

猕猴桃挤压损伤高光谱快速检测研究

孟庆龙, 冯树南, 谭涛, 满婷, 尚静
(贵阳学院 食品与制药工程学院, 贵阳 550005)

摘要: **目的** 探究猕猴桃挤压损伤较优的快速无损判别方法。**方法** 利用高光谱成像系统获得所有猕猴桃的高光谱图像, 并提取猕猴桃损伤区域以及完好无损区域的光谱反射率; 运用多元散射校正方法对原始反射光谱进行预处理, 并运用主成分分析对光谱数据降维; 比较并分析 Fisher 判别分析方法以及简化的 K 最近邻 (Simplified K Nearest Neighbor, SKNN) 模式识别方法对猕猴桃挤压损伤的判别效果。**结果** 在 710~850 nm 和 960~1 030 nm 这 2 个波段内, 猕猴桃损伤区域的平均光谱反射率与完好无损区域的平均光谱反射率存在较明显差异; 采用主成分分析从 256 个全波段中筛选了前 5 个主成分作为新变量, 识别模型的检测效率得到了提升; 构建的 SKNN 和 Fisher 模型对预测集中样本的正确识别率均为 93.3%, 从 SKNN 识别模型的混淆矩阵中得出, 预测集中仅有 2 个样本出现误判, 并且 SKNN 模型对校正集中样本的正确识别率高于 Fisher 模型。**结论** 在判别猕猴桃挤压损伤时, SKNN 识别模型具有相对较好的判别效果。

关键词: 猕猴桃; 挤压损伤; 高光谱成像; 主成分分析; 快速检测

中图分类号: TB485.3; S663.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)15-0114-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.013

Rapid Detection for Pressed Damage of Kiwifruit Based on Hyperspectral Imaging Technology

MENG Qing-long, FENG Shu-nan, TAN Tao, MAN Ting, SHANG Jing

(Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

ABSTRACT: The work aims to explore a better rapid nondestructive method of detecting the pressed damage of kiwifruit. The hyperspectral imaging system was adopted to obtain hyperspectral images of kiwifruit and the spectra reflectance in damaged region and normal region was extracted. The multi-scatter calibration (MSC) was adopted to preprocess the primary reflectance spectra and principal component analysis was employed to conduct data mining. Then, the effects of Fisher discrimination analysis and simplified K nearest neighbor (SKNN) recognition method in distinguishing the pressed damage of kiwifruit were compared and analyzed. In the spectral range of 710-850 nm and 960-1 030 nm, the average spectra reflectance in damaged region of kiwifruit was obviously different from that in normal region. The first 5 principal components were selected as new variables by PCA from 256 full wavelengths and the detection efficiency of recognition model was improved. The accurate discrimination rates of SKNN and Fisher recognition models for prediction

收稿日期: 2022-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(62141501); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1010号); 贵州省基础研究计划(科学技术基金)(黔科合基础[2020]1Y270); 贵阳学院专项资金(GYU-KY-[2022]); 贵州省大学生创新创业训练计划项目(202110976040)

作者简介: 孟庆龙(1989—), 男, 博士, 贵阳学院副教授, 主要研究方向为农产品品质无损检测。

通信作者: 尚静(1988—), 女, 硕士, 贵阳学院讲师, 主要研究方向为农产品品质无损检测。

set both reached 93.3%. Only two samples in the prediction set were not distinguished accurately from the confusion matrix of SKNN model. The accurate discrimination rate of SKNN recognition model for calibration set was better than that of Fisher recognition model. SKNN recognition model has better effect in distinguishing pressed damage of kiwifruit.

KEY WORDS: kiwifruit; pressed damage; hyperspectral imaging; principal component analysis; rapid detection

猕猴桃含有丰富的维生素 C, 其果肉细嫩且多浆、果汁酸甜爽口, 深受广大消费者的青睐^[1-2]。猕猴桃在采摘或者运输过程中, 因碰撞或者挤压形成的表面隐形损伤难以被肉眼判别^[3]。水果表面损伤一般发生在表皮下面, 与正常组织的颜色差异较小, 特别是猕猴桃果皮颜色较深, 在形成初期很难被识别。猕猴桃在贮藏期间, 损伤部位逐渐发生褐变直至腐烂。这就会导致猕猴桃在贮藏保鲜过程中发生大面积溃烂或感染的现象, 将带来直接的经济损失, 因此, 开展水果的损伤判别对提升水果经济价值具有重要的意义。近几年, 基于近红外光谱的无损检测方法具有不破坏检测对象、检测速度快、无污染等诸多优势, 受到国内外广大科学家的关注, 该技术被广泛地运用在农产品内外部品质的快速检测领域中^[4-11]。国内外研究团队已开展了关于苹果^[12-13]、柑橘^[14]、猕猴桃^[3,15]、桃子^[16]和梨^[17]等外部品质的无损检测研究, 并取得了一定的成果。王思玲等^[18]利用高光谱成像技术和支持向量机实现了苹果水心病果的无损判别, 但正确判别率仅为 72%。目前, 基于高光谱成像结合模式识别方法对猕猴桃挤压损伤的快速无损判别研究鲜有报道。

文中使用可见/近红外高光谱图像系统获得猕猴桃损伤区域和完好无损区域的高光谱图像; 运用多元散射校正预处理原始光谱, 并应用主成分分析对光谱数据降维; 比较并分析 Fisher 判别分析方法以及简化的 K 最近邻模式识别方法对猕猴桃挤压损伤的检测效果, 以期研发挤压损伤猕猴桃的快速判别装备提供理论基础。

1 实验

1.1 材料

猕猴桃采摘于贵州省修文县龙关口猕猴桃生态果园, 从不同的猕猴桃果树上摘取 120 个完好无损的样本, 随机将 120 个猕猴桃样本分为 60 个实验 A 组和 60 个对照 CK 组。对 A 组中的猕猴桃样本进行人为损伤, 即利用电子式压力试验机以最大压力 (100 N) 缓慢挤压猕猴桃样本 (压头直径为 10 mm), 在猕猴桃的表面产生轻微的人眼难以识别的损伤, 并利用记号笔将损伤部位 (挤压部位) 标记出来。CK 组中的猕猴桃样本不做任何处理, 为完好无损样本。

1.2 实验仪器

GaiaField-F-V10 高光谱成像系统 (江苏双利合谱科技有限公司) 的结构框图见图 1, 其中, CCD 相机的曝光时间为 9.5 ms, 样本距离镜头大约 40 cm。

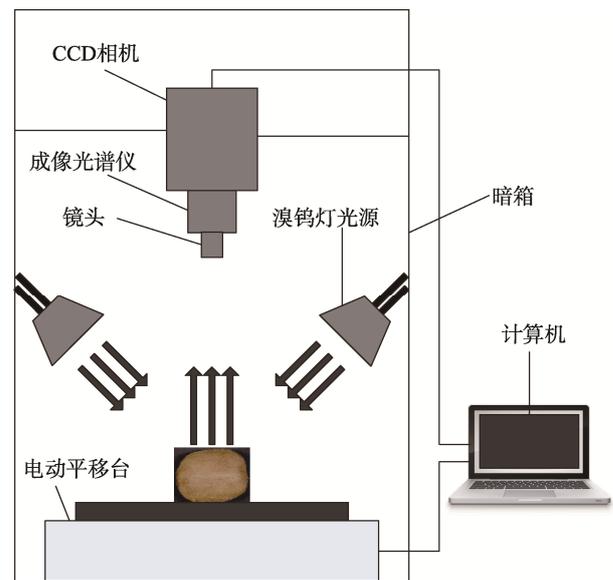


图 1 高光谱成像系统框图

Fig.1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

CBS-50K 电子式压力试验机 (重庆重标实验仪器有限公司) 的压力范围为 0~500 N, 压力分度值为 0.01 N, 位移速度为 0.01~500 mm/min, 位移精确度为 ±1%。

1.3 高光谱图像采集与校正

首先将猕猴桃样本依次放在电动平移台上逐个扫描, 得到样本的原始高光谱图像; 其次获取全白以及全黑的标定图像 R_{white} 和 R_{black} ; 最后对所有猕猴桃样本的原始高光谱图像 $R_{original}$ 进行反射率校正, 获得校正的猕猴桃高光谱图像 R_{ref} , 校正公式为:

$$R_{ref} = \frac{R_{original} - R_{black}}{R_{white} - R_{black}} \quad (1)$$

1.4 建模方法

1.4.1 主成分分析

主成分分析方法是一种从样本集组成变量的协方差矩阵开始, 利用特征分解得到方差最高的虚拟主成分去替代原始变量, 最终达到剔除冗

余数据的目的。

1.4.2 模式识别

实验分别基于 Fisher 判别分析方法和简化的 K 最近邻法 (Simplified K Nearest Neighbor, SKNN) 构建损伤猕猴桃无损识别模型。其中, Fisher 判别分析方法是 将 样 本 点 的 特 征 记 为 $x_{ik,g}$, g 表示类别 ($g=1, 2$; 类 1 为完好无损猕猴桃, 类 2 为挤压损伤猕猴桃), k 为模式类别序号 ($k=1, 2, \dots, n_g$; n_g 为 g 类样本数), Fisher 判别函数为:

$$D_{gk}(x) = \sum_{i=1}^p \omega_i x_{ik,g} \quad (2)$$

式中: $i=1, 2, \dots, p$, p 为特征变量数量; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p)^T$ 。

SKNN 方法是基于一种简化算法(类重心法构建的), 即将校正集中每类别(类 1 为完好无损猕猴桃, 类 2 为挤压损伤猕猴桃)样本点的重心算出, 进而分析预测集样本点距离每类别重心的距离, 当预测集样本点最接近哪一类重心, 就将预测集样本点归到该类样本。若用 p 个特征变量对 2 类样本(类 1 为完好无损猕猴桃, 类 2 为挤压损伤猕猴桃)进行分类, 则第 j 类的重心为 $c_j (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jp})$, 其公式为:

$$c_{ji} = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} x_{kj}, \quad (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2) \quad (3)$$

式中: n_j 为第 j 类样本的数量。

1.4.3 模型评价方法

采用混淆矩阵、校正集和预测集中样本的正确识别率评价模型的检测性能。其中, 混淆矩阵是有监督统计分类中的一种可视化方法, 用于比较模式分类效果。校正集或预测集中样本的正确识别率表示为:

$$D_R = \frac{N_1}{N_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: D_R 为正确识别率; N_1 为校正集或预测集中样本的正确识别数; N_2 为校正集或预测集中样本总数。

1.5 数据分析

利用 Matlab R2016b 软件进行数据处理与分析, 基于式(2) — (3), 通过计算各样本间的重心距离和 Fisher 判别函数, 完成损伤猕猴桃 SKNN 和 Fisher 识别模型的构建以及评价。

2 结果与分析

2.1 损伤猕猴桃的图像

图 2 给出了某一损伤猕猴桃样本的图像。从图 2 中可见, 去皮前猕猴桃损伤区域与完好无损区域没有任何差异(虚线圈内为猕猴桃损伤区域), 去皮后可

以明显看出损伤区域的果肉颜色发暗。可见, 仅通过样本的外部图像难以判别出猕猴桃是否损伤。

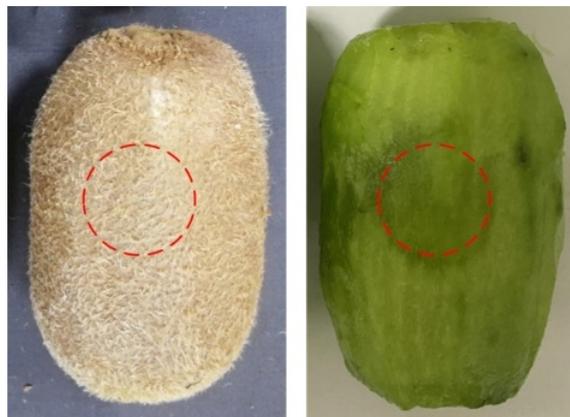


图 2 某一损伤猕猴桃的图像
Fig.2 Image of a damaged kiwifruit

2.2 损伤和完好无损区域反射光谱

猕猴桃受到挤压损伤后, 损伤区域颜色变深, 水分含量降低。猕猴桃损伤区域和完好无损区域的平均的光谱反射率见图 3。观察图 3 得出, 在波长为 710~850 nm 时, 由于损伤区域颜色变深, 光敏素含量增加, 导致猕猴桃损伤区域反射率的平均值低于完好无损区域反射率的平均值; 而在 960~1 030 nm 时, 由于损伤区域水分含量的降低, 导致猕猴桃损伤区域反射率的平均值高于完好无损区域反射率的平均值。综上, 可依据此光谱差异构建识别挤压损伤猕猴桃的无损识别模型。

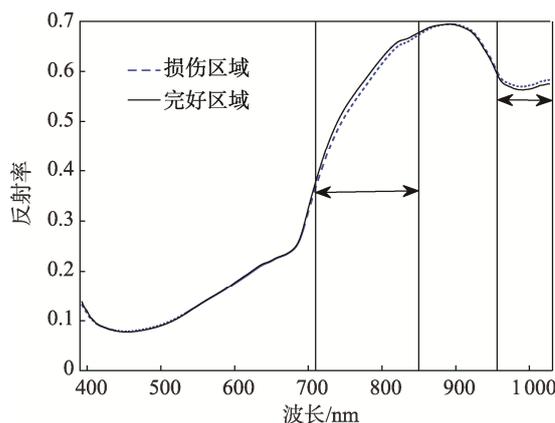


图 3 猕猴桃损伤区域和完好无损区域的平均光谱
Fig.3 Average spectra for damaged region and normal region of kiwifruit

2.3 光谱预处理

由于原始的反射光谱中包含一些噪声, 为了提升识别模型的精确度和稳定性, 运用多元散射校正 (Multi-Scatter Calibration, MSC) 对原始的反射

光谱进行预处理。图 4 分别呈现了所有猕猴桃原始反射光谱和 MSC 预处理后的相对反射光谱。对比图 4a 和图 4b 可以发现, 预处理后的光谱曲线整体上聚拢在一起, 变得更窄。这表明经 MSC 预处理, 原始的反射光谱去掉了部分噪声和背景干扰信号。

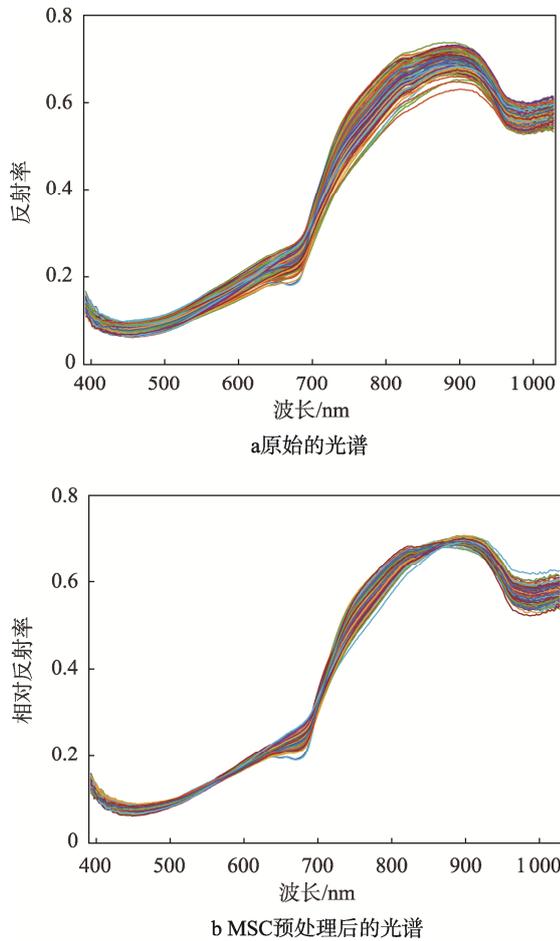


图 4 猕猴桃反射光谱
Fig.4 Reflectance spectra of kiwifruit

2.4 主成分分析

图 5 给出了 MSC 预处理后的相对反射光谱在经主成分分析后得到的第 1、2 主成分得分分布图。从图 5 可见, 除个别样本外, 所有样本的分类结果总体上具有较好的分类效果 (虚线将所有样本分为 2 类, 类 1 为完好无损猕猴桃, 类 2 为挤压损伤猕猴桃)。表 1 列举了前 5 个主成分 (P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_{c3} 、 P_{c4} 、 P_{c5}) 得分的贡献率及其累计贡献率。从表 1 可见, 前 5 个主成分得分可以呈现 98% 以上的原始信息, 因此, 将前 5 个主成分得分当作新的输入变量, 不仅能保证识别模型的检测性能, 而且将 256 个原始变量压缩到 5 个新的特征变量 (P_{c1} — P_{c5}) 后, 识别模型的运行效率得到了极大的提升。

表 1 主成分得分贡献率
Tab.1 Contribution rate of principal component score

主成分	贡献率/%	累计贡献率/%
P_{c1}	76.21	76.21
P_{c2}	16.51	92.72
P_{c3}	2.4	95.12
P_{c4}	1.6	96.72
P_{c5}	1.37	98.09

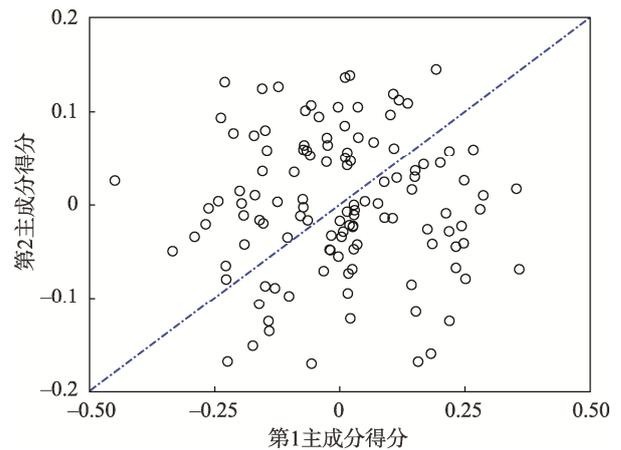


图 5 第 1、第 2 主成分的得分散点图
Fig.5 Score scatter plot of P_{c1} and P_{c2}

2.5 损伤猕猴桃判别结果

在构建损伤猕猴桃识别模型之前, 先基于 MSC 预处理后的光谱, 采用 Kennard–Stone 算法^[19]将 120 个猕猴桃样本按照 3 : 1 的比例划分为 90 个校正集 (挤压损伤猕猴桃和完好无损猕猴桃各 45 个) 和 30 个预测集 (挤压损伤猕猴桃和完好无损猕猴桃各 15 个)。然后将经主成分分析后得到的新变量作为自变量, 样本的类别信息 (类 1 为完好无损猕猴桃, 类 2 为挤压损伤猕猴桃) 作为因变量, 通过计算各样本间的重心距离和 Fisher 判别函数, 构建损伤猕猴桃的 SKNN 和 Fisher 2 种识别模型。不同识别模型对挤压损伤猕猴桃和完好无损猕猴桃的判别结果见表 2。从表 2 中可见, SKNN 和 Fisher 2 种识别模型对预测集中样本的正确识别率均为 93.3%, 而且 SKNN 识别模型对校正集中样本的正确识别率要高于 Fisher 识别模型, 表明在判别挤压损伤猕猴桃时, SKNN 模型的性能要优于 Fisher 模型。同时, 利用构建的 SKNN 识别模型, 将预测集中的每个猕猴桃样本的真实类别信息和预测类别信息进行分类, SKNN 识别模型对预测集中猕猴桃判别结果的混淆矩阵见图 6。从图 6 中可以看出, SKNN 识别模型对预测集中完好无损和挤压损伤猕猴桃的预测结果中仅有 2 个样本出现误判。综合建模效果和预测效果表明, SKNN 识别模型拥有相对较好的判别效果。

表2 损伤猕猴桃判别结果
Tab.2 Discriminant results of damaged kiwifruit

识别模型	校正集 (90)		预测集 (30)	
	识别数量	正确识别率/%	识别数量	正确识别率/%
SKNN	85	94.4	28	93.3
Fisher	84	93.3	28	93.3

		完好无损	挤压损伤
		完好无损	14
挤压损伤	1	14	

图6 SKNN 识别模型的混淆矩阵
Fig.6 Confusion matrix of SKNN recognition model

3 结语

以挤压损伤和完好无损猕猴桃为研究对象,通过分析两者的光谱差异,得出在 710~850 nm 和 960~1 030 nm 的 2 个波段内,猕猴桃的损伤区域和完好无损区域的反射光谱图呈现出较明显的差异,光谱差异是构建判别挤压损伤猕猴桃的识别模型的依据。为消除反射光谱中的部分噪声和背景干扰信号,运用多元散射校正预处理原始的反射光谱。采用主成分分析方法从 256 个全波段中筛选了前 5 个主成分得分作为新变量,提升了识别模型的运算速度。构建的 SKNN 识别模型和 Fisher 识别模型对预测集中样本的正确识别率均为 93.3%,而 SKNN 识别模型对校正集中样本的正确识别率高于 Fisher 识别模型,表明在识别挤压损伤猕猴桃时,SKNN 模型的性能要优于 Fisher 模型。综合建模效果和预测效果,说明 SKNN 识别模型拥有相对较好的检测效果,为研发挤压损伤猕猴桃快速无损判别装备提供了理论基础。

参考文献:

[1] 王金华, 杜超, 梁晨, 等. 贵长猕猴桃多糖提取工艺及体外抗氧化功能[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 19-23. WANG Jin-hua, DU Chao, LIANG Chen, et al. Extraction and Antioxidant Activity of Polysaccharides from Guichang Kiwifruit[J]. Food Science, 2016, 37(20):

19-23.
[2] 孟庆龙, 尚静, 黄人帅, 等. 基于主成分回归的猕猴桃可溶性固形物无损检测[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 19-24. MENG Qing-long, SHANG Jing, HUANG Ren-shuai, et al. Nondestructive Detection for Soluble Solids Content of Kiwifruits Based on Principal Component Regression[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 19-24.
[3] 迟茜, 王转卫, 杨婷婷, 等. 基于近红外高光谱成像的猕猴桃早期隐性损伤识别[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 235-241. CHI Qian, WANG Zhuan-wei, YANG Ting-ting, et al. Recognition of Early Hidden Bruises on Kiwifruits Based on Near-Infrared Hyperspectral Imaging Technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 235-241.
[4] 刘燕德, 徐海, 孙旭东, 等. 不同产地苹果糖度可见近红外光谱在线检测[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 482-491. LIU Yan-de, XU Hai, SUN Xu-dong, et al. On-Line Detection of Soluble Solids Content of Apples from Different Origins by Visible and Near-Infrared Spectroscopy[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 482-491.
[5] 许丽佳, 陈铭, 王玉超, 等. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2188-2195. XU Li-jia, CHEN Ming, WANG Yu-chao, et al. Study on Non-Destructive Detection Method of Kiwifruit Sugar Content Based on Hyperspectral Imaging Technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2188-2195.
[6] CECILIA R, DOLORES P M, ANA G V. Optimizing Spatial Data Reduction in Hyperspectral Imaging for the Prediction of Quality Parameters in Intact Oranges[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 1-7.
[7] LI X, WEI Y, XU J, et al. SSC and pH for Sweet Assessment and Maturity Classification of Harvested Cherry Fruit Based on NIR Hyperspectral Imaging Technology[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 143: 112-118.
[8] ZHANG H, ZHAN B, PAN F, et al. Determination of Soluble Solids Content in Oranges Using Visible and near Infrared Full Transmittance Hyperspectral Imaging with Comparative Analysis of Models[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 163: 1-9.
[9] GARILLOS-MANLIGUEZ C A, CHIANG J Y. Multi-modal Deep Learning and Visible-Light and Hyperspectral Imaging for Fruit Maturity Estimation[J].

- Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(4): 1288.
- [10] FENG L, WU B, ZHU S, et al. Application of Visible/Infrared Spectroscopy and Hyperspectral Imaging with Machine Learning Techniques for Identifying Food Varieties and Geographical Origins[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 680357.
- [11] LAN W, JAILLAIS B, RENARD C, et al. A Method Using near Infrared Hyperspectral Imaging to Highlight the Internal Quality of Apple Fruit Slices[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 1-8.
- [12] 黄文倩, 陈立平, 李江波, 等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 272-277.
- HUANG Wen-qian, CHEN Li-ping, LI Jiang-bo, et al. Effective Wavelengths Determination for Detection of Slight Bruises on Apples Based on Hyperspectral Imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 272-277.
- [13] 张保华, 黄文倩, 李江波, 等. 基于高光谱成像技术和 MNF 检测苹果的轻微损伤[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1367-1372.
- ZHANG Bao-hua, HUANG Wen-qian, LI Jiang-bo, et al. Detection of Slight Bruises on Apples Based on Hyperspectral Imaging and MNF Transform[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1367-1372.
- [14] TIAN Xi, FAN Shu-xiang, HUANG Wen-qian, et al. Detection of Early Decay on Citrus Using Hyperspectral Transmittance Imaging Technology Coupled with Principal Component Analysis and Improved Watershed Segmentation Algorithms[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111071.
- [15] 郭文川, 王铭海, 谷静思, 等. 近红外光谱结合极限学习机识别贮藏期的损伤猕猴桃[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(10): 2720-2727.
- GUO Wen-chuan, WANG Ming-hai, GU Jing-si, et al. Identification of Bruised Kiwifruits during Storage by near Infrared Spectroscopy and Extreme Learning Machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2720-2727.
- [16] SUN Y, WANG Y, XIAO H, et al. Hyperspectral Imaging Detection of Decayed Honey Peaches Based on Their Chlorophyll Content[J]. *Food Chemistry*, 2017, 235: 194-202.
- [17] FU Xia-ping, WANG Meng-yao. Detection of Early Bruises on Pears Using Fluorescence Hyperspectral Imaging Technique[J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(1): 115-123.
- [18] 王思玲, 蔡骋, 马惠玲, 等. 基于高光谱成像的苹果水心病无损检测[J]. *北方园艺*, 2015(8): 124-130.
- WANG Si-ling, CAI Cheng, MA Hui-ling, et al. Nondestructive Detection of Apple Watercore Based on Hyperspectral Imaging[J]. *Northern Horticulture*, 2015(8): 124-130.
- [19] KENNARD R W, STONE L A. Computer Aided Design of Experiments[J]. *Technometrics*, 1969, 11(1): 137-148.

责任编辑: 曾钰婵