

不同成熟度杏果实采后细胞壁物质代谢规律的研究

敬媛媛, 杨婷婷, 马玄, 闫有明, 朱璇

(新疆农业大学食品科学与药学学院食品科学系, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究不同成熟度杏果实采后细胞壁物质代谢的变化。以新疆“赛买提”杏为试材, 根据转黄率将果实分为成熟度 I (着色面积<50%)、成熟度 II (着色面积 50%~80%) 和成熟度 III (着色面积>80%), 置于 4℃、90%~95% RH 贮藏, 每 7 d 测定相关指标的变化。试验结果表明, 成熟度 I、II 和 III 杏果实可溶性果胶 (WSF)、CDTA 溶解性果胶 (CSF)、纤维素含量逐渐上升, Na₂CO₃ 溶解性果胶 (NSF1) 和 NaOH 溶解性果胶 (NSF2) 含量逐渐下降, 木质素含量、多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG)、果胶甲酯酶 (Pectinmethylesterase, PME)、 β -葡萄糖苷酶 (β -glucosidase, β -G)、纤维素酶 (Cellulase, Cx) 酶活性呈先上升后下降趋势。贮藏结束时, 成熟度 II 杏果实纤维素含量、PG、PME 活性低于成熟度 I 和 III 果实 ($p<0.05$), 木质素含量高于成熟度 I 和 III 果实 ($p<0.01$), 硬度、Cx 活性高于成熟度 I 和 III 杏果实 ($p<0.05$)。说明采后贮藏杏果实可选择成熟度 II 作为适宜采收成熟度。

关键词: 杏果实; 成熟度; 软化; 细胞壁物质

文章编号: 1673-9078(2017)5-103-108

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.5.107

Studies of the Patterns of Cell Wall Material Metabolism in Postharvest Apricot Fruits at Different Degrees of Maturity

JING Yuan-yuan, YANG Ting-ting, MA Xuan, YAN You-ming, ZHU Xuan

(Department of Food Science, College of Food Science and Pharmaceutical Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to explore the changes in the metabolism of cell wall materials in postharvest apricot fruits with different degrees of maturity, Xinjiang "Saimaiti" apricot fruits were analyzed in this study. According to the yellowing rate, the fruits were classified into three different stages of maturity: I (colored area:<50%), II (colored area: 50~80%), and III (colored area: >80%). These fruits were stored at 4°C with 90~95% relative humidity (RH) and several related physiological indices were determined every seven days. The results showed that the content of water-soluble fraction (WSF) of pectin and cyclohexane diaminetetraacetic acid (CDTA)-soluble fractions (CSF) of pectin and cellulose were in the order of maturity stage I < maturity stage II < maturity stage III, while the content of sodium bicarbonate-soluble and sodium hydroxide-soluble fractions of pectin were in an order of maturity stage I > maturity stage II > maturity stage III. From maturity stage I to stage III, the lignin content and the activities of polygalacturonase (PG), pectin methylesterase (PME), β -glucosidase (β -G), and cellulase (Cx) showed a downward trend after the initial increase. However, at the end of storage, the cellulose content and the PG and PME activities of the apricot fruits at maturity stage II were lower than those at stages I and III ($p < 0.05$), and the lignin content at stage II was higher than that at stages I and III ($p < 0.05$). The fruit firmness and Cx activity of apricot fruits at maturity stage II were significantly higher than those of the fruits at maturity stages I and III. These results suggested that maturity stage II could be selected as a suitable maturity stage for postharvest storage of apricot fruits.

Key words: apricot fruits; maturity; softening; substances of cell wall material

杏 (*Prunus armeniaca*) 属蔷薇科, 李属^[1]。据 2015 年新疆统计年鉴所示, 新疆杏树种植面积为 13.2435 万 hm^2 , 杏果实产量为 128.164 万 t ^[2]。赛买提杏是新疆南

收稿日期: 2016-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31460414); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303075)

作者简介: 敬媛媛 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜

通讯作者: 朱璇 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏与保鲜

疆地区中栽培面积较广的一个品种, 以其酸甜适宜、肉质紧实而备受人们的喜爱。果实的采收成熟度是影响果实采后品质的关键因素, 杏果实采收过早会由于果实尚未发育完全、果个小、缺乏应有的风味、糖酸等营养物质积累不足而显著降低杏果实的经济价值; 采收过晚会导致果实过熟、果肉松软、发生品质劣变等现象不利于贮藏, 同时, 赛买提杏属于典型的呼吸跃变型果实, 加之采收时节正值高温夏季, 采后

呼吸作用十分旺盛,在常温下,1~2 d发生软化,2~3 d即达完熟,供应期短,极易软化腐烂,严重影响了杏果实的贮藏、运输和销售。因此,确定杏果实的适宜采收成熟度对延长杏果实贮藏时间,提高农民收入,促进新疆特色林果业发展具有重要的现实意义。

杏果实采后主要的生理变化是果实的后熟软化,这也是影响果实贮藏性的主要因素之一。而果实细胞壁成分的降解会引起果实的后熟软化,果实中的果胶物质由可溶性果胶和原果胶组成,原果胶又可分为离子结合果胶、共价结合果胶,通常果肉中离子型果胶向水溶性果胶转化,紧密结合型多糖向松弛结合型多糖转化标志着细胞软化的开始^[3]。研究表明,草莓^[4]和龙眼^[5]果实细胞壁中可溶性果胶、离子结合果胶、共价结合果胶、纤维素含量的改变及 PG、PME 酶活性的变化是导致果实成熟软化的主要原因;白杏果实 PG 和 Cx 活性降低能够延缓原果胶的降解以及水溶性果胶的增加而推迟果实的软化进程。因此,采后果实细胞壁成分代谢的变化可以作为衡量其后熟软化程度的参数。目前,有关杏果实的研究主要集中在化学保鲜、冷害和病害机理的探究等方面,而不同采收成熟度杏果实采后细胞壁物质代谢的研究鲜见报道。本文以新疆赛买提杏为试材,通过对比不同采收成熟度杏果实采后细胞壁物质代谢的差异,为杏果实适宜采收成熟度的确定以及杏果实采后贮运保鲜的研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

“赛买提”杏采自新疆库车县乌恰镇杏果园,采摘后 12 h 内运回果蔬采后生理实验室,去除伤、病果,各成熟度挑选大小均一的杏果实。果实运回后,散去田间热,根据转黄率^[6]将果实分为成熟度 I(着色面积<50%)、成熟度 II(着色面积 50%~80%)和成熟度 III(着色面积>80%)后装筐,移至 4 °C RH 90%~95%的冷库中贮藏。贮藏过程中每 7 d 取样 1 次,进行相关指标测定,每种成熟度用果 10 kg,重复 3 次。

1.2 仪器与设备

CY-B 硬度计,上海伦捷仪表有限公司;AL204-IC 电子分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;电热恒温水浴锅,北京市永光明医疗仪器厂;TU-1810APC 紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;GL-20G-II 高速冷冻离心机,上海安亭科学仪器厂。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 果实硬度测定

参照曹建康^[7]的方法,单位: kg/cm²。

1.3.2 细胞壁果胶物质的分离及含量的测定

参照尚海涛^[8]的方法。

1.3.3 多聚半乳糖醛酸酶(PG)活性测定

参考 Verma^[9]的方法。

1.3.4 果胶甲酯酶(PME)活性测定

参照 Verma^[9]的方法,以下式计算 PME 酶活性,以每 mL 酶液每 min 内释放 1 mmol CH₃O⁻为 1 个酶活力单位。

$$\text{酶活力单位 (mmol CH}_3\text{O}^-\text{/min)} = \frac{0.05 \times V_1}{V_2 \times t}$$

式中,0.05 为 NaOH 的摩尔浓度;V₁ 为消耗的 NaOH 体积(mL);V₂ 为反应系统内加入酶液的体积(mL);t 为酶促反应时间(min)。

1.3.5 β-葡萄糖苷酶活性测定

参照曹建康^[7]的方法。

1.3.6 纤维素酶(Cx)活性测定

参照曹建康^[7]的方法,纤维素酶活性以每小时每克鲜重(FW)杏果样品在 37 °C 催化羧甲基纤维素水解形成还原糖的微克数表示,即 μg/(h·g FW)。

1.3.7 纤维素含量测定

参照曹建康^[7]的方法。

1.3.8 木质素含量测定

参照曹建康^[7]的方法。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 软件进行数据整理和分析,通过 SPSS 20.0 软件进行方差分析和检验,并利用 Duncan 多重比较,进行差异显著性分析, $p < 0.01$ 表示差异极显著, $p < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同成熟度杏果实采后硬度的变化

如图 1 所示,在贮藏期间,三种成熟度杏果实硬度呈下降趋势。贮藏第 35 d,成熟度 I、II 和 III 杏果实硬度分别为 0.32 kg/cm²、0.43 kg/cm² 和 0.33 kg/cm²,成熟度 II 杏果实硬度分别比成熟度 I、III 杏果实高了 34.38%、30.30% ($p < 0.05$)。成熟度 I 杏果实由于采收时成熟度较低,保护组织未充分形成,导致贮藏后期失水较多,不利于硬度的保持;成熟度 III 杏果实采收时成熟度高,在整个贮藏期间硬度均低于成熟度 II 杏

果实。说明成熟度 II 杏果实在贮藏期间能够较好地保持杏果实的硬度。

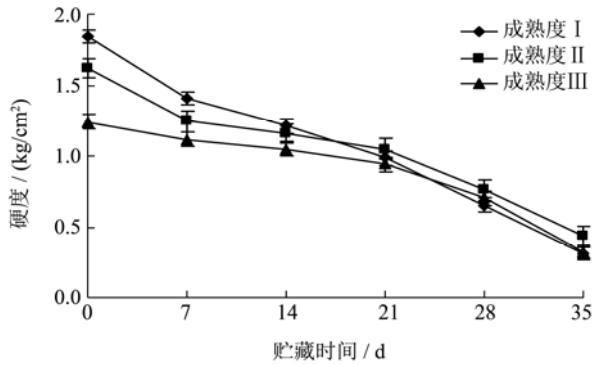


图 1 不同成熟度杏果实贮藏期间硬度的变化

Fig.1 Changes in firmness of apricot fruits at different maturity stages during storage

2.2 不同成熟度杏果实采后果胶物质及软化相关酶活性的变化

2.2.1 不同成熟度杏果实采后 WSF、CSF、NSF1、NSF2 含量的变化

如图 2a 所示, 整个贮藏期间, 三种成熟度杏果实可溶性果胶含量不断上升, 贮藏第 21 d, 成熟度 III 杏果实 WSF 含量比成熟度 I、II 杏果实分别高了 66.67% ($p < 0.01$)、16.79% ($p < 0.05$)。如图 2b 所示, 贮藏期间杏果实 CSF 逐渐上升, 至贮藏末期略有下降, 贮藏第 35 d, 3 种成熟度杏果实 CSF 的含量分别为 0.108 mg/g、0.087 mg/g 和 0.104 mg/g, 成熟度 II 杏果实比成熟度 I、III 杏果实分别低了 19.44% ($p < 0.05$)、16.35% ($p < 0.05$)。如图 2c 所示, 随着贮藏期的延长, 三种成熟度杏果实 NSF1 含量逐渐下降, 贮藏第 21 d, 成熟度 II、III 杏果实 NSF1 含量比成熟度 I 杏果实分别低了 28.57% ($p < 0.01$)、57.14% ($p < 0.01$)。如图 2d 所示, 成熟度 III 杏果实 NSF2 含量在贮藏 21 d 内始终最高, 贮藏第 35 d, 成熟度 II 杏果实 NSF2 含量比成熟度 I 和成熟度 III 杏果实高了 38.35% ($p < 0.01$)、23.94% ($p < 0.01$)。

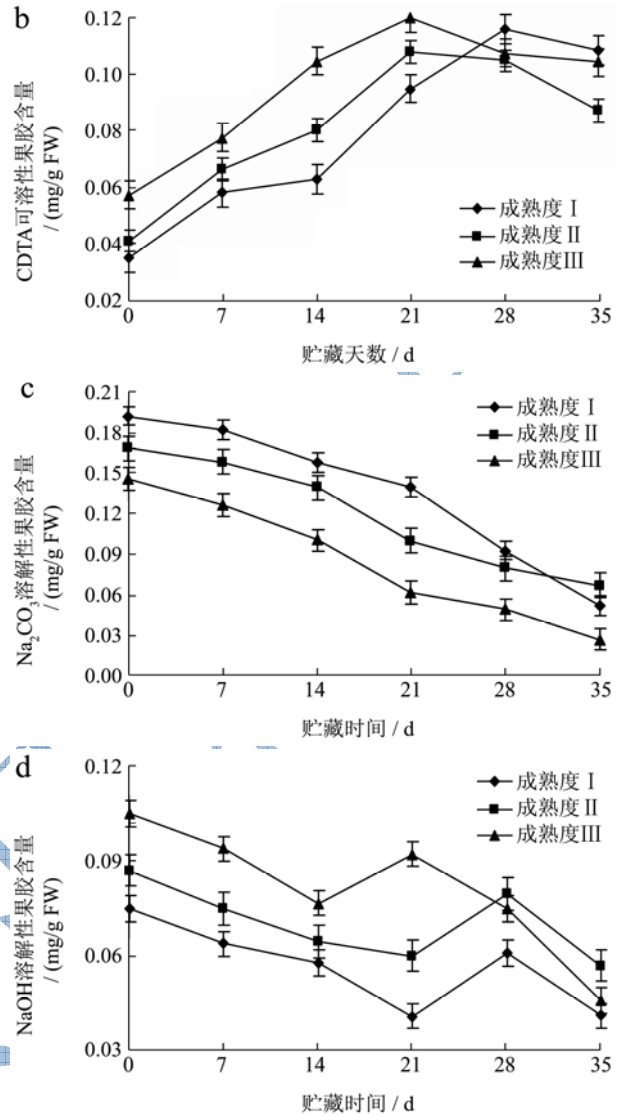
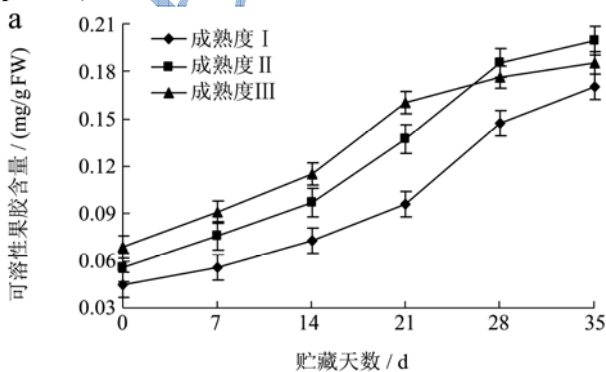


图 2 不同成熟度杏果实贮藏期间 WSF (a)、CSF (b)、NSF1 (c)、NSF2 (d) 含量的变化

Fig.2 Changes in WSF (a), CSF (b), NSF1 (c), and NSF2 (d) content in apricot fruits at different maturity stages during storage

2.2.2 不同成熟度杏果实采后 PG、PME、β-G、Cx 活性的变化

如图 3a 所示, 三种成熟度杏果实采后 PG 呈先上升后下降的趋势。贮藏后期成熟度 II 杏果实 PG 活性下降较快, 贮藏第 35 d, 成熟度 I、II 和 III 杏果实 PG 活性分别为 276.76 μg/(h·g FW)、218.79 μg/(h·g FW)、259.63 μg/(h·g FW), 成熟度 II 杏果实比成熟度 I、III 杏果实分别低了 20.95%、15.73% ($p < 0.05$)。如图 3b 所示, 整个贮藏期间, 成熟度 I、II 和 III 杏果实 PME 活性持续增加, 分别在贮藏第 28 d、21 d 和 14 d 后下降, 贮藏第 35 d, 成熟度 II 杏果实 PME 活性比成熟度 I、III 杏果实分别低了 24.54%、14.58% ($p < 0.05$)。如图 3c 所示, 前 7 d 成熟度 I、II 杏果实 β-葡萄糖苷

酶活性逐渐上升,成熟度III杏果实 β -葡萄糖苷酶活性逐渐下降;贮藏7 d后,成熟度II杏果实 β -葡萄糖苷酶活性上升趋势变缓,成熟度I、III杏果实迅速上升。贮藏第21 d,成熟度II杏果实 β -葡萄糖苷酶活性比成熟度I、II杏果实分别高了52.21%和72.46% ($p < 0.01$),差异极显著。

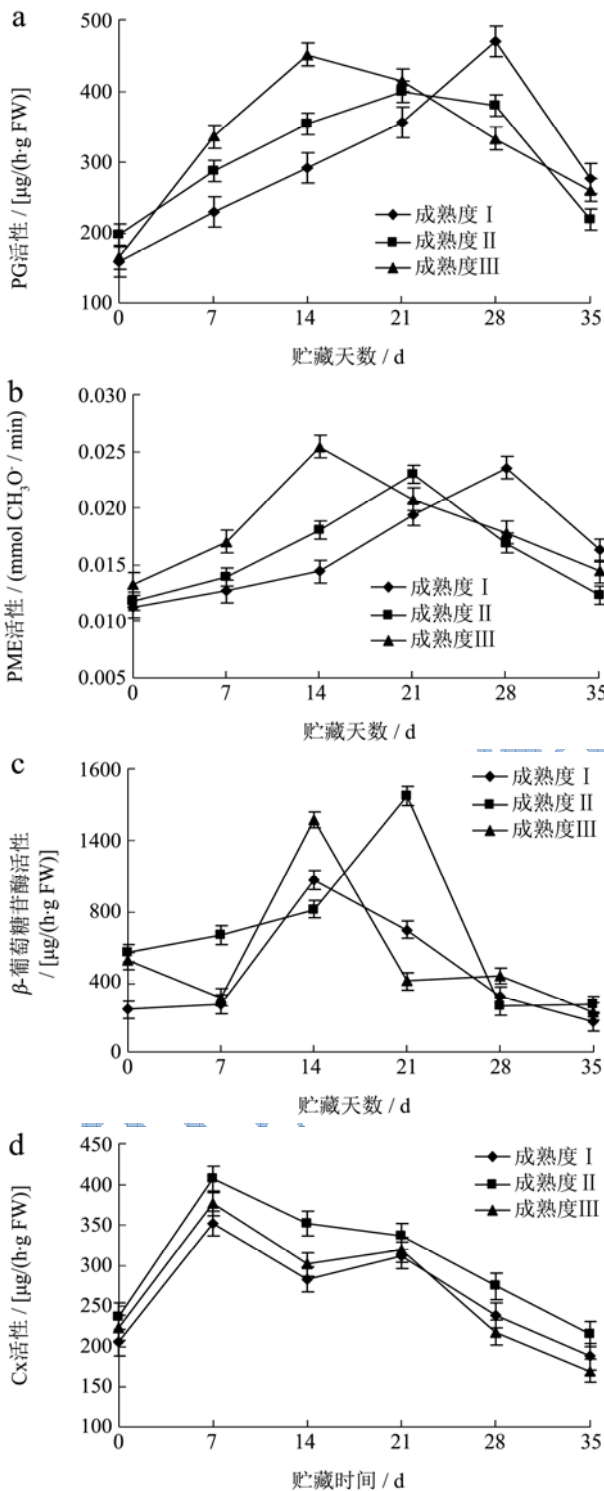


图3 不同成熟度杏果实贮藏期间PG、PME、 β -G、Cx活性变化
Fig.3 Changes in PG (a), PME (b), β -G (c), and Cx (d) activities in apricot fruits at different maturity stages during storage

如图3d所示,整个贮藏期间,成熟度II杏果实Cx活性始终高于成熟度I、III杏果实。贮藏第35 d,成熟度I、II和III杏果实Cx活性分别为187.65 $\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g}\text{FW})$ 、215.33 $\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g}\text{FW})$ 和170.18 $\mu\text{g}/(\text{h}\cdot\text{g}\text{FW})$ 。成熟度II杏果实Cx活性比成熟度I、III杏果实分别高了14.75%、26.53% ($p < 0.05$)。说明成熟度II杏果实在贮藏期间能够保持较高的Cx活性,从而降低杏果实纤维素的含量。

2.3 不同成熟度杏果实采后纤维素和木质素含量的变化

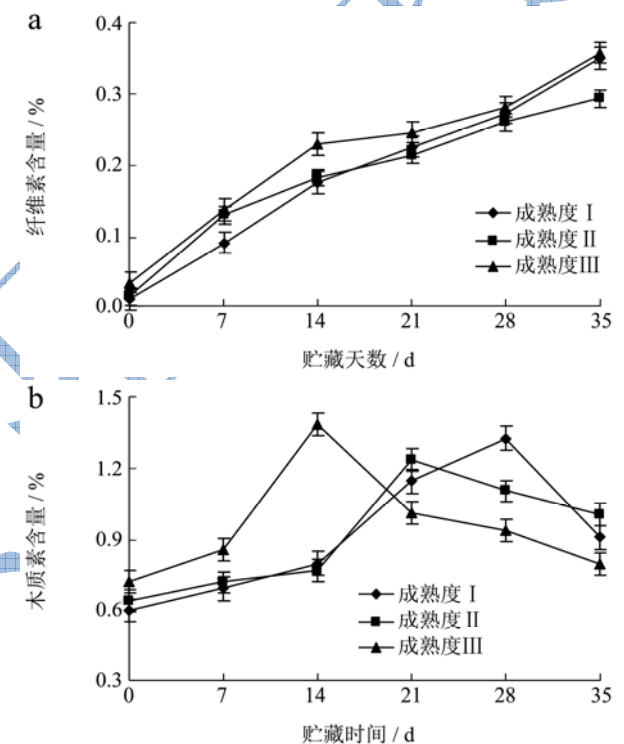


图4 不同成熟度杏果实贮藏期间纤维素和木质素含量的变化
Fig.4 Changes in cellulose (a) and lignin (b) content in apricot fruits at different maturity stages during storage

如图4a所示,前14 d成熟度II杏果实纤维素含量低于成熟度III杏果实,高于成熟度I杏果实;此后成熟度II杏果实纤维素含量上升缓慢,成熟度I杏果实纤维素含量迅速积累。贮藏第35 d,成熟度II杏果实纤维素含量比成熟度I、III杏果实低了16.30%、18.08% ($p < 0.05$),而成熟度I、III杏果实纤维素含量无显著差异 ($p > 0.05$)。如图4b所示,整个贮藏期间,三种成熟度杏果实木质素含量均呈上升趋势。贮藏第35 d,成熟度I、II和III杏果实木质素含量分别为0.91%、1.01%和0.80%,成熟度II杏果实木质素含量比成熟度I、III杏果实木质素含量分别高了10.99% ($p < 0.05$)、26.25% ($p < 0.01$)。说明成熟度II杏果实

在贮藏后期木质素含量下降缓慢,较好地维持了杏果实木质素含量。

3 讨论

细胞壁组成物质在果实的软化过程起着重要作用。高等植物果实细胞壁物质主要由果胶、纤维素和木质素等多糖类物质组成,它们相互交联成网状结构,是果实硬度表现的重要物质基础。根据果胶溶解性^[8]的不同,将果胶分为水溶性果胶(WSF)和原果胶,但为了更深入的研究原果胶与果实软化的关系,又把原果胶分为CDTA溶解型以离子键结合的果胶(CSF),Na₂CO₃溶解型的以共价键结合的果胶(NSF1),以及NaOH溶解型的不溶性果胶(NSF2)。果实正常成熟过程中,伴随着水溶性果胶和离子结合果胶不断增加,共价结合果胶和不溶性果胶的减少^[10]。本研究表明,贮藏过程中,杏果实水溶性果胶(WSF)、CDTA溶解性果胶(CSF)逐渐升高,NaOH溶解性果胶(NSF1)、Na₂CO₃溶性果胶(NSF2)含量逐渐下降,但成熟度II杏果实较成熟度I、III杏果实更好的延缓了水溶性果胶(WSF)、CDTA溶解性果胶(CSF)含量的上升及Na₂CO₃溶解性果胶(NSF1)、NaOH溶解性果胶(NSF2)含量的下降。魏建梅^[11]等研究也表明,京白梨果实后熟软化过程中共价结合果胶含量减少,离子结合果胶和水溶性果胶含量增加。细胞壁降解酶主要有PG和PME,PG可水解细胞壁中多聚半乳糖醛酸中1,4- α -D-半乳糖苷键,生成半乳糖醛酸和低聚半乳糖醛酸^[12]。本试验中,杏果实硬度的下降伴随着PG酶活性的增加,说明因PG导致的果胶降解是杏果软化的主要原因之一。PME主要是使果胶去甲酯化,催化果胶酯酸转化为果胶酸,同时生成适合于PG作用的底物,进而PG沿多聚半乳糖醛酸主链水解果胶酸,使果胶降解,细胞壁解体,果实软化。本试验中在贮藏前期,随着杏果实硬度的下降,PME活性逐渐增加;当杏果实硬度下降至一定程度并且趋于停止时,PME活性也逐渐下降,并且三种成熟度杏果PME活性差异显著。对梨^[11]和樱桃^[13]等果实后熟软化的研究中,也表明果实的软化伴随着PME活性的明显增加,说明PME虽不直接参与果胶的降解过程,但由于能有效地为PG提供底物,因此PME也是杏果实采后软化的关键酶。

杏果实冷藏后期,果肉与果核变得难以分离,并且同芦笋^[14]、枇杷^[15]果实一样会出现木质化和絮败的品质败坏现象,口感粗糙少汁。纤维素在纤维素酶Cx、 β -葡萄糖苷酶的作用下,逐步分解并最终生成 β -葡萄糖,导致细胞壁解体,果实硬度下降,本试验中,三种成熟度杏果纤维素含量均呈上升趋势,这一方面

可能是因为低温胁迫会造成果实果胶质和纤维素的降解过程受阻,另一方面可能跟贮藏期间果实的可溶性固形物合成了粗纤维以及能量代谢失调有十分紧密的联系^[15]。本研究中成熟度I杏果实虽然能够较好地保持果实的硬度,但由于其采收成熟度低,未能形成健全的保护组织,在贮藏期间易失水而导致果实硬度下降并且无法后熟;成熟度III杏果实由于其采收成熟度较高,在贮藏后期发生较为严重的絮败现象,口感粗糙;成熟度II杏果实贮藏期间保持了较高的Cx、 β -葡萄糖苷酶活性,显著降低了杏果实纤维素含量的上升并保持了较高的木质素含量,本课题前期研究结果也表明,成熟度II杏果实在贮藏期和货架期能保持较好的品质^[6],结合本研究的试验结果,认为成熟度II是贮藏杏果实适宜的采收成熟度。

4 结论

4.1 成熟度I、II、III杏果实的WSF、CSF和纤维素含量逐渐上升,NSF1和NSF2含量逐渐下降,木质素含量、PG、PME、 β -G、Cx酶活性呈先上升后下降趋势。贮藏结束时,成熟度II杏果实纤维素含量、PG、PME活性低于成熟度I、III果实,木质素含量高于成熟度I、III果实,硬度、Cx活性高于成熟度I、III杏果实。

4.2 综上所述,成熟度II杏果实在采后贮藏期间能保持较低PG、PME活性和纤维素含量,并且保持一定的木质素含量和果胶含量,从而较好地保持杏果实的硬度,采后贮藏杏果实可选择成熟度II作为适宜采收成熟度。

参考文献

- [1] Ayimuguliaisaiti, Wang Y, Jia P P, et al. Effect of oligochitosan treatment on induce disease resistance and active oxygen metabolism in apricot fruits [J]. Food Research & Development, 2015, 36(5): 126-131
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2015
The Xinjiang Uygur autonomous region statistical bureau. Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015
- [3] 梁庆沙,张东亚,李芳,等.钙处理对白凤桃果实冰温贮藏后细胞壁代谢物质的影响[J].果树学报,2009,26(5):714-718
LIANG Qing-sha, ZHANG Dong-ya, LI Fang, et al. Effects of Ca treatment on metabolite of cell wall of Baifeng peach fruit stored at ice point [J]. Journal of Fruit Science, 2009, 26(5): 714-718

- [4] Posé S, Kirby A R, Mercado J A, et al. Structural characterization of cell wall pectin fractions in ripe strawberry fruits using AFM [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(3): 882-890
- [5] 赵云峰,林河通,王静,等.热处理抑制采后龙眼果肉自溶及细胞壁物质降解[J].*农业工程学报*,2014,30(11):268-275
ZHAO Yun-feng, LIN He-tong, WANG Jing, et al. Inhibiting aril breakdown and degradation of cell wall material in pulp of harvested longan fruits by heat treatment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(11): 268-275
- [6] 杨婷婷,朱璇,向玉洁,等.采收成熟度对杏果实贮藏品质的影响[J].*现代食品科技*,2015,7:277-282
YANG Ting-ting, ZHU Xuan, XIANG Yu-jie, et al. Impact of harvest maturity on storage quality of apricot fruits [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 7: 277-282
- [7] 曹建康,姜微波,赵玉梅,等.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, et al. *Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* [M]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 2007
- [8] 尚海涛.桃果实絮败和木质化两种冷害症状形成机理研究[D].南京:南京农业大学,2011
SHANG Hai-tao. Study on development mechanisms of mealiness or leatheriness in chilling injured peach fruit [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011
- [9] Verma C, Singh R K, Singh R B, et al. Biochemical and In-silico studies on pectin methylesterase from G9 variety of *Musa acuminata* for delayed ripening [J]. *Open Biochemistry Journal*, 2015, 9(1): 15-23
- [10] Held M A, Jiang N, Basu D, et al. *Plant cell wall polysaccharides: structure and biosynthesis* [M]. Springer International Publishing, 2015
- [11] Wei J, Qi X, Cheng Y, et al. Difference in activity and gene expression of pectin-degrading enzymes during softening process in two cultivars of Chinese pear fruit [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 197: 434-440
- [12] Ng J K, Schröder R, Sutherland P W, et al. Cell wall structures leading to cultivar differences in softening rates develop early during apple (*Malus x domestica*) fruit growth [J]. *BMC Plant Biology*, 2013, 13(1): 1-17
- [13] Wang L, Jin P, Wang J, et al. Hot air treatment induces resistance against blue mold decay caused by *Penicillium expansum* in sweet cherry (*Prunus cerasus* L.) fruit [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 189(3): 74-80
- [14] 赵丛枝,张子德,梁磊.芦笋采后生理及贮藏技术研究进展[J].*保鲜与加工*,2004,4(2):4-6
ZHAO Cong-zhi, ZHANG Zi-de, LIANG Lei. Advances of research on post-harvest physiology and storage technology of asparagus [J]. *Storage and Process*, 2004, 4(2): 4-6
- [15] 陈发河,张美姿,吴光斌.NO 处理延缓采后枇杷果实木质化劣变及其与能量代谢的关系[J].*中国农业科学*,2014,47(12): 2425-2434
CHEN Fa-he, ZHANG Mei-zi, WU Guang-Bin. Study of lignification's delaying and its relationship with energy metabolism in loquat fruits after nitric oxide fumigation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12): 2425-2434