

付函, 刘恩秀, 杨洲, 等. 基于摆动冲击试验的青香蕉碰撞损伤敏感性评估 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 100-108.
FU Han, LIU Enxiu, YANG Zhou, et al. Evaluation of impact bruise susceptibility for green banana based on pendulum impact test[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 100-108.

基于摆动冲击试验的青香蕉碰撞损伤敏感性评估

付 函¹, 刘恩秀¹, 杨 洲^{1,2}, 杨靖恺¹, 张汉尧¹, 谢博伟¹, 杜文迪¹, 段洁利¹

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 嘉应学院/广东省山区特色农业资源保护与
精准利用重点实验室, 广东 梅州 514015)

摘要:【目的】评估一束适收期青香蕉果穗内梳层节点、节点嵌套的内外排层、果指表面区域和冲击水平对果实碰撞损伤敏感性的影响, 为后续生产处理环节中确保果指质量的针对性防护提供参考。【方法】嵌套、单因素和正交试验设计结合单因素及多因素方差分析, 确定显著影响果实碰撞损伤敏感性的因素及主次关系。设计和搭建摆动冲击试验台, 开展果实的碰撞损伤试验。通过测量碰撞部位的损伤体积和吸收能量, 计算果实的碰撞损伤敏感性(单位吸收能量下的损伤体积)。【结果】嵌套试验结果表明: 梳层节点对损伤敏感性无显著影响; 节点嵌套的排层对其影响极显著; 根据多重比较分析结果节点嵌套排层的 14 个水平可分为 4 组。单因素试验结果表明: 果指表面区域对损伤敏感性的影响极显著, 近果顶端>果指中部>近果柄端; 损伤敏感性随冲击水平的提高而显著增加。正交试验结果表明: 影响果实碰撞损伤敏感性各因素的主次顺序为冲击水平>生长位置>果指表面区域。【结论】一束香蕉梳层节点嵌套的内外排层及果指表面不同区域的碰撞损伤敏感性具有统计意义上的差异。

关键词: 青香蕉; 机械损伤; 碰撞损伤敏感性; 生长位置; 果指表面区域
中图分类号: S225;S668.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)06-0100-09

Evaluation of impact bruise susceptibility for green banana based on pendulum impact test

FU Han¹, LIU Enxiu¹, YANG Zhou^{1,2}, YANG Jingkai¹, ZHANG Hanyao¹, XIE Bowei¹, DU Wendi¹, DUAN Jieli¹
(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Jiaying University/Guangdong Provincial Key Laboratory of Conservation and Precise Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous Areas, Meizhou 514015, China)

Abstract: 【Objective】This study was aimed to evaluate the effect of nodes within a green banana bunch harvested in suitable period, inner and outer row layers nested in nodes, fruit finger surface area and impact level on fruit impact bruise susceptibility, providing references for targeted protection to ensure fruit finger quality in subsequent production and handling processes. 【Method】Nested, one-way and orthogonal experimental designs were combined with one-way and multi-way ANOVAs to determine the factors and primary-secondary relationship that significantly affect the bruise susceptibility of fruits. A pendulum impact bench was designed and constructed to carry out the impact damage test on fruits. The bruise susceptibility (bruise volume per unit absorbed energy) of fruits was calculated based on measuring bruise volume and corresponding absorbed

收稿日期:2021-07-20 网络首发时间:2021-10-06 11:27:48
网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210930.2153.006.html>
作者简介:付 函(1986—), 男, 讲师, 博士, E-mail: fuhan@scau.edu.cn; 通信作者: 段洁利(1973—), 女, 副教授, 博士, E-mail: duanjieli@scau.edu.cn
基金项目:国家重点研发计划(2020YFD1000104); 国家自然科学基金(51905179); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助(CARS-31-10)

energy. 【Result】 The results of the nested test showed that the nodes within a banana bunch had no significant effect on the bruise susceptibility while the row layer nested in nodes had an extremely significant effect. The 14 levels of the row layers nested in nodes could be divided into four groups according to the results of multiple comparisons analysis. The results of the one-way test showed that fruit finger surface area had highly significant effect on the bruise susceptibility which was in order of near fruit apex >fruit middle >near fruit pedicel. The bruise susceptibility increased with the increase of impact level. The results of the orthogonal test showed that the order of the factors affecting fruit bruise susceptibility was impact level > growth location> fruit finger surface area. 【Conclusion】 The impact bruise susceptibilities were significantly different between inner and outer row layers nested in nodes within a banana bunch, and among different fruit finger surface areas.

Key words: green banana; mechanical damage; bruise susceptibility; growth location; fruit finger surface area

国家统计局数据^[1]显示,香蕉是我国排第五位的大宗水果,2019 年种植面积达 $3.303\times10^5\text{ hm}^2$,产量达 $1.1656\times10^7\text{ t}$ 。在收获时为了长途运输,必须采摘未经催熟而暂不能食用的青果,即青香蕉。青香蕉受外力碰压或摩擦易发生机械损伤。机械损伤是影响果品质量的重要因素。机械损伤既能直接降低果实的外观品质,影响消费者的购买欲望^[2],更会为某些微生物的侵染提供通道^[3],致使果实腐败交叉感染,给果农和商家造成巨大的经济损失。研究果实产生机械损伤敏感性的成因及其影响因素,探索有效的防护措施,对于确保果品质量具有重要的意义。

碰撞损伤是水果机械损伤的主要类型,其敏感性被定义为单位吸收(或碰撞)能量下的损伤体积^[4]。由于碰撞损伤敏感性的定义考虑了果实损伤中的吸收能量和损伤体积 2 个重要指标,因此被广泛地用于评价水果发生冲击损伤的可能。目前,有学者已经研究了苹果、梨、桃、番茄、猕猴桃等多种类球形水果的碰撞损伤敏感性,并揭示了相关的影响因素。这些因素既包括果实固有的物理特性(如尺寸、形状、硬度、含水率),也包含外部因素(如下落高度、碰撞能量、冲击力、冲击速度)。例如, Van Zeebroeck 等^[4]研究番茄时发现果实的碰撞损伤敏感性随其成熟度的增加而增加;番茄的温度与曲率的交互效应对其损伤敏感性存在显著影响,曲率越大、温度越低则番茄越易损伤。苹果和桃子的碰撞损伤敏感性与其成熟度之间也有类似规律^[5-6]。

除了损伤敏感性,损伤率^[7]、损伤抵抗性、损伤指数^[8]、跌落损伤指数^[9]等指标也被用于评价水果吸收(抵抗)外力致损的可能。其中损伤抵抗性的定义与损伤敏感性的定义相反^[10]。Schoorl 等^[11]发现,苹果的损伤体积与吸收能量呈强线性正

相关,于是采用损伤体积与吸收能量之间简单线性回归模型的斜率表达果实的碰撞损伤抵抗性。Hadi 等^[12]为了对油棕榈果的损伤进行分类评价,提出了损伤指数的概念,根据果实的成熟度,确定了损伤指数与游离脂肪酸(Free fatty acid, FFA)含量之间的关系。

目前有关香蕉机械损伤的研究文献很少,特别是针对青香蕉碰撞损伤敏感性的研究鲜见报道。Banks 等^[13]测量了准静态压缩下青香蕉损伤的阈值力及其随加载时间变化的规律,发现香蕉损伤敏感性随其成熟度的增加而降低,且损伤更易被辨识,同时损伤深度逐渐变浅。Akkaravessapong 等^[14]发现香蕉贮藏的相对湿度对其碰撞损伤敏感性没有显著影响。Kajuna 等^[15]利用摆式冲击的方法对比研究了贮藏时间对青香蕉与芭蕉碰撞损伤敏感性的影响,发现贮藏初期芭蕉的损伤敏感性较低,但贮藏后期其敏感性快速升高并超过香蕉。Bugaud 等^[16]从物理和化学的角度考虑,通过冲击试验揭示了基因表型和采后贮藏条件对香蕉果皮损伤阈值的影响。Maia 等^[17]验证了机械应力诱导下‘普拉塔’香蕉在室温条件下的物理和生理代谢变化。Fernando 等^[18]测量并分析了香蕉在长途运输过程道路振动对其机械损伤程度的影响,用于优化减损包装设计。

香蕉的结构特征与其他水果均不相同,本文结合青香蕉果穗的结构特点,通过嵌套和单因素试验设计,揭示梳层节点及其嵌套的排层、冲击水平和果实表面区域对果实碰撞损伤敏感性的影响;通过混合正交试验设计,揭示各因素对碰撞损伤敏感性的影响显著性以及影响主次关系。自行设计和搭建摆动冲击试验台,开展果实的碰撞损伤试验。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验装置

香蕉是一种草本植物，一棵香蕉树只结一束果穗，每束果穗一般包含 7 层果梳，每层果梳又包含内外 2 排果指，每根果指的长度依据香蕉品种的不同在 10~30 cm 之间^[19]，香蕉果穗和果实的形态和结构组成如图 1 所示^[19-21]。本文以广州本地广泛种植的巴西蕉 AAA 品种为例开展试验，在 2020 年 4 月 1 日(断蕾后第 110 天)采收果穗并运回实验室，在室温条件下通风保存至整体温度稳定。试验时，将果指保留果柄在靠近梳柄处单根取下，挑选位于蕉梳中部、颜色、大小和形状一致、无机械损伤、无病虫害的果指。将选出的果指按生长节点和内排、外排分组，用清水清洗后软布擦干。受光照、植株长势等环境因素的影响，同一束果穗不同梳层、同一梳层的内外排果指以及同一果指表面的不同区域，果指的生长状况均可能存在差异，从而影响其损伤敏感性的差异。为此，本试验重点研究梳层节点、排层和果指表面区域 3 个重要因素对果实碰撞损伤敏感性的影响。

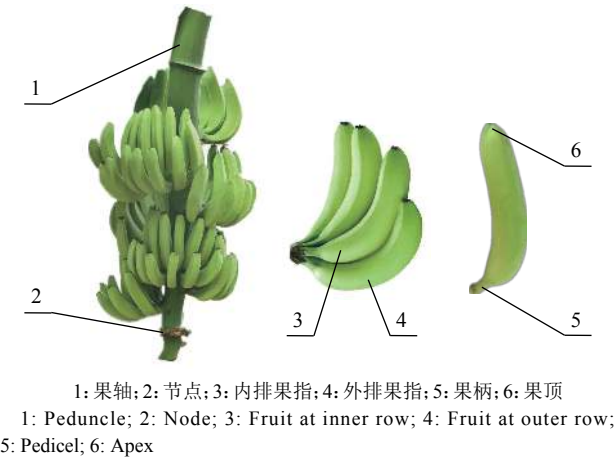


图 1 香蕉果穗和果实的形态和结构组成
Fig. 1 Morphology and structure of banana bunch and fruit

果蔬碰撞损伤试验的实施一般选用跌落或摆动冲击 2 种类型的试验装置。由于香蕉果指是条状，采用跌落试验的方式难以精准控制其表面的碰撞位置，并且果指易发生弯转，不便计算碰撞部位的吸收能量。为此，参考前人开发的试验装置^[10, 22]，设计并搭建了基于摆动冲击试验的香蕉果指碰撞损伤试验台，如图 2 所示。试验台中部的摆臂长 0.6 m，截面为 20 mm×15 mm 的实心铝合金杆；摆锤碰撞头为直径 40 mm 的木质半球；在摆臂铰链处安装了

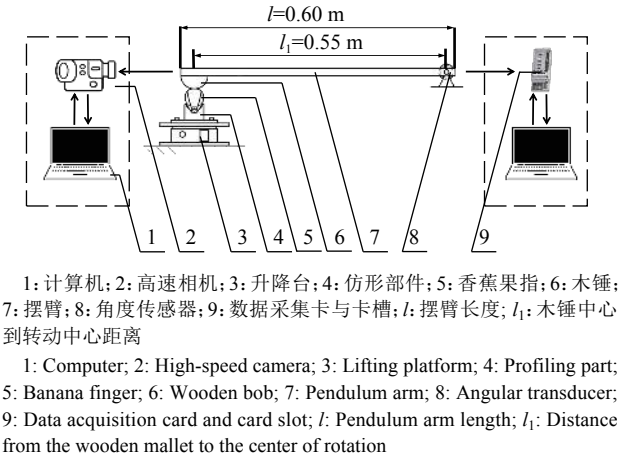


图 2 摆动冲击试验台示意图
Fig. 2 Schematic of the pendulum impact test device

一台角度传感器，用于测量摆角；试验台的整体框架选用铝合金型材搭建。试验时，香蕉果指被固定在具有升降功能的支撑平台上。为了避免果指碰撞区域外损伤，提前打印了多种规格的仿形部件，以适应香蕉接触表面的不同形态，增大接触面积。摆臂碰撞后的速度通过高速相机测量。试验台构成的主要硬件包括：高速相机(2 000 fps, Mini UX50, Photron)，数据采集卡(26.5 kHz, NI9234, National Instrument)，卡槽(cDAQ-9174, National Instrument)，角度传感器(精度 0.3%, MCJSI420A-360-38AC, 天宇恒创)，升降台(LZ80-2, 汇科)。

碰撞前，将香蕉果指试样固定于仿形部件，调节升降台以保证果指碰撞区域与木锤接触时摆臂水平。试验时，用手通过棉线将摆臂拉起，定位在设置的水平，然后自由释放，使木锤冲击在选定区域，在木锤再次冲击前用手阻挡摆臂，避免二次撞击。高速相机置于试验台一侧，平视冲击试验台，记录整个冲击过程。

1.2 试验原理

参考苹果^[23]、梨^[24]等水果敏感性的定义，本文采用单位吸收能量下的损伤体积表达香蕉的碰撞损伤敏感性，其值越大，果实越易损。

将损伤敏感性记为 S_B , cm^3/J ；损伤体积记为 V_B ，吸收能量为 ΔE ，则：

$$S_B = \frac{V_B}{\Delta E} \quad (1)$$

在评估损伤时，首先观察碰撞区域果皮的表面色态，用手触摸确定损伤的确切位置，然后将损伤区域的中间依次横切和纵切，用相机记录损伤截面。损伤的典型示例如图 3 所示。



图 3 香蕉果指不同截面损伤情况示例

Fig. 3 Illustration of bruised banana finger in different sections

用 ImageJ1.8.0 软件测量损伤部位的面积和长度, 分别记为 S 和 b 。损伤面积 S 的测量步骤如图 4 所示, 首先建立如图 4a 所示的图片标尺, 其次将图片二值化 (图 4b), 然后选择适宜亮度值划分损伤部位和健康部位 (图 4c), 计算损伤部位的面积。损伤长度 b 测量方法与损伤面积相似。

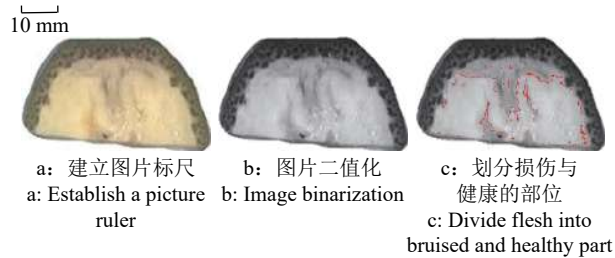


图 4 香蕉损伤面积测量方法示意图

Fig. 4 Schematic of the method for measuring bruise area on banana

在苹果^[25]、梨^[24]等多种类球形水果损伤程度的测量中, 通常将损伤部位的形状近似为半球或半椭球形, 利用切片法进行积分计算。然而, 香蕉横截面显示其损伤部位为 3 瓣状, 与其他水果的损伤形状不同。为此, 修改切片法测量损伤体积, 将损伤在 XOY 截面上的边界近似为椭圆形, 在 YOZ 截面上近似为半椭圆形, 损伤形状类似于图 5 所示。设损伤最深处 $Z(0,0)=h$, 根据椭圆公式可得 YOZ 平面的损伤边界公式近似为:

$$\frac{Z(0,y)^2}{h^2} + \frac{y^2}{(b/2)^2} = 1, \quad (2)$$

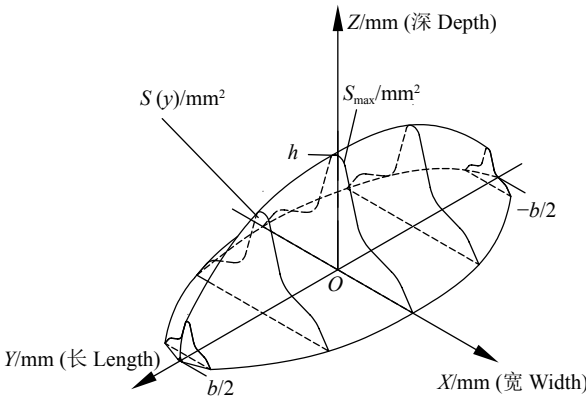
其中, $y \in (-b/2, b/2)$ 。

沿长度方向任意位置横截面的损伤面积设为 $S(y)$, 根据实际情况 $S(y)$ 在 XOZ 截面上最大, 即 $S(0)=S_{\max}$ 。可以得到:

$$S(y) = \frac{Z(0,y)}{h} S_{\max}. \quad (3)$$

通过椭圆面积公式得到损伤体积 (V_B) 公式为:

$$V_B = \frac{\pi}{4} b S_{\max}. \quad (4)$$



$S(y)$: 沿长度方向任意位置横截面的损伤面积; $S_{\max}$: 在 $y=0$ 处的 $S(y)$; b : 损伤长度; h : 损伤深度

$S(y)$: Bruise area of a cross section at any position along the length direction; $S_{\max}$: $S(y)$ at $y=0$; b : Bruise length; h : Bruise depth

图 5 用于计算损伤体积的变量示意图

Fig. 5 Schematic of the definition of the variables for calculation of bruise volume

忽略摆锤铰链处的摩擦损耗、空气阻力和试验台振动损耗, 根据能量守恒定律, 香蕉果指的吸收能量 ΔE 为摆锤冲击能量 E_1 与其反弹能量 E_2 之差, 即:

$$\Delta E = E_1 - E_2. \quad (5)$$

设摆锤的转动惯量为 J , $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 木锤质量为 m_1 , 摆臂质量为 m_2 , 木锤球径为 r , 摆臂长度为 l , 木锤质心到转动中心距离为 l_1 , 那么转动惯量为:

$$J = 0.26m_1r^2 + m_1l_1^2 + \frac{1}{3}m_2l^2. \quad (6)$$

设 ω 为摆锤的角速度, rad/s , 则钟摆的转动动能 (E) 为:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (7)$$

在进行冲击试验时, 钟摆的线速度通过高速拍照的方式测量。设高速相机摄像时相邻 2 张图片的拍摄间隔为 ΔT , 分别选出摆锤与香蕉果指临近接触和分离的相邻 2 张图片, 测量摆锤冲击和反弹的位移 X_1 和 X_2 , 用位移与间隔时间的比计算摆锤冲击和反弹的速度, 分别记为 V_1 和 V_2 :

$$\begin{cases} V_1 = X_1/\Delta T, \\ V_2 = X_2/\Delta T. \end{cases} \quad (8)$$

由于摆锤固定于摆杆上绕摆杆一端转动, 为了便于计算冲击能量, 将摆锤冲击和反弹的瞬时线速度转换为角速度, 分别记为 ω_1 和 ω_2 , 设摆锤到转动中心距离为 l_1 , 那么

$$\begin{cases} \omega_1 = V_1/l_1, \\ \omega_2 = V_2/l_1, \end{cases} \quad (9)$$

果指被撞部位的吸收能量为:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{1}{2} \left(0.26m_1r^2 + m_1l_1^2 + \frac{1}{3}m_2l^2 \right) \left[\left(\frac{X_1}{\Delta Tl_1} \right)^2 - \left(\frac{X_2}{\Delta Tl_1} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

1.3 试验设计

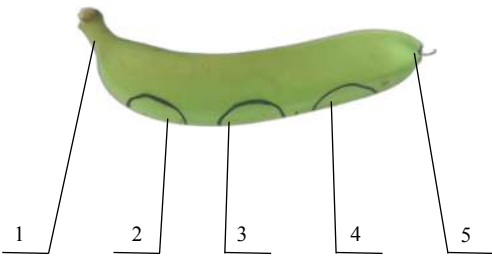
1.3.1 嵌套试验设计 香蕉一般有 7 个梳层节点, 每个节点有 2 排果指, 由于每一梳香蕉生长节点对应内外 2 排果指, 不同节点对应的内排或外排果指无法交叉。为了确定一级因素梳层节点 (*A*) 和二级因素排层 [*B*(*A*)]2 个因素对果指碰撞损伤敏感性的影响, 梳层节点和排层采用二级因素嵌套设计。梳层节点设为 7 个水平, 排层为内、外 2 排 2 个水平, 试验因素和水平如表 1 所示。每个嵌套组合重复 5 次, 整个试验在 24 h 内完成, 碰撞完成的样本在 22 ℃ 的室内条件下储存 24 h, 使损伤特征充分显现。

表 1 嵌套试验因素和水平
Table 1 Nested test factors and levels

水平 Level	梳层节点(<i>A</i>) Node	排层[<i>B</i> (<i>A</i>)] Row
1	首梳(<i>A</i> ₁) The first node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₁)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₁)] Inner row
2	第2梳(<i>A</i> ₂) The second node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₂)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₂)] Inner row
3	第3梳(<i>A</i> ₃) The third node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₃)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₃)] Inner row
4	第4梳(<i>A</i> ₄) The fourth node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₄)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₄)] Inner row
5	第5梳(<i>A</i> ₅) The fifth node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₅)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₅)] Inner row
6	第6梳(<i>A</i> ₆) The sixth node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₆)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₆)] Inner row
7	尾梳(<i>A</i> ₇) The last node	外排[<i>B</i> ₁ (<i>A</i> ₇)] Outer row
		内排[<i>B</i> ₂ (<i>A</i> ₇)] Inner row

1.3.2 单因素试验设计 香蕉果指较长, 不同位置的损伤敏感性可能存在显著差异。为了检验果指表

面区域对损伤的敏感性, 从果指表面区域等间距选 3 个水平, 即近果柄端、果指中部和近果顶端, 如图 6 所示。前人研究^[24-25]发现冲击水平是一种对水果碰撞损伤敏感性影响显著的因素, 为了选取合适的冲击能量, 在预试验中对果指中部开展了 10°、15°、20°、35°和 50°多种摆角下的系列碰撞, 静置 24 h 后发现: 当摆角低于 15°时, 果指上几乎没有损伤显现; 当摆角为 20°时, 可在果指上观察到小于 1 cm² 的不明显机械损伤; 当摆角为 35°时, 发现约 1 cm² 的较明显损伤; 当摆角为 50°时, 发现大于 1 cm² 但小于 2 cm² 的明显损伤。青香蕉品质分级标准^[21]指出, 若果指存在机械伤则被定为优等品以下 (一等品、二等品或劣等品)。根据预试验结果, 并结合青香蕉品质分级标准, 本文选择了 20°、35°和 50° 3 种摆角, 对应的冲击能量分别为 0.52、0.88 和 1.17 J, 研究果指表面区域和冲击水平 2 个因素对果指碰撞损伤敏感性的影响, 每种处理重复 7 次。整个试验在 24 h 内完成, 碰撞完成的样本放置在 22 ℃ 的室内条件下储存 24 h, 以使损伤特征充分显现。



1: 果柄; 2: 近果柄端; 3: 果指中部; 4: 近果顶端; 5: 果顶
1: Pedicel; 2: Near fruit pedicel; 3: Fruit middle; 4: Near fruit apex; 5: Apex

图 6 香蕉果指表面被撞位置标记示例
Fig. 6 Illustration of the impact zones on a banana finger

1.3.3 正交试验设计 为进一步探究各因素对冲击损伤敏感性影响的显著性以及影响的主次关系, 在嵌套试验和单因素试验基础上, 开展了混合正交试验。根据嵌套试验的结果, 将 *B*(*A*) 因素的 14 个水平分为 4 组 (见“2.1”节), 因素记为生长位置, 编号 *B'*。正交试验因素水平表见表 2, 每种处理重复 5 次。

1.4 统计分析

所有数据用 Office excel 2016 软件记录; 用 Origin 2018 软件绘图; 统计分析时, 先用 IBM SPSS Statistics 22.0 对数据的正态性和方差齐性进行检验, 然后通过方差分析 (ANOVA) 进行显著性检验, 选用 Duncan’s 法对同一因素各水平间的均值进行多重比较。数据结果用平均值±标准差表示。

表 2 正交试验因素和水平
Table 2 Orthogonal test factors and levels

水平 Level	生长位置(B') Growth location	果指表面区域(C) Fruit surface area	冲击水平(D/J) Impact level
1	B ₁ '	近果柄端 Near fruit pedicel	低水平 (0.52) Low level
2	B ₂ '	果指中部 Fruit middle	中水平 (0.88) Medium level
3	B ₃ '	近果顶端 Near fruit apex	高水平 (1.17) High level
4	B ₄ '		

2 结果与分析

2.1 嵌套试验

一级因素梳层节点各水平下的损伤敏感性服从正态分布, 首梳至尾梳各水平下 P 值依次为 0.33、0.79、0.45、0.63、0.46、0.09, 且方差齐性检验结果为 $P=0.10$ 。二级因素排层 (梳层节点) 各水平下的损伤敏感性服从正态分布, 首梳外排至尾梳内排各水平下 P 值依次为 0.39、0.19、0.54、0.46、0.63、0.09、0.67、0.58、0.31、0.25、0.25、0.53、0.85、0.89, 且方差齐性检验结果为 $P=0.09$ 。

香蕉果指生长位置嵌套试验的方差分析结果显示, 一级因素梳层节点间和二级因素排层 (梳层节点) 间的 F 值分别为 0.17 和 6.94, P 值分别为 0.98 和 0.00, 表明一级因素梳层节点对果指碰撞损伤敏感性影响不显著; 二级因素排层 (梳层节点) 间的果指碰撞损伤敏感性差异显著。

为了进一步比较 7 个梳层节点内外 2 排不同水平间果指碰撞损伤敏感性的均值, 利用 Duncan's 法对其进行多重比较, 结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 果指损伤敏感性的均值为 1.06~1.34; 同一梳层内排果指的损伤敏感性的均值总比外排果指的高。根据 7 个梳层节点内外 2 排不同水平间果指损伤敏感性均值的多重比较结果, 可以将一条果穗 14 层不同生长位置的香蕉果指分为 4 组处理: 第 1 组包括首梳内排、第 5 梳内排、第 4 梳内排、第 2 梳内排、第 3 梳内排、第 7 梳外排、第 7 梳内排、第 6 梳内排、第 5 梳外排和第 4 梳外排; 第 2 组包括第 7 梳外排、第 7 梳内排、第 6 梳内排、第 5 梳外排、第 4 梳外排和第 3 梳外排; 第 3 组包括第 7 梳内排、第 6 梳内排、第 5 梳外排、第 4 梳外排、第 3 梳外排和第 6 梳外排; 第 4 组包括第 6 梳内排、第 5 梳外排、第 4 梳外排、第 3 梳外排、第 6 梳外排、第 2 梳外排和首梳外排。这种差异可能与果指的弯曲程度有关。香蕉果指总体向上生长, 外排果指受到内排果指的影响, 只能先水平再向上生长, 所以内排果指的曲率半径总比外排果指的大, 图 1a 与图 1b 较好地展现了这一点。Abedi 等^[26]的研究结果表明, 当冲击水果的冲击能量超过 0.24 J 时,

表 3 不同生长位置香蕉果指碰撞损伤敏感性均值的多重比较结果¹⁾

Table 3 Multiple comparisons of average bruise susceptibility of banana finger at various growth positions

梳层节点(A) Node	排层[B(A)] Row	损伤敏感性/ (cm ³ ·J ⁻¹) Bruise susceptibility
首梳(A ₁) The first node	外排[B ₁ (A) ₁] Outer row	1.06 ± 0.03d
	内排[B ₂ (A) ₁] Inner row	1.34 ± 0.08a
第2梳(A ₂) The second node	外排[B ₁ (A) ₂] Outer row	1.07 ± 0.09d
	内排[B ₂ (A) ₂] Inner row	1.31 ± 0.07a
第3梳(A ₃) The third node	外排[B ₁ (A) ₃] Outer row	1.15 ± 0.07bcd
	内排[B ₂ (A) ₃] Inner row	1.31 ± 0.07a
第4梳(A ₄) The fourth node	外排[B ₁ (A) ₄] Outer row	1.19 ± 0.05abcd
	内排[B ₂ (A) ₄] Inner row	1.32 ± 0.09a
第5梳(A ₅) The fifth node	外排[B ₁ (A) ₅] Outer row	1.19 ± 0.16abcd
	内排[B ₂ (A) ₅] Inner row	1.32 ± 0.07a
第6梳(A ₆) The sixth node	外排[B ₁ (A) ₆] Outer row	1.13 ± 0.10cd
	内排[B ₂ (A) ₆] Inner row	1.21 ± 0.02abcd
尾梳(A ₇) The last node	外排[B ₁ (A) ₇] Outer row	1.29 ± 0.08ab
	内排[B ₂ (A) ₇] Inner row	1.22 ± 0.07abc

1) 冲击能量为 1.17 J; 冲击位置为果指中部; 表中数据为平均值±标准差; 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

1) The impact energy is 1.17 J; Impact position is the finger middle; Data in the table are means±standard deviations; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

果实接触的曲率半径越大, 其损伤敏感性越高, 这与本文的试验结果是一致的。

2.2 单因素试验

2.2.1 果指表面区域对碰撞损伤敏感性的影响
为研究果指表面区域对损伤敏感性的影响, 从果指的凸起部分沿其生长方向等间距选取 3 个区域, 分

别记为近果柄端、果指中部和近果顶端，用低水平 (0.52 J) 的冲击能量对相同生长位置的香蕉进行碰撞，果指表面区域单因素试验结果如图 7 所示。

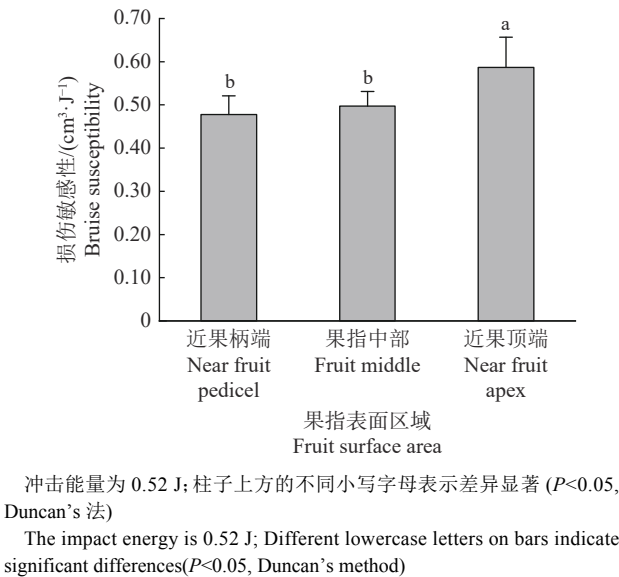


图 7 外排香蕉果指不同表面区域的损伤敏感性
Fig. 7 Bruise susceptibility of different surface positions of the banana finger in the outer row

果指表面区域 3 种水平下的损伤敏感性的正态性检验显著，近果柄端水平下 $P=0.07$ ；果指中部水平下 $P=0.23$ ；近果顶端水平下 $P=0.60$ 。方差齐性检验显著， $P=0.14$ 。

近果柄端、果柄中部和近果顶端的损伤敏感性分别为 0.48、0.50 和 0.59 cm^3/J ，其损伤敏感性沿着果指生长方向逐渐增加。近果顶端的损伤敏感性与其他 2 个区域差异显著。果指中部与近果柄端的损伤敏感性无显著差异。

统计香蕉果指的形态发现，香蕉果指从果柄至果指中部区域弯曲较大，从果指中部至果顶几乎不弯曲或弯曲较小，说明果指的曲率半径从近果柄端到近果顶端依次增加，图 6 也很好地证实了这一点。先前的研究发现，水果的曲率半径越小，在低水平冲击下越易损伤^[27]。然而，Abedi 等^[26]发现当冲击水平超过 0.24 J 时，撞击区域的曲率半径越大，水果的损伤程度越大，其损伤敏感性反而越高，本文的试验结果也很好地证明了这一点，即曲率半径对水果的碰撞损伤敏感性扮演了双重角色。Bugaud 等^[16]在研究贮藏条件与基因型对香蕉损伤敏感性影响的研究中发现，香蕉损伤敏感性与其硬度负相关。为了揭示造成香蕉果指不同区域损伤敏感性显著差异的机理，我们将在今后的研究中进一步证实。

2.2.2 冲击水平对碰撞损伤敏感性的影响 为了研究冲击水平对香蕉果指碰撞损伤敏感性的影响，选择相同生长位置的香蕉，对香蕉果指的近果顶端施加 3 种水平的冲击：低水平 (0.52 J)、中水平 (0.88 J) 和高水平 (1.17 J)。3 种冲击水平下的损伤敏感性正态性检验显著，低水平下 $P=0.83$ ，中水平下 $P=0.27$ ，高水平下 $P=0.43$ ；方差齐性检验显著， $P=0.91$ 。

损伤敏感性随冲击水平变化的结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出，香蕉果指碰撞损伤敏感性在 3 种冲击水平下分别为 0.52、0.95 和 1.35 cm^3/J ，随冲击水平的增加而显著增加。这个结果与先前其他水果碰撞损伤敏感性的规律是一致的。Van Zeebroeck 等^[4]用钟摆冲击的方式研究了番茄碰撞损伤的敏感性，发现被撞部位吸收的能量随冲击水平的提升而增加，即果实损伤的敏感性也在增加。Du 等^[28]通过自由下落试验与有限元分析的方法研究猕猴桃的碰撞损伤敏感性时也有类似发现。所以，在香蕉采收或采后处理时需尽量降低果实冲击，以保证果实质量。

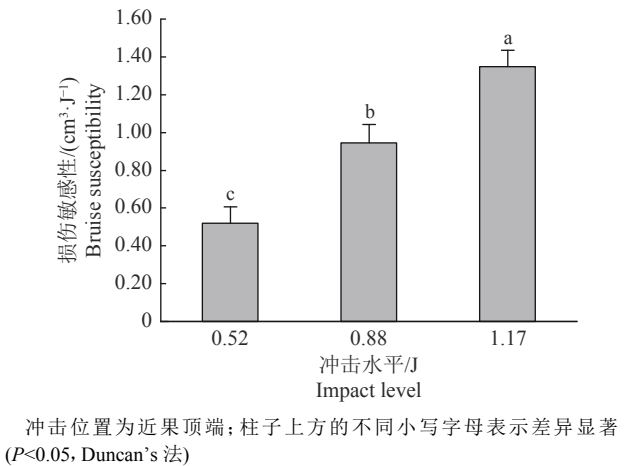


图 8 不同冲击水平下香蕉内排果指近果顶端的损伤敏感性
Fig. 8 Bruise susceptibility near apex of the banana finger in the inner row under different impact levels

2.3 正交试验

正交试验结果如表 4 所示，方差分析如表 5 所示。

根据表 4 极差分析可知，影响香蕉果指损伤敏感性的主次顺序为：冲击水平>生长位置>果指表面区域；表 5 的正交试验方差分析结果显示，冲击水平、生长位置、果指表面区域对香蕉果实损伤敏感性影响极显著 ($P<0.01$)。

表 4 正交试验方案及结果¹⁾

Table 4 The scheme and result of orthogonal test

编号 No.	生长位置(<i>B'</i>) Growth location	果指表面区域(<i>C</i>) Fruit surface area	空列 Null column	冲击水平(<i>D</i>) Impact level	空列 Null column	损伤敏感性/(cm ³ ·J ⁻¹) Bruise susceptibility
1	4	3	1	1	1	0.52
2	4	2	2	2	2	0.84
3	4	1	3	3	3	1.16
4	4	3	4	1	4	0.53
5	3	3	2	3	4	1.19
6	3	2	1	1	3	0.53
7	3	1	4	1	2	0.48
8	3	3	3	2	1	0.97
9	2	3	3	1	2	0.57
10	2	2	4	3	1	1.18
11	2	1	1	2	4	0.93
12	2	3	2	1	3	0.52
13	1	3	4	2	3	1.03
14	1	2	3	1	4	0.54
15	1	1	2	1	1	0.50
16	1	3	1	3	2	1.37
<i>k</i> ₁	0.76	0.77	0.84	0.52	0.79	
<i>k</i> ₂	0.79	0.77	0.76	0.94	0.82	
<i>k</i> ₃	0.80	0.84	0.81	1.23	0.81	
<i>k</i> ₄	0.86		0.80		0.80	
<i>R</i>	0.10	0.07	0.08	0.71	0.03	

因素排列 Sequence of factors *D>B'>C*

1): *k*₁~*k*₄ 分别是碰撞损伤敏感性在不同因素和水平下的总和平均值, *R*为极差

1): *k*₁~*k*₄ are the total average value of bruise susceptibility under different factors and levels, *R* is range

表 5 正交试验方差分析

Table 5 Variance analysis of orthogonal test

变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	离差平方和 Sum of squares of deviations	平均离差平方和 Sum of squares of mean deviations	<i>F</i>	<i>P</i> ¹⁾
生长位置(<i>B'</i>) Growth location	3	0.11	0.04	7.37	0.00**
果指表面区域(<i>C</i>) Fruit surface area	2	0.09	0.05	9.28	0.00**
冲击水平(<i>D</i>) Impact level	2	7.12	3.56	724.12	0.00**
误差 Error	72	0.36	0.01		
总和 Sum	80	59.31			

1) “**” 表示显著性达到*P*<0.01的水平

1) “**” indicates the significance at *P*<0.01 level

3 结论

1) 嵌套试验结果表明: 香蕉果指的碰撞损伤敏感性从首梳节点到尾梳节点无显著性差异, 而同梳节点嵌套的内外 2 排果指的损伤敏感性差异显著, 从首梳至尾梳内排果指的损伤敏感性逐渐增加, 而外排果指的损伤敏感性与此相反; 多重比较结果显示, 根据显著性水平, 可以将节点嵌套排层的 14 种水平分为 4 组处理。

2) 单因素试验结果表明: 果指表面区域和冲击水平对其碰撞损伤敏感性影响极显著, 其中近果顶端的损伤敏感性明显高于果指中部和近果柄端, 而果指中部和近果柄端的损伤敏感性无显著差异; 损伤敏感性随冲击水平的升高而增加。

3) 正交试验结果表明: 影响损伤敏感性各因素的主次顺序为冲击水平>生长位置>果指表面区域。

本文揭示了适收期内青香蕉果穗的梳层节点、

嵌套的排层、果指表面区域和冲击水平对果实碰撞损伤敏感性的影响,初步分析了相关的原因,但对造成显著差异机理层面的解释还存在不足,将在后续的研究中进一步证实。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 年度数据: 香蕉产量 [EB/OL].[2021-07-03]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.

[2] 王南南. 基于高光谱成像技术的多指标综合决策香蕉品质等级研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

[3] 邓理, 侯义龙, 陈立东, 等. 香蕉机械伤的初步研究[J]. 北方园艺, 2002(1): 48-50.

[4] VAN ZEEBROECK M, VAN LINDEN V, DARIUS P, et al. The effect of fruit properties on the bruise susceptibility of tomatoes[J]. Postharvest Biology & Technology, 2007, 45(2): 168-175.

[5] DIENER R G, ELLIOTT K C, NESSELROAD P E, et al. Bruise energy of peaches and apples[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(2): 287-290.

[6] HUNG Y C, PRUSSIA S E. Effect of maturity and storage time on the bruise susceptibility of peaches (CV. red globe)[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1368-1373.

[7] OPARA L U. Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date[J]. Postharvest Biology & Technology, 2007, 43(1): 47-54.

[8] BLAHOVEC J, MARES V. Approximation of bruise spot volume in pears in plots against deformation parameters[J]. Research in Agricultural Engineering, 2003, 49(2): 50-55.

[9] MENESATTI P, PAGLIA G. pH—postharvest technology: Development of a drop damage index of fruit resistance to damage[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(1): 53-64.

[10] BAJEMA R W, HYDE G M. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1399-1405.

[11] SCHOORL D, HOLT J E. Bruise resistance measurements in apples[J]. Journal of Texture Studies, 1980, 11(4): 389-394.

[12] HADI S, AHMAD D, AKANDE F B. Determination of the bruise indexes of oil palm fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(2): 322-326.

[13] BANKS N H, BORTON C A, JOSEPH M. Compression bruising test for bananas[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1991, 56(2): 223-226.

[14] AKKARAVESSAPONG P, JOYCE D C, TURNER D W. The relative humidity at which bananas are stored or

ripened does not influence their susceptibility to mechanical damage[J]. Scientia Horticulturae, 1992, 52(3): 265-268.

[15] KAJUNA S T A R, BILANSKI W K, MITTAL G S. Response of bananas and plantains to impact forces[J]. Journal of Texture Studies, 1997, 28(1): 71-85.

[16] BUGAUD C, OCRISSE G, SALMON F, et al. Bruise susceptibility of banana peel in relation to genotype and post-climacteric storage conditions[J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 87: 113-119.

[17] MAIA V M, SALOMAO L, SIQUEIRA D L, et al. Physical and metabolic alterations in "Prata Anã" banana induced by mechanical damage at room temperature[J]. Scientia Agricola, 2011, 68(1): 31-36.

[18] FERNANDO I, FEI J, STANLEY R. Measurement and analysis of vibration and mechanical damage to bananas during long-distance interstate transport by multi-trailer road trains[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158: 110977.

[19] 中华人民共和国农业部. 青香蕉: NY/T 517—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[20] 国家技术监督局. 香蕉: GB/T 9827—1988 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.

[21] 中华人民共和国农业部. 香蕉等级规格: NY/T 3193—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[22] FU H, HE L, MA S, et al. 'Jazz' apple impact bruise responses to different cushioning materials[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(2): 327-336.

[23] 关济雨. 基于光学特性的水果损伤敏感性预测评估[D]. 无锡: 江南大学, 2016.

[24] KOMARNICKI P, STOPA R, SZYJEWICZ D, et al. Evaluation of bruise resistance of pears to impact load[J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 114: 36-44.

[25] CELIK H K, USTUN H, ERKAN M, et al. Effects of bruising of 'Pink Lady' apple under impact loading in drop test on firmness, colour and gas exchange of fruit during long term storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 179: 111561.

[26] ABEDI G, AHMADI E. Bruise susceptibilities of Golden Delicious apples as affected by mechanical impact and fruit properties[J]. Journal of Agricultural Science, 2014, 152(3): 439-447.

[27] AHMADI E, GHASSEMZADEH H R, SADEGHI M, et al. The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(1): 110-117.

[28] DU D, WANG B, WANG J, et al. Prediction of bruise susceptibility of harvested kiwifruit (Actinidia chinensis) using finite element method[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 152: 36-44.