DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80123 [文章编号] 1003-5788(2022)11-0136-07

基于 NMR 和 ^{1}H-MRI 技术的不同糖度锦绣黄桃耐贮性评价

Storage endurance evaluation of 'jinxiu' yellow peach with different sugar content based on NMR and ^{1}H-MRI techniques

周慧娟[1,2] 叶正文[1,2] 张志强[3] 杜纪红[1,2] 曾思懿[1,2]

ZHOU Hui-juan[1,2] *YE Zheng-wen*[1,2] *ZHANG Zhi-qiang*[3] *DU Ji-hong*[1,2] *ZENG Si-yi*[1,2]

(1. 上海市农业科学院林木果树研究所,上海 201403;2. 上海市设施园艺技术重点实验室,上海 201403;3. 上海思而腾农业科技发展有限公司,上海 201407)

(1. *Forest and Fruit Tree Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai* 201403, *China*; 2. *Agro-product Fresh Keeping and Processing Research Center, Shanghai* 201403, *China*; 3. *Shanghai Settle Agricultural Technology Development Co., Ltd., Shanghai* 201407, *China*)

摘要:目的:评价不同含糖量黄桃果实的耐贮性。**方法:**将不同含糖量的锦绣黄桃贮藏于(2±0.5) ℃的冷库中,测定贮藏 0,14,21,28,35,(35+3) d 的果实呼吸强度、乙烯释放速率、可溶性固形物含量、质构,并利用核磁共振技术(NMR)和质子核磁共振成像(^{1}H-MRI)技术测定果实自由水含量和弛豫时间以观察贮藏期间果实变化规律。**结果:**贮藏期间,低糖组果实果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性特性下降速率较快,尤其是贮藏后期(14～35 d)水分丧失量较大,耐贮性较差;高、中糖组果实质构品质保持较好,耐贮性好,贮藏前期(0～21 d)水分含量较高且无明显变化,贮藏后期水含量略下降但仍高于低糖组。**结论:**含糖量高的锦绣黄桃货架期可达 3 d,在贮藏期间可保持较高的自由水含量和品质,耐贮性较好,0～14 d 为冷藏下的优质保鲜期,21 d 为安全保鲜期,28～35 d 为品质劣变期。

关键词:核磁共振;质子核磁共振成像;耐贮性;自由水含量;黄桃

Abstract: Objective: To evaluate the storability of yellow peach with different sugar content. **Methods:** The respiration intensity, ethylene release rate, soluble solid content and texture of the fruit stored at 0, 14, 21, 28, 35, (35+3) d were measured. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) technique and proton magnetic resonance imaging (^{1}H-MRI) were used to determine the content of free water (A_2) and relaxation time (T_2) to observe the changes of fruit stored at (2±0.5) ℃. **Results:** During storage and shelf, the decrease rate of firmness of pulp, flesh compactedness and chewiness was faster in low-sugar group, especially at the later stage of storage (14～35 d) and shelf-life, the water loss was larger, and the storage tolerance was poor; Fruit texture and storability of high and medium sugar groups were maintained well, and the water content of high and medium sugar groups was higher than that of low sugar group at the early stage of storage (0～21 d), but decreased slightly at the late stage of storage. **Conclusion:** 'Jinxiu' yellow peach with high sugar content can keep high free water content and quality during storage, and has good storability. 0～14 days is the high quality fresh preservation period, 21 days is safety preservation period, 28～35 days is the quality deterioration period, and the shelf life can reach 3 days.

Keywords: nuclear magnetic resonance; proton magnetic resonance imaging; storability; free water content; yellow peach

锦系列鲜食黄桃是中国长江以南的主栽品种[1],常温不耐贮运,长期的低温冷藏易出现果肉褐变、糖酸比失调、挥发性物质丧失或异常积累等冷害症状。糖代谢可介导果实的风味代谢和成熟衰老进程,因此糖含量与黄桃果实冷害程度[2]和果实的贮运特性密切相关[3-4]。贮藏期间,水分通过参与果实的新陈代谢而影响内外品质的变化,水分状态和含量与果实的新鲜度和风味特征密切相关[5]。Herppich 等[6]报道,胡萝卜水分状态与贮藏期间果实的硬度变化显著相关。

基金项目:上海市科委项目(编号:22N51900600);农业农村部项目(编号:CARS-31);湖湘高层次人才聚集工程项目(编号:2021RC5031)

作者简介:周慧娟,女,上海市农业科学院副研究员,博士。

通信作者:叶正文(1963—),男,上海市农业科学院研究员,博士。E-mail:yezhengwen1300@163.com

收稿日期:2022-03-30 **改回日期:**2022-06-09

传统的果实水分测定方法无法区分水分状态,不能科学地解释水分与果实品质的相关性。核磁共振技术(NMR)通过测定氢质子密度变化来判定果蔬中水分的状态、分布及迁移规律,是一种无损检测技术[7-8]。Zhu等[9]采用 NMR 及成像技术研究贮藏期樱桃水分变化,结果表明樱桃样品组织的软化现象与水分损失密切相关,新鲜组织中水分分布均匀,随着贮藏时间的延长,游离水含量逐渐增加,从而引起组织内部损伤。Fundo 等[10]利用 NMR 技术检测鲜切梨的水分状态,发现贮藏过程中水的状态变化与果实硬度、色差等密切相关。质子核磁共振成像(^{1}H-MRI)技术可以激发物体吸收射频(RF)能量的能力,它不仅可以提供果蔬内部结构的高分辨率图像,还可以检测果蔬的内部损伤并评估果蔬耐贮性[11-15]。

研究拟以上海市农业科学院自主育成的锦绣黄桃为研究对象,测定不同糖含量黄桃在贮藏期间的 TSS 含量、呼吸强度、乙烯释放速率、果实质构的变化再利用 NMR 和^{1}H-MRI 技术测定贮藏期和货架期黄桃的水分含量及分布状态以评估黄桃的耐贮性,以期为果实品质智能检测提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

以上海市农业科学院果树种植基地种植的锦绣黄桃果实为试材,试验园树龄 10 年,果实套黄袋。2021 年 8 月 16 日,分别于 60 株树冠外围高约 1～2 m 处随机采取 5 000 个硬度一致、大小均匀、色泽均一、无机械伤和病虫害的果实,立即运回上海市农业科学院林木果树研究所实验室和冷库进行处理。

防雾保鲜袋:0.03 mm,零度包装科技有限公司;

无损糖度计:H100F 型,北京阳光亿事达科技有限公司;

质构仪:TA. XT. Plus C 型,英国 SMS 公司;

折光仪:ATAGO-1 型,日本 ATAGO 公司;

气相色谱仪:GC7890A 型,美国安捷伦科技公司;

红外线 CO_2 气体分析仪:GXH-305 型,泰仕电子工业股份有限公司;

核磁共振分析与成像系统:MZsoMR23-150H-I 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.2　试验方法

1.2.1　试验处理　在果肉组织硬度一致的前提下(果肉组织硬度 15～21 N),用无损糖度计对 5 000 个果实进行糖度测定并按照可溶性固形物含量(TSS)大小,将果实分为高糖组、中糖组、低糖组,详细见表 1。每个处理组 200 个果实,每组设 3 个平行,共计 1 800 个果实。将各组果实置于温度为 2～4 ℃、相对湿度为 85%～90%的冷库中预冷和贮藏,在冷藏第0,14,21,28,35,(35+3)(即贮藏 35 d 后置于货架常温存放 3 d)天时测定果实的呼吸强度、乙烯释放速率、可溶性固形物含量和果实质构,并利用 NMR 和^{1}H-MRI 技术测定各组果实的 A_2、T_2 及质子密度像。

表 1　高、中、低糖组果实入库初始品质

Table 1　The initial storage quality of fruit in high, medium and low sugar groups

组别	TSS 含量/%	果肉组织硬度/N	果面色泽
高糖组	14.5～16.5	15～20	金黄色
中糖组	12.5～13.5	15～21	金黄色
低糖组	10.5～12.0	15～21	金黄色

1.2.2　指标测定

(1) 乙烯释放速率:参照王淼等[16]的方法稍加修改。15 ℃条件下,将 5 个桃子放置于容器为 4 L 的密闭容器中密封 1 h,吸取 1 mL 混合气体,注入气相色谱仪中测定乙烯含量。

(2) 呼吸强度:参照周慧娟等[1]的方法,随机取 5 个果实,称重,置于与红外线 CO_2 分析仪气路相连的 4 L 密闭塑容器中,15 ℃下测定 CO_2 释放速率。

(3) 可溶性固形物(TSS):随机取 20 个果实,取果实缝合线左右赤道处对称部位果肉,用手持阿贝折光仪测定未经稀释的汁液可溶性固形物含量。

(4) 质构测定:质构仪的圆柱形探头(P/5)直径为 5 mm,选用 Two Deformation Test (TDT)进行两次下压,测前速度 60 mm/min,测试速度 120 mm/min,测后速度 600 mm/min,触发力 0.049 N。第一次下压距离为 3 mm,测定参数为果皮硬度、果皮脆性,第二次下压距离为20 mm,获得参数为果肉硬度、果肉紧实度、果肉脆性。

(5) 自由水含量(A_2)、弛豫时间(T_2)和质子密度像:核磁共振分析与成像系统参数设置:硬脉冲 90°脉宽 5.8 μs,硬脉冲 180°脉宽为 10.64 μs,重复采样等待时间为 6 000 ms,回波个数为 15 000,重复采样次数为 4,接受机带宽为 50 kHz。将所得的测试数据进行 10 万次反演,得到横向弛豫时 T_2 图谱。

^{1}H-MRI 运用 MRI 成像软件及 MSE 多层自旋回波序列采集样品横断面的质子密度图像。MRI 成像参数:GSliceZ 为−210,GPhaseY 为 40,GReadX 为−40,TR 为 2 000 ms,TE 为 120 ms,累加 2 次,空间大小 256×256。

1.3　数据处理

所有试验均设 3 次重复,使用 Simca-p 软件和 SPSS 17.0 软件进行主成分分析(PCA)和方差统计分析(ANOVA);采用 Tukey 方法对数据进行显著差异分析,结果以平均值±标准偏差表示。利用苏州纽迈分析仪器股份有限公司自主研发的核磁共振分析应用软件 Ver 1.0 分析图谱;利用 Origin 软件分析横向弛豫时间 T_2 图谱。

2　结果与分析

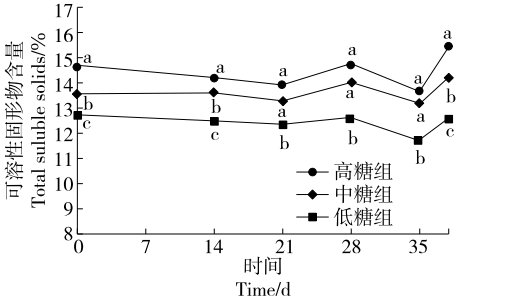
2.1　可溶性固形物含量

由图 1 可知，高、中、低糖组果实均在贮藏的第 28 天出现 TSS 峰值，高糖组和中糖组果实 TSS 峰值显著高于低糖组果实（$P<0.05$）。贮藏后期（第 28～35 天）各组 TSS 呈下降趋势，说明果实品质劣变；货架期间，高、中、低糖组果实 TSS 含量均呈上升趋势，说明贮藏 35 d 后的锦绣黄桃，放置于常温（20～25 ℃）货架时，仍存在内含物代谢进程；整个贮藏期间，高糖组和中糖组果实 TSS 含量显著高于低糖组（$P<0.05$），说明提高果实的糖含量有利于提高果实的低温耐贮性，果实入库品质对贮藏和货架品质及后熟代谢进程密切相关[17]。

2.2　乙烯释放速率和呼吸强度

由图 2 可知，高、中、低糖组果实均在贮藏第 28 天出现呼吸强度高峰，且峰值无显著性差异。贮藏第 0～21 天，中、低糖组果实的呼吸强度显著高于高糖组的；货架期间，高、中、低糖组果实的呼吸强度均呈急剧上升趋势且高、低糖组果实的呼吸强度显著高于中糖组的（$P<0.05$）。

在贮藏的第 14 天，低糖组果实出现乙烯释放高峰，高、中糖组果实较低糖组果实延缓 14 d 出现乙烯释放高峰，且乙烯释放高峰值显著低于低糖组果实（$P<0.05$），与高糖含量可较好地维持冷藏期间桃果实膜稳定性、增强耐冷性有关[18]；货架期间，高、中、低糖组果实乙烯释放速率呈急剧上升趋势，高糖组果实的乙烯释放速率显著高于中、低糖组果实的（$P<0.05$）。高糖组果实的呼吸强度高但乙烯释放速率低，具体机理需进一步研究。



同一贮藏时间点字母不同表示处理间差异显著（$P<0.05$）

图 1　高、中、低糖组果实可溶性固形物含量的变化

Figure 1　Changes of total soluble solids content of fruit in high, medium and low sugar groups

2.3　质构

由图 3 可知，贮藏前期（0～21 d），高、中、低糖组果实的带皮硬度、果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性均较稳定，贮藏后期（21～35 d），各组的质构参数值呈下降趋势。贮藏 0～28 d 时，高糖组果实的带皮硬度、果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性均高于低糖组果实的，说明高糖组果实质构特性佳；高、中糖组果实的果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性无显著差异。货架期间，高、中、低糖组果实的带皮硬度、果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性进一步下降，且各组间无显著差异，说明在同等成熟度条件下，当锦绣黄桃果实的可溶性固形物含量低于 12%时，贮藏期间果实的质构会受到一定的影响，进一步说明入库品质对贮藏和货架品质影响的重要性。

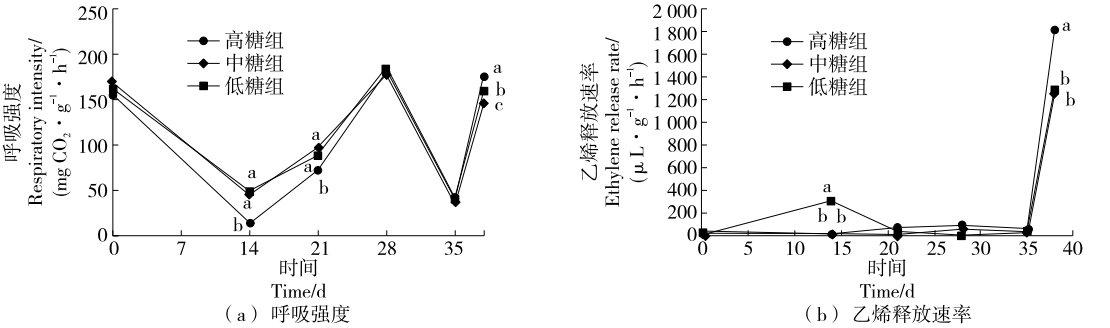
可溶性固形物含量、果实呼吸强度、乙烯释放速率和果实质构的测定均损坏了果实样品，而 NMR 和 ^{1}H-MRI 是无损测定技术，可用于评价不同糖度等级黄桃果实耐贮性的差异性。

2.4　T_2 和 A_2

T_2 反映了氢质子的结合力和自由度，与果实质地密不可分[19]。束缚的氢质子越多或自由度越小，T_2 越短；T_2 拉长，峰值右移[20]。图 4 为锦绣黄桃的 T_2 弛豫谱，T_2 在 500～1 000 ms 时，果肉细胞毛细管中的水被定义为自由水，其对应的峰积分面积经计算后得自由水含量为 A_2，与 Zhou 等[21]的结论一致，与冯蕾[5]在黄瓜和樱桃中报道的 4 个峰值有一定差异，可能与锦绣黄桃果实中的水主要以自由水的状态存在有关。

2.5　果实内部质子密度及水分分布

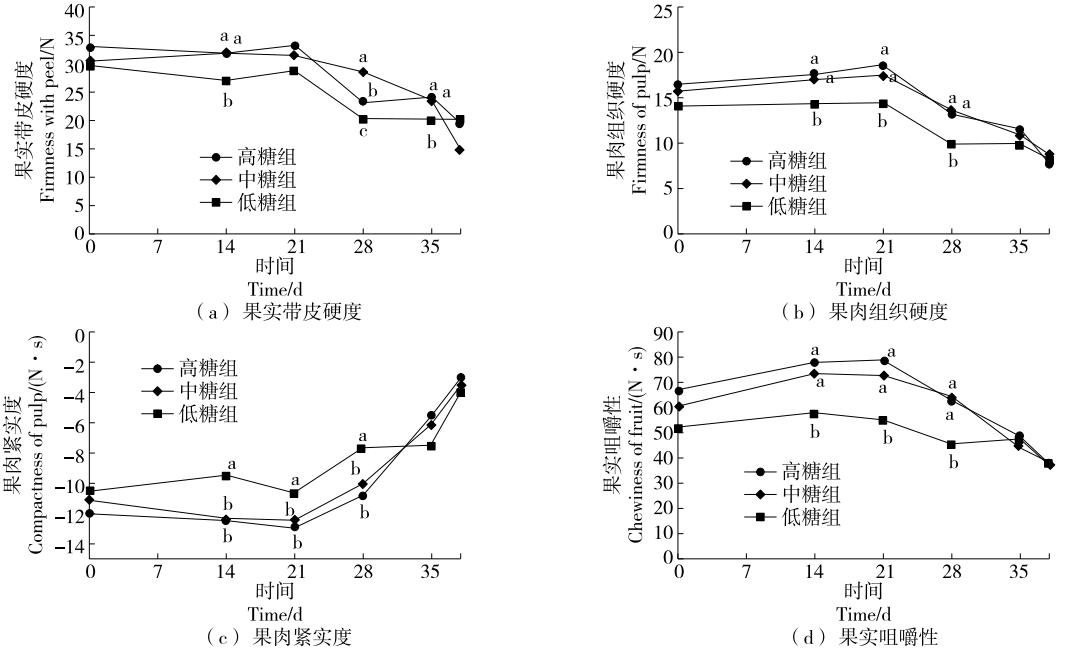
贮藏期间，果蔬的细胞结构和完整性发生改变，膜的渗透性增加，从而导致水分迁移[22]。^{1}H-MRI技术可直接



同一贮藏时间点字母不同表示处理间差异显著（$P<0.05$）

图 2　各组果实呼吸强度和乙烯释放速率随时间变化规律

Figure 2　The respiratory intensity and ethylene release rate of furits in each group changed with time



(a) 果实带皮硬度　(b) 果肉组织硬度　(c) 果肉紧实度　(d) 果实咀嚼性

同一贮藏时间点字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)

图 3　高、中、低糖组果实质构特性的变化

Figure 3　Changes of fruit texture properties in high, medium, and low sugar groups

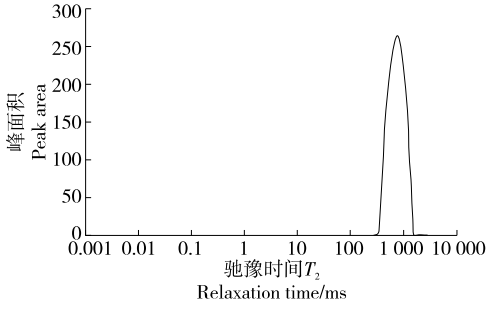


图 4　入库时锦绣黄桃果实的弛豫时间和自由水含量

Figure 4　Relaxation time and free water content of 'jinxiu' yellow peach fruit during storage

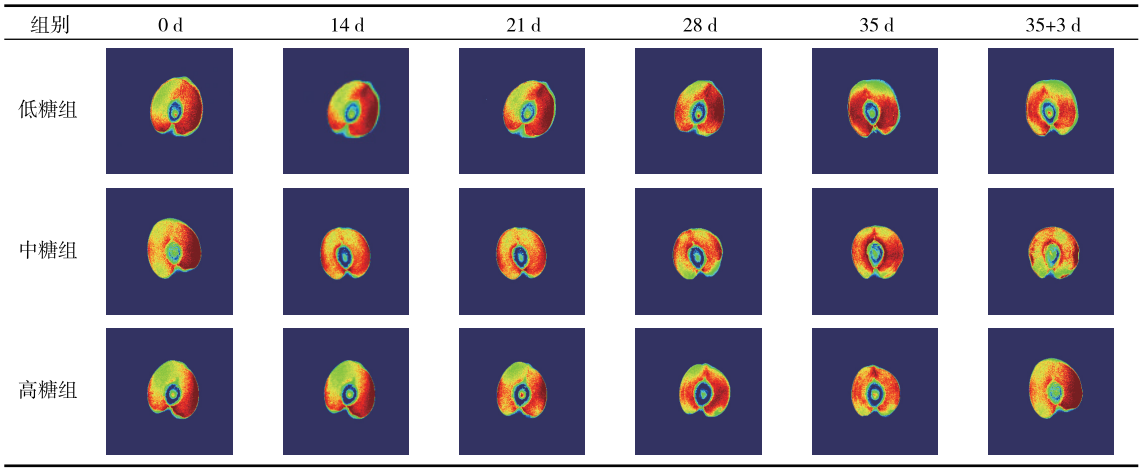
评估贮藏和货架期间高、中、低糖组果实内部水分分布和迁移情况,质子密度图中蓝色表示质子密度低,红色表示质子密度高,红色区域内氢质子、水分含量越多,亮度越大[23]。由表 2 可知,新鲜样品(贮藏第 0 天)的水分分布比较均匀,水分含量较高,且果皮、果肉及果核的轮廓较清晰。随着贮藏时间的延长,果实水分含量下降。对于低糖组,贮藏 0～14 d,果实质子密度无显著性变化,果实水分变化较小;贮藏 21～35 d,果实内部质子密度降低,可能是因为破裂细胞的液体取代了细胞间隙中的空气,减少了磁场梯度上的总界面面积,这与此期间果实带皮硬度、果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性下降的趋势一致[9],说明该时间点为果实内部自由水含量降低的关键点,与果实品质劣变的关键时间点一致;货架期间,低糖组果实内部质子密度进一步降低,与 A_2 变化趋势一致,果核周围的水分散失较为明显,果核与果肉间明显出现一条缝隙,果肉中靠近果皮的水分也在轻微的减少,可能是因为货架期间温度骤然升高导致黄桃果实呼吸强度增强从而加速水分散失,靠近果核处的呼吸强度较靠近果皮处的强,与黄瓜样品果实水分含量的变化和迁移过程主要发生在果肉部分的结论[5]一致。对于高糖组,贮藏 0～21 d,果实内部质子密度变化不显著,水分分布比较均匀,水分含量较高;贮藏 21～35 d 及货架期间,果实内部质子密度呈增加趋势,亮度增加,说明果实内部自由水含量较高,较好地保持了果实固有品质。Mazhar 等[22]研究表明,水分含量的变化及水分迁移的过程与果实细胞壁的分解等物理化学变化密切相关。低糖组锦绣黄桃果实自由水含量损失较多可能是因为长期冷藏导致果实细胞及细胞器膜通透性增加,使得水与大分子物质之间接触而发生相互作用,从而产生相对流动性更强且易挥发的自由水[24-25]。综上,高含量的可溶性固形物可以较好地保持锦绣黄桃贮藏期间果实细胞膜的完整性,产生抗冷性,提高果实的贮藏性。

2.6　基于自由水含量的主成分分析

为了观察不同贮藏时间点高、中、低糖组黄桃果实的自由水含量是否有显著差异,采用主成分分析方法对果实的自由水含量进行分析,如图 5 所示。经过降维处理后贮藏期间高、中、低糖组黄桃果实两个主成分的累计贡献率为 90.6%,其中第一主成分(PC1)的贡献率为70.2%,第二主成分(PC2)的贡献率为20.4%。结果表

表 2　贮藏和货架期间果实质子密度成像图

Table 2　The proton density imaging of fruits during storage and shelf life



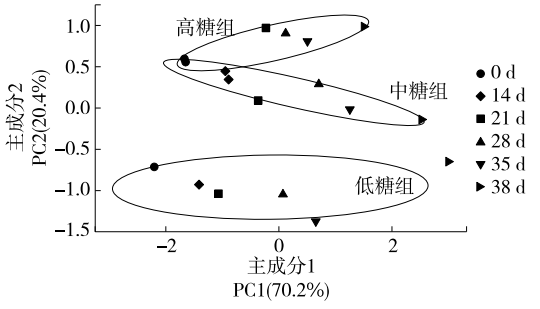


图 5　贮藏期间黄桃果实自由水含量的主成分分析

Figure 5　Principal component analyses of free water content of yellow peach fruit during storage

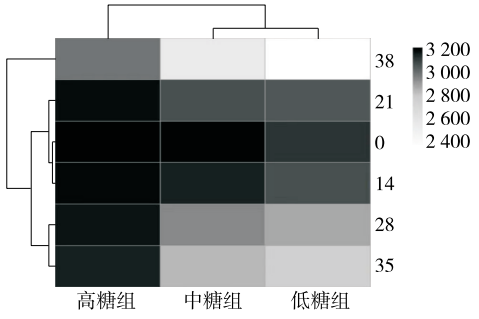


图 6　贮藏期间黄桃果实自由水含量的聚类分析

Figure 6　Cluster analyses of free water content of yellow peach fruit during storage

明，PC1 和 PC2 可较好地反映样本的自由水含量信息，高、中、低糖组及 6 个贮藏时间的果品在主成分空间中处于相对独立的空间，得到了有效区分。PC1 与 3 个变量（高糖组、中糖组和低糖组）较强相关，PC2 主要与自由水信号和 T_2 相关。由图 5 可知，在 PC1 的投影上，高、中、低糖组果实的自由水含量和 T_2 均随贮藏时间发生了显著性变化，且在同一贮藏时间下，高、中、低糖组果实从低到高变化的范围逐渐变小，说明贮藏时间可以调控各组的自由水含量和 T_2 的变化；在 PC2 的投影上，自由水含量和 T_2 在不同组间的变化差异明显大于组内的，说明可溶性固形物含量对果实自由水含量和 T_2 的变化有显著的调控作用。

2.7　基于自由水含量的聚类分析

选用层次聚类分析法中的最短距离法对贮藏及货架期间高、中、低糖组果实自由水含量进行聚类分析，结果如图 6 所示。高、中、低糖组果实的自由水含量被聚为 3 个类群，即由高糖组果实组成的类群Ⅰ，由中糖组果实组成的类群Ⅱ，由低糖组果实组成的类群Ⅲ，结果表明高糖组、中糖组和低糖组果实的自由水含量有显著差异。

在聚类分析的基础上结合黄桃果实的自由水含量可进一步将不同贮藏时间的高、中、低糖组果实样品聚为 4 个类群，类群Ⅰ包含贮藏 0 d 和 14 d 的果品，类群Ⅱ包含贮藏 21 d 的果品，类群Ⅲ包含贮藏 28 d 和 35 d 的果品，类群Ⅳ包含第 38 天（即货架期第 3 天）的果品，聚类结果与黄桃果实贮藏品质的结果一致，随着时间的延长，果实的品质和自由水含量发生变化。

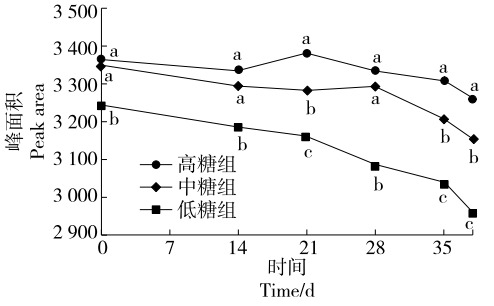
2.8　果实内部水分迁移及水分流动性

冯蕾[5]报道，果蔬内部有 4 种状态的水存在，分为细胞壁水、细胞质水、细胞间隙水及液泡水，其中液泡水（自由水）流动性最强。贮藏期间，自由水最先流失，自由水含量（A_2）是果实品质的重要指标[26]，黄桃果实 T_2 和 A_2 与果实的软化密切相关[21]。NMR 技术可有效地监测和预测桃贮藏过程中的水分含量。由表 1 和图 7 可知，随着贮藏时间的延长，中糖和低糖组果实 A_2 呈下降趋势。低糖组果实在贮藏的第 14 天出现乙烯释放高峰，在贮藏的第 21 天出现果实硬度和自由水含量呈急剧下降趋势，最后在贮藏第 28 天出现呼吸强度释放高峰，说明自由水含量的变化与果实的质构密切相关[21]。高含量的糖可抑

制贮藏期间果实 A_2 的下降,使果实保持较高的自由水含量和果肉组织硬度及紧实度;货架期间,高糖组果实 A_2 呈显著上升趋势,进一步说明了高糖组果实可保持较高的新鲜度和较好的固有品质状态,与 Zhu 等[9]报道的樱桃样品组织的软化现象与贮藏过程中的水分损失密切相关的结论一致。

随着贮藏时间的延长,低糖组果实自由水含量降低,果肉水分逐渐向内迁移,与陈森等[27]报道的樱桃在常温贮藏和低温条件下的水分迁移规律一致,说明贮藏期间低糖组果实内自由水含量降低,且货架期间果实的软化未引起汁液的增加,与冷害的发生症状一致。中、高糖组果实可保持较高的自由水含量,抑制果实自由水变为结合水而导致的果实冷害的发生,与 Møller 等[28]报道的低温贮藏可以降低黄桃中细胞质水和细胞间隙水的含量,提高液泡水的含量的结论一致。

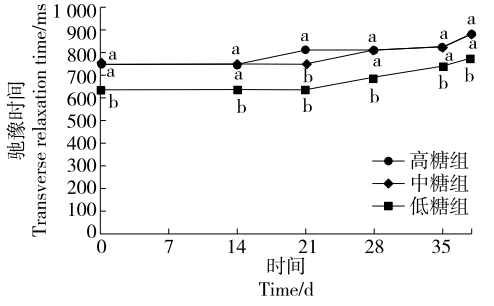
T_2 对氢质子的状态变化较为敏感,而果蔬中的氢质子主要来源于水分子及糖类物质,因此在贮藏过程中,由于代谢作用,弛豫时间随水分及糖含量发生变化。由图 8 可知,在贮藏第 0～21 天时,中糖组和低糖组果实弛豫时间(T_2)不变,说明果实中被束缚的氢质子较多,内部结构紧密,结合力大;随着贮藏时间的延长(贮藏 21～35 d 及



同一贮藏时间点字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)

图 7　贮藏和货架期间锦绣黄桃的自由水含量的变化

Figure 7　Variation of free water content (A_2) of 'jinxiu' yellow peach during storage and shelf life



同一贮藏时间点字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)

图 8　贮藏和货架期间锦绣黄桃的弛豫时间的变化

Figure 8　Variation of relaxation time (T_2) of 'jinxiu' yellow peach during storage and shelf life

货架期间),中糖和低糖组果实弛豫时间延长,峰值持续右移,说明果实中被束缚的氢质子降低或自由度变大,与该期间果实带皮硬度、果肉组织硬度、果肉紧实度及果实咀嚼性下降的趋势一致。贮藏 14～35 d 及货架期间,高糖组果实弛豫时间(T_2)延长,峰值持续右移,高糖组持续时间较果实软化点提前 7 d 出现,说明果实中的含糖量可能影响弛豫时间,与高糖果实中被束缚的氢质子较少或自由度大有关[20]。整个贮藏和货架期间,高、中糖组果实 A_2 和 T_2 显著高于低糖组果实,说明整个冷藏期内高中糖组果实可保持较高的自由水含量,货架期间果实可正常软化,汁液丰富。

3　结论

以锦绣黄桃为研究对象,测定不同贮藏期间黄桃的可溶性固形物含量、呼吸强度、乙烯释放速率、果实质构的变化,再利用核磁共振技术和质子核磁共振成像技术测定贮藏期和货架期黄桃的水分含量及分布状态以评估黄桃的耐贮性。结果表明,入库时可溶性固形物含量低于 12%时,贮藏期的果实品质下降,因此入库时可溶性固形物含量应不低于 12%;低、中、高糖组黄桃中,高糖组黄桃的自由水含量最高,耐贮性最好,可以通过抑制果实自由水变为结合水从而保持较好的品质;0～14 d 为高、中糖组锦绣黄桃的优质保鲜期,21 d 为安全保鲜期,28～35 d 为品质劣变期,货架期可达 3 d。果实自由水含量和质子核磁共振成像与果实质地的相关性需进一步研究和验证,如何将质子核磁共振成像技术与果品的无损分选设备相结合也是未来的研究方向之一。

参考文献

[1] 周慧娟, 杜纪红, 张夏南, 等. UVC 预处理对冷藏和货架期间'锦香'黄桃挥发性物质组分及含量的影响[J]. 上海农业学报, 2021, 37(3): 91-99.
ZHOU H J, DU J H, ZHANG X N, et al. Effects of UVC pretreatment on composition and content of volatile substances of 'Jinxiang' yellow peach during cold storage and shelf-life [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2021, 37(3): 91-99.

[2] ABIDI W, CANTIN C M, JIMENEZ S, et al. Influence of antioxidant compounds, total sugars and genetic background on the chilling injury susceptibility of a non-melting peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) progeny[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95: 351-358.

[3] ZHOU H J, ZHANG X N, SU M S, et al. Effects of ultraviolet-C pretreatment on sugar metabolism in yellow peaches during shelflife[J]. HortScience, 2020, 55(4): 416-423.

[4] LAUXMANN M A, BORSANI J, OSORIO S, et al. Deciphering the metabolic pathways influencing heat and cold responses during post-harvest physiology of peach fruit[J]. Plant Cell and Environment, 2013, 37(3): 1-16.

[5] 冯蕾. 基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究[D]. 苏州: 江南大学, 2019: 11.
FENG L. Research on freshness intelligent recognition of cucumbers and cherry tomatoes based on electronic nose and low-field nuclear magnetic resonance[D]. Suzhou: Jiangnan University, 2019: 11.

[6] HERPPICH W B, HEROLD B, LINKE M, et al. Dynamic effects of temperature and water status on the texture of radish and carrots during postharvest[J]. Acta Horticulturae, 2003, 604(2): 647-649.

[7] 陈卫江, 林向阳, 阮榕生, 等. 核磁共振技术无损快速评价食品水分的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4): 125-127.
CHEN W J, LIN X Y, RUAN R S, et al. Study on quickly and non-destructive estimate the moisture content of food[J]. Food Research and Development, 2006, 27(4): 125-127.

[8] 王胜威. 基于低场核磁共振及电子舌对羊肉品质安全判别研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2015: 4-5.
WANG S W. Study on quality and safety discrimination of mutton by low-field nuclear magnetic resonance and electronic tongue technology[D]. Guizhou: Guizhou University, 2015: 4-5.

[9] ZHU D, L J, LIU H, et al. Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low-temperature storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(10): 3 651-3 658.

[10] FUNDO J F, AMARO A L, MADUREIRA A R, et al. Fresh-cut melon quality during storage: An NMR study of water transverse relaxation time[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 167: 71-76.

[11] KRISHNA K P, MOHAMMAD A K, ABHIJIT K. Recent developments in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce - An overview[J]. J Food Sci Tech, 2015, 52(1): 1-26.

[12] FUNDO J F, GALVIS S A, MADUREIRA A R, et al. NMR water transverse relaxation time approach to understand storage stability of fresh-cut 'Rocha'pear[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 280-285.

[13] KJÆR A, NIELSEN G, STÆRKE S, et al. Prediction of starch, soluble sugars and amino acids in potatoes (*Solanum tuberosum* L.) using hyperspectral imaging, dielectric and LF-NMR methodologies[J]. Potato Research, 2016, 59(4): 357-374.

[14] HERNANDZ S N, HILS B P, BARREIRO P, et al. An NMR study on internal browning in pears[J]. Postharvest Biol Technol, 2007, 44: 260-270.

[15] GONZALEZ M E, BARRETT D M, MCCARTHY M J, et al. ^{1}H-NMR study of the impact of high pressure and thermal processing on cell membrane integrity of onions[J]. J Food Sci, 2010, 75(7): 417-425.

[16] 王淼, 张晶, 贺妍, 等. 基于低场核磁共振的柑橘汁胞粒化评级[J]. 农业工程学报, 2016(7): 290-295.
WANG M, ZHANG J, HE Y, et al. Evaluation of juicy sac granulation in citrus with low field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 290-295.

[17] 张浩, 安可婧, 徐玉娟, 等. 基于电子舌与 SPME-GC-MS 技术的芒果风味物质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2018, 34(10): 214-224.
ZHANG H, AN K J, XU Y J, et al. The characteristic flavor compounds analysis of different cultivars of mango by electronic tongue and SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(10): 214-224.

[18] CAO S F, YANG Z F, ZHENG Y H. Sugar metabolism in relation to chilling tolerance of loquat fruit[J]. Food Chemistry, 2013, 136: 139-143.

[19] SHAO X L, LI Y F. Application of low-field NMR to analyze water characteristics and predict unfrozen water in blanched sweetcorn[J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6(6): 1 593-1 599.

[20] LIU R X, CHEN X H, JIANG M, et al. Water distribution in tofu and application of T2 relaxation measurements in determination of tofu's water-holding capacity[J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(34): 8 594-8 601.

[21] ZHOU H J, YE Z W, SU M S, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance and proton magnetic resonance imaging in evaluation of 'Jinxiu' yellow peach's storage suitability[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2016, 28(9): 633-643.

[22] MAZHAR M, JOYCE D, COWIN G, et al. Non-destructive ^{1}H-MRI assessment of flesh bruising in avocado (*Persea americana* M.) cv. Hass[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 100: 33-34.

[23] SHAO J H, DENG Y M, SONG L, et al. Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 1-6.

[24] FANG D L, YANG W J, KIMATU B M, et al. Effect of nanocomposite packaging on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of mushrooms (*Flammulina velutipes*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 119: 49-57.

[25] LI T, RUI X, LI W, et al. Water distribution in tofu and application of T_2 relaxation measurements in determination of tofu's water-holding capacity[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2014, 62(34): 8 594-8 601.

[26] 冯爱博, 杨光, 贺亮, 等. 低场核磁共振技术对不同贮藏条件下雷竹笋水分迁移规律的研究[J]. 食品与发酵科技, 2018(1): 18-23.
FENG A B, YANG G, HE L, et al. Study on the migration of Bamboo shoots with different storage conditions by low-field magnetic resonance spectroscopy[J]. Sichuan Food and Fermentation, 2018(1): 18-23.

[27] 陈森, 孟兆磊, 陈闰堃, 等. 樱桃水分变化的低场核磁共振[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(8): 52-54.
CHEN S, MENG Z L, CHEN R K, et al. The change of moisture in cherry by low-field NMR[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(8): 52-54.

[28] 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): 1 021-1 024.