

## 猕猴桃电商包装随机振动响应及果品损伤研究

孙一鸣<sup>1</sup>, 马先润<sup>1</sup>, 张立军<sup>1</sup>, 吴子鸣<sup>1</sup>, 吴映桐<sup>1</sup>, 王立军<sup>1,2</sup>, 宋海燕<sup>1,2\*</sup>

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2.中国轻工业食品包装材料与技术重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** **目的** 研究猕猴桃在5种不同电商包装形式内的振动响应和损伤情况, 为猕猴桃电商包装提供理论基础和科学指导。**方法** 以“红阳”猕猴桃为研究对象, 对目前市场常见的5种形式的猕猴桃电商包装(EPE衬垫、EPS衬垫、PET带盖托盘、瓦楞隔板和EPE网套)分别进行扫频振动和随机振动试验研究, 获得各包装内猕猴桃的共振频率、振动传递率、果品损伤面积、硬度、质量损失率、可溶性固形物含量等参数, 分析包装形式对猕猴桃果实振动响应和振后损伤的影响。**结果** PET带盖托盘和EPE网套包装下猕猴桃的共振频率较小, 在20~30 Hz, 处于公路运输振动范围内, 易发生共振受损。瓦楞隔板包装的猕猴桃共振频率最大, 在50~75 Hz内, 受到的振动能量较低。5种包装下猕猴桃的振动传递率从大到小为EPE网套、EPE衬垫、瓦楞隔板、EPS衬垫、PET带盖托盘, PET带盖托盘包装的振动传递率最低, 为1.68, 隔振效果最好; EPE网套和EPE衬垫包装的振动传递率较高, 为3.16~3.72, 隔振效果较差。振后24 h果实硬度下降了13.5%~48.7%、软化率提高了9.0%~40.4%、质量损失率提高了6.7%~100.0%、可溶性固形物含量(SCC)提高了3.2%~15.0%、损伤面积为981~6 931 mm<sup>2</sup>。**结论** 5种包装中PET带盖托盘包装对果实的保护效果最佳, 瓦楞隔板和EPE网套包装的保护效果较差。

**关键词:** 猕猴桃; 电商包装形式; 振动响应; 振动损伤; 生理特性

**中图分类号:** TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0067-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.009

## Random Vibration Response and Damage of Kiwifruit E-commerce Packaging

SUN Yi-ming<sup>1</sup>, MA Xian-run<sup>1</sup>, ZHANG Li-jun<sup>1</sup>, WU Zi-ming<sup>1</sup>, WU Ying-tong<sup>1</sup>,  
WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, SONG Hai-yan<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Food Packaging Materials and Technology of China Light Industry, Tianjin 300457, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the vibration response and damage of kiwifruit in five different packaging forms, so as to provide theoretical basis and scientific guidance for the e-commerce packaging of kiwifruit. "Hongyang" kiwifruit was taken as the research object, and the five forms of kiwifruit e-commerce packaging (EPE liner, EPS liner, PET capped tray, corrugated separator and EPE net) commonly used in the current market were studied by sweep frequency vibration and random vibration tests. The parameters such as resonance frequency, vibration transmission rate, damage area, hardness, weight loss rate and soluble solids content (SSC) were obtained, and the effects of packaging form on the vibration response and post-vibration damage of kiwifruit were analyzed. The results showed that the resonance frequency of kiwifruit in PET capped tray and EPE net was small, which was 20 ~ 30 Hz and within the vibration range of road transportation, such packaging was prone to resonance damage. The resonance frequency of kiwifruit packaged in corrugated separator was the largest, and the vibration energy was lower in the range of 50 ~ 75 Hz. The vibration transmission rate of kiwifruit

under five kinds of packaging was: EPE net > EPE liner > corrugated separator > EPS liner > PET capped tray. The vibration transmission rate of PET capped tray packaging was the lowest, which was 1.68, and the vibration isolation effect was the best. The vibration transmission rate of EPE net and EPE liner packaging was higher, which was 3.16 ~ 3.72, and the vibration isolation effect was poor. Within 24 h after vibration, the fruit hardness decreased by 13.5% ~ 48.7%, softening rate increased by 9.0 ~ 40.4%, weight loss rate increased by 6.7% ~ 100.0%, SCC increased by 3.2%~15%, and damage area was 981 ~ 6 931 mm<sup>2</sup>. Among five kinds of packaging, the PET capped tray has the best protection effect on fruit, and corrugated separator and EPE net are poor in protection effect.

**KEY WORDS:** "Hongyang" kiwifruit; e-commerce packaging; vibration response; vibration damage; physiological characteristics

猕猴桃是一种口感酸甜、老少皆宜、深受消费者喜欢的水果,是人体维生素 C、膳食纤维、钾和维生素 E 的优质来源<sup>[1-2]</sup>。因为猕猴桃为呼吸跃变型果实,采摘后果实硬度下降迅速,在运输过程中极易受到机械损伤,造成经济损失<sup>[3]</sup>。所以研究猕猴桃在电商包装中的振动响应和损伤状况是非常有必要的。

当前,在果品电商包装和机械损伤领域,已有较多研究。在探究不同包装材料对水果机械损伤的影响方面,王妮睿等<sup>[4]</sup>通过比较 PET 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 衬垫、聚苯乙烯 (Expanded Polystyrene, EPS) 衬垫和纸屑衬垫包装的振动传递率及振动后果实受损程度,发现纸屑衬垫的缓振效果最好,并发现包装缓冲结构是猕猴桃表面损伤指数和振动传递率最大的影响因子;夏铭等<sup>[5]</sup>通过随机振动试验,比较 EPS 衬垫、聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC) 衬垫和自制的珍珠棉衬垫包装的保护效果,发现减振包装能显著减少猕猴桃损伤和延缓果实衰老,并发现珍珠棉衬垫对减少猕猴桃果实损伤和延缓果实衰老的效果最优;薛洁等<sup>[6]</sup>采用单层珍珠棉衬垫、单层 PVC 蛋托和双层珍珠棉衬垫分别包装猕猴桃进行长距离运输,分析运输后的果实货架品质,发现双层珍珠棉衬垫包装减振效果最优,可以有效延缓猕猴桃运输后的品质劣变。目前大多研究所采用的包装形式不够具有代表性,研究结果缺乏指导意义,对各种包装的振动特性和包装内果实的振动响应缺少科学分析。

在研究振动加速度、振动频率、振动时间等因素对果实运输后货架品质的影响方面,康维民等<sup>[7]</sup>研究了塑料包装箱盛装的梨的各方向振动加速度传递率,发现顶层塑料箱在左右、前后方向受到的加速度传递

率远大于上下方向的,并且在相同加速度条件下,振动频率越小,梨越容易产生损伤;谢丹丹等<sup>[8]</sup>采用 5、10 和 20 Hz 这 3 种振动频率模拟了不同运输路况的振动强度,研究猕猴桃果实在振动过程中的生理和品质响应,发现 5~10 Hz 的振动频率对猕猴桃货架品质没有显著影响,但 20 Hz 振动频率能加速猕猴桃货架品质劣变。Lin 等<sup>[9]</sup>通过对成熟桃果实的振动试验发现,在振动后第 1 天,果实瘀伤面积、腐烂率和总酚含量之间存在显著的线性相关性,并得出振动能够立刻影响水果的总酚代谢。但目前在振动对果实品质影响的作用机理、果实生理特性的变化规律方面尚未进行深入的探究。

基于此,本研究通过充分的市场调研,选出 5 种市场常见的猕猴桃电商包装形式:聚乙烯泡沫塑料 (Expandable Polyethylene, EPE) 衬垫、EPS 衬垫、PET 带盖托盘、瓦楞隔板、EPE 网套。以“红阳”猕猴桃为包装对象,进行扫频振动和随机振动试验,分析各种包装内猕猴桃的振动特性及响应,探究不同包装形式对果实生理特性的影响,以期对猕猴桃电商包装提供科学的指导。

## 1 试验

### 1.1 材料

主要材料:“红阳”猕猴桃,质量为 (120±5) g,购自成都市山依湖生态农业开发有限公司,挑选果形端正、大小均匀、无机械损伤的果实作为试验样品。

从电商平台购入 5 种常用的猕猴桃礼盒包装,如图 1 所示,分别为 EPE 衬垫 (P1)、EPS 衬垫 (P2)、PET 带盖托盘 (P3)、瓦楞隔板 (P4)、EPE 网套 (P5)。



图 1 5 组猕猴桃包装形式  
Fig.1 Five groups of kiwifruit packaging form

## 1.2 仪器与设备

主要测试设备: GY-4 型水果硬度计, 艾普计量仪器有限公司; 手持折光仪, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; DC-600-6 振动试验台, 苏州苏试试验仪器有限公司; 电子分析天平, 上海梅特勒托利多有限公司。

## 1.3 振动试验方法

### 1.3.1 扫频振动

1) 根据 ISTA 6-AMAZON.COM 2018 试验方法<sup>[10]</sup>, 设置包装件 3 种摆放方式 (图 2): 正放 (面 3 放在振动台薄表面)、侧放 (面 4 放在振动台薄表面)、竖放 (面 6 放在振动台薄表面)。加速度传感器水平固定在包装内部中间位置和边角位置的果实上, 按照 3 种摆放方式, 分别对 EPE 衬垫 (P1) 包装进行扫频试验, 频率范围为 3~100 Hz, 加速度为 0.5g。

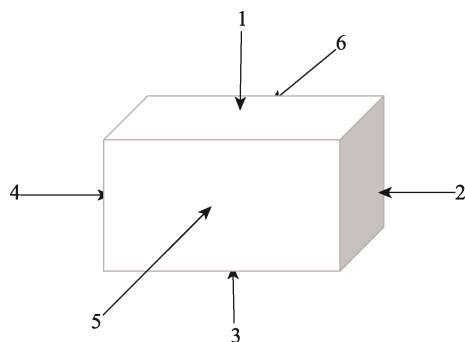


图 2 独立包装件各面示意图  
Fig.2 Schematic diagram of each independent packaging component

2) 根据 ASTM D4169-16 试验方法<sup>[11]</sup>对 5 种不同的电商包装形式进行扫频试验, 频率范围为 3~100 Hz, 加速度为 0.5g。加速度传感器水平固定在包装内部中间位置和边角位置的果实上, 测量果实收到的响应加速度值。

### 1.3.2 随机振动

根据 GB/T 4857.23—2021 试验方法<sup>[12]</sup>进行随机振动试验, 谱型选取标准中的中国公路运输道路谱, 严酷等级 II, 加速度为 0.58g, 振动时间为 180 min。模拟运输距离为 1 080 km, 振动强度为一般水平, 模

拟中国公路电商运输的常见情况, 具有代表性。加速度传感器水平固定在中间位置的猕猴桃果实上, 测量猕猴桃在模拟运输中的振动响应。

设置 6 个试验组: 对照组、EPE 衬垫 (P1)、EPS 衬垫 (P2)、PET 带盖托盘 (P3)、瓦楞隔板 (P4)、EPE 网套 (P5)。对照组的猕猴桃在室温环境下静置, 不进行振动试验, 其他包装根据前述试验方法, 在室温下进行 3 h 的随机振动试验, 模拟电商包装的实际运输情况。振动后对各组猕猴桃果实进行机械损伤面积、质量损失率、硬度、可溶性固形物含量 (SSC) 等生理指标的测量。

## 1.4 水果生理指标测定

### 1.4.1 硬度及软化率

在果实赤道处选取 3 个位置进行去皮测定<sup>[13]</sup>, 使用 GY-4 型硬度计, 探头直径为 7.9 mm, 测定深度为 10 mm, 硬度单位为 kg/cm<sup>2</sup>。取 3 个位置的平均值作为一个试样的硬度值, 每次选取 3 个平行试样进行测量。为直观地表现猕猴桃果实硬度的变化情况, 定义果实软化率<sup>[14]</sup>为果实振动后降低的硬度与振动前硬度的比值。

### 1.4.2 质量损失率

使用电子分析天平测量 3 个平行试样振动前后的质量<sup>[15]</sup>, 定义质量损失率为振动后果实降低的质量与振动前质量的比值。

### 1.4.3 可溶性固形物含量

取果实混合汁液, 滴在手持折光仪平板上, 进行测定<sup>[16]</sup>, 用百分比表示。为直观地表现猕猴桃果实 SSC 的变化情况, 定义果实的 SSC 变化率为果实振动后变化的 SSC 与振动前 SSC 的比值<sup>[17]</sup>。

### 1.4.4 机械损伤面积

随机振动后猕猴桃在室温下放置 24 h, 进行损伤面积的测量。损伤面积采用硫酸纸描绘方法<sup>[18]</sup>进行测量, 如图 3 所示。将透明硫酸纸覆盖于损伤区域, 用铅笔在硫酸纸上绘制损伤轮廓。将绘制好轮廓的硫酸纸放在 1 mm<sup>2</sup> 的方格坐标纸上, 通过损伤轮廓内的方格数量精确计算损伤面积, 单位为 mm<sup>2</sup>。



图 3 猕猴桃损伤面积测量方法  
Fig.3 Kiwifruit damage area measurement method



## 2 结果与讨论

### 2.1 不同摆放方式对 EPE 衬垫 (P1) 包装的猕猴桃振动响应的影响

对 EPE 衬垫中猕猴桃果实的扫频振动响应测量结果如图 4 所示。可以看出, 3 种摆放方式下猕猴桃共振频率的振动传递率较为接近, 在 3.12~3.46, 竖放时振动传递率最高, 侧放时振动传递率最低。不同摆放方式下猕猴桃的共振频率明显不同, 竖放条件下猕猴桃的共振频率最小, 振动传递率最高时频率为 21.3 Hz, 处于公路运输振动频率范围内<sup>[19]</sup>, 可能会出现共振, 在相同振动等级下引起猕猴桃果实损伤较为严重。正放时猕猴桃的共振频率最大, 为 36.7 Hz。造成此现象的原因是包装摆放方式不同时, 包装内的猕猴桃受到振动激励的方向不同, 导致猕猴桃的共振频率出现差异。因此, 在猕猴桃电商物流运输的过程中, 应尽量保持包装正放, 避免包装竖放或侧放, 以避免猕猴桃果实发生共振, 减轻猕猴桃果实的振动损伤。

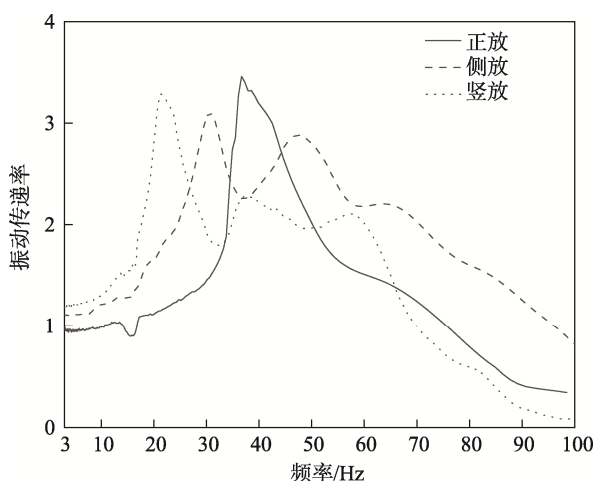


图 4 EPE 衬垫 (P1) 包装在 3 种摆放方式下中间位置猕猴桃的扫频振动响应

Fig.4 Sweep frequency vibration response of kiwifruit in the middle position under three placement modes of P1-EPE liner

### 2.2 包装形式对猕猴桃电商包装振动传递率的影响

将猕猴桃受到的响应加速度与振动台的激励加速度的比值称作振动传递率  $T_r$ , 能更加直观地反映缓冲包装结构对内部猕猴桃的减振保护作用。各包装的振动传递率如图 5 所示。

$$T_r = \frac{a_t}{a_0} \quad (1)$$

式中:  $a_t$  为猕猴桃受到的响应加速度值 ( $g$ );  $a_0$  为振动台的激励加速度值 ( $g$ )。

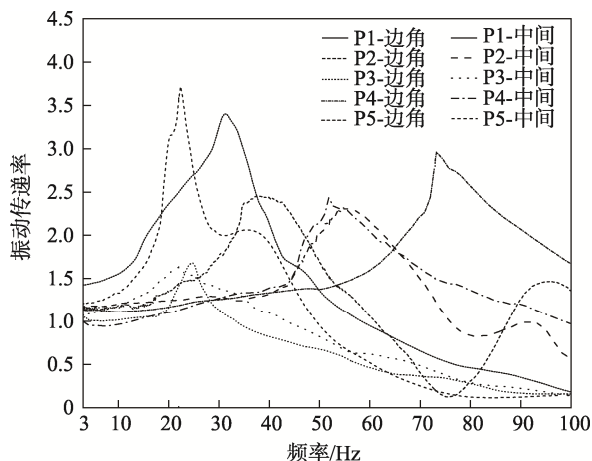


图 5 各电商包装扫频试验下猕猴桃的传递率曲线

Fig.5 Vibration transmission rate of sweep frequency test of each e-commerce packaging

注: P1 为 EPE 衬垫, P2 为 EPS 衬垫, P3 为 PET 带盖托盘, P4 为瓦楞隔板, P5 为 EPE 网套。

由图 5 可知, 不同包装形式下猕猴桃的共振频率有显著差异, 各包装各位置猕猴桃的共振频率总体分布在 22~73 Hz。其中 PET 带盖托盘 (P3) 和 EPE 网套 (P5) 包装共振频率偏小, 在 20~30 Hz 内, 处于公路运输振动频率范围内, 实际运输过程中可能出现共振现象, 应该对这 2 种包装的结构进行优化设计, 适当增大其共振频率, 能够有效减少运输振动中猕猴桃受到的共振损伤。EPE 衬垫 (P1) 和 EPS 衬垫 (P2) 的共振频率偏大, 在 35~60 Hz 内; 瓦楞隔板 (P4) 包装的共振频率最大, 在 50~75 Hz 内。

除 EPS 衬垫 (P2) 外, 各包装边角位置猕猴桃的共振频率较中间位置的偏大。其中 EPE 衬垫 (P1) 和瓦楞隔板 (P4) 包装的边角位置与中间位置共振频率相差较大, 说明其包装整体性较差, 位置差异明显, 应优化改进设计, 增加其包装衬垫的整体性。

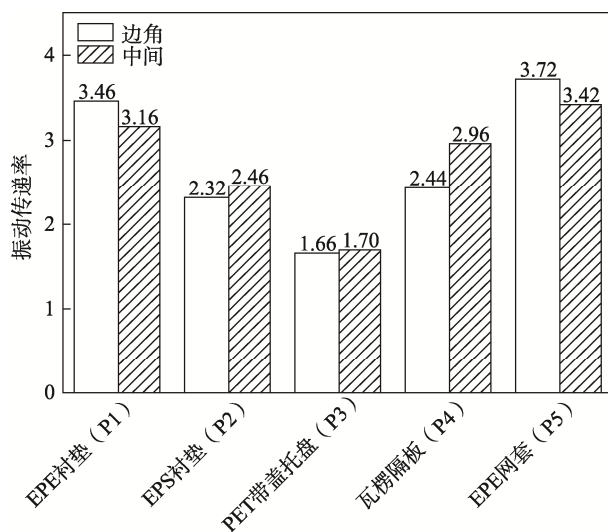


图 6 各电商包装峰值振动传递率  
Fig.6 Maximum vibration transmission rate of each e-commerce packaging

共振频率下各包装形式猕猴桃的峰值振动传递率<sup>[20]</sup>如图6所示。由图6可知,5种包装形式下猕猴桃的振动传递率差异显著,按从大到小排列为EPE网套(P5)、EPE衬垫(P1)>瓦楞隔板(P4)>EPS衬垫(P2)>PET带盖托盘(P3)。PET带盖托盘(P3)包装的振动传递率最低,比其他包装形式低28.4%到55.4%;EPE网套(P5)和EPE衬垫(P1)包装的振动传递率较高,原因是EPE网套(P5)包装不能抑制猕猴桃的跳动现象,EPE衬垫(P1)中猕猴桃底部没有缓冲材料,容易受到冲击。综上可知,PET带盖托盘包装缓振效果最好,EPS衬垫(P2)包装次之,EPE网套(P5)包装缓振效果最差。在包装易损的水果时,应优先选择PET带盖托盘(P3)和EPS衬垫(P2)包装。

### 2.3 不同包装形式对猕猴桃振后果实品质的影响

机械损伤面积可以直观地表现猕猴桃在模拟运输的过程中所受到的振动损伤,能直接影响猕猴桃的经济价值<sup>[21]</sup>。从图7a中可以看出,5种包装的猕猴桃果实振动后24h的损伤情况差异明显,PET带盖托盘(P3)包装的猕猴桃损伤面积最小,为981 mm<sup>2</sup>;瓦楞隔板(P4)和EPE网套(P5)包装的猕猴桃损伤面积较大,分别为6 931 mm<sup>2</sup>和6 524 mm<sup>2</sup>,较PET带盖托盘(P3)包装损伤面积增大了606.5%和565%。造成此现象的原因主要是PET带盖托盘(P3)包装中猕猴桃果实在托盘中不直接与外盒产生作用力,并有上层盖板固定,在振动中极少出现跳动和摩擦的情况,对果实机械损伤的保护效果最佳;瓦楞隔板(P4)和EPE网套(P5)包装对猕猴桃果实的位置固定效果较差,果实在振动过程中极易发生跳动与摩擦,导致出现较多的擦伤和瘀伤,对果实的保护效果较差。该发现与Wang等<sup>[18]</sup>的研究结论相符,果实在包装内的运动空间越大,振动过程中产生的损伤面积越大。在猕猴桃包装设计中应尽量按照果实尺寸设计包装衬垫,减小果实在包装中的活动空间。

质量损失率是衡量猕猴桃果实经济价值的直接指标<sup>[22]</sup>。从图7b中可以看出,各包装内的猕猴桃经过模拟运输之后质量损失率较对照组的有显著增加。振动后24h,各包装的质量损失率比对照组的增加了6.67%~100%;振动后168h,各包装的质量损失率比对照组的增加了7.18%~97.2%。5种包装中,PET带盖托盘(P3)包装对猕猴桃质量损失率的影响最小,振后96h,质量损失率比对照组增加了13.0%;瓦楞隔板(P4)、EPE衬垫(P1)和EPE网套(P5)均对猕猴桃质量损失率的增加有显著影响,振动后96h,比对照组增加了96.7%~116.3%。

说明振动能够加速猕猴桃的呼吸代谢,促进猕猴桃果实内部水分的流失,并加速果实中淀粉和可滴定酸等营养物质的损耗,导致果实质量下降。结果与薛洁<sup>[23]</sup>的试验结论相符合,果实受到振动胁迫时提高呼吸速率导致活性氧自由基增加,进而破坏了细胞膜的完整性。

果实硬度是决定水果口感和质地,以及检测水果损伤程度的重要指标,主要受果胶和纤维素等物质的影响<sup>[24]</sup>。损伤面积与体积越大,硬度下降越多。分析图7c、图7d可以看出,5种包装的猕猴桃振动后果实硬度均有不同程度下降。振后24h,EPE网套(P5)包装的猕猴桃软化率相较于对照组增大了40.4%,PET带盖托盘(P3)相对增大了9.0%;振后96h,EPE网套(P5)包装的猕猴桃软化率相对增大了37.2%,PET带盖托盘(P3)相对增大了10.3%。造成此现象的原因是剧烈振动导致了果肉细胞组织被破坏,同时加速了果胶类物质的水解和酶的催化作用,细胞壁水解酶使细胞壁的支撑力下降,果肉硬度也随之下降,并加快了果实的软化速度。这与谢丹丹等<sup>[8]</sup>提出的振动引起有关细胞壁酶活性的增加,导致细胞壁降解的理论相一致。

可溶性固形物就是果实体内水溶性的干物质,主要是糖、有机酸、单宁等,是检测猕猴桃果实品质和贮藏效果的重要指标。振动对各包装猕猴桃的可溶性固形物含量的影响如图7e、图7f所示,可以看出经过随机振动,猕猴桃果实的SSC均有所上升。其中EPE网套(P5)和EPE衬垫(P1)包装对SSC变化率的影响最为显著,振后24h,SSC变化率比对照组增大了15.0%和8.0%,PET带盖托盘(P3)包装的影响最小,SSC变化率比对照组增大了3.2%;振后96h,EPE网套(P5)包装的SSC变化率比对照组的增大了19.7%,PET带盖托盘(P3)包装的SSC变化率比对照组的增大了6.9%。说明振动过程加速了果实的后熟过程,加快了淀粉转化成糖的生理过程,使得可溶性固形物含量上升。这与夏铭等<sup>[5]</sup>得出的试验规律相符,保护效果好的包装衬垫更有利于维持果实SSC的稳定性。

综上可知,随机振动对猕猴桃果实的机械损伤、质量损失率、硬度、SSC等生理特性均有显著影响,加速了果实的后熟过程,促进了果实的呼吸代谢和腐烂变质。5种包装对猕猴桃果实的保护效果差异明显,PET带盖托盘(P3)包装的综合保护效果最佳,EPS衬垫(P2)次之,EPE网套(P5)包装的保护效果最差。在进行猕猴桃电商包装的选择时,对于成熟度较低、不易受损伤的果实,可选用EPE衬垫(P1)或EPE网套(P5)包装;对于成熟度较高、极易受损伤的果实,应尽量选用PET带盖托盘(P3)或EPS衬垫(P2)进行包装。

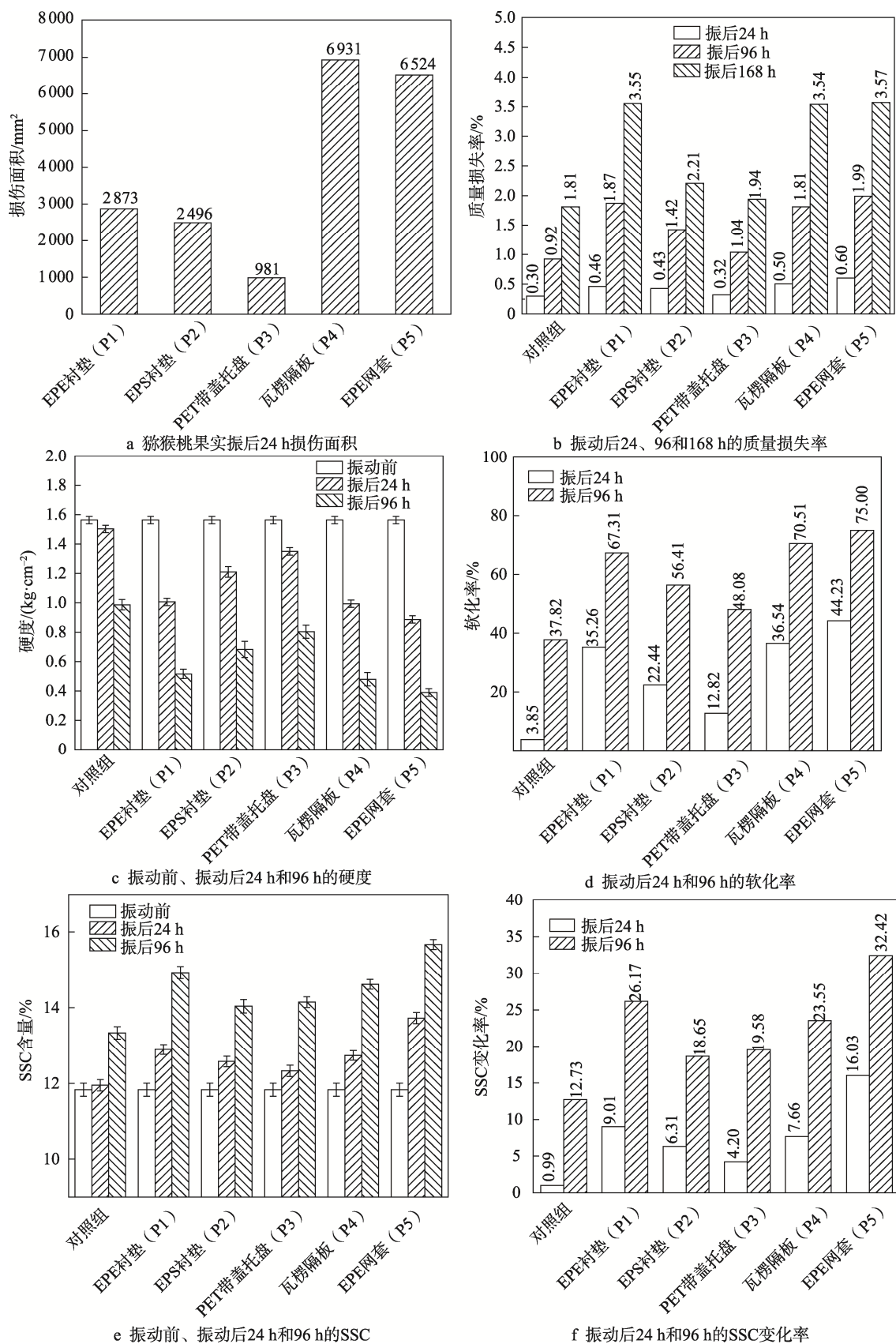


图7 振动后猕猴桃机械损伤及生理指标测量结果

Fig.7 Mechanical damage and physiological index measurement results of kiwifruit after vibration

根据试验结果的分析,对5种包装形式的缓冲结构设计提出优化改进建议:EPE衬垫(P1)的结构应

尽量采用挖孔式设计,保证猕猴桃果实的底部有足够的缓冲材料,同时应增大衬垫材料的空间利用率,避

免材料的浪费;EPS衬垫(P2)存在材质过脆的问题,在振动过程中容易发生破裂、掉渣的情况,应适当增加衬垫结构强度,保证衬垫的缓冲性能;瓦楞隔板(P4)和EPE网套(P5)包装对猕猴桃包装的保护性能较差,不建议单独使用此结构直接对猕猴桃果实进行包装,可以采取两者相结合的方式,使用瓦楞隔板固定果实位置的同时,使用EPE网套对果实进行保护,能够起到较好的缓冲作用。

### 3 结语

1) 5种包装中,PET带盖托盘和EPE网套包装的猕猴桃共振频率偏小,处于公路运输频率范围内,容易产生共振,应该对这2种包装的结构进行优化设计,适当增大其共振频率。

2) 5种包装的猕猴桃的振动传递率从大到小排列为EPE网套、EPE衬垫、瓦楞隔板、EPS衬垫、PET带盖托盘。PET带盖托盘包装的振动传递率最低,对猕猴桃的缓振效果最好;EPE网套和EPE衬垫包装的振动传递率较高,缓振效果较差。

3) 振动导致猕猴桃硬度显著下降、果实软化加速、质量损失率和SSC升高、机械损伤面积增大等。不同包装对猕猴桃的保护效果差异显著,EPE带盖托盘包装对猕猴桃果实的综合保护效果最佳,瓦楞隔板和EPE网套对果实的保护效果较差,实际运输中应尽量选用PET带盖托盘包装。

本文可为猕猴桃电商包装优化设计及猕猴桃振动损伤研究提供理论基础和科学指导。

#### 参考文献:

- [1] SIVAKUMARAN S, HUFFMAN L, SIVAKUMARAN S, et al. The Nutritional Composition of Zespri® Sun-Gold Kiwifruit and Zespri® Sweet Green Kiwifruit[J]. Food Chemistry, 2018, 238: 195-202.
- [2] RAMAZZINA I, BERARDINELLI A, RIZZI F, et al. Effect of Cold Plasma Treatment on Physico-Chemical Parameters and Antioxidant Activity of Minimally Processed Kiwifruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 107(4): 55-65.
- [3] MIR H, SHAHBAZI F. Simulated Transit Vibration Effects on the Postharvest Quality of Persimmon during Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 189: 111918.
- [4] 王妮睿, 尤飞, 江智. 猕猴桃的模拟振动实验及特性研究[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 172-177.  
WANG Ni-rui, YOU Fei, JIANG Zhi. Simulated Vibration Experiment and Features of Kiwifruit[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 172-177.
- [5] 夏铭, 赵晓晓, 徐昌杰, 等. 不同减振衬垫对模拟运输猕猴桃生理和品质影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 276-279.  
XIA Ming, ZHAO Xiao-xiao, XU Chang-jie, et al. Physiological and Qualitative Influences of Anti-Vibration Pad on Kiwifruit in Simulated Transportation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(4): 276-279.
- [6] 薛洁, 李欢, 王香兰, 等. 不同包装运输对猕猴桃货架品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 185-193.  
XUE Jie, LI Huan, WANG Xiang-lan, et al. Effect of Different Packages during Transportation on Shelf-Life Quality of Kiwifruit[J]. Food Science, 2022, 43(5): 185-193.
- [7] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 模拟3自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 219-222.  
KANG Wei-min, XIAO Nian-xin, CAI Jin-xing, et al. Vibrating Acceleration Transmissibility and Fruit Bruise in Simulating Three-Degree-of-Freedom Vibration System[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 219-222.
- [8] 谢丹丹, 茅林春, 卢文静, 等. 猕猴桃果实对模拟运输振动的生理和品质响应[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(11): 168-174.  
XIE Dan-dan, MAO Lin-chun, LU Wen-jing, et al. Physiological and Qualitative Responses to Simulated Transport Vibration in Kiwifruit[J]. Food Research and Development, 2018, 39(11): 168-174.
- [9] LIN Meng-hua, CHEN Jia-hui, CHEN Feng, et al. Effects of Cushioning Materials and Temperature on Quality Damage of Ripe Peaches According to the Vibration Test[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 25(2): 100518.
- [10] ISTA 6-AMAZON, COM 2018 Ships in Own Container (SIOC) for Amazon.com Distribution System Shipment[S].
- [11] ASTM D4169-16, Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems[S].
- [12] GB/T 4857.23—2021, 包装 运输包装件基本试验 第23部分: 垂直随机振动试验方法[S].  
GB/T 4857.23—2021, Packaging—Basic Tests for Transport Packages—Part 23: Vertical Random Vibration Test Method[S].
- [13] BERARDINELLI A, BENELLI A, TARTAGNI M, et al. Kiwifruit Flesh Firmness Determination by a NIR Sensitive Device and Image Multivariate Data Analyses[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2019, 296: 265-271.

- [14] FULLERTON C G, PRAKASH R, NINAN A S, et al. Fruit from Two Kiwifruit Genotypes with Contrasting Softening Rates Show Differences in the Xyloglucan and Pectin Domains of the Cell Wall[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 964.
- [15] ZHANG Li-ming, LIU Zhan-li, WANG Xiang-you, et al. The Properties of Chitosan/Zein Blend Film and Effect of Film on Quality of Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 155: 47-56.
- [16] MA Te, XIA Yu, INAGAKI T, et al. Non-Destructive and Fast Method of Mapping the Distribution of the Soluble Solids Content and pH in Kiwifruit Using Object Rotation Near-Infrared Hyperspectral Imaging Approach[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 174(111440): 174.
- [17] WANG Feng, YANG Qing-zhen, ZHAO Qi-feng, et al. Roles of Antioxidant Capacity and Energy Metabolism in the Maturity-Dependent Chilling Tolerance of Postharvest Kiwifruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 168(3): 111281.
- [18] WANG Li-jun, ZHANG Qi, SONG Hai-yan, et al. Mechanical Damage of 'Huangguan' Pear using Different Packaging under Random Vibration[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187: 111847.
- [19] GB/T 7031—2005, 机械振动 道路路面谱 测量数据报告[S].  
GB/T 7031—2005, Mechanical Vibration—Road Surface Profiles—Reporting of Measured Data[S].
- [20] 李星占, 董兴建, 岳晓斌, 等. 振动响应传递率的动力学特性研究及其在工作模态分析中的应用[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(9): 62-70.  
LI Xing-zhan, DONG Xing-jian, YUE Xiao-bin, et al. Dynamic Characteristics of Vibration Response Transmissibility and Its Application in Operational Modal Analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(9): 62-70.
- [21] 章永年, 张任飞, 孙晔, 等. 局部按压对不同成熟度番茄机械损伤的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11): 292-298.  
ZHANG Yong-nian, ZHANG Ren-fei, SUN Ye, et al. Effects of Local Compression on the Mechanical Damage of Tomato with Different Maturity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(11): 292-298.
- [22] WEI Xiao-peng, XIE Dan-dan, MAO Lin-chun, et al. Excess Water Loss Induced by Simulated Transport Vibration in Postharvest Kiwifruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 250: 113-120.
- [23] 薛洁. 不同包装运输对‘华优’猕猴桃货架品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.  
XUE Jie. Effects of Different Packaging and Transportation On the Shelf Quality of 'Huayou' Kiwifruit[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021.
- [24] XU Fang-xu, LU Fei, XIAO Zhi-gang, et al. Influence of Drop Shock on Physiological Responses and Genes Expression of Apple Fruit[J]. *Food Chemistry*, 2020, 303: 125424.

责任编辑: 曾钰婵