

有机酸浸渍处理对苹果片冻干品质的影响

Effects of different organic acid impregnating treatments on the quality of freeze-dried apple slices

王前菊^{1,2}颜廷才¹闫秋菊^{2,3}WANG Qian-ju^{1,2} YAN Ting-cai¹ YAN Qiu-ju^{2,3}华 春^{2,4}周 峰^{2,4}王海鸥^{2,4}HUA Chun^{2,4} ZHOU Feng^{2,4} WANG Hai-ou^{2,4}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 南京晓庄学院食品科学学院,

江苏 南京 211171; 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)

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

摘要:采用浓度为1%, 2%, 3%, 4%的柠檬酸、乙酸、苹果酸和抗坏血酸浸渍苹果片,以冻干苹果片色泽、产出率、复水比、形变率、质地特性及微观结构为检测指标,分析不同酸浸渍对真空冷冻干燥苹果片品质的影响。结果表明:柠檬酸、抗坏血酸和苹果酸处理冻干苹果片的总色差值 ΔE 随酸浓度的增加而增加,乙酸处理冻干苹果片 ΔE 值相对较小,护色效果好;经柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸处理冻干苹果片形变率随浓度的增加有增加的趋势,且显著高于乙酸处理组和未浸渍组($P < 0.05$),而乙酸处理组的形变率较未浸渍组略有降低;酸浸渍处理冻干苹果片的复水比均显著高于未浸渍组($P < 0.05$)。在浓度为1%的条件下,苹果酸和乙酸较其他酸处理冻干苹果片后的组织细胞较为完整,细胞壁较厚,表现出较高的硬度和较小的形变率。因此乙酸可以较好地保持冻干苹果片的综合品质。

关键词:真空冷冻干燥;苹果片;柠檬酸;乙酸;苹果酸;抗坏血酸;品质;微观结构

Abstract: The fresh-cut apple slices were impregnated with dif-

ferent concentrations (1%, 2%, 3% and 4%) of organic acid including citric acid, ascorbic acid, malic acid and acetic acid. The color, yield, rehydration, deformation rate, texture characteristics and microscopic pore structure of freeze-dried apple chips were used as indicators to analyze the effect of different acid immersion on the quality of vacuum freeze-dried apple chips. The results showed that the ΔE value of freeze-dried apple slices treated with citric acid, ascorbic acid and malic acid increased with the increase of acid concentration, with relatively small ΔE value treated with acetic acid, and the color protection effect was good. The deformation rate of freeze-dried apple slices treated with citric acid, ascorbic acid and malic acid increased with increasing concentration, and was significantly higher than that in the acetic acid treated group and the non-impregnated group ($P < 0.05$), slight reduction in dipping group. The rehydration ratios of freeze-dried apple slices treated with acid impregnated were significantly higher than those in the non-dipping group ($P < 0.05$). At a concentration of 1%, the malic acid and acetic acid impregnation freeze-dried apple slices showed more completed tissue cells and thicker cell walls, which contributed to high hardness and small deformation rate. It was found that acetic acid could effectively improve the comprehensive quality of freeze-dried apple slices.

Keywords: vacuum-freeze drying technology; apple slices; citric acid; acetic acid; malic acid; ascorbic acid; quality; micro structure

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

作者简介:王前菊,女,沈阳农业大学在读硕士研究生。

通信作者:王海鸥(1978—),男,南京晓庄学院教授,博士。

E-mail: who1978@163.com

收稿日期:2020-03-30

真空冷冻干燥(冻干)是一种低温、无氧条件下的干燥方式,其主要目的是为了较好地保持原料的营养物质、色泽、风味、质地等品质,为消费者提供方便、营养、卫生安全的果蔬制品^[1]。果蔬干燥制品加工前通常需要进行清洗、切分、护色、调味等预处理工艺。据报道^[2-3],在干燥前对物料进行适当的预处理可以在一定程度上改善干制品的色泽、质地、口感及干燥特性,从而提高产品的质量。有机酸因其结构简单、分子量小而可以自由通过组织细胞^[4],可作为抗菌剂延长产品的货架期^[5],被广泛应用于食品加工中。酸浸渍常在果蔬加工前处理中使用,采用的有机酸主要有抗坏血酸、柠檬酸、苹果酸、乙酸等。余洁^[6]发现有机酸处理能够减轻樱桃番茄果实采后贮藏期的腐烂率,有助于保持果蔬的营养价值。田密霞等^[7-8]发现抗坏血酸、柠檬酸可减轻鲜切水果的褐变及营养品质变化。Doymaz等^[9]发现酸处理能较好地保持烘干无核葡萄的色泽。柠檬酸^[10]、抗坏血酸^[11]等浸渍处理是常用的商业化预处理方式,不仅有助于消灭物料的酶活性,减少干燥过程因酶参与反应的各种品质变化,还可以软化质地来加快干燥速度并防止品质下降^[12]。目前,对酸浸渍处理的研究主要集中在鲜切果蔬褐变抑制机理方面^[13],也见有某单一有机酸浸渍处理对冷冻干燥样品理化性质影响的研究报道^[14],但尚未见系统地研究不同种类及浓度的有机酸浸渍处理对冻干果蔬品质影响的报道。

试验拟分别采用浓度为1%,2%,3%,4%的柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸、乙酸4种有机酸对新鲜苹果片浸渍处理,进而将浸渍后的苹果片进行真空冷冻干燥,探讨酸浸渍处理对冻干苹果片色泽、产出率、复水比、形变率、质构及微观结构的影响,以期苹果片干制品生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器设备

新鲜苹果:新疆阿克苏品种,南京市售;

柠檬酸、乙酸、苹果酸、抗坏血酸等:食品级,市售;

真空冷冻干燥机:BLK-0.5型,江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;

电脑色差仪:NH300型,深圳市三恩驰科技有限公司;

质构仪:TMS-PRO型,美国FTC公司;

扫描电子显微镜:EVO-LS10型,德国ZEISS公司;

压汞仪:AutoPore IV 9510型,美国Micromeritics公司。

1.2 试验方法

挑选新鲜完好、大小均匀的苹果为原料,经清洗、去皮、去核、去顶、去底后,沿苹果轴向平面切成5 mm厚度薄片,然后用打孔器冲制成直径20 mm的圆片。配置质量分数为0%(以不浸渍处理为对照),1%,2%,3%,4%

的柠檬酸、乙酸、苹果酸、抗坏血酸溶液分别对苹果片进行渗透浸渍处理后取出沥干,浸渍液液质量比为1:8,温度为25℃,浸泡时间2 h。将备好的酸浸渍苹果片置于冷冻干燥机进行预冻4 h,使其中心温度降至-40℃以下,然后开启真空冷冻干燥温度控制程序,压强控制在50 Pa左右,冻干14 h后解除真空出料,苹果片湿基含水率在5%以下,将冻干苹果片装入密封袋,置于干燥器中备用。

1.3 指标测定

1.3.1 色差 参照崔莉等^[15]的试验方法,利用NH300型色差仪测定上述各组处理的冻干苹果片样品色泽,每组样品平行测定5次,取平均值。

1.3.2 产出率 分别称量各处理组苹果片的初始质量和冻干后质量,按式(1)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。

$$P_o = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

P_o ——冻干苹果片产出率,%;

m_1 ——鲜切苹果片质量,g;

m_2 ——冻干苹果片质量,g。

1.3.3 形变率 利用游标卡尺分别测定各处理组鲜切苹果片厚度和冻干后苹果片厚度,按式(2)计算冻干苹果片形变率,每个处理重复测试3次,取平均值。

$$T_s = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

T_s ——冻干苹果片形变率,%;

t_1 ——鲜切水果片厚度,mm;

t_2 ——冻干后苹果片厚度,mm。

1.3.4 复水比 参照王海鸥等^[16]的试验方法对冻干苹果片的复水比进行测定,每组样品平行测定3次,取平均值。

1.3.5 TPA质地参数 选择“TPA-1000N”测试程序,记录冻干苹果片的硬度、黏聚性、弹性、胶着性、咀嚼性、回复性等质地参数^[17],每个处理重复测定10个苹果片,取平均值。

1.3.6 组织结构扫描电镜观察 参照裴斐^[18]的试验方法,选择1%浓度的4种酸渍处理冻干苹果片进行微观结构观察。

1.3.7 孔隙指标 将1%浓度的4种酸处理冻干苹果片制成10 mm×10 mm×5 mm的样品,将样品放入到压汞仪中测定孔隙率、表观密度、真实密度、平均孔径和总孔面积等指标^[19]^[10-12]。

1.3.8 数据处理 使用统计软件SPSS 19.0分析上述试验数据,显著性分析水平为0.05,多重比较方法为

Duncan's。

2 结果与分析

2.1 冻干苹果片的色泽

不同酸浸渍处理下冻干产品色泽变化如表 1 所示。在柠檬酸浸渍组,1%浓度处理冻干苹果片的 L^* 值显著低于其他浓度处理和未浸渍组($P<0.05$), b^* 值基本随浓度升高而降低,而 1%浓度处理冻干苹果片 ΔE 值显著低于其他浓度处理和未浸渍组($P<0.05$),整体上呈随浓度升高而增加的变化趋势。在抗坏血酸浸渍组,冻干苹果片的 L^* 值、 ΔE 值随浓度的增加而增加,且 3%,4%浓度处理下冻干苹果片的 L^* 值、 ΔE 值显著高于未浸渍组($P<0.05$),而 1%浓度处理下冻干苹果片的 ΔE 值略低于对照组, b^* 值无明显变化。在苹果酸和乙酸浸渍组,与未浸渍组(CK)相比,浸渍组冻干苹果片的 L^* 值、 ΔE 值显著降低, a^* 值显著增高($P<0.05$), b^* 值无明显变化。各组冻干产品色泽差异是受多种因素综合影响的结果。在酸溶液浸渍 2 h 过程中,苹果切片中所含的单宁、色素等酚类物质会部分溶解流失到浸泡溶液中,同时有机酸物质也会渗透进入细胞组织形成低 pH 值条件来降低酚酶活性,导致苹果片在后续冷冻干燥过程中产品颜色发

生不同变化^[20-21]。

就同一浓度的不同种类酸而言,当处理浓度为 1%时, ΔE 值由高到低分别为:抗坏血酸、柠檬酸、乙酸、苹果酸,其中柠檬酸和乙酸无显著差异($P>0.05$);当处理浓度为 2%时, ΔE 值由高到低分别为:抗坏血酸、柠檬酸、乙酸、苹果酸,其中抗坏血酸和柠檬酸无显著差异,乙酸和苹果酸无显著差异;当处理浓度为 3%和 4%时, ΔE 值由高到低分别为:抗坏血酸、柠檬酸、苹果酸、乙酸,其中抗坏血酸和柠檬酸无显著差异。总体而言,抗坏血酸浸渍处理冻干苹果片 ΔE 值相对高于其他酸浸渍处理组,色泽变化大,因为抗坏血酸是在非酶褐变中继还原糖后又一个引起关注的一种羟基化合物,氧化后形成脱氢化合物,水合成糖酸经脱水、脱羧后形成糠醛,接着会形成褐色素,在冻干过程中随温度的升高会产生褐变产物^[22]。而乙酸浸渍处理冻干苹果片 ΔE 值相对较小,护色效果较好,说明乙酸是一种潜在的冻干苹果片护色剂。

2.2 冻干苹果片的产出率、复水比及形变率

由表 2 可以看出,经各种酸浸渍处理的冻干苹果片产出率均显著低于未浸渍组($P<0.05$),是因为这些有机酸结构相对简单,在浸渍处理过程中能够自由的进入细

表 1 4 种酸浸渍处理后的冻干样品色泽[†]

Table 1 The color of the freeze-dried samples after four acid immersion treatments

有机酸	浓度/%	L^*	a^*	b^*	ΔE
柠檬酸	0	88.53±0.30 ^a	0.76±0.11 ^d	23.81±0.91 ^b	14.27±0.40 ^{ab}
	1	83.85±0.96 ^{bb}	5.88±0.27 ^{aB}	25.59±0.94 ^{aA}	9.36±0.42 ^{cB}
	2	88.28±0.37 ^{aA}	1.72±0.18 ^{cC}	23.76±0.75 ^{bA}	13.90±0.3 ^{bA}
	3	88.82±0.62 ^{aA}	1.89±0.27 ^{bcC}	21.76±0.69 ^{cAB}	14.75±0.47 ^{aA}
	4	88.29±0.89 ^{aA}	2.13±0.17 ^{bC}	20.51±0.82 ^{cA}	14.70±0.25 ^{aA}
抗坏血酸	0	88.53±0.30 ^b	0.76±0.11 ^{cd}	23.81±0.91 ^a	14.27±0.40 ^{bc}
	1	88.19±0.27 ^{bA}	2.17±0.30 ^{aC}	23.37±2.32 ^{aAB}	13.93±0.43 ^{cA}
	2	88.56±0.28 ^{bA}	1.50±0.08 ^{bC}	22.61±2.23 ^{aA}	14.44±0.71 ^{bcA}
	3	89.47±0.88 ^{aA}	0.63±0.15 ^{dD}	23.36±1.74 ^{aA}	15.28±0.65 ^{abA}
	4	90.16±0.62 ^{aA}	1.08±0.24 ^{cD}	23.27±2.07 ^{aA}	15.94±0.50 ^{aA}
苹果酸	0	88.53±0.30 ^a	0.76±0.11 ^d	23.81±0.91 ^a	14.27±0.40 ^a
	1	75.78±0.69 ^{dC}	9.48±0.38 ^{aA}	25.14±4.23 ^{aA}	7.60±0.67 ^{dC}
	2	82.75±1.39 ^{cB}	5.83±0.70 ^{bb}	24.57±2.01 ^{aA}	8.95±0.56 ^{cB}
	3	82.86±0.45 ^{cB}	6.50±0.28 ^{bb}	23.25±1.35 ^{aA}	9.38±0.52 ^{cB}
	4	85.75±2.02 ^{bb}	3.63±0.51 ^{cB}	24.25±1.46 ^{aA}	11.36±0.82 ^{bb}
乙酸	0	88.53±0.30 ^a	0.76±0.11 ^c	23.81±0.91 ^a	14.27±0.40 ^a
	1	73.51±3.05 ^{cC}	10.38±1.61 ^{aA}	20.18±0.34 ^{aB}	9.52±0.72 ^{bB}
	2	78.32±1.30 ^{bC}	7.86±0.21 ^{bA}	21.57±6.89 ^{aA}	9.25±0.67 ^{bB}
	3	77.40±0.70 ^{bC}	8.68±0.05 ^{bA}	20.77±0.70 ^{aB}	7.92±0.26 ^{cC}
	4	78.50±0.74 ^{bC}	8.25±0.23 ^{bA}	26.14±7.60 ^{aA}	9.18±0.91 ^{bC}

[†] 同列数据中小写字母不同表示同种酸不同浓度在 0.05 水平上差异显著,大写字母不同表示不同酸同样浓度在 0.05 水平上差异显著。

胞组织^[4],提高细胞的通透性,加快组织中水分的流动,使物料本身的可溶性物质向外流失增多,降低冻干苹果片的产出率。柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸3个浸渍处理组的冻干苹果片产出率整体上呈随酸液浓度的增加而增加的趋势,而酸液浓度对乙酸浸渍处理组冻干苹果片产出率的影响并不显著。这是因为有机酸的羧基与苹果细胞组织中多糖的羟基发生交联化作用,随着浓度的增加,分子量较大的柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸3个外源有机酸更多地附聚在苹果细胞组织,从而引起冻干苹果片产出率的增加^[23]。

从复水比来看,经酸处理的冻干苹果片复水比显著高于未浸渍组($P<0.05$)。这是因为酸浸渍处理加快了干燥速度,软化了物料的组织结构,细胞壁变薄,使得酸化过后的苹果片更易吸收水分^[3,12],说明了酸对冻干苹果片的复水特性有一定的促进作用。

从表2还可以看出,经柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸浸渍处理的冻干苹果片形变率较未浸渍组显著升高($P<0.05$),且各浸渍组形变率基本呈随浓度的增加而增加的趋势;而乙酸处理组形变率较未浸渍组略有降低,其中2%,3%,4%3个浓度处理差异不显著,可能是因为柠檬

酸、抗坏血酸、苹果酸的分子量较大,进入苹果组织内部后更容易改变细胞组织特性,破坏细胞壁和细胞膜的完整性,在冻干过程中会增加干燥速度,更容易引起干燥样品内部多孔结构的收缩,导致产品形变率远大于对照组和乙酸处理组。

在处理浓度为1%,2%时,4种酸浸渍处理组冻干苹果片产出率之间无显著性差异;形变率从高到低是抗坏血酸、苹果酸、柠檬酸、乙酸,其中2%浓度下的柠檬酸处理组与苹果酸处理组无显著性差异。在浓度为3%时,苹果酸组产出率显著高于乙酸组($P<0.05$),其他各组产出率均无显著差异;4种酸浸渍处理冻干苹果片的形变率之间差异显著($P<0.05$)。在酸浓度为4%时,冻干苹果片产出率由高到低依次是苹果酸、抗坏血酸、柠檬酸、乙酸,其中除柠檬酸与乙酸组无显著差异外,其他各组均有显著差异($P<0.05$);抗血酸与苹果酸两组的形变率无显著差异,但显著高于柠檬酸、乙酸组($P<0.05$)。

2.3 冻干苹果片的质构特性

不同酸浸渍处理对冻干苹果片TPA测试质构参数有不同的影响,如表3所示。

从表3可以看出,酸浸渍处理冻干苹果片的硬度值

表2 4种酸浸渍处理后的冻干样品产出率、复水比、复水率及形变率[†]

Table 2 The yield, rehydration, deformation rate of the freeze-dried samples after four acid immersion treatments

有机酸	浓度/%	产出率/%	复水比/%	形变率/%
柠檬酸	0	13.97±0.36 ^a	3.08±0.08 ^c	5.70±0.21 ^c
	1	9.91±0.28 ^{cA}	3.57±0.21 ^{bC}	14.44±0.95 ^{bC}
	2	9.94±0.20 ^{cA}	3.61±0.23 ^{bC}	15.25±1.48 ^{bB}
	3	10.43±0.24 ^{bAB}	4.32±0.23 ^{aB}	15.08±1.43 ^{bC}
	4	10.44±0.16 ^{bC}	4.50±0.12 ^{aA}	18.26±1.53 ^{aB}
抗坏血酸	0	13.97±0.36 ^a	3.08±0.08 ^c	5.70±0.21 ^c
	1	10.21±0.41 ^{cA}	4.21±0.11 ^{bB}	26.22±1.07 ^{bA}
	2	10.22±0.15 ^{cA}	4.58±0.06 ^{aB}	28.77±1.15 ^{aA}
	3	10.53±0.43 ^{cAB}	4.65±0.08 ^{aB}	28.89±1.30 ^{aA}
	4	11.23±0.35 ^{bB}	4.19±0.14 ^{bB}	27.93±1.63 ^{abA}
苹果酸	0	13.97±0.36 ^a	3.08±0.08 ^c	5.70±0.21 ^d
	1	9.98±0.29 ^{dA}	4.55±0.06 ^{aB}	16.75±1.03 ^{cB}
	2	9.92±0.88 ^{dA}	4.32±0.39 ^{abB}	16.62±1.40 ^{cB}
	3	11.03±0.53 ^{cA}	4.61±0.34 ^{aB}	21.90±1.25 ^{bB}
	4	12.01±0.37 ^{bA}	3.98±0.13 ^{bB}	27.67±1.73 ^{aA}
乙酸	0	13.97±0.36 ^a	3.08±0.08 ^c	5.70±0.21 ^a
	1	10.65±0.88 ^{bA}	5.20±0.42 ^{aA}	5.01±0.62 ^{abD}
	2	10.68±0.44 ^{bA}	5.31±0.22 ^{aA}	4.45±0.54 ^{bcC}
	3	9.98±0.41 ^{bB}	5.27±0.10 ^{aA}	3.61±0.78 ^{cD}
	4	9.95±0.47 ^{bC}	4.62±0.13 ^{bA}	4.63±0.64 ^{abcC}

[†] 同列数据中小写字母不同表示同种酸不同浓度在0.05水平上差异显著,大写字母不同表示不同酸同样浓度在0.05水平上差异显著。

显著低于未浸渍组($P<0.05$),其硬度下降的原因可能是因为酸浸渍处理改变了苹果细胞壁纤维素、半纤维素及果胶等多糖组分及相互结合状态,引起冻干苹果片细胞壁孔室结构和强度变化,导致组织结构松软^[24]。柠檬酸、苹果酸、乙酸处理组冻干苹果片的黏聚性和弹性随酸浓度变化不大;但在抗坏血酸处理组,冻干苹果片的黏聚性和弹性随酸浓度的增加有下降的趋势。酸处理冻干苹果片的胶着性、咀嚼性和回复性显著低于未浸渍组($P<0.05$)。

对不同酸而言,当处理浓度为 1% 时,4 种酸浸渍处理冻干苹果片硬度差异显著($P<0.05$),其中苹果酸组硬度值最大;当浓度为 2% 时,硬度从大到小依次是乙酸、苹果酸、柠檬酸、抗坏血酸,其中乙酸和苹果酸、柠檬酸和抗坏血酸差异不显著;当浓度为 3% 时,4 种酸浸渍组硬度差异显著($P<0.05$),其中乙酸处理组硬度值最大;当浓度为 4% 时,硬度从大到小依次是乙酸、抗坏血酸、柠檬酸、苹果酸,其中柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸无显著差异。总体来说,乙酸浸渍组冻干苹果片硬度值比其他酸处理组相对较高,可能是因为乙酸为一元羧酸,分子量较小,

浸渍过程中对苹果组织组分与结构影响相对较小。

2.4 冻干苹果片的微观结构

选取浓度为 1% 的 4 种酸浸渍组冻干苹果片进行微观结构观察,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,未浸渍组冻干苹果片细胞壁网孔结构较紧密、相对饱满,有少许较大孔洞;柠檬酸浸渍组冻干苹果片内部组织形成了大小不均匀的多孔结构,孔壁较薄,有局部皱缩和塌陷现象;抗坏血酸处理冻干苹果片细胞组织皱缩、塌陷现象更严重;苹果酸处理冻干苹果片有少许的大孔室,多孔结构细胞壁多呈黏聚状态;乙酸处理冻干苹果片组织蜂窝状多孔结构较其他酸处理组相对明显,有少部分细胞壁组织黏聚现象。总体来说,酸浸渍处理使冻干苹果片多孔结构由饱满、紧密变得皱缩、黏聚,原因可能是酸浸渍处理使苹果片细胞壁被软化,冻干过程中引起不同程度的塌陷,降低组织孔隙度。苹果酸、乙酸浸渍处理冻干苹果片多孔组织比柠檬酸、抗坏血酸组冻干苹果片要完整,与上述处理浓度为 1% 时,苹果酸组、乙酸组冻干苹果片硬度显著高于柠檬酸组、抗坏血酸组的结果一致。这是因为乙酸、苹果酸分别为一元酸和二元酸,含氢离子少,浸

表 3 4 种酸浸渍处理后的冻干样品 TPA 测试质构参数[†]

Table 3 The TPA test texture parameters of freeze-dried samples after four acid immersion treatments

有机酸	浓度/%	硬度/N	黏聚性	弹性/mm	胶着性/N	咀嚼性/mJ	回复性
柠檬酸	0	35.33±2.84 ^a	0.31±0.08 ^a	0.46±0.07 ^a	11.38±1.04 ^a	5.01±0.22 ^a	23.38±1.44 ^a
	1	6.84±0.59 ^{bc}	0.35±0.04 ^{aA}	0.47±0.03 ^{aA}	1.91±0.62 ^{bA}	0.89±0.28 ^{bA}	15.00±1.69 ^{cA}
	2	5.32±0.62 ^{bb}	0.37±0.08 ^{aA}	0.42±0.06 ^{aAB}	1.93±0.07 ^{bA}	0.82±0.15 ^{bA}	14.93±1.98 ^{cb}
	3	5.82±0.53 ^{bb}	0.41±0.04 ^{aA}	0.42±0.08 ^{aAB}	1.39±0.03 ^{bb}	1.01±0.21 ^{bb}	18.60±2.24 ^{bA}
	4	4.74±0.11 ^{bb}	0.30±0.07 ^{aB}	0.36±0.05 ^{aB}	1.60±0.03 ^{bAB}	0.60±0.37 ^{bAB}	14.89±2.06 ^{cb}
抗坏血酸	0	35.33±2.84 ^a	0.31±0.08 ^{ab}	0.46±0.07 ^a	11.38±1.04 ^a	5.01±0.22 ^a	23.38±1.44 ^a
	1	4.74±0.11 ^{bd}	0.42±0.09 ^{aA}	0.46±0.08 ^{aA}	2.35±0.35 ^{bA}	1.14±0.66 ^{bA}	17.25±1.78 ^{bA}
	2	5.19±0.32 ^{bb}	0.40±0.05 ^{aA}	0.41±0.03 ^{abAB}	1.93±0.43 ^{bA}	0.79±0.20 ^{bcA}	21.82±1.79 ^{aA}
	3	4.36±0.58 ^{bc}	0.30±0.05 ^{abA}	0.35±0.04 ^{bb}	1.6±0.63 ^{bAB}	0.56±0.24 ^{bcC}	18.56±1.40 ^{bA}
	4	5.49±0.11 ^{bAB}	0.26±0.05 ^{bB}	0.33±0.02 ^{bb}	1.18±0.20 ^{bb}	0.38±0.05 ^{cb}	12.85±1.38 ^{cb}
苹果酸	0	35.33±2.84 ^a	0.31±0.08 ^a	0.46±0.07 ^a	11.38±1.04 ^a	5.01±0.22 ^a	23.38±1.44 ^a
	1	11.13±1.06 ^{bA}	0.32±0.04 ^{aA}	0.45±0.09 ^{aA}	2.87±0.79 ^{bA}	1.25±0.23 ^{bA}	16.11±1.85 ^{cA}
	2	6.92±0.21 ^{cA}	0.29±0.07 ^{aA}	0.36±0.10 ^{aB}	1.58±0.85 ^{bcA}	0.63±0.47 ^{cA}	14.65±1.97 ^{cb}
	3	3.16±0.26 ^{dd}	0.38±0.06 ^{aA}	0.39±0.11 ^{aB}	1.20±0.19 ^{cC}	0.48±0.21 ^{cC}	20.31±0.53 ^{bA}
	4	4.51±0.44 ^{cdB}	0.40±0.03 ^{aA}	0.37±0.09 ^{aB}	1.81±0.39 ^{bcA}	0.67±0.23 ^{cAB}	14.23±1.39 ^{cb}
乙酸	0	35.33±2.84 ^a	0.31±0.08 ^b	0.46±0.07 ^a	11.38±1.04 ^a	5.01±0.22 ^a	23.38±1.44 ^a
	1	8.57±0.90 ^{bb}	0.34±0.02 ^{abA}	0.48±0.09 ^{aA}	2.91±0.85 ^{bcA}	1.45±0.63 ^{bcA}	16.55±1.76 ^{bA}
	2	7.32±0.65 ^{bA}	0.33±0.02 ^{abA}	0.49±0.02 ^{aA}	2.42±0.83 ^{bcA}	1.20±0.43 ^{cA}	17.44±1.81 ^{bb}
	3	7.04±0.59 ^{bA}	0.41±0.04 ^{aA}	0.55±0.05 ^{aA}	3.69±0.62 ^{bA}	2.01±0.22 ^{bA}	18.03±1.99 ^{bA}
	4	5.91±0.91 ^{bA}	0.3±0.03 ^{abAB}	0.48±0.03 ^{aA}	2.02±0.37 ^{cA}	0.97±0.20 ^{cA}	19.18±1.85 ^{bA}

† 同列数据中小写字母不同表示同种酸不同浓度在 0.05 水平上差异显著,大写字母不同表示不同酸同样浓度在 0.05 水平上差异显著。

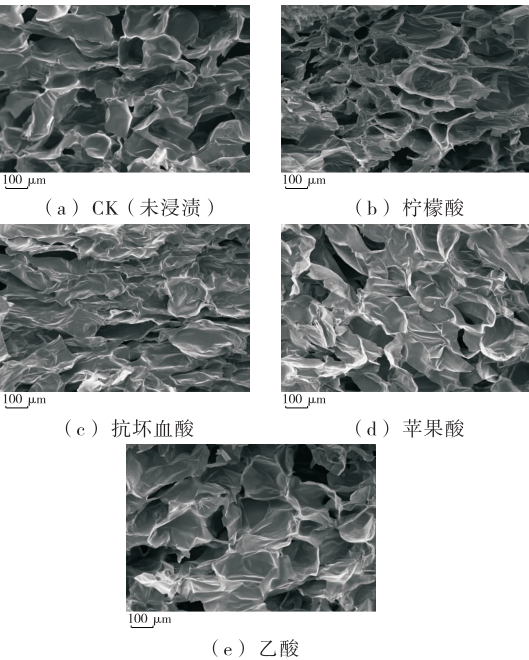


图 1 1%浓度不同酸渍处理冻干苹果脆片断面扫描电镜图

Figure 1 Scanning electron microscope image of crisp pieces of freeze-dried apples treated with different acid pickling at 1% concentration (×100)

渍过程中对细胞组织改变较小,冻干过程中组织结构形态保持较好、细胞壁破坏程度相对较小、硬度质地相对较高。

2.5 冻干苹果片的孔隙结构参数

通过测量压汞仪压入的水银量测定 1%浓度下 4 种酸浸渍处理冻干苹果片的微观孔隙结构参数指标,可以更好地分析冻干苹果片在干燥过程中产生的非规则变形收缩现象^{[19]9-10}。测试结果如表 4 所示,未浸渍组和乙酸处理组冻干苹果片孔隙率未见显著差异,且显著高于其他酸处理组($P<0.05$),随后依次为柠檬酸组、苹果酸组和抗坏血酸组。抗坏血酸组冻干苹果片孔隙率最小,其表观密度、真实密度均显著高于乙酸组和未浸渍组($P<0.05$)。乙酸组冻干苹果片平均孔径与未浸渍组无明显差异,但显著高于其他酸处理组($P<0.05$)。对照组和乙酸组冻干苹果片总孔面积相对较高,且无显著差异,抗坏血酸组冻干苹果片总孔面积最小,显著低于其他各组($P<0.05$)。总体来说,经柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸浸渍后冻干苹果片的孔隙率、孔径和总孔面积都显著低于未浸渍组与乙酸浸渍组($P<0.05$),与冻干苹果片形变率测定结果和组织微观结构扫描电镜观察结果基本一致。

3 结论

试验以未浸渍苹果片的冻干样品为对照,以不同浓

表 4 1%酸浸渍处理后的冻干苹果片孔隙结构参数[†]

Table 4 The pore structure parameters of freeze-dried apple chips after 1% acid dipping

组名	孔隙率/%	表观密度/(g·mL ⁻¹)	真实密度/(g·mL ⁻¹)	平均孔径/μm	总孔面积/(m ² ·g ⁻¹)
CK	66.3±1.25 ^a	0.11±0.06 ^b	0.33±0.05 ^b	27.96±0.82 ^a	0.63±0.09 ^a
柠檬酸	53.5±1.02 ^b	0.19±0.05 ^{ab}	0.41±0.05 ^{ab}	23.59±0.56 ^b	0.49±0.05 ^{bc}
抗坏血酸	41.5±1.09 ^d	0.27±0.07 ^a	0.46±0.06 ^a	20.01±0.48 ^c	0.31±0.04 ^d
苹果酸	51.2±0.85 ^c	0.20±0.04 ^{ab}	0.41±0.05 ^{ab}	24.05±0.54 ^b	0.45±0.03 ^c
乙酸	65.5±1.34 ^a	0.12±0.03 ^b	0.34±0.04 ^b	28.12±0.39 ^a	0.59±0.05 ^{ab}

[†] 同列数据中小写字母不同表示不同酸在 0.05 水平上差异显著。

度的 4 种酸浸渍处理苹果片的冻干样品为研究对象,分析其品质及微观结构的变化。试验结果表明:苹果酸、乙酸浸渍处理组冻干苹果片综合性色差值均小于未浸渍组冻干苹果片,具有较好的护色效果,而柠檬酸和抗坏血酸只有浓度为 1%,2%时护色效果较好;4 种有机酸浸渍处理组冻干苹果片复水性均高于未浸渍组的冻干苹果片,但酸浸渍处理组冻干苹果片硬度均小于未浸渍组;除乙酸浸渍组冻干苹果片形变率略低于未浸渍组外,柠檬酸、抗坏血酸、苹果酸浸渍组冻干苹果片形变率均高于未浸渍组,且随酸浓度的增加而增加。在浓度为 1%的条件下,苹果酸和乙酸浸渍处理的冻干苹果片组织细胞较其他酸处理完整,细胞壁较厚,且乙酸处理冻干苹果片的孔隙率和总孔面积与未浸渍组未见显著差异,显著高于其

他酸处理组($P<0.05$)。综上可得,乙酸浸渍处理后冻干苹果片具有较好的护色效果,形变率较低,硬度值较高,细胞组织结构破坏小,乙酸浸渍处理能更好地保持冻干苹果片的综合品质。

试验采用的 4 种有机酸具有不同理化性质,其在浸渍和冷冻干燥过程中如何影响苹果片内部组分及结构进而形成最终的冻干制品品质等有关作用机理还有待深入研究。

参考文献

[1] DARAOU I N, DUFOUR P, HAMMOURI H, et al. Model predictive control during the primary drying stage of lyophilisation[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5): 483-494.

- [2] BRAHIM D. Hot-air drying and rehydration characteristics of red kidney bean seeds[J]. Chemical Engineering Communications, 2015, 203(5): 599-608.
- [3] DOYMAZ I, DENIR H, YILDIRIM A. Drying of quince slices: Effect of pretreatments on drying and rehydration characteristics[J]. Chemical Engineering Communications, 2015, 202(10): 1 271-1 279.
- [4] THERON M M, LUES J F R. Organic acids and meat preservation: A review[J]. Food Reviews International, 2007, 23(2): 141-158.
- [5] ANDRE B, CALSTEREN M R V. Antimicrobial films produced from chitosan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1999, 26(1): 63-67.
- [6] 余洁. 草酸处理减轻樱桃番茄果实采后冷害的机理研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2015: 11-15.
- [7] 田密霞, 胡文忠, 朱蓓薇, 等. 抗坏血酸处理对鲜切水晶梨营养成分及褐变的影响[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(1): 156-159.
- [8] 范林林, 赵文静, 赵丹, 等. 柠檬酸处理对鲜切苹果的保鲜效果[J]. 食品科学 2014, 35(18): 230-236.
- [9] DOYMAZ I, ALTINER P. Effect of pretreatment solution on drying and color characteristics of seedless grapes[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(1): 43-49.
- [10] TARHAN S, ERGUNES G, TASER O F. Selection of chemical and thermal pretreatment combination to reduce the dehydration time of sour cherry[J]. Journal of Food Process Engineering, 2006, 29(6): 651-663.
- [11] IBRAHIM D. Drying of potato slices: Effect of pretreatments and mathematical modeling[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2012, 36(4): 310-319.
- [12] XIAO Hong-wei, YAO Xue-dong, LIN Hai, et al. Effect of SSB (Superheated Steam Blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices[J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35(3): 370-390.
- [13] 姜丹, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 紫外线照射与柠檬酸处理对鲜切苹果的保鲜作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2 482-2 488.
- [14] STANISLAW R, DARIUSZ D, ANDRZEJ K. Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) [J]. LWT-Food Science & Technology, 2015, 63(1): 497-503.
- [15] 崔莉, 宋双双, 杜利平, 等. 低温鼓风干燥过程中皱皮木瓜的褐变及其活性成分变化研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 70-74.
- [16] 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.
- [17] ZIELINSKA M, SADOWSKI P, BŁASZCZAK W. Freezing/thawing and microwave-assisted drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 555-563.
- [18] 裴斐. 双孢蘑菇冷冻干燥联合微波真空干燥传质动力学及干燥过程中风味成分变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 22-25.
- [19] 谭礼斌. 果蔬多孔介质干燥热质传递及应力应变研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
- [20] CHANDRA S, KUMARI D. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(4): 552-561.
- [21] RUDY S, DZIKI D, KRZYKOWSKI A, et al. Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 497-503.
- [22] 周永妍. 抗坏血酸/酸性氨基酸体系非酶褐变反应研究[D]. 恩施: 湖北民族学院, 2015: 5-6.
- [23] SEFC B, TRAJKOVIC J, HASAN M, et al. Dimensional stability of wood modified by citric acid using different catalysts[J]. Drvna Industrija, 2009, 60(1): 23-26.
- [24] FEMENIA A, GAROSI P, ROBERTS K, et al. Tissue-related changes in methyl-esterification of pectic polysaccharides in cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) stems[J]. Planta, 1998, 205(3): 438-444.

(上接第 157 页)

- [4] 杨祖彬, 代小红. 基于图像配准的食品包装印刷缺陷检测与实现[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 319-322.
- [5] 马宝秋. 基于图像小波变换的食品包装印刷缺陷检测方法[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(5): 212-215.
- [6] 裴悦琨, 叶家敏, 姜艳超, 等. 基于机器视觉的樱桃形状及大小检测技术[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 199-202.
- [7] 徐浪, 曾忠, 刘金赞, 等. 机器视觉在印刷缺陷在线检测中的应用与研究[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(3): 186-190.
- [8] 胡方尚, 郭慧. 基于 ROI 模板的印刷品图像配准方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 582-586.
- [9] 李萌, 孙铁波. 基于机器视觉的食品包装缺陷检测研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 125-127.
- [10] 童季刚, 廖菲, 罗良传. 一种机器视觉的瓶罐缺陷检测系统设计[J]. 机电工程技术, 2016, 45(8): 28-31.
- [11] 陈丽, 唐万有. 基于 DP 方法的印刷品图像检测技术研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 116-120.
- [12] 张文娟, 康家银. 一种用于图像降噪的自适应均值滤波算法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2 496-2 498.
- [13] 徐敏, 唐万有, 马千里, 等. 基于 Blob 算法的印刷缺陷在线检测的研究[J]. 包装工程, 2011(9): 20-23.