

荔枝采后贮运品质变化研究

王立军¹, 胡峻星¹, 宋海燕¹, 周浩^{2*}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2.深圳职业技术大学 数字传媒学院, 广东 深圳 518055)

摘要: **目的** 研究振动强度、贮藏条件对不同品种荔枝品质变化的影响。**方法** 以“妃子笑”和“黑叶”品种荔枝为对象,对荔枝3层堆码包装分别进行3个等级(0.40g、0.54g、0.70g)的随机振动试验,设置常温和低温高湿(4℃和90%相对湿度)2种贮藏条件,监测果实振后的品质变化。**结果** 首先,振动加速了荔枝品质的下降。与对照组相比,荔枝振后褐变更严重,果肉硬度、VC含量更低,质量损失率和呼吸强度更高。其次,振动等级对荔枝品质变化具有显著影响。振动等级越高,褐变现象越严重,硬度和VC含量更低,质量损失率更高。再次,贮藏条件是影响荔枝品质的重要因素。低温高湿贮藏能有效抑制荔枝的褐变和代谢,延长货架期。最后,不同品种荔枝的特性与品质变化差异较大,“妃子笑”展现出更为优越的抗振性能,其褐变程度更低,具有更好的力学性能和生理性能。**结论** 振动对荔枝的褐变和品质变化具有明显的加速作用,运输和贮藏条件对荔枝品质影响较大,不同品种荔枝特性和抗振性能差异较大,物流运输过程应考虑以上因素,采取相应的采后减损措施。

关键词: 荔枝; 振动; 贮藏条件; 品质变化

中图分类号: TB489

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0107-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.013

Investigation on Postharvest Quality Changes of Litchi

WANG Lijun¹, HU Junxing¹, SONG Haiyan¹, ZHOU Hao^{2*}

(1. School of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Digital Media, Shenzhen Polytechnic University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of vibration intensity and storage conditions on the quality of different varieties of litchi. "Feizixiao" and "Heiye" litchi varieties were selected as subjects, and the three layers of litchi packaging were subject to random vibration tests (0.40g, 0.54g, 0.70g), and the storage conditions were set at room temperature and low temperature and high humidity (4℃ and 90% relative humidity), and then the quality changes of fruit after vibration were monitored. Firstly, vibration accelerated the quality decline of litchi. Compared with the control group, for the litchi after vibration, the browning change was serious, the flesh hardness and VC content were lower and the weight loss rate and respiratory intensity were higher. Secondly, the vibration level had a significant effect on the quality of litchi. The higher the vibration level, the more serious the browning phenomenon, the lower the hardness and VC content, and the higher the weight loss rate. Thirdly, storage condition was an important factor affecting the quality of litchi. Low temperature and high humidity storage can effectively inhibit the browning and metabolism of litchi and prolong the shelf life. Finally, the characteristics and quality changes of different varieties of litchi were different. "Feizixiao"

收稿日期: 2025-02-05

基金项目: 广东省教育厅重点领域专项项目(2021ZDZX4086)

*通信作者

showed better vibration resistance, lower browning degree, and better mechanical and physiological properties. Vibration can accelerate the browning and quality change of litchi, transport and storage conditions have great effect on the quality of litchi, and the characteristics and vibration resistance of different litchi varieties are different. The above factors should be considered in the process of logistics transportation, and corresponding measures should be taken to reduce the postharvest loss.

KEY WORDS: litchi; vibration; storage conditions; quality change

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn) 为非呼吸跃变型水果, 我国是荔枝产业第一大国^[1]。荔枝果实虽营养丰富却存在明显的采后劣变问题, 夏季高温采摘后果皮因多孔结构易失水褐变, 而物流运输中的机械振动则会加剧果实的破损与腐烂, 严重影响其商品价值。

研究表明, 物流振动损伤主要源于运输车辆动力系统传递的随机振动信号, 其强度与车型^[2]、车辆减振装置^[3-4]、路况^[5]等因素有关。振动参数中, 振动时间^[6]、振动频率^[7-8]、振动强度^[9]以及谱型^[10-12]等因素的影响较大。水果损伤与振动时间、振动等级呈正相关关系, 桃子^[13]、柿子^[14]、苹果^[15]等水果损伤差异较大, 存在品种特异性差异。振动频率对水果损伤的影响与共振频率密切相关, 共振放大了传递到水果上的能量, 引起较为严重的机械损伤。Wang 等^[16]的研究证明, 振动激励谱型对皇冠梨机械损伤有较大影响。

针对荔枝采后品质变化, 众多学者进行了深入研究。褐变是荔枝品质表征的重要指标, 主要分为酶促褐变和非酶促褐变^[17]。诱发果皮褐变的因素很多, 如失水、温度变化、机械损伤、病菌侵染等^[18], 现有研究多聚焦温度、保鲜方式对褐变指标的影响^[19-22]。除以上因素, 振动也严重影响荔枝品质, 但振动胁迫处理下荔枝品质变化目前鲜有报道。本文创新性构建 3 层堆码荔枝包装系统, 探究振动参数、贮藏温度及品种特性对果实品质的作用机制, 为荔枝的运输、保鲜、贮藏等提供理论支持和技术参考。

1 试验

1.1 材料与仪器

试验荔枝品种为“妃子笑”(TCS)和“黑叶”(BL), 产自深圳市, 于成熟期采摘, 挑选尺寸相近、颜色均匀、果皮无褐变、无病虫害、无损伤的果实进行振动试验。荔枝采用 3 层 E 楞瓦楞纸箱包装(300 mm×240 mm×95 mm), 每箱荔枝个数为 90~100。设置 3 层荔枝堆码包装简要模拟实际运输情况, 采用弹性绳将包装固定在振动台上, 见图 1。

主要仪器: DL-3000-40 型电磁式振动台, 苏州苏试试验集团股份有限公司; WSC-S 色差仪, 上海精密仪器仪表有限公司; TA.XT PlusC 质构仪, 厦门超技仪器设备有限公司; SW-32D 数显糖度计, 广州市速为电子科技有限公司; PBI Dansensor Check-

Mate9900 气体分析仪, 英肖仪器仪表(上海)有限公司; AL204 电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; ETH-150-40-CP-AR 恒温恒湿箱, 巨孚仪器(北京)有限公司。



图 1 3 层荔枝堆码包装系统
Fig.1 Packaging system of three layers of litchi

1.2 方法

1.2.1 振动试验

设置室温(P1)和 4℃、相对湿度 90%(P2)2 种贮藏条件, 并设置未经振动胁迫处理的对照组(CK)作为对比。分别在上述 2 种温湿度条件下对 2 个品种的 3 层荔枝堆码包装进行随机振动试验。以 ASTM D4169 标准卡车谱作为激励谱^[23], 振动等级(G_{rms})分别为 0.40g、0.54g 和 0.70g, 振动时间为 3 h。ASTM D4169 标准卡车谱的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)曲线见图 2。振后保持各组温湿度不变贮藏荔枝, P1 和 P2 条件下分别每隔 1 d 和 2 d 对荔枝的品质变化进行监测。测试指标中, 由于呼吸强度计算时需要一定的贮藏时间, 从 0.25 d 起算, 以振动试验结束后作为 0 d 开始测量其余质量指标。

1.2.2 荔枝品质变化测量

1.2.2.1 褐变指数

荔枝果皮褐变指数(Browning Index, BI)参照 Zhang 等^[24]的方法进行测定。从荔枝样品中随机选取 20 颗进行统计分析, 其褐变分级标准如下: 1 级果无

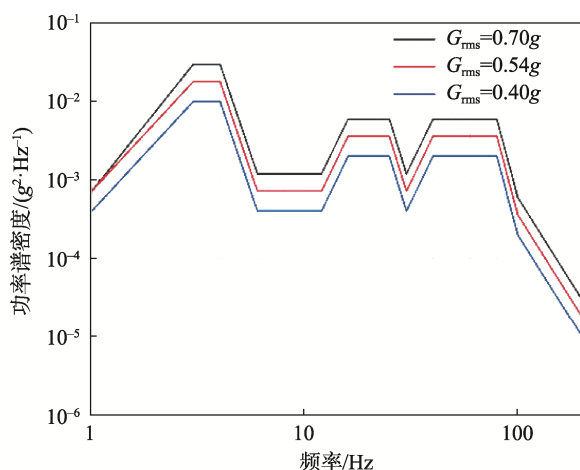


图 2 ASTM D4169 标准卡车谱的 PSD 曲线
Fig.2 PSD curve of ASTM D4169 standard truck spectrum

褐变或褐变面积小于果皮面积的 1/4; 2 级果褐变面积占果皮面积 1/4~1/2; 3 级果褐变面积占果皮面积 1/2~3/4; 4 级果褐变面积大于果皮面积的 3/4; 5 级果为完全褐变。褐变指数的计算见式 (1)。

$$B_1 = \frac{\sum(a \times n)}{N} \quad (1)$$

式中: B_1 为褐变指数; a 为褐变级数; n 为各级褐变果数; N 为调查果实总数。

1.2.2.2 荔枝表皮色度

随机选取 3 颗荔枝果实样品进行色度测试, 通过色差仪测定荔枝果皮赤道面 2 个对称点的 L^* (亮度)、 a^* (红绿色度值)、 b^* (蓝黄色度)。取 2 对对称点进行测量, 测量过程重复 3 次取平均值, 取 3 个样品的色度平均值作为测量值。

1.2.2.3 质量损失率

随机选取 3 颗荔枝果实样品, 通过电子天平称量其质量^[19], 取 3 个样品的平均值作为该次测量的质量损失率。质量损失率 W_L 的计算见式 (2)。

$$W_L = \frac{m - m'}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为荔枝初始质量; m' 为荔枝当前所测质量。

1.2.2.4 硬度

随机选取 3 颗荔枝果实样品进行果肉硬度测定。在样品最大横径处选对角位置切去 1 cm² 的果皮, 用质构仪测定去皮处的果肉硬度, 取对角 2 个位置处的果肉硬度平均值作为该样品的硬度值, 以 3 个样品的平均值作为该次的测量值。

1.2.2.5 呼吸强度

果实呼吸强度参照蒋依辉等^[25]的方法, 测量振动后不同贮藏条件下不同品种荔枝的呼吸强度。将荔枝样品放入罐内进行密封贮藏, 分别在 P1 和 P2 条件下通过气体测试仪测定罐内 CO₂ 和 O₂ 浓度, 每次测量重复 3 次, 取平均值。

1.2.2.6 抗坏血酸含量

荔枝果皮抗坏血酸 (VC) 含量参照李晓琴^[26]的方法, 用 2,6-二氯酚靛酚滴定法进行测量。每次测量重复 3 次, 取其平均值。

1.3 数据处理

采用 Origin 2024b 处理相关图形, 采用 SPSS 27 进行数据相关性分析。

2 结果与分析

2.1 振后荔枝果皮色差及褐变指数变化

2.1.1 色度指标变化

色度反映荔枝采后果实色泽的变化, 是荔枝果实品质的重要参数。色度指标 L^* 和 a^* 可以用来定量描述果皮颜色的变化程度。2 种荔枝在 P1 和 P2 条件下 L^* 与 a^* 随贮藏时间的变化见图 3, 可见荔枝采后的 L^* 和 a^* 随着贮藏时间的延长逐渐降低, 表明荔枝果皮逐渐变暗, 红色色泽逐渐褪去。对照组荔枝果皮的 a^* 明显高于振动胁迫处理试验组, 表明振动胁迫处理加速荔枝果皮色泽的变化。不同振动等级下, 0.40g 时荔枝的 a^* 最大, 0.54g 时次之, 0.70g 时最小, 可见振动等级越高对荔枝造成的机械损伤越大, 从而加重果皮色泽劣化程度, 而低温高湿贮藏条件可有效延缓果皮变暗的速度。“妃子笑”荔枝的 a^* 高于“黑叶”, 表明“妃子笑”果皮色泽更优。经过振动胁迫处理, 不同温度下“妃子笑”“黑叶”荔枝的 L^* 和 a^* 均低于对照组 ($P < 0.05$)。

2.1.2 褐变指数

BI 值用来量化荔枝果皮的褐变程度, 该值越大表明褐变现象越严重。图 4 为不同贮藏条件下和不同振动等级下“妃子笑”和“黑叶”荔枝的 BI 值随贮藏时间的变化。结果显示, 品种对荔枝振后褐变现象影响较大, “黑叶”荔枝比“妃子笑”的果皮褐变现象更加严重。P1 条件下, 振动等级对 BI 值的影响均表现出显著性差异 ($P < 0.05$); P2 条件下, 在 0.40g、0.54g 和 0.70g 振动等级下, 品种对 BI 值的影响分别在第 4 天和第 6 天出现显著性差异 ($P < 0.05$)。相同贮藏条件和振动等级下, “黑叶”荔枝的 BI 值高于“妃子笑”。P1 条件下, “黑叶”荔枝在 4 d 时 BI 值为 0.88, 而“妃子笑”荔枝在 5 d 时 BI 值为 0.87, 低于“黑叶”。P2 条件下, 8 d 时“黑叶”荔枝 BI 值为 0.86, 12 d 时“妃子笑”荔枝 BI 值为 0.8, 也低于“黑叶”。

振动等级以及温湿度对荔枝 BI 值具有显著影响。与对照组相比, 经振动胁迫处理的荔枝 BI 值更高, 并且 BI 值与振动等级呈正相关关系, 随着振动等级的提高而增加。与 P1 相比, P2 条件下荔枝的货架期明显延长。贮藏过程中, 荔枝果实表皮变化如图 5 所示。

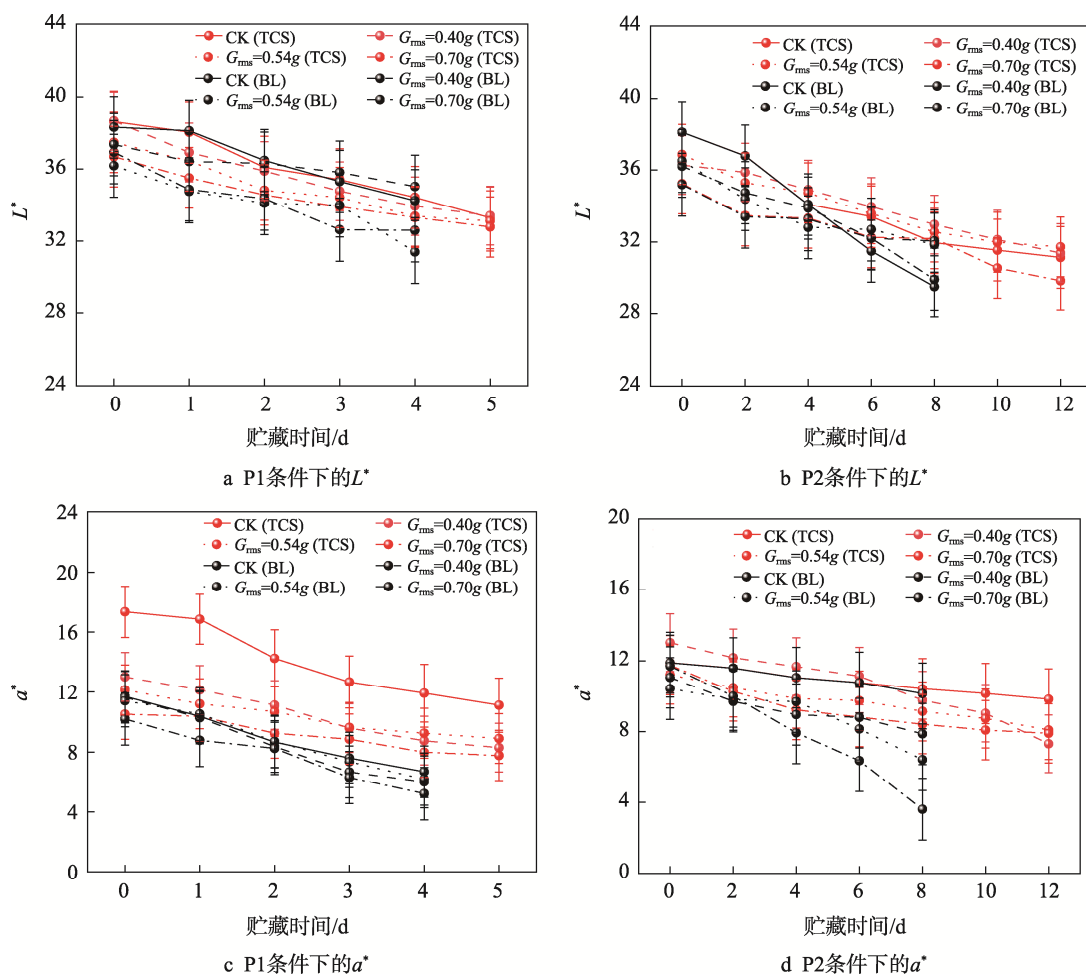


图3 2种荔枝在P1和P2条件下 L^* 与 a^* 随贮藏时间的变化
Fig.3 Changes of L^* values and a^* values of 2 varieties of litchi with storage time under P1 and P2 conditions

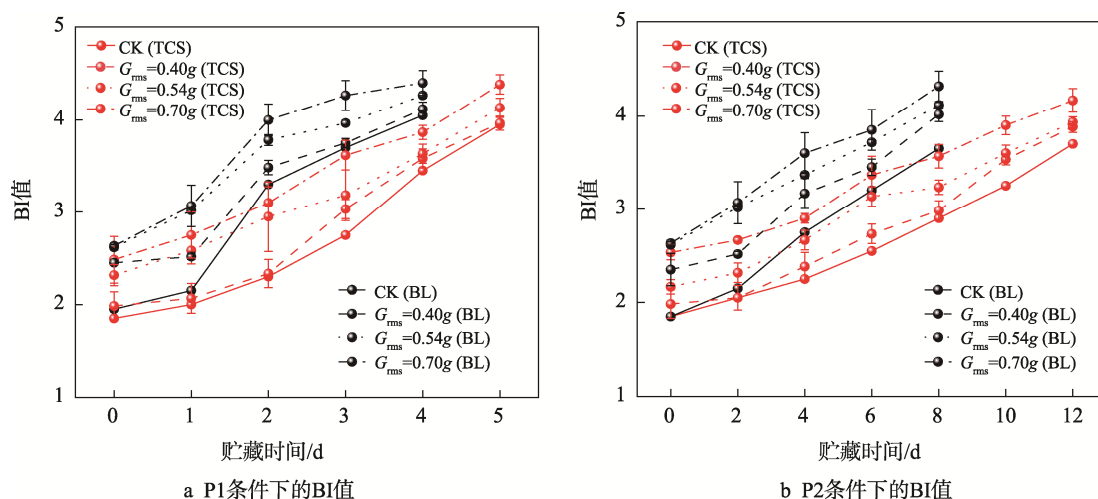


图4 2种荔枝在P1和P2条件下BI值随贮藏时间的变化
Fig.4 Changes of BI value with storage time of 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

2.2 振后荔枝物理及力学性能变化

2.2.1 质量损失率

振动会对荔枝造成一定程度的机械损伤,破坏荔枝果皮及果肉组织,引起水分流失。质量损失率可用

来描述荔枝的含水量,是影响荔枝新鲜度和口感的重要指标之一。振动胁迫处理的荔枝质量损失率变化如图6所示。随着贮藏时间的延长,荔枝质量损失率逐渐增加。品种、振动等级以及贮藏条件都会影响荔枝的质量损失率。与对照组相比,振动胁迫导致荔枝质

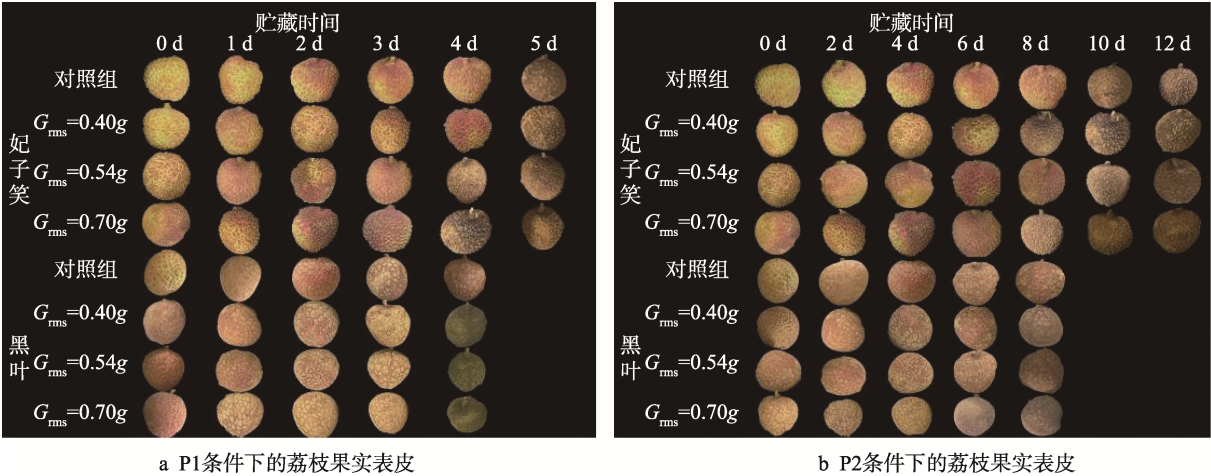


图 5 2 种荔枝在 P1 和 P2 条件下果实表皮的变化
Fig.5 Changes of fruit epidermis of 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

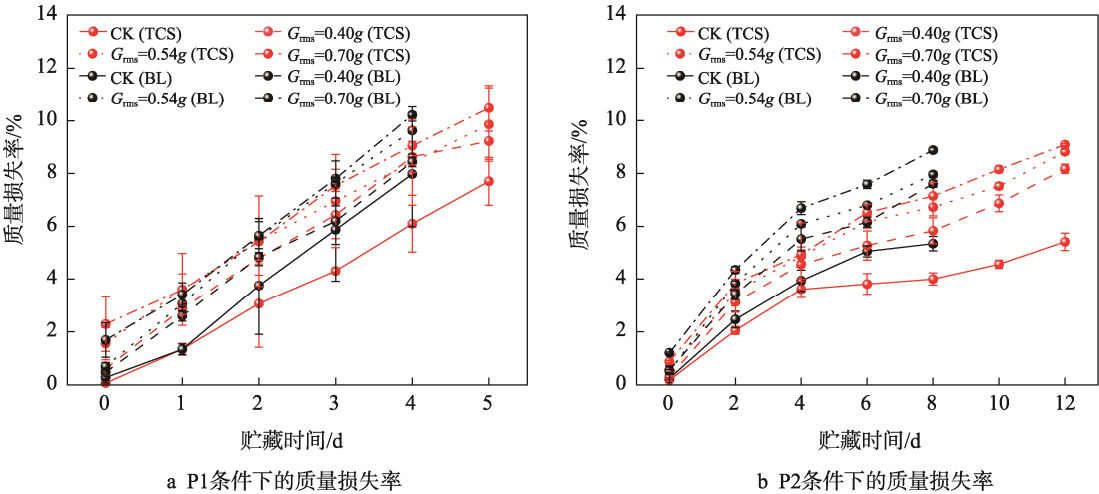


图 6 2 种荔枝在 P1 和 P2 条件下的质量损失率变化
Fig.6 Changes of weight loss of 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

量损失率增加,且质量损失率随着振动等级的提高而增加。2 种贮藏条件下,“黑叶”荔枝质量损失率始终高于“妃子笑”。室温下,“黑叶”荔枝在 4 d 后严重腐烂,开始长出白色菌丝,而“妃子笑”荔枝 5 d 后严重腐烂。P2 条件下,“黑叶”荔枝在 8 d 后严重腐烂,而“妃子笑”荔枝 12 d 后严重腐烂。不同品种、不同贮藏条件下经振动胁迫处理后的质量损失率,与对照组相比出现显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2.2 硬度

硬度是评价荔枝果肉力学性能的重要指标。果肉组织受损后导致细胞壁破裂,内部汁液流出,造成果肉硬度下降,硬度越大表明果实质品质越高。图 7 为振动胁迫处理后货架期内荔枝果肉硬度的变化情况,其中对照组 0 d 时硬度不同但较为接近,这是因为该组选取 2 个贮藏条件下的不同荔枝进行测量。结果表明,振动胁迫处理导致荔枝硬度明显下降,且荔枝硬度随着振动等级的提高而降低。温湿度也是造成荔

枝硬度变化不同的原因,低温高湿条件下荔枝货架期明显大于室温,且“妃子笑”荔枝硬度大于“黑叶”。低温高湿振动和贮藏时间对荔枝硬度变化具有显著影响,有效延缓了硬度下降,且“黑叶”荔枝变化对温湿度更加敏感。不同品种、不同温度之间,振动胁迫处理后的硬度,与对照组相比出现显著性差异 ($P<0.05$)。

2.3 振后荔枝生理性能变化

2.3.1 呼吸强度

呼吸强度反映果实生命活动状态和代谢水平,振后荔枝的呼吸强度见图 8。结果显示:振动胁迫加速了荔枝的呼吸强度;低温高湿贮藏条件抑制了荔枝的代谢活动,明显降低“妃子笑”和“黑叶”荔枝的呼吸强度,从而延长荔枝货架期;低温高湿下,货架期内荔枝呼吸强度整体呈上升趋势,随着振动强度的提高,呼吸强度逐渐增大,8 d 时“黑叶”荔枝和 12 d 时“妃子笑”荔枝呼吸强度(以 CO_2 计)分别为 25.88

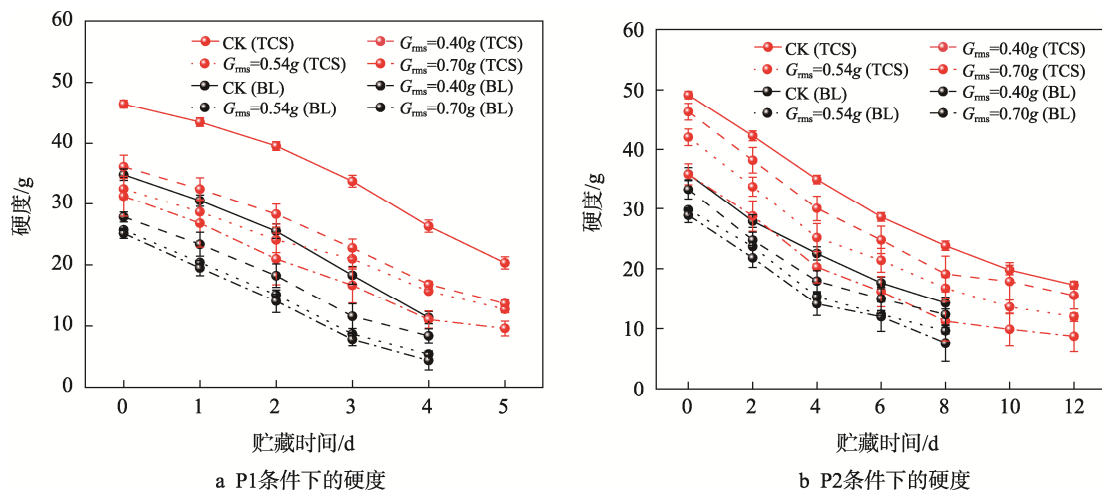


图7 2种荔枝在P1和P2条件下的硬度变化
Fig.7 Changes of hardness of 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

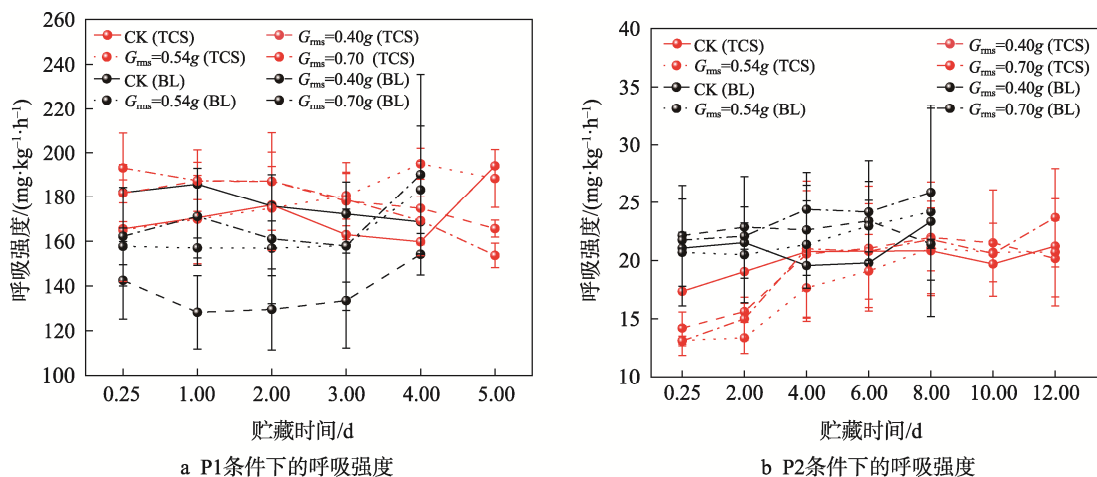


图8 2种荔枝在P1和P2条件下呼吸强度的变化
Fig.8 Changes of respiratory intensity of 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

和 $23.68 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ，“黑叶”荔枝呼吸强度总体大于“妃子笑”。振动胁迫处理后，“黑叶”荔枝的呼吸强度在P1条件下2 d时出现显著性差异 ($P < 0.05$)，在P2条件下6 d时出现显著性差异 ($P < 0.05$)。“妃子笑”荔枝经振动胁迫处理后，其呼吸强度在贮藏期间均出现显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3.2 VC含量

VC是水果中重要的营养物质，其含量极易因氧化作用而下降。2种荔枝在P1和P2条件下VC含量的变化见图9，可知荔枝VC含量在货架期内呈下降趋势，振动胁迫处理加速荔枝VC的消耗，且VC含量随着振动强度提高而降低；“妃子笑”荔枝的VC含量始终高于“黑叶”。P1条件下，4 d时“黑叶”荔枝VC含量为 $7.811 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ，5 d时“妃子笑”荔枝VC含量为 $39.073 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 。P2条件下，8 d时“黑叶”荔枝VC含量为 $9.213 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ，12 d时“妃子笑”荔枝VC含量为 $40.645 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 。可见，低温高湿贮藏

能减缓荔枝果实VC含量的下降速度，更好地保存荔枝果实的营养品质，且“妃子笑”荔枝比“黑叶”的VC含量更高。不同品种、不同温度之间，振动胁迫处理后的VC含量，与对照组相比出现显著性差异 ($P < 0.05$)。

综合以上指标，振动胁迫处理会加速荔枝品质的下降。由于振动对荔枝果皮和果肉组织造成不可逆的损伤，导致果肉硬度下降和整果质量损失率上升，机械损伤使得荔枝的呼吸和代谢水平发生变化，营养物质和底物不断被消耗，导致VC含量逐渐降低，而失水、代谢变化等引起果皮发生褐变。振动等级和温湿度对荔枝品质变化具有较大影响，不同品种荔枝展现出不同的特性。选择合适的品种和贮藏条件可有效抑制荔枝的褐变，延长货架期。对荔枝进行实验室模拟试验时，要尽可能调研实际运输振动环境，再现真实情况，振动等级对荔枝品质影响较大，避免因振动激励输入不当造成无效评估。

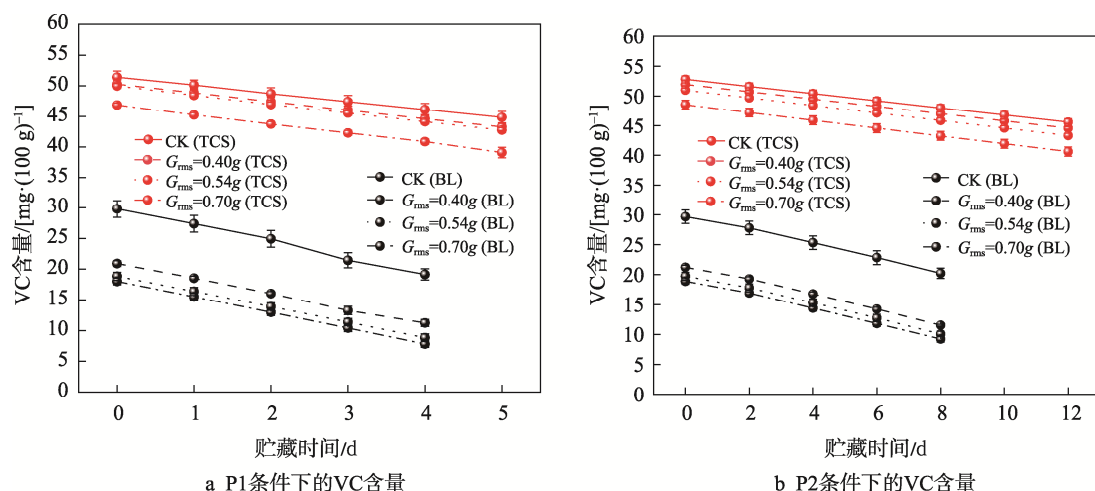


图9 2种荔枝在P1和P2条件下VC含量的变化
Fig.9 Changes of VC content in 2 varieties of litchi under P1 and P2 conditions

3 结论

1) 振动胁迫处理造成荔枝品质下降。与对照组相比,振动胁迫处理后,荔枝褐变现象更加严重,BI值升高, L^* 和 a^* 降低。振动胁迫引起荔枝果肉硬度下降,整果质量损失率上升,呼吸强度升高,VC含量降低。

2) 振动等级对荔枝品质变化具有显著影响。货架期内荔枝品质随着振动等级的增加而降低,振动等级越高,褐变现象越严重,硬度越低,整果质量损失率越高,VC含量越低。

3) 温湿度是影响荔枝品质的重要因素之一。低温高湿贮藏能有效抑制荔枝的褐变和代谢,提高果肉硬度,降低整果质量损失率,保护内部营养物质,提高VC含量。

4) 不同品种荔枝的特性与品质变化差异较大。“妃子笑”展现出更为优越的抗振性能,其褐变程度更低,具有更好的力学性能和生理性能。

参考文献:

- [1] ZHAO L, WANG K, WANG K, et al. Nutrient Components, Health Benefits, and Safety of Litchi (Litchi Chinensis Sonn.): A Review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2139-2163.
- [2] ZHOU R, YAN L P, LI B G, et al. Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as a Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(11): 949-957.
- [3] SINGH J, SINGH S P, JONESON E. Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate These Conditions[J]. Packaging Technology and Science, 2006, 19(6): 309-323.
- [4] GARCIA-ROMEY-MARTINEZ M A, SINGH S P, CLOQUELL-BALLESTER V A. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(8): 439-451.
- [5] ZHOU H, WANG Z W. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Express Logistics Transportation in South China[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(10): 665-678.
- [6] 陈代良, 陈杭君, 刘瑞玲, 等. 振动胁迫对双孢菇褐变与抗氧化能力的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 258-265.
- [7] CHEN D L, CHEN H J, LIU R L, et al. Effects of Vibration Stress on the Browning and Antioxidant Capacity of Agaricus Bisporus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 258-265.
- [8] 侯德华, 王彩莲, 景赛, 等. 模拟运输振动对冬枣品质及软化相关代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 318-326.
- [9] HOU D H, WANG C L, JING S, et al. Effects of Simulated Transportation Vibration on Quality and Softening Metabolism of Winter Jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 318-326.
- [10] 孙一鸣, 马先润, 张立军, 等. 猕猴桃电商包装随机振动响应及果品损伤研究[J]. 包装工程, 2023, 44(19): 67-74.
- [11] SUN Y M, MA X R, ZHANG L J, et al. Random Vibration Response and Damage of Kiwifruit E-Commerce Packaging[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(19): 67-74.
- [12] 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.
- [10] WANG L J, ZHANG Q, SONG H Y, et al. Effects of Different Vibration Spectrum Shapes on Mechanical Damage of Postharvest Huangguan Pear during Transportation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 318: 112121.
- [11] 王志伟, 房树盖. 不同谱型激励下包装件动态响应研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(24): 218-226.
- WANG Z W, FANG S G. A Study on Dynamic Responses Properties of Packaged Products under Different Spectral Excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(24): 218-226.
- [12] WANG Z W, WANG L J. Accelerated Random Vibration Testing of Transport Packaging System Based on Acceleration PSD[J]. *Packaging Technology and Science*, 2017, 30(10): 621-643.
- [13] DAGDELEN C, ADAY M S. The Effect of Simulated Vibration Frequency on the Physico-Mechanical and Physicochemical Properties of Peach during Transportation[J]. *LWT*, 2021, 137: 110497.
- [14] HADIS M, FEIZOLLAH S. Simulated Transit Vibration Effects on the Postharvest Quality of Persimmon during Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 189: 111918.
- [15] FADIJI T, COETZEE C, CHEN L, et al. Susceptibility of Apples to Bruising Inside Ventilated Corrugated Paperboard Packages during Simulated Transport Damage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 118: 111-119.
- [16] WANG L J, ZHANG Q, SONG H Y, et al. Mechanical Damage of 'Huangguan' Pear Using Different Packaging under Random Vibration[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187: 111847.
- [17] ZHANG W L, PAN Y G, JIANG Y M. Advances in Control Technologies and Mechanisms to Treat Peel Browning in Postharvest Fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311: 111798.
- [18] PONGENER A, PURBEY S K, PUJA K, et al. Salicylic Acid Maintains Membrane Stability and Reduces Pericarp Browning in Litchi[J]. *Acta Horticulturae*, 2018(1211): 45-52.
- [19] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同保鲜运输方式对荔枝果实品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 225-232.
- YANG S X, LYU E L, LU H Z, et al. Effects of Different Fresh-Keeping Transportation Modes on Quality of Litchi Fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 225-232.
- [20] 程志华, 龚霄, 刘洋洋, 等. 不同贮藏温度对采后番荔枝品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 264-268.
- CHENG Z H, GONG X, LIU Y Y, et al. Effects of Different Storage Temperatures on Quality of Postharvest *Annona Squamosa* L.[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(9): 264-268.
- [21] 夏晶晶, 虞新新, 吕恩利, 等. 不同贮藏温度下荔枝呼吸速率模型的对比与验证[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 267-273.
- XIA J J, YU X X, LYU E L, et al. Comparison and Verification of Litchi Respiration Rate Models at Different Storage Temperatures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 267-273.
- [22] 吴丹, 戴凡炜, 刘湘玲, 等. 低温贮藏荔枝在梯度回温后的货架期品质变化[J/OL]. *现代食品科技*, 1-9 (2024-09-04)[2025-03-18]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0463>.
- WU D, DAI F W, LIU X L, et al. Shelf Life Auality Changes of Litchi Stored at Low Temperature after Gradient Rewarming[J/OL]. *Modern Food Science and Technology*, 1-9(2024-09-04)[2025-03-18]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0463>.
- [23] US-ASTM. Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems: ASTM D4169-23[S]. America: ASTM International, 2023.
- [24] ZHANG Z Q, PANG X Q, JI Z L, et al. Role of Anthocyanin Degradation in Litchi Pericarp Browning[J]. *Food Chemistry*, 2001, 75(2): 217-221.
- [25] 蒋依辉, 黄泽鹏, 刘伟, 等. 电商物流包装贮运对‘翡翠’荔枝贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 249-254.
- JIANG N H, HUANG Z P, LIU W, et al. Effect of E-Commerce Logistics Packaging and Transportation on the Storage Quality of 'Feicui'Litchi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(18): 249-254.
- [26] 李晓琴. 荔枝采后风险评估及保鲜技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- LI X Q. Study on Postharvest Risk Assessment and Preservation Technology of Litchi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.