00x_2 - 0.002\ 90x_1x_2 - 0.009\ 00x_1^2 - 0.360\ 00x_2^2$	0.94	0.000 3	0.007 6	0.614 5	<0.000 1	0.342 8	0.003 8	0.135 5	
形变率 ( $Y_2$ )	$Y_2 = 14.740\ 00 - 0.057\ 00x_1 + 0.081\ 00x_2 - 0.014\ 00x_1x_2 + 0.005\ 00x_1^2 + 0.210\ 00x_2^2$	0.89	0.003 4	0.004 8	0.002 7	0.002 0	0.540 2	0.015 9	0.233 2	
产出率 ( $Y_3$ )	$Y_3 = 9.970\ 00 + 0.190\ 00x_1 - 0.410\ 00x_2 - 0.005\ 00x_1x_2 + 0.004\ 80x_1^2 + 0.170\ 00x_2^2$	0.95	0.000 2	0.984 3	<0.000 1	0.499 1	0.907 5	0.170 0	0.597 9	
硬度 ( $Y_4$ )	$Y_4 = 1.660\ 00 - 0.067\ 00x_1 + 0.640\ 00x_2 - 0.002\ 80x_1x_2 + 0.006\ 40x_1^2 - 0.170\ 00x_2^2$	0.98	<0.000 1	0.137 8	<0.000 1	0.130 9	0.732 4	<0.000 1	0.021 9	
综合指标 ( $Q$ )	$Q = 0.050\ 00 + 0.013\ 00x_1 - 0.110\ 00x_2 + 0.001\ 50x_1x_2 - 0.000\ 02x_1^2 - 0.007\ 00x_2^2$	0.95	0.000 2	0.172 0	<0.000 1	0.000 2	0.541 3	0.913 3	0.704 5	

$x_1$ : 葡萄糖质量分数;  $x_2$ : 柠檬酸质量分数。



2.2.4 综合指标( $Q$ )的等高线、响应面图及浸渍液组合优化 由图 9 可见,当葡萄糖质量分数为 25% 时,综合指标随着柠檬酸质量分数的增加而降低,响应面曲线较陡,当柠檬酸质量分数为 1% 时,综合指标最大;当葡萄糖质量分数为 5% 时,综合指标随柠

檬酸质量分数的变化趋势不明显。由图 9b 可以看出,当葡萄糖质量分数越高、柠檬酸质量分数越低时,冻干苹果片的综合指标越高。以最高综合指标为优化目标,得出最佳浸渍液组合为 25% 葡萄糖+1% 柠檬酸。

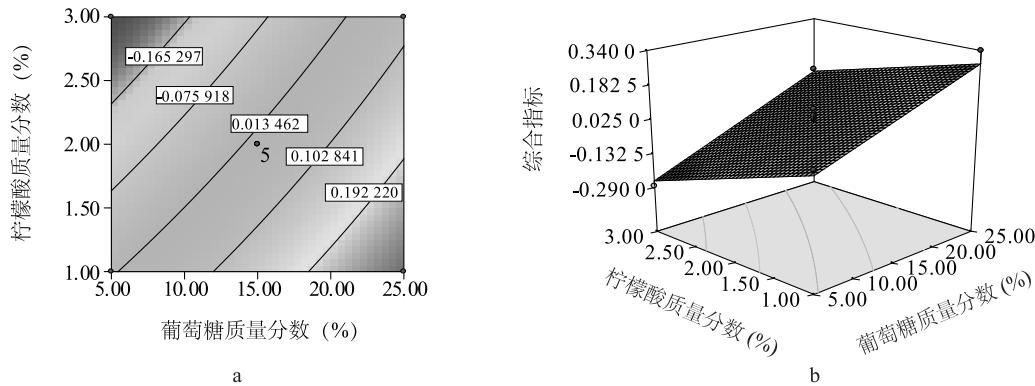


图 9 葡萄糖和柠檬酸质量分数对冻干苹果片综合指标影响的等高线(a)及响应面图(b)

Fig.9 Response surface and contour plots showing the interactive effect of glucose and citric acid on the comprehensive index of freeze-dried apple slices

2.2.5 最优葡萄糖、柠檬酸质量分数组合模型预测结果的验证 通过响应面优化获得的最佳浸渍溶液质量分数组合(25%葡萄糖+1%柠檬酸)正好是表 3 中的第 6 组。对该组试验数据和 5 个指标回归模型的预测数据进行对比验证。如表 5 所示,色差值

( $Y_1$ )和形变率( $Y_2$ )的预测值与实测值有较大差异,产出率( $Y_3$ )、硬度( $Y_4$ )和综合指标的预测值与实测值的差异在试验误差范围内。由此可见,响应面优化的最佳葡萄糖、柠檬酸质量分数组合参数及产出率、硬度和综合指标的回归模型预测是可靠的。

表 5 最优葡萄糖、柠檬酸浓度组合条件下各指标的预测值与实测值的验证结果

Table 5 Predicted values and measured values of the indicators under the optimal combination of glucose and citric acid

因素最优条件	指标	回归模型	预测值	实测值
$x_1 = 25, x_2 = 1$	色差值( $Y_1$ )	$Y_1 = 7.190\ 00 - 0.200\ 00x_1 + 3.730\ 00x_2 - 0.002\ 90x_1x_2 - 0.009\ 00x_1^2 - 0.360\ 00x_2^2$	-0.14	9.67±0.41
	形变率( $Y_2$ )	$Y_2 = 14.740\ 00 - 0.057\ 00x_1 + 0.081\ 00x_2 - 0.014\ 00x_1x_2 + 0.005\ 00x_1^2 + 0.210\ 00x_2^2$	16.38	14.82±0.61
	产出率( $Y_3$ )	$Y_3 = 9.970\ 00 + 0.190\ 00x_1 - 0.410\ 00x_2 - 0.005\ 00x_1x_2 + 0.004\ 80x_1^2 + 0.170\ 00x_2^2$	17.36	17.26±0.65
	硬度( $Y_4$ )	$Y_4 = 1.660\ 00 - 0.067\ 00x_1 + 0.640\ 00x_2 - 0.002\ 80x_1x_2 + 0.006\ 40x_1^2 - 0.170\ 00x_2^2$	4.39	4.43±0.43
	综合指标( $Q$ )	$Q = 0.050\ 00 + 0.013\ 00x_1 - 0.110\ 00x_2 + 0.001\ 50x_1x_2 - 0.000\ 02x_1^2 - 0.007\ 00x_2^2$	0.28	0.34±0.09

## 2.3 最优浸渍液组合处理的冻干苹果片的微观结构

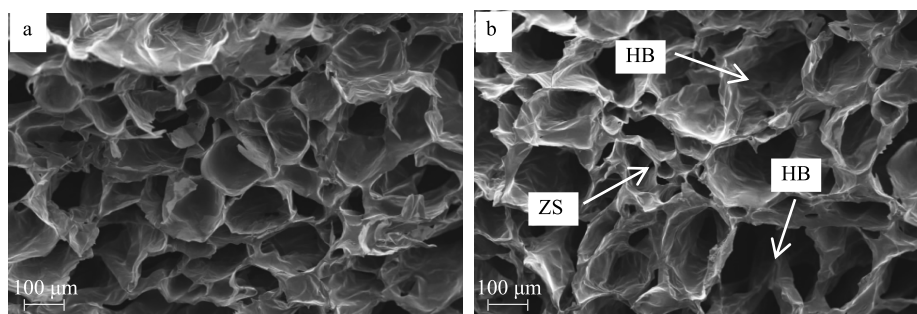
最优浸渍液组合(25%葡萄糖+1%柠檬酸)处理组及未浸渍对照组冻干苹果片的微观结构扫描电镜观察结果如图 10 所示。可以看出,未浸渍对照组的冻干苹果片形成了良好的多孔网络构造,细胞排列层次分明,孔隙边界清晰,呈现饱满且规则的外形,结构形态发生改变或者破坏的细胞相对较少。

25%葡萄糖+1%柠檬酸组合处理组冻干苹果片的微观结构相对于未浸渍对照组而言有所破坏,细胞孔室皱缩变形较为明显,构成多孔结构的细胞壁相对较厚。这可能由于高质量分数的糖溶液具有高黏性和脱水易结晶的特点,大量葡萄糖渗入苹果片组织内部,与细胞壁的纤维素、果胶等多糖物质结合在一起,形成较厚的细胞壁壳层。此外,在浸渍处理下,葡萄糖的渗透脱水、柠檬酸的软化细胞壁等综合作



用使得浸渍后的鲜切苹果片组织细胞形态发生皱缩变形,在最终的冷冻干燥过程中形态进一步改变,造成较大的外观变形。由此可见,微观结构观察结果

与与单因素试验中的硬度、形变率等指标分析结果具有一定的吻合度。



a:未浸渍对照组;b:25%葡萄糖+1%柠檬酸溶液组合浸渍组;ZS:皱缩变形;HB:厚壁孔室。

图10 对照组与最优葡萄糖、柠檬酸质量分数组合组冻干苹果片微观结构的扫描电镜结果(100×)

Fig.10 Scanning electron microscopy photographs of freeze-dried apple slices in the control group and the optimal combination group (100×)

### 3 结论

葡萄糖、柠檬酸溶液浸渍处理的单因素试验结果表明,用高质量分数(25%)葡萄糖溶液浸渍处理可以使冻干苹果片获得较高的色差值、产出率、形变率和硬度,而用高质量分数(4%)柠檬酸溶液浸渍处理时,则使冻干苹果片获得相对较高的色差值、复水比、形变率及相对较低的产出率、硬度。初步判断,浸渍处理时采用高质量分数(25%)葡萄糖、低质量分数(1%)柠檬酸对冻干样品的综合品质有利。

通过中心组合响应面试验,考察葡萄糖、柠檬酸溶液组合浸渍处理对冻干苹果片色差值、形变率、产出率、硬度等指标的影响,并用加权系数法将4个指标转化成综合指标,进而获得各指标的预测模型。结果表明,葡萄糖质量分数越高,柠檬酸质量分数越低,所得冻干苹果片的综合指标越高,响应面优化的最佳浸渍溶液组合为25%葡萄糖+1%柠檬酸。

#### 参考文献:

- [1] DUAN X T, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(4): 444-453.
- [2] RATTI C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4): 311-319.
- [3] 陈刚,马晓,胡春瑞,等. 石榴皮提取液对4℃贮藏鲜切“红富士”苹果品质与多酚氧化酶活性的影响[J]. *北方园艺*,

- 2018, 42(3): 139-144.
- [4] 肖敏. 不同糖渗透处理和干燥方式对苹果脆片品质形成影响的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2017.
- [5] 王海鸥,扶庆权,陈守江,等. 预处理方式对真空冷冻干燥苹果片品质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(11): 126-130.
- [6] 任世英. 四季豆渗透脱水及渗后热风干燥试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2012.
- [7] ZOU K J, TENG J W, HUANG L, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 253-259.
- [8] 肖敏,易建勇,毕金峰,等. 不同聚合度糖渗透对苹果片干燥特性及品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 53-58.
- [9] SIMAL S, DEYA E, FRAU M, et al. Simple modeling of air drying curves of fresh and osmotically pre-treated apple cubes[J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33(1): 139-150.
- [10] LI H, RAMASWAMY H S. Effect of microwave assisted osmotic drying pretreatment on the second stage air drying rate and color change in apples[C]//CHEN G H. *The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference (Volumes 2)*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2007: 764-769.
- [11] SAUREL R, RAOULT-WACK A L, RIOS G, et al. Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Frozen plant tissue[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1994, 29(5): 543-550.
- [12] DOYMAZ I, DEMIR-DUZ H, YILDIRIM A. Drying of quince slices: Effect of pretreatments on drying and rehydration characteristics[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(10): 1271-1279.
- [13] 周颀,王海鸥,孙艳辉,等. 不同前处理和冻结方式对苹果片真空冷冻干燥效率及干制品品质的影响[J]. *现代食品科技*,

- 2016, 32(12): 218-224.
- [14] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 预处理对压差闪蒸干燥丰水梨脆片品质及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(21): 73-78.
- [15] 邹克坚. 芒果渗透脱水和变温压差膨化干燥的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [16] FERRANDO M, SPIESS W. Cellular response of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose, and trehalose solutions[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(2/3): 115-127.
- [17] FERNANDES F A N, GALLÃO M, RODRIGUES S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(4): 604-610.
- [18] CHIRALT A, TALENS P. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(1/2): 167-177.
- [19] CHIRALT A, MARTINEZNAVARRETE N, MARTINEZMONZO J, et al. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes cryoprotectant effect[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(2/3): 129-135.
- [20] 杨莹. 草酸处理对去皮荸荠块茎的保鲜效果及其作用机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016.
- [21] 王海鸥, 扶庆权, 陈守江, 等. 不同真空冷冻干燥方法对杏鲍菇片干燥特性及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 904-912.
- [22] CHIRIFE J, BUERA M P. A simple model for predicting the viscosity of sugar and oligosaccharide solutions[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(3): 221-226.
- [23] 赖海涛, 邓清莲, 杨柳. 干燥前预处理对豌豆脱水后的品质影响[J]. 福建化工, 2002(4): 53-55, 52.
- [24] 李红娟, 张茜, 杨旭海, 等. 果蔬预处理现状分析及未来发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 271-272, 361.
- [25] BARRETT A, KALETUNC G, ROSENBERG S, et al. Effect of sucrose on the structure, mechanical strength and thermal properties of corn extrudates[J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 26(4): 261-269.

(责任编辑: 徐 艳)