

振动胁迫对杏果实细胞壁物质代谢的影响

吴芳, 程曦, 王英, 朱璇

(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 本试验以新疆赛买提杏为研究材料, 网套包装与无网套包装的杏在 4 ℃、90%~95% RH 环境下置于自制变频可调幅振动台上, 同时进行频率为 5 Hz 的水平和垂直方向振动处理, 模拟低温下汽车运输过程。杏果分别振动 12 h、24 h 和 48 h 并在 4 ℃、90%~95% RH 条件下贮藏, 以不振动果实作为对照。每隔 7 d 定期取样, 分别测定硬度、原果胶、可溶性果胶、纤维素含量以及 PG、Cx、 β -葡萄糖苷酶的活性, 研究振动胁迫对杏果细胞壁物质代谢的影响。试验结果表明, 振动胁迫显著促使杏果 PG、Cx 和 β -葡萄糖苷酶的活性升高, 加速可溶性果胶和纤维素含量的上升, 降低贮藏过程中杏果的硬度和原果胶含量, 加速杏果的品质劣变和软化进程。与无网套包装相比, 网套包装可抑制杏果以上生理过程的进行, 提高硬度, 说明在贮藏过程中网套包装比无网套包装更能显著减缓杏果细胞壁物质的代谢和降解。

关键词: 杏; 振动胁迫; 软化; 细胞壁物质代谢

文章编号: 1673-9078(2017)3-155-161

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.024

Impact of Vibration Stress on the Cell Wall Metabolism of Apricot Fruits

WU Fang, CHENG Xi, WANG Ying, ZHU Xuan

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

Abstract: Xinjiang "Saimaiti" apricot was the experimental material analyzed in this study. At a temperature of 4 ℃ and a relative humidity of 90%~95%, the apricot fruits with and without foam-net were placed on a homemade vibration table with a controllable amplitude and variable frequency. The vibration treatment was conducted horizontally and vertically at a simultaneous vibration frequency of 5 Hz to simulate vehicle vibration during transportation. The apricot fruits were vibrated for 12 h, 24 h, and 48 h, and stored at 4 ℃ and 90%~95% relative humidity. Fruits with no vibration were used as controls. Sampling was carried out every seven days, and fruit firmness, proto-pectin content, water-soluble pectin content, cellulose content, and polygalacturonase (PG), cellulase (Cx), and β -glucosidase activities were measured and the effect of vibration stress on the cell wall metabolism of the fruits was studied. The results showed that vibration stress could increase the water-soluble pectin content, cellulose content, as well as PG, Cx, and β -glucosidase activities of apricots. This also decreases the firmness and proto-pectin content of apricots, as well as accelerates the quality deterioration and softening process of apricots. Compared with no foam-net packaging, foam-net could inhibit the above physiological processes and increase the hardness of apricot fruits. This indicates that the cell wall metabolism and degradation of apricots with foam-net packaging were reduced more effectively than those without foam-net packaging during storage.

Key words: apricot; vibration stress; softening; cell wall metabolism

杏 (*Prunus armeniaca*) 为蔷薇科, 李属, 原产于我国并在新疆林果业中占有重要的地位^[1]。新疆是我国杏果的最大最集中产区, 有二十余个主要栽培品种, 其中“赛买提”杏果实营养丰富、肉质细腻, 口感酸甜^[2], 广受大众的喜悦。

收稿日期: 2016-04-26

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

作者简介: 吴芳 (1990-), 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

杏果实属于典型的呼吸跃变性果实, 在夏季高温季节集中采收, 果实货架期非常短, 不耐贮藏和长途运输, 采后常温 2~3 d 内就会出现绿褪转黄, 品质下降, 组织硬度降低, 果实开始软化腐烂变质的现象, 严重影响了杏采后贮藏、运输和消费。新疆南部地区是杏主要产出地, 由于距离国内大中城市遥远, 杏果实的运输时间和距离也会随之延长, 在采摘、包装和运输等环节, 都会造成杏果实的大量损耗^[3]。果实采后无论采取何种运输方式与包装在贮运过程中都会受到一定程度的振动、碰撞和挤压等机械胁迫, 这些机

械胁迫不仅会严重影响果实的外观,还会在一定程度上引起果实内部组织的生理生化反应^[4],增加水分散失和腐败微生物入侵的渠道,加速果实组织损伤和软化现象的发生。目前,大多数研究主要集中在振动胁迫对果实采后生理品质、活性氧代谢以及理化性质等方面的影响,针对果实细胞壁物质代谢的相关情况还鲜有系统深入的研究。

本试验以新疆主栽“赛买提”杏果实为试验材料,研究模拟 4℃、90%~95% RH 低温环境下汽车运输过程中不同振动时间和不同包装方式的杏果实贮藏期间硬度及细胞壁物质的变化情况,探讨振动胁迫对杏果实细胞壁物质代谢的影响,完善振动胁迫影响杏果实软化的机理,为减轻杏果振动损伤的技术研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

赛买提杏果实:试验杏果实于 2015 年 6 月人工采摘自新疆库车县乌恰镇的赛买提杏。果实用网套包装置于四周垫好纸的塑料筐内,采摘后 12 h 内运回新疆乌鲁木齐新疆农业大学果蔬采后生理研究室,选择果色均匀、大小和成熟度相近并且其中剔除伤果病果的杏果实作为试验样品。

自制变频可调幅振动台:Y90L-2 三相异步电动机(2200 W, 380 V, 2840 r/min, 50 HZ);硬度计:GY-1 型,上海伦捷仪表有限公司;高速冷冻离心机:GL-20G-II 型,上海安亭科学仪器厂;电子分析天平:AL204-IC 型,梅特勒托利多仪器厂上海有限公司;电热恒温水浴锅:XMTD-4000 型,北京市永光明医疗仪器厂;电子分析天平:AL204-IC 型,梅特勒托利多仪器厂上海有限公司;紫外分光光度计:TU-1810 型,北京普希通用仪器有限责任公司。

1.2 试验方法与设计

因实际运输中各种因素干扰较大,振动实验易出现误差。因此实验参照振动胁迫常用的模拟研究法,参照卢立新等^[5]的方法,根据跟车记录从乌鲁木齐到北京公路运输中采集的振动数据,用变频可调幅振动台来实现振动胁迫。根据国标对振动进行加强 $\sqrt{5}$ 倍以还原实际运输的工况,从而确定振动的频率和振动的幅度,采用水平和垂直两个变频器和电机控制振动的频率和调整振动的方向,通过曲柄长度调整变化振动幅度。

将杏果实平均分为三组,每组的 20 kg。将杏果实

置于规格一致四周垫上,以防止划伤杏子的纸的塑料筐中。将装有网套包装与无网套包装的杏的塑料筐固定于自制变频可调幅振动台(Y90L-2 三相异步电动机:2200 W, 380 V, 2840 r/min, 50 HZ)上,在 4℃、90%~95% RH 低温环境中放置的振动台上同时进行水平和垂直方向振动频率为 5 HZ 的振动处理,三组杏果实分别振动 12 h、24 h 和 48 h,每组处理重复三次,以未进行振动处理的杏果为对照,每 7 d 定期测定相关指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 果实硬度测定

参考曹建康方法^[6],每种成熟度随机选择 10 个杏果,在围绕果实的赤道部位,间隔等距离的三个位置,各削去一小块薄薄的果皮(厚约 1 mm),用 GY-B 型果实硬度计测定各个位置果肉的硬度。最终结果以平均值计,单位:kg/cm²。

1.3.2 可溶性果胶含量和原果胶的测定

参照曹建康^[6]等,采用咔唑比色法。

1.3.3 纤维素含量的测定

采用蒽酮比色法^[7]。纤维素含量用 OD₆₂₀/g FW 表示。

1.3.4 果胶酶活性的测定

参照曹建康^[6]等,采用比色的方法。

1.3.5 β -葡萄糖苷酶活性的测定

参照曹建康等^[6],采用水杨苷水解法。

1.3.6 纤维素酶活性的测定

参照曹建康^[6]等的方法。

1.4 试验数据处理与分析

Excel 统计分析所有数据,计算标准误差并制图;利用 SPSS 多重比较对差异显著性进行分析, $p < 0.05$ 表示差异显著, $p > 0.05$ 表示无显著性差异。

2 结果与分析

2.1 振动胁迫对杏果实贮藏过程中硬度的影响

由图 1 可知,相同振动时间下,随着采后贮藏时间的延长,a、b 和 c 三个图中杏果实的硬度逐渐下降。在同一贮藏时间下,振动时间越长的杏果实硬度越低,同时网套包装振动的杏果实硬度始终高于无网套包装振动的杏果实。贮藏第 35 d,对照杏果比振动 12 h、24 h 和 48 h 网套包装的杏果实硬度值分别高 10.60%、

31.81%和 37.95%，比振动 12 h、24 h 和 48 h 无网套包装杏果实硬度值高 35.50%、52.70%和 60.60%，各组差异均极显著($p < 0.01$)。振动胁迫可以显著加速杏硬度的下降，受振网套包装的杏果实硬度始终高于无网套包装的杏，说明网套包装能较无网套包装更好的减缓杏果实软化速度。

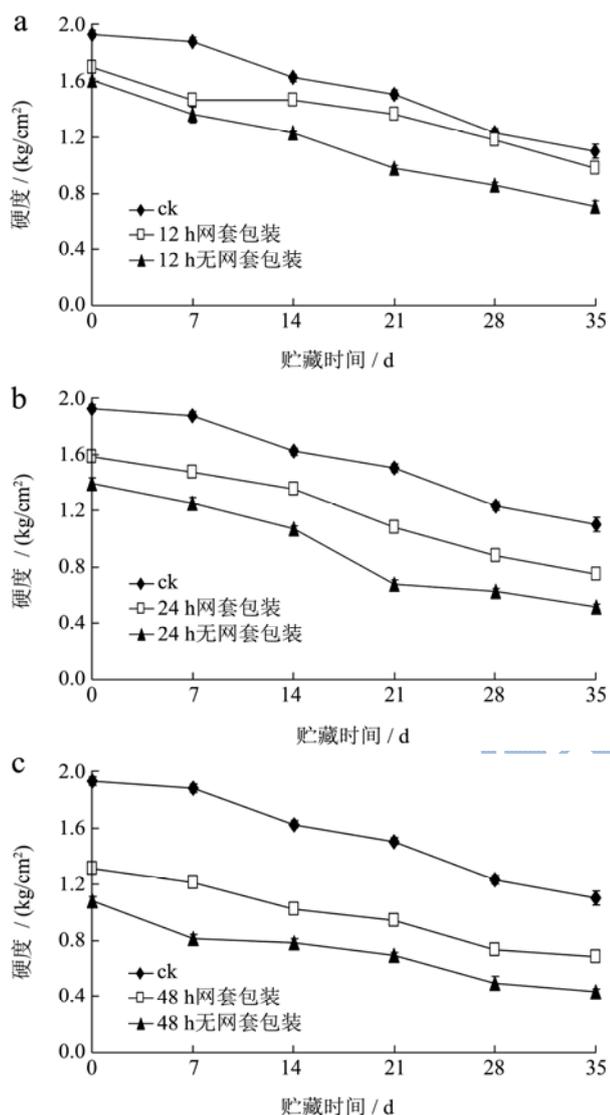


图 1 不同振动时间对杏果实贮藏期间硬度的影响

Fig.1 Effect of different vibration times on the firmness of apricot fruits during storage

2.2 振动胁迫对杏果实贮藏过程中原果胶含量的影响

由图 2 可知，三组不同振动时间处理的杏果实原果胶含量都随着贮藏时间的延长而逐渐降低，且振动时间越长的杏果实原果胶含量下降越快，同时，受振网套包装的杏果实原果胶含量高于受振无网套包装的

杏果实，振动 12 h 和振动 48 h 杏果实原果胶含量变化较不稳定，均呈现交错变换趋势。贮藏第 14 d，受振网套包装的杏果实原果胶含量由大到小依次为振动 12 h>振动 24 h>振动 48 h。贮藏 35 d，振动 12 h、24 h 和 48 h 网套包装杏果实原果胶含量比振动 12 h、24 h 和 48 h 无网套包装杏果实分别高了 2.76%、5.30%和 11.60%，c 图中振动 48 h 的杏果实三个处理间差异显著($p < 0.05$)。说明网套包装可以显著减缓因为振动胁迫的作用使杏果实原果胶含量下降的程度。

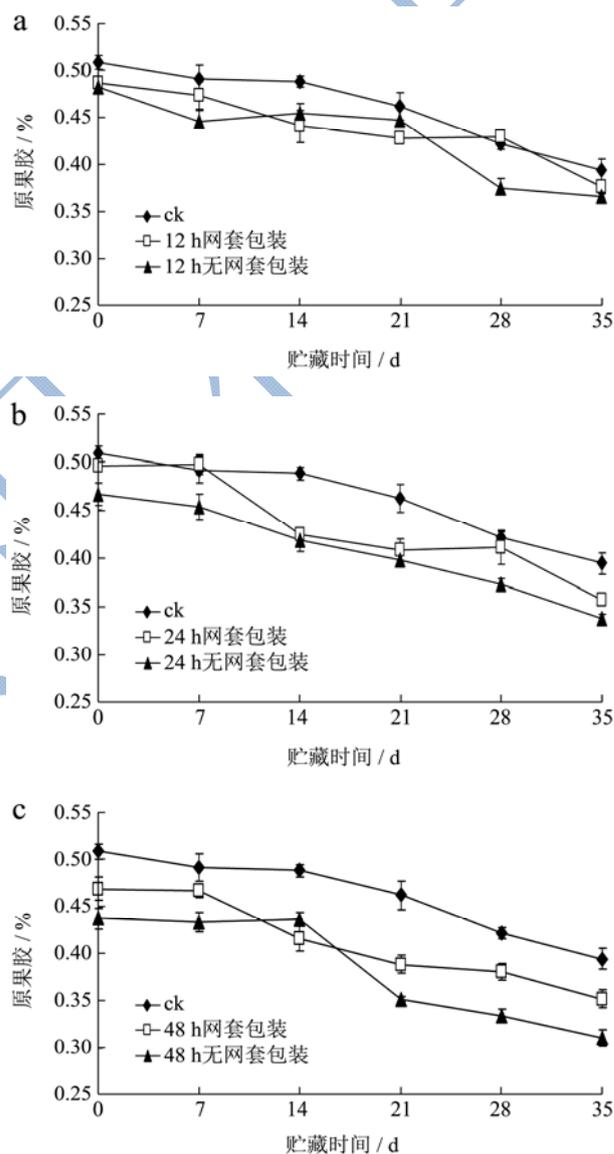


图 2 不同振动时间对杏果实贮藏期间原果胶含量的影响

Fig.2 Effect of different vibration times on the proto-pectin content of apricot fruits during storage

2.3 振动胁迫对杏果实贮藏过程中可溶性果胶含量的影响

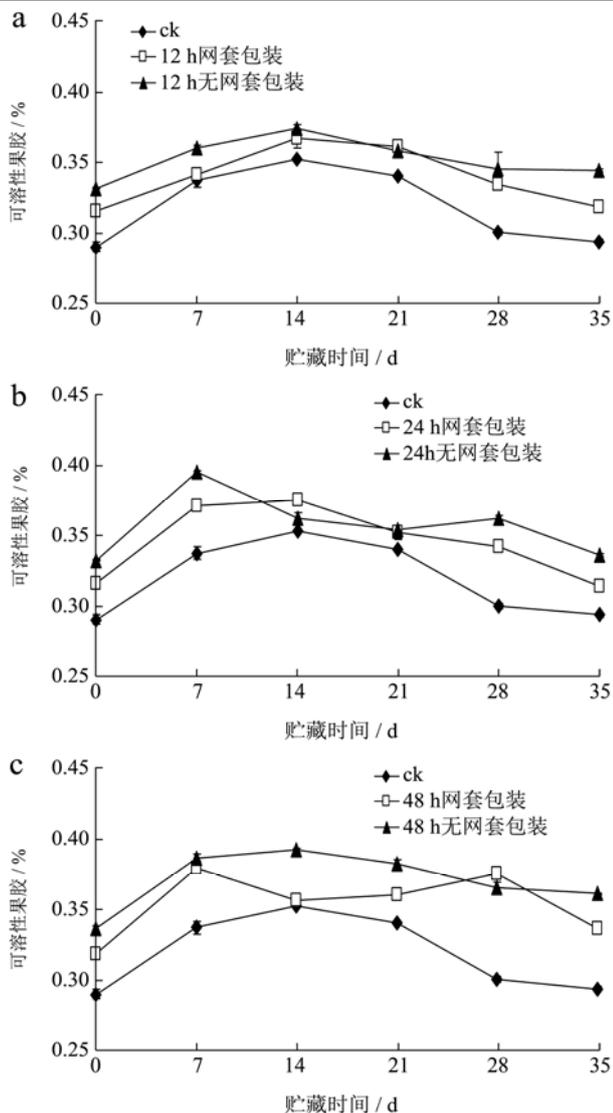


图3 不同振动时间对杏果实贮藏期间可溶性果胶含量的影响

Fig.3 Effect of different vibration times on the water-soluble pectin content of apricot fruits during storage

由图3可知, a、b和c三个图中的杏果实可溶性果胶含量在整个贮藏过程中整体均呈现出先上升再下降的趋势, 且变换趋势均较为平缓。同一贮藏时间, 振动时间越长杏果实的可溶性果胶含量越高, 其中受振无网套包装的杏果实可溶性果胶含量整体高于受振网套包装的杏果实。如上图所示, 对照、振动12h和24h网套包装和振动24h无网套包装的杏果实的可溶性果胶含量的峰值出现贮藏第14d, 而其余处理果实的高峰出现在贮藏的第7d。出现峰值时, 受振无网套包装杏果实中的可溶性果胶含量明显高于网套包装和未进行振动处理的对照杏果实的可溶性果胶含量。由此可知, 振动胁迫可以使可溶性果胶含量上升的时间提前和加速上升幅度, 网套包装可以显著($p < 0.05$)减缓杏果实贮藏期间可溶性果胶的变化。

2.4 振动胁迫对杏果实贮藏过程中纤维素含量的影响

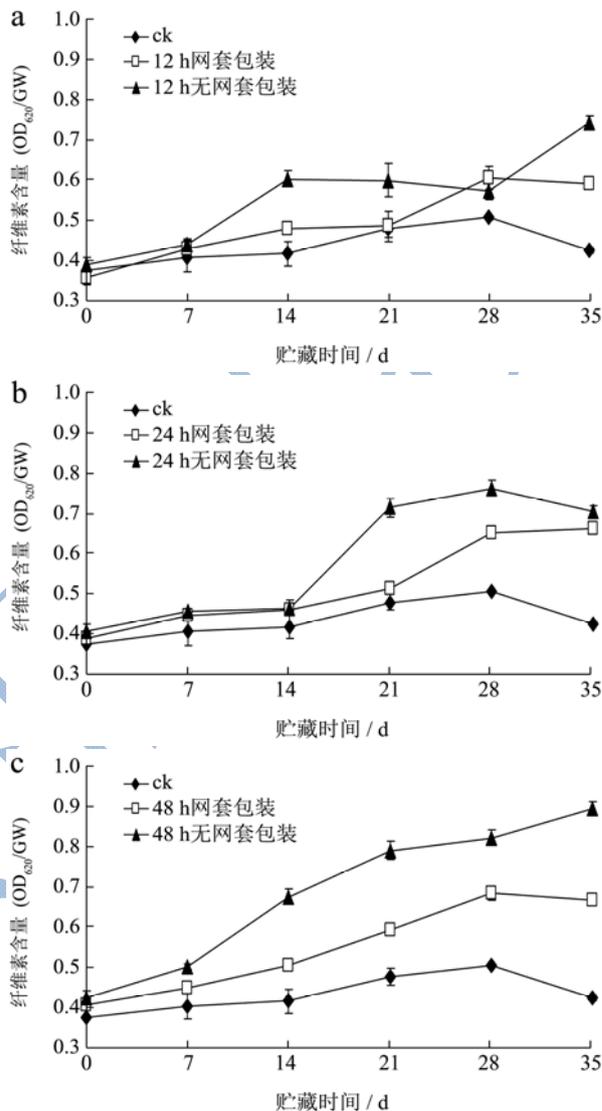


图4 不同振动时间对杏果实贮藏期间纤维素含量的影响

Fig.4 Effect of different vibration times on the cellulose content of apricot fruits during storage

由图4所示, 振动胁迫促进了杏果实贮藏过程中纤维素含量的上升趋势, 相同贮藏时间下振动时间越长的杏果实纤维素含量越高, 相同振动时间下贮藏时间越长的杏果实纤维素含量越高, 且受振网套包装的杏果实纤维素含量始终低于无网套包装的杏。如上图可知, 在贮藏前期, 振动12h和24h的杏果实三个处理之间差异不显著($p > 0.05$), 而振动48h的杏果实纤维素含量差异较为明显。在贮藏第35d, 三个振动时间的杏果实纤维素含量由高到低均为受振无网套包装>受振网套包装>对照, 其中受振48h网套包装纤维

素含量<受振 24 h 网套包装纤维素含量<受振 12 h 网套包装纤维素含量<对照, 说明网套包装能较无网套包装更好的保持杏果实纤维素含量, 且振动时间长的杏果实纤维素含量高。

2.5 振动胁迫对杏果实贮藏过程中多聚半乳糖醛酸酶活性的影响

糖醛酸酶活性的影响

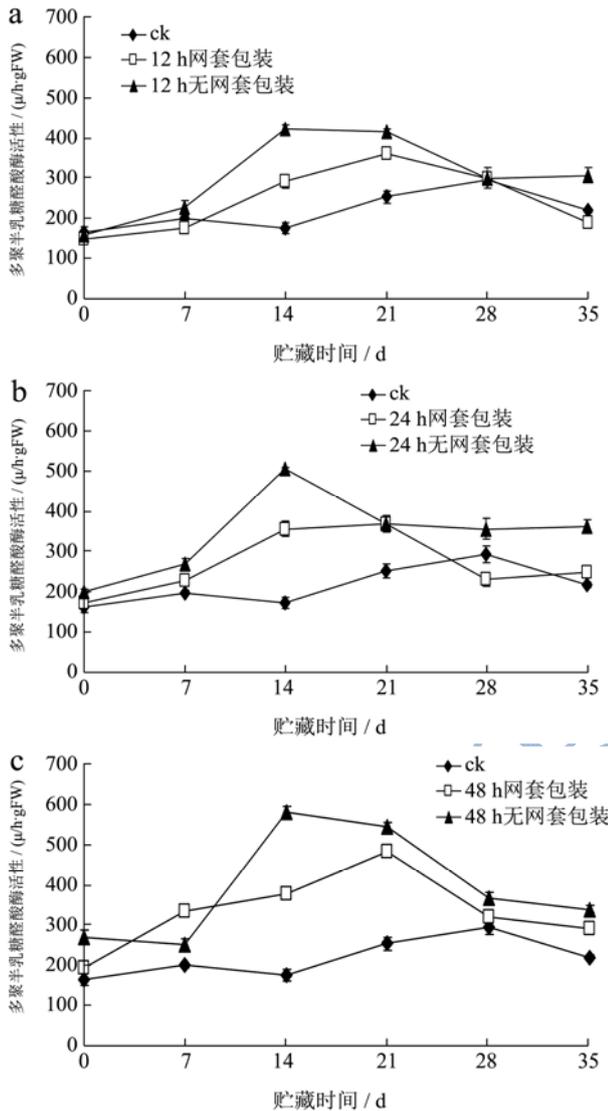


图 5 不同振动时间对杏果实贮藏期间多聚半乳糖醛酸酶活性的影响

Fig.5 Effect of different vibration times on the PG activity of apricot fruits during storage

由图 5 可知, 贮藏过程中杏果实 PG 酶活性整体呈现先上升再下降的趋势, 其中贮藏时间一样, 振动时间越长杏果实的 PG 酶活性越高, 且受振网套包装的杏果实 PG 酶活性高于受振无网套包装的杏。贮藏第 14 d, a、b 和 c 三个图中受振杏果实的 PG 酶活性均迅速升高, 而 a、b 和 c 三个图中对照杏果实的 PG

酶活性到第 28 d 时才达到最大值。贮藏 14 d 时, 振动 12 h、24 h 和 48 h 无网套包装杏果实 PG 酶活性比网套包装杏果实分别高 31.30%、29.31%和 35.22%, 各组差异均显著($p<0.05$)。由此可以得出, 网套包装比无网套包装能更好的保持贮藏过程中 PG 酶的活性, 且振动时间越长杏果实的 PG 酶活性越高, 杏果实硬度下降更加迅速。

2.6 振动胁迫对杏果实贮藏过程中纤维素酶活性的影响

活性的影响

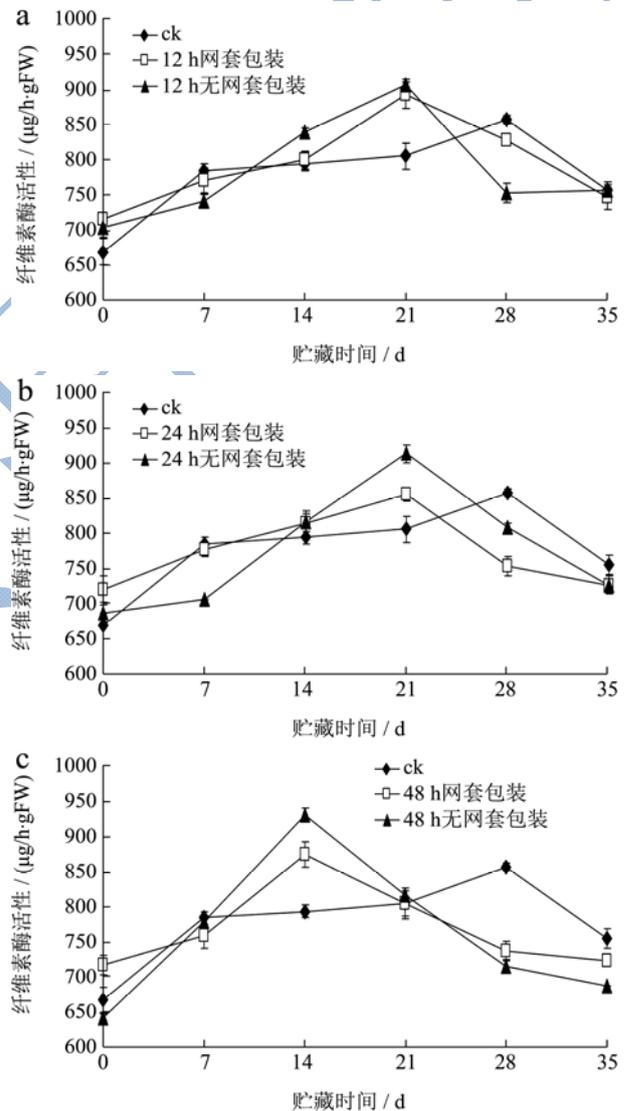


图 6 不同振动时间对杏果实贮藏期间纤维素酶活性的影响

Fig.6 Effect of different vibration times on the Cx activity of apricot fruits during storage

由图 6 可知, a、b 和 c 三个图中的杏果实纤维素酶活性大体上都呈现先上升再下降的趋势, 其中振动时间越长杏果实的纤维素酶活性越低。对照杏果实的 Cx 活性在贮藏期间第 28 d 达到最大值, 而 a 和 b 组受

振网套包装和无网套包装杏果 Cx 活性于贮藏第 28 d 达到最大值, c 组受振杏果 Cx 活性峰值比对照提前 14 d 出现, 且比 a 和 b 两组峰值提前 7 d 出现。贮藏第 35 d, 受振网套包装的杏果实纤维素酶活性又高到低依次为振动 12 h>振动 24 h>振动 48 h, 各处理之间差异不显著 ($p>0.05$)。结果说明, 说明振动胁迫可以使杏果实贮藏期间 Cx 活性最大值的出现时间提前, 网套包装可以显著减缓杏果实 Cx 活性的变化。

2.7 振动胁迫对杏果实贮藏过程中 β -葡萄糖苷酶活性的影响

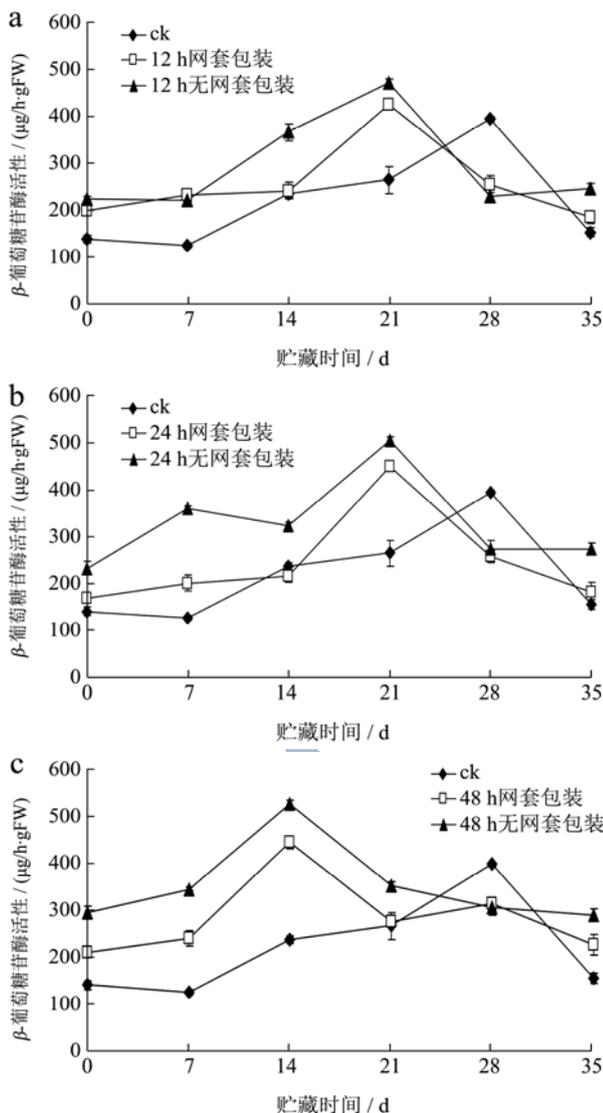


图 7 不同振动时间对杏果实贮藏期间 β -葡萄糖苷酶活性的影响

Fig.7 Effect of different vibration times on the β -glucosidase activity of apricot fruits during storage

由图 7 可以看出, 振动胁迫处理加快了杏果实 β -葡萄糖苷酶活性的上升, 在整个贮藏期间, β -葡萄糖

苷酶活性呈先上升后下降的变化趋势, 且振动时间越长杏果实的 β -葡萄糖苷酶活性越高。对照杏果在贮藏 28 d 时达到最大值, 但而 a 和 b 组受振网套包装和网套包装杏果 β -葡萄糖苷酶活性于贮藏第 21 d 达到最大值, c 组受振杏果 β -葡萄糖苷酶活性于贮藏第 14 d 达到最大值。振动 12 h、24 h 和 48 h 无网套包装杏果 β -葡萄糖苷酶活性达到最大值时比网套包装分别高 10.01%、11.17% 和 15.65% ($p>0.05$)。贮藏第 35 d, 受振 48 h 网套包装的杏果实 β -葡萄糖苷酶活性均高于其余两个振动时间的受振网套包装杏果实, 且受振无网套包装的杏果实 β -葡萄糖苷酶活性变化速度始终高于网套包装和对照果实, 说明网套包装比无网套包装能更好的保持杏果实 β -葡萄糖苷酶活性。

3 结论

3.1 果实在采摘后需要进行运输, 任何运输的方式都会对果实造成不同程度的挤压、碰撞和振动, 造成果实生理生化反应的不同变化, 降低果实的贮藏寿命和商品价值。振动胁迫往往在没有造成果实组织表面破损时就已经引起果实内部的生理失常, 导致果实加速软化与衰老^[8]。其中肉眼可见的果实表观损害容易被发现并及时处理, 而振动胁迫造成的内部组织损害最容易被忽视, 对果实损伤较为严重。大多数研究认为果实软化主要是包括果胶物质和纤维素等细胞壁物质的降解, 这些变化会造成细胞壁结构破坏而软化促进果实的成熟衰老^[9]。

3.2 细胞壁的相关物质变化对果实口感和后熟软化和都具有重要影响, 果实中 PG、Cx 和 β -葡萄糖苷酶等水解酶共同作用引起果胶物质的聚合溶解, 导致细胞壁结构和组分发生变化, 并影响果实的硬度, 发生软化现象^[10,11]。本试验的研究结果表明, 在杏果实整个贮藏期间, 与对照未振动的杏果实相比, 进行振动胁迫处理的杏果实品质下降迅速, 且振动时间越长, 杏果实的软化越严重。试验中受振网套包装的杏果实原果胶含量下降缓慢, 延缓了可溶性果胶含量的上升, 同时较好的抑制了 PG 酶和 β -葡萄糖苷酶活性, 进行振动胁迫处理的杏果实纤维素含量上升迅速, 加速了纤维素酶活性的下降, 造成杏果实细胞壁物质的分解, 硬度逐渐降低。解静^[12]研究发现振动胁迫会破坏果实结构, 促进底物与酶的接触, 造成细胞壁网状结构解体, 使果实原果胶含量和硬度降低, 这与本试验的研究结果一致。Soumya 和孙玉飞等^[13,14]研究认为在甜瓜果实成熟软化过程中纤维素对酶分解具有较强的抗性, 可能是纤维素酶使细胞壁物质粗纤维解体作用起到了主要作用。在本试验中, 振动胁迫加速了杏果实

贮藏过程中 PG、Cx 和 β -葡萄糖苷酶先上升, 达到一个最高点后逐渐下降的变化趋势, 从而促进杏果实细胞壁的降解和果实硬度下降, 且经过振动后的杏果实贮藏过程中网套包装比无网套包装更能显著减缓细胞壁的降解和果实硬度下降。王艳颖等^[15]在红富士苹果上的研究也发现机械损伤造成红富士苹果果实迅速软化, 主要表现为促进原果胶含量降低, 加快可溶性果胶和纤维素含量升高。周然等^[16]通过研究也发现受振动损伤较高的黄花梨在贮藏过程中水解酶活性变化较大。

3.3 综上所述, 振动胁迫可以显著促进贮藏过程中杏果实 PG、Cx 和 β -葡萄糖苷酶活性以及可溶性果胶含量的上升, 加快了原果胶和纤维素的降解从而加快杏果实硬度下降和软化进程。同时, 网套包装能更好的抑制杏果实细胞壁物质降解, 延缓软化与衰老进程, 保持杏果实较高的硬度。

参考文献

- [1] 张大海.新疆杏产业发展历程对新疆林果业发展的若干启示[J].新疆农业科学,2010,47(10):1970-1975
ZHANG Da-hai. Some inspirations about development and change of the apricot industry to the forest fruit industry in Xinjiang [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(10): 1970-1975
- [2] 程曦,王英,许禄鼎,等.不同处理对赛买提杏贮藏保鲜效果的影响[J].食品工业科技,2015,14:340-344
CHENG Xi, WANG Ying, XU Lu-ding, et al. Effect of simulating transportation vibration stress on the quality of "Saimaiti" apricot fruits [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 14: 340-344
- [3] 刘峰娟.采后保鲜处理和振动胁迫对杏子生理及品质影响的研究[D].新疆:石河子大学,2011
LIU Feng-juan. Studies on the physiology and quality of postharvest preservation and vibration stress on apricot [D]. Xinjiang: Shihezi University, 2011
- [4] Zarifshat S, Ghassemzadeh H R, Sadeghi M, et al. Effect of impact level and fruit properties on golden delicious apple bruising [J]. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2010, 5(2): 114-121
- [5] 卢立新,周德志.基于疲劳损伤理论的果品振动损伤模型表征[J].农业工程学报,2009,11:341-344
LU Li-xin, ZHOU De-zhi. Model for vibration-cumulative bruising of fruit based on fatigue damage theory [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 11: 341-344
- [6] 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]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 2007
- [7] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2001
LI He-sheng. Plant physiology and biochemistry test principles and techniques [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001
- [8] Bao-gang Wang, Jian-hui Wang, Xiao-yuan Feng, et al. Effects of 1-MCP and exogenous ethylene on fruit ripening and antioxidants in stored mango [J]. Plant Growth Regulation, 2009, 57(2): 185-192
- [9] Silvia Minoia, Adnane Boualem, Fabien Marcel, et al. Induced mutations in tomato *SExp1* alter cell wall metabolism and delay fruit softening [J]. Plant Science, 2016, 242: 195-202
- [10] Reinhard Korbinian Proels, Ralph Hückelhoven. Cell-wall invertases, key enzymes in the modulation of plant metabolism during defence responses [J]. Molecular Plant Pathology, 2014, 15(8): 858-864
- [11] Amer Eissa A H. Comparison of package cushioning materials to protect vibration damage to golden delicious apples [J]. Latest Trends in Agriculture & Food Sciences, 2012, 3(2): 36-57
- [12] 解静.1-MCP 对番茄冷害及机械损伤的影响[D].杭州:浙江大学,2010
XIE Jing. Effect of 1-Methylcyclopropene on chilling injury and mechanical damage of tomato fruit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010
- [13] Soumya V Menon, T V Ramana Rao. Health-promoting components and related enzyme activities of muskmelon fruit during its development and ripening [J]. Journal of Food Biochemistry, 2014, 38(4): 415-423
- [14] Yu-fei Sun, Pei Chen, Chao-rui Duan, et al. Transcriptional regulation of genes encoding key enzymes of abscisic acid metabolism during melon(*Cucumis melo* L.) fruit development and ripening [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2013, 32(2): 233-244
- [15] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果采后软化生理的影响[J].食品研究与开发,2008,29(5):132-135
WANG Yan-ying, HU Wen-zhong, PANG Kun, et al. Effects of mechanical damage on postharvest softening physiology of

- Fuji apples [J]. Food Research and Development, 2008, 29(5): 132-135
- [16] 周然. 黄花梨运输振动损伤与冷藏品质变化的试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007
- ZHOU Ran. Studies on the quality changes of huanghua pears during transport and storage [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007

现代食品科技