

超声-微波辅助解冻对杨梅保鲜品质的影响

黄国中, 王琴, 马路凯, 刘祎帆, 刘东杰*, 王嘉沂, 陈小婷, 文芷懿

(仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

摘要: 为了探究超声-微波辅助解冻对杨梅保鲜品质的影响, 以速冻杨梅为实验对象, 设置了常温空气、常温水浴、微波、超声波和超声-微波辅助解冻 5 个实验组 (以 A、B、C、D、E 表示), 对速冻杨梅解冻后的果实进行了感官评价, 并测定了解冻时间、汁液流失率、硬度值、色泽、维生素 C 含量、可溶性固形物含量以及苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化物酶 (POD) 和多酚氧化酶 (PPO) 的活性。数据显示, 杨梅解冻后, 感官综合评分最高是 E 组, 达到 85.67 分; 解冻过程耗时最短是 C 组, 耗时 1.48 min, E 组次之, 耗时 3.67 min; 汁液流失率最小是 E 组的 0.33%; 硬度值最大是 E 组的 0.87 N; 维生素 C 含量最高是 E 组的 200.00 mg/100g; 可溶性固形物含量最高仍是 E 组的 10.83%; 由此可见, 超声-微波辅助解冻可在较短时间内得到解冻品质最优的杨梅; 除此之外, 在表征杨梅损伤程度的三种代表性酶 PAL、POD 和 PPO 方面, E 组酶活性均为最低, 分别为 37.00 U/mg、57.97 U/mg 和 43 U/mg, 反映了超声-微波辅助解冻对杨梅的损伤程度最小, 根据上述结果综合分析得出结论, 超声-微波辅助解冻在 5 种解冻方式中最佳。

关键词: 杨梅; 解冻; 品质; 微波; 超声波

文章编号: 1673-9078(2023)03-186-193

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.3.0331

Effect of Ultrasonic-microwave Assisted Thawing on the Fresh-keeping Quality of Red Bayberry

HUANG Guozhong, WANG Qin, MA Lukai, LIU Huifan, LIU Dongjie*, WANG Jiayi, CHEN Xiaoting, WEN Zhiyi
(College of Light Industry and Food Technology Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: In order to explore the effect of ultrasonic-microwave assisted thawing on the preservation quality of red bayberry, five experimental groups (represented by A, B, C, D, and E) were set up, including normal temperature air, normal temperature water bath, microwave, ultrasound, and ultrasonic-microwave assisted thawing. The sensory evaluation of the unfrozen fruit of red bayberry was conducted, and the thawing time, juice loss rate, hardness value, color, and vitamin C content were measured. The content of soluble solids and the activities of phenylalanine ammonia lyase (PAL), peroxidase (POD), and polyphenol oxidase (PPO). The data showed that after the waxberry was thawed, the highest comprehensive sensory score was in Group E, reaching 85.67 points; The shortest thawing process took 1.48 minutes in Group C, followed by 3.67 minutes in Group E; The minimum juice loss rate was 0.33% of group E; The maximum hardness value is 0.87 N of Group E; The highest content of vitamin C was 200.00 mg/100g in group E; The highest soluble solids content was still 10.83% of group E; It can be seen that ultrasonic-microwave assisted thawing can obtain the best quality waxberry in a relatively short time; In addition, in terms of the three representative enzymes PAL, POD, and PPO that characterize the degree of damage to red bayberry, group E has the lowest enzyme activity, which is 37.00 U/mg, 57.97 U/mg, and 43 U/mg, respectively, reflecting the smallest degree of damage to red bayberry caused by ultrasonic-microwave assisted thawing. Based on the comprehensive analysis of the above results, it is concluded that ultrasonic-microwave assisted thawing is the best of the five thawing methods.

引文格式:

黄国中,王琴,马路凯,等.超声-微波辅助解冻对杨梅保鲜品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(3):186-193.

HUANG Guozhong, WANG Qin, MA Lukai, et al. Effect of ultrasonic-microwave assisted thawing on the fresh-keeping quality of red bayberry [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(3): 186-193.

收稿日期: 2022-03-23

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B020225003); 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室 (2021B1212040013)

作者简介: 黄国中 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: kcbullet@163.com

通讯作者: 刘东杰 (1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬采后生理与贮藏保鲜, E-mail: djliu0827@gmail.com

Key words: waxberry; thawing; quality; microwave; ultrasonic

杨梅主要种植在浙江、福建、广西以及广东一带,属于木兰纲杨梅科杨梅属灌木植物,味道酸甜可口且富含丰富的纤维素、矿物质元素、维生素、蛋白质等营养成分,具有很高的食用价值以及药用价值^[1],其各个品种成熟期一般集中于3~6月份,其中的红梅品种是早熟类型,果实呈浅红色,可溶性糖含量较低,口味较酸,适合肥胖人群以及糖尿病患者食用,一般3~4月即可采收,而比较出名的东魁品种则在5~6月方才成熟,果肉呈现出紫红色,糖含量较高,口味甜中带酸,而且其抗氧化活性物质多酚以及维生素C含量十分丰富,适合老年人食用。

杨梅以鲜果销售为主,但它的贮藏期十分短暂,一周内就会出现腐败迹象,给产销带来极大的不便^[2];因此有许多学者致力于研发杨梅的保鲜方法,目前主要保鲜技术有低温冷藏^[3]、气调保藏^[4]以及涂膜保鲜^[5],而最常见的莫过于低温冷冻保鲜技术,它具有操作便捷、绿色无害和成本较低的优点^[6],具体实施方案是在杨梅产地对果实进行高效冻结,经冷链运输到销售地再进行高质解冻后摆上货架;由此可见冰鲜杨梅的品质不仅取决于冷冻技术,更是与解冻技术^[7]息息相关,而现阶段的果蔬解冻方法有常温放置^[8]、流水浴^[9]、微波加热^[10]以及超声波振荡^[11]等,然而普遍存在解冻时间过长、汁液流失过多的问题。目前的果蔬解冻方法研究中均仅应用单一物理场进行辅助解冻,因此本研究尝试将微波和超声物理场相结合,综合水浴受热均匀、微波升温迅速和超声波振荡快速破除冰晶的特点,试图缩短解冻时长和减少汁液流失,提高果蔬解冻品质,为食品解冻领域提供一定的数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

东魁品种杨梅,采摘于广东省梅州市祥达种植基地。分类筛选大小形状均一、无机械性损伤、无虫害霉变的杨梅。盐酸(标准溶液)、乙酸锌(分析纯)、硫酸铜(分析纯),上海阿拉丁股份有限公司;酒石酸钾钠(分析纯)、亚铁氰化钾(分析纯),西陇化工股份有限公司;邻苯二甲酸氢钾(分析纯)、氯化钾(分析纯)、氢氧化钾(分析纯)、碳酸氢钠(分析纯)、氯化钡(分析纯),广州索奥生物科技有限公司;2,6-二氯靛酚溶液、硼酸缓冲液、L-苯丙氨酸溶液、三盐酸缓冲液、磷酸缓冲液、愈创木酚溶液,广州科为生物

科技有限公司。

BS223S 电子天平,德国 Sartorius 公司生产;TU-1901 紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司生产;W-86L728J 超低温冰箱,青岛海尔特种电器有限公司;HHS 电热恒温水浴锅,广州东巨实验仪器有限公司生产;DS-1 高速组织捣碎机,广州东巨实验仪器有限公司生产;MITIR 数字食品温度计,温州米特尔智能科技有限公司;R6-G238N3 微波炉,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;Xrite-SP62 型色差分析仪,美国 Xrite 公司;TA-XTplus 质构分析仪,英国 Stablemicrosystem 公司;PAL-(手持折光仪)、SB-5200DT 超声微波联用仪,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2 实验方法

数量均分为 A、B、C、D、E,5 组,在 4℃ 冰柜中预冷 1 d 后,置于 -80℃ 超低温冰箱中冻结,冻结至果实中心温度为 -18℃ 时放入 -20℃ 冷库中冻结并储藏备用。

A 组(常温空气解冻):将冻结杨梅从 -20℃ 的冷库中取出置于实验台上,实验环境温度为 25℃。用数字食品温度计测定杨梅果肉中心温度,其温度达到 4℃ 时停止解冻,记录所需时间,解冻后测定各项指标。

B 组(常温水浴解冻):将冻结杨梅从 -20℃ 的冷库中取出置于常规自来水中(初始温度 23℃),水面恰好没过样品,杨梅中心温度达到 4℃ 时停止解冻,记录所需时间,解冻后测定各项指标。

C 组(微波空气解冻):将冻结杨梅从 -20℃ 的冷库中取出置于微波炉中,以光波模式进行解冻,功率为 300 W,杨梅中心温度达到 4℃ 时停止解冻,记录所需时间,解冻后测定各项指标。

D 组(超声波水浴解冻):将冻结杨梅从 -20℃ 的冷库中取出置于超声波清洗器中,超声波清洗器中水面恰好覆盖样品,初始水温 23℃,功率设置为 300 W,当杨梅中心温度达到 4℃ 时终止解冻,记录所需时间,解冻后测定各项指标。

E 组(超声-微波联合解冻):将冻结杨梅从 -20℃ 的冷库中取出置于超声-微波联用仪中,以常规自来水作为解冻介质,水面恰好淹没样品,初始水温 23℃,选择光波模式,设置功率均为 300 W 进行作业,待杨梅中心温度达到 4℃ 时停止解冻,记录所需时间,解冻后测定各项指标。

1.3 测定指标

果实感官评价:邀请 10 个试吃员,通过品尝对处理后的杨梅的色泽、香气以及味道口感进行鉴评,每项以 100 分为满分进行评定,并记录成绩,最终结果去掉各项指标的最高分和最低分,计算出平均值,具体评价标准见表 1。

汁液流失率^[12]:采用称重法,分别测定杨梅样品冻结解冻前的质量及解冻后再用滤纸吸去表面汁液后

的质量,二者的质量差与冻结解冻前样品的质量之比即为汁液流失率。样品平行测定 3 次。

硬度值^[13]:使用 TA.XTPlus 型质构仪测定,探头直径为 3.0 mm,测定深度为 4.0 mm,测定速度为 1.0 mm/s,随机取 3 颗杨梅,每个样品取表面三个互相间隔较远的点进行测定,结果取平均值。

色泽^[14]:利用色差分析仪测定,以白板进行校准,结果以 L^* 值和 a^* 值表示。随机取 3 颗杨梅,每个样品取 3 个相互间隔较远的点进行测定,结果取其平均值。

表 1 杨梅果实感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standard of Bayberry fruit

评价项目	评价标准	分数/分
色泽	果实呈深紫色,有明显光泽,肉柱没有泛白现象	85~100
	果实呈紫色,无明显光泽,少量肉柱出现泛白现象	70~84
	果实呈淡紫色,失去光泽,大量肉柱出现泛白现象	<70
香气	具有杨梅的特征风味,香味浓郁	85~100
	具有杨梅的特征风味,有淡淡香味	70~84
	无杨梅的特征风味,几乎没有香味	<70
味道口感	果实甜酸适中,汁液充足,咀嚼无渣	85~100
	果实甜酸适中,汁液多,咀嚼略有渣	70~84
	果实味道偏酸,汁液少,咀嚼明显有渣	<70

维生素 C 含量^[15]:采用 2,6-二氯酚滴定法。称取杨梅果肉约 10 g 于研钵中,加少许 2% (m/V) 草酸研磨,转入到 100 mL 容量瓶中,并定容至刻度,充分摇匀,浸提 10 min,过滤。吸取样品滤液 10 mL 于 100 mL 三角瓶中,用已标定的 2,6-二氯酚酚溶液滴定至粉红色维持 15 s 不褪色为终点。同时做空白滴定。同法平行操作 3 次。

可溶性固形物含量^[16]:采用手持折射计进行测定,保持测定温度稳定,滴加 2~3 滴待测液,对准光源,记录折射仪读数。样品平行 3 次。

苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 酶活力测定:取 0.2 g 杨梅果肉,放入事先进行了预冷的研钵当中,加入 2 mL 50 mmol/L 硼酸缓冲液 (pH 值为 8.8,内含 0.1% (V/V) 巯基乙醇),然后再加入 2% (m/V) 聚乙烯吡咯烷酮和石英砂进行充分研磨后装入 2 mL 的离心管中,在 4 °C, 15 000 r/min 条件下离心 20 min,取 0.1 mL 上清液于 2 mL 离心管中,加入 1.9 mL 10 mmol/L 的 L-苯丙氨酸溶液,混合均匀后将其置于 30 °C 避光环境中反应 30 min,随后加入 0.1 mL 5 mol/L 的盐酸终止反应,与 290 nm 波长下测定其吸光值,以 50 mmol/L 硼酸缓冲液作为空白对照。

过氧化物酶 (POD) 酶活力测定:取 1 g 杨梅果肉,将其剪碎放置于研钵中,加入 5 mL 0.1 mol/L 的

三盐酸缓冲液 (pH 值为 8.5),充分研磨后,在离心机中用 4 000 r/min 离心 5 min,取上清液备用;取 50 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液 (pH 值为 6.0),加入 0.028 mL 过氧化氢溶液和 0.019 mL 愈创木酚溶液,制备成反应混合液;取 2 个光径为 1 cm 的比色皿,一个加入 0.2 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 值为 6.0),作为空白对照,另一个加入 1 mL 上清液,再加入 3 mL 反应混合液,开始记录时间,在 470 nm 波长下测定其吸光度,以每分钟的吸光度变化表示其酶活力大小。

多酚氧化酶 (PPO) 酶活力测定:酶液的制备与上述 POD 步骤相似,仅将三盐酸缓冲液替换为磷酸缓冲液 (pH 值为 5.8);在 3 mL 比色皿中加入 1.5 mL 0.05 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 值 7.0)、1.0 mL 0.05 mol/L 邻苯二酚溶液和 0.5 mL 酶液,立刻放入紫外分光光度计中,半分钟时开始在 410 nm 波长下测定并记录其吸光值的变化,以每分钟增大 0.001 吸光值为 1 个活力单位。

1.4 数据分析

数据用 Office 2013 软件进行处理,以 Origin 2018 进行作图,借助 SPSS 24 软件进行方差分析, Duncan's 多重比较进行均值间差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 解冻方法对杨梅感官评价的影响

表 2 解冻杨梅的果实色泽、香味、味道口感以及综合评分

Table 2 Color, aroma, taste and comprehensive score of defrosted waxberry fruit

组别	色泽	香气	味道口感	综合评分
A	80.33±1.53 ^b	80.33±2.08 ^{ab}	80.33±2.52 ^a	80.33 ^c
B	83.67±2.52 ^{ab}	83.00±2.00 ^a	81.33±2.52 ^a	82.67 ^b
C	75.00±3.00 ^c	76.00±2.65 ^b	72.33±1.53 ^b	74.44 ^d
D	84.00±2.65 ^{ab}	83.67±3.79 ^a	83.00±2.00 ^a	83.56 ^b
E	86.67±3.51 ^a	85.33±3.51 ^a	85.00±3.61 ^a	85.67 ^a

注：同一列不同字母代表具有显著性差异 ($P<0.05$)。

由表 2 可见，不同的解冻方式对于杨梅果实的色泽具有显著性差异 ($P<0.05$)，微波加热解冻条件对于果实的色泽、香气和味道口感评分影响最大，且从综合评分来看，微波处理组得分最低，可见微波加热在很大程度上降低了杨梅的品质，B 组常温水浴解冻、D 组超声波解冻以及 E 组超声-微波联合解冻综合评分较高，解冻后的果实色差变化最小，肉柱坚挺，风味良好，可见水浴解冻效果要优于空气解冻，其中，超声-微波联合解冻的杨梅在色泽、香气、味道口感以及综合评分上均为最高，说明它的解冻效果最佳。

2.2 解冻方法对解冻时间的影响

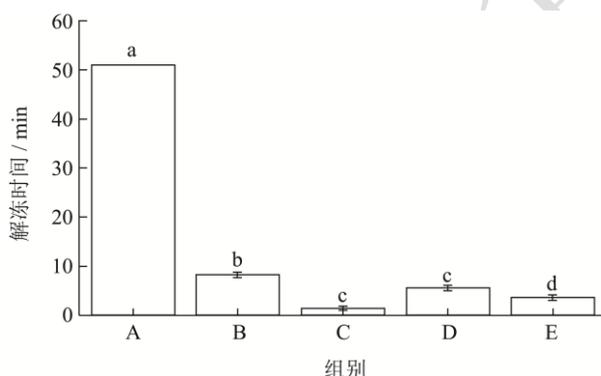


图 1 解冻方法对解冻时间的影响

Fig.1 Influence of thawing method on thawing time

注：图中不同字母代表差异显著 ($P<0.05$)，下同。

由图 1 可知，冻结的杨梅在 A 条件常温空气下解冻，中心温度达到 4℃ 时耗时 51.17 min，在所有条件里耗时最长，B 条件常温水浴耗时 8.33 min，C 条件微波加热耗时 1.48 min，D 条件超声波水浴耗时 5.67 min，而 E 条件超声-微波联合作用耗时最短，为 3.67 min；不同解冻方式对于冻结杨梅的解冻时间均有显著性差异 ($P<0.05$)。对比 A 和 B 条件可见在

常温环境下，以水为介质对杨梅进行解冻处理，时间效率远高于以空气作为解冻介质^[17]；在施加物理场的情况下，杨梅解冻速率进一步提高^[18]，因此若从生产效率的方面考虑，应当选择水浴式作为冻结杨梅的解冻方法；其中超声-微波联合解冻的效率最高，该解冻方法将水浴与 2 种物理场的作用优势结合在一起，对比传统的常温空气和水浴解冻节时 70% 和 40%。

2.3 解冻方法对汁液流失率的影响

果蔬解冻目前无法避免产生一定程度上的汁液流失，由实验结果可知，A 条件常温空气解冻下汁液流失率达到 11.00%，B 条件常温水浴解冻下损失 4.6% 汁液，C 条件微波加热解冻下为 9.00%，D 条件超声波水浴解冻下是 5%，流失率最低的是 E 组别超声-微波联合解冻，仅为 3.00%；5 种解冻方式对于杨梅果实的汁液流失率均具有显著性差异 ($P<0.05$)。由图 2 可知，水浴条件下可以有效减少汁液流失率，可能是杨梅果实在水浴环境中均匀受热，解冻过程比较稳定^[19]。汁液流失的多少除了和解冻方法息息相关，还与冻结过程^[20]中所产生的冰晶大小及其分布有关联^[21]，冰晶体积大，分布不均则会破坏杨梅的组织结构，解冻后自然会有较高的汁液流失率，反之则可减少汁液流失。超声-微波联合解冻在耗时较短的情况下，还能保持较低的果实汁液流失率，这在一定程度上说明该解冻方法存在一定的优势。

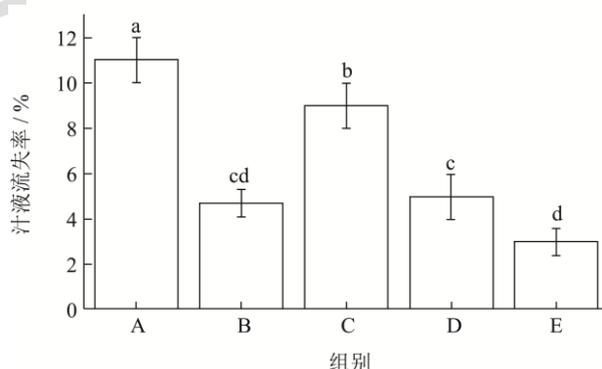


图 2 解冻方法对汁液流失率的影响

Fig.2 Influence of thawing method on juice loss rate

2.4 解冻方法对硬度的影响

杨梅内部水分与组织结构相结合，使得果肉饱满力挺，从而维持着果实的硬度，然而一旦流失过多水分，果肉细胞则会发生皱缩，硬度值也随之下降。由图 3 得知，新鲜杨梅果实硬度值为 0.9 N，经速冻处理以及不同方式解冻后，硬度值大小依次为 E 组超声-微波联合解冻 > D 组超声波水浴解冻 > B 组常温水浴解冻 > A 组常温空气解冻 > C 组微波空气解冻，除 E

组外, 其余 4 组解冻方式对于杨梅果实的硬度值均具有显著性差异 ($P < 0.05$); 5 种解冻方式中, 以空气作为介质的组别, 解冻后硬度值下降幅度较大, 原因可能是杨梅在解冻过程中因受热不均, 果实内部外部温差较大, 外层果肉固态水解冻速率远高于内层固态水的解冻速率, 受水分迁移作用的影响而发生组织结构的破裂^[22]从而流失了大量汁液。微波-超声联合解冻后的杨梅果实硬度值与新鲜样品相近, 可见该解冻方法可有效减少解冻损失。

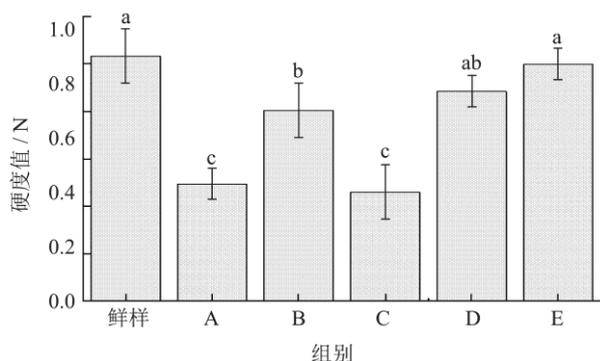


图3 解冻方法对硬度的影响

Fig.3 Effect of thawing method on hardness

2.5 解冻方法对色泽的影响

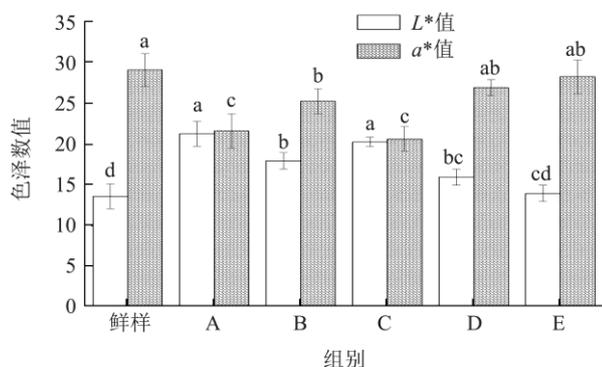


图4 解冻方法对色泽的影响

Fig.4 Influence of thawing method on color

色差仪所测得 L^* 值越大代表样品亮度越高, 反之则越暗; a^* 值越大代表红色越深^[23], 反之则越淡乃至偏绿; 看图 4 可知, 不同解冻方式对于杨梅的色泽均具有显著性差异 ($P < 0.05$), A 组常温空气解冻和 C 组微波解冻的杨梅, 果实色泽亮度显著增加, 红色明显变淡, 这可能是在解冻过程中受热不均, 导致果实内部与外部解冻速率相差较大, 受内部水分的迁移作用力影响, 组织结构发生一定程度上的损伤, 汁液流失率增加, 杨梅果实的红色素^[24]随着大量汁液的流失而减少, 而在水浴环境中解冻则可以有效避免解冻过程中果实内外温差过大的问题, 杨梅组织结构状态维持较好, 汁液流失现象得到控制, 因而 3 组水浴解冻

均可以使果实保持较好的色泽状态, 其中微波-超声联合解冻后的杨梅色泽 L^* 、 a^* 值变化最小, 解冻效果最优。

2.6 解冻方法对维生素 C 含量的影响

维生素 C 对于杨梅果实来说起着抗氧化和抗衰老的重要作用, 若其含量在果实解冻过程中发生大量流失, 那该果实将在后续贮藏过程中极易腐败。由图 5 可知, A、B、C、D 四组解冻方式对于杨梅的维生素 C 含量均具有显著性差异 ($P < 0.05$); 新鲜杨梅维生素 C 含量为 0.21 mg/100 g, 经 A 条件常温空气解冻后维生素 C 含量剩余 0.16 mg/100 g, B 条件常温水浴条件下维生素 C 含量剩余 0.18 mg/100 g, C 条件微波空气解冻后含量剩余 0.17 mg/100 g, D 条件超声波水浴解冻后含量剩余 0.19 mg/100 g, 而剩余量最多的解冻方式是 E 组微波-超声联合解冻, 其杨梅维生素 C 含量为 0.20 mg/100 g, 是 5 种解冻方式中维生素 C 保留量最高的。对比上述数据, 发现 A 组和 C 组在空气介质下解冻的杨梅, 果实维生素 C 含量较低, 这一方面可能是由于杨梅组织结构在解冻过程中受损, 水溶性的维生素 C 随着大量的果实水分流失到外界; 另一方面是因果实破损, 内含物直接裸露在外界环境中, 受到一定程度的氧化作用^[25]而使维生素 C 含量进一步下降。

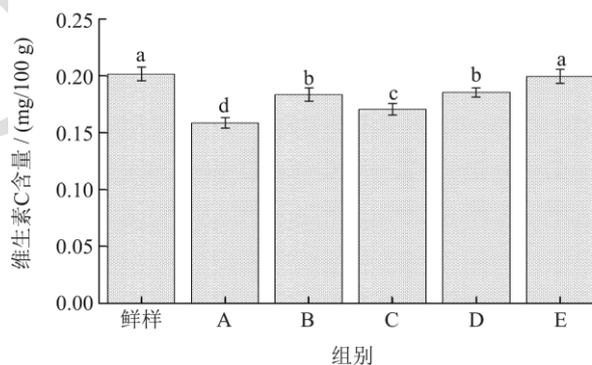


图5 解冻方法对维生素 C 含量的影响

Fig.5 Effect of thawing method on vitamin C content

2.7 解冻方法对可溶性固形物的影响

新鲜杨梅中含有丰富的可溶性固形物, 包括可溶性糖类、酸类、维生素以及矿物质等, 它们是杨梅果实营养物质的主要组成成分, 在一定程度上决定着果实的品质高低^[26]。由图 6 可知, 不同解冻处理对于杨梅的可溶性固形物含量均具有显著性差异 ($P < 0.05$); 新鲜杨梅的可溶性固形物含量为 13%, 经冻结解冻处理后, 含量高低依次为 E 组超声-微波联合解冻 > D 组超声波水浴解冻 > B 组常温水浴解冻 > A 组常温空气解冻 > C 组微波空气解冻, 以空气作为介质的解冻方式在果实解冻后, 可溶性固形物含量均低于水浴介质

解冻, 原因可能是空气介质下解冻因果实内外受热不均匀导致造成较大的解冻损伤, 杨梅组织结构受损, 可溶性物质随着内部水分的流失而大量地减少, 而水浴条件下解冻, 果实内外温差波动幅度较小, 解冻过程中杨梅内部水分迁移较为平缓, 不会产生较大的作用力, 因而组织结构保持较为完整^[27], 汁液流失率较低, 从而在解冻后依然能够保持较高的可溶性固形物含量, 其中微波-超声辅助解冻效果最好。

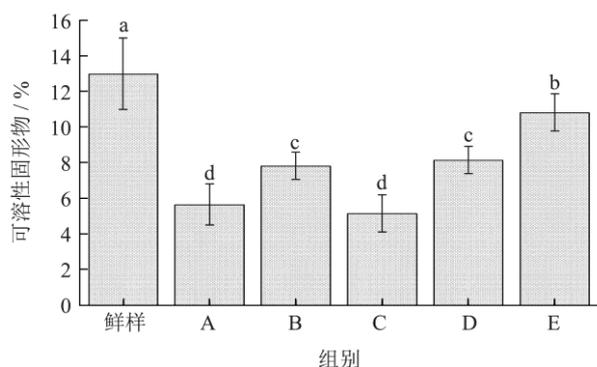


图6 解冻方法对可溶性固形物的影响

Fig.6 Effect of thawing method on soluble solids

2.8 解冻方法对 PAL、POD 和 PPO 酶活性的影响

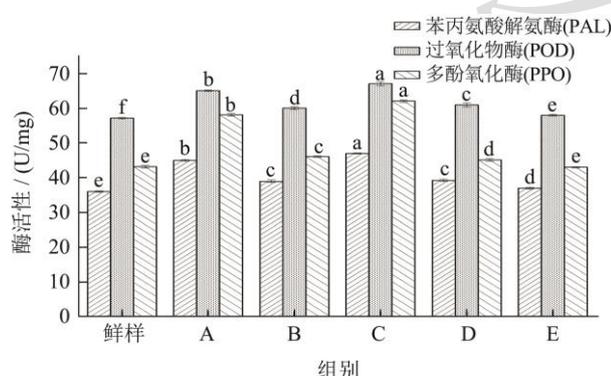


图7 解冻方法对 PAL、POD 和 PPO 酶活性的影响

Fig.7 Effects of thawing method on PAL, POD and PPO enzyme activities

PAL、POD 与 PPO 都是杨梅果实中非常重要的抗逆、抗氧化酶^[28], PAL 是苯丙氨酸代谢途径的限速酶和关键酶, 可催化合成植保素、木质素、生物碱、苯甲酸酯糖苷以及酚类物质等植物体内的次生代谢物质, 这些物质具有防紫外线危害, 增强果实的抗虫害能力的效果^[29]。POD 是果实成熟与衰老的标志酶, 它可以在果实生长期促进乙烯的合成从而让果实更快地成熟, 同时也能在果实发育成熟后分解植物体内过多的生长素从而延缓其衰老的进程, 还可以分解过氧化氢之类的氧化物从而达到抗氧化的作用^[30], 除此之

外, POD 对外界不良环境表现出高度的敏感性, 杨梅果实受到如机械应力的损伤时, POD 的活性显著提高, 从而阻止外界病原物的侵染, 然而 POD 的催化反应会生成大量各类的自由基产物, 总体来说会加重果实细胞的毒害作用, 因此在果实后续贮藏过程中, 应尽量避免该酶活性的提升。在果实细胞中, 多酚类物质通常与多酚氧化酶存在于不同的部位, 前者主要集中在细胞液泡中, 后者则定位于质体内囊体, 因此 PPO 在常规状态下没有活性, 但若果蔬组织受损, 细胞液泡水流出, 多酚类物质被释放, PPO 则被活化而表现出较强的活性, 导致杨梅果实的多酚类物质被氧化, 从而引起一系列褐变^[31]。由图 7 可见, 不同解冻方式对杨梅果实 PAL、POD 以及 PPO 酶活力影响均有显著性差异 ($P < 0.05$); 对比新鲜样品, 3 种酶的酶活力在解冻后均有所上升, 其中 C 组微波解冻后酶活力最高, A 组常温空气解冻次之, 可能是解冻过程中造成损伤, 从而激发了酶的活性, 消耗了大量的营养物质; B 组常温水浴解冻和 D 组超声波水浴解冻果实的酶活力上升幅度较小, 而 E 组超声-微波联合解冻的样品酶活力波动幅度最小, 说明超声-微波联合解冻可以在很大程度上避免杨梅果实受到较大的解冻损伤, 使其保持较为完好的结构状态, 从而抑制了果实体内 PAL、POD 和 PPO 的活性, 解冻效果最好。

3 结论

在常温空气、常温水浴、微波、超声波和微波-超声辅助物理场 5 种解冻方式中, 发现添加物理场进行辅助解冻均能显著提高解冻效率, 其中微波解冻耗时最短, 仅为 1.48 min, 但解冻过程中由于受热不均对杨梅组织结构造成较大损伤从而导致营养物质的大量流失, 而微波-超声辅助解冻在 5 种解冻方式当中耗时较短 (3.67 min)、汁液流失率最低 (3.00%)、硬度值下降幅度最小 (0.03%)、色泽保持最好 (L^* 值和 a^* 值都仅上升 0.03%)、维生素 C 含量保留了 0.2 mg/100 g, 可溶性固形物含量达到 10.83%, 而且 PAL、POD 和 PPO 酶活力受到的影响最小, 在实验的 5 个解冻处理组中酶活性水平较低, 说明超声-微波辅助解冻可以在很大程度上减少杨梅受到的解冻损伤, 组织结构状态维持良好, 果实品质得以保证, 这可能是得益于该解冻方式结合了微波升温快、超声波振动破除冰晶和水浴环境受热均匀的优点。由此可见微波-超声辅助物理场应用在杨梅解冻领域既可做到高效率也可做到高质量, 具有一定的推广意义。然而, 决定杨梅等果蔬解冻品质的因素不仅仅是解冻方式, 还与冻结方式有着千丝万缕的关系, 亟需研发相应的冻结手段, 与超声-

微波辅助解冻相辅相成, 让杨梅的产销链趋于成熟。

参考文献

- [1] Ren Haiying, He Yuanhao, Qi Xingjiang, et al. The bayberry database: a multiomic database for *Myrica rubra*, an important fruit tree with medicinal value [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 452.
- [2] Poonam Kumari, Archana Brar, Jitender Kumar. Evaluation of shelf-life of aonla (*Emblica officinalis* G) cultivars during storage at room temperature [J]. Journal of Applied and Natural Science, 2017, 9(1): 573-576.
- [3] 吴炜俊,程丽娜,徐玉娟,等.液氮喷雾速冻在杨梅品质保鲜上的优势[J].现代食品科技,2020,36(10):140-146,330.
- [4] 郑俊峰,谢建华,庞杰.低压贮藏对杨梅果实抗氧化及其细胞膜透性的影响[J].食品研究与开发,2021,42(12):60-66.
- [5] Asad Riaz, Rana Aadil, Madjid Abdou, et al, Application of chitosan - based apple peel polyphenols edible coating on the preservation of strawberry (*Fragaria ananassa* cv Hongyan) fruit [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): 15018.
- [6] Liu Jiawen, Liu Yuxin, Zheng Rui, et al. Mechanism of texture deterioration of cockle (*Clinocardium californiense*) during chilled storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 46(2): 16231.
- [7] Cheng Hao, Bian Chuhan, Chu Yuanming, et al. Effects of dual-frequency ultrasound-assisted thawing technology on thawing rate, quality properties, and microstructure of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. Foods, 2022, 11(2): 226.
- [8] 章宁瑛,郇海燕,陈杭君,等.不同解冻方式对速冻蓝莓果实品质的影响[J].食品工业科技,2017,38(7):320-324,339.
- [9] 陈晓维,余元善,徐玉娟,等.不同解冻方式下的蓝莓品质的比较分析[J].现代食品科技,2019,35(9): 170-175,139.
- [10] Watanabe Takashi, Yasumasa Ando. Evaluation of heating uniformity and quality attributes during vacuum microwave thawing of frozen apples [J]. LWT, 2021, 150(2): 111997.
- [11] Farahnak Raha, Nourani Moloud, Riahi Elnaz. Ultrasound thawing of mushroom (*Agaricus bisporus*): Effects on thawing rate, protein denaturation and some physical properties [J]. LWT, 2021, 151(3): 112150.
- [12] 王夷秀,陈芹芹,毕金峰,等.不同解冻方法对速冻桑葚汁液流失率、理化品质及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2017, 38(7):149-154.
- [13] Olmedo Patricio, Zepeda Baltasar, Rojas Barbara, et al. Cell wall calcium and hemicellulose have a role in the fruit firmness during storage of blueberry (*Vaccinium* spp.) [J]. Plants, 2021, 10(3): 553.
- [14] Vasylyshyna Olena, Postolenko Yevhenii. Influence of freezing method on color change and antioxidant activity in cherry fruit [J]. Carpathian Journal of Food Science and Technology, 2019, 11(4): 157-160.
- [15] Adeoso Abiodun, Oyebamiji Olufunke. Comparative analysis of vitamin c in two varieties of pineapple (honey queen and brazza) to maximize nutritional benefits [J]. Current Developments in Nutrition, 2021, 5(2): 1300.
- [16] Dairi Mai, Pankaj Pathare, Yahyai Rashid. Chemical and nutritional quality changes of tomato during postharvest transportation and storage [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2021, 20(6): 401-408 .
- [17] Li Dongni, Zhao Huanhuan, Idris Muhammad, et al. The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) filets [J]. Food Chemistry, 2020, 320(5): 126614.
- [18] Phinney David, Frelka John, Wickramasinghe Anita, et al. Effect of freezing rate and microwave thawing on texture and microstructural properties of potato (*Solanum tuberosum*) [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(4): 933-938.
- [19] Tian Xiaojing, Shao Lele, Yu Qianqian, et al. Comparative analysis of quality and microbial safety of ohmic and water bath cooked pork batter during refrigerated storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(7): 2461-2471.
- [20] Cheng Lina, Wu Weijun, An Kejing, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry [J]. Crystals, 2020, 10(5): 368.
- [21] Tan Mingtang, Ye Jingxin, Chu Yuanming, et al. The effects of ice crystal on water properties and protein stability of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 130(2): 242-252.
- [22] Zhang Yuemei, Ertbjerg Per. On the origin of thaw loss: Relationship between freezing rate and protein denaturation [J]. Food Chemistry, 2019, 299(3): 125104.
- [23] Wu Yaqiong, Zhang Chunhong, HUANG Zhengjin, et al. The color difference of rubus fruits is closely related to the composition of flavonoids including anthocyanins [J]. LWT, 2021, 149(1): 111825.
- [24] Zhao Hongxia, Liu Zhixia, Luo Zhiyang, et al. Study on the relation between waxberry color and its nutrition composition

- based on BP neural network [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 304(6): 268-273.
- [25] Jannatul Ferdous, Suvra Roy, Rajesh Chakraborty, et al. Vitamin C, antioxidant and polyphenol activity of some selected potato varieties as influenced by vermicompost [J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2019, 33(1): 1-9.
- [26] Shao Yuanyuan, Wang Kaili, Xuan Guantao, et al. Soluble solids content monitoring for shelf-life assessment of table grapes coated with chitosan using hyperspectral imaging [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 115(6): 103725.
- [27] 张勇,刘衡川,殷强仲,等.冷冻和解冻对大肠埃希菌超微结构的影响[J].*中国卫生检验杂志*,2012,22(4):760-761,764.
- [28] Andrade Mariana, Reboleira Joao, Bernardino Susana, et al. Brown algae and terrestrial plants: potential synergy of the antioxidant capacity [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5(1): 152-159.
- [29] Insanu Muhamad, Marliani Lia, Nabila Pandu. Comparison of antioxidant activities from four species of piper [J]. *Pharmaciana*, 2017, 7(2): 305-312.
- [30] Parul Tripathi, Apeksha Srivastava, Lavie Rekhi, et al. Screening of some edible plants for antioxidant potential [J]. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*, 2017, 8(2): 256-261.
- [31] Dkhil Mohamed, Delic Denis, Enshasy Hesham, et al. Medicinal plants in therapy: antioxidant activities [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 16(1): 7468524.