

## 缓冻和速冻对杨梅保藏期品质变化规律的探究

黄国中, 王琴, 马路凯, 刘祎帆, 刘东杰, 王嘉沂, 陈小婷, 文芷懿

### Study on Quality Change of Waxberry in Storage Period by Slow Freezing and Fast Freezing

HUANG Guozhong, WANG Qin, MA Lukai, LIU Huifan, LIU Dongjie, WANG Jiayi, CHEN Xiaoting, and WEN Zhiyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040229>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

不同贮藏方法对鸭汤营养成分和感官品质的影响

Influence of different storage methods on nutritional ingredient and sensory quality of duck soup

食品工业科技. 2017(14): 258-262 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.050>

磁场辅助冻结对马铃薯块冻结及贮藏特性影响

Effect of Magnetic Field Assisted Freezing on the Freezing and Preservation of Potato Blocks

食品工业科技. 2018, 39(16): 272-274,305 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.048>

基于低场核磁共振分析与成像探究贮藏过程中板栗水分迁移对其质构变化的影响

Based on the Analysis and Imaging of Low Field Nuclear Magnetic Resonance, Explore the Influence of Chestnut Moisture Migration to the Change of Its Texture in the Storage Process

食品工业科技. 2020, 41(24): 44-49 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030262>

不同冻藏时间的猪肉品质比较及其变化机制研究

Comparison of Pork Quality in Different Frozen Storage Time and Its Change Mechanism

食品工业科技. 2021, 42(18): 48-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010063>

南方大口鲶在微冻和冻藏条件下鲜度及品质的变化

Changes in the Quality and Freshness of *Silurus meridionalis* Chen under Partial Freezing and Frozen Conditions

食品工业科技. 2018, 39(23): 300-304,311 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.052>

基于低场核磁共振技术检测冷鲜滩羊肉的嫩度

Detection of tan-sheep meat tenderness based on low-field nuclear magnetic resonance

食品工业科技. 2017(02): 69-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄国中, 王琴, 马路凯, 等. 缓冻和速冻对杨梅保藏期品质变化规律的探究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 365-371. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040229

HUANG Guozhong, WANG Qin, MA Lukai, et al. Study on Quality Change of Waxberry in Storage Period by Slow Freezing and Fast Freezing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 365-371. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040229

· 贮运保鲜 ·

# 缓冻和速冻对杨梅保藏期品质 变化规律的探究

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:** 本文探究了空气介质下, 缓慢冷冻 ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和快速冷冻 ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 对杨梅果实细胞壁组织结构的影响, 及其保藏期间主要营养品质成分的变化, 并通过低场核磁技术观测杨梅保藏期内的果实内部水分以及迁移情况。结果显示, 速冻处理的杨梅果实细胞壁形态保持较好, 缓冻处理的细胞壁横截面存在明显缝隙; 在 25 d 的保藏期中, 果实水分含量逐步减少, 但速冻杨梅水分迁移幅度较小, 其总横向弛豫时间大于缓冻杨梅的弛豫时间, 说明速冻可以有效维持果实水分活度; 速冻杨梅自由水信号值仅下降 18%, 而缓冻杨梅自由水信号值下降了 47.75%, 可见速冻有利于保持果实水分含量; 此外, 果实营养物质逐渐降低, 但速冻杨梅保藏末期总糖含量为 13.64 mg/g、可滴定酸含量为 13.43 g/L、总酚和花色苷含量分别为 15.43 mg/mL 与 0.53  $\mu\text{mol/g}$ , 主要营养指标保有率均在不同程度上高于缓冻杨梅, 因此速冻方式能有效延缓杨梅果实营养物质的流失。

**关键词:** 速冻, 缓冻, 杨梅, 保藏期, 低场核磁

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)03-0365-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040229



本文网刊:

## Study on Quality Change of Waxberry in Storage Period by Slow Freezing and Fast Freezing

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 this study, the effects of slow freezing ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and quick freezing ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) on the cell wall structure of waxberry fruits were investigated, and the changes of main nutrient quality components during storage were also studied. The moisture content and migration of waxberry fruits during storage were observed by low field NMR. The results showed that the cell wall morphology of quick-frozen waxberry fruits maintained well, and there were obvious gaps in the cross section of the cell wall of slow-frozen waxberry fruits. During the storage period of 25 days, the water content of fruit gradually decreased, but the range of water transfer of quick-frozen waxberry was small, and the total lateral relaxation time was larger than the relaxation time of slow-frozen waxberry, indicating that quick-frozen waxberry could effectively maintain fruit water activity. The free water signal value of quick-frozen waxberry decreased only by 18%, while the free water signal value of slow-frozen waxberry decreased by 47.75%, indicating that quick-frozen waxberry was beneficial to maintaining fruit water content. In addition, fruit nutrients decreased gradually, but the total sugar content, titratable acid content, total phenols and anthocyanins contents were 13.64 mg/g, 13.43 g/L, 15.43 mg/mL and 0.53  $\mu\text{mol/g}$ , respectively, at the end of storage stage of quick-frozen waxberry. The retention rates of main nutritional indexes were higher than those

收稿日期: 2022-04-20

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。

\* 通信作者: 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。

of slow frozen waxberry. Therefore, quick-freezing can effectively delay the loss of nutrients in waxberry fruits.

**Key words:** quick freezing; slow freezing; waxberry; storage period; low field nuclear magnetic resonance

杨梅(*Myrica rubra*),属于木兰纲、杨梅科、杨梅属灌木植物,其产区主要集中于江南一带的浙江、广东、广西和福建等地;其因沁人心脾的酸甜口感和颇高的抗氧化活性而成为国内受众较大和比较有产销价值的果蔬之一,其药用特性被应用于传统的中医学中已有两千多年的历史<sup>[1]</sup>。杨梅属于肉质浆果类,其特色品种主要有红梅和东魁,前者也称作早梅,味偏酸,颜色淡红,成熟时间较早,一般在3月份即可采收;后者的味道偏甜,果实呈暗红色,是典型的晚熟品种,成熟时间主要是在4~6月的高温多雨时节;杨梅以鲜销为主,然而其果实没有诸如苹果、橘子那般的外果皮保护层,而是直接裸露在外界中,果肉柔软且非常容易腐烂,极易遭受机械应力的损伤、生理的恶化还有病原菌的侵染;在高湿高温的恶劣环境下,果实采收后,其贮藏期最多只有2 d左右,这在很大程度上制约了其销售渠道和经济效益的发展<sup>[2]</sup>,因而科学家们一直致力于研发杨梅的保鲜方法。

杨梅现阶段的保鲜手段较多,例如气调保藏<sup>[3]</sup>、高压静电物理场保藏<sup>[4]</sup>、超声波处理保藏<sup>[5]</sup>和辐照杀菌保藏<sup>[6]</sup>等,其中采用低温气调贮藏<sup>[7]</sup>是目前相对理想的贮藏方法,但杨梅的贮藏货架期仍十分短暂,同时该方法也存在技术和设备复杂、成本高昂等不足。冷冻是一种被认为对果蔬中生物活性破坏最小和最为安全的保鲜手段<sup>[8]</sup>,是保持色泽、香气、味道、品质以及营养价值的有效办法,然而目前的研究对于杨梅冷冻过程中具体的品质及质构变化鲜有明确的表征。因此,本实验通过对比两种冷冻方式,探寻杨梅冷冻过程中的理化指标以及组织架构的变化情况,尝试阐述杨梅冷冻保藏中的品质变化规律,为进一步改善杨梅冻品质量提供一定程度上的数据参考,有助于加强冷冻保鲜技术在杨梅产销中的应用,进而为杨梅产业的可持续发展及提高其商业价值提供帮助。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

东魁杨梅 2021年4月10号采摘于广东省梅州市祥达种植基地,果实成熟度为8成熟。分类筛选出形状大小均一、无机械应力损伤、无虫害霉变的杨梅,数量均分为A、B两组后放置于4℃冰柜中预冷1 d备用;氢氧化钠、氯化钡、草酸、酚酞等均为分析纯,广州索奥生物科技有限公司;总糖含量检测试剂盒 北京索莱宝科技有限公司;植物花色苷含量试剂盒 上海索桥科技有限公司;戊二醛溶液、钨酸溶液、柠檬酸铅溶液、醋酸双氧铀乙醇饱和溶液、福林酚试剂 广州科为生物科技有限公司。

Meso MR23-040H-I 低场核磁共振成像分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司;TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司;ZD-2 型酸

碱滴定仪 上海仪电科技股份有限公司;DW-86L828J 超低温冰箱 青岛海尔集团公司;JEOL JEM-2100Plus 透射电镜 日本电子株式会社;Testo108 食品物料中心温度计 德国德图公司;LEICA-EM-UC7 型超薄切片机 德国徕卡公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 杨梅果实处理方式及冻结所需时间的测定

A组(缓冻处理)杨梅放入-20℃冰柜中(耗电量为510 W/24 h),B组(速冻处理)杨梅放入-80℃超低温冰箱(耗电量为1000 W/24 h);使用食品物料中心温度计测定果实中心温度,以-18℃为冻结点,分别记录两组所需时间为120和29 min。冻结后的杨梅分装于塑封袋内并存放于-20℃冷库中备用,待测定指标时,取样置于常温水浴中解冻至物料中心温度为10℃。

1.2.2 杨梅果实细胞壁形态透射电镜观察 分别取新鲜、缓冻和速冻处理的杨梅部分果实肉柱,长约1 cm,置于1.5 mL离心管内,加入2.5%的戊二醛溶液(固定液加满离心管,使样品完全浸没在固定液中),放置于4℃下保存12 h;倒掉固定液,用0.1 mol/L, pH7.0的磷酸缓冲液漂洗样品三次,每次15 min;用1%的钨酸溶液固定样品1~2 h;小心取出钨酸废液,用0.1 mol/L, pH7.0的磷酸缓冲液漂洗样品三次,每次15 min;用梯度浓度(包括30%、50%、70%、80%、90%和95%五种浓度)的乙醇溶液对样品进行脱水处理,每种浓度处理15 min,再用100%的乙醇处理20 min;最后过渡到纯丙酮处理20 min。用环氧树脂与丙酮的混合液(体积比=1:1)处理样品1 h;用环氧树脂与丙酮的混合液(体积比=3:1)处理样品3 h;纯环氧树脂处理样品过夜;将经过渗透处理的样品包埋起来,70℃加热过夜,即得到包埋好的样品。样品在LEICA-EM-UC7型超薄切片机中切片,获得70~90 nm的切片,切片经柠檬酸铅溶液和醋酸双氧铀50%乙醇饱和溶液各染色5~10 min,晾干后即可在透射电镜中2万倍数观察。

1.2.3 杨梅果实水分弛豫时间(T<sub>2</sub>)及水信号峰值的测定 开启低场核磁共振成像分析仪<sup>[9]</sup>,设定磁场中心温度为32℃,待温度稳定后,将标准水样放入直径60 mm的磁体线圈中,点击单次采样,仪器将会自动校准射频和中心频率。校准完毕后,取完整的杨梅果实放入磁体线圈中心位置,而后采用CPMG序列采集样品的水分信号,具体参数设置如下:

射频(SF)=21 MHz;频率偏移(O1)=253788.65 Hz;P1脉宽=10.00 μs;P2脉宽=19.04 μs;采样频率(SW)=200 kHz;射频延时(RFD)=0.02 ms;采样点数(TD)=720014;等待时间(TW)=4000 ms;时延(TE)=0.2 ms;

回波个数(NECH)=18000;放大增益(DRG1)=1;模拟增益(DR)=1;重复采样次数(NS)=8。每个处理重复测定 3 次。选择迭代次数十万次进行数据反演。每 5 d 进行取样测定。

1.2.4 杨梅果实内部水分分布测定 每 8 d 取样测定一次,25 d 内测定 4 次。

参数设置<sup>[10]</sup>:采样层数=5,层厚度=3 mm,层间距离=1 mm,重复等待时间=800 ms,回波时间=18.20 ms,频率编码视野大小=80 mm,相位编码视野大小=80 mm,累加 6 次,K 空间大小 256×196。

1.2.5 杨梅果实硬度的测定 使用 TA-XT Plus 型质构仪测定<sup>[11]</sup>,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,每 5 d 进行取样,每个样品测定三个点,结果取平均值。

1.2.6 杨梅果实总糖含量的测定 参照可见分光光度法<sup>[12]</sup>,使用总糖含量检测试剂盒进行测定;每 5 d 进行取样测定。

1.2.7 杨梅果实可滴定酸含量的测定 参照酸碱滴定法进行测定<sup>[13]</sup>;每 5 d 进行取样测定。

1.2.8 杨梅果实总酚含量的测定 参照福林酚比色法<sup>[14]</sup>,取 0.5 g 果肉,用 20 mL 4% 的氢氧化钠溶液水解 1 h,然后用盐酸中和至 pH7.0,定容至 100 mL。量取定容后的溶液 0.5 mL,用水稀释成 10 mL,加 1 mL 福林酚试剂及 2 mL 20% 的碳酸钠溶液,沸水浴加热 1 min,冷却并稀释成 20 mL,室温放置 30 min,测定 745 nm 波长下的吸光值,重复 3 次,取平均值,根据标准曲线: $y=0.1326x-0.0665$ , $R^2=0.9958$ ,计算其总酚含量。

1.2.9 杨梅果实花色苷含量的测定 参照 pH 示差法<sup>[15]</sup>,使用植物花色苷含量试剂盒进行测定。

### 1.3 数据处理

采用 Origin 2018 制图、SPSS 24 作统计分析,使用单因素方差分析检验法,在 95% 置信水平下, $P<0.05$  代表具有显著性差异; $P>0.05$  代表差异不显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 杨梅果实细胞壁形态变化

冻结的杨梅果实经解冻处理后,通过生物透射电镜(TEM),放大 2 万倍观察杨梅果实细胞壁形态,如图 1 所示,经过缓慢冷冻处理后的杨梅果实细

胞壁出现了明显的冷冻损伤,这很有可能是由于在冻结过程中形成了体积较大的冰晶,从而使得细胞壁内部结构被冰晶撑破,解冻后便留下了如图 1B 中红框所示的明显缝隙;而速冻处理的杨梅细胞壁整体结构基本完好无损,细胞壁结构致密程度不亚于未冻结的新鲜杨梅,这在一定程度上说明了快速冷冻可以使样品在冻结过程中温度急速下降,快速通过“冰晶生成带”,从而形成体积细小且分布均匀的冰晶<sup>[16]</sup>,解冻后自然很大程度地避免了细胞壁形态遭到破坏;由此可见速冻处理相较于缓冻处理,其造成的冷冻损伤较小。

### 2.2 杨梅果实水分横向弛豫谱图的变化

由低场核磁共振仪所测得的水分横向弛豫图谱反映的是杨梅果实的水分组成、含量及其活跃程度<sup>[17]</sup>。由图 2、图 3 可知,杨梅内部含有 3 组水分,其中峰顶点时间介于 0.1~10 ms 区间内的称为结合水,是果实中最不活跃的一组水分,其与杨梅内部结构结合十分紧密,受机体的束缚作用而表现出非常短暂的弛豫时间,在 3 组水分中含量最少但状态最为稳定;峰顶点时间介于 10~100 ms 区间内的称作不易流动水,一般存在于果实细胞间质中,活跃度高于结合水,但仍然受限于胞内,相对自由水来说不容易被磁场激发;自由水是含量最高、活跃度最高的一组水分,一般存在于细胞外,是一种游离性的水分,比较容易散发到胞外而流失,该组水分的峰顶点时间位于 100~1000 ms 区间内<sup>[18]</sup>。对比缓冻和速冻的弛豫图谱,发现随着贮藏天数的增加,缓冻组别的杨梅自由水信号幅度下降明显,信号幅度即反映该组水分的含量,从 1552.377 降低到 811.174,下降率接近 50%,而速冻组别自由水下降率为 18%;速冻组别的不易流动水在自由水含量下降的情况下,呈现逐步上升的趋势,这可能是游离水在流失的同时,亦有一部分迁移到胞内转化为细胞间质水<sup>[19]</sup>,反观缓冻组别,不易流动水的峰与自由水的峰发生交联,两者间的界限被打破,可能是缓冻对杨梅细胞造成冷冻损伤而破裂,自由水与不易流动水发生融合<sup>[20]</sup>;两个组别的结合水在 25 d 贮藏期内均未发生明显变化。

### 2.3 杨梅果实内部水分分布变化

低场核磁成像(MRI)图<sup>[21]</sup>可以直接反映杨梅果实内部的水分含量以及分布情况<sup>[22]</sup>。见图 4 可知,红色代表水分充足,蓝色代表没有水分;第 0 d 的新



图 1 杨梅果实细胞壁形态对比

Fig.1 Comparison of cell wall morphology of waxberry fruit

注: A: 新鲜的杨梅细胞壁; B: 缓冻处理后的杨梅细胞壁; C: 速冻处理后的杨梅细胞壁。

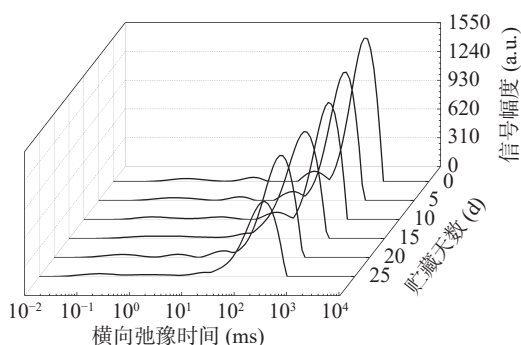


图2 杨梅缓冻处理后的水分横向弛豫图谱

Fig.2 Horizontal water relaxation pattern of waxberry after slow freezing treatment

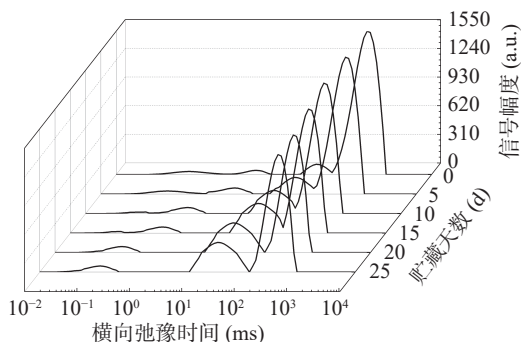


图3 杨梅速冻处理后的水分横向弛豫图谱

Fig.3 Horizontal water relaxation pattern of waxberry after quick freezing treatment

鲜杨梅的MRI图主要呈现出一片红斑,随着贮藏时间的增加,红斑逐渐往果实中心收缩直至完全褪去,MRI图呈现出黄色乃至绿色,即代表水分不断流失,贮存到25d时已基本只呈现绿色;对比缓冻和速冻组别,可见缓冻组别的水分流失更快,贮存16d时只剩少许红斑,而速冻组别贮存25d时果核外圈仍有大量红斑,由此可知速冻能达到更好的保水保鲜效果,具体原因可能是杨梅在速冻过程中,果实内部水分,尤其是活度较大的自由水在发生迁移作用之前就

因极低的温度而被迅速地冻结,形成稳定且均匀的固态水(冰晶),在极大程度上缓解了冷冻所造成的损伤;反观缓慢冻结的杨梅,环境温度不够低,果实内水分未被及时冻结而发生了迁移,导致最终形成大块状冰晶,破坏了果实的内部结构<sup>[23]</sup>,因此在后续储藏过程中就不可避免地发生大量的水分流失,这一点可以从图中的缓冻组果实随着贮藏时间的增加,其内部水分逐渐往一侧迁移流失,而速冻组的果实水分则是以圆圈状均匀地向外界散发得到印证。

### 2.4 杨梅果实硬度值的变化

由图5可见,经过冷冻处理后,果实硬度值随着贮藏天数的增加呈现不断下降的趋势,不同冷冻速率处理的杨梅果实硬度值变化均有显著性差异( $P < 0.05$ );速冻组硬度值从贮藏初期的1.00 N下降到贮藏末期的0.47 N,而缓冻组由0.95 N下降到0.35 N;后者下降幅度更大,这可能是由于缓慢冻结过程中产生了体积较大且分布极为不均匀的冰晶,这些冰晶破坏了杨梅的细胞结构<sup>[24]</sup>,导致大量的水分流失,果实组织失去了水分的支撑,就会越发的疏松,从而表现为硬度值的不断下降。

### 2.5 杨梅果实总糖含量的变化

实验测得新鲜杨梅的总糖含量为22.16 mg/g,随着贮藏时间的推移,果实总糖含量逐步下降,缓冻或速冻处理对杨梅的总糖含量变化都有显著性差异( $P < 0.05$ );经过25d的贮藏期,速冻组杨梅的总糖含量剩余13.64 mg/g,缓冻组杨梅的总糖含量剩余12.33 mg/g,且由图6可知,缓冻组在贮藏期第5d即流失大量糖分,原因可能是缓冻过程中产生的大体积冰晶破坏<sup>[25]</sup>了杨梅果肉细胞壁和细胞膜,解冻后,细胞间质随着游离水流出院外,其中就包含着大量的可溶性糖的流失,因此造成总糖含量的大幅下降。

### 2.6 杨梅果实可滴定酸含量的变化

杨梅果实的酸性成分与糖分含量比例得当是保

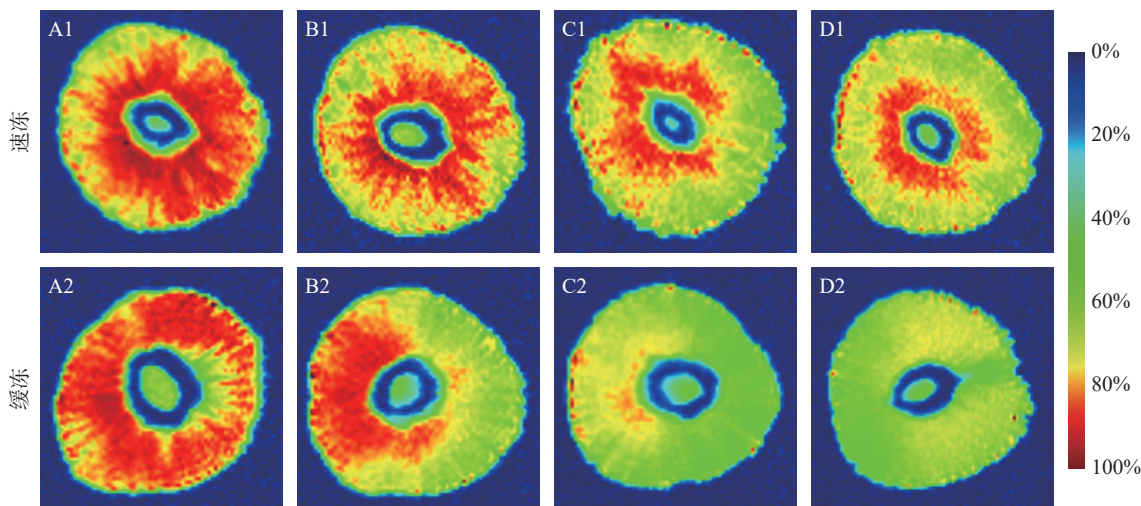


图4 杨梅果实内部水分分布变化

Fig.4 Variation of water distribution in waxberry fruit  
注: A1、A2: 0 d; B1、B2: 8 d; C1、C2: 16 d; D1、D2: 25 d。

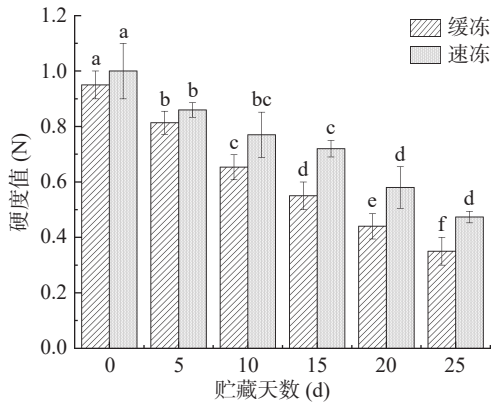


图 5 杨梅硬度值的变化

Fig.5 Changes of hardness values of waxberry

注: 不同字母代表同一处理组不同贮藏时间具有显著性差异 ( $P<0.05$ ); 图 6~图 9 同。

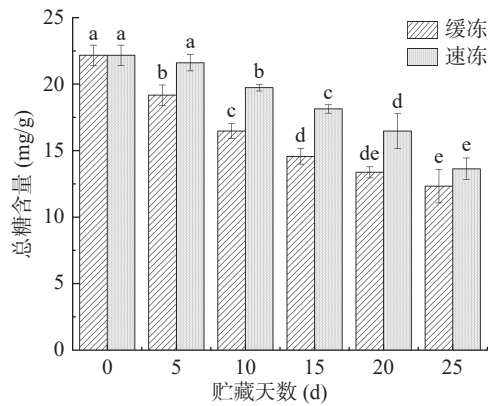


图 6 杨梅总糖含量的变化

Fig.6 Changes of total sugar content of waxberry

障杨梅丰富口感的前提,由图 7 可知,可滴定酸含量整体呈下降趋势,两个实验处理组对杨梅可滴定酸含量变化均具有显著性差异 ( $P<0.05$ ); 在 25 d 贮藏期内,缓冻组的可滴定酸含量下降 41.3%,速冻组可滴定酸含量下降 36.5%。由于速冻处理时温度更低,杨梅果实呼吸作用<sup>[26]</sup>得以充分抑制,糖和有机酸等基本营养物质不会被大量的氧化分解,同时低温也使得酶活力降低,酸性成分降解程度减少从而在贮藏后期得以保留更高的可滴定酸含量。

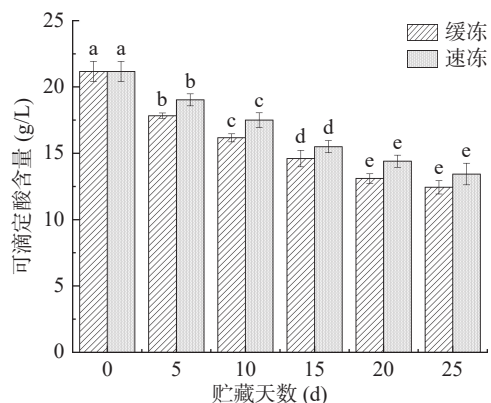


图 7 杨梅可滴定酸含量的变化

Fig.7 Changes of titratable acid content of waxberry

### 2.7 杨梅果实总酚含量的变化

酚类物质能有效抑制有害的氧化反应,对维持杨梅果实品质具有重要作用<sup>[27]</sup>。由图 8 可知,总酚含量不断下降,速冻和缓冻处理对杨梅总酚含量变化均有显著性差异 ( $P<0.05$ ); 第 0 d 的新鲜杨梅总酚含量为 22.17 mg/mL,贮藏 25 d 后,缓冻组总酚含量剩余 14.80 mg/mL,稍低于速冻组 (15.43 mg/mL),然而在贮藏第 5 d 时,缓冻组总酚含量下降率明显高于速冻组;缓慢冷冻造成的冷冻损伤使得杨梅细胞破裂,内部结构直接暴露于空气中,果实中的一部分多酚类物质随着内部水分一并流失到胞外,而另一部分则遭遇外界氧气而转化为醌,从而总酚含量逐渐下降,果实失去酚类的保护,将逐步氧化衰败。而快速冷冻可以在较短时间内将杨梅内部的游离水分冻结,避免了大体积冰晶的生成,从而缓解了果实细胞受到的机械应力损伤,有效降低了总酚含量的下降速率。

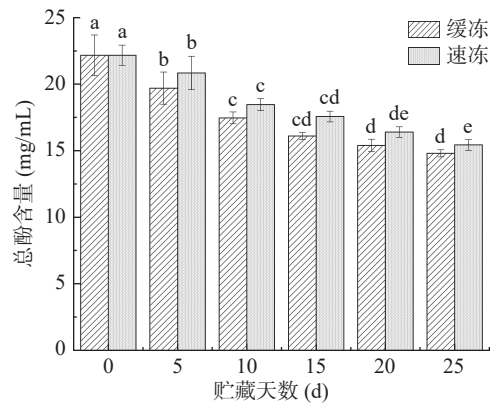


图 8 杨梅总酚含量的变化

Fig.8 Changes of total phenolic content of waxberry

### 2.8 杨梅果实花色苷含量的变化

杨梅花色苷是水溶性物质<sup>[28]</sup>,也是果实色素的主要组成物质,当水分大量流失的同时,溶于果实水分中的花色苷也随之流出体外,含量大幅下降,果实色泽也会相应地受到一定程度的影响,具体表现为杨梅外观紫红色变淡且失去光泽。两个冷冻处理组对杨梅花色苷含量变化均具有显著性差异 ( $P<0.05$ )。由图 9 可见,新鲜杨梅花色苷含量为 1.33  $\mu\text{mol/g}$ ,其

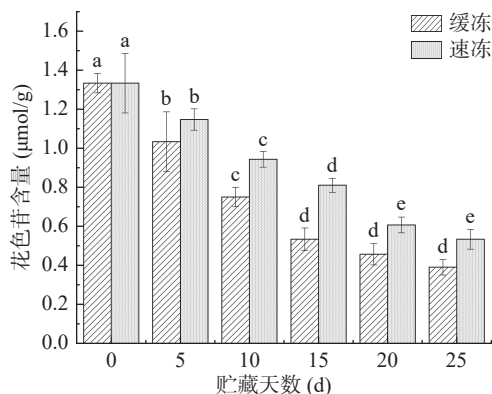


图 9 杨梅花色苷含量的变化

Fig.9 Changes of anthocyanin content of waxberry

含量均随着贮藏天数的增加而下降,贮藏5 d时缓冻组花色苷含量已下降22.56%,下降幅度明显大于速冻组;贮藏末期,缓冻和速冻组花色苷含量分别剩余0.39和0.53  $\mu\text{mol/g}$ ,仍然是速冻组更优,这可能是得益于较低的处理温度可以在短时间内冻结果实水分,阻止其发生大规模迁移,从而缓解了后续贮藏过程中的水分流失,使花色苷含量得以保持。

### 3 结论

本实验探究了缓慢冷冻和快速冷冻对杨梅保藏期品质变化的规律,借助生物透射电镜观察发现,速冻杨梅的果实细胞壁形态保持较好,而缓冻杨梅细胞壁遭受较大的冷冻损伤,其组织横截面中存在明显的大体积冰晶消融后留下的缝隙;通过低场核磁共振仪测得杨梅果实含有结合水、不易流动水和自由水三种水分,随着贮藏时间的增加,自由水含量逐步下降,但缓冻组的自由水含量下降幅度更大,核磁成像图显示出缓冻组的果实水分发生了较大的迁移而致使其水分流失加快。除此之外还对杨梅果实25 d贮藏期内的硬度值、总糖含量、可滴定酸含量、总酚含量以及花色苷含量进行测定,结果表明,杨梅营养物质在冷冻保藏过程中均呈现出逐渐流失的趋势,且两种冷冻处理方式对杨梅的营养指标以及质构特性都具有显著性差异( $P < 0.05$ );速冻处理的杨梅果实在贮藏末期,硬度值下降53.0%,总糖含量下降38.5%,可滴定酸含量下降36.5%,总酚与花色苷含量分别下降30.40%和60.15%,在消耗较短冻结时间的同时可以更好地维持杨梅果实的品质,其原因可能是较低的温度能够充分抑制杨梅果实的呼吸作用,而且在冻结过程中能迅速穿过冰晶生成带,形成众多细小且分布均匀的冰晶,较大程度上减少了冷冻损伤,从而得以保留更多的营养物质。速冻技术作为一种绿色、安全、无害的物理保鲜方法,对于实现杨梅产地高效冻结具有重要作用,上述研究表征了杨梅冷冻过程的品质以及质构变化规律,为进一步研究果蔬冷冻保鲜技术提供了一定的数据参考。

### 参考文献

- [1] 肖田. 广东·广州杨梅量少价高[J]. 中国果业信息, 2014, 31(5): 63. [XIAO T. Canton·Canton waxberry in small quantity and high price[J]. China Fruit News, 2014, 31(5): 63.]
- [2] 梁森苗, 徐云焕, 王伟, 等. 杨梅果实发育过程中外观及主要营养品质形成规律研究[J]. 核农学报, 2016, 30(6): 1135-1142. [LIANG S M, XU Y H, WANG W, et al. Study on the formation discipline of fruit appearance and mainnutrient quality in the fruit development of Chinese waxberry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(6): 1135-1142.]
- [3] 凌建刚, 康孟利, 朱麟, 等. 杨梅箱式气调模拟贮藏保鲜技术研究[J]. 北方园艺, 2012, 36(19): 159-161. [LING J G, KANG M L, ZHU L, et al. Study on waxberry preservation during modified atmosphere and transportation[J]. Northern Horticulture, 2012, 36(19): 159-161.]
- [4] 李海波, 谢超, 梁瑞萍, 等. 基于低压静电场技术(LVEF)协同

- 低温对舟山杨梅保鲜过程中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 265-270. [LI H B, XIE C, LIANG R P, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with low temperature on quality of Zhoushan waxberry during fresh-keeping[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 265-270.]
- [5] 刘梦培, 孙文文, 韩卫娟, 等. 超声波处理对采后甜柿品质及相关酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 301-307. [LIU M P, SUN W W, HAN W J, et al. Effects of ultrasonic treatment on the quality and related enzyme activities of sweet persimmon after post-harvest[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 301-307.]
- [6] 石彬, 李咏富, 龙明秀, 等. 壳聚糖复合膜与辐照保鲜技术对贵长猕猴桃保鲜效果的研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 171-175. [SHI B, LI Y F, LONG M X, et al. Effect of chitosan composite film and irradiation on Guichang kiwifruit preservation[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 171-175.]
- [7] 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. [WU W J, CHENG L N, XU Y J, et al. Advantages of liquid nitrogen spraying quick-freezing on the quality preservation of waxberry[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 140-146, 330.]
- [8] 曹鹏飞, 刘青娥. 杨梅贮藏保鲜工艺技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(24): 221-222, 225. [CAO P F, LIU Q E. Research progress on storage and preservation technology of waxberry[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(24): 221-222, 225.]
- [9] LIU W C, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A novel combination of LF-NMR and nir to intelligent control in pulse-spouted microwave freeze drying of blueberry[J]. LWT, 2020, 137(11): 110455.
- [10] YANG D, WU G C, LI P Y, et al. The effect of fatty acid composition on the oil absorption behavior and surface morphology of fried potato sticks via LF-NMR, MRI, and SEM[J]. Food Chemistry: X, 2020, 7(20): 100095.
- [11] 徐春蕾, 王佳, 李长洪, 等. 气调包装对混合鲜切果蔬保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 131-135. [XU C L, WANG J, LI C H, et al. Effect of modified atmosphere packaging on fresh-keeping of mixed fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 131-135.]
- [12] 郑俊峰, 谢建华, 张巧芬, 等. 减压贮藏对杨梅果实采后品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 33-37. [ZHENG J F, XIE J H, ZHANG Q F, et al. Effects of hypobaric storage on postharvest qualities of Chinese waxberry (*Myrica rubra*) fruits[J]. Storage and Process, 2021, 21(2): 33-37.]
- [13] 李文生, 冯晓元, 王宝刚, 等. 应用自动电位滴定仪测定水果中的可滴定[J]. 食品科学, 2009, 30(4): 247-249. [LI W S, FENG X Y, WANG B G, et al. Study on determination of titratable acidity in fruits using automatic potentiometric titrator[J]. Food Science, 2009, 30(4): 247-249.]
- [14] 谭晓舒, 吴建文, 梨贵卿, 等. 火麻仁油总酚含量福林酚测定法的优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 166-173. [TAN X S, WU J W, LI G Q, et al. Optimization of folin-ciocalteu method for

- the determination of total polyphenols in hemp seed oil[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(2): 166–173. ]
- [ 15 ] PENG J, WANG K, MA C, et al. Determination of anthocyanin and moisture content of purple sweet potatoes during drying process by their optical properties in the 400~1050 nm range[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359(5): 129811.
- [ 16 ] JIA G L, CHEN Y M, SUN A D, et al. Control of ice crystal nucleation and growth during the food freezing process[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(3): 2433–2454.
- [ 17 ] 黄国中, 王琴, 刘东杰. 基于 LF-NMR 及其成像技术探究冬枣贮藏过程中的水分变化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 319–324. [ HUANG G Z, WANG Q, LIU D J. Application of LF-NMR and its imaging technology in the study of winter jujube storage process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 319–324. ]
- [ 18 ] HU J X, BI J F, LI X, et al. Understanding the mechanism of moisture migration impact on the texture and color characters of dried apple cubes[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(12): 16031.
- [ 19 ] HE X, LIN R, CHENG S S, et al. Effects of microwave vacuum drying on the moisture migration, microstructure, and rehydration of sea cucumber[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2499–2512.
- [ 20 ] LI Y T, OBADI M, SHI J C, et al. Determination of moisture, total lipid, and bound lipid contents in oats using low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 87(3): 103401.
- [ 21 ] KAMAL T, SONG Y K, ZHANG T, et al. Effect of hot-air oven dehydration process on water dynamics and microstructure of apple (*Fuji*) cultivar slices assessed by LF-NMR and MRI[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(15): 1–14.
- [ 22 ] LIU Q S, HE Y, CAO Q F, et al. Correlation between water state and texture during moistening of *Paeoniae Radix Alba* by LF-NMR/MRI[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(20): 45–49.
- [ 23 ] ZHAO Y Y, SONG C C, DAVID B, et al. Salicylic acid treatment mitigates chilling injury in peach fruit by regulation of sucrose metabolism and soluble sugar content[J]. *Food Chemistry*, 2021, 358(12): 129867.
- [ 24 ] PANNIPA Y, SURIYAN S. Impact of rainfall rate and temperature during fruit development on chilling injury of Queen pineapples (*Ananas comosus* L.) during cold storage[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2021, 62(5): 777–784.
- [ 25 ] CAO Y, ZHAO L Y, HUANG Q L, et al. Water migration, ice crystal formation, and freeze-thaw stability of silver carp surimi as affected by inulin under different additive amounts and polymerization degrees[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124(0): 107267.
- [ 26 ] ARTEMIO P L, MARTHA R G, TEODORO E S, et al. Postharvest respiration of fruits and environmental factors interaction: An approach by dynamic regression models[J]. *Scientia Agropecuaria*, 2020, 11(1): 23.
- [ 27 ] MEDDA S, FADDA A, DESSENA L, et al. Quantification of total phenols, tannins, anthocyanins content in *Myrtus communis* L. and antioxidant activity evaluation in function of plant development stages and altitude of origin site[J]. *Agronomy*, 2021, 11(6): 1059.
- [ 28 ] ROSA D, WEIS G, MORO B, et al. Effect of wall materials and storage temperature on anthocyanin stability of microencapsulated blueberry extract[J]. *LWT Food Science and Technology*, 2021, 142(4): 111027.