

苹果初期损伤温度变化导致光谱特征演化机理研究

徐涛^{1,2} 许旭锋^{1,2} 魏子朝^{1,2} 李泽通^{1,2} 饶秀勤^{1,2}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为提升商品果品品质, 及早进行机械损伤检测至关重要。针对苹果初期损伤部位光谱演化机理不明, 导致损伤检测模型识别准确性和鲁棒性较低的问题, 本文采集蛇果机械损伤初期(0~2 h)损伤演化过程的损伤区域和未损伤区域的温差时序数据, 并结合敏感波段(1 255~1 314 nm)的光谱特征, 利用 Granger 因果检验方法揭示和论证了温度变化导致光谱特征演化的机理: 随着苹果损伤时间推移, 温差先上升后下降, 而后趋于平稳, 且损伤越严重, 温差越大; Granger 因果检验结果表明, 苹果损伤部位温度变化是导致其特征波段 1 255~1 314 nm 的光谱特征发生变化的主要原因; 损伤越严重, 温差对图谱特征的影响越强; 光谱特征 \bar{R} 在损伤后苹果表面温度表征上更具有代表性和全面性。通过对蛇果损伤后光谱特征演化机理研究, 为后续更可靠地进行苹果初期轻微损伤检测提供了研究思路 and 理论依据。

关键词: 苹果; 高光谱成像; 平均光谱反射率; 光谱曲线形状特征; 温差; Granger 因果检验

中图分类号: S375 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)07-0495-07

OSID:



Evolution Mechanism of Temperature-driven Spectral Characteristics of Initial Damage in Apples

XU Tao^{1,2} XU Xufeng^{1,2} WEI Zichao^{1,2} LI Zetong^{1,2} RAO Xiuqin^{1,2}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To enhance the quality of commercial fruits, it is imperative to detect mechanical damage at an early stage. Aiming to address the issue of unclear spectral evolution mechanisms in the early stages of fruit damage, leading to low accuracy and robustness of the damage detection model. The temperature difference time series data of damaged and undamaged areas in the early stages (0~2 h) of mechanical damage was collected to Red delicious apples, and combined it with the spectral features of sensitive bands (1 255~1 314 nm) by using the Granger causality test method to reveal and substantiate the mechanism of spectral feature evolution caused by temperature changes; with the progression of apple damage, the temperature difference was firstly risen, then fell, and finally stabilized. The more severe the damage was, the greater the temperature difference would be. The results of the Granger causality test indicated that the main cause of the change in the spectral features of the apple's damage site in the 1 255~1 314 nm characteristic band was the change in temperature at the site of damage. The milder the damage was, the weaker the influence of the temperature difference on the spectral features would be. The spectral features \bar{R} were more representative and comprehensive in characterizing the surface temperature of the apple after damage. Through the study of the evolution mechanism of spectral features after the Red delicious apples was bruised, the research result can provide a theoretical basis and research approach for more reliable early detection of minor apple damage.

Key words: apple; hyperspectral imaging; average spectral reflectance; spectral curve shape feature; temperature difference; Granger causality test

收稿日期: 2024-04-07 修回日期: 2024-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1600300)

作者简介: 徐涛(1995—), 男, 博士生, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: 12113053@zju.edu.cn

通信作者: 饶秀勤(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: xqrao@zju.edu.cn

0 引言

机械损伤是水果在生产过程中受到损伤的主要形式^[1-3]。机械损伤造成的水果腐烂变质,以及已腐烂水果传染导致的损失扩大,严重限制商品果的贮运和销售,甚至可能出现食品安全问题。如果能在机械损伤初期实现损伤检测并及时剔除坏果,就可以有效减少此类损失,提高商品果品质。

学者们采用光谱和成像技术进行了果蔬初期损伤检测研究^[4-6],但检测准确性和鲁棒性远不能满足需求。根本原因在于损伤初期损伤部位的生理响应周期长,损伤部位与未损伤部位光谱特征的差异不足以被明确识别。研究表明,在果蔬损伤初期,细胞间的信号传递效率低^[7],损伤信息表达缓慢;且细胞内部启动自修复机制来恢复受损细胞^[8-9],进一步弱化了损伤信息表达。同时,细微的结构变动不足以在光学属性上产生可识别的差异,这使得应用高光谱成像等非破坏性技术时,难以在损伤初期准确区别损伤与非损伤区域。

近年来,演化规律研究方法在作物胁迫等细微、缓慢的变化研究方面,取得了良好进展^[10-11],为解决损伤初期检测难题提供了思路。根据文献^[12-14]可以得知,对水果损伤部位进行时间维度上的多点光谱信息采集,有助于形成损伤部位的演化规律。

笔者所在团队^[15]针对水果初期损伤部位损伤特征不明显的问题,通过对蛇果损伤初期(0~3 h)的光谱信息演化过程进行分析,提取了3个机械损伤敏感波段:650~734 nm、850~970 nm和1255~1314 nm。XU等^[15]发现随着损伤时间推移,波段1255~1314 nm的光谱特征(平均光谱反射率 \bar{R} 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$)呈先上升后下降,最终趋于稳定的变化趋势,并考虑其变化与温度变化相关。然而,目前尚无法确定苹果在损伤初期损伤部位温度的变化规律,以及其是否导致了光谱特征的演化。

损伤参数与光谱特征的因果关系探究有助于理解和简化苹果损伤以及损伤检测过程中的损伤信息传递,为初期损伤检测提供更有效的损伤信息和检测依据。常见的因果检验方法,包括回归中断法、面板数据模型等,多是通过突变数据进行因果推断的,然而苹果损伤初期损伤与未损伤区域的差异较小导致的特征数据缺失严重影响了检验结果的可靠性。Granger因果检验通过对两个时间序列之间的领先和滞后关系进行全面分析,能够识别出微小而持续的差异^[16-18],使得其在处理此类时序数据方面具有显著优势。

本研究以蛇果为研究对象,分析苹果损伤部位的温度以及光谱特征在时间维度上的变化规律,并基于Granger因果检验方法探究温度与光谱特征之间的关系,以揭示和论证苹果损伤部位光谱演化的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验装置

试验采用杭州果品批发市场购买的同一批均质蛇果(*Malus × domestica* Borkh.)作为试验材料,以减少变异性对研究结果的影响。机械损伤试验前,将苹果在常温环境放置24 h,以消除温度可能引起的光谱数据变异^[19]。同时,对试验苹果进行筛选,剔除裂果、烂果和异形果,并确保其没有任何损伤。随机选取40个苹果进行机械损伤试验。

成熟度水平的差异会对瘀伤程度和相关物质含量产生影响^[20]。因此,选择苹果硬度作为判定其成熟度的重要指标,以进行试验样品的成熟度判定^[21]。为了避免在硬度测量过程中对苹果造成潜在损害,并影响机械损伤试验结果,试验选择同批次的20个苹果进行硬度测试。测量时,每个苹果上、中、下各选一个测量点,每次旋转90°,共12个测量点^[22-23]。硬度测量使用GY-4型水果硬度计(浙江托普云农科技有限公司),探头直径为11.1 mm。结果显示,苹果上部、中部和下部的平均硬度分别为(15.18 ± 1.89) N、(15.85 ± 1.95) N和(15.73 ± 1.98) N,反映出样品间良好的一致性。

采用如图1所示的试验平台,在MY-A721型冲击试验台(东莞铭宇智能科技有限公司)的基础上配合定制的塑料材质果托^[24-25]。MY-A721型冲击试验台由基座、标尺、导杆、卡扣和冲击锤组成。冲击锤直径为80 mm,质量为500 g。

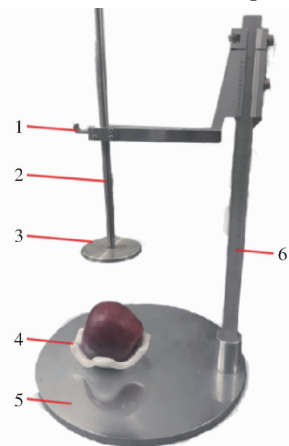


图1 撞击试验平台

Fig. 1 Impact test apparatus

1. 卡扣 2. 导杆 3. 冲击锤 4. 果托 5. 基座 6. 标尺

采用 SOC710 SWIR 型高光谱成像系统 (Surface Optics Corporation, 美国), 光谱范围为 917 ~ 1 717 nm, 光谱分辨率为 2.75 nm, 镜头焦距为 35 mm, 像素分辨率为 640 像素 × 568 像素。为了避免环境光的干扰, 系统安装于专用暗箱内 (图 2)。暗箱的侧面对称地布置 4 个 75 W 卤素灯 (AZ - D100 型, Osram, 德国), 以确保整个视场的光照均匀^[15]。

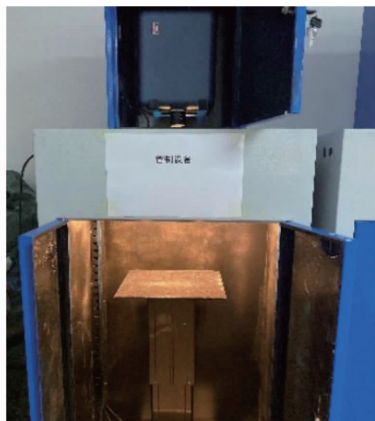


图 2 高光谱成像系统

Fig. 2 Hyperspectral imaging system

采用 DS - 2TD2636 - 10 型热成像双光谱网络筒形摄像机 (杭州海康威视数字技术股份有限公司), 光谱范围为 800 ~ 1 400 nm, 噪声等效温差小于 50 mK, 焦距为 10 mm, 像素分辨率为 384 像素 × 288 像素, 帧率为 50 f/s。摄像机采集的数据包括热像图 (以 JPEG 格式呈现) 和各像素点的温度数据 (以 data 格式记录)。

1.2 机械损伤试验

选择苹果横纵径最大处作为撞击点 (图 3), 并将其稳定放置于果托上; 移动冲击试验台标尺滑块至指定高度 (100、150、200 mm), 释放冲击锤, 使其撞击果托内苹果, 形成损伤^[26-27]。制备 40 个苹果损伤样本作为样本重复, 其中 20 个用于光谱数据采集, 20 个用于温度数据采集。

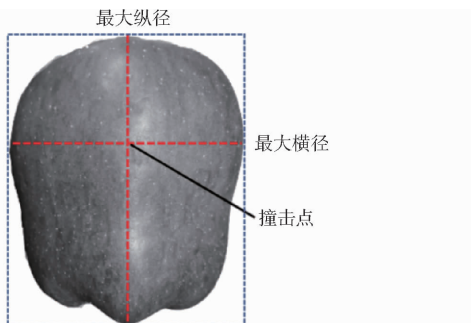


图 3 苹果撞击点示意图

Fig. 3 Schematic of apple impact point

1.3 光谱数据采集及光谱特征提取

在苹果撞击后的 10 s 内, 将损伤样本放置于高光谱成像仪中。每 6 min 进行一次扫描, 总共进行

21 次扫描, 即单个样本完成 120 min 的连续光谱数据采集。按照损伤程度及损伤时长, 将损伤样本光谱数据分别命名为 $H_{S0} \sim H_{S20}$ 、 $H_{M0} \sim H_{M20}$ 、 $H_{L0} \sim H_{L20}$ 。

使用配套软件 SRAnal710TM 进行黑白校正。人为进行感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 选取, 提取完整损伤时间 (0 ~ 2 h) 内 ROI 区域的光谱数据, 并形成光谱曲线。提取各组数据在波段 1 255 ~ 1 314 nm 的光谱曲线进行分析, 并依次进行平滑 (Savitzky - Golay, SG)、标准化 (Standard normalized variate, SNV) 和归一化处理, 尽可能消除噪声和批次差异。

基于 XU 等^[15] 提出的光谱特征提取方法, 提取各组数据在波段 1 255 ~ 1 314 nm 的光谱特征, 包括平均光谱反射率 \bar{R} 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 。

1.4 温差数据测定

使用 DS - 2TD2636 - 10 型热成像仪对苹果损伤样本进行温差数据采集。热成像仪与损伤样品间的距离为 0.2 m。每 6 min 进行一次热像图采集, 共完成 21 次采集, 即单个样本完成 120 min 的连续热像图采集。按照损伤程度及损伤时长, 将损伤样本热像图划分为 $T_{S0} \sim T_{S20}$ 、 $T_{M0} \sim T_{M20}$ 、 $T_{L0} \sim T_{L20}$ 。

使用大津阈值分割法 (Otsu) 结合最大连通分量提取以及孔洞填充完成背景分割, 提取苹果果体全部区域 ROI_0 。利用最小外接矩形进行苹果位置框定, 并提取苹果最大横、纵径。以苹果最大横纵径交点为中心, 选取 10 像素 × 10 像素的区域为损伤区域 ROI_1 (仅占热像图中苹果面积的 0.17%, 占热像图中最小苹果损伤面积的 25%)。在同一横径选取相同大小的未损伤区域 ROI_2 (图 4)。提取损伤区域 ROI_1 和未损伤区域 ROI_2 对应的温度数据, 分别求平均并做差值, 得到损伤区域和未损伤区域的温差 ΔT 。

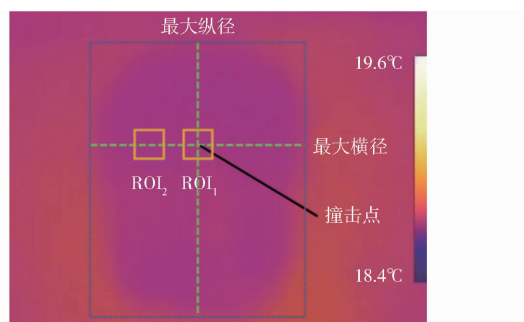


图 4 ROI 区域选取示意图

Fig. 4 Schematic of ROI area selection

2 结果与讨论

2.1 温差时变规律分析

温差随损伤时间变化趋势如图 5 所示。由图 5

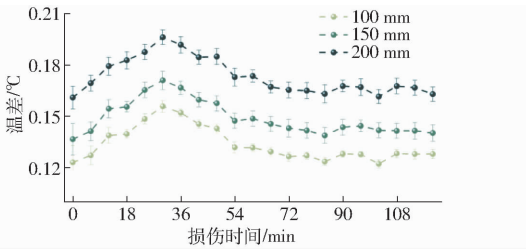


图5 温差随损伤时间变化趋势曲线

Fig.5 Variation trends of temperature difference with time of damage

可以看出,随着损伤时间推移,温差先上升后下降,而后趋于平稳,且损伤越严重,温差越大。苹果损伤部位的温度变化反映了初期损伤的发展过程。当苹果受到损伤时,损伤区域会发生一系列的生物化学反应和代谢活动,这些过程会产生热量。这些热量以热辐射的形式从受损的苹果表面散发出来^[28],从而导致苹果损伤区域温度升高^[29-30]。CHAVOSHI等^[3]发现苹果碰伤后,损伤部位和未损伤部位存在温度差,在30 min左右达到最大温差。另外,苹果损伤越严重,通常会伴随着更高的热辐射^[28,30],从而导致更大的温差。因此,温差的观察和测量可以作为评估苹果损伤程度的指标之一。

此外,损伤后内部生理生化反应的延续导致损伤演化观察期(0~2 h)内温差均高于0°C,说明观察期内苹果损伤区域温度仍高于未损伤区域^[28,30-31]。

2.2 光谱特征演化机理探究

2.2.1 光谱特征演化规律

光谱特征变化趋势如图6所示。由图6可以看出,随着损伤时间推移,光谱特征(平均光谱反射率 \bar{R} 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$)呈先上升后下降,最终趋于稳定的变化趋势。这一规律与XU等^[15]研究结果一致。光谱特征所在特征波段(1255~1314 nm波段)位于近红外区域,该区域与热辐射之间存在密切关系^[32-33],且苹果损伤部位温差与光谱特征变化趋势一致。因此,考虑撞击后损伤部位温度变化是造成光谱特征演化的原因。

2.2.2 基于Granger因果检验方法的温差和光谱特征因果关系判断

Granger因果检验通过检验一个时间序列的延迟值是否能够提供对另一个时间序列的更好预测,来判断它们之间的因果关系^[34-36]。该方法可以更好地揭示和论证苹果损伤部位光谱演化机理。具体步骤为:

(1)确定要检验的时间序列。选择不同损伤程度下苹果的温差时间序列,分别记为 T_1 、 T_2 、 T_3 。选

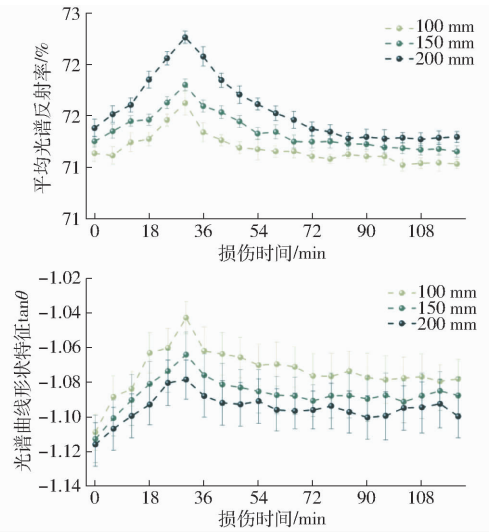


图6 光谱特征随损伤时间变化趋势曲线(1255~1314 nm)

Fig.6 Variation trends of spectral features with time of damage (1255~1314 nm)

择对应损伤程度下提取的平均光谱反射率 \bar{R} 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 的时间序列,分别记为 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 、 \bar{R}_3 、 $\tan\theta_1$ 、 $\tan\theta_2$ 、 $\tan\theta_3$ 。

(2)建立原假设。 T_1 对 \bar{R}_1 无Granger因果关系; T_1 对 $\tan\theta_1$ 无Granger因果关系; T_1 对 \bar{R}_2 无Granger因果关系; T_1 对 $\tan\theta_2$ 无Granger因果关系; T_1 对 \bar{R}_3 无Granger因果关系; T_1 对 $\tan\theta_3$ 无Granger因果关系。同样的假设也适用于 T_2 、 T_3 与 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 、 \bar{R}_3 、 $\tan\theta_1$ 、 $\tan\theta_2$ 、 $\tan\theta_3$ 。

(3)进行 F 统计量检验。由于Granger因果检验要求序列平稳,所以首先进行ADF(Augmented dickey-fuller)检验,对非平稳序列进行差分平稳。ADF检验是一种用于检测时间序列数据是否存在单位根,即是否具有稳定性的统计检验方法。若时间序列通过了ADF检验,则有理由认为该时间序列是稳定的,可以用于进一步的时间序列分析。Granger因果检验的结果严重依赖于解释变量的延迟阶数,即不同的延迟阶数可能会得到不同的Granger检验结果。结合2个方式进行延迟阶数确定:①通过分析各时间序列的自相关图和互相关系数图,确定可引入变量的延迟阶数。②在上述延迟阶数的基础上,通过拟合不同延迟的有约束模型和无约束模型,借助最小信息量准则,使用AIC(Akaike information criterion)最小的无约束模型和有约束模型的残差平方和计算 F 统计量。最小信息量准则包括AIC准则、BIC(Bayesian information criterion)准则等,主要用于确定模型结构的复杂性,在保证模型适应性的前提下,选择使信息量最小的模型。AIC准则是最为常见的模型考察方法之一,是拟合精度和参数个数的加权函

数,公式为

$$AIC = -2\ln L + 2k$$

式中 L ——模型最大似然函数值

k ——模型参数量

以 T_1 、 \bar{R}_1 、 $\tan\theta_1$ 为例,各变量均在 0 阶延迟达到互相关系数最大值(图 7),结合其余变量的互相关系数,考虑到非平稳序列为了达到序列平稳而引入的 3 阶差分,根据 AIC 准则,最终确定引入各变量的 3 阶延迟进入 Granger 因果检验。

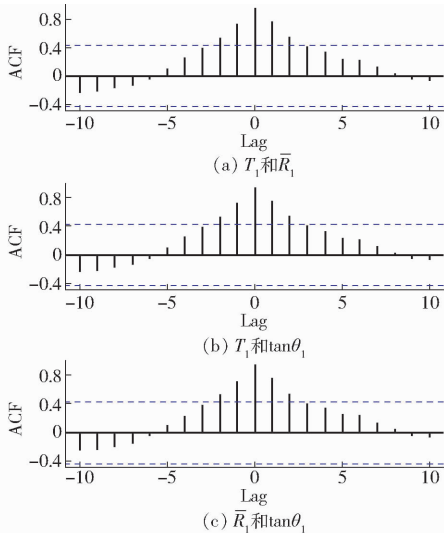


图 7 T_1 、 \bar{R}_1 、 $\tan\theta_1$ 的互相关系数

Fig. 7 Correlation of T_1 , \bar{R}_1 and $\tan\theta_1$

(4) 判断结果:根据 F 统计量的显著性水平,来判断原假设是否被拒绝。

Granger 因果检验结果如表 1、图 8 所示。在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 条件下,温差变量 T_1 可认为是光谱特征变量 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 时间序列波动的 Granger 原因, T_2 可认为是 \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 、 \bar{R}_3 的 Granger 原因, T_3 可认为是 \bar{R}_2 、 \bar{R}_3 的 Granger 原因。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, T_1 可认为是 \bar{R}_3 的 Granger 原因, T_3 可认为是 \bar{R}_1 的 Granger 原因。苹果受到损伤后,损伤部位细胞内部启动自修复机制来恢复受损细胞^[8-9]。细胞的修复过程包括新细胞合成和死亡细胞吸收^[37-39],均需消耗能量,进而产生热量,从而导致损伤部位温度上升。温度变化使得损伤部位的热性质出现变化,而热性质的改变可以影响物体对光线的吸收和反射特性^[40],进而改变其光谱反射率。从 F 统计量和 P 值上均可得到支持,表明苹果损伤部位温度的变化是其特征波段 1 255 ~ 1 314 nm 的平均光谱反射率 \bar{R} 发生变化的主要原因。同时,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下,温差变量 T_1 可认为是光谱曲线形状特征 $\tan\theta_1$ 时间序列波动的 Granger 原因, T_2 可认为是 $\tan\theta_1$ 、 $\tan\theta_2$ 、 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因, T_3 可认为是

$\tan\theta_2$ 、 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因。从 F 统计量和 P 值上均可得到支持,表明苹果损伤部位温度的变化是其特征波段 1 255 ~ 1 314 nm 的光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 发生变化的主要原因。

苹果损伤程度加重,通常会伴随着更高的热辐射^[28,30]、更高的平均光谱反射率 \bar{R} 、更低的光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 以及更高的 Granger 因果检验的 F 值。表明损伤程度越小,温差对图谱特征的预测能力越弱,其主要原因在于损伤程度受苹果个体差异(包括成熟度、水分含量、营养状态等^[3])的影响较大。另外,除对应损伤程度下温差对图谱特征具有预测能力外,温差对于不同损伤程度下损伤部位的图谱特征也存在一定的预测能力。同时,温差变量 ΔT 和平均光谱反射率 \bar{R} 为因果关系的 F 统计量明显大于温差变量 ΔT 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 为因果关系的 F 统计量。例如, T_1 和 \bar{R}_1 的 F 统计量为 24.6,而 T_1 和 $\tan\theta_1$ 的 F 统计量仅为 6.0。表明光谱特征 \bar{R} 在损伤后苹果表面温度表征上更具有代表性和全面性。

在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 条件下,光谱曲线形状特征 $\tan\theta_1$ 可认为是温差变量 T_1 时间序列波动的 Granger 原因, $\tan\theta_2$ 可认为是 T_2 的 Granger 原因。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下, $\tan\theta_3$ 可认为是 T_3 的 Granger 原因。然而,Granger 因果检验原假设的拒绝并不能说明两个序列间具有真正的因果关系。其构造思想是:使响应变量预测精度有显著提高的自变量可以视作响应变量的因^[41]。因此,需结合实际场景的逻辑关系进行分析。光谱特征变量的变化导致损伤区域温差变化存在明显的逻辑问题,不能认为光谱曲线形状特征 $\tan\theta$ 是温差变量时间序列波动的原因。同样的情况,在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 条件下,平均光谱反射率 \bar{R}_2 可认为是光谱曲线形状特征 $\tan\theta_2$ 时间序列波动的 Granger 原因, \bar{R}_3 可认为是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因, $\tan\theta_2$ 可认为是 \bar{R}_2 的 Granger 原因, $\tan\theta_3$ 可认为是 \bar{R}_3 的 Granger 原因,然而由于逻辑原因,不能认为图谱特征之间存在因果关系。

3 结论

(1) 采集了蛇果机械损伤初期(0 ~ 2 h)损伤演化过程的损伤区域和未损伤区域的温差时序数据,并结合敏感波段(1 255 ~ 1 314 nm)的光谱特征,利用 Granger 因果检验方法揭示和论证了温度变化导致光谱特征演化的机理。

表1 Granger 因果检验的 F 统计量

Tab.1 F-statistics of Granger causality test

原假设	F 统计量	结论	原假设	F 统计量	结论
T_1 不是 T_2 的 Granger 原因	4.1	接受	T_2 不是 T_1 的 Granger 原因	2.1	接受
T_1 不是 T_3 的 Granger 原因	0	接受	T_3 不是 T_1 的 Granger 原因	0.1	接受
T_1 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	24.6**	拒绝	T_3 不是 T_2 的 Granger 原因	2.7	接受
T_1 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	10.3**	拒绝	\bar{R}_1 不是 T_1 的 Granger 原因	1.7	接受
T_1 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	7.6*	拒绝	\bar{R}_1 不是 T_2 的 Granger 原因	0.2	接受
T_1 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	6.0*	拒绝	\bar{R}_1 不是 T_3 的 Granger 原因	0	接受
T_1 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	4.1	接受	\bar{R}_2 不是 T_1 的 Granger 原因	0.9	接受
T_1 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	3.8	接受	\bar{R}_2 不是 T_2 的 Granger 原因	1.7	接受
T_2 不是 T_3 的 Granger 原因	1.0	接受	\bar{R}_2 不是 T_3 的 Granger 原因	0.9	接受
T_2 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	22.5**	拒绝	\bar{R}_2 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	1.3	接受
T_2 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	25.7**	拒绝	\bar{R}_3 不是 T_1 的 Granger 原因	0.1	接受
T_2 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	23.5**	拒绝	\bar{R}_3 不是 T_2 的 Granger 原因	1.0	接受
T_2 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	4.1*	拒绝	\bar{R}_3 不是 T_3 的 Granger 原因	2.0	接受
T_2 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	6.5*	拒绝	\bar{R}_3 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	1.6	接受
T_2 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	6.0*	拒绝	\bar{R}_3 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	1.5	接受
T_3 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	6.8*	拒绝	$\tan\theta_1$ 不是 T_1 的 Granger 原因	10.1**	拒绝
T_3 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	22.3**	拒绝	$\tan\theta_1$ 不是 T_2 的 Granger 原因	1.3	接受
T_3 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	28.6**	拒绝	$\tan\theta_1$ 不是 T_3 的 Granger 原因	1.4	接受
T_3 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	2.4	接受	$\tan\theta_1$ 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	3.7	接受
T_3 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	5.0*	拒绝	$\tan\theta_1$ 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	0.3	接受
T_3 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	7.0*	拒绝	$\tan\theta_1$ 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	0.2	接受
\bar{R}_1 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	0.4	接受	$\tan\theta_2$ 不是 T_1 的 Granger 原因	2.5	接受
\bar{R}_1 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	0.9	接受	$\tan\theta_2$ 不是 T_2 的 Granger 原因	10.6**	拒绝
\bar{R}_1 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	7.2*	拒绝	$\tan\theta_2$ 不是 T_3 的 Granger 原因	2.8	接受
\bar{R}_1 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	1.2	接受	$\tan\theta_2$ 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	1.2	接受
\bar{R}_1 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	0.5	接受	$\tan\theta_2$ 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	8.6**	拒绝
\bar{R}_2 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	0.3	接受	$\tan\theta_2$ 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	3.9	接受
\bar{R}_2 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	1.3	接受	$\tan\theta_2$ 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	0	接受
\bar{R}_2 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	11.0**	拒绝	$\tan\theta_3$ 不是 T_1 的 Granger 原因	1.3	接受
\bar{R}_2 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	1.8	接受	$\tan\theta_3$ 不是 T_2 的 Granger 原因	2.9	接受
\bar{R}_3 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	0.3	接受	$\tan\theta_3$ 不是 T_3 的 Granger 原因	8.0**	拒绝
\bar{R}_3 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	1.4	接受	$\tan\theta_3$ 不是 \bar{R}_1 的 Granger 原因	0.1	接受
\bar{R}_3 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	13.0**	拒绝	$\tan\theta_3$ 不是 \bar{R}_2 的 Granger 原因	2.9	接受
$\tan\theta_1$ 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	2.0	接受	$\tan\theta_3$ 不是 \bar{R}_3 的 Granger 原因	11.5**	拒绝
$\tan\theta_1$ 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	2.2	接受	$\tan\theta_3$ 不是 $\tan\theta_1$ 的 Granger 原因	1.6	接受
$\tan\theta_2$ 不是 $\tan\theta_3$ 的 Granger 原因	0.6	接受	$\tan\theta_3$ 不是 $\tan\theta_2$ 的 Granger 原因	2.6	接受

注：* 表示在 0.05 的显著性水平下拒绝原假设，** 表示在 0.01 的显著性水平下拒绝原假设。

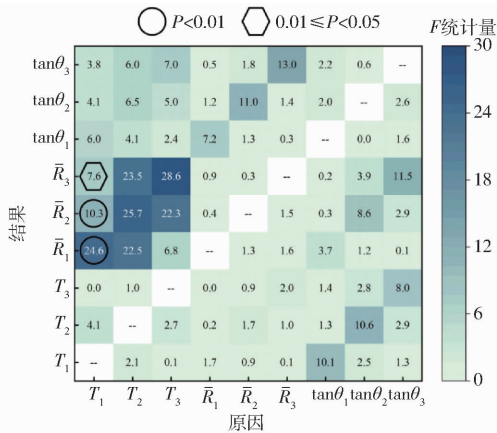


图8 Granger 因果检验的 F 统计量

Fig.8 F-statistics of Granger causality test

(2) 随着苹果损伤时间推移,温差先上升后下降,而后趋于平稳,且损伤越严重,温差越大。损伤后内部生理生化反应的延续导致损伤演化观察期(0~2 h)内损伤区域温度仍高于未损伤区域。

(3) Granger 因果检验的结果表明苹果损伤部位温度的变化是导致其特征波段 1 255 ~ 1 314 nm 的光谱特征(平均光谱反射率 \bar{R} 和光谱曲线形状特征 $\tan\theta$) 发生变化的主要原因;苹果损伤越严重,温差对图谱特征的影响越强,其主要原因在于损伤程度受苹果个体差异的影响较大;光谱特征 \bar{R} 在损伤后苹果表面温度表征上更具有代表性和全面性。

参 考 文 献

- [1] WANG Lijun, ZHANG Qi, SONG Haiyan, et al. Mechanical damage of ‘Huangguan’ pear using different packaging under random vibration[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187(3): 111847.
- [2] FU Han, DU Wendi, YANG Jingkai, et al. Bruise measurement of fresh market apples caused by repeated impacts using a pendulum method[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 195(4): 112143.
- [3] CHAVOSHI E, AHMADI E, NIA A A, et al. Determination of dynamic deformation behavior of Golden Delicious apple using finite element method and its validation by scanning electron microscopy[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 307(3): 111531.
- [4] GAO Mengjie, GUO Wenchuan, HUANG Xiaolan, et al. Effect of pressing and impacting bruises on optical properties of kiwifruit flesh[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 172(4): 111385.
- [5] PANG Qi, HUANG Wenqian, FAN Shuxiang, et al. Detection of early bruises on apples using hyperspectral imaging combining with YOLOv3 deep learning algorithm[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 110(3): 345–355.
- [6] ZHANG Peipei, SHEN Bingbing, JI Hongwei, et al. Nondestructive prediction of mechanical parameters to apple using hyperspectral imaging by support vector machine[J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(3): 1397–1406.
- [7] MEENTS A K, MITHÖFER A. Plant-plant communication: is there a role for volatile damage-associated molecular patterns? [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 583275.
- [8] BUSCH S, SCHMITT K, ERHARDT C, et al. Analysis of self-repair mechanisms of *Phaseolus vulgaris* var. *saxa* using near-infrared surface-enhanced raman spectroscopy[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2010, 41(5): 490–497.
- [9] DU Meijun, LIU Zitian, ZHANG Xiantao, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109854.
- [10] FAN Shuxiang, LI Changying, HUANG Wenqian, et al. Detection of blueberry internal bruising over time using NIR hyperspectral reflectance imaging with optimum wavelengths[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 134: 55–66.
- [11] DU Zhenjiao, ZENG Xiangguan, LI Xiangxin, et al. Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 133–141.
- [12] ZHU Hongyan, CEN Haiyan, ZHANG Chu, et al. Early detection and classification of tobacco leaves inoculated with tobacco mosaic virus based on hyperspectral imaging technique[C]//2016 ASABE Annual International Meeting, 2016: 162460422.
- [13] SUN Yuanyuan, TONG Cheng, HE Shan, et al. Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies based on temporal dynamics of leaf morphology and color[J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 762.
- [14] SU Jinya, LIU Cunjia, HU Xiaoping, et al. Spatio-temporal monitoring of wheat yellow rust using UAV multispectral imagery [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167: 105035.
- [15] XU Tao, XU Xufeng, HUANG Xinyao, et al. Research on the evolutionary of spectral features of the initial damaged parts of ‘Red Delicious’ apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 210: 112730.
- [16] LADROUE C, GUO S, KENDRICK K, et al. Beyond element-wise interactions: identifying complex interactions in biological processes[J]. *PLoS One*, 2009, 4(9): e6899.
- [17] ZOU Cunlu, LADROUE C, GUO Shuixia, et al. Identifying interactions in the time and frequency domains in local and global networks—a granger causality approach[J]. *BMC Bioinformatics*, 2010, 11(1): 337.
- [18] HEERAH S, MOLINARI R, GUERRIER S, et al. Granger-causal testing for irregularly sampled time series with application to nitrogen signalling in arabidopsis[J]. *Bioinformatics*, 2021, 37(16): 2450–2460.
- [19] WANG Tingting, YAN Ting, SHI Jingkun, et al. The stability of cell structure and antioxidant enzymes are essential for fresh-cut potato browning[J]. *Food Research International*, 2023, 164: 112449.
- [20] HUSSEIN Z, FAWOLE O A, OPARA U L. Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2020, 6(1): 1–13.
- [21] ORNELAS-PAZ J D 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*, 2017, 55(1): 33–41.
- [22] ZHANG Shu, WU Xiaohua, ZHANG Shuhui, et al. An effective method to inspect and classify the bruising degree of apples based on the optical properties[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 127: 44–52.
- [23] BIAN Hongxia, SHI Ping, TU Peng. Determination of physicochemical quality of bruised apple using dielectric properties[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(5): 2590–2599.
- [24] XU Tao, ZHU Yihang, ZHANG Xiaomin, et al. Dynamic prediction model for initial apple damage [J]. *Foods*, 2023, 12(20): 3732.
- [25] XU Tao, ZHANG Xiaomin, ZHU Yihang, et al. Evolution pattern in bruised tissue of ‘Red Delicious’ apple[J]. *Foods*, 2024, 13(4): 602.
- [26] BARANOWSKI P, MAZUREK W, WOZNIAK J, et al. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(3): 345–355.

- [17] 冯凤翔,任慧玲,李晓瑛,等. 融合相似度算法与预训练模型的中文电子病历实体映射方法研究[J]. 医学信息学杂志, 2023,44(5):45-50.
FENG Fengxiang, REN Huiling, LI Xiaoying, et al. Study on Chinese electronic medical record entity mapping method by fusing similarity algorithms and pre-trained[J]. Journal of Medical Informatics, 2023,44(5):45-50. (in Chinese)
- [18] LIU Y, GU J, GOYAL N, et al. multilingual denoising pre-training for neural machine translation[J]. Transactions of the Association for Computational Linguistics, 2020, 8: 726-742.
- [19] LEWIS M, LIU Y, GOYAL N, et al. Bart: denoising sequence-to-sequence pre-training for natural language generation, translation, and comprehension[J]. arXiv Preprint, arXiv:1910.13461, 2019.
- [20] XUE L, CONSTANT N, ROBERTS A, et al. mT5: a massively multilingual pre-trained text-to-text transformer[J]. arXiv Preprint, arXiv:2010.11934, 2020.
- [21] YE Q, XU H, XU G, et al. mplug-owl: modularization empowers large language models with multimodality[J]. arXiv Preprint, arXiv:2304.14178, 2023.
- [22] TOUVRON H, MARTIN L, STONE K, et al. Llama 2: open foundation and fine-tuned chat models[J]. arXiv Preprint, arXiv:2307.09288, 2023.
- [23] PENEDO G, MALARTIC Q, HESSLOW D, et al. The refined web dataset for Falcon LLM: outperforming curated corpora with web data, and web data only[J]. arXiv Preprint, arXiv:2306.01116, 2023.
- [24] BELLAGENTE M, TOW J, MAHAN D, et al. Stable LM 2 1.6 B technical report[J]. arXiv Preprint, arXiv:2402.17834, 2024.
- [25] KOUBAA A. GPT-4 vs. GPT-3.5: a concise showdown[J]. Preprints. org, 2023, 2023030422.

(上接第 501 页)

- [27] NTURAMBIRWE J F I, PEROLD W J, OPARA U L. Classification learning of latent bruise damage to apples using shortwave infrared hyperspectral imaging[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(15):4990.
- [28] KIM G, KIM G H, PARK J M, et al. Application of infrared lock-in thermography for the quantitative evaluation of bruises on pears[J]. Infrared Physics and Technology, 2014, 63: 133-139.
- [29] VARITH J, HYDE G M, BARITELLE A L, et al. Non-contact bruise detection in apples by thermal imaging[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2003, 4(2): 211-218.
- [30] DOOSTI-IRANI O, GOLZARIAN M R, AGHKHANI M H, et al. Development of multiple regression model to estimate the apple's bruise depth using thermal maps[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 116: 75-79.
- [31] BARANOWSKI P, MAZUREK W, WITKOWSKA-WALCZAK B, et al. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 53(3): 91-100.
- [32] MERZLYAK M N, SOLOVCHENKO A E, GITELSON A A. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 27(2): 197-211.
- [33] ABBASPOUR-GILANDEH Y, SABZI S, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ M, et al. Nondestructive estimation of the chlorophyll b of apple fruit by color and spectral features using different methods of hybrid artificial neural network[J]. Agronomy, 2019, 9(11): 735.
- [34] CENTENO C A R, ALBERTO M C R, WASSMANN R, et al. Assessing diel variation of CH₄ flux from rice paddies through temperature patterns[J]. Atmospheric Environment, 2017, 167: 23-39.
- [35] HAYS G C, CHIVERS W J, LALOË J O, et al. Impact of marine heatwaves for sea turtle nest temperatures[J]. Biology Letters, 2021, 17(5): 20210038.
- [36] ZHANG Zhewen, WU Lifeng. Graph neural network-based bearing fault diagnosis using granger causality test[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 242: 122827.
- [37] ANANDAN S, RUDOLPH A, SPECK T, et al. Comparative morphological and anatomical study of self-repair in succulent cylindrical plant organs[J]. Flora, 2018, 241: 1-7.
- [38] SPECK O, SPECK T. An overview of bioinspired and biomimetic self-repairing materials[J]. Biomimetics, 2019, 4(1): 26.
- [39] SPECK O, LANGER M, MYLO M D. Plant-inspired damage control-an inspiration for sustainable solutions in the anthropocene[J]. The Anthropocene Review, 2021, 9(2): 220-236.
- [40] GONZALEZ M E, BARRETT D M. Thermal, high pressure, and electric field processing effects on plant cell membrane integrity and relevance to fruit and vegetable quality[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(7): 121-130.
- [41] BAUM C F, HURN S, OTERO J. Testing for time-varying granger causality[J]. The Stata Journal, 2022, 22(2): 355-378.