

# 模拟不同等级道路运输振动对哈密瓜软化和果胶降解的影响

周 然<sup>1,2</sup>, 吴 琼<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 农业农村部冷库及制冷设备质量监督检验测试中心(上海), 上海 201306)

**摘 要:**为了研究长距离运输过程中不同等级道路的振动对哈密瓜贮藏品质的影响, 试验模拟半挂车在三级公路、二级公路、一级公路以及高速公路的运输振动环境, 比较经不同道路振动处理与未经振动处理哈密瓜在 23 ℃(室温)贮藏期间(28 d), 硬度、水溶性果胶、共价型果胶、离子结合型果胶, 多聚半乳糖醛酸酶、果胶酯酶的变化情况。结果表明, 贮藏 28 d 时, 不同等级道路振动后的哈密瓜的硬度、共价型果胶以及离子结合型果胶含量均低于对照组, 而水溶性果胶含量、多聚半乳糖醛酸酶、果胶酯酶的活性均高于对照组, 其中三级公路及二级公路较高速公路和一级公路对哈密瓜细胞壁影响更为显著, 说明振动会加快哈密瓜贮藏期间果胶的降解, 加速哈密瓜的生理软化。

**关键词:** 运输振动; 哈密瓜; 硬度; 果胶

**中图分类号:** TS255.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-1524(2018)11-1832-07

## Effect of different levels of road transport vibration on softening and pectin degradation of Hami melons during storage

ZHOU Ran<sup>1,2</sup>, WU Qiong<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment (Shanghai), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to study the effect of vibration on storage quality of Hami melons (*Cucumis melo* var. *saccharinus*) in different grades of road during storage, the effect of semi-trailer on highway, arterial roads (ARs), secondary roads (SRs), and tertiary roads (TRs) were simulated, and the hardness, water-soluble pectin content, CDTA-soluble pectin content, sodium carbonated-soluble pectin content, polygalacturonase (PG) activity and pectin esterase (PE) activity of Hami melons in different road vibration treatments during storage at room temperature (23 ℃) were compared. The results showed that the hardness, pectin substance and activity of enzymes related to pectin degradation of Hami melon were lower than those of the control group at 28 days after storage, while water-soluble pectin content, PG and PE activities were higher than those of the control group, and the influence of the TRs, the SRs and ARs on the cell wall of Hami melon was more significant, which indicated that vibration accelerated the degradation of pectin during storage and physiological softening of Hami melon, destructed the integrity of cell wall, and ultimately accelerated the aging of melon.

**Key words:** transport vibration; Hami melons; hardness; pectin

收稿日期: 2016-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(31201439); 上海高校一流学科建设项目(B-5005-13-0002-4); 上海市科委工程中心建设项目(11DZ2280300); 上海海洋大学优秀青年学科骨干培养计划(海鸥计划)

作者简介: 周然(1977—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 研究方向为冷链物流。E-mail: rzhou@shou.edu.cn

商业运输中,公路运输是最重要的一种运输方式,其中,运输易腐货物时最常用的是卡车运输<sup>[1]</sup>。在中国,哈密瓜、猕猴桃和梨等多采用卡车运输,但由于冷链运输体系的不完善<sup>[2]</sup>,运输过程中振动胁迫会导致运输货物产生损伤,引起货架期短、腐烂率高的现象,造成巨大的经济损失。

哈密瓜(*Cucumis melo* var. *saccharinus*)源自新疆,果肉清香爽口、脆嫩多汁,倍受消费者喜爱,但是上海、北京等地也成为哈密瓜除在新疆以外的主要销售地<sup>[3]</sup>。为了消除地域限制<sup>[4]</sup>,取得更好的经济效益,需将哈密瓜从原产地输送至上述销售地。而长距离的运输及振动胁迫会促进哈密瓜的呼吸作用,加速果实老熟、腐烂,进而造成巨大经济损失。康维民等<sup>[5]</sup>研究发现,梨所受到的机械损伤随着振动加速度的增加以及振动频率的减小而严重。Jarimopas 等<sup>[1]</sup>研究橘子在道路上运输时发现土路、水泥路、沥青路使橘子受到机械损伤的程度依次降低,而对橘子的伤害与运输速度呈正比。曾媛媛等<sup>[6]</sup>初步研究了长途运输对哈密瓜贮藏品质的影响,发现运输振动能够加速哈密瓜的生理生化反应进而加快哈密瓜成熟衰老。但不同道路对哈密瓜生理软化及细胞壁的影响暂无报道。因此本研究以哈密瓜为材料,研究不同振动对果实贮藏过程中生理软化及细胞壁代谢的影响,以期为寻找降低振动对哈密瓜品质损伤的方法提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

半挂车:华俊牌,吨位 20 t,装载量 12.7 t。运输总路程约 800 km。运输过程中,半挂车的车厢后部安有一个加速度传感器,距车厢后板的距离为 1 m。运输过程中每隔 3 min 收集振动数据。运输结束后拆下测试装备并将数据导入电脑,通过软件处理,得到一个加速度频谱图。

本试验模拟设置 4 种等级公路,分别为高速公路、一级公路、二级公路及三级公路,采用上述方法得到对应 61~90 km·h<sup>-1</sup>速度下的功率谱密度图(图 1),再将谱图导入 MPA408/LS444M

振动台试验系统(北京航天希尔测试技术有限公司),利用振动台模拟公路运输振动。

### 1.2 设备

MPA408/LS444M 振动台试验系统(北京航天希尔测试技术有限公司);UV2100 可见紫外分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司);TA-XT plus 型物性仪(Stable Micro System 公司)。

### 1.3 材料处理

哈密瓜采自上海浦东水果园,选用大小、颜色且成熟度(根据果农建议及颜色外观判断,选择适合长途运输的八成熟哈密瓜)一致,无机械损伤和病虫害感染的哈密瓜用于试验。采购来的哈密瓜在运输过程中,用塑料网托包好装进纸箱。对试验用的哈密瓜采用如下分组:一组不作任何处理,为对照组;另一组为振动处理组,哈密瓜被放置在振动台上,模拟在高速公路、一级公路、二级公路和三级公路 4 种等级公路运输条件下振动 15 h,振动结束后,哈密瓜于 23 ℃(室温)下贮藏,每隔 7 d 测定一次指标,共测 28 d。

### 1.4 测定方法

#### 1.4.1 硬度

参考秦宗权等<sup>[7]</sup>的方法略作修改。取 10 等份 3 cm 厚的赤道处哈密瓜(每组取 3 个哈密瓜),用 TA-XT plus 型物性质构仪测定每份中心点的硬度,即每个哈密瓜测定 10 次,选择直径 6 mm 柱形探头,测定速度为 5 mm·s<sup>-1</sup>,触发力为 25 g。

#### 1.4.2 果胶类物质的提取、分离

参考 Fishman 等<sup>[8]</sup>和 Brummell 等<sup>[9]</sup>的方法。分别提取水溶性果胶、离子结合型果胶、共价型果胶,其中果胶含量用硫酸咔唑法测定,显色条件为在 1.0 mL 滤液中,加入 0.25 mL 0.1% 咔唑-无水乙醇溶液,迅速加入 5.0 mL 硫酸,在 85 ℃ 水浴中加热 20 min,自来水浴中冷却,显色后 1.5 h 内在 525 nm 波长条件下测定,含量表示为 mg·g<sup>-1</sup>。

#### 1.4.3 果胶降解相关酶活性

参考 Zhou 等<sup>[10]</sup>的方法。多聚半乳糖醛酸酶(PG)的测定:取 20 g 哈密瓜果肉,加入 40 mL 含 0.015 g CDTA,1.169 g NaCl,2 g PVP 的 pH 7.0 磷酸缓冲溶液,冰浴研磨,抽滤所得上清液即 PG

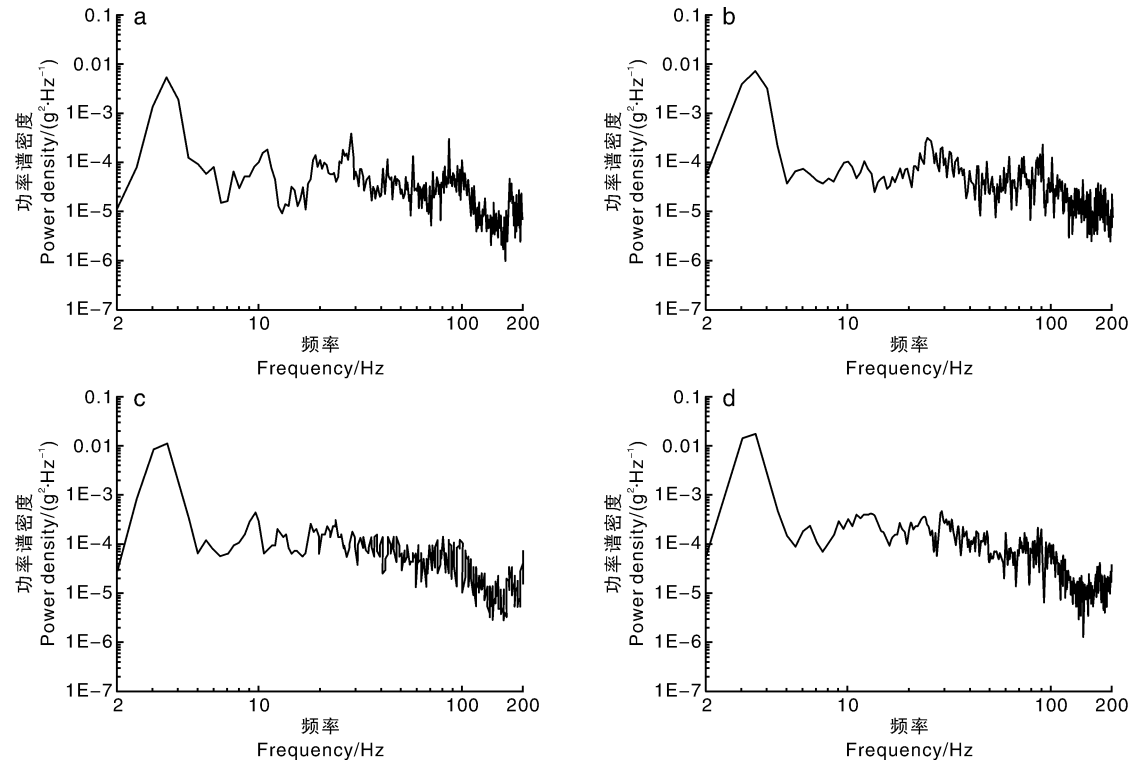


图1 高速公路(a)、一级公路(b)、二级公路(c)、三级公路(d)四种等级公路在61~90 km·h<sup>-1</sup>速度下行驶15 h的功率谱密度图

Fig.1 Power special density levels of the normal load truck during transport at the speed of 61 ~ 90 km·h<sup>-1</sup> for 15 h on highways(a), ARs(b), SRs(c), and TRs(d)

提取液。PG 活性测定,取 0.1 mL 酶提取液,加入 0.5 mL 0.2 mol·L<sup>-1</sup> 乙酸缓冲液(pH 4.5)和 0.5 mL 果胶(1%),37 ℃ 恒温水浴 1 h,再加入 0.7 mL DNS 显色液,沸水浴中显色 5 min 后,先冷却再加入 10 mL 蒸馏水,于 540 nm 下测定其吸光值,空白对照采用灭活过的酶提取液。根据半乳糖醛酸标准曲线计算生成半乳糖醛酸量,以 37 ℃ 下每分钟催化生成 1 μmol 还原糖基团所需的酶量为一个酶活力单位。果胶酯酶(PE)的测定:取 10 g 哈密瓜果肉浆与 10 mL pH 8.0,0.5 mol·L<sup>-1</sup> Tris-HCl(含 1 mmol·L<sup>-1</sup> CDTA,5% PVP,2 mol·L<sup>-1</sup> NaCl)溶液混和,得到浓度为 1% 的果胶溶液。取 10 mL 事先在沸水中钝化的酶液(pH 7.0),检测样加入 10 mL 酶液(pH 7.0)。于 30 ℃ 水浴保温,每隔一段时间加 0.01 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 溶液,以维持 pH 环境不变。30 min 内所加的 NaOH 当量数就是酶作用后释放出游离羧基的当量数。用牛血清蛋白测定粗酶液中蛋

白含量<sup>[3]</sup>。

1.5 数据处理

试验指标重复测定 3 次,数据差异性利用软件 SPSS 20.0 中的 Duncan 法进行方差分析、显著性水平分析等多重比较,同时使用 Origin Pro V8.6 绘制曲线。

2 结果与分析

2.1 振动处理对哈密瓜硬度的影响

果实硬度是反映果实质地的重要指标,果实软化的重要表现就是果实的硬度下降,也是反映果实成熟衰老的重要指标之一<sup>[11]</sup>。图 2 显示,哈密瓜硬度随着贮藏时间的延长而降低,而硬度变化呈现先快速下降后缓慢下降的趋势,这说明哈密瓜在贮藏的过程中,随着贮藏时间的延长,果实不断成熟软化。而从图 2 中也可以看出,振动处理组的下降趋势均较对照组明显,在 28 d 时,

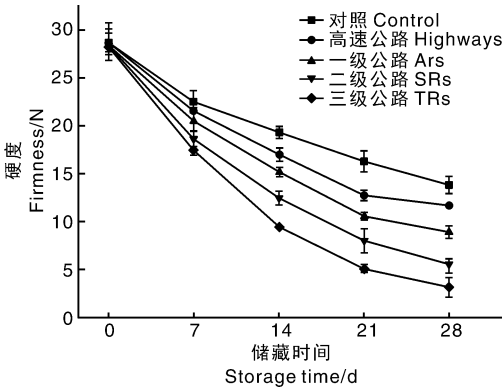


图2 振动处理对哈密瓜硬度的影响  
Fig.2 Effect of vibration treatment on firmness of Hami melon

经高速公路、一级公路、二级公路、三级公路振动处理的哈密瓜硬度分别是对照组的 1.17、1.56、2.81、4.11 倍 ( $P < 0.05$ ), 这说明运输振动影响哈密瓜在贮藏过程中的硬度, 加速生理软化, 降低哈密瓜的新鲜程度, 其中三级公路更能加速果实软化。

2.2 振动处理对哈密瓜果胶类物质的影响

2.2.1 水溶性果胶

由图 3-a 可见, 哈密瓜在贮藏的过程中, 水溶性果胶含量逐渐增加, 这说明哈密瓜随着贮藏时间的增加, 原果胶不断降解为可溶性果胶, 果实不断成熟, 这与硬度的变化趋势一致。而在贮藏 7 d 后, 振动处理组哈密瓜的水溶性果胶较对照组显著上升, 在 28 d 时, 高速公路、一级公路、二级公路、三级公路运输振动处理的果实水溶性果胶含量分别是对照组的 1.15、1.23、1.41、1.52 倍 ( $P < 0.05$ ), 运输振动能够显著促进果实成熟, 且二级公路及三级公路较高速公路及一级公路更为显著 ( $P < 0.05$ )。

2.2.2 共价结合型果胶

共价结合型果胶是通过共价酯键与其他细胞壁多糖连接, 存在于整个初生细胞壁。由图 3-b 可知, 在贮藏过程中, 其含量逐渐降低, 且在 7 d 后振动处理组较对照组的共价结合型果胶显著降低 ( $P < 0.05$ ), 贮藏 28 d 时, 高速公路、一级公路、二级公路、三级公路运输振动处理的果实共价结合型果胶含量分别是对照组的 2.18、3.13、3.41、5.16 倍 ( $P < 0.05$ ), 其中三级公路运输振动的破坏作用最为显著 ( $P < 0.05$ )。

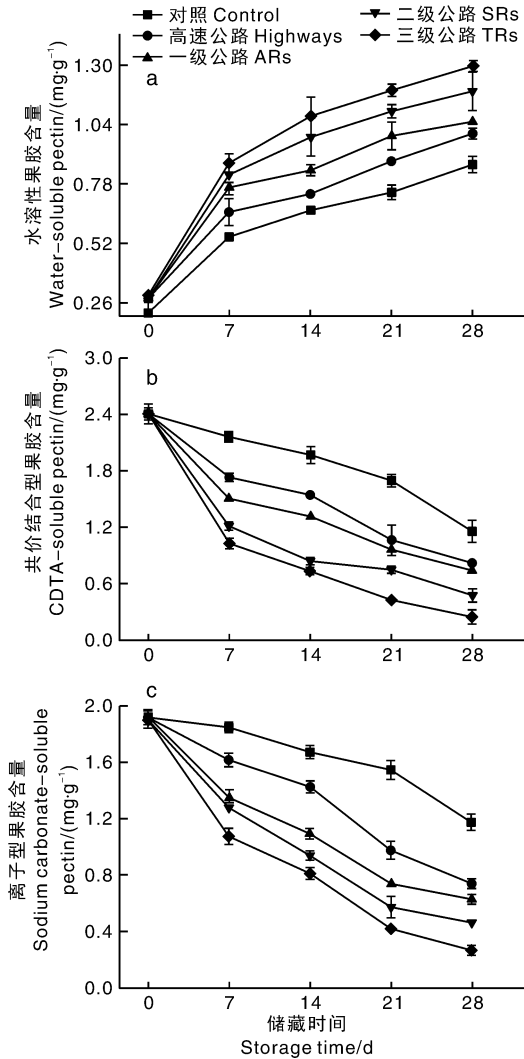


图3 振动处理对哈密瓜水溶性果胶(a)、共价结合型果胶(b)、离子型果胶(c)含量的影响  
Fig.3 Effect of vibration treatment on water-soluble pectin (a), CDTA-soluble pectin (b), and carbonated-soluble pectin (c) content of Hami melon

2.2.3 离子型果胶

离子型果胶主要是由离子交联型果胶组成, 主要存在于中胶层。由图 3-c 可知, 在贮藏过程中, 其含量逐渐降低, 且在 7 d 后振动处理组较对照组的离子型果胶显著降低 ( $P < 0.05$ ), 贮藏 28 d 时, 高速公路、一级公路、二级公路、三级公路运输振动处理的果实离子型果胶含量分别是对照组的 1.91、2.83、3.47、5.41 倍 ( $P < 0.05$ ), 三级公路运输振动的破坏作用最为显著 ( $P < 0.05$ )。

2.3 振动处理对哈密瓜果胶降解相关酶活性的影响

2.3.1 多聚半乳糖醛酸酶

由图4-a可知,哈密瓜果实的PG活性在贮藏过程中逐渐升高。在贮藏7d后,经振动处理后的哈密瓜PG均维持较高的活性,且显著高于对照组( $P < 0.05$ )。在贮藏28d时,高速公路、一级公路、二级公路运输振动处理的果实离子型果胶含量分别是对照组的1.30、1.41、1.60、2.02倍。

2.3.2 果胶酯酶

由图4-b可知,哈密瓜果实PE活性在贮藏过程中活性先上升,达到一个最大值后再逐渐下降。在贮藏7d后,经振动处理后的哈密瓜PE均维持较高的活性,且显著高于对照组( $P < 0.05$ )。在贮藏28d时,高速公路、一级公路、二级公路运输振动处理的果实离子型果胶含量分别是对照组的1.11、1.21、1.32、1.43倍( $P < 0.05$ )。

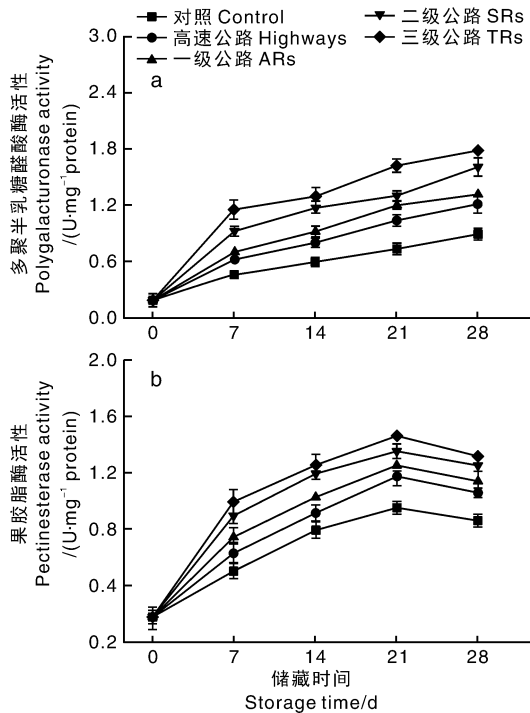


图4 振动处理对哈密瓜对多聚半乳糖醛酸酶(a)和果胶酯酶(b)活性的影响

Fig.4 Effect of vibration treatments on polygalacturonase (a) and pectinesterase (b) activity of Hami melon

3 讨论

果实软化的主要机制是果肉细胞胞间果胶

质降解,细胞相互分离<sup>[11]</sup>。在果实成熟过程中,原果胶不断降解为可溶性果胶,细胞结构也随之受损,胞间层电子密度降低,并且随着微纤维丝间果胶和纤维素物质的溶解<sup>[12]</sup>,微纤维丝结构变得松弛而软化<sup>[13]</sup>,细胞壁变薄,大量细胞壁结构消失,细胞变圆且趋于分散,果肉硬度随之下降<sup>[14]</sup>。本试验发现,哈密瓜在贮藏的过程中,硬度逐渐下降,说明果实逐渐软化成熟。而运输振动会显著促进哈密瓜的生理软化( $P < 0.05$ ),其中以三级公路对其促进最为显著( $P < 0.05$ )。此外,从图3可以发现,水溶性果胶随着贮藏时间的增加而逐渐增加,而离子型果胶和共价结合型果胶逐渐降低,这是因为,伴随着果实成熟软化,原果胶降解成可溶性果胶,水溶性果胶含量在贮藏的过程中逐渐增加<sup>[15-17]</sup>;离子型果胶和共价结合型果胶逐渐降解,从而使初生壁解体<sup>[18]</sup>,细胞间的黏合力降低<sup>[19]</sup>,细胞分区消失而失去膨压,造成细胞黏度和果实硬度下降,最终导致果实的软化<sup>[20]</sup>。这些结果充分表明了果胶的降解与果实的成熟软化有着密切的联系。

而从图4中可以发现,哈密瓜在贮藏的过程中,多聚半乳糖醛酸酶逐渐上升,果胶酯酶在21d有峰值。细胞壁的降解是哈密瓜果实软化和品质改变的主要因素,而与细胞壁降解相关的因素即为与细胞壁降解相关的酶类<sup>[21-22]</sup>。果蔬细胞壁成分果胶的分解主要原因是多聚半乳糖醛酸酶和果胶酯酶一起作用的结果<sup>[23]</sup>,果胶的甲氧基基团由于果胶酯酶的作用而被脱去,而多聚半乳糖醛酸酶则以果胶酯酶发生作用的产物为底物,多聚半乳糖醛酸中的 $\alpha$ -1,4-D-半乳糖苷键以及果胶分子被分解为小分子物质<sup>[24-26]</sup>。一般认为多聚半乳糖醛酸酶降解甲氧基果胶的活性比降解脱甲氧基果胶活性小<sup>[27]</sup>,因此果胶酯酶影响多聚半乳糖醛酸酶对细胞壁的果胶物质敏感程度。在贮藏的过程中,多聚半乳糖醛酸酶及果胶酯酶均呈现上述的趋势,这说明哈密瓜在贮藏的过程中,酶活性不断增加,细胞生理生化反应不断加快,从而促使不溶性果胶逐渐分解为水溶性果胶,进而促使哈密瓜细胞壁变薄、原生质层消失、细胞壁的黏着度消失,果实细胞成熟软化。

而在运输过程中,果蔬与包装箱或者果蔬之间交互的接触部分会承受各种压力,如挤压、摩

擦、碰撞、冲击等。当损害果蔬的这些作用力相对强度比较高时,果蔬会受平浅形表面损伤,且会因为外力的反复作用,果蔬细胞间的连接力与细胞间的强度会发生变化,导致脆性或塑性损伤,使其变软<sup>[4,28]</sup>。本研究结果发现,哈密瓜经运输振动处理后,硬度下降速度较对照组显著加快,而硬度是反映果实质地的主要指标之一,进而表明振动处理会加速果实软化。而果实软化与细胞壁有关,细胞壁中的主要成分有果胶、纤维素、半纤维素等。而哈密瓜在贮藏的过程中,细胞壁中重要的结构物质果胶逐渐由不溶性的原果胶降解成可溶性果胶,运输振动会促进哈密瓜的生理生化反应,酶活性升高,从而促进原果胶降解,加快果实成熟软化。而通过试验数据可以推测,三级公路模拟振动的频率与哈密瓜的固有频率最相近,对哈密瓜的品质影响最大。所以在哈密瓜的运输过程中,为保障哈密瓜品质应该避免选择三级公路进行货运,在每个哈密瓜外部套一个网套减少机械损伤,或者使用一些化学的保鲜方法。同时,通过此试验结果可以发现,不同道路的运输振动会不同程度地促进哈密瓜的成熟软化,这说明可以通过控制运输振动的强度及时间来控制哈密瓜成熟度,是今后研究哈密瓜物理催熟的方向。

## 参考文献 (References):

- JARIMOPAS B, SINGH S P, SAENGNI W. Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit[J]. *Packaging Technology and Science*, 2005, 18(4): 179–188.
- 张娜娜,马丽,张辉,等. 壳聚糖-改性纳米 SiO<sub>2</sub> 复合涂膜对沪产哈密瓜生理生化品质影响的研究[J]. *核农学报*, 2014, 28(11): 2031–2037.  
ZHANG N N, MA L, ZHANG H, et al. Research on the effect of chitosan modified nano-SiO<sub>2</sub> composite coating on physiological and biochemical quality of Hami melon produced in Shanghai [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(11): 2031–2037. (in Chinese with English abstract)
- 周然,王锡昌,谢晶,等. 热水结合果蜡处理抑制振动引起哈密瓜衰老的机理[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 318–324.  
ZHOU R, WANG X C, XIE J, et al. Effects of combination of hot water and shellac on reducing ripening changes in Hami melons (*Cucumis melo* var. *saccharinus*) induced by transport vibration and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24): 318–324. (in Chinese with English abstract)
- 周任佳,乔勇进,王海宏,等. 高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响[J]. *核农学报*, 2012, 26(2): 300–305+323.  
ZHOU R J, QIAO Y J, WANG H H, et al. Effect of high-energy electron beam irradiation on physiological quality of fresh-cut Hami melon[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(2): 300–305+323. (in Chinese with English abstract)
- 康维民,肖念新,蔡金星,等. 稳定振动条件下梨的振动损伤研究[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(3): 105–108.  
KANG W M, XIAO N X, CAI J X, et al. Study on pear scathe under stationary vibration condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(3): 105–108. (in Chinese with English abstract)
- 曾媛媛,王锡昌,周然,等. 运输振动对哈密瓜贮藏品质的影响[J]. *食品与机械*, 2016(3): 141–144+148.  
ZENG Y Y, WANG X C, ZHOU R, et al. Effects of transport vibration on storage quality of Hami melon[J]. *Food & Machinery*, 2016(3): 141–144+148. (in Chinese with English abstract)
- 秦宗权,沈文彬,刘峰娟,等. 热水处理对哈密瓜采后品质影响的研究[J]. *食品工业*, 2011(5): 23–26.  
QIN Z Q, SHEN A B, LIU F J, et al. Effects of hot water treatment on quality of Hami melon[J]. *Food Industry*, 2011(5): 23–26. (in Chinese with English abstract)
- FISHMAN M L, LEVAJ B, GILLESPIE D, et al. Changes in the physico-chemical properties of peach fruit pectin during on-tree ripening and storage[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1993, 118(3): 343–349.
- BRUMMELL D A, CIN V D, CRISOSTO C H, et al. Cell wall metabolism during maturation, ripening and senescence of peach fruit[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(405): 2029–2039.
- ZHOU R, SU S Q, YAN L P, et al. Effect of transport vibration levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Huanghua) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(1): 20–28.
- CHEN F, ZHANG L, AN H, et al. The nanostructure of hemicellulose of crisp and soft Chinese cherry (*Prunus pseudocerasus* L.) cultivars at different stages of ripeness[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(1): 125–130.
- CHENG G, DUAN X, JIANG Y, et al. Modification of hemicellulose polysaccharides during ripening of postharvest banana fruit[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(1): 43–47.

- [13] CONFORTI F D, ZINCK J B. Hydrocolloid-lipid coating affect on weight loss, pectin content, and textural quality of green bell peppers[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(4):1360–1363.
- [14] 张鹏龙,陈复生,杨宏顺,等. 果实成熟软化过程中细胞壁降解研究进展[J]. 食品科技,2010(11):62–66.  
ZHANG P L, CHEN F S, YANG H S, et al. Research advances on cell wall disassembly in fruit ripening and softening[J]. *Food Science and Technology*, 2010(11):62–66. (in Chinese with English abstract)
- [15] GWANPUA S G, BUGGENHOUT S V, VERLINDEN B E, et al. Pectin modifications and the role of pectin-degrading enzymes during postharvest softening of Jonagold apples[J]. *Food Chemistry*, 2014, 158(9):283–291.
- [16] CHRISTIAENS S, BUGGENHOUT S V, VANDEVENNE E, et al. Towards a better understanding of the pectin structure-function relationship in broccoli during processing: Part II: analyses with anti-pectin antibodies[J]. *Food Research International*, 2011, 44(9):2896–2906.
- [17] 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 Y F, LIN H T, WANG J, 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*, 2014, 30(11):268–275. (in Chinese with English abstract)
- [18] STANLEY J, PRAKASH R, MARSHALL R, et al. Effect of harvest maturity and cold storage on correlations between fruit properties during ripening of apricot (*Prunus armeniaca*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 82:39–50.
- [19] REDGWELL R J, MACRAE E, HALLETT I, et al. *In vivo* and *in vitro* swelling of cell walls during fruit ripening[J]. *Planta*, 1997, 203(2):162–173.
- [20] 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 R. Studies on the quality changes of Huanghua pears during transport and storage[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [21] RAZZAQ K, KHAN A S, MALIK A U, et al. Role of putrescine in regulating fruit softening and antioxidative enzyme systems in ‘Samar Bahisht Chaunsa’ mango[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 96:23–32.
- [22] YASHODA H M, PRABHA T N, THARANATHAN R N. Mango ripening-role of car-bohydases in tissue softening[J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(3):691–698.
- [23] SINGH A P, PANDEY S P, RAJLUXMI, et al. Transcriptional activation of a pectate lyase gene, RbPel1, during petal abscission in rose[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 60(2):143–148.
- [24] YUAN L, BI Y, GE Y H, et al. Postharvest hot water dipping reduces decay by inducing disease resistance and maintaining firmness in muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 161(2):101–110.
- [25] FAGUNDES C, PALOU L, MONTEIRO A R, et al. Effect of antifungal hydroxypropyl methylcellulose-beeswax edible coatings on gray mold development and quality attributes of cold-stored cherry tomato fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 92(2):1–8.
- [26] DONG T, XIA R, WANG M, et al. Changes in dietary fibre, polygalacturonase, cellulase of navel orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck ‘Cara Cara’) fruits under different storage conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(4):414–420.
- [27] LOHANI S, TRIVEDI P K, NATH P. Changes in activities of cell wall hydrolases during ethylene-induced ripening in banana: effect of 1-MCP, ABA and IAA[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 31(2):119–126.
- [28] CHONHENCHOB V, SINGH S P. Packaging performance comparison for distribution and export of papaya fruit[J]. *Packaging Technology and Science*, 2005, 18(3):125–131.

(责任编辑 张 韵)