

## 基于电学特性库尔勒香梨冲击损伤模型构建

于世辉<sup>1</sup>, 牛希跃<sup>2</sup>, 唐玉荣<sup>1</sup>, 兰海鹏<sup>1</sup>, 刘扬<sup>1</sup>, 张宏<sup>1</sup>

(1.塔里木大学 机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300;

2.新疆特色农产品深加工兵团重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300)

**摘要:** **目的** 为了有效量化库尔勒香梨因冲击载荷造成的损伤, 实现库尔勒香梨冲击损伤量化评价。**方法** 以不同成熟度库尔勒香梨为实验材料, 探究不同成熟度下冲击高度与香梨损伤程度的关系, 构建冲击高度与香梨损伤程度模型, 依据电学特性检测系统构建不同测试频率下电学参数并联等效电容( $C_p$ )与冲击损伤程度的量化模型。**结果** 在同一冲击高度下, 香梨损伤程度与成熟度成正比关系。当成熟度为 H1—H5, 冲击高度为 30 cm, 与瓦楞纸板进行冲击时, 香梨表面未发现损伤。当冲击高度达到 150 cm 时, 不同成熟度香梨表皮均已破损, 不同成熟度香梨冲击高度与损伤程度量化模型决定系数  $R^2$  为 0.984 9~0.998 5, 可有效量化评价不同成熟度香梨冲击高度与损伤程度的关系。在同一测试频率下,  $C_p$  值随着香梨损伤程度的增加而增大。随着测试频率的升高, 电学参数  $C_p$  值逐渐减小, 5 种测试频率、不同成熟度下的量化模型决定系数  $R^2$  的平均值由高到低为 1 kHz、1 MHz、10 kHz、100 kHz、100 Hz。**结论** 在测试频率 1 kHz 下, 所构建的电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的量化模型检测效果相对最优, 能够有效量化评价香梨的损伤程度。该模型的构建为香梨冲击损伤鉴别提供了理论依据。

**关键词:** 库尔勒香梨; 冲击损伤; 电学特性; 模型构建; 损伤量化

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)09-0065-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.009

## Construction of Impact Damage Model of Korla Fragrant Pear Based on Electrical Characteristics

YU Shi-hui<sup>1</sup>, NIU Xi-yue<sup>2</sup>, TANG Yu-rong<sup>1</sup>, LAN Hai-peng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Xinjiang Alar 843300, China; 2. Production & Construction Group Key Laboratory of Special Agricultural Products Further Processing in Southern Xinjiang, Xinjiang Alar 843300, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to effectively quantify the damage to Korla fragrant pear caused by impact load and realize the quantitative evaluation of impact damage to Korla fragrant pears. In this paper, Korla fragrant pears of different maturity are used as test materials. Exploring the relationship between impact height and damage degree of Korla fragrant pear at different maturity. The model of impact height and damage degree of fragrant pear was established. According to the electrical characteristic detection system, a quantitative model of the electrical parameter  $C_p$  (parallel equivalent ca-

收稿日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(31160196, 31560479, 31660489); 兵团科技特派员创新创业计划(2019CB037); 新疆特色农产品深加工兵团重点实验室开放课题(AP1905); 塔里木大学校长基金(TDZKCQ201902); “强青”科技创新骨干人才项目(2021CB039)

作者简介: 于世辉(1996—), 男, 塔里木大学硕士生, 主攻新疆特色农产品无损检测。

通信作者: 张宏(1975—), 男, 塔里木大学教授、硕导, 主要研究方向为新疆特色农产品无损检测。

capitance) and the impact damage degree under different test frequencies was constructed. Under the same impact height, the damage degree of the Korla fragrant pear is proportional to maturity. When the maturity was H1-H5, no damage was found on the surface of the Korla fragrant pear after impact with corrugated cardboard from a height of 30 cm. When the impact height was 150 cm, the epidermis was damaged by fragrant pears for all maturities. The determination coefficient  $R^2$  value of the quantitative model of impact height and damage degree of fragrant pear with different maturity ranges from 0.984 9 to 0.998 5, which can effectively quantitatively evaluate the relationship between impact height and damage degree of pear with different maturity. At the same test frequency,  $C_p$  increased with an increase in the damage degree of Korla fragrant pears. As the test frequency increases, the value of the electrical parameter  $C_p$  decreases. The quantitative model average  $R^2$  value of the quantitative model under different maturities for the five test frequencies was ranked from high to low as 1 kHz, 1 MHz, 10 kHz, 100 kHz, and 100 Hz. Under the test frequency of 1 kHz, the constructed quantitative model of the electrical parameters  $C_p$  and impact damage area has the best detection effect, which can effectively quantitatively evaluate the damage degree of fragrant pears. The construction of this model provides a reference theoretical basis for identifying the impact damage of fragrant pears.

**KEY WORDS:** Korla fragrant pear; impact damage; electrical characteristics; model building; damage to quantify

库尔勒香梨作为新疆地域性特色水果之一,以其酥脆爽口、皮薄汁丰等优良品质而深受广大消费者的喜爱<sup>[1]</sup>。香梨从采摘到上市销售需经历多个环节,在各个环节中香梨易遭受不同程度的冲击损伤,会降低香梨的食用性和贮藏性<sup>[2]</sup>。冲击损伤会对香梨的营养品质、商品价值等方面造成较大影响,使得香梨林果产业面临严重的经济损失。由此,在香梨采后各个环节中及时将发生损伤的香梨剔除,对于延长香梨贮藏期和提升香梨商品价值、营养价值具有重要实践意义。

目前,针对果实冲击损伤方面已有相关研究。刘春娣<sup>[3]</sup>研究发现,从冲击高度达到 30 cm 开始就对苹果乙烯生成途径和生理活性指标存在影响,当冲击高度超过 30 cm 后,苹果的各项生化指标均有所下降。吴杰<sup>[4]</sup>研究发现,香梨在高度 20~80 cm 处跌落,曲率半径较大的香梨受损伤的程度越严重。许洪振等<sup>[5]</sup>研究发现,枇杷果实的损伤程度与跌落高度和果实质量存在正比关系,且枇杷允许的最大跌落高度为 0.4 m。Lindenv 等<sup>[6]</sup>研究发现,番茄品种和撞击位置对番茄损伤敏感性存在影响,提出了不同的 Logistic 回归模型,并对其进行了评价。Stropek 等<sup>[7]</sup>研究表明,冲击速度 0.25 m/s 是所测试苹果品种不发生损伤的最大速度。孙慧杰<sup>[8]</sup>对香梨接触应力分布展开了相关探究,得到了香梨接触应力与损伤之间的联系。WANG 等<sup>[9]</sup>研究发现,随着跌落高度的增加,荔枝的吸能比例、最大接触面积和损伤程度均会增加,同时接触时间会减少。Fadiji 等<sup>[10]</sup>研究表明,采用散装包装设计的水果比分层包装设计水果的发病率高 50% 以上,损伤易感性高 66%,当包装跌落高度从 30 cm 增加到 50 cm 时,底部的损伤率显著增加了约 50%。Mota 等<sup>[11]</sup>研究香蕉时发现,冲击损伤会影响其淀粉向可溶性糖的转化,会极大提升多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)的活性。上述研究主要集中在

冲击与果实品质和损伤程度之间的关系等方面,尚无果实冲击损伤有效量化评价方面的研究,因此需要一种科学、有效的方法实现香梨冲击损伤的量化评价。目前大多通过红外热波无损检测<sup>[12]</sup>、高光谱成像无损检测<sup>[13]</sup>、主动热成像<sup>[14]</sup>、机器视觉<sup>[15]</sup>等技术来实现水果机械损伤的鉴别,存在资金投入多、操作程序复杂等问题。为了科学有效地量化香梨的冲击损伤程度,应从香梨自身属性等方面出发,寻求高效便捷的技术方法。香梨内部含有大量的水分、糖类、维生素和多种矿物质,香梨果实的组织细胞含有大量电荷,在自身内部形成了稳定的生物电场。当遭受冲击损伤后,香梨自身生物电场会发生改变,从而引起宏观上电学特性的变化,为采用电学特性实现对香梨冲击损伤的鉴别提供了应用前景<sup>[16-17]</sup>。现阶段采用电学特性对香梨冲击损伤程度的鉴别及量化鲜有报道。

文中以不同采摘期库尔勒香梨为实验材料,应用水果冲击损伤实验平台对香梨展开冲击损伤实验,探究冲击高度与香梨损伤面积之间的关系,使用自制的电学参数检测系统进行电学参数的获取,构建不同测试频率下电学特性与不同成熟度香梨损伤面积的量化模型,依据决定系数  $R^2$  均值筛选出最佳测试频率,以期对香梨冲击损伤量化和水果损伤鉴别提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的选择

香梨采摘地点为新疆阿拉尔市十团梨园,该地域是新疆高品质香梨生产区,截至 2019 年树龄为 12 年。采摘库尔勒香梨的选取依据:色泽均匀、果型一致、无机械损伤及病虫害。在采收过程中相关人员均佩戴手套,以避免人为因素对香梨造成损伤。采收时间为

2019 年 9 月 1—29 日, 香梨采摘的间隔时间为 4 d, 共计采摘 8 次, 依次记为 H1—H8。每次实验前将采摘后的香梨进行称量分级, 筛选出质量为  $(125 \pm 3) \text{g}$  的香梨进行实验。

## 1.2 冲击损伤实验

依据相关文献<sup>[18]</sup>, 采用自制的水果冲击损伤实验平台开展实验。选取单瓦 3 层、UV 型齿形、A 楞型的瓦楞纸板作为冲击接触材料, 并置于实验平台上。首先开展冲击损伤预实验, 获取香梨出现损伤及表皮破裂时的高度值, 发现香梨在冲击高度为 30 cm 时出现损伤, 在 150 cm 时香梨表皮严重破损, 因而将香梨的冲击损伤高度定为 30、50、70、90、110、130、150 cm。每组实验重复 10 次。每完成 1 组实验后更换 1 次瓦楞纸板。在香梨遭受损伤后即刻开展电学参数数据的采集, 采集数据后的香梨待静置规定时间后进行损伤面积的测定。将实验结果取平均值。

## 1.3 电学参数检测系统

冲击损伤香梨电学参数数据的采集选用电学参数检测系统, 见图 1。在采集数据前需将 LCR 测试电桥预热 1 h, 并进行调零操作, 以降低实验误差。在预热和调零工作完成后, 将屏蔽箱 5 打开, 使用加载电机 1 通过控制上电极板 7 与下电极板 8 的间距进行粗调, 从而使上下电极板与香梨相互接触。再通过手工转动微调手轮 2, 使上下电极板与香梨赤道表面充分接触, 并且保持香梨在屏蔽箱内的位置不变。为消除香梨表面与上下电极板之间的空气间隙, 减小实验误差, 将导电海绵粘贴在上下电极板的表面。选取上下电极板直径为 30 mm, 关闭屏蔽箱, 采用预紧力 0.7 N 对香梨进行夹持。上下电极板采用绝缘杆 6 与外部机械结构相连, 防止外部电磁影响数据的精准

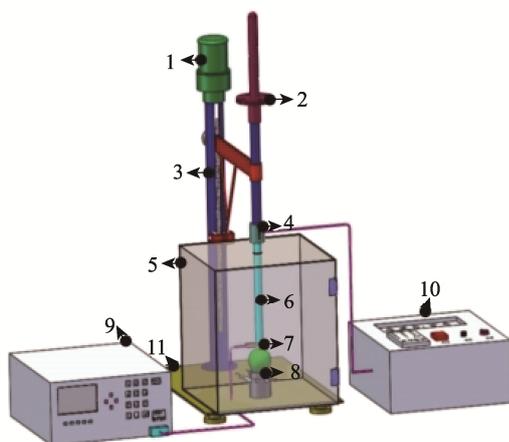


图 1 电学参数检测系统装置  
1.加载电机; 2.微调手轮; 3.支架; 4.力传感器; 5.屏蔽箱; 6.绝缘杆;  
7.上电极板; 8.下电极板; 9.测试电桥; 10.测力控制器; 11.底座。

图 1 电学参数检测系统装置  
Fig.1 Electrical parameter detection system device

度。实验测试电压为 1 V, 测试频率为 100 Hz、1 kHz、10 kHz、100 kHz、1 MHz。

研究发现, 并联等效电容 ( $C_p$ ) 常作为表征水果损伤程度的电学参数指标<sup>[19]</sup>。 $C_p$  表征果实在既定电位差下的电荷积聚量。通常来说, 电荷在电场中会受到电场力而发生移动。当导体内部存有介质就会阻碍电荷在电场中的运动, 受阻的电荷开始产生积聚, 进而导致电荷量累积<sup>[20]</sup>。故文中选取  $C_p$  来研究其与香梨损伤程度的关系。

## 1.4 损伤面积的测量

将遭受机械损伤后的果实放置在常温环境中静置 24 h 以上, 使果实受损部位充分发生褐变。常采用果实损伤部位褐变面积或体积来量化损伤程度<sup>[21]</sup>。将香梨表皮去除后, 其损伤面积可通过肉眼辨别, 从而提高判断香梨损伤程度的效率, 文中采用测量损伤面积的方法来实现香梨冲击损伤程度的量化评价。

香梨遭受冲击损伤后, 将其在常温条件下放置 24 h。将香梨冲击损伤部位的表皮去除, 其损伤部位的形状近似为椭圆形, 利用游标卡尺测量出损伤部位的尺寸。香梨的损伤面积依据文献中的方法进行计算<sup>[22-23]</sup>, 见式 (1)。

$$S = \frac{\pi}{4} L_1 \cdot L_2 \quad (1)$$

式中:  $S$  为香梨冲击损伤面积,  $\text{mm}^2$ ;  $L_1$  为椭圆形损伤部位边缘轮廓的最长距离,  $\text{mm}$ ;  $L_2$  为椭圆形损伤部位边缘轮廓的最短距离,  $\text{mm}$ 。

## 1.5 香梨损伤量化模型构建方法

使用 Origin 2018 对采集的数据进行处理, 得到成熟期果实冲击高度与损伤面积的关系曲线, 并对其进行拟合分析, 得到的量化模型见式 (2)。

$$S = a_1 + b_1 H + c_1 H^2 \quad (2)$$

式中:  $S$  为冲击损伤面积,  $\text{mm}^2$ ;  $H$  为冲击高度,  $\text{cm}$ ;  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  为常数。

为了构建不同测试频率下电学参数  $C_p$  值与香梨冲击损伤面积之间关系的量化模型, 使用 Origin 2018 对采集的数据进行处理, 得到  $C_p$  值与香梨冲击损伤面积的关系曲线, 并对其进行拟合分析, 得到的量化模型见式 (3)。

$$S = a_2 + b_2 C_p + c_2 C_p^2 \quad (3)$$

式中:  $S$  为冲击损伤面积,  $\text{mm}^2$ ;  $C_p$  为并联等效电容;  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  为常数。

## 2 结果与分析

### 2.1 冲击高度与香梨损伤程度分析

由图 2 可知, 在香梨成熟度相同时, 其损伤面积与冲击高度成正比关系。在香梨冲击高度相同时, 其

损伤面积与成熟度成正比关系。香梨冲击高度越高,下落时所形成的冲击能越大,使得香梨的损伤面积越大。当成熟度为 H1—H5 时,从高度 30 cm 跌落,香梨的表面未发现损伤。当冲击高度大于 30 cm 时,香梨表面开始出现不同程度的损伤。当成熟度为 H6—H8 时,由于香梨的硬度较低,因此在冲击高度为 30 cm 时就会出现损伤。成熟度为 H1—H8 的香梨在冲击高度低于 130 cm 时,冲击高度与损伤面积呈现均匀递增的变化关系;当高度超过 130 cm 时,不同成熟度曲线趋于平缓,即随着高度的增加,香梨损伤面积的增加幅度变小。因为当冲击高度为 130 cm 时,香梨与瓦楞纸板接触的表面已经产生较大的损伤,此时再增加冲击高度,会进一步增加香梨的腐烂损伤程度,而损伤面积增加幅度变小。当冲击高度达到 150 cm 时,所有成熟度的香梨表皮均已破裂,此时香梨表现为果肉塌陷且伴随汁水溢出,香梨损伤程度最严重。

当外界条件统一时,香梨成熟度与损伤面积存在一定关系,即随着香梨成熟度的不断增加,香梨的损伤面积逐步增大。因为在果实成熟度较低时,果实中含有一种果胶物质,它存在于细胞壁最外层的中胶层中,可以将相邻的细胞黏着在一起,从而缓冲果实内部细胞之间的挤压,宏观上表现为果实硬度值偏高。随着果实成熟度的增加,果胶逐渐溶解,细胞相互分离,致使果肉变软。当香梨遭受相同程度的冲击时,成熟度高的香梨产生的损伤面积就越大,抵御冲击损伤的能力越弱<sup>[24-25]</sup>。

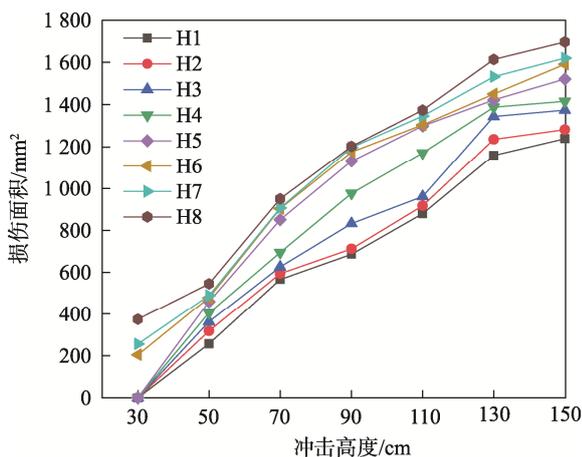


图2 冲击高度对不同成熟度香梨损伤面积的影响  
Fig.2 Effects of impact height on damage area of Korla fragrant pears with different maturity levels

不同成熟度香梨冲击高度与损伤面积量化模型的具体参数见表1。由表1可知,拟合后的方程决定系数  $R^2$  值变化范围为 0.984 9~0.998 5,不同成熟度香梨冲击高度与损伤面积之间的量化模型决定系数  $R^2$  接近于 1,表明其量化模型拟合效果良好。不同成熟

度下香梨的冲击高度与损伤面积的量化模型拟合系数  $R^2$  值的变化范围较小,表明所构建的量化模型能够有效量化评价不同成熟度香梨冲击高度与损伤面积的关系。

表1 不同成熟度香梨冲击高度与损伤面积的量化模型  
Tab.1 Quantitative model of impact height and damage area of fragrant pear with different maturity

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -425.00 + 15.15H - 0.03H^2$	0.991 2
H2	$S = -430.23 + 15.93H - 0.03H^2$	0.986 7
H3	$S = -482.36 + 18.00H - 0.036H^2$	0.984 9
H4	$S = -679.30 + 24.93H - 0.07H^2$	0.997 9
H5	$S = -811.35 + 30.42H - 0.10H^2$	0.998 5
H6	$S = -483.05 + 24.16H - 0.07H^2$	0.992 8
H7	$S = -432.80 + 23.41H - 0.06H^2$	0.992 4
H8	$S = -216.72 + 19.29H - 0.04H^2$	0.989 9

## 2.2 电学参数与冲击损伤规律及模型构建

香梨受到不同程度冲击载荷损伤后,电学参数  $C_p$  在 100 Hz~1 MHz 测试频率范围内的变化规律见图3。由图3可知,在不同测试频率下,电学参数  $C_p$  与损伤面积均呈现出“快速—缓慢”的递增变化趋势。在同一电学测试频率下,电学参数  $C_p$  随着香梨损伤程度的增加而增大;电学参数  $C_p$  值随着损伤面积的增加而增加。电学参数  $C_p$  随着频率的增加呈现降低的变化趋势, $C_p$  值在不同测试频率范围内其数值差异较为明显。不同成熟度下的香梨电学参数  $C_p$  与损伤面积的关系曲线错综复杂,因此需要确定香梨的成熟度,在同一成熟度下建立电学参数  $C_p$  与损伤面积的量化模型。

香梨在遭受冲击损伤时,果肉的组织细胞膜会破裂,离子通透性变强,同时果肉组织细胞内的结合水成为自由水,电流阻碍能力降低,导致受损果实在既定电位差下的电荷积聚量大于正常香梨果实。与正常香梨相比,受损香梨的电学参数  $C_p$  值会增大。香梨的损伤程度随着冲击高度的增加而增大,导致香梨组织细胞的破裂程度加剧,大量自由水及电解质溢出,电荷积聚量增加,所以损伤程度越高的香梨其电学参数  $C_p$  值越大<sup>[26-27]</sup>。不同测试频率下,香梨损伤面积与  $C_p$  之间均存在增长速率变缓的拐点。其原因可能是随着冲击力的增加,香梨抵御冲击的能力也趋于减弱,当冲击高度大于香梨自身可抵御的冲击能量阈值时,冲击能量使香梨表皮开始破裂,汁水淌出,导致香梨果实的电解质含量升高,导电性能增强,从而使电学参数  $C_p$  值迅速变化。

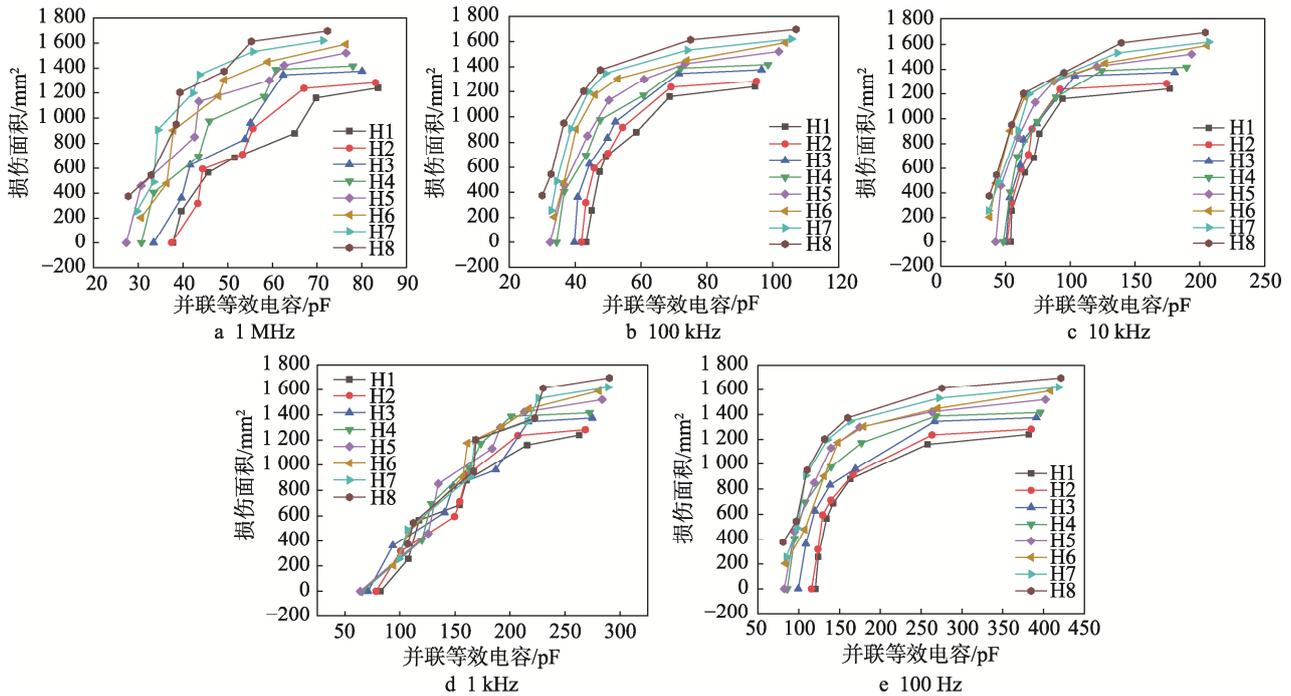


图 3 不同频率下电学参数  $C_p$  与损伤面积的关系曲线

Fig.3 Relation curve between electrical parameter  $C_p$  and damage area at different frequencies

电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积量化模型见表 2—6。在 5 种测试频率下, 电学参数  $C_p$  与损伤面积之间均满足式 (3)。在测试频率 1 MHz 下, 香梨成熟度为 H8 时, 量化模型的决定系数  $R^2=0.9663$ , 在各成熟度量化模型中拟合效果最优。在测试频率 100 kHz 下, 香梨成熟度 H5 时, 电学参数  $C_p$  值与损伤面积量化模型拟合效果最优, 决定系数  $R^2=0.9533$ 。在测试频率 10 kHz 下, 香梨成熟度 H1 和 H2 时, 电学参数  $C_p$  值与损伤面积拟合方程最优, 拟合方程决定系数  $R^2$  为 0.9693 和 0.9632。在测试频率 1 kHz 下, 香梨成熟度 H6 时, 电学参数  $C_p$  与损伤面积量化模型最优, 电学参数  $C_p$  与损伤面积的拟合方程决定系数  $R^2=0.9816$ 。在测试频率 100 Hz 下, 香梨成熟度 H6 时, 电学参数  $C_p$  与损伤面积量化模型最优, 决定系数  $R^2=0.9230$ 。对比 5 种测试频率下最优决定系数  $R^2$  值发现, 其决定系数相差较小, 电学参数  $C_p$  与损伤面积的决定系数均在 0.8610 以上, 量化模型拟合度良好, 电学参数  $C_p$  可以用来作为量化评价香梨冲击损伤的敏感参数。

在 5 种测试频率下, 电学参数  $C_p$  与冲击损伤量化模型的拟合决定系数值差异不明显。为了获得最佳的测试频率, 以实现香梨冲击损伤的有效量化评价, 现对 5 种测试频率、不同成熟度下的决定系数  $R^2$  取平均值, 筛选出最优量化冲击损伤电学测试频率。在 5 种频率下, 不同成熟度的决定系数  $R^2$  平均值由高到低依次为 1 kHz、1 MHz、10 kHz、100 kHz、100 Hz。由此可见, 在 1 kHz 频率下电学参数  $C_p$  对不同成熟度香梨的冲击损伤量化效果最优。

表 2 1 MHz 频率下电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的量化模型

Tab.2 Quantitative model of electrical parameter  $C_p$  and impact damage area at 1 MHz frequency

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -2328.24 + 83.16C_p - 0.49C_p^2$	0.9573
H2	$S = -3304.91 + 117.10C_p - 0.74C_p^2$	0.9656
H3	$S = -2660.86 + 102.40C_p - 0.65C_p^2$	0.9566
H4	$S = -2532.90 + 108.71C_p - 0.75C_p^2$	0.9649
H5	$S = -2115.98 + 102.08C_p - 0.72C_p^2$	0.9562
H6	$S = -2851.48 + 129.43C_p - 0.94C_p^2$	0.9571
H7	$S = -3391.39 + 164.85C_p - 1.33C_p^2$	0.9452
H8	$S = -2345.00 + 121.61C_p - 0.91C_p^2$	0.9663

表 3 100 kHz 频率下电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的量化模型

Tab.3 Quantitative model of electrical parameter  $C_p$  and impact damage area at 100 kHz frequency

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -3987.16 + 130.96C_p - 0.80C_p^2$	0.9279
H2	$S = -3987.94 + 135.13C_p - 0.84C_p^2$	0.9392
H3	$S = -3499.24 + 124.16C_p - 0.77C_p^2$	0.9380
H4	$S = -2378.31 + 94.20C_p - 0.57C_p^2$	0.9495
H5	$S = -2221.88 + 91.20C_p - 0.54C_p^2$	0.9533
H6	$S = -1949.37 + 87.49C_p - 0.52C_p^2$	0.8883
H7	$S = -1813.15 + 86.97C_p - 0.52C_p^2$	0.8843
H8	$S = -1335.52 + 75.16C_p - 0.44C_p^2$	0.9177

表4 10 kHz 频率下电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的  
量化模型

Tab.4 Quantitative model of electrical parameter  $C_p$  and  
impact damage area at 10 kHz frequency

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -2403.38 + 48.73C_p - 0.22C_p^2$	0.969 3
H2	$S = -2512.42 + 64.11C_p - 0.24C_p^2$	0.963 2
H3	$S = -1949.74 + 52.74C_p - 0.19C_p^2$	0.928 5
H4	$S = -1428.30 + 41.11C_p - 0.14C_p^2$	0.925 0
H5	$S = -1135.64 + 38.52C_p - 0.13C_p^2$	0.909 4
H6	$S = -534.00 + 28.67C_p - 0.09C_p^2$	0.892 0
H7	$S = -553.55 + 28.45C_p - 0.09C_p^2$	0.939 7
H8	$S = -356.04 + 26.10C_p - 0.08C_p^2$	0.935 7

表5 1 kHz 频率下电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的  
量化模型

Tab.5 Quantitative model of electrical parameter  $C_p$  and  
impact damage area at 1 kHz frequency

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -1345.50 + 19.49C_p - 0.03C_p^2$	0.972 4
H2	$S = -1161.47 + 17.11C_p - 0.03C_p^2$	0.961 2
H3	$S = -908.73 + 14.94C_p - 0.02C_p^2$	0.969 4
H4	$S = -1203.04 + 19.24C_p - 0.03C_p^2$	0.956 3
H5	$S = -1060.03 + 17.47C_p - 0.03C_p^2$	0.960 5
H6	$S = -1572.92 + 23.12C_p - 0.04C_p^2$	0.981 6
H7	$S = -1354.22 + 20.22C_p - 0.03C_p^2$	0.968 7
H8	$S = -1291.59 + 19.33C_p - 0.03C_p^2$	0.966 3

表6 100 Hz 频率下电学参数  $C_p$  与冲击损伤面积的  
量化模型

Tab.6 Quantitative model of electrical parameter  $C_p$   
and impact damage area at 100 Hz frequency

成熟度	量化模型	$R^2$
H1	$S = -1649.78 + 19.88C_p - 0.03C_p^2$	0.861 0
H2	$S = -1565.74 + 19.60C_p - 0.03C_p^2$	0.876 5
H3	$S = -1247.62 + 17.84C_p - 0.03C_p^2$	0.918 6
H4	$S = -967.70 + 16.73C_p - 0.02C_p^2$	0.907 3
H5	$S = -996.20 + 17.80C_p - 0.03C_p^2$	0.885 6
H6	$S = -866.80 + 16.16C_p - 0.03C_p^2$	0.923 0
H7	$S = -685.28 + 15.72C_p - 0.02C_p^2$	0.872 4
H8	$S = -531.40 + 14.81C_p - 0.02C_p^2$	0.906 1

## 2.3 香梨不同成熟阶段的最优损伤量化模型

通过冲击高度与损伤面积的关系可知,在同一冲击高度下,不同成熟度下的香梨损伤面积差异程度可分为3个阶段,即“稳定—急速—稳定”。由此,可将香梨整个成熟期分为3个阶段:成熟初期,  $H1 \leq H_{初} \leq H2$  (9月1日—9月5日);成熟中期,  $H2 < H_{中} < H6$  (9月6日—9月17日);成熟末期,  $H6 \leq H_{末} \leq H8$  (9月18日—9月29日)。因在测试频率1 kHz下,电学参数  $C_p$  与不同成熟度香梨冲击损伤面积间的量化模型拟合度最佳,故将测试频率1 kHz下的损伤模型拟合为3个广谱的损伤量化模型,使之依据采摘时间选取不同损伤量化模型。香梨在不同成熟阶段的最优损伤量化模型见表7。

## 3 讨论

当香梨成熟度为H1—H2, H6—H8时,即成熟初期和成熟末期,香梨冲击高度与损伤面积关系曲线之间疏密程度较小。在相同冲击载荷条件下,成熟初期和成熟末期的香梨其成熟度对损伤程度的影响较弱。成熟度为H3—H5时,即成熟中期,香梨冲击高度与损伤面积曲线比较远。在同一载荷条件下,成熟中期香梨的成熟度对其损伤程度影响较为显著。其原因可能是香梨在成熟过程中其硬度值与香梨成熟度成反比关系,大致表现为“稳定—急速—稳定”的变化规律。果实内部水解酶的活性往往在成熟中期最高<sup>[28]</sup>,大量的水解酶会造成细胞壁中纤维素、原果胶的溶解,使细胞壁强度减弱,导致库尔勒香梨成熟期内的硬度表现出“稳定—急速—稳定”的变化规律。由此可见,若在成熟中期及以后阶段采摘香梨,需特别注意果实的损伤问题,避免导致更多果实发生损伤。

通过研究发现,香梨随着测试频率的增加,其并联等效电容呈现出降低的变化趋势。研究结果与边红霞等<sup>[29]</sup>对葡萄的电学特性测量结果和王玲等<sup>[30]</sup>对苹果电学特性测量的结果近似,但是与唐燕等<sup>[31]</sup>对猕猴桃的电学特性研究结果相反。这可能与香梨和猕猴桃果实在果肉组织结构、营养成分等方面的差异有关。对于库尔勒香梨自身而言,冲击损伤是一种强烈的外界干扰,影响了其正常生理活动,宏观上表现出电学参数发生变化。通过实验结果可以看出,冲击损伤的香梨电学参数  $C_p$  均高于未损伤香梨电学参数  $C_p$ 。文中的研究结果与陈燕等<sup>[32]</sup>对荔枝的研究结果近似。香梨发生冲击损伤之后,细胞膜会破裂,离子通透性增强,导致  $C_p$  增大。

表 7 不同成熟阶段香梨的最优损伤量化模型  
Tab.7 Optimal damage quantification model of fragrant pear at different ripening stages

成熟期	量化模型	$R^2$
$H1 \leq H_{初} \leq H2$ (9月1日—9月5日)	$S_{初} = -1\ 236.40 + 18.07C_p - 0.032C_p^2$	0.965 2
$H2 < H_{中} < H6$ (9月6日—9月17日)	$S_{中} = -1\ 065.67 + 17.32C_p - 0.029C_p^2$	0.952 2
$H6 \leq H_{末} \leq H8$ (9月18日—9月29日)	$S_{末} = -1\ 404.54 + 20.84C_p - 0.036C_p^2$	0.970 2

注:  $S_{初}$ 、 $S_{中}$ 、 $S_{末}$ 分别表示香梨成熟早期、中期、末期的冲击损伤面积。

## 4 结语

香梨成熟度与损伤面积存在一定关系,即在同等冲击高度条件下,香梨损伤程度随成熟度的增大而增加。在同一成熟度下,随着冲击高度的增加,香梨损伤程度呈现递增的变化趋势。当冲击高度超过 130 cm 时,随着冲击高度的增加,香梨损伤程度增加速率趋于下降。电学参数  $C_p$  可以作为评价香梨损伤程度的电学参数指标。冲击损伤香梨的电学参数  $C_p$  均高于未受损香梨的电学参数  $C_p$ ,并随着香梨损伤程度的增大而不断增大。随着测试频率的增大,香梨电学参数  $C_p$  值不断减小。在测试频率 1 kHz 下对香梨冲击损伤量化评价效果最优,且损伤量化模型均符合二次函数。依据香梨成熟期内冲击高度与损伤面积的关系,将冲击损伤量化模型分为 3 类,即成熟初期、成熟中期和成熟末期,其损伤量化模型为  $S_{初} = -1\ 236.40 + 18.07C_p - 0.032C_p^2$ ,  $S_{中} = -1\ 065.67 + 17.32C_p - 0.029C_p^2$ ,  $S_{末} = -1\ 404.54 + 20.84C_p - 0.036C_p^2$ 。研究结果可为香梨冲击损伤程度的量化及水果采后损伤鉴别提供理论指导。

### 参考文献:

[1] 范修文,于世辉,兰海鹏,等. 基于电学特性的库尔勒香梨静压损伤程度量化研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 194-198.  
FAN Xiu-wen, YU Shi-hui, LAN Hai-peng, et al. Study on Static Pressure Damage Degree of Korla Pear Based on Electrical Properties[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 194-198.

[2] 罗吉庆,张永杰,江丽慧,等. 枇杷营养价值和功能价值的应用研究[J]. 农产品加工, 2021(4): 83-87.  
LUO Ji-qing, ZHANG Yong-jie, JIANG Li-hui, et al. Application of Nutritional and Functional Value of Eriobotrya Japonica[J]. Farm Products Processing, 2021(4): 83-87.

[3] 刘春娣. 模拟振动和冲击对富士苹果品质影响及其分子机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 45-49.  
LIU Chun-di. Effect of Stimulated Vibration and Impact

on the Qualities of Fuji Apples and Its Molecular Mechanism[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016: 45-49.

[4] 吴杰. 库尔勒香梨的动态粘弹特性及碰压损伤机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 37-58.  
WU Jie. Study on Dynamic Viscoelastic Property and Impact Bruise of Korla Pear[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2011: 37-58.

[5] 许洪振,赵阳,代洪周,等. 枇杷果实损伤特性试验研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(8): 106-112.  
XU Hong-zhen, ZHAO Yang, DAI Hong-zhou, et al. Experimental Study on Damage Characteristics of Loquat Fruit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 106-112.

[6] LINDEN V V, KETELAERE B D, DESMET M, et al. Determination of Bruise Susceptibility of Tomato Fruit by Means of an Instrumented Pendulum[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40(1): 7-14.

[7] STROPEK Z, GOŁACKIK. The Effect of Drop Height on Bruising of Selected Apple Varieties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 167-172.

[8] 孙慧杰. 库尔勒香梨跌落碰撞接触应力分析及损伤预测的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014: 8-19.  
SUN Hui-jie. Contact Pressure Analysis of Drop Impact for Korla Pear and Bruising Prediction Using Finite Element Analysis[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014: 8-19.

[9] WANG Wei-zu, ZHANG Shuang-ming, FU Han, et al. Evaluation of Litchi Impact Damage Degree and Damage Susceptibility[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105409.

[10] FADIJI T, COETZEE C, PATHARE P, et al. Susceptibility to Impact Damage of Apples Inside Ventilated Corrugated Paperboard Packages: Effects of Package Design[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 286-296.

[11] MOTA R V D, CORDENUNSI B R, NASCIMENTO J R O D, et al. Activity and Expression of Banana Starch Phosphorylases during Fruit Development and Ripening[J]. Planta, 2002, 216(2): 325-333.

- [12] 王利平, 陈恒, 王团部. 基于红外热波无损检测技术的水果分级研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(7): 59-62.  
WANG Li-ping, CHEN Heng, WANG Tuan-bu. Study on Fruit Grading Based on Infrared Heat Wave Nondestructive Testing Technology[J]. Laser Journal, 2018, 39(7): 59-62.
- [13] 韩浩然. 基于高光谱成像的水果轻微机械损伤无损检测的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018: 6-19.  
HAN Hao-ran. Study on Non-Destructive Detection of Light Mechanical Damage of Fruits Based on Hyperspectral Imaging[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018: 6-19.
- [14] 周建民, 周其显. 基于主动热成像技术的苹果早期机械损伤检测[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 162-165.  
ZHOU Jian-min, ZHOU Qi-xian. Detection of Early Mechanical Damage in Apple Based on Active Thermal Imaging[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 162-165.
- [15] 孙宝霞, 汤林越, 何志良, 等. 基于机器视觉的采后荔枝表皮微损伤实时检测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 35-41.  
SUN Bao-xia, TANG Lin-yue, HE Zhi-liang, et al. Real-Time Detection of Micro-Damage on Peel of Post-harvest Litchi Based on Machine Vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 35-41.
- [16] LAN Hai-peng, WANG Zhen-tao, NIU Hao, et al. A Nondestructive Testing Method for Soluble Solid Content in Korla Fragrant Pears Based on Electrical Properties and Artificial Neural Network[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(9): 5172-5181.
- [17] GUO Wen-chuan, FANG Li-jie, LIU Da-yang, et al. Determination of Soluble Solids Content and Firmness of Pears during Ripening by Using Dielectric Spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 117: 226-233.
- [18] 卢立新. 苹果-瓦楞纸板缓冲跌落动力学模型[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 276-280.  
LU Li-xin. Cushioning Dropping Modeling of a Falling Apple on the Corrugated Board[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 276-280.
- [19] 马雪莲, 张海红, 周世平. 损伤对灵武长枣电参数的影响[J]. 食品科技, 2014, 39(9): 75-81.  
MA Xue-lian, ZHANG Hai-hong, ZHOU Shi-ping. Influence of Damages on Electrical Parameter Values of Lingwu Long-Jujube[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(9): 75-81.
- [20] 唐燕. 猕猴桃和桃电学特性和生理特性关系研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011: 26-31.  
TANG Yan. The Study on Relationship between Electrical Properties and Physiological Characteristics of Kiwifruit and Peach[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2011: 26-31.
- [21] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise Damage Measurement and Analysis of Fresh Horticultural Produce—A Review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 91: 9-24.
- [22] 吴杰, 郭康权, 葛云, 等. 香梨果实跌落碰撞时的接触应力分布特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 250-254.  
WU Jie, GUO Kang-quan, GE Yun, et al. Contact Pressure Distribution Characteristics of Korla Pear Fruit at Moment of Drop Impact[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 250-254.
- [23] 吴杰, 李凡, 葛云, 等. 香梨静压接触应力测量及损伤预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 261-266.  
WU Jie, LI Fan, GE Yun, et al. Measurement of Contact Pressure of Korla Pear under Compression and Bruising Prediction Using Finite Element Analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 261-266.
- [24] ORNELAS-PAZ J J, QUINTANA-GALLEGOS B M, ESCALANTE-MINAKATA P, et al. Relationship between the Firmness of Golden Delicious Apples and the Physicochemical Characteristics of the Fruits and Their Pectin during Development and Ripening[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(1): 33-41.
- [25] 唐玉荣, 刘扬, 兰海鹏, 等. 成熟期库尔勒香梨电学参数的变化规律[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(3): 137-139.  
TANG Yu-rong, LIU Yang, LAN Hai-peng, et al. Changes of Electrical Parameters of Korla Fragrant Pear at Maturity[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(3): 137-139.
- [26] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 243-247.  
WANG Rui-qing, ZHANG Ji-shu, MA Shu-shang. Nondestructive Determination of the Quality of Red Bartlett Pear during Shelf Life by Electrical Characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 243-247.
- [27] 张立彬, 胡海根, 计时鸣, 等. 果蔬产品品质无损检测技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 176-180.  
ZHANG Li-bin, HU Hai-gen, JI Shi-ming, et al. Review of Non-Destructive Quality Evaluation Technology for Fruit and Vegetable Products[J]. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 176-180.
- [28] 许娟, 李疆, 张校立, 等. '库尔勒香梨'果实发育中细胞壁组分和水解酶活性的变化[J]. 果树学报, 2015, 32(6): 1114-1117.
- XU Juan, LI Jiang, ZHANG Xiao-li, et al. Variations of Cell Wall Components and Hydrolase Activity of 'Korla Fragrant Pear' during the Fruit Developmental Stage[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(6): 1114-1117.
- [29] 边红霞, 屠鹏. 跌落高度对红地球葡萄介电特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(7): 154-157.
- BIAN Hong-xia, TU Peng. Influence of the Fallen Height on Dielectric Properties of Red-Globe Grape[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(7): 154-157.
- [30] 王玲, 黄森, 张继澍, 等. '嘎拉'苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402-407.
- WANG Ling, HUANG Sen, ZHANG Ji-shu, et al. Electric Properties of 'Gala' Apple Fruit Quality[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(2): 402-407.
- [31] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 损伤对猕猴桃果实电特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 6-11.
- TANG Yan, DU Guang-yuan, ZHANG Ji-shu. Effect of Damage on Dielectric Properties of Kiwifruits[J]. Food Science, 2011, 32(5): 6-11.
- [32] 陈燕, 谈建豪, 向和平, 等. 机械损伤对荔枝电特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(4): 47-50.
- CHEN Yan, TAN Jian-hao, XIANG He-ping, et al. Effect of Mechanical Damage on Dielectric Properties of Litchi[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(4): 47-50.

责任编辑: 彭颀