

赵 邯, 刘春菊, 李大婧, 等. 糖酸协同调控黄桃脆片质地[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6): 1120-1128.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.019

糖酸协同调控黄桃脆片质地

赵 邯^{1,2}, 刘春菊^{1,2}, 李大婧¹, 李 斌², 李 越^{1,2}, 庞文倩^{1,2}, 吴海虹¹, 牛丽影¹
(1.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014; 2.沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 为探究糖、酸对压差膨化黄桃脆片质地协同调控的特性, 利用蔗糖、柠檬酸、磷酸二氢钠处理黄桃脆片, 并对处理后的黄桃脆片质地、微观结构、细胞壁组分与孔隙结构进行分析。结果表明: 与对照相比, 单一蔗糖处理黄桃脆片的硬度、破裂距离显著下降, 单一柠檬酸处理和单一磷酸二氢钠处理黄桃脆片的硬度、破裂距离和脆裂用功均显著下降。24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液复合处理的黄桃脆片质地特性指数最高, 水溶性果胶含量最低。从微观结构可以看出, 添加蔗糖可固化细胞壁, 柠檬酸可增大细胞孔隙, 磷酸二氢钠可进一步促进两者的协同作用, 使黄桃脆片结构更加整齐均匀。因此, 24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液复合处理的黄桃脆片细胞间孔隙均匀, 边界清晰, 细胞壁排列规则, 呈现出蜂窝状结构。本研究发现糖酸可以协同调控压差膨化黄桃脆片质地, 且磷酸盐可进一步促进糖酸协同作用, 本研究结果为黄桃脆片加工品质的提升提供了技术支撑和理论依据。

关键词: 黄桃脆片; 压差膨化干燥; 质地特性; 孔隙结构

中图分类号: TS255.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-1120-09

Synergistic regulation of sugar and acid on the texture of yellow peach chips

ZHAO Han^{1,2}, LIU Chunju^{1,2}, LI Dajing¹, LI Bin², LI Yue^{1,2}, PANG Wenqian^{1,2}, WU Haihong¹, NIU Liying¹

(1. Institute of Argo-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: To explore the synergistic regulation of sugar and acid on the texture of pressure-differential puffed yellow peach chips, the yellow peach chips were treated with sucrose, citric acid and sodium dihydrogen phosphate, and the texture, microstructure, cell wall components and pore structure of the treated yellow peach chips were analyzed. The results showed that compared with the control, the hardness and cracking distance of yellow peach chips treated with single sucrose decreased significantly. Compared with the control, the hardness, cracking distance and work of cracking of yellow peach chips treated with single citric acid and single sodium dihydrogen phosphate decreased significantly. The yellow peach chips treated with

24% sucrose + 2.0% citric acid + 2.0% sodium dihydrogen phosphate had the highest texture index and the lowest water-soluble pectin content. The microstructure showed that sucrose could solidify the cell wall, citric acid could increase the cell porosity, and sodium dihydrogen phosphate could further promote the synergy between the two, making the structure of yellow peach chips more even. Therefore, the yellow peach chips treated with 24% sucrose + 2.0% citric acid + 2.0% sodium dihydrogen phosphate solution had

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(22)3176]; 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2023316); 江苏现代农业产业技术体系建设专项[JATS(2022)447]

作者简介: 赵 邯(1997-), 女, 吉林白山人, 硕士研究生, 研究方向为果蔬加工与品质调控。(E-mail) zhaohan19970529@163.com

通讯作者: 刘春菊, (E-mail) cjliu0306@163.com

uniform intercellular spaces, clear borders, regular cell wall arrangement and honeycomb structure. It was found that the sugar and acid could coordinate the texture of the puffed yellow peach chips, and the phosphate could further promote the sugar and acid synergistic action. The results of this study can provide technical support and theoretical basis for the improvement of the processing quality of yellow peach chips.

Key words: yellow peach chips; explosion puffing drying; texture characteristics; pore structure

近年来,果蔬脆片因其便携便贮、酥脆香甜、营养丰富等优点市场份额迅速扩大。果蔬脱水方式有很多种,有经典的热风干燥、油炸膨化,还有可以最大限度保存营养成分的冷冻干燥等^[1-2]。根据原料本身的硬度、色泽、含水量以及预期产品在脆度、色泽、风味、形状上的要求,不同果蔬往往需要选择不同的脱水方式。其中,黄桃因为色泽金黄、易切分等特点成为桃类加工首选。压差膨化干燥可以较好得保留物料营养成分、色泽和酥脆度,并因其具有环保、节能、非油炸等优点而得到广泛关注^[3-4],该方法在苹果加工产品上也得到了良好的推广应用^[5-6]。

黄桃果肉水分含量高、质地柔软,细胞壁较薄,经压差膨化脱除水分后细胞结构易坍塌,较难形成不回缩骨架结构,会造成黄桃脆片膨化率低、硬度大、酥脆性差等问题。目前常常通过浸渍、烫漂、冻融等预处理方式来改善果蔬脆片的质地^[7-10]。蔗糖、柠檬酸等浸渍预处理可以使果肉形成较多且均匀的小孔结构,改善细胞组织结构^[11-13],同时可以调节产品口味、改善色泽^[14-15]。另外磷酸盐与柠檬酸共同对果蔬进行浸渍处理,磷酸盐、柠檬酸与细胞壁交联,进而改变果蔬脆片的质地^[16-17]。但是蔗糖、柠檬酸、磷酸盐是否具有协同改善黄桃脆片质的作用还未见报道。

本研究拟通过对蔗糖、柠檬酸和磷酸二氢钠单独或同时浸渍处理,对压差膨化干燥后黄桃脆片的质地、细胞壁组分、微观结构和孔隙特性进行检测分析,为提高黄桃脆片加工品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄桃品种为锦绣,采摘自江苏省农业科学院桃圃。所用试剂包括蔗糖(食品级)、柠檬酸(食品级)、磷酸二氢钠(食品级)、无水乙醇、三氯甲烷、甲醇、氢氧化钾、无水碳酸钠等。

1.2 仪器与设备

QDPH-5 型电加热式压差膨化设备购自天津市

勤德新材料科技有限公司;BS224S 电子分析天平购自北京赛多利斯科学仪器有限公司;101A-2 型电热鼓风干燥箱购自上海浦东荣丰科学仪器有限公司;A-11-B-S025 型研磨机购自艾卡(广州)仪器设备有限公司(IKA 中国);TDL-5-A 低速台式大容量离心机购自上海安亭科学仪器厂;CT3 25K 型质构仪购自美国博勒飞公司;AutoPore TM IV 系列自动汞孔隙率计购自麦克默瑞提克(上海)仪器有限公司;EVO-LS10 扫描电子显微镜购自德国卡尔-蔡司公司。

1.3 黄桃片加工工艺

将黄桃洗净、去皮、去核后,将果肉切成厚度为 1 cm 的黄桃片,烫漂 40 s,烫漂后冷冻。黄桃片解冻后,用不同浸渍溶液真空浸渍 40 min,浸渍后的黄桃片于 70 ℃热风干燥箱内进行预干燥,使其达到一定的含水量,放于冷藏室内均湿一夜。将均湿后的黄桃片放入压差膨化罐中进行膨化,膨化温度 105 ℃,压力 0.2 MPa,真空干燥温度 70 ℃。

1.4 黄桃片处理

1.4.1 单一处理 单一蔗糖溶液处理:用质量分数 5%、10%、15%、20%、25%蔗糖溶液分别浸渍处理黄桃片,再进行压差膨化干燥。单一柠檬酸溶液处理:用质量分数 0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%柠檬酸溶液分别浸渍处理黄桃片,再进行压差膨化干燥。单一磷酸二氢钠溶液处理:用质量分数 0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%磷酸二氢钠溶液分别浸渍处理黄桃片,再进行压差膨化干燥获得黄桃脆片样品。

1.4.2 复合处理 根据单一处理结果进一步采用响应面优化法^[18]以获得最佳处理条件。选取 24%蔗糖、2.0%柠檬酸和 2.0%磷酸二氢钠,进行如下 4 个处理,A 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B 处理:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C 处理:2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。黄桃片分别浸渍处理后,再进行压差膨化干燥获得黄桃脆片样品。

1.5 试验方法

1.5.1 质地特性指数测定 用质构仪测定各处理黄

桃脆片的硬度和脆性,为说明压差膨化条件对脆片质构特性的影响,引入质构特性指数(Te)。公式如下:

$$Te = \frac{\sqrt{K^2 - S^2 - W^2}}{H}$$

式中, H 为硬度(g), S 为破裂距离(mm), K 为脆性斜率(g/s), W 为脆裂用功(g·s)。

1.5.2 细胞壁组分测定 参考刘佳新^[19]的方法提取各处理黄桃脆片水溶性果胶、整合性果胶、碱溶性果胶、半纤维素和纤维素,果胶含量测定采用咔唑比色法,纤维素含量测定采用蒽醌比色法。每个处理进行 3 次重复测定。

1.5.3 微观结构 运用扫描电子显微镜观察黄桃脆片的微观结构,加速电压为 10 kV,放大倍数为 50。

1.5.4 孔隙特性测定 将黄桃脆片放入压汞仪中,测定黄桃脆片的孔隙大小和孔隙率^[17]。

1.6 数据分析

利用 SPSS 26.0 软件进行显著性分析($P < 0.05$),利用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 蔗糖对黄桃脆片力学性质的影响

如表 1 所示,当蔗糖含量为 5%~20%,随着蔗糖含量的增加,黄桃脆片的硬度显著增加($P < 0.05$)。

20%蔗糖处理的黄桃脆片硬度达到最大,和对照无显著差异($P > 0.05$)。25%蔗糖处理的黄桃脆片硬度较 20%蔗糖处理显著降低($P < 0.05$)。这可能是因为随着蔗糖含量的增加,蔗糖分子渗透到组织中,增加了可溶性固形物的含量,使结构致密,导致硬度增加^[20-21]。但当蔗糖达到一定含量,由于渗透和扩散的动态平衡,黄桃组织脱水,组织内部可溶性固形物溶出,黄桃组织的可溶性固形物含量降低,硬度下降^[22-24]。

20%蔗糖处理的黄桃脆片破裂距离显著低于 0%、5%、10%、15%和 25%蔗糖处理($P < 0.05$)。20%蔗糖处理的黄桃脆片脆裂用功显著低于 0%、5%、10%、15%和 25%蔗糖处理($P < 0.05$)。20%蔗糖处理的黄桃脆片脆性斜率显著高于 0%、5%、10%、15%和 25%蔗糖处理($P < 0.05$)。20%蔗糖处理的黄桃脆片质地特性指数显著高于 0%、5%、10%、15%和 25%蔗糖处理($P < 0.05$)。可见当蔗糖含量为 20%,黄桃脆片破裂距离和脆裂用功均最小,分别为 2.09 mm、169.96 g·s,脆性斜率最大,为 12 572.88 g/s,此时黄桃片脆性最好。当蔗糖含量为 20%,黄桃脆片质地特性指数最大,为 0.43。该试验结果表明,蔗糖可以渗入黄桃片内部,使可溶性固形物与水分子的交互作用增强,增加黄桃片的组织强度,形成蓬松多孔结构^[25-27]。

表 1 不同含量蔗糖处理的黄桃脆片力学性质

Table 1 Mechanical properties of yellow peach chips treated with different contents of sucrose

蔗糖含量 (%)	硬度 (g)	破裂距离 (mm)	脆裂用功 (g·s)	脆性斜率 (g/s)	质地特性指数
0	29 449.23±425.15a	2.92±0.10a	245.67±8.82b	6 309.86±115.37e	0.32±0.01d
5	18 968.05±178.22e	2.84±0.29b	247.66±21.67a	7 313.48±157.23e	0.32±0.01d
10	19 754.31±124.21d	2.44±0.11e	199.46±19.56d	9 473.09±115.72b	0.36±0.01c
15	24 215.08±98.17c	2.79±0.16c	176.19±18.66e	8 078.77±134.66d	0.38±0.02b
20	29 015.41±167.19a	2.09±0.14f	169.96±23.15f	12 572.88±177.24a	0.43±0.01a
25	28 253.23±162.21b	2.74±0.17d	204.79±26.11c	8 954.01±217.23c	0.34±0.01c

同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 柠檬酸对黄桃脆片力学性质的影响

如表 2 所示,0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%柠檬酸处理黄桃脆片硬度均较对照显著降低($P < 0.05$),柠檬酸处理后黄桃脆片硬度仅为对照的 14.96%~21.93%。并且,随着柠檬酸含量的增加,黄桃脆片的硬度显著降低($P < 0.05$)。1.5%柠檬酸

处理黄桃脆片破裂距离最大,为 2.80 mm。2.5%、3.5%、4.5%柠檬酸处理黄桃脆片脆裂用功差异不显著($P > 0.05$)。0.5%柠檬酸处理的黄桃脆片脆性斜率显著高于 1.5%、2.5%、3.5%、4.5%柠檬酸处理($P < 0.05$)。当柠檬酸含量为 0 时,黄桃脆片性斜率最高,为 6 309.86 g/s。当柠檬酸含量为 0~3.5%,

随着柠檬酸含量的增加,黄桃脆片的质地特性指数显著增加 ($P<0.05$)。当柠檬酸含量为 3.5% 和 4.5%,黄桃脆片质地特性指数均最大,为 0.46。3.5% 柠檬酸处理和 4.5% 柠檬酸处理黄桃质地特性

指数无显著差异 ($P>0.05$)。可能是因为随着柠檬酸含量增大到一定范围,破坏了黄桃细胞壁中的纤维素结构,使其在压差膨化后内部产生大孔隙结构,黄桃脆片的酥脆性增加^[28]。

表 2 不同含量柠檬酸处理的黄桃脆片力学性质

Table 2 Mechanical properties of yellow peach chips treated with different contents of citric acid

柠檬酸含量 (%)	硬度 (g)	破裂距离 (mm)	脆裂用功 (g·s)	脆性斜率 (g/s)	质地特性指数
0	29 449.23±425.15a	2.92±0.10a	245.67±8.82a	6 309.86±115.37a	0.32±0.01e
0.5	6 458.49±109.16b	2.25±0.15d	82.95±25.78b	3 061.05±99.32b	0.34±0.01d
1.5	5 447.38±121.23c	2.80±0.17b	79.54±27.63c	1 916.10±89.23d	0.35±0.01c
2.5	4 573.22±88.13d	2.33±0.08c	62.80±19.78d	1 944.26±79.48d	0.44±0.00b
3.5	4 499.17±97.06e	1.76±0.13f	62.54±22.21d	2 547.66±102.01c	0.46±0.01a
4.5	4 406.21±110.37f	1.89±0.12e	62.38±11.34d	2 573.35±77.65c	0.46±0.01a

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 磷酸二氢钠对黄桃脆片力学性质的影响

如表 3 所示,1.5%磷酸二氢钠处理的黄桃脆片硬度较 0.5%磷酸二氢钠处理显著降低 ($P<0.05$)。当磷酸二氢钠含量为1.5%~4.5%,随着磷酸二氢钠含量的增加,黄桃脆片硬度显著增加 ($P<0.05$)。当磷酸二氢钠含量为 1.5%时,黄桃脆片的硬度最低,这可能是由于当磷酸二氢钠含量较低时可催化柠檬酸与细胞壁的反应,促进反应的进行,使其硬度降低^[19]。但当磷酸二氢钠达到一定含量,浸渍处理液的粘度增大,组织内部填充物粘连性变大,使其硬度上升^[29]。2.5%磷酸二氢钠处理的黄桃脆片破裂距离、脆裂用功显著低于 0、0.5%、1.5%、3.5%、4.5%蔗糖处理 ($P<0.05$),质地特性

指数显著高于 0、0.5%、1.5%、3.5%、4.5%蔗糖处理 ($P<0.05$)。当磷酸二氢钠含量为 2.5%,破裂距离和脆裂用功最低,分别为 2.28 mm 和 44.22 g·s。1.5%磷酸二氢钠处理的黄桃脆片脆性斜率显著低于 0、0.5%、2.5%、3.5%、4.5%磷酸二氢钠处理 ($P<0.05$),质地特性指数显著高于 0、0.5%、2.5%、3.5%、4.5%磷酸二氢钠处理 ($P<0.05$)。当磷酸二氢钠含量为 1.5%,黄桃脆片脆性斜率最低,为1 826.23 g/s。当磷酸二氢钠含量为 2.5%时,黄桃脆片的质地特性指数最大。可见磷酸二氢钠含量为 2.5%时,黄桃脆片的质地最好,此时其硬度适中,口感更加酥脆,更容易被人们接受。

表 3 不同含量磷酸二氢钠处理的黄桃脆片力学性质

Table 3 Mechanical properties of yellow peach chips treated with different contents of sodium dihydrogen phosphate

磷酸二氢钠含量 (%)	硬度 (g)	破裂距离 (mm)	脆裂用功 (g·s)	脆性斜率 (g/s)	质地特性指数
0	29 449.23±425.15a	2.92±0.10a	245.67±8.82a	6 309.86±115.37a	0.32±0.01e
0.5	4 631.21±101.31e	2.38±0.22d	53.75±14.26e	1 921.66±103.12e	0.41±0.01b
1.5	4 302.08±57.17f	2.32±0.18e	54.80±27.35d	1 826.23±78.23f	0.42±0.01b
2.5	7 868.41±75.19d	2.28±0.27f	44.22±19.97f	2 605.31±81.44d	0.43±0.00a
3.5	12 186.26±121.22c	2.69±0.19c	141.51±18.34b	4 352.14±63.78b	0.36±0.01c
4.5	12 815.15±105.21b	2.87±0.17b	133.44±23.16c	4 300.40±54.38c	0.34±0.01d

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 复合处理对黄桃脆片力学性质的影响

由表 4 可知,与 CK 相比,复合处理 (A、B、C、D) 的黄桃脆片硬度均显著降低 ($P<0.05$),其中 D 处理黄桃脆片的硬度最大,D 处理与 B 处理黄桃脆片

的硬度无显著差异 ($P>0.05$),C 处理黄桃脆片硬度最低,为8 956.25 g。对比发现,添加蔗糖的 A 处理、B 处理、D 处理黄桃脆片硬度显著大于未添加蔗糖的 C 处理。这可能是由于在脱水过程中黄桃脆片

细胞组织结构中的羟基与蔗糖相互作用,使组织结构连接紧密,硬度变大^[30-31];同时水分流失使糖液结晶析出并吸附在组织内部或者迁移到表面形成硬壳^[31-32]。B 处理、C 处理黄桃脆片破裂距离与 CK 相比无显著差异($P>0.05$),A 处理、D 处理黄桃脆片破裂距离显著低于 B 处理、C 处理($P<0.05$)。其中 D 处理黄桃脆片破裂距离最小,为 2.52 mm。B 处理黄桃脆片的脆裂用功最大,显著高于 CK、A 处理、C 处理、D 处理($P<0.05$)。C 处理黄桃脆片的脆裂用功最小,显著低于 CK、A 处理、B 处理、D 处理($P<0.05$)。D 处理黄桃脆片的脆性斜率最大,显

著高于 CK、A 处理、B 处理、C 处理($P<0.05$)。C 处理黄桃脆片的脆性斜率最小,显著低于 CK、A 处理、B 处理、D 处理($P<0.05$)。B 处理黄桃脆片质地特性指数和 CK 相比无显著差异($P>0.05$)。A 处理和 D 处理黄桃脆片质地特性指数最大,为 0.36。有研究表明,磷酸二氢钠可作为催化剂,加快柠檬酸与细胞壁的反应速率^[26]。由此可见,蔗糖与柠檬酸复合处理可以明显改善黄桃脆片的质地,并且在加入少量磷酸二氢钠后,三者复合处理对黄桃脆片质地改善的效果更佳。

表 4 复合处理下黄桃脆片的力学性质

Table 4 Mechanical properties of yellow peach chips under different treatments

处理	硬度 (g)	破裂距离 (mm)	脆裂用功 (g·s)	脆性斜率 (g/s)	质地特性指数
CK	29 449.23±425.15a	2.92±0.10a	245.67±8.82c	6 309.86±115.37d	0.32±0.01c
A	20 388.15±951.24c	2.62±0.10b	268.07±4.96b	7 156.77±165.12c	0.36±0.01ab
B	27 622.42±324.13b	2.94±0.10a	329.83±8.10a	8 651.54±268.43b	0.31±0.01c
C	8 956.25±102.16d	2.83±0.10a	129.53±5.06d	3 099.18±131.58e	0.34±0.01b
D	27 945.38±910.19b	2.52±0.10b	252.57±8.90c	10 409.36±212.64a	0.36±0.02a

CK:空白对照;A:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C:2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 复合处理对黄桃脆片细胞壁组分的影响

如表 5 所示,与 CK 相比,A 处理、B 处理、C 处理、D 处理黄桃脆片水溶性果胶含量均显著提高($P<0.05$),其中 A 处理黄桃脆片水溶性果胶含量最高。与 CK 相比,A 处理、B 处理、D 处理黄桃脆片螯合性果胶含量显著降低($P<0.05$),这可能是由于在处理过程中有一部分螯合性果胶转变为水溶性果胶。同时添加了蔗糖和磷酸二氢钠的 B 处理、D 处理黄桃脆片碱溶性果胶含量显著高于 A 处理、C 处理($P<0.05$)。结合表 4,碱溶性果胶含量越高黄桃脆片硬度越大,碱溶性果胶的含量在一定程度上决定了黄桃脆片的硬度^[33-34]。

如表 5 所示,与 CK 相比,A 处理、B 处理、C 处理、D 处理黄桃脆片半纤维素含量显著增加($P<0.05$),纤维素含量显著降低($P<0.05$),这可能是由于在处理过程中纤维素发生破碎和溶胀,释放出少量组分。可以看出 B 处理黄桃脆片纤维素含量最低,C 处理和 D 处理黄桃脆片纤维素含量无显著差异($P>0.05$)。A 处理黄桃脆片半纤维素含量最高,为 27.89 mg/g,D 处理半纤维素含量最低,为

24.90 mg/g,并且 B 处理、C 处理、D 处理黄桃脆片半纤维素含量无显著差异($P>0.05$)。这可能是由于柠檬酸对半纤维素的提取有促进作用,由于酸介质的加入样品发生润胀,使样品的半纤维素和纤维素内部的氢键结构减弱,半纤维素含量提高^[35]。同时磷酸二氢钠可以催化柠檬酸与细胞壁的交联,使纤维素之间的聚合度下降,还原性末端增多,加速交联反应,从而提高细胞壁的稳定性,使纤维素不易于被提取出来^[26]。同时蔗糖会与纤维素发生水合反应,从而抑制干燥过程中纤维素网络结构的降解^[36]。

2.6 复合处理对黄桃脆片微观结构的影响

图 1 为复合处理后压差膨化的黄桃脆片外观与扫描电镜图,可以看出,CK 黄桃脆片空隙坍塌情况严重,A 处理和 D 处理黄桃空隙均匀,膨化效果较好。从扫描电镜图可以看出,复合处理后黄桃脆片组织微观结构与 CK 相比有明显差异。从图 1b 可以看出,CK 黄桃脆片细胞间出现了皱缩的情况,并且皱缩程度不均匀,使黄桃脆片成品结构塌陷,边缘较硬。与 CK 相比,复合处理后黄桃脆片细胞间孔

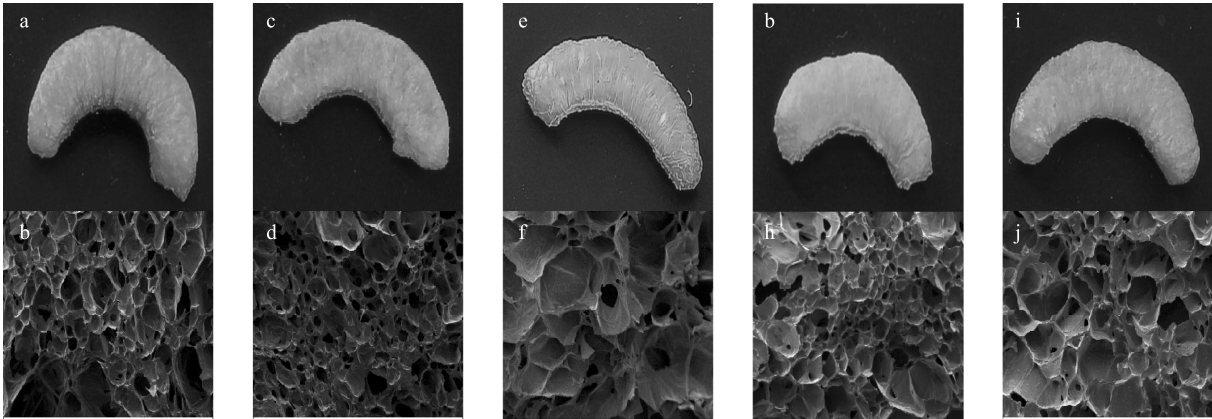
隙排列相对均匀,黄桃脆片质地有较大改善。与 A 处理相比,添加了磷酸二氢钠的 D 处理黄桃脆片细胞间孔隙更大,孔隙较为均匀,细胞间较为平滑,组织形态更紧实。与 B 处理相比,添加了柠檬酸的 A 处理、C 处理、D 处理黄桃脆片细胞组织结构的孔隙结构更大,大小均匀,细胞结构更加清晰。可以看出,未添加蔗糖处理的黄桃脆片细胞间孔隙较大且

不均匀,细胞壁较薄,容易发生塌陷。蔗糖可以填充细胞基质,减小收缩的冲击力,形成小而均匀的孔隙,减少结构坍塌^[37-38]。其中 D 处理的黄桃脆片孔隙相对均匀,孔隙边界清晰,排列相对规则,细胞壁的厚度适中,呈现出很好的蜂窝状结构,说明产品质地酥脆并保持着较好的形态结构,是最佳处理。

表 5 复合处理下黄桃脆片的细胞壁组分
Table 5 Cell wall components of yellow peach chips under different treatments

处理	水溶性果胶含量 (mg/g)	螯合性果胶含量 (mg/g)	碱溶性果胶含量 (mg/g)	纤维含量 (mg/g)	半纤维含量 (mg/g)
CK	64.66±2.95d	21.73±1.59a	78.85±2.65a	94.51±2.35a	19.52±2.45c
A	82.45±3.41a	17.67±1.79b	72.67±1.38c	90.83±1.71b	27.89±1.67a
B	81.35±2.95a	15.91±2.45c	75.53±2.57b	78.90±2.68d	25.59±1.47b
C	76.82±3.71b	21.02±1.47a	67.97±1.71d	86.78±2.80c	26.24±2.65ab
D	69.61±2.33c	17.57±1.65b	75.32±2.44b	87.54±1.93c	24.90±1.67b

CK:空白对照;A:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C:2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。



a、b 为 CK 黄桃脆片外观与扫描电镜图;c、d 为 A 处理黄桃脆片外观与扫描电镜图;图 e、f 为 B 处理黄桃脆片外观与扫描电镜图;图 g、h 为 C 处理黄桃脆片外观与扫描电镜图;图 i、j 为 D 处理黄桃脆片外观与扫描电镜图。CK:空白对照;A 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B 处理:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C 处理:2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。

图 1 复合处理下黄桃脆片外观及扫描电镜图(×50)

Fig.1 Appearance and scanning electron micrographs of yellow peach chips under different treatments (×50)

2.7 复合处理处理对黄桃脆片孔隙结构的影响

孔隙率影响材料的物理和机械性能,是影响干燥食品质地的关键指标^[39]。各处理黄桃脆片的孔隙率如表 6 所示,D 处理黄桃脆片总孔容最大,为 2.54 ml/g;C 处理黄桃脆片总孔容最小,为 1.19 ml/g。A 处理、C 处理和 D 处理的黄桃脆片总孔面积显著大于 CK、B 处理($P<0.05$)。A 处理、B 处理、C 处理、D 处理的黄桃脆片平均孔直径均显著大

于 CK ($P<0.05$),其中 C 处理的黄桃脆片平均孔直径最大。并且 C 处理的黄桃脆片表观密度显著高于 CK、A 处理、B 处理、D 处理($P<0.05$)。孔隙率为孔隙体积与黄桃脆片体积的比值,A 处理、C 处理、D 处理的黄桃脆片孔隙率均显著高于 CK ($P<0.05$),B 处理的黄桃脆片孔隙率与 CK 相比无显著差异($P>0.05$),D 处理的黄桃脆片孔隙率最大,为 88.14%。表明经过处理后,黄桃脆片的孔隙增多,

总孔容,孔面积与孔直径增大,口感更加酥脆,本结论与扫描电镜图片结果一致。

表 6 不同处理黄桃脆片的孔隙特性

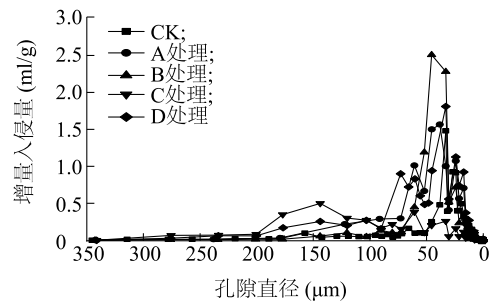
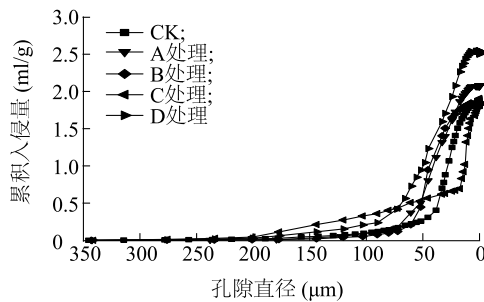
Table 6 Pore characteristics of yellow peach chips under different treatments

处理	总孔容 (ml/g)	总孔面积 (m ² /g)	平均孔直径 (nm)	表观密度 (g/ml)	孔隙率 (%)
CK	1.84±0.12c	0.46±0.03b	18 667.54±756.89d	0.48±0.04b	80.58±3.24d
A	2.08±0.11b	0.70±0.01a	27 397.69±1069.32c	0.37±0.04c	84.65±2.18b
B	1.85±0.12c	0.41±0.04b	33 904.40±1479.28b	0.44±0.01b	80.65±3.19d
C	1.19±0.09d	0.68±0.02a	54 639.27±973.32a	0.59±0.05a	81.93±1.48c
D	2.54±0.07a	0.74±0.04a	35 074.18±783.96b	0.35±0.03c	88.14±3.37a

CK:空白对照;A:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C:2%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 2A 表示汞累积入侵量,在汞入侵过程中,汞液会先入侵到孔径较大的孔隙中,然后入侵到孔径较小的孔隙中,汞累积入侵量是指压入黄桃脆片细胞间孔隙中汞的总量^[39]。可以看出,当孔径为80~250 μm,C 处理的黄桃脆片汞累积入侵量最大,这是因为 C 处理的黄桃脆片细胞之间的孔隙较大,酥脆度较好,所以汞累计入侵量较大。当孔径<80 μm,D 处理的黄桃脆片汞累积入侵量最大,其次是 B 处理。CK 的黄桃脆片汞累计入侵量较小,原因可能是未经过处理的黄桃脆片膨化后皱缩严重,细胞之间的孔隙较小。由此可见,经过复合处理的黄桃脆片酥脆质地较好,细胞间孔隙较小且结构均匀,此

结论与之前黄桃脆片的质地特性指数结果一致。图 2B 表示汞增量入侵量,汞增量入侵量是指压入黄桃脆片细胞间单一孔径孔隙汞的量。从图中可以看出,当孔径为100~200 μm,C 处理黄桃脆片孔隙中汞的增量入侵量较大,说明 C 处理黄桃脆片孔径较大的孔隙较多。当孔隙直径变小后,B 处理的黄桃脆片孔隙中汞的增量入侵量明显增大,原因可能是经过该处理的黄桃脆片孔隙致密,小孔径的孔隙较多。D 处理的黄桃脆片直径较小的孔隙(<80 μm)中汞的增量入侵量较多且均匀,说明黄桃脆片孔隙致密且均匀,酥脆适宜,口感较好。



CK:空白对照;A 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸;B 处理:24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠;C 处理:2%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠;D 处理:24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液。

图 2 不同处理黄桃脆片孔隙中汞累积入侵量和增量入侵量

Fig.2 Cumulative and incremental invasion of hydrargyrum in the pores of yellow peach chips under different treatments

3 结论

本研究对不同处理的黄桃脆片的质地、细胞壁组分、微观结构和孔隙结构进行了比较分析,结果发现,与对照相比,在单一柠檬酸处理中,随着柠檬酸

含量的升高,黄桃脆片质地特性指数逐渐上升。与对照相比,单一蔗糖处理黄桃脆片的硬度显著下降($P<0.05$);单一柠檬酸处理和单一磷酸二氢钠处理黄桃脆片的硬度、破裂距离和脆裂用功均显著下降($P<0.05$)。经复合处理后,A 处理(24%蔗糖+

2.0%柠檬酸)和D处理(24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液)黄桃脆片的质地特性指数最高。在所有复合处理中,A处理(24%蔗糖+2.0%柠檬酸)黄桃脆片的水溶性果胶含量、纤维素含量与半纤维素含量最高,D处理(24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液)黄桃脆片的水溶性果胶含量最低,B处理(24%蔗糖+2.0%磷酸二氢钠)黄桃脆片的螯合性果胶含量最低,C处理(2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠)黄桃脆片的碱溶性果胶含量最低。从微观结构可以看出,D处理(24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液)黄桃脆片的细胞孔隙均匀,边界清晰,细胞壁排列规则,呈现出蜂窝状结构。研究表明,添加蔗糖可固化细胞壁,柠檬酸可增大细胞孔隙,磷酸二氢钠可进一步促进两者的协同作用,使黄桃脆片结构更加整齐均匀。D处理(24%蔗糖+2.0%柠檬酸+2.0%磷酸二氢钠溶液)黄桃脆片的孔隙率最大,其次是A处理(24%蔗糖+2%柠檬酸),CK孔隙率最低。综上所述,糖酸可协同调控压差膨化黄桃脆片质地特性和孔隙结构,磷酸二氢钠可改善糖酸协同调控效果,本研究结果为提升黄桃脆片产品品质提供理论依据。

参考文献:

- [1] RICARDO L M, JADE V L. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 112-126.
- [2] AKHTARUZZAMAN M D, SHAKIL M D, SAZZAD-HOSSAIN M D, et al. OSMO-microwave drying of pineapple (*Ananas comosus*) slices: mass transfer kinetics and product quality characterization [J]. Asian Food Science Journal, 2022, 21(12): 63-77.
- [3] GONDEK E, JAKUBCZYK E, HERREMANS E, et al. Acoustic, mechanical and microstructural properties of extruded crisp bread [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(1): 132-139.
- [4] CARSANBA E, DUERRSCHMID K, SCHLEINING G. Assessment of acoustic/mechanical measurements for crispness of wafer products [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 229: 93-101.
- [5] CHANG H Y, VICKERS Z M, TONG C B. The use of a combination of instrumental methods to assess change in sensory crispness during storage of a "Honeycrisp" apple breeding family[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(2): 228-239.
- [6] WANG M, SUN Y, HOU J, et al. A comparison of food crispness based on the cloud model[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(1): 102-112.
- [7] AHMED I, QAZI I M, JAMAL S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 29-43.
- [8] WANG H O, FU Q Q, CHEN S J, et al. Effect of hot-water blanching pretreatment on drying characteristics and product qualities for the novel integrated freeze-drying of apple slices [J]. Journal of Food Quality, 2018: 1-12. DOI: 10.1155/2018/1347513.
- [9] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETANI H, et al. Improvements of drying rate and structural quality of microwave-vacuum dried carrot by freeze-thaw pretreatment[J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 100: 294-299.
- [10] CARRION C, MULET A, GARCÍA-PÉREZ A, et al. Ultrasonically assisted atmospheric freeze-drying of button mushroom. Drying kinetics and product quality[J]. Drying Technology, 2018, 36(15): 1814-1823.
- [11] TABTIANG S, PRACHAYAWARAKON S, SOPONRONNARIT S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices [J]. Drying Technology, 2012, 30(1): 20-28.
- [12] 张立彦, 芮汉明, 李作为, 等. 蔗糖对淀粉物料微波膨化的影响研究[J]. 食品工业科技, 2004, 22(3): 19-21.
- [13] 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.
- [14] 呼娜, 李路宁, 李雅松, 等. 磷酸酯板栗淀粉的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(7): 281-285.
- [15] DENG L Z, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(9): 223-245.
- [16] HE X Y, XIAO Z F, FENG X H, et al. Modification of poplar wood with glucose crosslinked with citric acid and 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy ethyleneurea[J]. Holzforschung, 2016, 70: 47-53.
- [17] LIU C H, ZHENG X Z, SHI J, et al. Optimising microwave vacuum puffing for blue honeysuckle snacks[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(3): 96-117.
- [18] GUO J, LIU C J, LIU J X, et al. Effect of sucrose and citric acid on the quality of explosion puffing dried yellow peach slices[J]. Drying Technology, 2022, 40(13): 2783-2793.
- [19] 刘佳新. 浸渍预处理调控黄桃膨化脆片质地结构的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [20] 谭礼斌. 果蔬多孔介质干燥热质传递及应力应变研究[D]. 咸阳: 陕西科技大学, 2017.
- [21] 黄宗海, 何新益, 王佳蕊, 等. 预处理方式对胡萝卜变温压差膨化干燥品质的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 124-126.
- [22] 张炎, 姚开, 贾冬英. 浸糖工艺对气流膨化苹果脆片的影响[J]. 食品与发酵科技, 2009, 45(2): 45-47.
- [23] 何新益, 黄宗海, 刘金福. 变温压差膨化干燥对大枣总黄酮和

- 水溶性糖含量的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 39(10): 100-103.
- [24] 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.
- [25] 李榆杨. 芒草细胞壁降解中的多糖变化和 NcPMO-2 在植物中功能探索[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [26] 张鹏飞, 吕健, 毕金峰, 等. 渗透脱水对变温压差膨化干燥桃片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(1): 69-76.
- [27] ŠEFC B, TRAJKOVIC J, MARIN H, et al. Dimensional stability of wood modified by citric acid using different catalysts[J]. Drvna Industrija, 2009, 60(1): 168-181.
- [28] 张绍阳, 李洪艳, 田亚容, 等. 沙子空心李果脯配方工艺优化[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(5): 119-122.
- [29] 刘春菊, 王海鸥, 刘春泉, 等. 预处理对气流膨化干燥黄桃丁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(3): 251-255.
- [30] 肖敏. 不同糖渗透处理和干燥方式对苹果脆片质构品质形成影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [31] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 117-123.
- [32] TABTIANG S, PRACHAYAWARAKON S, SOPONRONNARIT S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices[J]. Drying Technology, 2012, 30(1): 20-28.
- [33] 杜胜兰. 粉脆质地莲藕细胞壁组分差异及其影响因素的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [34] 张茂杰. 采用变温压差膨化技术开发红薯脆片的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013.
- [35] 刘艳汝. 共轭酸碱预处理体系下杨木细胞壁组分的降解、迁移及溶出规律[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017.
- [36] 车文博, 肖泽芳, 谢延军. 蔗糖与二羟甲基二乙烯脲浸渍压缩杨木单板的性能评价[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(8): 73-77.
- [37] LIU C, WANG H, NIU L, et al. Effect of sucrose regulation on microstructure and quality of air-expanded yellow peach chips[J]. Food Science, 2020, 41(11): 113-120.
- [38] PROTHON F, AHRN'E L, SJOHOLM I. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration; a critical review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2003, 43(4): 447-479.
- [39] YANG J, MARTIN A, RICHARDSON S, et al. Microstructure investigation and its effects on moisture sorption in fried potato chips[J]. Journal of Food Engineering, 2017, (214): 117-128.

(责任编辑: 成纾寒)