

王留言,任婧楠,秦雨晴,等.不同解冻方法对3种速冻柑橘果肉品质特性的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(2):154-163.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.018

不同解冻方法对3种速冻柑橘果肉品质特性的影响

王留言¹,任婧楠¹,秦雨晴¹,范刚¹,潘思轶¹,李正伦²,胡兆兴²,何祥²

1. 华中农业大学食品科学技术学院/环境食品学教育部重点实验室/
果蔬加工与品质调控湖北省重点实验室,武汉 430070; 2. 秭归县屈姑食品有限公司,秭归 443600

摘要 为探究解冻方法对秭归脐橙、宜昌蜜桔、椪柑3个品种速冻柑橘果肉品质的影响,采用冰箱解冻、自然解冻、流水解冻、水浴解冻、超声波解冻和微波解冻6种方法对柑橘果肉进行处理,测定了速冻柑橘果肉的解冻时间、汁液流失率、常规品质指标、色泽、硬度、总酚含量、抗氧化活性的变化,并进行感官评价。结果表明,不同解冻处理对秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉品质的影响呈现显著差异($P<0.05$)。秭归脐橙、宜昌蜜桔、椪柑3个品种微波解冻的时间最短,分别是0.82、0.89、0.81 min;汁液流失率最低,分别是0.25%、0.16%、0.15%;微波和超声波解冻的常规品质指标保存的较好;微波解冻的色泽影响最小, ΔE 分别为8.48、7.52、4.71,且硬度损失率最小,分别降低了36.10%、52.03%和36.48%;总酚含量、抗氧化活性较高,感官方面与新鲜果肉样品最接近。以上结果表明,相比于其他5种解冻方式,微波解冻可以在1 min内完成果肉的解冻,有效减缓果肉颜色变化和硬度损失,较好地保留速冻柑橘果肉的食用品质和营养品质。

关键词 柑橘;解冻方法;速冻;品质;风味

中图分类号 TS255.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0154-10

柑橘是中国产量最高的水果,因其鲜亮的果皮、酸甜多汁的果肉和独特的营养价值而深受人们喜爱。柑橘类水果含有丰富的有机酸、维生素、多糖等物质^[1-2],同时含有许多生物活性物质,如酚类物质包括天然黄酮类和酚酸类化合物,具有抗炎、抗癌、抗氧化等重要的生理功能^[3-4]。由于新鲜柑橘的保质期短,在储存、运输和市场销售过程中易损易腐,目前将柑橘果肉速冻后放置在一18℃冷库中低温贮藏保鲜是保持果肉优良品质、延长供应期的有效方法,解冻后可以全年生产果酱、果汁、水果制剂、罐头等加工制品。因此,采用适宜的解冻工艺对保持柑橘类产品的品质特性具有重要意义。

解冻工艺是速冻柑橘制品在食用或加工前不可或缺的重要环节,是促进柑橘制品产业发展的关键。传统的解冻方法,包括室温和水浴解冻,由于其投资少、操作简单,在工业加工中得到了广泛的应用^[5]。然而,这些方法存在严重的缺陷,往往会造成汁液损失、质地破坏和退色等品质变化。因此,为了克服传统解冻方法的缺点,开发出一系列新的解冻方法,主

要分为热解冻法和非热解冻法。微波解冻是一种很有前途的热解冻方法,在缩短加工时间、节约能源、改善营养品质和某些食品(如冷冻水果)的可接受性方面优势突出^[6]。Liu等^[7]使用5种解冻方式处理冷冻树莓,发现微波解冻时间为0.57 min,滴漏损失为4.40%,这2个指标在5种解冻方法中都是最低的。超声波解冻是一种创新的非热解冻方法,冷冻产品可以吸收超声波能量,加速解冻过程,避免表面受热,保持产品颜色,提高产品质量^[8]。汪楠等^[9]研究不同解冻方法对速冻方竹笋品质的影响,发现在超声波解冻下的方竹笋组织结构保持得最好,汁液流失率较低,硬度、色泽影响最小。速冻柑橘果肉解冻后通常会导致质地软化和营养流失等品质问题,因此,有必要评价不同解冻方法对速冻柑橘果肉品质变化的影响,并比较其优缺点,为实际生产加工应用提供指导。本研究通过比较不同解冻方法(冰箱解冻、自然解冻、流水解冻、水浴解冻、超声波解冻和微波解冻)对3种速冻柑橘果肉的解冻效率、汁液流失率、营养成分、色泽、质地、感官、总酚含量及抗氧化

收稿日期:2023-12-06

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2022BBA0030);湖北省科技人才服务企业项目(2023DJC116)

王留言,E-mail:965489905@qq.com

通信作者:范刚,E-mail:fangang@mail.hzau.edu.cn

活性的影响,找出较为合适的解冻工艺,从而保障解冻后的柑橘果肉品质。

1 材料与方法

1.1 试验材料

秭归脐橙(*Citrus sinensis* L. Osbeck)、宜昌蜜桔(*Citrus reticulata* Blanco)和椪柑(*Citrus reticulata* Blanco)均购自湖北省宜昌市果园。

1.2 速冻柑橘果肉制备

秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑分别进行手工剥皮、分瓣,挑取大小一致的橘瓣,装袋后在 -80°C 的低温速冻柜中速冻,用温湿度记录仪插入橘瓣的几何中心检测温度,并将数据记录仪连接到计算机进行记录。每10 s记录1次样品温度,直至温度达到 -18°C 。速冻柑橘果肉在检测前进行解冻,新鲜果肉为对照处理。

1.3 解冻方法

从 -18°C 冰箱取出速冻柑橘果肉,每份果肉质量约150 g,分成6组进行解冻处理,解冻方法包括 4°C 冰箱解冻、 $(25.0\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 自然解冻、 23.5°C 流水解冻、 50°C 水浴解冻、 $[(25.0\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 、100 W、40 kHz]超声波解冻、400 W微波解冻,样品中心温度达到 4°C 时解冻完成,记录解冻时间,重复测定3次。

1.4 汁液流失率的测定

取速冻柑橘,解冻前称质量(m_1),解冻后用滤纸擦净表面的汁液,然后称质量(m_2)。计算二者的质量差与解冻前质量的比值,得出柑橘解冻的汁液流失率(R_{IL}),计算方法如式(1)所示:

$$R_{\text{IL}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.5 果实常规品质指标测定

依照GB/T 8210—2011《柑橘鲜果检验方法》,对VC含量采用2,6-二氯酚酚滴定法测定;可滴定酸采用酸碱滴定法测定;还原糖采用3,5-二硝基水杨酸比色法;可溶性固形物含量采用阿贝折光仪测定。

1.6 色泽的测定

用色差仪测定速冻果肉的亮度值 L^* 、红绿值 a^* 、黄蓝值 b^* ,以新鲜果肉亮度值 L_0 、红绿值 a_0 、黄蓝值 b_0 为对照,计算总色差 ΔE ,计算方法如式(2)^[10],每个样品重复测定9次。

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

1.7 硬度的测定

参照文献[11]的方法,采用质构仪对果肉进行

TPA测试。探头:P36R;测定模式:下压过程测量力;测试条件:测试前速度为2 mm/s,测试速度为1 mm/s,测试后速度为4 mm/s,测试距离为5 mm。每个样品重复测定9次。

1.8 总酚含量的测定

总酚的提取:取3 g匀浆加入6 mL 80%甲醇,至 60°C 水浴中超声60 min,取出、冷却、离心,残渣再提取,上清液混合定容于10 mL容量瓶。

总酚含量测定参照文献[12]利用Folin-Ciocalteu比色法测定,并进行适当修改:在25 mL容量瓶中加9 mL水和1 mL上述上清液,混匀,将1 mL的Folin-Ciocalteu试剂加入其中,暗处静置5 min,并加入2 mL的20%碳酸钠溶液。 25°C 放置60 min后,于750 nm处测量溶液的总酚含量,结果以100 g样品中含有没食子酸质量表示,mg/100 g。

1.9 抗氧化活性的测定

1) 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS)自由基清除能力的测定。参照文献[13]的方法,7 mmol/L ABTS与2.5 mmol/L过硫酸钾混合,室温下暗处静置16 h,制备 $\text{ABTS}^+\cdot$ 自由基溶液。分析时用纯水稀释 $\text{ABTS}^+\cdot$ 自由基溶液,在734 nm处获得 (0.70 ± 0.02) 的吸光度值。将0.05 mL样品溶液和3.6 mL $\text{ABTS}^+\cdot$ 自由基溶液混合搅拌,室温下暗处静置30 min。使用全波长酶标仪记录样品在734 nm处的吸光度,结果以1 g样品中含有Trolox的质量表示,mg/g。

2) 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力的测定。参照文献[14]的方法,将0.1 mL样品与2.5 mL DPPH溶液混合,并在室温下避光反应30 min。在517 nm处测量样品的吸光度,绘制标准曲线,结果以1 g样品中含有Trolox的质量表示,mg/g。

3) 铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)的测定。参照文献[15]的方法,将0.05 mL样品溶液与4.0 mL FRAP反应液混合,并在室温下反应10 min。在593 nm处测定其吸光度值,以Trolox为标准品,测定不同浓度Trolox对铁离子的还原力,结果以1 g样品中含有Trolox的质量表示,mg/g。

1.10 电子舌和感官评价

将新鲜和每个处理组的果肉匀浆离心,取滤液

用于电子舌测试。在测试前,对电子舌传感器进行活化,确保在可靠、稳定的试验条件下进行数据采集。本试验在25℃室温下进行,参比电极和7个传感器的测量时间为120 s,冲洗时间为60 s^[16]。对每个样品连续测量8次,记录其中5个稳定平衡数据点。

由10名经过培训的评估员从颜色、味道、质地和风味4个方面对不同解冻方法的果肉进行感官评价。

1.11 数据分析

利用Microsoft Office Excel 2021软件处理数据,采用Origin 2023作图,IBM SPSS统计26.0用于方差分析,Duncan's多重比较用于均值差异的显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方法对柑橘果肉解冻时间和汁液流失率的影响

由表1可知,3个柑橘品种果肉所需的解冻时间长短依次为:微波解冻<超声波解冻<水浴解冻<流水解冻<自然解冻<冰箱解冻,并且秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉经微波解冻的时间显著短于其他方法的解冻时间($P<0.05$)。冰箱解冻和自然解冻利用空气作为解冻介质与柑橘果肉表面进行热量传递,温差较小,所需时间较长。流水解冻和水浴解冻通过利用传导率较大的水作为解冻介质进行热量传递,二者的解冻时间没有显著差异($P>0.05$),但比冰箱解冻和自然解冻所需时间短。

表1 不同解冻方法下速冻柑橘果肉的解冻时间和汁液流失率

Table 1 Thawing time and drip loss of quick-frozen citrus pulp under different thawing methods

品种 Variety	解冻方法 Thawing method	解冻时间/min Thawing time	汁液流失率/% Juice leakage rates
秭归脐橙 Zigui navel orange	冰箱解冻 Refrigerator thawing	492.33±12.50a	0.88±0.09c
	自然解冻 Natural thawing	92.67±11.68b	2.56±0.17a
	流水解冻 Flowing water thawing	38.67±4.04c	1.89±0.23b
	水浴解冻 Warm water thawing	28.00±3.61cd	1.71±0.23b
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	22.00±2.65d	0.72±0.10c
宜昌蜜桔 Yichang mandarin	微波解冻 Microwave thawing	0.82±0.15e	0.25±0.08d
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	437.33±14.47a	1.35±0.36c
	自然解冻 Natural thawing	59.33±1.15b	3.84±0.30a
	流水解冻 Flowing water thawing	20.00±2.65c	1.67±0.11bc
	水浴解冻 Warm water thawing	15.00±1.00c	1.78±0.23b
椪柑 Ponkan tangerine	超声波解冻 Ultrasonic thawing	11.67±1.04c	0.70±0.12d
	微波解冻 Microwave thawing	0.89±0.10d	0.16±0.07e
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	412.00±15.87a	0.75±0.09c
	自然解冻 Natural thawing	56.33±1.53b	2.16±0.23a
	流水解冻 Flowing water thawing	22.33±1.53c	1.06±0.07b
	水浴解冻 Warm water thawing	17.33±1.53c	0.98±0.16b
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	17.00±1.00c	0.42±0.06d
	微波解冻 Microwave thawing	0.81±0.13d	0.15±0.03e

注:不同小写字母表示同一品种内不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments within the same variety ($P<0.05$). The same as follows.

不同解冻方法下3个柑橘品种的汁液流失率呈现显著差异($P<0.05$)。秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉经微波解冻的汁液流失率最低,分别为0.25%、0.16%、0.15%,与其他解冻方法差异显著($P<0.05$);其次是超声波解冻,分别为0.72%、0.70%、0.42%;冰箱解冻仅次于超声波解冻,分别为0.88%、1.35%和0.75%;流水解冻和水浴解冻的汁液流失率

没有显著性差异($P>0.05$);自然解冻的汁液流失率最高,分别为2.56%、3.84%、2.16%。

2.2 不同解冻方法对柑橘果肉常规品质指标的影响

由表2可知,所有解冻方法均会使柑橘果肉的VC含量降低。秭归脐橙果肉经微波解冻的VC含量最高,损失率为10.16%,其次为超声波解冻,损失率

为10.46%。宜昌蜜桔经超声波解冻的损失率最低,为6.04%。椪柑果肉经超声波和微波解冻的VC含量无显著差异($P>0.05$),损失率均为17.40%。水浴解冻3个柑橘品种果肉的VC损失率均较高。不同解冻处理下柑橘品种果肉的还原糖含量均有所降低,其中微波和超声波解冻后,秭归脐橙和椪柑果肉的还原糖含量显著高于其他解冻方法;而宜昌蜜桔果肉经冰箱、超声波和微波解冻的还原糖含量显著高于其他解冻方法($P<0.05$)。超声波和微波解冻

秭归脐橙果肉的可滴定酸含量最高,为0.65 mg/100 mL,显著高于其他解冻方法($P<0.05$);超声波解冻宜昌蜜桔果肉的可滴定酸含量最高,为0.57 mg/100 mL;椪柑果肉经冰箱、超声波和微波解冻的可滴定酸含量最高,为0.49 mg/100 mL,与其他解冻方法存在显著差异($P<0.05$)。流水和水浴解冻秭归脐橙果肉的可溶性固形物含量最低;自然解冻宜昌蜜桔和椪柑果肉的可溶性固形物含量最低,这可能与柑橘果肉在解冻过程中的汁液流失有关。

表2 不同解冻方法下速冻柑橘果肉常规品质指标的变化

Table 2 Changes of conventional quality indexes of quick-frozen citrus pulp under different thawing methods

品种 Variety	解冻方法 Thawing method	维生素C含量/(mg/ 100 g) Vitamin C content	还原糖含量/% Reducing sugar content	可滴定酸含量/ (mg/100 mL) Titratable acid content	可溶性固形物 含量/% Total soluble solid content
秭归脐橙 Zigui navel orange	新鲜对照 Fresh control	49.23±1.74a	9.18±0.25a	0.54±0.04c	10.53±0.10a
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	41.27±0.80b	8.67±0.48a	0.59±0.02bc	9.90±0.23bc
	自然解冻 Natural thawing	33.63±0.99d	8.64±0.14a	0.59±0.01b	9.58±0.08d
	流水解冻 Flowing water thawing	37.26±1.26c	7.71±0.34b	0.58±0.02bc	9.17±0.08e
	水浴解冻 Warm water thawing	29.01±2.18e	7.68±0.33b	0.59±0.04bc	9.17±0.13e
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	44.08±1.94b	8.89±0.33a	0.65±0.02a	10.07±0.20b
	微波解冻 Microwave thawing	44.23±2.16b	8.94±0.33a	0.65±0.01a	9.73±0.13cd
宜昌蜜桔 Yichang mandarin	新鲜对照 Fresh control	15.07±0.47a	6.98±0.17a	0.43±0.01d	9.38±0.10a
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	13.56±1.29a	5.45±0.26b	0.52±0.01b	9.08±0.08b
	自然解冻 Natural thawing	8.33±0.57b	4.52±0.19d	0.45±0.01d	7.98±0.08d
	流水解冻 Flowing water thawing	8.03±0.57b	5.05±0.15c	0.49±0.01c	8.65±0.15c
	水浴解冻 Warm water thawing	7.04±1.42b	5.06±0.14c	0.49±0.02c	8.98±0.08b
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	14.16±1.37a	5.45±0.17b	0.57±0.01a	9.10±0.05b
椪柑 Ponkan tangerine	新鲜对照 Fresh control	16.96±0.35a	7.79±0.43a	0.38±0.02c	9.20±0.05a
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	12.50±0.68c	6.71±0.35bc	0.49±0.02a	9.15±0.05ab
	自然解冻 Natural thawing	10.15±0.95d	6.53±0.26c	0.43±0.01b	8.52±0.08e
	流水解冻 Flowing water thawing	12.50±0.60c	6.66±0.19bc	0.44±0.01b	8.80±0.10d
	水浴解冻 Warm water thawing	10.07±0.69d	6.94±0.13bc	0.46±0.01ab	9.02±0.03c
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	14.01±0.80b	7.56±0.23a	0.49±0.05a	9.10±0.05abc
微波解冻 Microwave thawing	14.01±1.17b	7.24±0.49ab	0.49±0.02a	9.07±0.03bc	

2.3 不同解冻方法对柑橘果肉色泽的影响

由表3可知,速冻柑橘果肉经解冻后的 L^* 、 a^* 和 b^* 值均显著低于新鲜柑橘果肉($P<0.05$),说明柑橘果肉的亮度、红色度和黄色度降低。与其他解冻方法相比,水浴解冻对秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的 L^* 、 a^* 和 b^* 值影响均最大。 ΔE 值代表解冻柑橘果肉整体的色泽变化情况,微波解冻秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的 ΔE 值均最小,分别为8.48、7.52和4.71,其次是超声波解冻。水浴解冻秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的 ΔE 值最大,分别为13.87、11.08和9.23,说明在解冻过程中果肉组织损伤严重,导致

细胞汁液流失,颜色劣化。综合来看,微波解冻对3种柑橘果肉的色泽影响最小,其次是超声波解冻,水浴解冻对色泽的影响最大。

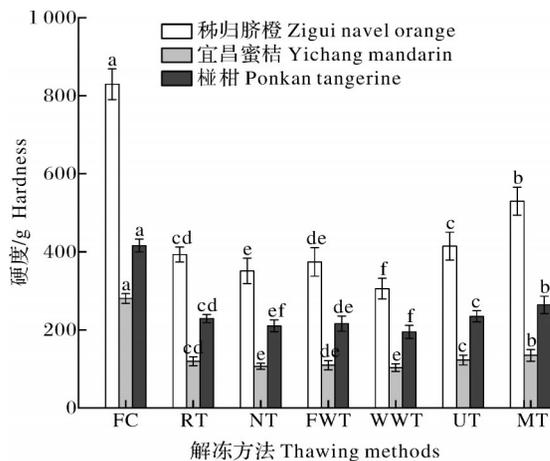
2.4 不同解冻方法对柑橘果肉硬度的影响

由图1可知,解冻后柑橘果肉组织软化,硬度比新鲜果肉低。不同解冻方法处理后果肉硬度大小依次为:微波解冻>超声波解冻>冰箱解冻>流水解冻>自然解冻>水浴解冻,其中微波解冻的果肉硬度显著高于其他解冻方法($P<0.05$),说明微波解冻时间短,对细胞结构破坏小,能够较好地保持柑橘果肉的硬度。冰箱和超声波解冻的柑橘果肉硬度之间

表3 不同解冻方法下柑橘果肉色泽的变化

Table 3 Changes of the color of quick-frozen citrus pulp under different thawing methods

品种 Variety	解冻方法 Thawing method	亮度值 L^* The value of L^*	红绿色度值 a^* The value of a^*	黄蓝色度值 b^* The value of b^*	总色差 ΔE Total color difference ΔE
秭归脐橙 Zigui navel orange	新鲜对照 Fresh control	57.35±1.56a	3.94±0.11a	26.08±1.64a	-
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	45.15±1.71c	2.96±0.41b	24.11±2.35abcd	12.72±2.82a
	自然解冻 Natural thawing	45.92±2.41c	2.32±0.49c	23.79±1.19bcd	11.97±2.25ab
	流水解冻 Flowing water thawing	45.76±1.96c	3.20±0.54b	24.80±1.75abc	11.83±2.83ab
	水浴解冻 Warm water thawing	44.37±2.02c	1.92±0.47d	22.39±2.79d	13.87±3.04a
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	48.58±1.06b	3.35±0.37b	23.20±2.33cd	9.81±1.81bc
	微波解冻 Microwave thawing	49.19±2.78b	3.28±0.39b	25.85±1.59ab	8.48±2.95c
宜昌蜜桔 Yichang mandarin	新鲜对照 Fresh control	50.30±1.91a	7.42±0.60a	33.80±1.30a	-
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	46.87±1.41b	6.70±0.49bc	26.54±1.29bc	8.26±1.58b
	自然解冻 Natural thawing	46.17±1.58b	6.74±0.40bc	26.80±1.25bc	8.32±1.66b
	流水解冻 Flowing water thawing	45.85±1.68b	6.50±0.35c	25.98±1.48cd	9.16±1.95b
	水浴解冻 Warm water thawing	44.21±2.02c	6.34±0.58c	24.92±1.12d	11.08±2.05a
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	46.65±1.70b	7.00±0.37ab	27.51±0.95b	7.66±2.04b
	微波解冻 Microwave thawing	47.29±1.30b	7.08±0.40ab	27.28±1.38bc	7.52±2.14b
椪柑 Ponkan tangerine	新鲜对照 Fresh control	48.37±2.71a	8.42±0.72a	26.71±1.88a	-
	冰箱解冻 Refrigerator thawing	45.00±1.61bc	7.50±0.69b	22.32±1.56b	6.57±1.86b
	自然解冻 Natural thawing	44.96±1.18bc	7.45±0.64b	21.87±1.55b	6.67±2.22b
	流水解冻 Flowing water thawing	44.63±1.78bc	6.70±0.40c	22.55±1.33c	6.39±1.97b
	水浴解冻 Warm water thawing	43.46±1.85c	6.84±0.87c	19.51±1.58b	9.23±2.60a
	超声波解冻 Ultrasonic thawing	45.68±1.76b	7.86±0.33ab	22.85±1.31b	5.79±1.84b
	微波解冻 Microwave thawing	45.60±1.44b	8.16±0.52a	25.84±1.37a	4.71±1.96b



FC: 新鲜对照 Fresh control; RT: 冰箱解冻 Refrigerator thawing; NT: 自然解冻 Natural thawing; FWT: 流水解冻 Flowing water thawing; WWT: 水浴解冻 Warm water thawing; UT: 超声波解冻 Ultrasonic thawing; MT: 微波解冻 Microwave thawing. 不同小写字母表示同一品种内不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments within the same variety ($P < 0.05$). The same as follows.

图1 不同解冻方法下速冻柑橘果肉硬度的变化

Fig. 1 Changes of the hardness of quick-frozen citrus pulp under different thawing methods

没有显著性差异 ($P > 0.05$), 冰箱解冻虽然解冻时间长, 但由于解冻温度低, 汁液流失率少, 所以硬度值保持的也较好。自然解冻、流水解冻和水浴解冻均属于外部解冻, 在解冻过程中对细胞壁产生了不可逆的破坏作用, 最终导致硬度变低。

2.5 不同解冻方法对柑橘果肉总酚含量和抗氧化活性的影响

由图2A可知, 新鲜秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的总酚含量均最低, 微波解冻的总酚含量均最高, 其中冰箱解冻秭归脐橙果肉的总酚含量与新鲜果肉无显著差异 ($P > 0.05$); 冰箱和自然解冻宜昌蜜桔果肉的总酚含量与新鲜果肉无显著差异 ($P > 0.05$); 冰箱解冻椪柑果肉的总酚含量显著低于微波解冻 ($P < 0.05$)。由图2B、C、D可知, 不同方法解冻后柑橘果肉抗氧化活性均有所提高, 其中超声波解冻秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的ABTS⁺·自由基清除能力最大, 分别为48.72、49.08、28.04 mg/g; 微波解冻秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的DPPH·自由基清除能力最大, 分别为120.20、113.08和41.45 mg/g; 微波解冻果肉FRAP铁离子还原力最大, 分别为52.83、49.67、26.87 mg/g。以上研究结果说明微波和超声波解冻均显著提高了果肉的总酚含量和抗氧化活性。

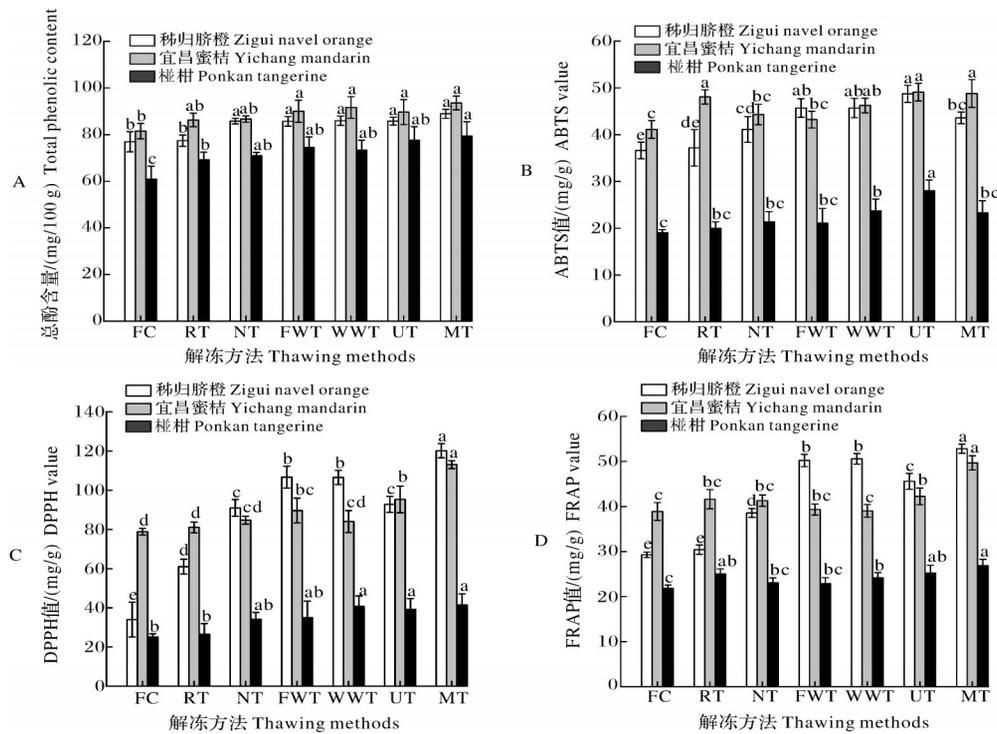


图 2 不同解冻方法下速冻柑橘果肉总酚含量 (A)、ABTS (B)、DPPH (C) 和 FRAP (D) 的变化
 Fig. 2 Changes of total phenolic content (A), ABTS (B), DPPH (C) and FRAP (D) of quick-frozen citrus pulp under different thawing methods

2.6 不同解冻方法对柑橘果肉电子舌信号值和感官评价的影响

由图 3 可知,不同解冻方法处理的柑橘果肉与新鲜

鲜果肉样品风味存在明显差异。微波解冻下秭归脐橙果肉电子舌信号值位置更接近新鲜样品,其次是超声波解冻。相较于秭归脐橙果肉,宜昌蜜桔和

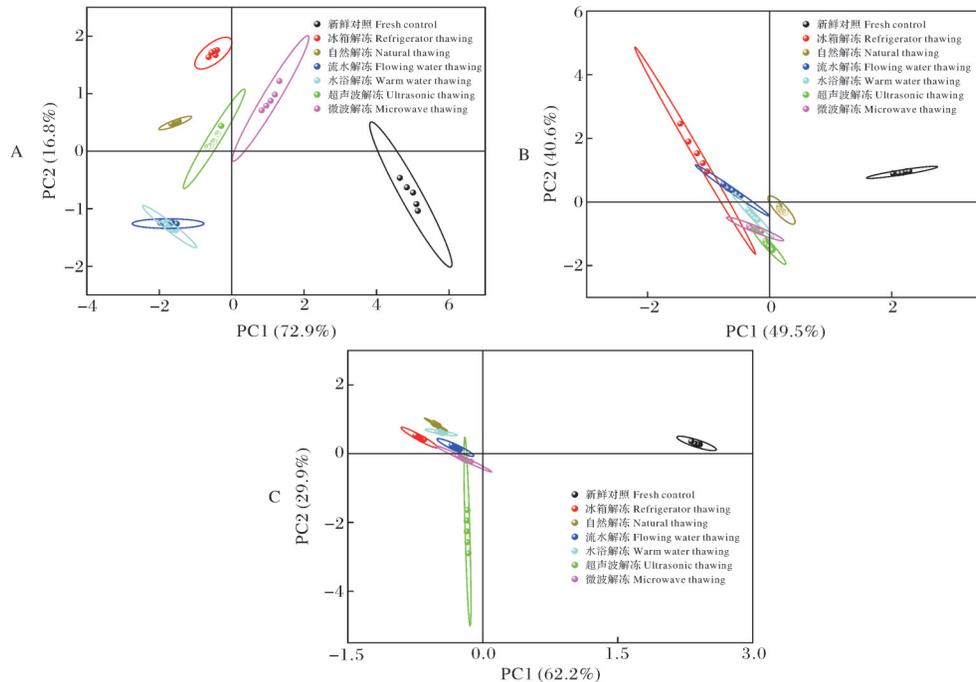


图 3 不同解冻方法下速冻秭归脐橙 (A)、宜昌蜜桔 (B) 和椪柑 (C) 果肉电子舌 PCA 分析
 Fig. 3 PCA analysis of electron tongue in quick-frozen citrus pulp of Zigui navel orange (A), Yichang mandarin (B) and Ponkan tangerine (C) under different thawing methods

椪柑果肉在不同解冻方法组别间的风味差异不明显,位置均远离新鲜果肉且较为集中,说明采用电子舌的方式难以将它们进行有效区分,需要再结合人工感官评价进行综合分析。

新鲜果肉和不同解冻方法解冻后果肉的感官分

析如图4所示,不同解冻方法解冻后的柑橘果肉在色泽、风味、质地和口感上都发生了一定程度的变化。秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉经微波解冻的综合评分最高,分别为80.0、74.9和76.4;3种柑橘果肉经水浴解冻的色泽、香味、质地和口感评分均最低。

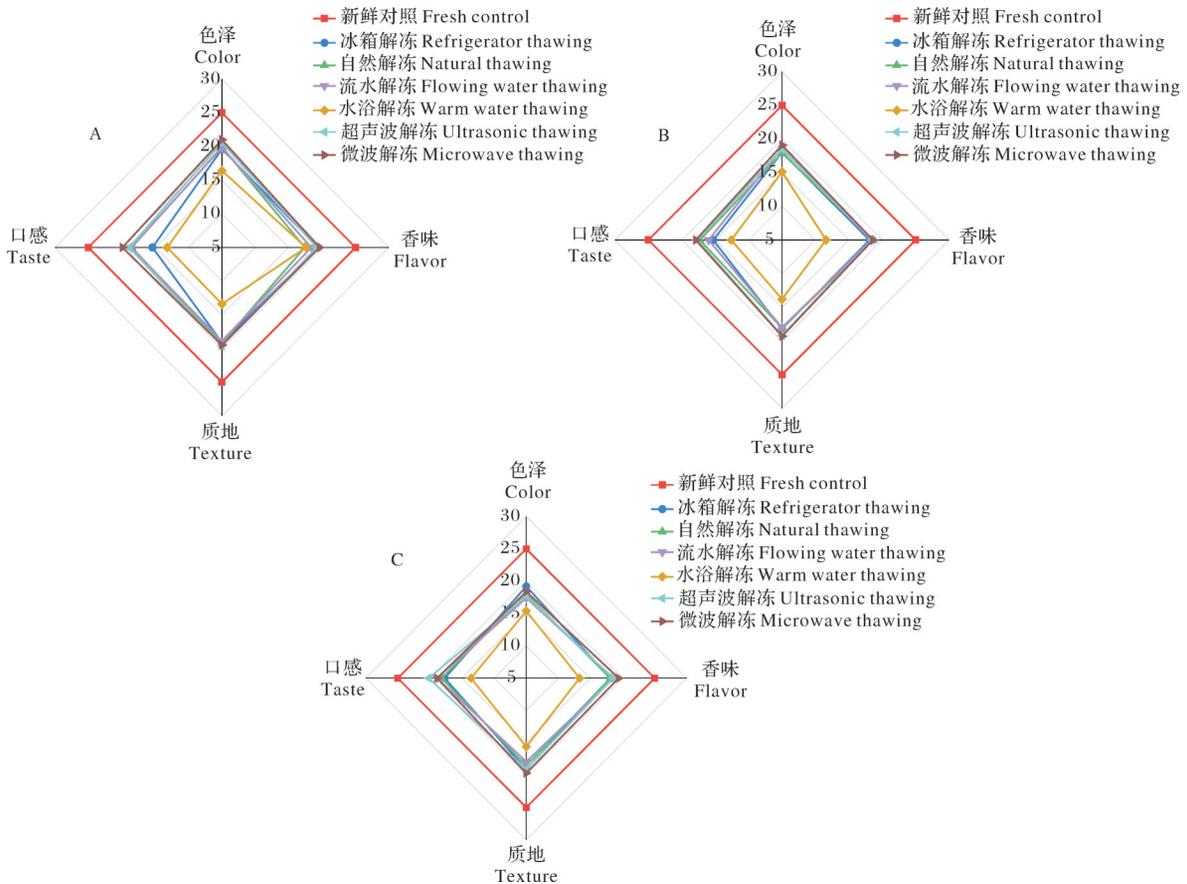


图4 不同解冻方法下速冻秭归脐橙(A)、宜昌蜜桔(B)和椪柑(C)果肉感官评价

Fig. 4 Sensory evaluation of quick-frozen citrus pulp of Zigui navel orange (A), Yichang mandarin (B) and Ponkan tangerine (C) under different thawing methods

3 讨论

本研究综合评价了6种解冻方法对秭归脐橙、宜昌蜜桔、椪柑3种速冻柑橘果肉品质的影响。结果表明,不同解冻方法对速冻柑橘果肉的解冻时间、汁液流失率、常规品质指标、色泽、硬度、总酚含量、抗氧化活性和感官均有显著影响。其中,微波解冻的时间最短,汁液流失率最低,色泽和硬度保持得最好,超声波解冻次之,这是因为微波解冻可以使食物吸收微波激发水分子,同时加热柑橘果肉的表面和内部,加速解冻过程,减少汁液流失率;而超声波解冻是将超声波与水浴解冻的效果叠加,使热量能够在柑橘果肉内部迅速衰减,产生的热量顺利地通过果

肉内部,减少解冻时间和汁液流失率^[17-18]。因此,微波和超声波解冻对果肉组织结构破坏较小,能够较好地保持解冻后果肉的细胞结构^[9]。秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉经微波和超声波解冻的VC损失率较低,这是由于在这2种解冻方法下的汁液流失率低,VC不容易降解。水浴解冻显著降低了 L^* 、 a^* 和 b^* 值,总色差 ΔE 变化最大;硬度和VC损失率也最大,说明细胞组织损伤严重,导致了红色素、黄色素和VC的严重降解^[19-20]。姜怡彤等^[20]同样发现微波解冻的速冻菠萝蜜果肉汁液流失率仅为0.18%,VC含量损失较小,色泽与硬度变化显著小于其他解冻方法。Peng等^[21]也发现微波解冻提高了芒果质量,减少了颜色变化和汁液流失,降低了硬度和VC损失

率,并且感官评分最高,被认为是芒果解冻的最有利条件,与本研究结果相似。

柑橘果实富含多酚类物质,具有抗氧化、降血糖、清除自由基等功能活性。多酚含量和抗氧化活性二者存在密切关系,酚类物质发生褐变后,生成的褐变物质会导致抗氧化能力降低和果肉品质发生劣变。Celli等^[22]和Rickman等^[23]报道了冷冻后酚类化合物含量会相对增加,与本研究结果相似。微波和超声波解冻更有利于增加果肉的总酚含量和抗氧化活性。其中超声波解冻的ABTS⁺·自由基清除能力最强,微波解冻的总酚含量最高,DPPH·自由基清除能力和FRAP铁离子还原力最强,与张瑜等^[24]的研究结果一致。冰箱解冻的总酚和抗氧化活性均较小,这可能是由于解冻时间较长,增加了多酚氧化酶与酚类物质的接触时间,从而增强了氧化反应^[24],而超声波和微波解冻的时间较短,所以表现出较高的抗氧化活性。

主成分分析法(PCA)能保留原始数据的大部分信息,利用主成分分析对电子舌的响应值进行分析,可以确定不同解冻方法果肉的风味是否存在差异^[25]。本研究中秭归脐橙、宜昌蜜桔和椪柑果肉的主成分累加值均大于80%,表明提取的PC1和PC2主成分能较好地反映整个电子舌数据的信号值。通过电子舌和人工感官评价相结合的方法,从色泽、风味、质地和口感4个方面全面评估了解冻柑橘果肉的感官属性,结果表明微波解冻秭归脐橙果肉的风味与新鲜果肉更接近,而电子舌难以完全区分宜昌蜜桔和椪柑解冻果肉的风味,但人工感官对微波解冻3种柑橘果肉的评分均最高,说明微波解冻在感官质量方面的综合影响最小,接受度最高。胡中海等^[26]指出微波解冻时间短且不与水接触,对香气主成分影响较小,与本试验结果相符。微波解冻技术具有许多优点,最重要的方面是缩短了热处理的时间,并降低了解冻成本。此外,它在保持解冻产品高感官质量的同时提高了解冻工艺效率,对食品营养价值影响最小^[6]。

综上所述,微波解冻可以有效地减少柑橘果肉的色泽变化,降低果肉的硬度损失,保留柑橘果肉的生物活性物质和感官品质,极大程度地缩短解冻时间,降低解冻成本,超声波的解冻效果仅次于微波解冻。这2种解冻方法都可以较好地维持速冻柑橘果肉解冻后的品质稳定性。

参考文献 References

- [1] STINCO C M, ESCUDERO-GILETE M L, HEREDIA F J, et al. Multivariate analyses of a wide selection of orange varieties based on carotenoid contents, color and *in vitro* antioxidant capacity [J]. Food research international, 2016, 90: 194-204.
- [2] KIM S S, PARK K J, AN H J, et al. Phytochemical, antioxidant, and antibacterial activities of fermented *Citrus unshiu* by-product [J]. Food science and biotechnology, 2017, 26 (2): 461-466.
- [3] TAO N G, LIU Y J, ZHANG J H, et al. Chemical composition of essential oil from the peel of Satsuma mandarin [J]. African journal of biotechnology, 2008, 7(9): 1261-1264.
- [4] 李勋兰, 洪林, 杨蕾, 等. 11个柑橘品种果实营养成分分析与品质综合评价 [J]. 食品科学, 2020, 41(8): 228-233. LI X L, HONG L, YANG L, et al. Analysis of nutritional components and comprehensive quality evaluation of *Citrus* fruit from eleven varieties [J]. Food science, 2020, 41 (8): 228-233 (in Chinese with English abstract).
- [5] WU X F, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2017, 57(17): 3620-3631.
- [6] GUZIK P, KULAWIK P, ZAJĄC M, et al. Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2022, 62(29): 7989-8008.
- [7] LIU L, LÜ C M, MENG X J, et al. Effects of different thawing methods on flavor compounds and sensory characteristics of raspberry [J]. Flavour and fragrance journal, 2020, 35 (5): 478-491.
- [8] BHARGAVA N, MOR R S, KUMAR K, et al. Advances in application of ultrasound in food processing: a review [J/OL]. Ultrasonics sonochemistry, 2021, 70: 105293 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>.
- [9] 汪楠, 张甫生, 阚健全, 等. 不同解冻方式对速冻方竹笋品质的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43 (11): 180-185. WANG N, ZHANG F S, KAN J Q, et al. Effect of different thawing methods on the quality of quick frozen *Chimonobambusa quadrangularis* shoot [J]. Food science, 2022, 43 (11): 180-185 (in Chinese with English abstract).
- [10] GU Y X, SHI W Q, LIU R, et al. Cold plasma enzyme inactivation on dielectric properties and freshness quality in bananas [J/OL]. Innovative food science & emerging technologies, 2021, 69: 102649 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102649>.
- [11] 赵金红, 胡锐, 刘冰, 等. 渗透脱水前处理对芒果冻结速率和品质的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 220-227. ZHAO

- J H, HU R, LIU B, et al. Effect of osmotic dehydration pre-treatment on freezing rate and quality attributes of frozen mango[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(2): 220-227 (in Chinese with English abstract).
- [12] KWAW E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food chemistry, 2018, 250: 148-154.
- [13] ŽLABUR J Š, MIKULEC N, DOŽDOR L, et al. Preservation of biologically active compounds and nutritional potential of quick-frozen berry fruits of the genus *Rubus* [J/OL]. Processes, 2021, 9(11): 1940 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.3390/pr9111940>.
- [14] 王磊, 李国龙, 唐志书, 等. 不同生长时期酸枣果肉多糖相对分子质量分布和单糖组成及抗氧化活性研究[J/OL]. 食品工业科技, 2023, 44: 1-15 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060269>. WANG L, LI G L, TANG Z S, et al. Study on the relative molecular mass, monosaccharide composition and antioxidant effects of *Ziziphus jujuba* flesh polysaccharide at different periods[J/OL]. Science and technology of food industry, 2023, 44: 1-15 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060269> (in Chinese with English abstract).
- [15] TLILI I, HDIDER C, LENUCCI M S, et al. Bioactive compounds and antioxidant activities of different watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Mansfeld) cultivars as affected by fruit sampling area[J]. Journal of food composition and analysis, 2010, 24(3): 307-314.
- [16] REN T Y, LI B, XU F Y, et al. Research on the effect of oriental fruit moth feeding on the quality degradation of chestnut rose juice based on metabolomics[J/OL]. Molecules, 2023, 28(20): 7170 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.3390/molecules28207170>.
- [17] 王雪松, 谢晶. 不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 137-143. WANG X S, XIE J. Effects of different thawing methods on the quality of frozen horse mackerel[J]. Food science, 2020, 41(23): 137-143 (in Chinese with English abstract).
- [18] HOLZWARTH M, KORHUMMEL S, CARLE R, et al. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.) [J]. Food research international, 2012, 48(1): 241-248.
- [19] 刘雪梅, 孟宪军, 李斌, 等. 不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 276-281. LIU X M, MENG X J, LI B, et al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of quick-frozen strawberries[J]. Food science, 2014, 35(22): 276-281 (in Chinese with English abstract).
- [20] 姜怡彤, 接伟光, 徐飞, 等. 解冻方式对速冻菠萝蜜果肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 266-271. JIANG Y T, JIE W G, XU F, et al. Effect of thawing methods on pulp quality of quick-frozen jackfruit[J]. Science and technology of food industry, 2020, 41(1): 266-271 (in Chinese with English abstract).
- [21] PENG Y, ZHAO J H, WEN X, et al. The comparison of microwave thawing and ultra-high-pressure thawing on the quality characteristics of frozen mango[J/OL]. Foods, 2022, 11(7): 1048 [2023-12-06]. <https://doi.org/10.3390/foods11071048>.
- [22] CELLI G, GHANEMA, BROOKS M S L. Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products [J]. Food reviews international, 2016, 32(3): 280-304.
- [23] RICKMAN J C, BARRETT D M, BRUHN C M. Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2007, 87(6): 930-944.
- [24] 张瑜, 赵金红, 丁洋, 等. 不同解冻技术对冷冻香菇 (*L. edodes*) 品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(9): 241-247. ZHANG Y, ZHAO J H, DING Y, et al. Effects of different thawing methods on the quality attributes of frozen *Lentinus edodes* cubes [J]. Modern food science and technology, 2016, 32(9): 241-247 (in Chinese with English abstract).
- [25] CHEN H Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Evaluation of the freshness of fresh-cut green bell pepper (*Capsicum annuum* var. *grossum*) using electronic nose [J]. LWT, 2018, 87: 77-84.
- [26] 胡中海, 孙谦, 马亚琴, 等. 不同解冻方法对速冻温州蜜柑橘瓣品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 123-126. HU Z H, SUN Q, MA Y Q, et al. Effect of different thawing methods on the quality of quick-freezing Satsuma mandarin (*Citrus unshiu*) segment[J]. Science and technology of food industry, 2015, 36(14): 123-126 (in Chinese with English abstract).

Effects of thawing methods on quality characteristics of three quick-frozen citrus pulp

WANG Liuyan¹, REN Jingnan¹, QIN Yuqing¹, FAN Gang¹, PAN Siyi¹,
LI Zhenglun², HU Zhaoxing², HE Xiang²

1. College of Food Science and Technology/Ministry of Education Key Laboratory of Environment Correlative Dietology/Hubei Province Key Laboratory of Fruit & Vegetable Processing & Quality Control, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Qugu Food Co., Ltd. in Zigui County, Zigui 443600, China

Abstract The three citrus pulp from Zigui navel orange, Yichang mandarin, and Ponkan tangerine was treated with six methods including refrigerator thawing, natural thawing, flowing water thawing, warm water thawing, ultrasonic thawing, and microwave thawing to study the effects of thawing methods on the quality characteristics of the quick-frozen citrus pulp. The thawing time, loss rate of juice, conventional quality indexes, color, hardness, total phenolic content, antioxidant activity, and changes in sensory of quick-frozen citrus pulp were measured. The results showed that the effects of different thawing treatments on the quality of citrus pulp from Zigui navel orange, Yichang mandarin, and Ponkan tangerine were significantly different ($P < 0.05$). The time of microwave thawing for Zigui navel orange, Yichang mandarin, and Ponkan tangerine was the shortest, being 0.82 min, 0.89 min, and 0.81 min, respectively. The loss rate of juice in microwave thawing for Zigui navel orange, Yichang mandarin, and Ponkan tangerine was the lowest, being 0.25%, 0.16%, and 0.15%, respectively. The conventional quality indexes of microwave and ultrasonic thawing were well preserved. The microwave thawing had the least effect on color with ΔE of 8.48, 7.52, and 4.71, and the least loss of hardness with reductions of 36.1%, 52.03%, and 36.48%, respectively. The content of total phenol and antioxidant activity in microwave thawing were relatively high, and the sensory profile was closest to that of fresh flesh samples. Compared to the other five thawing methods, microwave thawing can thaw the flesh within 1 minute, and effectively slow down the changes in color and the hardness loss of pulp, and better preserve the edible and nutritional qualities of the quick-frozen citrus pulp.

Keywords *Citrus*; thawing methods; quick-frozen; quality; flavor

(责任编辑:葛晓霞)