

基于多源光谱信息融合的采后荔枝蒂蛀虫无损检测

冯弘历¹, 徐赛^{2*}, 陆华忠³, 梁鑫², 赵梓坤¹, 李文景⁴

(1. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642) (2. 广东省农业科学院设施农业研究所, 广东广州 510640)

(3. 广东省农业科学院, 广东广州 510640) (4. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广东广州 510640)

摘要: 为探究一种荔枝果实蒂蛀虫的无损检测方法, 采用多源光谱技术采集荔枝可见/近红外光谱、高光谱图像和 X 射线成像信息, 使用多元散射校正 (Multiplicative Scatter Correction, MSC) 和标准正则变换 (Standard Normal Variate Transform, SNV) 对光谱进行预处理, 再使用连续投影法 (Successive Projections Algorithm, SPA) 提取光谱特征波段后, 对三种单一检测方法以及多源信息融合分别进行偏最小二乘 (Partial Least Squares Regression, PLSR) 和支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 建模识别对比。结果表面: 单独使用一种检测方法时, 荔枝的可见/近红外光谱数据所建立的 MSC+SPA+SVR 模型最佳, 训练集模型参数 $R^2=0.84$, RMSE=0.20, 测试集模型参数 $R^2=0.79$, RMSE=0.23。采用不同检测方法组合的特征信息融合结合 SVR 进行建模识别, 通过对比得到可见/近红外光谱结合 X 射线成像的检测效果最佳, 训练集模型参数 $R^2=0.90$, RMSE=0.15, 测试集模型参数 $R^2=0.84$, RMSE=0.19, 区分准确率为 95.00%。由此可见, 可见/近红外透射光谱和 X 射线成像的多源光谱信息融合能够获得较好的荔枝蒂蛀虫无损检测效果, 研究可为后续荔枝蒂蛀虫果无损检测装备研发提供参考。

关键词: 可见/近红外光谱; 荔枝; 高光谱成像; X 射线成像; 多源光谱融合

文章编号: 1673-9078(2025)01-284-291

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1419

Multi-spectral Fusion-based Non-destructive Detection of Damage by *Conopomorpha sinensis* in Postharvest Litchi

FENG Hongli¹, XU Sai^{2*}, LU Huazhong³, LIANG Xin², ZHAO Zikun¹, LI Wenjing⁴

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Institute of Facility Agriculture, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

(3. Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

(4. Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A non-destructive detection method to identify damage caused by *Conopomorpha sinensis* in litchi fruit was examined with the help of multiple spectral techniques. The visible/near-infrared spectra, hyperspectral images, and X-ray imaging data of litchi were collected. Multiplicative scatter correction and standard normal variate transform were adopted

引文格式:

冯弘历,徐赛,陆华忠,等.基于多源光谱信息融合的采后荔枝蒂蛀虫无损检测[J].现代食品科技,2025,41(1):284-291.

FENG Hongli, XU Sai, LU Huazhong, et al. Multi-spectral fusion-based non-destructive detection of damage by *Conopomorpha sinensis* in postharvest litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 284-291.

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 广东省农业科学院协同创新中心项目 (XTXM202201); 国家自然科学基金面上项目 (31971806); 广东省国际科技合作项目 (2023A0505050129); 广东省农业科学院十四五新兴学科建设项目 (202134T); 广东省农业科学院金颖之星人才培养计划项目 (R2020PY-JJX020); 广州市青年科技人才托举工程项目

作者简介: 冯弘历 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品品质无损检测, E-mail: 809807567@qq.com

通讯作者: 徐赛 (1991-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品品质无损检测技术与装备, E-mail: xusai@gdaas.cn

to preprocess the spectra. Subsequently, characteristic wavelengths were obtained from the spectra using the successive projections algorithm (SPA). After that, partial least squares regression (PLSR) and support vector regression (SVR) were performed on the three spectral methods individually and the proposed multi-spectral fusion method. The results suggest that when one single method is used for detection, the MSC+SPA+SVR model established based on the visible/near-infrared spectra of litchi gives the best results. The performance indicators of the training set are $R^2=0.84$ and $RMSE=0.20$, while those of the test set are $R^2=0.79$ and $RMSE=0.23$. SVR modeling results of different combinations of spectral techniques demonstrate that combining visible/near-infrared spectra with X-ray imaging data provides optimal detection results. The performance indicators of the training set are $R^2=0.90$ and $RMSE=0.15$, and those of the test set equal $R^2=0.84$ and $RMSE=0.19$, with a detection accuracy of 95.00%. Therefore, multi-spectral fusion of visible/near-infrared spectra and X-ray imaging data enables better detection results for damage caused by *Conopomorpha sinensis* in litchi fruit. These findings give insights to future research on the development of related equipment.

Key words: visible/near-infrared spectroscopy; litchi; hyperspectral imaging; multi-spectral fusion

荔枝是热带和亚热带水果，广受世界消费者喜爱。中国是荔枝的主产国，种植面积与产量均居世界第一^[1]。蒂蛀虫 (*Conopomorpha sinensis*) 是荔枝生产的第一害虫，主要以幼虫钻蛀幼果侵害最为严重，受害严重的果园蛀果率高达 95% 以上^[2]。荔枝蒂蛀虫会对荔枝内部造成破坏，严重影响荔枝果品与出口。寻找一种无损、智能、快速的荔枝蒂蛀虫检测方法对虫果进行剔除，可从另一角度解决产业问题，具有重要意义。

目前，可见/近红外光谱^[3]、高光谱成像^[4]、X 射线成像^[5] 在农产品品质无损智能检测方面发挥着重要作用。可见/近红外光可穿透农产品外表的特征，获取较为全面的内部品质特征信息，包括被侵害荔枝的结构破坏、果肉营养供给下降导致新鲜度偏低、果皮的多酚含量、花色苷含量和抗氧化能力指数下降等^[6]。荔枝蒂蛀虫幼虫会在成茧期之前从果蒂附近离开荔枝果实，留下痕迹，可通过高光谱成像技术获取荔枝果蒂附近表皮以及可透光表层的特征^[7,8]。蒂蛀虫侵害后留下的虫粪、空洞会导致该部分密度降低，X 射线成像技术可以穿透荔枝果实获取其内部结构特征，还原密度变化。但由于为害程度和为害部位的差异，上述检测方法并不一定适用所有的检测样本。

为此，本研究基于可见/近红外光谱、高光谱成像技术、X 射线成像技术搭建了荔枝蒂蛀虫无损智能检测平台，分别对荔枝果实样本进行无损采样，并切开荔枝判断并记录荔枝蒂蛀虫的侵害情况。通过单一方法与多源信息融合的对比，择优建立荔枝果实蒂蛀虫无损检测模型。研究结果可为产业后续开发荔枝蒂蛀虫流水线动态无损检测装备提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品及处理

本研究荔枝品种为桂味，于广东省广州市增城区荔科技园采摘荔枝果实 60 个，包含虫果 27 个，无虫果 33 个。当天带回实验室进行荔枝可见/近红外光谱、高光谱成像、X 射线成像信息采集，随后立即剖开观察并记录荔枝内部实际情况。

1.2 无损检测平台的搭建

1.2.1 可见/近红外光谱无损检测平台的搭建

采用实验室自搭建的可见/近红外光谱无损检测平台，包括 Ocean Optics QE pro 可见/近红外光谱仪（波段范围 400~1 100 nm），美国 Ocean 公司；不透光的荔枝固定托盘、一只 10 W 卤素灯以及一台计算机。经过调整测试，荔枝的可见/近红外光谱的较优采集参数设定为：积分时间 2 000 ms；接收光纤距离荔枝托盘距离 5 mm；荔枝与光源距离 5 mm；荔枝果梗向上立放于托盘的中心位置，光源、进光口、荔枝、出光口、光纤处于同一垂直线上。

1.2.2 高光谱成像无损检测平台的搭建

采用实验室自搭建的高光谱成像无损检测平台，包括：FX17E 高光谱成像仪（波段范围 400~1 000 nm，光谱分辨率 8 nm），芬兰 Specim 公司；黑色磨砂电动传送带、一套由 8 只 50 W 的卤素灯和漫反射黑色遮光壁组成的照明系统以及一台计算机。高光谱图像数据获取基于计算机上的 Spectron Pro 软件，将高光谱仪器预热 15 min 后

进行荔枝图像采集。为避免获取的图像失真、模糊，正式采集前经过多次预实验确定最佳的数据采集参数：光谱仪的曝光物距为 45 mm，曝光时间为 64.742 ms，帧速率为 15 Hz，扫描速度为 800 pps，单个荔枝的图像分辨率为 200 像素 × 200 像素。为减少冗余信息，参考已有研究提取 120 像素 × 120 像素果梗周围容易受到荔枝蒂蛀虫钻蛀的区域图像^[9,10]。实验前进行黑白板校正^[11]。

1.2.3 X射线无损检测平台的搭建

采用实验室自搭建的 X 射线成像无损检测平台，包括 RAYON4343 型 X 射线发生探测器（射线源电压 100 kV，射线源功率 15 W，焦点尺寸 5 μm），东莞睿奥检测设备公司；反射 X 射线材料覆盖的电控传送带以及计算机一台。经过多次预实验确定 X 射线成像采集的数据为 50 kV、192 uA 激发 X 射线管，电控传送带速率为 2.72 m/s，于 X 射线管正下方停留 2.8 s 获取图像，图像分辨率为 3 000 像素 × 3 000 像素。荔枝由低密度泡沫托盘固定，卧躺于托盘上，X 射线发生器、图像采集器与荔枝果梗、果核成垂直方向^[12]。

1.3 数据分析与建模

为消除样本背景高频噪声、基线偏移、光散射等对光谱稳定性有游戏的不利因素，本文采用多元散射校正（Multiplicative Scatter Correction, MSC）^[13]和标准正则变换（Standard Normal Variate Transform, SNV）^[14]对采集的光谱数据进行预处理以消除噪声。为从全光谱中进行有效波长的提取以提升模型运算效率^[15]，采用连续投影法（Successive Projections Algorithm, SPA）^[16]进行特征提取；采用 PCA 初步判断荔枝有虫果与无虫果的分类效果，由第一和第二主成分构成的样本散点图表示^[17]，最后对特征提取后的光谱数据采用偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression, PLSR）^[18]和支持向量回归（Support Vector Regression, SVR）^[19]分训练集与测试集进行建模识别。经过多次测试，偏最小二乘法的核心参数潜变量设置为 7；支持向量机的核函数类型为径向基核函数，用训练集交叉验证和网格搜索法进行参数寻优，按照均方根最小原则确定惩罚参数 C 和核参量 g 的值。无虫和有虫荔枝的期望输出设定为 0 和 1。检测效果用预测值与实际值之间的决定系数 R^2 、均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）表示^[20]和正确率表示。由于

PLSR 和 SVR 的结果输出为小数，统计 PLSR 与 SVR 的识别正确率时，参考已有研究将 PLSR 与 SVR 结果输出进行四舍五入取整，小于等于 0 输出为无虫，大于等于 1 为有虫^[21]。MSC、SNV、SPA 及 PCA 算法由 Matlab R2020a 软件实现，PLSR、SVR 算法由软件 The Unscrambler X 10.4 实现。

2 结果与分析

2.1 可见/近红外光谱对荔枝蒂蛀虫的检测

2.1.1 可见/近红外光谱分析及预处理

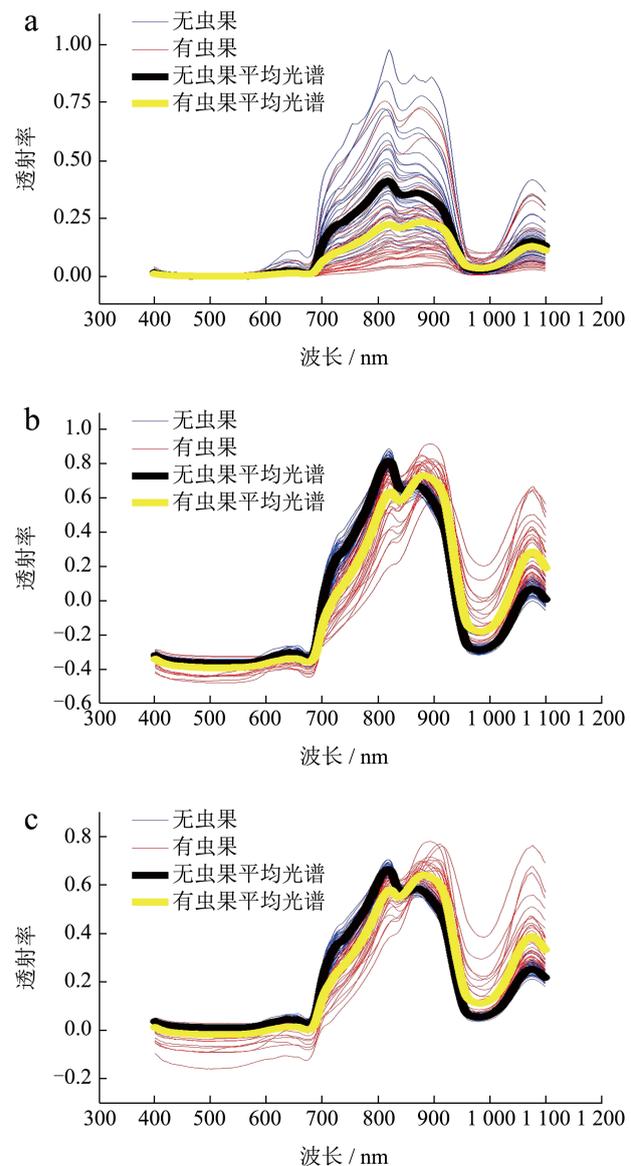


图 1 荔枝可见 / 近红外光谱

Fig.1 Litchi fruit's visible/near infrared spectrum data

注：(a) 原始光谱；(b) SNV 处理光谱；(c) MSC 处理光谱。图 2 同。

表 1 基于不同预处理方法与不同建模方法建立的可见/近红外光谱预测模型性能

Table 1 Performance of visible/near-infrared spectral prediction models based on different preprocessing methods and modeling methods

预处理及建模方法	训练集			测试集		
	RMSE	R^2	正确率 /%	RMSE	R^2	正确率 /%
SNV+SPA+PLSR	0.23	0.79	85.00	0.25	0.73	85.00
SNV+SPA+SVR	0.24	0.77	86.67	0.27	0.74	85.00
MSC+SPA+PLSR	0.19	0.86	90.00	0.21	0.80	88.33
MSC+SPA+SVR	0.20	0.84	91.67	0.23	0.79	90.00

有虫果和无虫果荔枝的可见/近红外原始光谱及其平均光谱如图 1a 所示, 无虫果的透射率总体比有虫果高, 均在 815 nm 和 875 nm 附近出现峰值。无虫果在 815 nm 附近的峰值比有虫果的高, 而有虫果在 875 nm 附近的峰值比无虫果的高。出现在 815 nm 和 875 nm 附近的吸收峰与 C—H 键拉伸振动的第三、四泛音以及 C=C 键拉伸振动第一泛音有关^[22], 被蒂蛀虫侵害后的荔枝果实果蒂处被破坏, 果树无法通过果蒂给果实输送养分, 导致有虫果与无虫果的果肉成分产生差异^[23]。由于荔枝表面粗糙, 采样过程中易混入散射光, 因此采用 SNV 和 MSC 两种方法进行数据预处理, 降噪后的光谱分别如图 1b 与图 1c 所示, 同类光谱之间聚拢性更好, 无虫果和有虫果在 815 nm 与 875 nm 附近呈现出的波形差异更加明显。但 SNV 和 MSC 在实际检测过程中哪种方法更优还需要进一步建模分析验证。

2.1.2 荔枝有虫/无虫样品的可见/近红外光谱检测模型

SNV、MSC 两种预处理方法处理后的光谱数据结合 SPA 特征波长选取结果及其基于 PLSR 和 SVR 两种建模方法的性能对比, 如表 1 所示。其中 MSC+SPA+SVR 对荔枝蒂蛀虫的无损检测区分效果较优, 其模型参数训练集 $R^2=0.20$, RMSE=0.84, 测试集 $R^2=0.79$, RMSE=0.23, 对训练集的正确率为 91.67%, 对测试集的正确率为 90.00%。MSC 在荔枝蒂蛀虫识别的降噪效果优于 SNV, 其原因是荔枝表皮粗糙导致散射噪声较大, 同时不同荔枝个体差异更加增大了噪声的差异, SNV 是根据单个样本自身的光谱数据进行散射降噪的, MSC 是根据多个样本的平均光谱数据来进行散射降噪的, 因此 MSC 比 SNV 更适合解决荔枝散射降噪的问题^[24]。SVR 对荔枝蒂蛀虫识别的建模效果优于 PLSR, 由于 SVR 相比于 PLSR 具有更好的非线性识别能力。相比 PLSR 模型, SVR 模型对荔枝有、无虫果的区分的准确率提高 1.67%, 同样使用效果

更佳的 SVR 模型下, 使用 MSC 预处理相比 SNV 预处理所建立的模型区分正确率提供 5%。对于荔枝的可见/近红外光谱数据而言, 使用多元散射校正进行预处理后, 模型更稳定、可靠性更高, 使用支持向量回归所建立的模型准确率更高。可以推断可见/近红外光谱与荔枝蒂蛀虫发生特性之间的非线性特性要强于线性特性。

但由于单一的可见/近红外透射光谱检测会把少数受蒂蛀虫侵害时间较短, 果肉和果皮的化学成分未发生明显变化的荔枝有虫果样品误判成无虫果, 导致区分的正确率降低, 因此后续需要引入可以对蒂蛀虫在荔枝内部啃咬造成果肉的水分、果蒂果核质地^[25]的变化进行检测的 X 射线成像技术, 以及可以对荔枝表皮是否有虫口进行检测的高光谱成像技术, 进一步提高对荔枝有虫果和无虫果的区分效果。

2.2 高光谱成像对荔枝蒂蛀虫的检测

2.2.1 荔枝果实的高光谱图谱及预处理

高光谱成像可以对荔枝的表皮以及可透光的浅层组织进行检测, 与着重于获取果实内部特征的可见/近红外透射光谱不同, 高光谱成像检测更着重于检测果实表面特征, 因此果皮的叶绿素、水分等成分可以通过高光谱图谱体现。图 2a 所示为有虫、无虫荔枝样品在 400~1 000 nm 波段的反射光谱曲线。原始光谱图中有虫果和无虫果的平均光谱差距不大。荔枝表面粗糙, 且表皮有凸起的果刺, 在检测过程中容易产生散射干扰, 因此需要引入 SNV 和 MSC 两种预处理方法消除检测荔枝表面时产生的散射等情况导致光谱整体发生偏移, 预处理后的光谱如图 2b 和图 2c 所示, 观察预处理后的光谱可以发现, 有虫果的光谱与无虫果的光谱存在差异, 700~800 nm 波段的吸收峰低于无虫果样品, 970 nm 附近的吸收峰高于无虫果样品。700~800 nm 处的吸收峰可能归因于样品中的叶绿素, 表面有虫

口的样品荔枝表皮被破坏, 叶绿素含量减少, 在此次峰值较低或不出现峰值^[26]; 970 nm 附近的吸收峰可能与水中的 O-H 键的伸缩振动造成, 表面有虫口的荔枝样品果实内部枝叶渗出, 导致表皮含水率更高, 在 970 nm 附近出现吸收峰^[27]。但由于高光谱成像主要作用于荔枝表皮, 而 400~1 000 nm 波段的光谱中较为明显的特征是由蒂蛀虫对果皮进行破坏后导致的, 表皮没有虫口的有虫果样品表皮的叶绿素和水分的含量与无虫果样品相差较小, 因此高光谱成像技术对荔枝是否被蒂蛀虫为害的总体检测效果较差。但是通过平均光谱可知表面无虫口的有虫果和无虫果的光谱差异依然较小, 需要后续引入 PLSR 和 SVR 两种建模方法进行建模分析, 确定经过 SNV 或 MSC 预处理后的高光谱图谱对有虫果和无虫果的区分准确度。

2.2.2 荔枝有虫/无虫样本的高光谱检测模型

荔枝有虫果和无虫果的高光谱不同预处理和建模方法的结果如表 2 所示, 经过 MSC 预处理后使用 SPA 进行特征波段选取, 再采用 SVR 建模的高光谱预测模型准确度最高。其原因是采集荔枝高光谱时, 只截取果蒂周围小范围的光谱数据, 受其他样品的散射影响较少, 因此主要为了校正样品间由散射引起的光谱误差较少, 同时, 少数有虫口的有虫果样品的光谱与平均光谱差异较大, 因此通过样品集的平均光谱来实现对每个光谱进行校正的 MSC 是较为有效的光谱预处理方法。另外, 与可见/近红外光谱相同, SVR 对荔枝蒂蛀虫识别的建模效果优于 PLSR, 由于 SVR 相比于 PLSR 具有更好的非线性识别能力, 因此高光谱与荔枝蒂蛀虫发生特性之间的非线性特性要强于线性特性。高光谱成像技术对荔枝有虫果和无虫果使用 MSC+SPA+SVR 所建立的模型最佳, 其模型训练集 $R^2=0.59$, RMSE=0.31, 测试集 $R^2=0.56$, RMSE=0.29, 训练集区分准确率最高为 66.67%, 测试集区分准确率最高为 63.33%。再同种建模方式的情况下, 使用 MSC 预处理后, 模型更稳定、可靠性更高。同样使用效果更佳的 SVR 建模的情况下, 经过 MSC 预处理后的数据相比 SNV 预处理所建立的模型区分准确率提高 5%。但是通过建模结果可以发现, 高光谱成像技术只能对表面有虫口的有虫果样品有较准确的识别效果, 容易把蒂蛀虫尚且留在荔枝果实内没有通过钻蛀的方式经过果皮离开的果实样品和虫体从荔枝幼果时期离开果实且果实表皮的虫口已经

愈合的果实样品误判为无虫果^[28,29], 因此高光谱成像技术可以把果皮有虫口的果实样品挑选出, 但对有虫果和无虫果整体的区分准确率较低。

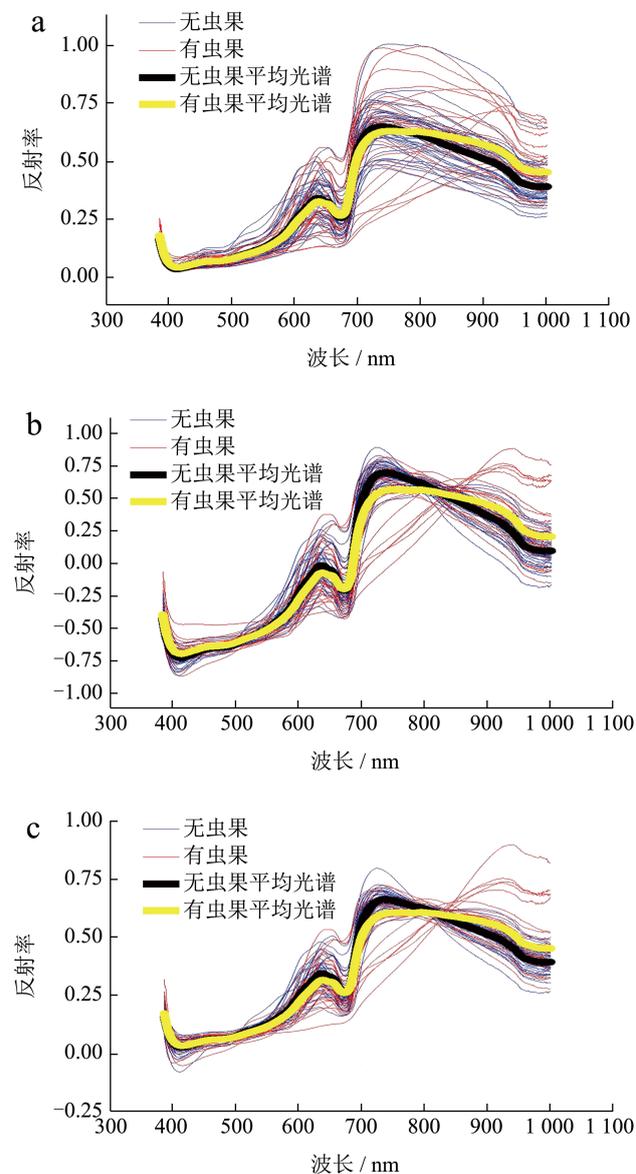


图 2 荔枝的高光谱图谱

Fig.2 Litchi fruit's hyperspectral spectrum data

2.3 X射线成像对荔枝蒂蛀虫的检测

2.3.1 X射线成像的PCA分类

有虫果的果蒂被蒂蛀虫的破坏和啃食后留下空洞和虫粪, 被啃食后留下的空洞和虫粪密度较正常区域低, X 射线成像可以检测出果实样品的密度并以不同灰度呈现出差别, 荔枝无虫果 X 射线图像如图 3a 所示, 有虫果 X 射线图像如图 3b 所示。把经过背景灰度校正的果蒂、果核、果肉处的灰度值使用主成分分析 (PCA) 对三个灰度值数据集进行初

步的可视化分析,绘制的得分图如图4所示,主成分1(果蒂灰度值因子)和主成分2(果核灰度值因子)贡献度分别为73%和27%,总贡献率接近100%。结果显示有虫、无虫样品可以被区分开来,但距离较近,聚类性有待提高。

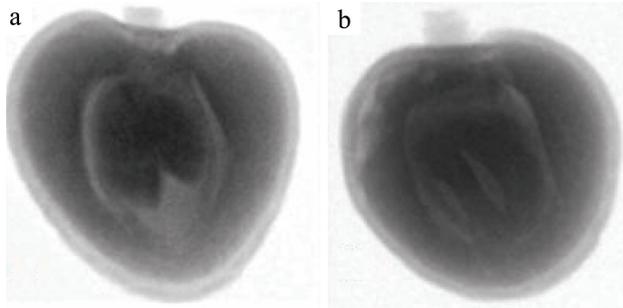


图3 荔枝的X射线图像

Fig.3 X-ray image of litchi fruit

注:(a)无虫果;(b)有虫果。

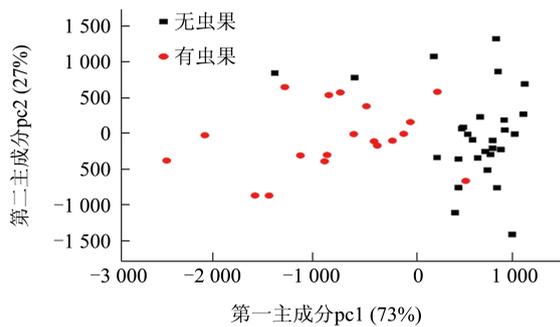


图4 蒂蛀虫果、非虫果的X射线成像特征区域灰度值PCA分类

Fig.4 PCA discrimination results of infected or noninfected litchi fruit based on X-ray grayscale value data

2.3.2 X射线成像的建模分析

为了探索X射线成像对荔枝蒂蛀虫无损检测的效果,采用PLSR和SVR两种方法对X射线成像的检测结果建立分类判别模型,结果如表3所示。SVR模型比PLSR模型的准确率更高,模型训练集 $R^2=0.71$, $RMSE=0.15$,区分正确率为90.00%,测

试集 $R^2=0.68$, $RMSE=0.20$,区分正确率为88.33%。X射线区域灰度值所建立的模型相比可见/近红外光谱数据建立的模型区分正确率低1.67%,相比高光谱成像数据建立的模型区分正确率提高25%。因此使用SVR对X射线成像的荔枝蒂蛀虫无损检测效果更好,由于SVR相比于PLSR具有更好的非线性识别能力,可以推断荔枝X射线成像的特征区域灰度值与荔枝蒂蛀虫发生特性之间的非线性特性要强于线性特性。同时,模型的目的在于通过X射线成像的图像数据区分有虫果和无虫果,而SVR更适用于二类分类问题,具有优秀的泛化能力。

2.4 多源光谱信息融合对荔枝蒂蛀虫的检测

为进一步探究三种检测方法的多源信息融合对荔枝蒂蛀虫无损检测的效果,各检测方法数据在本研究得到的较优方式下进行预处理后,不同的检测方法组合的信息融合检测效果如表4所示。其中可见/近红外光谱与X射线成像的检测数据融合后共同作为SVR模型的建模数据,建立的模型对训练集的回判 $R^2=0.90$ 、 $RMSE=0.15$ 、检测准确率为96.67%,对测试集的检测 $R^2=0.84$ 、 $RMSE=0.19$ 、测试准确率为95.00%,为准确率最高的检测方法组合,相比单一检测效果最佳的可见/近红外光谱检测准确率提高了5%,所建立的模型 R^2 提高0.05, $RMSE$ 降低0.04,模型更稳定、可靠性更高。因此,可见/近红外光谱和X射线成像的检测结果结合分析时,两种技术可以互相弥补,达到提高检测准确率的效果。而高光谱只能对荔枝表层信息进行获取,对蒂蛀虫检测精度不高,因此加入高光谱数据的组合无法达到最优的检测效果,甚至会降低检测精度^[30,31]。对比各种检测方法组合的效果确定最佳的测试方法组合为可见/近红外光谱+X射线成像,同时此两种方法的检测时间较短,可以集成在同一条流水线上进行在线检测。

表2 基于不同预处理方法与不同建模方法建立的高光谱光谱预测模型性能

Table 2 Performance of hyperspectral spectral prediction models based on different preprocessing methods and modeling methods

预处理及建模方法	训练集			测试集		
	RMSE	R^2	正确率/%	RMSE	R^2	正确率/%
SNV+SPA+PLSR	0.33	0.59	60.00	0.34	0.56	58.33
SNV+SPA+SVR	0.35	0.57	61.67	0.36	0.55	58.33
MSC+SPA+PLSR	0.30	0.61	65.00	0.33	0.58	61.67
MSC+SPA+SVR	0.31	0.59	66.67	0.29	0.56	63.33

表 3 基于不同建模方法建立的X射线成像预测模型性能

Table 3 Performance of X-ray grayscale value data prediction models based on different modeling methods

建模方法	训练集			测试集		
	RMSE	R^2	正确率/%	RMSE	R^2	正确率/%
PLSR	0.19	0.72	88.33	0.22	0.69	86.67
SVR	0.15	0.71	90.00	0.20	0.68	88.33

表 4 不同检测方法融合对荔枝蒂蛀虫果与非虫果的检测效果

Table 4 Effect of different detection methods fusion on the detection of infected or noninfected litchi fruit

检测方法	训练集			测试集		
	RMSE	R^2	准确率/%	RMSE	R^2	准确率/%
可见/近红外光谱+高光谱	0.16	0.88	91.67	0.21	0.80	90.00
可见/近红外光谱+X射线成像	0.15	0.90	96.67	0.19	0.84	95.00
高光谱+X射线成像	0.21	0.80	90.00	0.27	0.69	88.33
可见/近红外光谱+高光谱+X射线成像	0.22	0.79	86.67	0.27	0.71	85.00

3 结论

本文分别利用可见/近红外透射光谱技术、高光谱成像技术、X射线成像技术对荔枝蒂蛀虫果和非虫果进行检测获取特征数据,建立了一种区分荔枝蒂蛀虫果与无虫果的无损检测模型。分别探讨了MSC和SNV光谱预处理方法分别对PLSR和SVR两种模型的影响,比较了可见/近红外透射光谱技术、高光谱成像技术、X射线成像技术的单一使用与不同检测方法的融合分析对模型准确率的影响,最终确定了MSC处理的可见/近红外透射光谱经过SPA选取特征波长与X射线成像的特征区域灰度值结合分析,利用SVR建立模型,对荔枝蒂蛀虫果与非虫果的区分效果最佳,测试集的检测RMSE为0.19、 R^2 为0.84、测试准确率为95.00%,相比单独使用检测最佳的可见/近红外光谱准确率提高5%,研究结果为荔枝蒂蛀虫无损检测与智能分选提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 庄丽娟,邱泽慧.2019年中国荔枝产业发展特征与政策建议[J].中国南方果树,2021,50(4):184-188.
- [2] 陈文训.荔枝蛀虫生活史及其防除法之初步研究[J].协大农报,1941,3(2):153161.
- [3] SUN X D, ZHU K, JIANG X G, et al. Non-destructive detection of blackheart and soluble solids content of intact pear by online NIR spectroscopy [J]. The Journal of Supercomputing, 2020, 76(5): 3173-3187.
- [4] 周春欣,沈建国,蒋敏兰,等.基于高光谱成像技术与GBDT的大豆品种无损鉴别[J].中国粮油学报,2023,38(12):183-

190.

- [5] 杜灿.基于X射线成像技术的柑橘内部品质检测研究[D].南京:江苏大学,2021.
- [6] 张毛毛.预贮处理对采后荔枝果实MAP贮藏生理变化的影响[D].福州:福建农林大学,2023.
- [7] 李文景,董易之,姚琼,等.荔枝蒂蛀虫研究进展[J].昆虫学报,2018,61(6):721-732.
- [8] JUN T X, RUI L, RONG B B, et al. A micro-damage detection method of litchi fruit using hyperspectral imaging technology [J]. Sensors, 2018, 18(3): 700.
- [9] 邹小波,张小磊,石吉勇,等.基于高光谱图像的黄瓜叶片叶绿素含量分布检测[J].农业工程学报,2014,30(13):169-175.
- [10] 胡逸磊,姜洪喆,周宏平,等.高光谱成像技术检测油茶果成熟度[J].食品科学,2022,43(16):324-331.
- [11] 高晓惠.高光谱数据处理技术研究[D].西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2013.
- [12] 申利飞,田子建,白林绪.改进纹理模糊筛选下煤矸石X射线图像处理[J].激光与红外,2022,52(7):1090-1097.
- [13] 张娜,李震,兰维杰,等.基于可见光-近红外高光谱信息与数据融合的木质化鸡胸肉的判别模型构建[J].食品工业科技,2024,45(7):286-293.
- [14] 张悦,周骏辉,王思曼,等.基于可见光-近红外高光谱成像技术的陈皮陈化年份鉴别研究[J].光谱学与光谱分析, 2023,43(10):3286-3292.
- [15] 连雅茹.基于高光谱成像技术的番茄内部品质检测研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2020.
- [16] WU X, SONG X L, QIU Z J, et al. Mapping of TBARS distribution in frozen-thawed pork using NIR hyperspectral imaging [J]. Meat Science, 2016, 113: 92-96.
- [17] PAVEL P, JAKUB K, ERIK K, et al. On the utilization of principal component analysis in laser-induced breakdown spectroscopy data analysis, a review [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2018, 148: 65-82.

- [18] ZHU Z H, LI J M, GUO Y M, et al. Accuracy improvement of boron by molecular emission with a genetic algorithm and partial least squares regression model in laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33(2): 205-209.
- [19] ZHANG C, GUO C T, LIU F, et al. Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberry with support vector machine [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 11-18.
- [20] 龚爱平,王琦,邵咏妮.利用高光谱近红外波段的腊肠品质分级研究[J].*光谱学与光谱分析*,2017,37(8):2556-2559.
- [21] 徐赛,陆华忠,王旭,等.基于可见/近红外光谱的菠萝水心病无损检测[J].*农业工程学报*,2021,37(21):287-294.
- [22] 李志强,邱燕萍,欧良喜,等.荔枝蒂蛀虫发生规律及生活习性观察研究[J].*广东农业科学*,2008,7:8083.
- [23] 葛亮,王斌,张立明.基于偏最小二乘法的高光谱图像波段选择[J].*计算机辅助设计与图形学学报*,2011,23(11): 1844-1852.
- [24] GUO Z M, WANG M M, AGYEKUM A A, et al. Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 279: 109955.
- [25] ALHAMDAN A M, FICKAK A, ATIA A R. Evaluation of sensory and texture profile analysis properties of stored *Khalal barhi* dates nondestructively using Vis/NIR spectroscopy [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(6): e13215.
- [26] ZHANG J, HUANG W J, ZHOU Q. Reflectance variation within the in-chlorophyll centre waveband for robust retrieval of leaf chlorophyll content [J]. *PLOS ONE*, 2014, 9(11): e110812.
- [27] YU K Q, ZHAO Y R, LIU Z Y, et al. Application of visible and near-infrared hyperspectral imaging for detection of defective features in loquat [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 3077-3087.
- [28] 王舜.基于高光谱成像技术的脐橙产地与病害识别方法研究[D].南昌:华东交通大学,2022.
- [29] 张悦,李扬,宋月鹏.苹果轻微机械损伤高光谱无损检测 Stacking集成学习模型构建[J].*光谱学与光谱分析*,2023, 43(7):2272-2277.
- [30] 徐赛,陆华忠,丘广俊,等.水果品质无损检测研究进展及应用现状[J].*广东农业科学*,2020,47(12):229-236.
- [31] GADGILE D, LANDE B R, DHABDE A S, et al. X-ray imaging for detecting lack mould rot of *sapota (Achras sapota)* fruit [J]. *Plant Pathology & Quarantine*, 2017, 7(2): 92-94.