

# 秋红李子贮藏过程中水分迁移对其质构的影响

朱丹实, 梁洁玉, 吕佳煜, 陶桢, 冯叙桥, 励建荣

(渤海大学食品科学研究院, 辽宁省食品安全重点实验室, 辽宁锦州 121013)

**摘要:** 果实贮藏过程中水分迁移直接影响果实的贮藏品质, 不同温度条件下水分迁移规律及影响机制有所不同。本研究以秋红李子为实验材料, 采后分别在 0 °C、4 °C、10 °C、20 °C 下贮藏, 利用低场核磁共振技术研究贮藏过程李子中不同状态水分的迁移规律, 同时利用质构仪研究李子采后果皮硬度、果肉硬度和果肉粘度的变化规律, 并将水分迁移与质构变化建立相关性联系。结果表明: 贮藏温度较低时, 水分含量、液泡水和李子质构品质降低较慢, 跟 10 °C 和 20 °C 贮藏比较, 低温贮藏时细胞壁水和细胞质水会分别出现特殊的峰值和最低点, 这可能是低温影响秋红李子品质变化的关键特点。细胞壁水与李子质构相关性不显著 ( $p < 0.05$ ); 低温时细胞质水与果皮和果肉硬度变化负相关性显著 ( $p < 0.05$ ), 液泡水对质构各指标变化正相关性显著 ( $p < 0.05$ ); 10 °C 和 20 °C 贮藏时, 细胞质水和液泡水对果肉粘度影响均较小。

**关键词:** 李子; 贮藏; 低场核磁共振; 质构; 水分

文章编号: 1673-9078(2014)12-100-105

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.12.017

## Effects of Moisture Mobility on Qihong Plum during Storage

ZHU Dan-shi, LIANG Jie-yu, LV Jia-yu, TAO Zhen, FENG Xu-qiao, LI Jian-rong

(Research Institute of Food Science, Bohai University. Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, China)

**Abstract:** Moisture mobility during fruit storage directly affected the storage quality of fruit and the moisture mobility regularity and mechanism in different storage temperature were distinct. To explore the effects of moisture mobility on the quality of plum, the moisture mobility of Qihong plum in different temperature (0 °C, 4 °C, 10 °C, 20 °C) during storage was determined by low field nuclear magnetic resonance (NMR) technology and the microscopic process for the moisture dynamic variation was studied. Combined with texture analyzer, the skin hardness, pulp hardness and adhesiveness were determined and the correlation was analyzed. The results showed that in lower storage temperature, the moisture content, vacuoles water and texture quality of plum reduced more slowly. Compared with 10 °C and 20 °C, stored in lower temperature, cell wall and cytoplasm water appeared special peak and nadir respectively, which maybe the key point to the effect of low temperature on plum quality. Cell wall water presented no significant correlation with the texture of plum ( $p > 0.05$ ); in lower storage temperature, cytoplasm water presented a significantly negative correlation with the skin hardness and pulp hardness ( $p < 0.05$ ), vacuoles water presented a significantly positive correlation with the skin hardness, pulp hardness and adhesiveness ( $p < 0.05$ ); both cytoplasm water and vacuoles water presented no significant correlation with pulp adhesiveness in 10 °C and 20 °C ( $p > 0.05$ ).

**Key words:** plum; storage; low field nuclear magnetic resonance; texture; water

李子 (*Prunus salicina* Lindl.) 是蔷薇科植物李树的果实, 味酸, 能促进胃酸和胃消化液的分泌, 并能促进胃肠蠕动。李子属呼吸跃变型果实, 采收于高温季节, 后熟迅速, 并且会出现明显的呼吸高峰和乙烯产生高峰, 进而导致果实腐烂<sup>[1]</sup>。低温贮藏可以有效地抑制果实采后迅速软熟和控制病原微生物, 但贮藏

收稿日期: 2014-05-08

项目资助: 辽宁省食品安全重点实验室开放课题 (LNSAKF2011026); 辽宁省食品质量与安全优秀教学团队项目 (SPCX12)

作者简介: 朱丹实 (1978-), 女, 讲师, 研究方向为农产品贮藏加工

通讯作者: 励建荣 (1964-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事果蔬、水产品贮藏加工与质量安全控制方面的研究

温度过低或长时间低温贮藏易使一些果实发生冷害、果肉褐变及风味变淡。不同采收期和不同品种的李子贮藏条件有很大差异, 发生冷害的临界温度不同, 耐贮性也不同; 合适的采收期和贮藏温度可以使果实在整个贮藏过程中都保持较好的硬度和口感, 采收期过早李子口感酸涩, 更易发生冷害, 使品质劣变<sup>[2]</sup>。

低场核磁共振 (LF-NMR) 是一种快速有效的研究分子扩散的方法, 对通过研究水分迁移过程来提高产品稳定性和延长货架期具有积极意义。近年来, 低场核磁共振技术逐渐开始用于检测多种果蔬不同条件下水分状态的变化, 进而分析其相应品质的变化, 如猕猴桃渗透脱水过程中水分迁移<sup>[3-4]</sup>; 高压处理后草莓

因细胞质膜变化而引起水分迁移<sup>[5]</sup>；苹果冷冻干燥过程中水分变化<sup>[6]</sup>；盐渍土豆在冷藏和冷冻过程中水分状态变化<sup>[7]</sup>。王娜<sup>[8]</sup>研究了核磁共振技术在脐橙贮藏过程中的应用,分析其水分迁移过程对品质劣变的影响; Møller 等<sup>[9]</sup>利用低场核磁共振技术研究了不同处理后苹果不同状态水分含量的变化,而且发现苹果的硬度与液泡水( $T_{24}$ )的变化一致。低场核磁技术在其他领域也有相关的应用,如用于分析盐分及纤维成分对猪肉组织中水分分布和迁移的影响<sup>[10]</sup>;甜玉米不同温度处理后各相态水分变化的研究分析<sup>[11]</sup>。

果实贮藏过程中水分迁移直接影响果实的贮藏品质,不同温度条件下水分迁移规律及影响机制有所不同。本研究选择辽宁地区特色的李子品种-秋红李子为实验原料,利用低场核磁共振技术(LF-NMR)和质构仪器分析,研究不同温度贮藏过程中秋红李子中水分迁移与质构特性变化,并将二者建立联系。通过本研究可以丰富秋红李子保鲜机理,为进一步确定该品种李子最佳贮藏温度并采取相应保鲜技术延长李子货架期提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器设备

秋红李子(*Prunus salicina* Lindl.),锦州北镇果园采摘。挑选个体大小均匀,成熟度均为七成熟(颜色70%~80%为红色),无病虫害和机械伤害的果实,采摘后短时间内运回实验室进行预冷。

PL203型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;NMI20型核磁共振成像仪,上海纽迈电子科技有限公司;DHG-9055A型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;TA-XT-PLUS(SMS)质构仪,超技仪器有限公司;MIR254型低温恒温培养箱,SANYO。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品处理

将预冷处理后的李子分别存放在0℃、4℃、10℃、20℃的低温恒温培养箱中,每3d测定相应的指标,以分析秋红李子品质变化。

#### 1.2.2 水分含量测定

烘箱热空气干燥法,参照曹建康等<sup>[12]</sup>的实验方法。

#### 1.2.3 低场核磁共振研究水分迁移过程

将李子用取样器分别取直径7mm,长度为17mm的圆柱状小块,放入核磁管中进行测定。核磁共振测

定时使用CPMG序列采集样品 $T_2$ 信号,相应的参数设置如下:  $P90(\mu s)=13.5$ ,  $P180(\mu s)=27.00$ ,  $TD=800140$ ,  $SW(KHz)=100$ ,  $D3(\mu s)=100$ ,  $TR(ms)=10000$ ,  $RG1=25$ ,  $RG2=3$ ,  $NS=8$ ,  $Echo\ Time(\mu s)=200$ ,  $Echo\ Count=20000$ 。每个处理重复测定5次。

#### 1.2.4 质构仪分析组织变化

每个处理随机取5个李子样品,用TA-XT-PLUS(SMS)质构仪进行穿刺实验分析李子在贮藏过程中质构变化。质构测定参数设置如下:探头P/2,测试速度1mm/s,测试距离5mm。

#### 1.2.5 数据的统计分析

用Origin 8软件制图,统计分析软件SPSS 19.0进行显著性检验及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分含量的变化

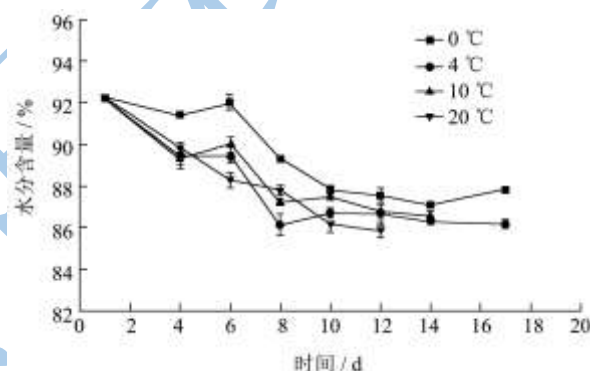


图1 不同温度贮藏过程中秋红李子水分含量的变化

Fig.1 Changing on moisture content of qihong plum during storage in different temperature

水分是果蔬组织的重要组成部分,不同果蔬组织含水量差异很大,水分损失导致果实的感官及食用品质严重降低。图1为秋红李子在不同温度下贮藏时水分含量的变化过程。由图1可知,不同温度下李子在贮藏过程中水分含量总体下降,贮藏前期(0~6d)变化不明显,由于个体差异,甚至略有回升;贮藏中期(6~12d)下降较为明显;贮藏后期(12~18d)水分含量基本保持稳定。李子在20℃贮藏后期,由于微生物作用腐败较为严重,水分在未达到稳定之前,果实已完全腐败,此时水分含量降低6.9%。10℃下李子在第14d失去食用价值,此时水分含量损失6.2%。0℃贮藏条件下,李子水分含量在贮藏末期相对较高,第18d时水分含量损失为4.8%。由于恒重法测定的水分主要是细胞质水和液泡水,在贮藏过程中李子水分含量出现略有回升,可能是由于细胞壁水向细胞质水转化,使得细胞质水和液泡水总含量升高。

2.2 低场核磁研究水分状态的变化

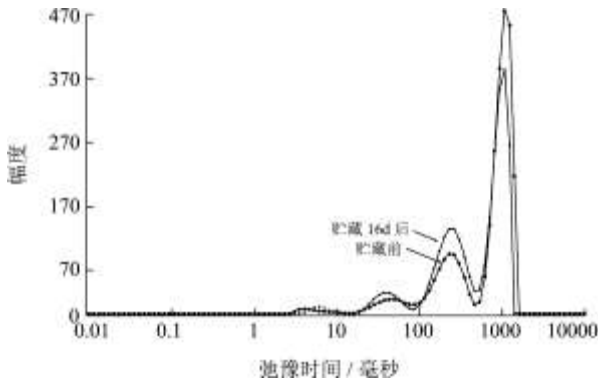


图2 秋红李子 CPMG 序列反演获得的  $T_2$  水分典型峰型图

Fig.2 Distribution curves of relaxation time ( $T_2$ ) obtained by CPMG sequencing of Qihong plum

在不同温度贮藏过程中，利用低场核磁共振技术研究了样品中不同水分状态并通过峰面积归一化法对不同状态水分进行定量。李子低场核磁共振  $T_2$  反演的标准谱图见图2。样品积分面积（即归一化质子密度）与样品中的组分含量成正比，从积分面积的变化可以看出样品中不同相态水含量变化。从如图2上可以看出秋红李子有四个典型峰，由于前两个峰的变化规律较小，可以看作一个整体，且贮藏前后峰面积变化不大，因此根据  $T_2$  弛豫时间，将李子中水分划分为三种状态的水分，即细胞壁水，细胞质水和液泡水，弛豫时间分别对应  $T_{21}$  (0.01~86.9749 ms)， $T_{22}$  (86.9749~533.67 ms)， $T_{23}$  (533.67~1417.47 ms)，其对应的峰积分面积为  $A_{21}$ 、 $A_{22}$  和  $A_{23}$ 。

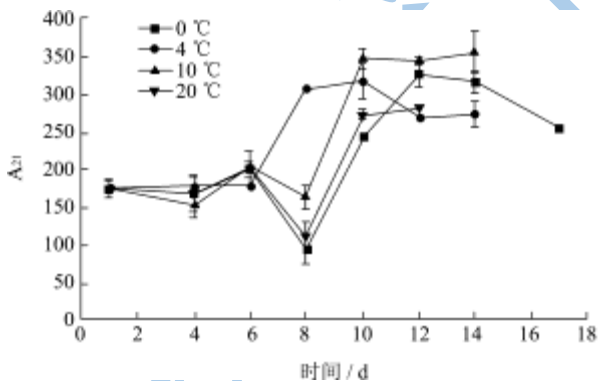


图3 不同温度下秋红李子细胞壁水低场核磁质子密度随贮藏过程的变化

Fig.3 Changes in proton density ( $A_{21}$ ) in low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) images of Qihong plum during storage at different temperatures

图3为秋红李子贮藏过程中细胞壁水( $A_{21}$ )的变化趋势。从图3可以看出，10℃和20℃贮藏条件下李子  $A_{21}$  的变化趋势基本一致，前6d基本不变，第6d下降，可能是因为随着贮藏时间延长果实软化，大

分子物质降解，细胞壁水转化为细胞质水。第8d又开始回升，可能因为此时李子水分含量损失严重（如图1），组织结构开始收缩，部分细胞质水与大分子基团结合转为细胞壁水；10d以后保持稳定。0℃和4℃贮藏条件下李子  $A_{21}$  前6d基本不变，0℃贮藏6~8d期间因转化为细胞质水而使得  $A_{21}$  下降；0℃和4℃贮藏  $A_{21}$  分别第8d和6d开始上升，4d之后达到峰值，可能是由大分子物质的含量升高引起的，因为李子受到低温影响果胶质代谢异常，原果胶等物质含量升高，进一步表现出木质化败坏<sup>[3]</sup>；由0℃和4℃贮藏时李子细胞壁水分别第6d和第8d开始升高，此时李子内部组织开始发生变化，说明4℃比0℃条件下先出现冷害，这与冷害发生的中间效应<sup>[4]</sup>是一致的，但是温度越低，低温伤害越严重。

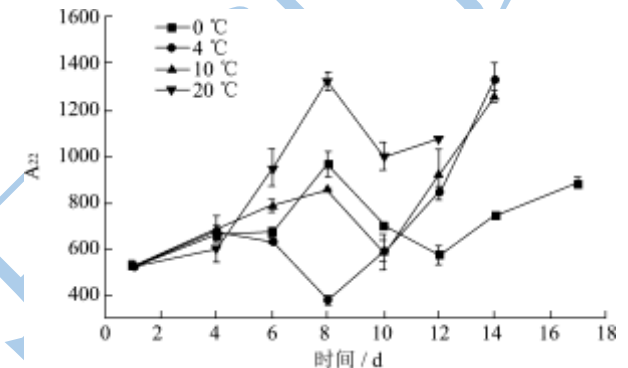


图4 不同温度下秋红李子细胞质水低场核磁质子密度随贮藏过程的变化

Fig.4 Changes in proton density ( $A_{22}$ ) in LF-NMR images of Qihong plum during storage at different temperatures

图4为秋红李子贮藏过程中细胞质水( $A_{22}$ )的变化趋势。由图4可以看出，0℃、10℃和20℃贮藏过程中李子  $A_{22}$  变化趋势基本一致，0℃和10℃贮藏时前6d略有升高，6~8d快速升高，20℃贮藏时4~8d快速升高，第8d均达到峰值，这可能是因为细胞壁水( $A_{21}$ )含量下降，转化成细胞质水，使得  $A_{22}$  上升；8d之后可能由于向液泡水转化而开始下降；10℃和20℃条件下  $A_{22}$  第10d，0℃第12d开始略有回升。4℃贮藏条件下李子  $A_{22}$  前6d略有升高，6~8d下降，可能因为此时李子组织结构变化，细胞壁水的含量升高（图3）由细胞质水转化的， $A_{22}$  下降；8d之后开始升高。

图5为秋红李子贮藏过程中液泡水( $A_{23}$ )的变化趋势。从图5可以看出，不同温度贮藏条件下李子  $A_{23}$  在前4d基本保持稳定，4d后随着贮藏时间的延长均不断下降，主要是因为李子受到环境影响使水分散失，这也是贮藏过程中首先损失的水分。20℃贮藏时4~8d下降较快，8d后趋于稳定；10d前0℃、10℃和

20℃液泡水的变化差异较小, 10 d后4℃和10℃下李子A<sub>23</sub>快速下降; 而0℃贮藏14 d到18 d液泡水的含量又略有升高, 表明液泡水的生成大于液泡水的消耗, 这是加速李子腐败的主要原因之一<sup>[9]</sup>。

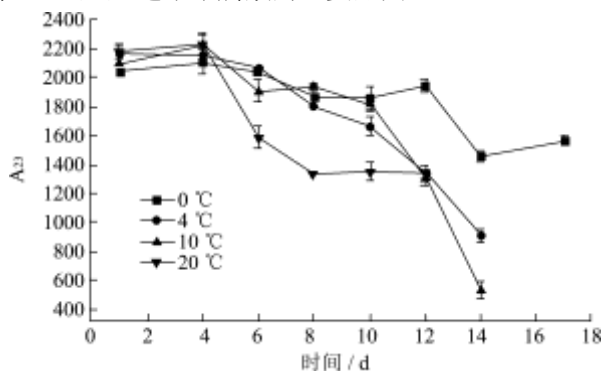


图5 不同温度下秋红李子液泡水低场核磁质子密度随贮藏过程的变化

Fig.5 Changes in proton density (A<sub>23</sub>) of LF-NMR images of Qihong plum during storage at different temperatures

### 2.3 秋红李子硬度及粘性变化

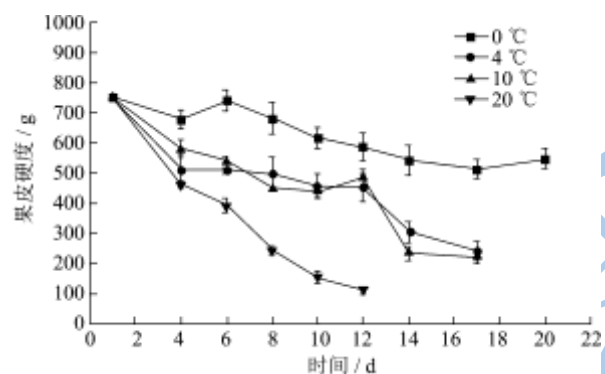


图6 不同温度贮藏过程中秋红李子果皮硬度的变化

Fig.6 Changes in skin hardness of Qihong plum during storage at different temperatures

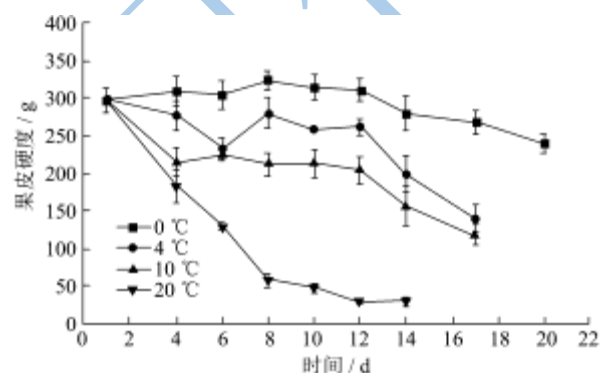


图7 不同温度贮藏过程中秋红李子果肉硬度的变化

Fig.7 Changes in fresh firmness of Qihong plum during storage at different temperatures

图6为秋红李子在贮藏过程中果皮硬度的变化趋

势。由图6可以看出, 温度越高, 果皮的硬度下降越快。20℃贮藏时果皮硬度降低最大, 达到约85.1%, 0℃贮藏时果皮硬度下降较小, 约27.2%, 可见温度对果皮硬度变化影响很大。4℃和10℃贮藏时李子果皮硬度变化趋势差异较小, 在贮藏结束时分别下降67.7%和70.4%。0℃贮藏后期李子果皮硬度有短暂的回升, 可能是因为组织失水严重, 出现木质化现象。

图7为秋红李子贮藏过程中果肉硬度的变化趋势。由图7可以看出, 秋红李子果肉的硬度在贮藏过程中呈下降趋势。温度越高, 果肉的硬度下降速度越快, 0℃和20℃条件下果肉硬度下降分别为19.5%和90.0%。0℃和4℃贮藏时, 第8 d李子果肉硬度略有回升, 可能是因为李子受到低温影响而代谢异常, 导致木质素等一些大分子物质含量增加。20℃下果肉硬度在第8 d后下降速度减缓, 可能由于水分损失严重, 组织皱缩严重, 结构变化减小。

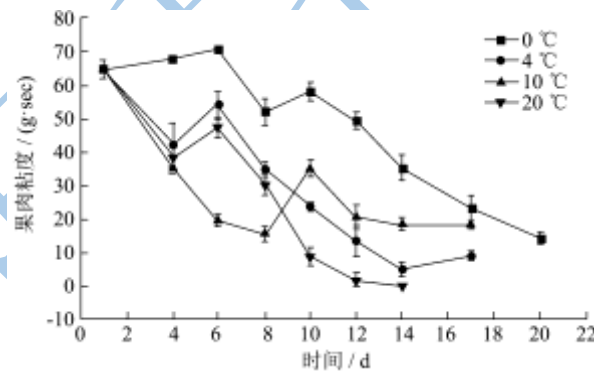


图8 不同温度贮藏过程中秋红李子果肉粘度的变化

Fig.8 Changes in pulp viscosity of Qihong plum during storage at different temperatures

秋红李子果肉粘度绝对值变化见图8。从图8可以看出, 不同温度贮藏时, 果肉粘度基本都呈下降趋势。果肉粘性主要跟组织中水分和一些小分子物质含量密切相关。随着贮藏时间延长, 果实中水分损失, 物质消耗, 果肉组织的粘附力减小, 粘度整体下降。10℃贮藏时李子果肉粘度变化波动较大, 8 d前10℃李子果肉粘度低于4℃和20℃, 8 d之后反而高于4℃和20℃。

### 2.4 不同状态水与秋红李子质构指标的相关性分析

由于温度较低时李子的贮藏期相对较长, 分别分析0℃, 4℃, 10℃下李子不同状态水分和质构变化的相关性(如表1~3), 20℃贮藏时不同状态水分和质构变化的相关性相同。

秋红李子0℃贮藏时, 不同状态水分与质构的相

相关性分析结果见表1。从表1可知,李子 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下贮藏时细胞壁水  $A_{21}$  和细胞质水  $A_{22}$  与李子的各项指标相关性很小;液泡水  $A_{23}$  与水分含量、果皮硬度、果肉硬度具有显著正相关关系 ( $p<0.05$ ),与果肉粘度的正相关性极显著 ( $p<0.01$ ),液泡水的生成可以补充一部分因为环境影响而损失的水分,使得果实的品质

短期得到缓解,但是当生成的液泡水大于损失的液泡水,果实的腐败就会加速<sup>[8]</sup>。水分含量与果皮硬度和果肉粘性相关性极显著 ( $p<0.01$ )。这说明  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时总水分含量对果皮硬度和粘性影响较大;液泡水对果皮硬度、果肉硬度和粘性变化影响均较大。

表1 秋红李子  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时不同状态水分与质构的 Pearson 相关性

Table 1 Results of Pearson correlation analysis between water content in different states and texture of Qihong plum during storage at

0 $^{\circ}\text{C}$							
	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	水分含量/%	果皮硬度/g	果肉硬度/g	粘性(g·sec)
$A_{21}$	1	-0.421	-0.511	-0.644	-0.703	-0.555	0.511
$A_{22}$	-0.421	1	-0.501	-0.288	-0.268	-0.176	0.522
$A_{23}$	-0.511	-0.501	1	0.761*	0.833*	0.758*	0.913**
水分含量/%	-0.644	-0.288	0.761*	1	0.910**	0.369	0.801**
果皮硬度/g	-0.703	-0.268	0.833*	0.910**	1	0.678	0.918**
果肉硬度/g	-0.555	-0.176	0.758*	0.369	0.678	1	0.747**
粘性(g·sec)	0.511	0.522	0.913**	0.801**	0.918**	0.747**	1

注: \*代表  $p<0.05$ , \*\*代表  $p<0.01$ 。

表2 秋红李子  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时不同状态水分与质构的 Pearson 相关性

Table 2 Results of Pearson correlation analysis between water content in different states and texture of Qihong plum during storage at

4 $^{\circ}\text{C}$							
	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	水分含量/%	果皮硬度/g	果肉硬度/g	粘性(g·sec)
$A_{21}$	1	0.150	-0.637	-0.884**	-0.577	-0.546	0.735
$A_{22}$	0.150	1	-0.829*	-0.355	-0.914**	-0.895**	0.722
$A_{23}$	-0.637	-0.829*	1	0.743	0.835*	0.780*	0.927**
水分含量/%	-0.884**	-0.355	0.743	1	0.840*	0.845*	0.872*
果皮硬度/g	-0.577	-0.914**	0.835*	0.840*	1	0.988**	0.895**
果肉硬度/g	-0.546	-0.895**	0.780*	0.845*	0.988**	1	0.868*
粘性(g·sec)	0.735	0.722	0.927**	0.872*	0.895*	0.868*	1

注: \*代表  $p<0.05$ , \*\*代表  $p<0.01$ 。

表3 秋红李子  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时不同状态水分与质构的 Pearson 相关性

Table 3 Results of Pearson correlation analysis between water content in different states and texture of Qihong plum during storage at

10 $^{\circ}\text{C}$							
	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$	水分含量/%	果皮硬度/g	果肉硬度/g	粘性(g·sec)
$A_{21}$	1	0.617	-0.777*	-0.532	-0.660	-0.611	0.297
$A_{22}$	0.617	1	-0.918**	-0.277	-0.707	-0.859*	0.491
$A_{23}$	-0.777*	-0.918*	1	0.337	0.808*	0.804*	0.467
水分含量/%	-0.532	-0.277	0.337	1	0.640	0.273	0.698
果皮硬度/g	-0.660	-0.707	0.808*	0.640	1	0.807**	0.759*
果肉硬度/g	-0.611	-0.859*	0.804*	0.273	0.807*	1	0.600
粘性(g·sec)	0.297	0.491	0.467	0.698	0.759*	0.600	1

注: \*代表  $p<0.05$ , \*\*代表  $p<0.01$ 。

秋红李子  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时,不同状态水分与质构的相关性分析如表2所示,李子在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  下贮藏时细胞壁水  $A_{21}$  与李子的各项指标相关性仍然很小,但是与

水分含量相关性极显著 ( $p<0.01$ );细胞质水与果皮硬度、果肉硬度负相关性极显著 ( $p<0.01$ ),可能因为细胞质水含量升高,主要是由细胞壁水转化而来的,细

胞壁水的转化和使得果实组织结构受到一定影响,果皮和果肉硬度下降;液泡水与果皮硬度、果肉硬度、果肉粘性正相关性显著 ( $p < 0.05$ );水分含量与果皮硬度、果肉硬度、果肉粘性相关性显著 ( $P < 0.05$ );这说明  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时李子细胞质水对果皮和果肉硬度影响较大,液泡水和水分含量对果皮硬度、果肉硬度、果肉粘性影响较大。

秋红李子  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时不同相态水与质构的相关性分析见表 3,细胞壁水和总水分含量与李子质构的各项指标相关性不显著 ( $p > 0.05$ );细胞质水与果肉硬度具有显著的负相关性 ( $p < 0.05$ );液泡水与果皮硬度、果肉硬度正相关性显著 ( $p < 0.05$ );这说明  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下只有细胞质水对果肉硬度影响较大,液泡水对果皮和果肉硬度影响较大。

综合表 1~3 可以看出,不同温度下细胞壁水与李子质构各项指标相关性均不显著。低温 ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 贮藏时细胞壁水对李子质构影响较小;细胞质水对粘性影响较小,而对果皮和果肉硬度影响较大;液泡水对质构影响较大,而且液泡水含量越高,质构品质较好。 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时不同状态水对果肉粘性影响较小,而液泡水对果皮和果肉硬度的影响较大,细胞质水对果肉硬度的影响较大。

### 3 结论

3.1 不同温度贮藏时秋红李子不同状态水分和质构的变化可知,温度较高时,李子水分含量、液泡水和质构各项指标降低较快。跟  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时比较, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏过程中细胞壁水(A21)分别在第 12 d 和第 8 d 出现不同的峰值,细胞质水会出现相应的最低点,这可能是判断李子低温贮藏时品质变化的关键点。 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  李子保持最佳食用品质的时间较长,约 12 d; $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下李子风味和口感可达到最佳程度,但是极易受到微生物作用而腐烂,其保持最佳品质的时间只有 5~6 d。低温贮藏时其贮藏期相对较长,但是其食用品质较差。

3.2 不同状态水分和李子质构各项指标之间的相关性分析结果可知,细胞壁水对秋红李子质构变化的影响较小。低温贮藏时,细胞质水对果皮和果肉硬度影响较大,对果肉粘度影响较小;液泡水对质构各项指标影响均较大。 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮藏时细胞质水对果肉硬度影响较大,液泡水对果皮和果肉硬度影响较大,细胞质水和液泡水均对果肉粘度影响较小。

### 参考文献

[1] 余德亿,黄鹏,方大琳,等.李子贮藏保鲜技术及其应用前景

[J].中国食物与营养,2011,17(9):51-55

YU De-yi, HUANG Peng, FANG Da-lin, et al. Fresh-keeping storage technologies of plums and its application prospect [J]. Food and Nutrition in China, 2011, 17(9): 51-55

[2] Guerra M, Casquero P A. Effect of harvest date on cold storage and postharvest quality of plum cv. green gage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 47(3): 325-332

[3] Panarese V, Laghi L, Pisi A, et al. Effect of osmotic dehydration on actinidia deliciosa kiwifruit: a combined nmr and ultrastructural study [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1706-1712

[4] Santagapita P, Laghi L, Panarese V, et al. Modification of transverse nmr relaxation times and water diffusion coefficients of kiwifruit pericarp tissue subjected to osmotic dehydration [J]. Food Bioprocess Technol, 2012: 1-10

[5] Marigheto N, Vial A, Wright K, et al. A combined NMR and microstructural study of the effect of high-pressure processing on strawberries [J]. Applied Magnetic Resonance, 2004, 26(4): 521-531

[6] Hills B P, Remigereau B. NMR studies of changes in subcellular water compartmentation in parenchyma apple tissue during drying and freezing [J]. International Journal of Food Science & Technology, 1997, 32(1): 51-61

[7] Micklander E, Thybo A K, Vanden Berg F. Changes occurring in potatoes during cooking and reheating as affected by salting and cool or frozen storage-a Lf-Nmr study [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(9): 1710-1719

[8] 王娜.核磁共振及其成像技术在脐橙的生长和储藏过程中的应用[D].江西:南昌大学,2008  
WANG Na. The application of NMR and MRI in the process of growth and storage in navel orange [D]. Jiang Xi: Nanchang University, 2008

[9] Møller S M, Travers S, Bertram H C, et al. Prediction of postharvest dry matter, soluble solids content, firmness and acidity in apples (cv. elshof) using NMR and NIR spectroscopy: a comparative study [J]. European Food Research and Technology, 2013, 237(6): 1021-1024

[10] McDonnell C K, Allen P, Duggan E, et al. The effect of salt and fibre direction on water dynamics, distribution and mobility in pork muscle: a low field nmr study [J]. Meat Science, 2013, 95: 51-58

[11] Shao X, Li Y. Application of low-field NMR to analyze water characteristics and predict unfrozen water in blanched sweet

- corn [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2011, 6: 1-7
- [12] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Bei Jing: Chinese Light Industry Press, 2007
- [13] 芮怀瑾,汪开拓,尚海涛,等. 热处理对冷藏枇杷木质化及相关酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 294-298
- RUI Huai-jin, WANG Kai-tuo, SHANG Hai-tao, et al. Effects of heat treatment on flesh leatheriness and related enzyme activities of loquat fruits during cold storage [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 294-298
- [14] Van der Plank J E, Davies R. Temperature-cold injury curves of fruit [J]. *J Pomol Hort Sci*, 1937, 15: 226-247

现代食品科技