文章编号:0253-4339(2020) 03-0091-11
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.03.091

液氮速冻对火龙果块微生物和品质的影响研究

杨瑾莉　罗司嘉　丁皓玥　王永涛

(中国农业大学食品科学与营养工程学院　北京　100083)

摘　要　本文以火龙果块为原料,研究了-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃和-100 ℃喷淋式液氮速冻及-18 ℃冰箱缓冻处理对火龙果微生物和品质的影响,并筛选了最佳液氮速冻温度。结果表明:样品冻结速率随液氮速冻温度的降低而加快,冻结时间由 1.25 min 降至 0.367 min,但-100 ℃出现低温断裂现象;液氮速冻处理对样品的多酚氧化酶有抑制作用,其中,-80 ℃液氮速冻处理后样品的多酚氧化酶活性降至 47.27%,而缓冻处理后的酶活升高至 301.09%;相比于缓冻处理,液氮速冻处理后的样品的质构保持更好,其汁液流失率在 8.88%~10.50%之间,而缓冻处理则高达 38.29%;随着液氮速冻温度的降低,样品的可滴定酸、可溶性固形物、总酚、花色苷、抗坏血酸等品质保持更好。所以在不同温度液氮速冻处理中,-80 ℃对样品的品质保持最佳。

关键词　液氮速冻;火龙果块;品质
中图分类号:TS205.7;TB657.1　　**文献标识码**:A

Effect of Liquid Nitrogen Quick-Freezing on Biochemical Activity and Quality of Pitaya Blocks

Yang Jinli　Luo Sijia　Ding Haoyue　Wang Yongtao

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083, China)

Abstract　In this study, the effects of quick-freezing through spraying of liquid nitrogen (-40, -60, -80, and -100 ℃) and slow-freezing (-18 ℃) on microorganism biochemical activity and fruit quality were studied with pitaya (*Stenocereusgriseus* L) blocks as raw materials. The rate of freezing of the sample accelerated with decreasing freezing temperature, and the freezing time was reduced from 1.25 to 0.367 min as freezing temperature declined. However, the sample exhibited low temperature fracturing after quick-freezing at -100℃. The liquid nitrogen quick-freezing treatment inhibited the activity of polyphenol oxidase, and the residual activity of polyphenol oxidase decreased to 47.27% after -80℃ freezing, while it increased to 301.09% after the slow-freezing treatment. The texture of the sample after liquid nitrogen quick-freezing was better than that of the slow-freezing treatment and the rate of juice loss was between 8.88% and 10.50%. In contrast, the rate of juice loss was as high as 38.29% after the slow-freezing treatment. The content of titratable acid, soluble solids, total phenol, anthocyanin, and ascorbic acid increased with the decreased freezing temperature of liquid nitrogen. The -80℃ liquid nitrogen quick-freezing treatment maintained the best quality of the sample.

Keywords　liquid nitrogen quick-freezing; pitaya blocks; quality

火龙果属于仙人掌科,原产于墨西哥和中南美洲的热带地区,现主要种植于马来西亚、越南、泰国、菲律宾和我国台湾,分为红皮白肉种、黄皮白肉种、红皮紫红色肉种以及红皮红肉种四个品种[1]。红心火龙果富含花色苷、酚类、维生素以及各种矿物质元素,此外还含有一般植物少有的植物性白蛋白[2],具有较高的营养价值,市场前景广阔。但火龙果在运输、贮藏、销售期间,易腐败变质,致使其品质下降,因此火龙果原果短期内多利用气调[3]、涂膜[4]等方法进行保藏,而长时间保存则需将原果切分后再进行冷冻。在火龙果块冻结加工中,常用方法为-18 ℃缓慢冻结,但该方法形成的冰晶较大,对产品的结构破坏严重,造成汁液流失、营养损失、硬度下降等品质劣变。

液氮是冷冻剂的一种,同普通的氨和氟利昂冷冻相比较,沸点为-195.8 ℃的液氮冷冻食品的能力更强,效率更高。在液氮速冻过程中,环境与物料之间的温度梯度大,加快食品的热量流失速度,可以使食品在极短时间内通过最大冰晶生成带,形成的晶核较多且细小,而均匀分布的小冰晶不会改变食品组织结构[5]。此外,液氮来源广泛,无毒无害,呈惰性,在液氮速冻过程中食品与空气接触少,减少了氧化反应和酶促褐变的发生,与其它速冻技术相比,液氮速冻的

收稿日期:2019-05-27;修回日期:2019-08-15

食品的干耗小[6],更适合于果蔬的速冻加工。

本研究以红心火龙果块为原料,采用液氮速冻装备处理样品,并以-18 ℃冻结样品为对照,测定了火龙果液氮速冻的冻结特性,以及液氮速冻对样品微生物及 pH、汁液流失率、色泽、总酚、花色苷、抗坏血酸、质构等品质的影响,最终筛选出火龙果的最佳液氮速冻温度。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1)原料及预处理

红心火龙果,品种为"红太阳",产于越南,2018 年 4 月购于美廉美超市。选用新鲜、软硬适中的火龙果为试验原料,洗净去皮后切分成大小为 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 的块状。

2)主要仪器与设备

质构仪(TA-XT Plus),Stable Micro Systems 公司;超纯水器(CLXXUVFM2),英国 ELGA LabWater 公司;电热恒温培养箱(HWS-70B),天津市泰斯特仪器有限公司;数显恒温水浴锅(HH-4-XMTD-204),常州普天仪器制造有限公司;pH 计(PB-10),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;超净工作台(SW-CJ-20),苏州净化有限公司;电子天平(BSA822-CW),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;分析天平(BSA224S-CW),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;高压蒸汽灭菌锅(MLS-3 781 L-PC),松下健康医疗器械株式会社;离心机(CF16RXII0),Hitachi Koki Co.,Ltd;紫外可见分光光度计(UV-1800),岛津-GL 消耗品销售公司;紫外可见分光光度计(V-1800),尤尼柯(上海)仪器有限公司;恒 pH 电位滴定仪(751-GPD),瑞士万通公司;分光测色仪(Color Quest XE),Hunter Lab;阿贝折射仪(DR-A1),ATGO.CO., LTD;九阳打浆机(JYL-C50T),九阳股份有限公司;液氮速冻机(SD-H-100),科威嘉尼(北京)科技有限公司;温度记录仪(RC-4),江苏省精创电器股份有限公司。

1.2 液氮速冻和缓冻处理

液氮速冻处理:先将喷淋式液氮速冻机内的环境温度降到设定的温度(-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃和-100 ℃),再将火龙果块放进液氮速冻机内,单层平铺,待其中心温度降至-18 ℃时停止速冻。

缓冻处理:将切分好的火龙果块置于-18 ℃的冰箱中,单层平铺,待其中心温度降至-18 ℃停止冻结。

1.3 试验方法

冻结过程中通过液氮速冻机和温度记录仪记录下冻结过程中火龙果块中心温度的变化,并以时间为横坐标,温度为纵坐标做出冻结曲线,通过火龙果块冻结曲线得出其冻结速率(火龙果块中心温度从-1 ℃降至-5 ℃所需的时间)。仔细观察经不同液氮速冻温度冻结后火龙果块表面是否出现裂痕,判断是否出现低温断裂现象。冻结样品在 4 ℃冰箱中进行空气解冻,待其中心温度升至 4 ℃时视为解冻完成。解冻后立即检测各项指标。除汁液流失率和质构外,其余指标均将火龙果块匀浆后测定。

1)微生物检测

微生物的检测方法参照 GB4789.2—2016《食品微生物学检验菌落总数测定》[7]。

2)汁液流失率的测定

冻结样品在 4 ℃冰箱中进行空气解冻,待其中心温度升至 4 ℃时视为解冻完成,解冻时间约 3 h,解冻过程中温度波动范围为±1 ℃。分别称取火龙果块解冻前和解冻后的质量,根据公式计算其汁液流失率。

$$\text{汁液流失率}(\%)=\frac{(m_0-m_1)}{m_0}\times 100 \tag{1}$$

式中:m_0 为解冻前火龙果块的质量,g;m_1 为解冻后火龙果块的质量,g。

3)pH 值的测定

将火龙果块匀浆倒入 50 mL 的离心管中,在常温下用 pH 计进行测定,待读数稳定后记录读数。

4)可溶性固形物的测定

将火龙果块匀浆,用阿贝折射仪测定可溶性固形物(TSS,Total Soluble Solid),用蒸馏水调零后滴加 1~2 滴火龙果匀浆并记录读数。

5)色泽的测定

参考师萱等[8]的方法并略作修改。用色差仪进行测定,在室温下校正后设置参数:RSIN-镜面反射,面积为 0.375 英寸。将火龙果块匀浆倒入润洗后的比色皿中,测定样品的 L^*、a^*、b^* 值,ΔE 的计算公式为:

$$\Delta E=[(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2]^{1/2} \tag{2}$$

式中:ΔE 为总色差;L^*、a^* 和 b^* 为处理后火龙果匀浆的亮度值、红色值和黄色值;L_0^*、a_0^* 和 b_0^* 为处理前火龙果匀浆的亮度值、红色值和黄色值。

6)可滴定酸的测定

参考 Z. Lisiewska 等[9]的方法并略作修改,采用 pH 电位滴定仪进行测定,称取火龙果块匀浆 10 g 于烧杯中,稀释 10 倍后用 0.01 mol/L 的 NaOH 溶液将其滴定至 pH 8.1。

样品中的可滴定酸用柠檬酸的百分含量表示,计算公式为:

$$TA = \frac{C \times V \times K}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中：*TA* 为可滴定酸含量，%；*C* 为滴定所用的 NaOH 的浓度，0.01 mol/L；*V* 为滴定所用的 NaOH 的体积，mL；*K* 为折算系数（以苹果酸 0.067 计算）；*m* 为样品质量，g。

7）总酚的测定

总酚的提取参照 X. Cao 等[10] 的 Folin-Ciocalteu 试剂法，结果用每 100 g 火龙果所含的没食子酸的当量（mg）来表示。

总酚提取：称取 10 g 火龙果匀浆放于 20 mL 的无水甲醇中，4 ℃静置提取 30 min，然后在 4 ℃、12 000 g 下离心 10 min，取上清液备用。

样品测定：将火龙果块总酚提取液稀释两倍后，吸取 0.4 mL 稀释液与 2 mL 福林酚稀释液（福林酚：超纯水 = 1 ∶ 9）混合，室温下避光反应 1 h 后，加入 1.8 mL 质量分数为 7.5% Na_2CO_3 溶液，再避光反应 30 min，在 765 nm 处测定吸光值。

8）多酚氧化酶活性测定

多酚氧化酶活性（PPO，Polyphenol oxidase）测定参照 P. Lopez 等[11] 的方法并略作修改。称取 10 g 火龙果块匀浆，加入 0.2 mol/L、pH6.5 的磷酸缓冲液 30 g，混匀，4 ℃静置 1 h，再在 4 ℃、12 000 g 下离心 10 min，上清液即为 PPO 提取液。

样品测定：用磷酸缓冲液调零，加入 2 mL 0.07 mol/L 的邻苯二酚溶液和 1 mL PPO 提取液，立即在 420 nm 处测定吸光值随时间的变化曲线，时间间隔为 0.1 s，测定 30 s。曲线中最初的直线部分的斜率即为火龙果样品的 PPO 酶活。

9）抗氧化能力的测定

（1）• M 清除能力测定

• DPPH 清除能力测定参照 N. J. Miller 等[12] 的方法，并略作修改，提取液的制备同 7）。

• DPPH 溶液的配置：称取 0.1 001 g • DPPH 标准样品，用无水甲醇溶解并定容至 50 mL，吸取 2.8 mL 溶液并用无水甲醇定容 100 mL，最终配得浓度为 0.14 mmol/L 的 • DPPH 溶液。

样品测定：用无水甲醇调零，吸取 100 μL 火龙果样品提取液和 4 mL、0.14 mmol/L • DPPH 溶液，混匀，在常温下避光反应 45 min，在 517 nm 处测定吸光值。以 100 μL 无水甲醇加入到 4 mL、0.14 mmol/L • DPPH 溶液为对照。

Trolox 标准曲线的制作：用无水甲醇配置浓度为 100、200、400、600、800 和 1 000 μM 的 Trolox 标准溶液，分别吸取 100 μL 和 4 mL、0.14 mmol/L • DPPH 溶液，混匀，在常温下避光反应 45 min，在 517 nm 处测定吸光值，绘制出标准曲线。

（2）FRAP 铁还原能力的测定

FRAP 铁还原能力的测定参照 A. M. Aljadi 等[13] 的方法，并略作修改，提取液的制备同 7）。

TPTZ 工作液的制备：pH 3.6 的醋酸盐缓冲液，10 mmol/L 的 TPTZ 溶液（用 30 mmol/L 的盐酸配置），20 mmol/L 的 $FeCl_3$ 组成按体积比 10 ∶ 1 ∶ 1 配制而成。

样品的测定：将样品提取液稀释两倍，蒸馏水调零后，吸取 100 μL 样品稀释液和 4 mL 的 TPTZ 工作液混匀，在常温下避光反应 10 min，在 593 nm 处测定吸光值。

Trolox 标准曲线的制作：用无水甲醇配置浓度为 10、60、100、200、400 和 600 mmol/L 的 Trolox 标准溶液，分别吸取 100 μL 和 4 mL 的 TPTZ 工作液混匀，在常温下避光反应 10 min，在 593 nm 处测定吸光值，绘制标准曲线。

10）花色苷含量的测定

参照孙军涛等[14] 的方法：称取 10 g 火龙果块匀浆于 50 mL 离心管中，加入 15 mL 体积分数为 60% 的乙醇水溶液，在 45 ℃水浴锅中避光加热 50 min，然后在 4 ℃，7 700 g 下离心 10 min，上清液即为花色苷提取液，避光保存备用。配置 pH1.0 和 4.5 的缓冲液，吸取 300 μL 和 3 mL 缓冲液充分混合，避光平衡反应 90 min，然后分别在 525 nm 和 700 nm 处测定吸光值。

$$\text{花色苷含量} = \frac{[(A_{525} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{525} - A_{700})_{pH4.5}]}{\varepsilon \times l} \times MW \times DF \times 100 \quad (4)$$

式中：*MW* 为矢车菊-3-O-葡萄糖苷分子质量，449.2 g/mol；*DF* 为稀释倍数；*ε* 为摩尔吸收率，26 900 L/（cm · mol）；*l* 为比色皿光程，1 cm。

11）抗坏血酸含量的测定

测定方法参照 GB5009.86—2016《食品中抗坏血酸的测定》[15]。称取 10 g 火龙果匀浆，放入等量的草酸溶液，混匀，用草酸溶液定容至 100 mL。加入活性炭褪色后，在 4 ℃，12 000 g 下离心 10 min，吸取 10 mL 无色透明的上清液于 50 mL 锥形瓶中，用标定过的 2，6-二氯靛酚溶液滴定，直至溶液呈粉红色 15 s 不褪色为止。同时用草酸溶液做空白试验。

$$X = \frac{(V - V_0) \times T \times A}{m} \times 100 \quad (5)$$

式中：*X* 为样品中抗坏血酸的含量，mg/100 g；*V* 为滴定样品所用的 2，6-二氯靛酚溶液的体积，mL；V_0 为滴定草酸所用的 2，6-二氯靛酚溶液的体积，mL；*T*

为 2,6-二氯靛酚的滴定度;A 为稀释倍数;m 为样品质量,g。

12)质构的测定

参考张甫生[16]的方法:采用质构仪进行 TPA 测试,将 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 块状火龙果放在质构仪上,用 P/50 探头进行测定。将预压速率、下压速率和上行速率均设置成 1 mm/s,压缩比为 40%,时间间隔为 5 s,触发力为 5 g。

13)感官评价

参照刘娟等[17]的方法制定火龙果块感官评价表,评价过程按照 S. Min 等[18]的方法进行。由 19 名学生进行感官评价,按照火龙果块感官评分标准,采用百分制打分法对火龙果块的口感、颜色、质构和风味这四项指标进行打分。每个指标分数越高,代表对该项指标的嗜好性越强。用随机编号的一次性纸杯分装经不同处理后的火龙果块,分发给感官评价员,同时给每个感官评价员提供一瓶水以去除品尝不同样品间口中残留的味道。

表 1 火龙果块感官评价表

Tab.1 Sensory evaluation form of pitaya blocks

指标	标准	分数
口感(30 分)	入口细嫩,酸甜适宜	20~30
	较为细嫩,偏酸或偏甜	10~19
	缺乏细嫩感,过酸或过甜	1~9
色泽(20 分)	紫红色,表面光亮	15~20
	紫红色,表面黯淡	10~14
	色泽不均匀,颜色过深或过浅	1~9
质构(30 分)	丁状,形状规则,硬度高,无明显汁液流失	20~30
	丁状,发生形变,硬度变低,有轻微汁液流失	10~19
	丁状,形变严重,变软严重,汁液流失严重	1~9
风味(20 分)	特有的果香浓郁,持续时间长,入口清香,无异味	15~20
	果香较淡,持续时间较长,无异味	10~14
	香气不足或有异味,持续时间短	1~9

14)数据分析

所有试验进行两平行三重复,数据采用 IBM SPSS statistics 20.0 软件进行单因素 ANOVA 分析,并计算出标准偏差,结果以平均数±标准差表示;显著水平为 0.05,当 $p<0.05$ 时,表示存在显著性差异;用 Origin Pro8.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 液氮速冻温度对火龙果块冻结速率和低温断裂的影响

如图 1 所示,可以看出不同冻结温度下火龙果块冻结速率不同,随着冻结温度的降低,火龙果块冻结速率加快,通过最大冰晶生成带所需时间缩短,其中,缓冻、-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃及-100 ℃的冻结速率分别为 154.5、3、2、1 及 0.8 min。樊建等[19]在缓冻(-35 ℃)、-60 ℃、-80 ℃和-100 ℃液氮速冻下处理白灵菇,发现其冻结速率分别为 151、1.25、0.8 和 0.367 min,与本研究实验结果一致。温度越低,通过最大冰晶生成带时间越短,形成的冰晶越小,对样品结构的破坏也越小,越有利于保持产品的品质,但过低的温度却会引起低温断裂,因此在考虑冻结速率的同时也要避免出现低温断裂。

火龙果块经液氮速冻处理后的表面状态如图 2 所示,经-40 ℃、-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后的火龙果块表面没有出现明显裂痕,而-100 ℃液氮速冻处理后表面断裂纹明显,这可能是因为环境温度与火龙果块中心温度相差太大,表面迅速冻结成冰,使火龙果块内部水分由于相变引起的膨胀受到阻碍,导致其内部压力升高,最终产生低温断裂[20]。I. Mulyawanti 等[21]也发现芒果块(2 cm×2 cm×2 cm)在液氮中浸泡 50 s 后会发生低温断裂。

由于-100 ℃液氮速冻会使火龙果块发生低温断裂,因此后续研究不再涉及此温度。

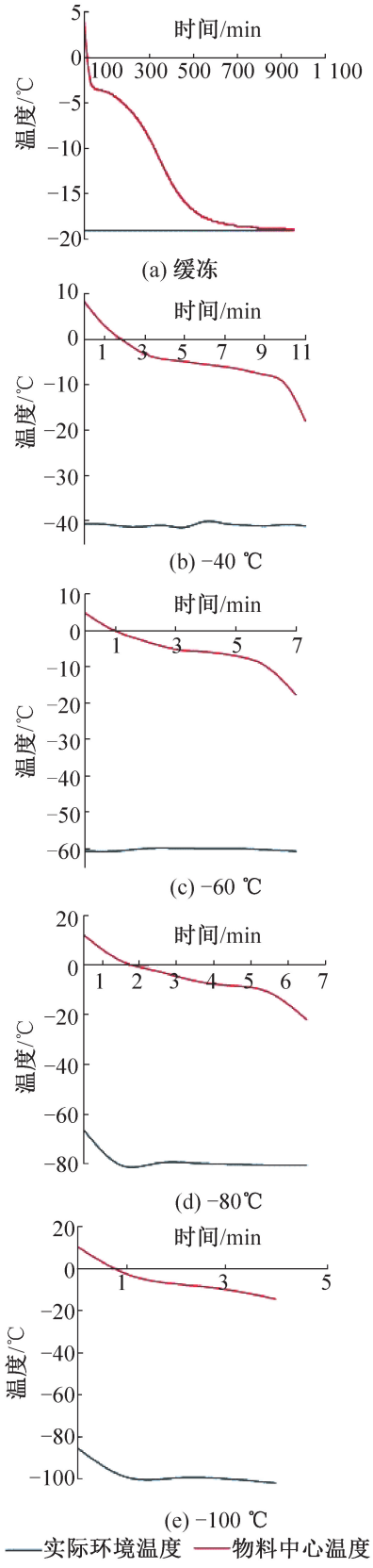


图 1 液氮速冻温度对火龙果块冻结速率的影响

Fig.1 The effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the freezing rate of pitaya blocks

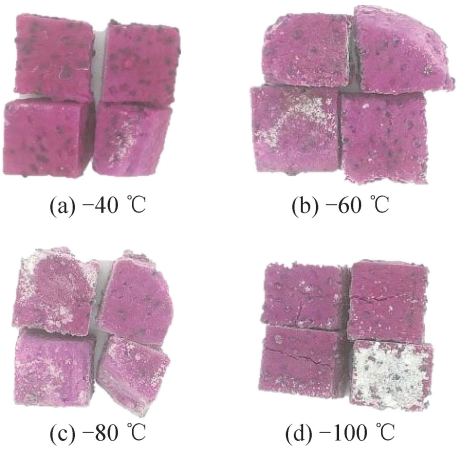


图 2 液氮速冻温度对火龙果块低温断裂的影响

Fig.2 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on low temperature fracture of pitaya blocks

2.2 液氮速冻温度对火龙果块菌落总数的影响

如图 3 所示,未处理组火龙果块的菌落总数为 5.11±0.04 lgCFU/g,经缓冻、-40 ℃、-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后的菌落总数分别为 5.10±0.09、5.12±0.04、4.91±0.02 和 4.86±0.06 lgCFU/g。结果表明缓冻和-40 ℃液氮速冻处理对样品中微生物没有显著的抑制效果,而-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理有显著抑制效果,且菌落总数随温度的下降而减少。该结果与方婷等[22]的研究结果一致,原因可能是低温会使微生物的蛋白质冻结变性,温度的回升不会使其活性得到恢复,相比之下,缓冻处理后仍有部分嗜冷微生物以较低的活性存活下来,所以当火龙果块解冻升温后,它们又会恢复生命力。

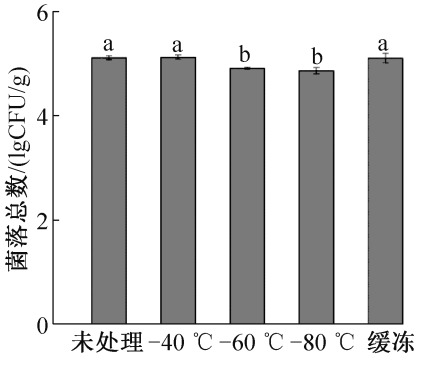


图 3 液氮速冻温度对火龙果块菌落总数的杀灭效果

Fig.3 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the inactivation of total aerobic bacteria (TAB) in pitayablocks

2.3 液氮速冻温度对火龙果块品质的影响

1)液氮速冻温度对汁液流失率的影响

液氮速冻温度对样品汁液流失率的影响如图 4

所示,-40 ℃、-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后样品的汁液流失率分别为 10.77%、8.91%和 8.34%,显著低于缓冻样品(38.43%),因为缓冻过程中形成的冰晶体积远大于液氮速冻中形成的,对细胞膜的破坏程度更严重,从而导致解冻后细胞膜通透性大大增加[23]。鲁珺[6]也发现带鱼和银鲳液氮速冻后的汁液流失率显著低于冰箱缓冻(-18 ℃)的,这与本研究结果相一致。此外,随着液氮速冻温度的降低,火龙果块的汁液流失率呈下降趋势,但变化不显著。

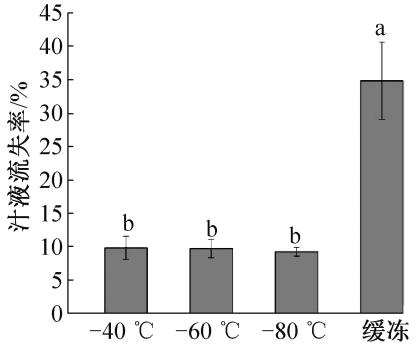


图 4 液氮速冻温度对火龙果块汁液流失率的影响

Fig.4 Effect of liquid nitrogen quick-freeze temperature on the juice loss rate of pitaya blocks

2)液氮速冻温度对 pH、TSS、可滴定酸和色泽的影响

如表 2 所示,未处理组样品的 pH、TSS 和可滴定酸分别是 4.94、15.97 °Brix 和 0.178%。与未处理组相比,液氮速冻和缓冻处理后样品的 pH 没有显著性变化,但经-40 ℃液氮速冻处理和缓冻处理后样品的 TSS 含量显著下降,该结果与 I. Mulyawanti 等[21]的结果相一致,即经液氮处理后的芒果片的 pH 没有显著性变化,而 TSS 含量显著下降。TSS 含量下降主要是因为冰晶破坏细胞结构,导致细胞膜通透性增加,解冻时部分溶质会伴随着汁液流出[23]。由图 4 和表 2 比较可知,液氮速冻和缓冻处理后的 TSS 变化趋势与汁液流失率相一致,崔静等[24]在研究中也发现经不同液氮速冻温度处理后,杨梅的 TSS 变化趋势和汁液流失率的变化一致,即随着液氮速冻温度的下降,汁液流失率下降,TSS 含量上升。

与未处理组相比,-80 ℃液氮速冻处理后样品可滴定酸含量没有显著性变化,其余处理组均发生显著性下降。可滴定酸含量发生变化主要有两个原因,一是因为冻结过程中形成的冰晶对细胞膜产生破坏作用,增大了细胞膜的通透性,使得可滴定酸在解冻过程中随着汁液流失;二是因为可滴定酸可作为细胞呼吸的底物,在解冻过程中仍存在着细胞呼吸作用,使可滴定酸发生降解[25]。王冉冉等[26]在研究过程中发现-20 ℃缓冻处理会使紫甘蓝的可滴定酸含量下降,这与本研究结果相一致。

表 2 液氮速冻温度对火龙果块 pH、TSS、可滴定酸的影响

Tab.2 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on pH, TSS, titrable acid of pitaya blocks

	pH	TSS/°Brix	可滴定酸/%
未处理	4.94±0.02^{ab}	15.97±0.15^{a}	0.178±0.003^{a}
-40 ℃	4.98±0.02^{a}	14.73±0.17^{b}	0.156±0.003^{c}
-60 ℃	4.97±0.02^{a}	15.77±0.12^{a}	0.167±0.006^{b}
-80 ℃	4.96±0.03^{a}	15.72±0.07^{a}	0.175±0.004^{a}
缓冻	4.92±0.01^{b}	14.43±0.33^{c}	0.163±0.004^{b}

注:同列数据标注不同小写字母表示显著性差异(P<0.05)。

表 3 液氮速冻温度对火龙果块色泽的影响

Tab.3 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature onthe color of pitaya blocks

	L^*	a^*	b*	ΔE
未处理	29.55±0.42^{ab}	9.34±1.57^{de}	-1.24±0.27^{a}	0
-40 ℃	29.56±0.28^{b}	11.49±0.83^{ab}	-1.47±0.21^{a}	2.19
-60 ℃	29.28±0.14^{b}	11.09±0.40^{bc}	-1.41±0.15^{a}	1.85
-80 ℃	29.48±0.16^{b}	12.36±0.86^{ab}	-1.29±0.16^{a}	3.03
缓冻	29.92±0.22^{a}	10.39±0.61^{cd}	-1.68±0.21^{b}	1.25

注:同列数据标注不同小写字母表示显著性差异(P<0.05)。

如表 3 所示,与未处理组相比,液氮速冻和缓冻处理后火龙果块的 L^* 值没有显著性变化,-40 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后火龙果块的 a^* 值显著上升,这可能是因为冻结过程中破坏了火龙果细胞结构,从而促进了火龙果呈色物质的溶出[23]。

经-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃液氮速冻处理和缓冻处理后火龙果块的 ΔE 分别为 2.19、1.85、3.03 和 1.25。其中,经-40 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后的 ΔE 超过 2,说明其颜色变化可肉眼分辨[27],由表 2 可知,-40 ℃和-80 ℃处理后的样品只有 a^* 值发生显著升高,说明样品颜色向更红转变,这可能是因为在冻结及解冻过程中促进了花色苷的溶出[25]。

3)液氮速冻温度对 PPO 酶活性的影响

如图 5 所示,液氮速冻处理后火龙果块中 PPO 活性明显受到抑制,其中,-40 ℃、-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后火龙果块中 PPO 酶活性分别降至 79.64%、63.58%和 47.27%,残余 PPO 酶活性随着液氮速冻温度的降低而下降。松茸经-60 ℃和-80 ℃液氮速冻处理后 PPO 酶活性也出现下降,且-80 ℃

液氮速冻处理后的 PPO 活性低于-60 ℃液氮速冻处理的,与本研究结果类似[28]。PPO 酶活性下降的原因可能是低温使得酶与底物分子的结合率降低,另外,冻结速率影响未冻结区域的大小及其溶质的浓度,进而影响到酶活力[29-30]。

缓冻处理后火龙果块的 PPO 酶活性上升,这可能是因为冻结过程中形成的冰晶较大,对细胞内部组织结构的破坏作用较大,使得部分结合态 PPO 游离为可溶性 PPO,从而使可溶性 PPO 活性上升[31]。PPO 酶活性上升加剧了样品的酶促褐变,使得样品的 a^* 值低于液氮处理组(表 3),也即缓冻处理样品的颜色更加暗红。

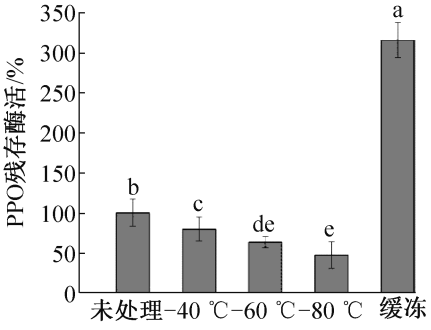


图 5 液氮速冻温度对火龙果块 PPO 的影响

Fig.5 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the PPO activity in pitaya blocks

4)液氮速冻温度对总酚、花色苷和抗坏血酸的影响

由图 6 可知,未处理火龙果块总酚、花色苷和抗坏血酸含量分别为 25.45 mg/100 g、5.19 mg/100 g 和 1.84 mg/100 g,经-40 ℃、-60 ℃和-80 ℃液氮速冻和缓冻处理后样品中总酚、花色苷和抗坏血酸含量均不同程度下降,其中总酚含量分别下降至 19.68 mg/100 g、20.67 mg/100 g、24.90 mg/100 g 和 20.00 mg/100 g,花色苷含量分别降至 4.77 mg/100 g、4.89 mg/100 g、5.15 mg/100 g 和 4.63 mg/100 g,抗坏血酸含量分别降至 0.74 mg/100 g、0.84 mg/100 g、1.28 mg/100 g 和 0.37 mg/100 g。由此可以看出,相比于缓冻,液氮速冻能更好地保存样品中的总酚、花色苷和抗坏血酸,且在不同液氮速冻处理中,-80 ℃的保存效果最好。郭蕴涵等[32]在研究中发现胡萝卜片经液氮速冻处理后总酚含量由 9.10 mg/100 g 降至 5.85 mg/100 g 下降,这与本研究结果类似;王远等[33]发现莲藕液氮速冻后维生素 C 损失率为 10%左右,显著低于-20 ℃冰箱冻结后的损失率(20%),这些与本研究结果类似。处理后总酚、花色苷和抗坏血酸含量的降低可能是样品冻结过程中形成的冰晶对细胞膜结构产生了破坏作用,使细胞膜通透性增加,部分水溶性酚类、花色苷和抗坏血酸在解冻过程中流失[34,35]。此外,解冻后样品中 PPO 活性依然存在,特别是缓冻处理后 PPO 活性还出现上升现象,这也会出现酶促反应,使作为底物的酚类和花色苷含量下降[36];而抗坏血酸含量的下降还可能是氧气存在导致的氧化分解[37]。

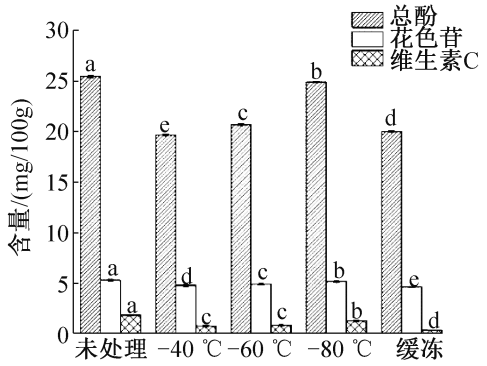


图 6 液氮速冻温度对火龙果块总酚、花色苷和维生素 C 的影响

Fig.6 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the total phenolics, anthocyanin and vitamin C in pitaya blocks

5)液氮速冻温度对抗氧化能力的影响

如图 7 所示,未处理组样品的 • DPPH 清除能力和 FRAP 铁还原能力分别为 0.86 和 0.62 mmol/kg,经-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃液氮速冻和缓冻处理后火龙果块的 • DPPH 清除能力分别降至 0.69、0.77、0.81 和 0.66 mmol/kg,FRAP 铁还原能力分别降至 0.24、0.35、0.53 和 0.27 mmol/kg,这与处理后的总酚、维生素 C 和花色苷的变化趋势相一致,可能是因为其具有抗氧化活性的物质如总酚、花色苷和维生素 C 等的含量降低导致其抗氧化能力下降。这与谭伟等[38]发现葡萄的抗氧化能力与其总酚、花青素和类

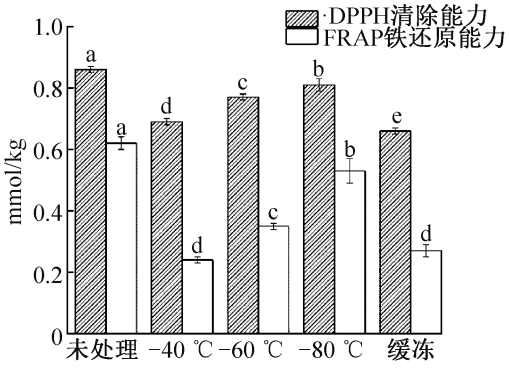


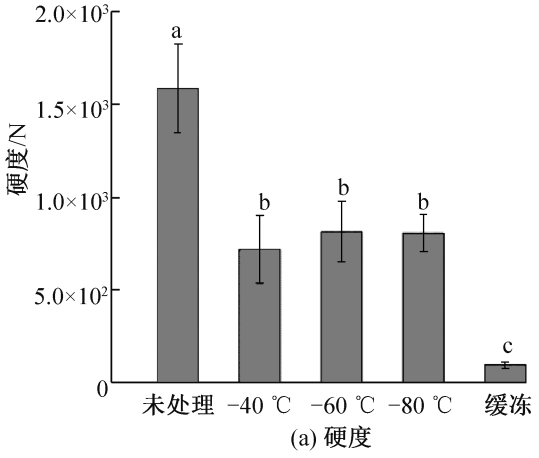
图 7 液氮速冻温度对火龙果块抗氧化能力的影响

Fig.7 Effects of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the antioxidant capacity of pitaya blocks

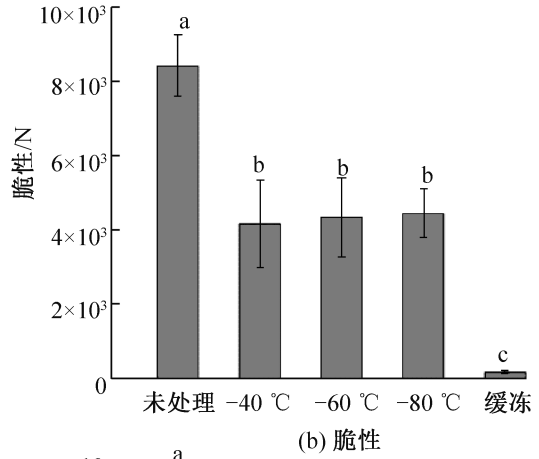
黄酮等的含量为显著正相关结果一致。张庆钢等[39]发现蓝莓经-30 ℃~-50 ℃液氮速冻处理后,其·DPPH 清除能力和 FRAP 还原能力降低,这与本研究结果一致。

6)液氮速冻温度对质构的影响

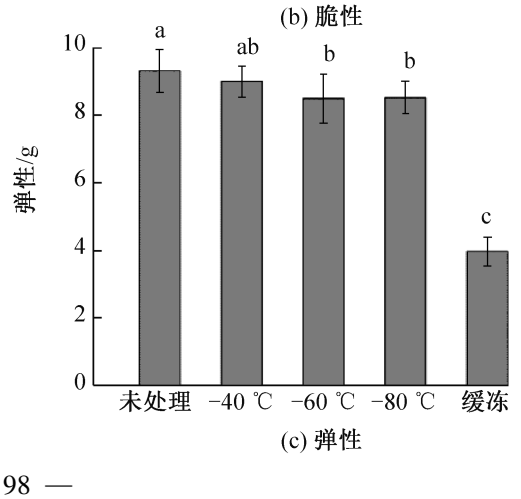
由图 8 可见未处理组样品的硬度为 1583.72 N,经-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃液氮速冻和缓冻处理后分别降低到 718.13、813.30、805.28 和 96.89 N。发生该现象的原因可能是冻结过程中冰晶对细胞组织结构产生破坏作用,解冻后随着汁液流失软化,导致这些质构指标发生显著性下降[23]。何全光[40]发现不同品种的芒果在液氮中浸泡 30 s 后硬度下降率在 35%~50%之间,这与本研究结果一致。从图中还可以看出,相比于缓冻处理,液氮速冻处理要更好地保持了样品的硬度、脆性、弹性和咀嚼度,这一结果也在感官评价中得到了验证,液氮速冻样品拥有更高的质构得分(表 3)。王远[33]也发现液氮速冻后莲藕脆度下降率为 15%,而-20 ℃冰箱缓冻后的下降率为 30%,两者差异显著。



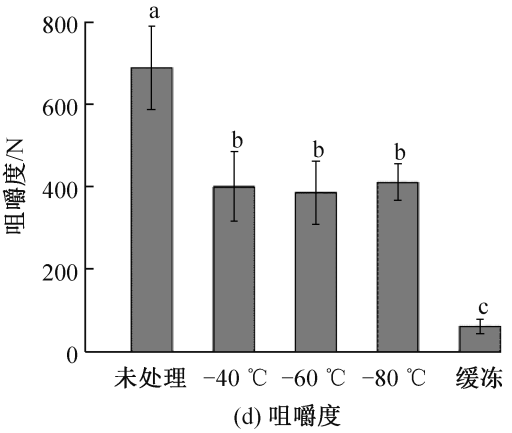
(a) 硬度



(b) 脆性



(c) 弹性



(d) 咀嚼度

图 8 液氮速冻温度对火龙果块质构的影响

Fig.8 Effect of liquid nitrogen quick-freezing temperature on the texture of pitaya blocks

7)液氮速冻处理对感官品质的影响

样品解冻完成后,立即进行感官评价,结果如表 4 所示。从表中可以看出,颜色方面,液氮速冻处理组得分与未处理组和缓冻处理组均无显著性差异,但缓冻处理组得分为 13.89,与未处理组(17.74)有显著性差异;口感和风味方面,液氮速冻处理组得分显著高于缓冻处理组,与未处理组无显著性差异;质构方面,液氮速冻处理组和缓冻组得分都显著低于未处理组,但液氮速冻处理组得分显著高于缓冻处理组,这与质构结果相一致;总分方面,液氮速冻处理组和未处理组之间没有显著性差异,并显著高于缓冻组。因此,可以看出液氮速冻处理能更好地保存火龙果块的感官品质,这与张庆钢等[41]的研究结果相一致,即液氮速冻后的蓝莓在硬度和外观品质等指标上均优于冰箱缓冻处理组。

3 结论

本文通过喷淋式液氮速冻装置,研究了不同温度(-40 ℃、-60 ℃、-80 ℃和-100 ℃)液氮速冻处理对火龙果块微生物和品质的影响,发现相比于传统缓冻处理,液氮速冻的冻结速率更高,形成的冰晶更细小,对火龙果块细胞结构破坏更少,汁液流失率更低,因此能更好保持样品的总酚、花色苷、维生素 C、抗氧化

表 4 液氮速冻温度对火龙果块感官评价的影响

Tab.4 Effects of liquid nitrogen quick-freezing temperature on sensory evaluation of pitaya blocks

	颜色	口感	质构	风味	总分
未处理	17.74±2.79[a]	22.05±3.76[a]	24.03±3.05[a]	14.95±2.78[a]	79.32±8.25[a]
−40 ℃	16.05±3.53[ab]	23.74±4.23[a]	16.05±3.53[b]	21.21±3.59[a]	77.42±11.62[a]
−60 ℃	15.53±3.70[ab]	27.74±5.10[a]	20.47±5.19[b]	15.32±2.79[a]	73.05±12.90[a]
−80 ℃	15.63±3.87[ab]	22.79±5.85[a]	20.63±5.11[b]	16.00±2.88[a]	75.05±12.30[a]
缓冻	13.89±3.56[b]	14.74±8.01[b]	10.37±6.30[c]	10.63±4.91[b]	50.47±20.82[b]

注:同列数据标注不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$)。

能力、质构、感官等品质;而在不同液氮速冻温度中,筛选出最佳的液氮速冻温度为−80 ℃。

本文只研究了液氮速冻处理前后火龙果块块品质的变化情况,今后还应进一步对贮藏期间液氮速冻样品的微生物及品质的变化进行研究,获得相应变化规律,为液氮速冻技术在火龙果块加工中的应用提供参考。

本文受北京市科技计划课题(NO.Z171100001317016)资助。(The project was supported by the Beijing Science and Technology Program(NO.Z171100001317016).)

参考文献

[1] KHARIDAH M, NUR I M Z, SRI PG, et al. High methoxyl pectin from dragon fruit (Hylocereuspolyrhizus) peel [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42(2):289−297.

[2] 纵伟, 刘艳芳, 白新鹏. 火龙果块的营养保健成分及加工[J]. 中国食物与营养, 2007(10):46−48. (ZONG Wei, LIU Yanfang, BAI Xinpeng.The nutrition and health components of cactus pear and its processing[J]. Food and Nutrition in China, 2007(10):46−48.)

[3] 王生有, 陈于陇, 徐玉娟, 等. 高 O_2 与高 CO_2 气调包装对鲜切火龙果块品质的影响[J]. 热带作物学报, 2014, 35(6):1221−1227. (WANG Shengyou, CHEN Yulong, XU Yujuan, et al. Effect of high O_2 and CO_2 atmospheric packaging on the quality of fresh-cut pitayas[J].Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(6): 1221−1227.)

[4] 任文彬, 黎铭慧. L−半胱氨酸与壳聚糖复合处理对鲜切火龙果块贮藏效果的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(18):317−320. (REN Wenbin, LI Minghui. Effect of combined treatments with L-Cys and chitosan on physiological changes of fresh-cut pitaya during storage[J]. Food Science, 2013, 34(18):317−320.)

[5] KHADATKAR R M, KUMAR S, PATTANAYAK S C. Cryofreezing and cryofreeze [J]. Cryogenics, 2004, 44(9):661−678.

[6] 鲁珺. 液氮深冷速冻对带鱼和银鲳品质及其肌肉组织的影响[D]. 浙江:浙江大学, 2015.(LU Jun. Effect of cryogenic freezing by liquid nitrogen on the quality and microstructure of hairtail and silver pomfret[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2015.)

[7] 菌落总数测定: GB4789.2−2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016. (Determination of the total number of colonies: GB4789.2−2016[S]. Beijing: China planning press, 2016)

[8] 师萱, 陈娅, 符宜谊, 等. 色差计在食品品质检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2009(5):373−375. (SHI Xuan, CHEN Ya, FU Yiyi, et al. Application of color difference meter in the quality inspection of food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009(5):373−375.)

[9] LISIIEWSKA Z, KMIECIK W. Effect of storage period and temperature on the chemical composition and organoleptic quality of frozen tomato cubes[J]. Food Chemistry, 2000, 70(2):167−173.

[10] CAO X, ZHANG Y, ZHANG F, et al. Effects of high hydrostatic pressure on enzymes, phenolic compounds, anthocyanin, polymeric color and color of strawberry pulps[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(5): 877−885.

[11] LOPEZP, SALA F J, FUENTE J L, et al. Inactivation of peroxidase, lipoxygenase, and polyphenol by manothermosonication[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(2):252−256.

[12] MILLER N J, DIPLOCK A T, RICE-EVANS C A. Evaluation of the total antioxidant activity as a marker of the deterioration of apple juice on storage[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1995, 43(7): 1794−1801.

[13] ALJADI A M, KAMRUDDIN M Y. Evaluation of the phenolic contents and antioxidant capacities of two Malaysian floral honeys[J]. Food Chemistry, 2004, 85(4):513-518.

[14] 孙军涛, 肖付刚, 李芳. 火龙果果皮色素的提取及稳定性研究[J]. 中国调味品, 2014, 39(8):89−92. (SUN Juntao, XIAO Fugang, LI Fang. Study on extraction and

stability of pigment from peel of pitaya[J]. China Condiment, 2014, 39(8):89-92.)

[15] 食品中抗坏血酸的测定: GB5009.86-2016[S].北京:中国标准出版社, 2016. (Determination of ascorbic acid in food: GB5009.86-2016[S]. Beijing: China Planning Press, 2016)

[16] 张甫生, 赵君, 陈芳, 等. 高静压加工对黄桃罐头品质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):337-343. (ZHANG Fusheng, ZHAO Jun, CHEN Fang, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on quality of yellow peaches in pouch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6):337-343.)

[17] 刘娟, 吴伟杰, 郜海燕, 等. 贮藏温度对鲜切火龙果品质及微生物的影响[J]. 中国食品学报, 2017(10):168-175. (LIU Juan, Wu Weijie, Gao Haiyan, et al. Effects of different storage temperatures on quality and microorganism of fresh-cut pitaya[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017(10):168-175.)

[18] MIN S, JIN T Z, ZHANG Q H, et al. Commercial scale pulsed electric field processing of tomato juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(11): 3338-3344.

[19] 樊建, 赵天瑞, 覃宇悦, 等. 白灵菇液氮速冻工艺研究[J]. 食品工业科技, 2008, (5):238-240. (FAN Jian, ZHAO Tianrui, TAN Yuyue, et al. Study on freezing technology of pleurotus ferulate varnebrodensis lenzi by liquid nitrogen quick freezing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, (5):238-240.)

[20] 刘宝林, 华泽钊. 食品及生物材料低温保存过程中的低温断裂问题[J]. 制冷学报, 1997, (4):19-22. (LIU Baolin, HUA Zezhao. Fracture phenomena during the frozen storage of foods and biological materials[J]. Journal of Refrigeration, 1997,(4):19-22.)

[21] MULYAWANTI I, DEWANDARI K T. Effect of freezing and storage periods on characteristics of frozen sliced Arumanis mango[J]. Indonesian Journal of Agriculture, 2010, 3(1):32-38.

[22] 方婷, 姜琼一, 胡洁,等. 速冻鲍鱼贮藏期间品质研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 443-448. (FANG Ting, JIANG Qiongyi, HU Jie, et al. Study on the quality of frozen abalone during storage[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2010, 30(5):443-448.)

[23] 樊建, 赵天瑞, 曹建新,等. 液氮速冻松茸工艺研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(1):126-129. (FAN Jian, ZHAO Tianrui, CAO Jianxin, et al. Technology for quick freezing tricholoma matsutake with liquid nitrogen[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, 30(1):126-129.)

[24] 崔静, 陈海强, 岳希举, 等. 杨梅液浸式超速冻藏保鲜工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(8):317-321. (CUI Jing, CHEN Haiqiang, YUE Xiju, et al. Study on immersion freezing and frozen storage technology for fresh keeping of Chinese bayberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(8):317-321.)

[25] WANG Y, LIU F, CAO X, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 9(2):326-334.

[26] 王冉冉, 古小露, 于筱雨,等. 不同速冻处理对紫甘蓝切片品质和安全性的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(5):20-25. (WANG Ranran, GU Xiaolu, YU Xiaoyu, et al. Effects of different quick-frozen treatments on the quality and safety of purple cabbage slices[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(5):20-25.)

[27] 夏必帮, 朱文娴, 廖红梅, 等. 热辅助超声波处理对鲜榨火龙果汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(01):12-16. (XIA Bibang, ZHU Wenxian, LIAO Hongmei, et al. Effect of thermosonication treatment on the quality of fresh red dragon fruit juice[J]. Science and Technology of Food Industry,2019,40(01):12-16.)

[28] 赵天瑞, 樊建, 曹建新. 冻结速率对松茸 PPO 和 POD 活性的影响[J]. 中国食用菌, 2006, 25(1):43-45. (ZHAO Tianrui, FAN Jian, CAO Jianxin. Effect of freezing-rate on PPO and POD activity on tricholoma matsutake[J]. Edible Fungi of China, 2006, 25(1):43-45.)

[29] 樊建, 赵天瑞, 曹建新, 等. 冻结条件对黑牛肝菌 PPO 和 POD 活性的影响[J]. 中国食用菌, 2007,26(2):47-49. (FAN Jian, ZHAO Tianrui, CAO Jianxin, et al. Effect of freezing on PPO and POD activity in boletus aereus[J]. Edible Fungi of China, 2007,26(2):47-49.)

[30] 刘邻渭. 食品化学[M]. 1 版. 北京:中国农业出版社, 2000. (LIU Lingwei. Food chemistry[M]. 1nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.)

[31] 郭红辉, 简在海, 贾克功. 冻藏龙眼果皮细胞膜透性、PPO 活性和酚类物质含量的变化[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 74(3): 505-506. (GUO Honghui, JIAN Zaihai, JIA Kegong. Membrane permeability, PPO activity and total phenol content changes in freezing-stored Longanfruits' pericarp[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2003, 74(3):505-506.)

[32] 郭蕴涵, 汪政富, 赵翠萍,等. 高压二氧化碳浸渍速冻胡萝卜片工艺及产品品质的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16):240-245. (GUO Yunhan, WANG Zhengfu, ZHAO Cuiping, et al. Study on high pressure carbonic maceration (HPCM) freezing process and quality of carrot slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012,

33(16):240-245.)

[33] 王远, 刘春菊, 刘春泉, 等. 冻结方式对莲藕片品质及微观结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2015,31(4):924-928. (WANG Yuan, LIU Chunju, LIU Chunquan, et al. Effect of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus root slices[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2015,31(4):924-928.)

[34] ARACELI C, MADELOURDES P, MAELENA P, et al. Chemical studies of anthocyanins: A review[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4):859-871.

[35] 朱萍, 邹永生, 张丽英, 等. 不同冻结方式对速冻金耳品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(4):98-101. (ZHU Ping, ZHOU Yongsheng, ZHANG Liying, et al. Effects of different freezing methods on quality of quick-frozen tremellaaurantialba[J]. Food Research and Development, 2013, 34(4):98-101.)

[36] 吴金鋆, 刘通讯, 刘亮,等. 荔枝果皮花色苷的提取纯化及其酶促降解研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(7):683-686. (WU Jinyun, LIU Tongxun, LIU Liang, et al. Purification and enzymatic degradation of anthocyanins from Litchi pericarp[J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(7):683-686.)

[37] 黄文书, 徐芹,常雪花, 等. 哈密瓜冻结规律及其品质变化的研究[J]. 食品科技, 2010, 35(9): 52-54. (HUANG Wenshu, XU Qin, CHANG Xuehua, et al. Study on freezing properties and quality of Hamimelon[J]. Food Science and Technology, 2010,35(9):52-54.)

[38] 谭伟, 唐晓萍, 董志刚, 等. 不同果皮颜色酿酒葡萄品种果实不同部位酚类物质含量比较及抗氧化能力分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(28): 252-258. (TAN Wei, TANG Xiaoping, DONG Zhigang, et al. Analysis of polyphenol contents and antioxidant capacity in different fruit parts of different wine grape varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(28):252-258.)

[39] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云,等. 蓝莓液氮式流态化速冻工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16):217-222. (ZHANG Qinggang, TAO Leren, DENG Yun, et al. Study on quick freezing blueberries on LN_2-spraying fluidized freezer[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16):217-222.)

[40] 何全光, 黄梅华, 张娥珍,等. 不同品种芒果块液氮速冻-解冻后质构特性比较研究[J]. 热带作物学报, 2017, 38(7): 1365-1370. (HE Quanguang, HUANG Meihua, ZHANG Ezhen, et al. Comparative study on different varieties of mango pieces texture properties after liquid nitrogen quick freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(7):1365-1370.)

[41] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓流态化速冻工艺及贮藏品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 171-176. (ZHANG Qinggang, TAO Leren, DENG Yun, et al. Process and storage quality of quick freezing blueberries in LN_2-spraying fluidized freezer[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(12):171-176.)

通信作者简介

王永涛,男,副教授,中国农业大学食品科学与营养工程学院, E-mail:wangyongtao102@163.com。研究方向:食品科学。

About the corresponding author

Wang Yongtao, male, associate professor, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, E-mail: wangyongtao102@163.com. Research fields: food science.