

# 高光谱成像技术在苹果品质无损检测中的应用

董聪颖<sup>1</sup>, 杨天意<sup>1</sup>, 陈谦<sup>2</sup>, 刘丽<sup>1,3</sup>, 肖雄<sup>1</sup>,  
魏志峰<sup>1</sup>, 石彩云<sup>1</sup>, 邵亚杰<sup>4</sup>, 高登涛<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>中国农业科学院郑州果树研究所, 郑州 450009; <sup>2</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

<sup>3</sup>中国农业科学院中原研究中心, 河南新乡 453500; <sup>4</sup>中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100

**摘要:** 中国是世界最大的苹果生产国, 品质是苹果质量最重要的评价指标, 传统的品质检测方法费时、费力且具有破坏性, 特别是对果实内部品质难以实现规模化检测和品质等级划分, 开展苹果品质快速、无损检测技术研究是实现中国苹果产业高质量发展的迫切需求。高光谱成像技术融合了传统成像技术和光谱分析技术, 能够获取大量包含连续波长信息的图像块, 提供关于待测目标的光谱和图像信息, 光谱信息可用于对水果内部品质的检测, 图像信息则可检测水果的外部品质, 是近年来发展迅速的一项果品品质无损检测技术。为了进一步了解国内外高光谱成像技术在苹果品质检测中应用的研究进展, 简介了高光谱成像技术的基本原理和常用的数据处理方法, 综述了高光谱技术在苹果内外部品质检测上的应用, 如可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硬度、含水量等内部品质, 损伤与缺陷、病虫害、农药残留等外部品质, 最后指出了目前该技术在应用过程中存在的问题, 并展望了该技术未来在苹果上的发展趋势, 以期今后苹果品质快速、无损检测提供新的思路。

**关键词:** 苹果品质; 高光谱成像技术; 无损检测

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2024)12-2582-13

## Application of hyperspectral imaging technology in non-destructive detection of apple quality

DONG Congying<sup>1</sup>, YANG Tianyi<sup>1</sup>, CHEN Qian<sup>2</sup>, LIU Li<sup>1,3</sup>, XIAO Xiong<sup>1</sup>, WEI Zhifeng<sup>1</sup>, SHI Caiyun<sup>1</sup>, SHAO Yajie<sup>4</sup>, GAO Dengtao<sup>1,4\*</sup>

(<sup>1</sup>Zhengzhou Fruit Research Institute, CAAS, Zhengzhou 450009, Henan, China; <sup>2</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; <sup>3</sup>Zhongyuan Research Center, CAAS, Xinxiang 453500, Henan, China; <sup>4</sup>Institute of Western Agriculture, CAAS, Changji 831100, Xinjiang, China)

**Abstract:** Apple is one of the most important fruit trees in the world. The external quality of apples, including color, size, peel damage, defects, etc., is the most direct feature that affects whether consumers buy or not, and the internal quality including soluble solids, titratable acid, hardness, etc., is essential to affect the nutritional value and sensory experience. Therefore, both internal and external qualities affect the market value of apples. It is very important to detect and evaluate the internal and external quality of apples after harvest. Traditional quality detection methods rely mainly on manual and instrumental methods, including mass spectrometry, high performance liquid chromatography, refractometry, and direct observation method. However, although these methods are highly precise, they have the disadvantages of being time-consuming, destructive, and difficult in detection on a large scale, especially detection of external quality with the naked eye would be affected by subjectivity. Therefore, in order to reduce the limitations of traditional methods in fruit quality detection, developing an accurate, rapid and

收稿日期: 2024-07-22 接受日期: 2024-09-25

基金项目: 河南省重点研发专项 (241111113500); 河南省科技攻关项目 (232102110036); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1610192023105)

作者简介: 董聪颖, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为智慧果园。E-mail: 2090852887@qq.com

\*通信作者 Author for correspondence. E-mail: gaodengtao@caas.cn

non-destructive fruit quality analysis method for quality detection and grading is essential. In recent years, non-destructive detecting has been widely used in fruit quality detection. At present, the commonly used non-destructive detecting technologies include near-infrared detection technology, fluorescence imaging detection technology, hyperspectral imaging technology, etc. Compared with the first two methods, hyperspectral imaging technology not only combines imaging technology with spectral technology, but can also obtain two-dimensional spatial information and one-dimensional spectral data at the same time, which consequently enables obtaining multiple dimension information with higher resolution. The image information obtained by hyperspectral imaging technology can be used to detect and evaluate the external quality, while the spectral information can be used to detect the internal quality. Therefore, hyperspectral imaging technology is expected to achieve non-destructive and accurate measurement and evaluation of the internal and external quality of apples. So far, various studies have been reported on the application of hyperspectral imaging technology to the quality detection of apples, and the feasibility of this technology in the non-destructive detecting technology of apple quality has been preliminarily confirmed. In order to deeply explore the research progress of hyperspectral imaging technology in apple quality detection and make hyperspectral imaging technology more widely used, this paper first introduced the basic components of hyperspectral system, imaging principles, and common methods of data processing in research. Secondly, the application progress of hyperspectral imaging technology in assessing apple internal and external quality was reviewed. Finally, the current challenges in the field of hyperspectral imaging were discussed, and the future direction of the more extensive and integrated application of this technology in the future was proposed. The research progress in the application of hyperspectral imaging technology in the internal and external quality of apples includes: (1) For internal quality, the technology can accurately quantify the soluble solids, firmness, and moisture content, which are essential for assessing flavor and ripeness. However, there are few studies on the prediction of titratable acids using hyperspectral imaging, which may be due to their lower levels in apple fruits. Therefore, future work can consider combining multiple technologies for further research. (2) In terms of external quality, the hyperspectral imaging can detect the shape, size, color, surface defects, contaminants, pest and disease infestations, and pesticide residues of apples by analyzing two-dimensional spatial information or combining image and spectral data, which is essential for post-harvest evaluation and grading. In addition, some studies have shown that hyperspectral imaging can distinguish internal pests and diseases in transmission patterns, which is important to ensure consumer safety and satisfaction. Although many studies have confirmed the application prospects of the hyperspectral imaging in apple quality detection, there are still some challenges in the application of this technology, such as the different data processing methods used in different origins and varieties, the low robustness of the model, the high cost of the instrument, and the transition from laboratory to actual field use. Therefore, future work can improve the accuracy of the model through the combination of multiple technologies and the development of more refined algorithms, so as to provide a better reference for non-destructive detecting of apple quality.

**Key words:** Apple quality; Hyperspectral imaging techniques; Non-destructive detecting

苹果口感酸甜、汁液丰富,且具有生态适应性强、营养价值高、耐贮藏等优点,深受消费者喜爱。随着人民生活水平的提高,消费者对苹果品质的要求也越来越严格,不仅要求苹果具有较好

的外观品质,而且更加关注口感、质地、营养价值等内部品质<sup>[1]</sup>。苹果外观品质包括颜色、大小、果皮损伤、缺陷等,是影响消费者是否购买的最直观特征,也是影响价格的关键因素;内部品质包括可溶性固形物含

量、可滴定酸含量、硬度等,是影响苹果营养价值和感官体验的关键特征,同时也是生产上判断苹果成熟的重要指标<sup>[2]</sup>。

中国是世界上最大的苹果生产国,但2023年全国苹果出口量仅为79.6万t,相对于3000多万t的产量,几乎可以忽略不计,与中国苹果生产第一大国的地位差距巨大。究其原因,主要是苹果生产质量不高,适宜出口的优质果较少,其次是苹果采后分级严重滞后,优级果和次级果等级划分不够明确,经过分级的标准化商品果少,市场竞争力不足<sup>[3]</sup>。因此,对苹果的品质进行综合评估有利于对不同品质的苹果进行分级以提高其市场竞争力。

传统的苹果品质检测方法主要依赖于人工和仪器进行,如使用硬度计测量苹果硬度,使用折光仪测定可溶性固形物含量,利用滴定法测定可滴定酸含量,利用高效液相色谱测量有机酸含量<sup>[4]</sup>,以及肉眼直观判断苹果是否存在外部损伤、缺陷、病害等,这些方法虽然准确性高且测量技术已经基本成熟,但费时、费力且具有破坏性,特别是对于果实内部品质,难以实现规模化检测和品质等级划分<sup>[5-6]</sup>。具体表现在,使用传统方法对内在品质测量前往往需要进行样品前处理,这不仅增加检测时间,而且对样品具有破坏性,限制了样品后续的使用或销售;使用人工评估外部品质时,可能存在一定程度的主观性,导致判断标准不一、等级划分不清等问题。简而言之,尽管传统的苹果品质检测方法在准确性上有其优势,但在样品处理、检测效率、破坏性和主观性方面存在限制,难以实现大规模、快速的品质检测,从而导致果品按质量分级难以实现。因此,开展苹果品质快速、无损检测技术研究是实现中国苹果产业高质量发展的迫切需求。

近年来,机器视觉技术和光谱技术在评估水果品质方面应用广泛。机器视觉技术依靠图像的灰度信息能够准确识别水果的形状、大小,使用RGB成像系统能够有效识别颜色和外部缺陷,在品质分级、品种分类等过程中发挥了重要的作用<sup>[7]</sup>。但通常来说,机器视觉技术不具备穿透能力,因而在内在品质检测上存在明显的局限性。光谱技术可以通过测定特定波长的吸收、反射和散射等光谱特性来获取样品的信息,这些信息可以用于预测样品的品质和成分,是一种有效的内部品质评估工具,但无法采集样品的空间信息<sup>[8]</sup>。因而,这两种方法在水果品质无

损检测的应用中均受到一定的限制。

高光谱成像技术的出现解决了上述两种方法存在的问题,该技术集成了成像技术和光谱技术的优点,能够同时对内部和外部品质进行评估和测量,是近几年国内外水果品质无损检测研究的热点<sup>[9-10]</sup>。因此,笔者简要介绍了高光谱成像技术原理、研究中常用的数据处理方法,综述了该技术在苹果品质检测中的应用以及在应用过程中存在的问题,最后展望了该技术未来在苹果品质检测上的应用方向及前景,以期今后高光谱成像技术在苹果品质检测领域的发展提供参考。

## 1 高光谱成像技术

### 1.1 高光谱系统简介及原理

高光谱成像技术将传统成像技术和光谱分析技术结合于一体,能够在大量连续的波长范围内同时获取待测样品的空间和光谱信息。这些信息能够形成一个包含每个像素点光谱信息的三维数据立方体,在一定程度上反映了待测样品内部物理性质和化学结构,从而能够实现苹果内部和外部品质的检测<sup>[11]</sup>。典型的高光谱成像系统包括光源、成像单元、带有相应控制软件的计算机。成像单元是获取样品光谱和空间信息的关键部件,由光谱仪及CCD相机或互补金属氧化物半导体(CMOS)相机组成<sup>[12]</sup>。

高光谱图像获取的方式有点扫描、线扫描和面扫描。其中,线扫描是品质检测最常用的方式<sup>[13]</sup>。

### 1.2 高光谱数据处理与分析

高光谱数据立方体中包含了样本的图像和光谱信息,反映了样本不同性质的信息。图像信息能够实现对外部品质的检测,光谱信息能够实现内在品质的检测,因此数据处理分析需要从光谱和图像两方面考虑<sup>[13]</sup>。

1.2.1 图像处理 高光谱图像在采集过程中容易受相机暗电流、样本形状不规则、光源不稳定的影响产生干扰。因此,要对图像进行黑白校正,校正公式如下:

$$R = \frac{I - B}{W - B} \quad (1)$$

其中, $R$ 为校正后的高光谱图像, $I$ 为原始图像, $B$ 为纯黑图像, $W$ 为白板图像。

图像处理包括图像预处理、图像分割和特征提取<sup>[11]</sup>。图像预处理的目的是增强有关信息的可检测

性,提高图像质量,使其更好地应用于后续的图像分割和特征提取。图像预处理的方法有直方图均衡化(histogram equalization)、主成分分析(principal components analysis)、灰度变换(gray level transformation)、对比度增强(contrast enhancement)等。图像分割的目的是将目标区域与背景区域分离,为后续感兴趣区域的提取提供基础,常用的方法有大津阈值分割算法(OTSU)、自适应阈值图像分割(Adaptive Threshold)、形态学处理等<sup>[13]</sup>。图像特征提取的目的是降低数据维、减少数据冗余和处理时间等。图像特征包括纹理、颜色和形态特征,纹理特征提取常用的方法有灰度共生矩阵(gray-level co-occurrence matrix)、Gabor滤波器、局部二值模式(LBP)、小波变换等;颜色特征提取方法有颜色直方图(color histogram)、颜色矩(color moments)、颜色聚合向量等;形态特征提取方法有傅里叶变换(fourier transform)、Sobel算子边缘检测等<sup>[14]</sup>。

1.2.2 光谱预处理 高光谱成像系统在采集信息时,会受到仪器、环境等诸多因素的干扰。因此,为了进一步提高数据的质量、提高模型的鲁棒性,在图像校正后需要进行光谱预处理,用于后续分析。常用的预处理方法有多元散射校正(multiplicative scatter correction)、一阶导数(first derivative)、二阶导数(second derivative)、均值中心化(mean centering)、归一化(mean normalization)、基线校正(baseline correction)、标准正态变量变换(standard normal variate)等<sup>[15]</sup>。

1.2.3 特征变量的选择 Hughes现象显示,当可获取的样本数量有限时,分类精度会随着波段数量的增加出现先上升后下降的趋势<sup>[16]</sup>。因此,即使原始高光谱数据立方体包含了几百个波段,但也并不是每个波长对应的信息都对后续的检测和建模有用。为了消除无关信息的影响,减小数据处理的时间和复杂程度,需要将预处理的光谱信息进行特征变量的选择。常用的特征波长提取方法有无信息变量消除法(uninformative variables elimination)、竞争性自适应权重取样法(competitive adaptive reweighted sampling)、连续投影算法(successive projections algorithm)、遗传算法(genetic algorithm)和随机蛙跳(random frog, RF)等<sup>[17]</sup>。

1.2.4 模型建立与评估 模型的建立分为定性和定量模型,这两种模型的关键区别在于他们的分析目

标,定性模型通常用于分类任务,即将样品根据其属性归入预定义的类别。定量模型则旨在预测连续数值类型的输出,例如水果的糖度、酸度、水分含量等内部品质指标。常用的定性模型建立方法有线性判别(linear discriminant analysis)、随机森林(random forest)、支持向量机(support vector machine)、K近邻(K-nearest neighbor)、最小二乘判别分析(partial least squares-discrimination analysis)等<sup>[18-19]</sup>。

在模型建立完成后,往往需要对评估指标模型的准确性和鲁棒性进行评价。常用于定量分析模型的评估指标有决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSEC)、残差预测偏差(RPD);定性模型的评估指标有准确率、精确率、召回率、F1分数、ROC曲线<sup>[1-5]</sup>。

## 2 高光谱成像技术在苹果品质检测中的应用

### 2.1 内部品质检测

内部品质是影响苹果风味的关键因素,也是机体获取维生素、碳水化合物等营养的来源<sup>[20]</sup>。因此,内部品质的检测对评价苹果的整体品质至关重要。一般来说,内部品质主要包含可溶性固形物含量、可滴定酸含量、硬度、水分含量等。

2.1.1 可溶性固形物含量(SSC) 可溶性固形物含量是果蔬产品中所有可溶解于水的化合物的总称,包括可溶性糖、酸、维生素、矿物质等物质,是判定果实品质的一个重要参数,也是判断成熟的关键指标<sup>[21]</sup>。为了提高果实品质及准确判断果实成熟期,不少研究学者利用高光谱成像技术对苹果可溶性固形物含量进行检测,是近年来内部品质检测的研究重点。

Çetin等<sup>[22]</sup>利用高光谱成像技术获取了不同收获时期的粉红女士苹果图像,通过图像分割得到苹果区域光谱数据,使用Bootstrap Random Forest方法对原始光谱数据进行特征选择,最后使用5种机器学习算法(人工神经网络ANN、k-最近邻KNN、决策树DT、偏最小二乘神经网络回归PLSR、多元线性回归DT)对SSC进行评估。研究结果表明,MLR算法对SSC的预测效果最好, $R^2=0.881$ 。Wang等<sup>[23]</sup>试图利用高光谱成像技术对苹果内在品质进行评估。试验结果表明,采用归一化不同光谱指数结合竞争性自适应重加权抽样提取的特征波长所建立的偏最小二乘回归模型效果最好,SSC相关系数 $R^2=0.901$ ,均方根误差RMSEv=0.535%。Tian等<sup>[24]</sup>基于

传统的特征选择方法提出了一种新的深度学习算法——堆叠加权自编码器(SWAE),并利用该算法提取包含SSC含量信息的深层特征,然后将特征信息输入灰狼优化-支持向量回归(GWO-SVR)模型中,以定量预测SSC。结果表明,SWAE-GWO-SVR模型的 $R^2$ 为0.943 6, RMSEP为0.132 8。Lu<sup>[25]</sup>利用高光谱散射技术获取了金冠(GD)和红冠(RD)苹果在500~1000 nm波段范围内的散射图像,并建立了反向传播前馈网络模型预测两种苹果SSC。试验表明,高光谱散射技术是一种用来预测苹果SSC的有效手段,但在试验中GD品种SSC的预测效果优于RD。这可能是由于RD苹果形状不够规则,对高光谱图像的获取产生了一定影响。

上述研究初步证明了高光谱成像技术在无损检测苹果SSC方面的实用性和准确性。通过使用不同的预处理方法、特征选择技术以及多种回归模型,研究人员成功地建立了准确预测SSC的模型。这些模型不仅能提高果实品质评估的精度,还有助于果实采摘和售卖时间的判断。同时研究结果还显示,果实的形状和规则性可能对预测模型的准确性产生影响,光谱信息和图像信息相融合可能有助于提高试验准确性。因此,未来应考虑从不同的位置收集光谱信息和理化值,使用多种图像和光谱信息处理方法并开发出新的算法,进一步挖掘数据之间的相关性。

**2.1.2 可滴定酸含量** 酸度是影响水果风味的重要因素,其中苹果酸和柠檬酸含量是主要的酸度指标。前人的研究表明,苹果风味的优劣与糖、酸的绝对值、糖酸比和固酸比均存在密切关系<sup>[26]</sup>。因此,对苹果中可滴定酸含量进行预测同样有利于改善苹果品质以及成熟期的判断。但由于酸在部分水果和蔬菜中的浓度比糖要小很多,因此导致光谱测量存在困难<sup>[27]</sup>。目前鲜见高光谱成像技术在苹果酸含量测定方面的研究,研究人员更多地利用近红外光谱对苹果酸度进行研究。

Lovász等<sup>[28]</sup>验证了近红外光谱透射技术在预测苹果的质量指标(硬度、折射率、pH及可滴定酸、干物质、醇不溶性固形物含量)方面的有效性。研究结果确认了近红外光谱透射法的适用性,但可滴定酸含量的预测精度低于其他品质指标。McGlone等<sup>[29]</sup>的研究描述了近红外光谱技术在预测苹果可滴定酸含量上的局限性。Peirs等<sup>[30]</sup>使用傅里叶近红外(FT-

NIR)光谱仪和标准光栅光谱仪对苹果酸度进行预测,研究结果表明,尽管FT-NIR光谱仪在酸度预测方面优于标准光栅光谱仪,但整体而言,酸度预测模型的准确性并不理想。

综上所述,尽管有研究利用近红外光谱技术验证了其在酸度预测上的潜力,但同时亦有研究揭示了光谱技术在酸度准确预测方面的挑战。这表明,尽管该技术是一种有效手段,但仍需要进一步改进或与其他方法结合使用,提高苹果酸度的预测准确性。目前,利用高光谱成像技术对水果酸含量的预测有葡萄<sup>[31-32]</sup>、芒果<sup>[33]</sup>、梨<sup>[34]</sup>。

**2.1.3 硬度** 硬度是判断水果成熟度和新鲜度的主要指标,特别是对于苹果这种质地较脆的水果来说。Wang等<sup>[23]</sup>在室外利用高光谱成像技术采集了100个富士苹果在500~900 nm波段范围内的高光谱图像,采用PTEE球面基准和光谱指数对图像进行定标,以消除太阳光强度不同、仪器差异等影响,接着利用稳定性竞争性自适应重加权采样(SCAR)提取特征波长,建立偏最小二乘回归分析(PLSR)模型。该试验结果表明,归一化不同光谱指数处理对室外采集的图像具有显著校正,且结合SCAR和PLSR能够有效预测苹果硬度,预测模型相关系数 $R^2=0.783$ ,均方根误差RMSEV=0.993。孟庆龙等<sup>[35]</sup>为实现基于高光谱成像技术和BP网络模型的苹果硬度无损检测,利用120个苹果在390~1030 nm范围内的平均反射光谱,建立BP网络预测模型。研究结果证实了高光谱成像技术和BP网络模型在苹果硬度预测上的有效性( $R_p=0.728$ ,  $R_{Pm}=0.282$ )。冯迪等<sup>[13]</sup>利用高光谱成像技术采集了苹果双面高光谱图像,并通过遗传算法开发神经网络(GA-BP)建立预测模型,实现了苹果糖度和硬度的同时检测。模型验证结果表明,糖度相关系数 $R^2$ 为0.847 6,均方误差MSE为3.32;硬度相关系数 $R^2$ 为0.793 8, MSE为9.6。赵杰文等<sup>[36]</sup>通过提取苹果高光谱图像中有效光谱信息,建立了偏最小二乘(PLS)和支持向量回归(SVR)模型用于预测苹果硬度。试验结果证明,高光谱成像技术能够用于检测苹果的硬度,且在785.11~872.45 nm范围内,SVR模型的预测结果优于PLS。SVR预测模型相关系数为0.680 8,均方根误差RMSEP=0.238 7。

以上研究显示了高光谱成像技术结合不同处理方法和预测模型在无损检测苹果硬度方面的潜力。

但预测模型相关系数分布在0.6~0.8之间,表明这些模型在硬度预测方面具有一定程度的准确性,同时也存在一定的改进空间。此外,冯迪等<sup>[13]</sup>的研究实现了糖度和硬度的同时预测,证明了多种指标的同时检测是可行的。

**2.1.4 水分含量** 苹果的水分含量也是内部品质的重要组成部分,不仅直接影响贮藏寿命,还影响口感和风味。适当的水分能够保持苹果的多汁,提升口感;水分含量低导致苹果干瘪萎缩,且口感变差。

查启明<sup>[37]</sup>使用主成分分析(PCA)和连续投影算法(SPA)提取苹果高光谱图像中的特征数据,并采用网格搜索法及粒子群算法对支持向量回归(SVR)参数进行优化,建立了4种水分预测模型并进行对比,最终选出最优模型组合为SPA-Grid-SVR,预测集相关系数 $R_p=0.875$  4、均方根误差 $RMSEP=0.238$  7。Crichton等<sup>[38]</sup>通过研究发现,3个特定波长(540、817、977 nm)的反射率数据就足以预测苹果切片的水分含量。Shrestha等<sup>[39]</sup>利用PLSR建立了不同品种、不同厚度的苹果切片在60℃和70℃干燥条件下水分比的平均光谱反射率曲线的回归模型,结果表明,水分比预测效果较好, $R^2=0.94$ , $RMSEC=0.076$ 。

上述研究表明,利用高光谱成像技术结合先进的数据处理和机器学习方法,可以准确无损地预测苹果的水分含量。与硬度相比,基于高光谱成像技术的水分预测模型准确性更高(表1)。因此,未来这些模型有望应用于苹果品质检测和分级系统,为消费者提供更高品质的苹果,为农业生产者提供高效的管理工具。

## 2.2 外部品质检测

苹果品质检测是一个全面评估的过程,不仅涉及内部品质,还包括外观品质特征的评定,如形状、大小、颜色特征。此外,由于水果自身特性以及地域差异等因素,在储存、运输过程中容易受到挤压、碰伤、冻伤、病虫害等多种损伤,这些都可能会造成苹果品质下降。

**2.2.1 形状、大小、颜色特征** 对于消费者来说,苹果的形状、大小、颜色等外观品质特征是选择果品时的最直观因素,也是最容易评估的属性。大多数消费者倾向于购买颜色鲜艳、外观均匀、大小适中的苹果<sup>[40]</sup>。

程国首等<sup>[41]</sup>以红富士苹果为研究对象,使用大津法对852/713波段比图像进行分割,开运算算法去除果梗区域,得到完整的苹果区域图像,之后提取苹果色调累计直方图的特征,采用AdaBoost算法反复训练BP神经网络,使其训练成由多个弱分类器组成的强分类。分级结果显示,模型与人工分级一致率达97.7%。郭俊先等<sup>[42]</sup>通过对采集到的苹果高光谱图像进行分割,剔除果梗区域等处理,再以面积、充实度、周长、椭圆长轴长度、短轴长度、RGB图像和色调H分量图像中目标区域的平均灰度和灰度标准差为特征,建立3种判别函数,实现了苹果不同等级的划分。Garrido-Novell等<sup>[43]</sup>根据不同储存状态下RGB相机和高光谱相机获取的颜色特征实现了对苹果的分类,并证明了高光谱相机在区分不同储存条件下苹果颜色方面比正常的RGB相机具有更大的应用潜力,分类准确率达95.83%。

以上研究表明,通过不同的图像处理和数据分

表1 高光谱成像技术在苹果内在品质检测中的应用

Table 1 Application of hyperspectral imaging technology in the internal quality detection of apple

试验对象 Test subject	检测应用 Detection applications	波长范围 Wavelength range/nm	建模方法 Modeling methods	精度 Precision	参考文献 References
苹果 Apple	SSC	386~1028	MLR	0.881 0	[22]
苹果 Apple	SSC	500~900	PLSR	0.901 0	[23]
苹果 Apple	SSC	400~1000	SVR	0.943 6	[24]
苹果 Apple	SSC	500~1000	BP	0.790 0、0.640 0	[25]
苹果 Apple	硬度 Hardness	500~900	PLSR	0.783 0	[23]
苹果 Apple	硬度 Hardness	390~1030	BP	0.728 0	[35]
苹果 Apple	硬度 Hardness	400~1000	BP	0.793 8	[13]
苹果 Apple	硬度 Hardness	408~1117	PLS、SVR	0.680 8	[36]
苹果 Apple	水分 Moisture content	400~1100	SVR	0.875 4	[37]
苹果 Apple	水分 Moisture content	400~1000	PLSR	0.990 0	[38]
苹果 Apple	水分 Moisture content	400~1010	PLSR	0.940 0	[39]

析方法,高光谱成像技术可以自动识别苹果的颜色、形状和尺寸特征,从而进行有效的品质分级。该技术的应用不仅能够帮助生产者降低人工成本,提高分拣效率,还确保了消费者能够购买到符合期待的高品质苹果。此外,还能够满足市场上不同消费群体对品质多样化苹果的需求和提高生产者的经济效益。

**2.2.2 表面损伤** 由于苹果质地较脆,极易在采摘、运输和采后处理中受到磕碰、撞击等,不仅影响外观品质,降低消费者的购买欲望,还会引起内部品质劣变,甚至传染至同批次苹果,造成种植者经济效益的严重降低。而人工挑选不仅耗时费力,且对于瘀伤表面积小或果皮颜色较深的苹果很难察觉,因此基于机器视觉的自动分拣非常重要。

Keresztes等<sup>[44]</sup>开发了一种基于短波红外波段的高光谱成像系统,该系统是基于像素的、实时的苹果早期瘀伤系统。在该研究中,通过多种预处理方法与偏最小二乘判别分析(PLS-DA)的结合实现了瘀伤和正常像素苹果图像的区分。试验结果表明,该系统识别苹果瘀伤的准确率达98%,且每个苹果的处理时间低于200 ms。Baranowski等<sup>[45]</sup>使用高光谱相机(400~2500 nm)结合热成像相机(3500~5000 nm)对不同品种苹果的瘀伤以及损伤深度进行检测,结果证实400~5000 nm波段范围结合建立的模型不仅能够区分瘀伤和健康组织,对于不同深度的瘀伤也有较好的预测效率。Zhang等<sup>[46]</sup>提出了一种基于最小噪声分离变换(MNF)的苹果轻微损伤检测方法。该方法首先使用主成分分析(PCA)和最低噪声分离变换(MNF)对50个苹果样本正常和不同损伤时间的样本图像进行变换,又利用I-RELIEF算法提取了5个特征波长,最后通过对比两种图像变换方法结合I-RELIEF算法对80个正常和损伤苹果的识别准确率进行试验。结果表明,损伤识别总体正确率达97.1%,证明该方法可以快速有效地识别苹果早期轻微损伤。沈宇等<sup>[47]</sup>以120个富士苹果为研究对象,利用高光谱成像技术获取了健康和轻微损伤0、2、4 h的苹果样本在400~1000 nm波段范围内的高光谱图像,通过光谱预处理及两次连续投影法找到了共线性最小的两个波长(821、940 nm),接着对提取的特征波长图像进行主成分分析,寻找能够区分损伤和健康区域的有效图像,最后对有效图像进行固定阈值分割和形态学处理。研究结果表明,利用该方法对不同轻微损伤时间的苹

果总体检测准确率达94.4%。蒋金豹等<sup>[48]</sup>使用高光谱成像系统采集了54个轻微损伤的黄香蕉、烟台富士苹果在400~1000 nm波段范围内的图像,经过感兴趣区域平均光谱的提取、最小噪声分离、端元波谱提取、损伤区域波谱和端元波谱光谱角的计算,构建PCA、MNF、EESA模型,实现了苹果轻微损伤检测。结果表明,EESA模型的检测准确率最高,识别准确率达到90.07%。

以上研究表明,高光谱成像技术在提高苹果外观缺陷和损伤的检测准确性以及效率方面表现出巨大潜力,未来该技术的广泛应用或许有助于促进自动化果品分拣系统的发展,降低人工成本,提升苹果产品的市场竞争力。但是在多数研究中,仅以富士品种为研究对象,对于其他品种的苹果研究较少,且多项研究表明,不同苹果品种之间不存在普适性的处理方法。因此,为了确保高光谱成像技术可以广泛地应用于不同品种的苹果,未来的研究应该注重品种多样化。

**2.2.3 外观缺陷** 病虫害是影响苹果品质和安全性的重要品质之一,受病虫害影响的苹果往往在外观上表现出斑点、裂缝、虫洞等缺陷,严重影响苹果外观质量。因此,为了满足消费者对苹果外观完整、整洁且无缺陷的需求,以及提高苹果市场价值,研究人员利用高光谱图像技术对水果表面缺陷进行大量研究。

赵娟等<sup>[49]</sup>利用高光谱技术对苹果外观缺陷进行检测,同时对主成分分析和波段比率法在高光谱图像上的应用效果。最终试验结果显示,两种方法对苹果表面缺陷的分级准确率分别为81.25%、93.75%。孟庆达<sup>[50]</sup>同样使用波段比值算法实现了苹果缺陷与正常区域的识别,进一步证实了高光谱成像技术下波段比率法能够用于苹果表面缺陷检测与识别。刘思伽等<sup>[51]</sup>利用高光谱成像技术对苹果的炭疽病、苦痘病、黑斑病和褐腐病的病果进行无损检测,根据病果和正常果在光谱值上的差异,提出改进流形距离方法,选择出3个特征波长(700、765、904 nm),将3个波长对应的相对反射率进行组合,建立BP神经网络模型。结果表明,700和904 nm为最佳组合,病果的检测率达96.25%。崔惠桢<sup>[52]</sup>利用高光谱成像技术对不同染病时间的苹果炭疽病进行研究,通过对比多种预处理、特征波长选择和回归模型方法,最终得出最优判别模型为UVE-RAW-LS-

SVM,整体判别正确率为95.8%。

田有文等<sup>[53]</sup>提取正常和虫害苹果的光谱和纹理特征信息,并将两种特征进行优化组合,形成4组特征向量作为BP人工神经网络输入矢量,以确定能够检测苹果虫害的最优向量。最终结果显示,利用0度方向的能量、熵、惯性矩、相关性及646 nm和824 nm波长的光谱信息融合后对两种苹果进行检测的效果最好。

以上研究结果表明,高光谱成像技术对苹果病虫害发生造成的外观缺陷进行检测和识别是可行的。但更多的研究聚焦于发生病害造成的外观缺陷上,关于虫害的研究较少,可能的原因是部分害虫危害果实内部,对外观品质影响较小,难以通过图像技术进行区分。

**2.2.4 农药残留** 为了降低病虫害的发生频率,减少昆虫和病害对苹果的侵扰,在生产上,往往使用化学防治法、生物防治法、生物和化学防治结合法避免病虫害发生或泛滥。但在实际生产上,苹果种植者往往更倾向于使用简便的化学防治法。该方法见效快且成本低廉,但容易造成农药残留,危害消费者健康安全,而且可能污染土壤及地下水。因此,急需一种快速、无损、准确的方法对喷洒过农药的苹果进行检测。

刘木华等<sup>[54]</sup>通过设置不同的试验处理,发现表面喷洒农药及不喷洒农药的高光谱灰度图像之间灰度值分布在1~100之间的像素个数存在差异,喷洒同种类农药的不同浓度处理之间也存在差异。试验结果表明,基于高光谱图像的检测方法能够评估农药的残留与否。乔琦<sup>[55]</sup>使用高光谱成像技术结合电子鼻对苹果农药残留进行研究,建立了基于高光谱和高光谱-电子鼻技术的农药残留检测模型。试验结果显示两种方法都有好的检测效果,高光谱-电子鼻融合技术的准确性更高。Jiang等<sup>[56]</sup>以4种不同农药处理过的苹果和健康苹果为对照,分别采集高光谱图像,通过ROI区域的提取、高斯白噪声的添加等处理,建立卷积神经网络模型。结果表明,当训练epoch数为10时,测试集检测准确率为99.09%,单波段平均图像检测准确率为95.35%。

上述研究结果表明,高光谱成像技术是一种准确、无损的技术,可为苹果采后农药残留提供切实有效的检测(表2)。此外,通过与其他技术如电子鼻的结合可进一步提高检测准确率。

### 3 存在的问题与发展趋势

#### 3.1 存在的问题

上述多项研究表明,将高光谱成像技术应用于

表2 高光谱成像技术在苹果外部品质检测中的应用

Table 2 The application of hyperspectral imaging technology in the external quality detection of apples

试验对象 Test subject	检测应用 Detection applications	波长范围 Wavelength range/nm	建模方法 Modeling methods	精度 Precision	参考文献 References
苹果 Apple	形状、颜色、大小 Shape, Color, Size	400~1000	BP	0.977 0	[41]
苹果 Apple	形状、颜色、大小 Shape, Color, Size	400~1000	DA	0.895 0	[42]
苹果 Apple	形状、颜色、大小 Shape, Color, Size	900~1700	PLS-DA	0.958 3	[43]
苹果 Apple	表面损伤 Surface damage	900~2500	PLS	0.980 0	[44]
苹果 Apple	表面损伤 Surface damage	400~2500	LDA、SVM、MISCA	0.950 0、0.920 0、0.670 0	[45]
苹果 Apple	表面损伤 Surface damage	400~1000	-	0.962 5	[46]
苹果 Apple	表面损伤 Surface damage	400~1000	PCA	0.944 0	[47]
苹果 Apple	表面损伤 Surface damage	400~1000nm	EESA、MNF、PCA	0.900 7、0.870 7、0.833 3	[48]
苹果 Apple	外观缺陷 Cosmetic defects	400~1100	PCA、BR	0.812 5、0.937 5	[49]
苹果 Apple	外观缺陷 Cosmetic defects	400~1000	Band Math	0.953 3	[50]
苹果 Apple	外观缺陷 Cosmetic defects	373~1033	BP	0.962 5	[51]
苹果 Apple	外观缺陷 Cosmetic defects	400~1000	LS-SVM	0.958 0	[52]
苹果 Apple	外观缺陷 Cosmetic defects	400~1100	BP	1.000 0	[53]
苹果 Apple	农药残留 Pesticide residues	-	-	-	[54]
苹果 Apple	农药残留 Pesticide residues	380~1038	PSO-SVM	0.983 3	[55]
苹果 Apple	农药残留 Pesticide residues	865.11~1 711.71	CNN	0.990 9	[56]

注:“-”表示该文献中未使用此方法。

Note: “-” indicates that this method is not used in the literature.

苹果品质检测在理论上显示出了诸多潜力和优势,该技术不仅能够实现对内部品质的预测,在外部品质检测方面也获得了广泛应用。但目前,该技术的应用大多局限于室内的实验室中,从理论到实践的过程中仍存在很多挑战<sup>[8,57-58]</sup>。

1) 样本自身影响:在苹果品质检测过程中,往往需要采集多次不同时间的图像,不同时间苹果摆放位置及个体间形状的差异或不规则可能会导致光线的散射或反射程度不同,从而使采集的光谱数据不均匀、光谱信息和质量不一致。苹果的果柄和果萼部分与正常果肉部分光谱曲线存在较大差异,往往需要事先剔除。

2) 处理方法普适性低:高光谱成像技术能够获取几百个波段内的信息,这虽然提供了更丰富的信息用于品质分析,但同时也带来了信息冗余问题。以上多个研究表明,并非所有波段的信息均对后续的分析有用,为了提高数据处理效率,大多需要进行特征选择或降维处理。而上述多个研究显示,不同产区、不同品种的苹果由于环境、气候、栽培管理等因素存在一定的差异,因而在光谱和图像信息上也有所差别。这意味着特定条件下预处理、特征波长选择、模型建立方法可能无法直接应用于不同产区、品种的苹果。

3) 受室外环境影响大:外界环境如光照度、光线分布、天气情况会对高光谱图像的采集产生影响,使得高光谱成像技术虽在实验室中能够获取较高的预测相关系数或分类准确率,但在室外应用效果差。

4) 成本昂贵:高光谱成像系统价格偏高,普通小型果园难以负担。

5) 高光谱成像系统往往需要搭载无人机或室内暗箱使用,设备较大,不易携带。

### 3.2 发展趋势

尽管如此,随着技术的不断创新和优化,将高光谱成像技术应用到实际场景中仍是有望实现的。为尽早将高光谱成像技术应用到实际生产上,为消费者提供更高品质的苹果,为苹果产业的发展提供强有力的技术支撑,在今后的研究中可以从样本采集、数据处理、技术整合和设备开发等多方面着手:

1) 增加样本来源和数量。尽管有研究显示,不存在普适的处理方法或模型,但随着技术的适应性不断增强,尽量多地收集不同产区、品种、年份的苹果,建立基础模型的稳定性会越来越高。在此基础

上,通过微调模型参数,可以将其应用到不同产区、不同品种的苹果无损检测中。

2) 从处理方法上入手,开发出更高效的特征提取算法或图像处理技术,通过特征提取算法挖掘包含特征信息的深层信息,并在减少数据量的同时保留对品质检测有价值的信息。如Tian等<sup>[24]</sup>开发出的特征提取方法—堆叠加权自编码器,提取了包含可溶性固形物含量的深层信息,提高了可溶性固形物含量的预测准确性。谈文艺<sup>[59]</sup>对选出的特征波长进行PCA分析,结合图像处理设计出一种精确识别苹果不同损伤时间的算法,识别率可达98.5%。此外,对外部品质的分析操作以及高准确性预测或分类均需要通过图像实现,因此,高效的图像处理技术能够使图像特征更加突出。

3) 与其他技术相结合。高光谱成像技术与近红外光谱技术结合,能够更准确、更全面地对内部品质如糖度、可溶性固形物含量等进行检测,此外,近红外光谱仪器轻小,方便携带,两种技术结合或许能使品质检测走出实验室;高光谱技术穿透能力有限,但高光谱成像系统本身包含透射模式,因而将其与CT技术、热成像等技术相结合或许能够提高内部病虫害以及成熟度判断的准确率。

4) 多模式成像研究。目前,对苹果内外部品质的检测大多仅利用高光谱成像中的反射模式,而忽略了透射和漫反射模式的作用。尽管透射模式仅具有几毫米的透射能力,但对于发生在果皮下的病害,如苹果苦痘病,仍具有一定的检测能力。此外,苦痘病发生早期仅表现在果皮下,无法及时预测,利用高光谱成像技术的透射模式结合反射模式或许能够实现早期病害检测,降低经济损失。

## 4 结论

高光谱成像技术结合了传统成像技术和光谱分析的优点,能够通过获取苹果的图像和光谱信息,为苹果的综合品质提供快速、无损检测。利用光谱信息与多种处理方法结合可准确预测苹果内在品质,而图像及图像处理技术相结合可有效识别外观品质。在过去几十年,大量研究证明了高光谱成像技术在苹果检测中的研究价值。笔者综述了高光谱成像技术在苹果品质检测中的应用现状,涵盖了苹果的内外在品质,内在品质包括可溶性固形物含量、硬度、可滴定酸含量、水分含量,外在品质包括损伤、缺

陷、病虫害、农药残留等。但目前,关于高光谱成像技术的研究大多仅局限于实验室中,并未真正应用到实际生产中。因此,在未来的研究中,如何改进、优化数据处理算法、降低应用成本,将该技术真正应用到生产中是需要重点关注的问题。

## 参考文献 References:

- [1] 谭涛,冯树南,温青纯,黄人帅,孟庆龙,尚静. 高光谱成像技术在水果品质检测中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024,52(6):11-18.  
TAN Tao, FENG Shunan, WEN Qingchun, HUANG Renshuai, MENG Qinglong, SHANG Jing. Research progress on application of hyperspectral imaging technology in detection of fruit quality[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(6):11-18.
- [2] 张保华,李江波,樊书祥,黄文倩,张驰,王庆艳,肖广东. 高光谱成像技术在果蔬品质与安全无损检测中的原理及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10):2743-2751.  
ZHANG Baohua, LI Jiangbo, FAN Shuxiang, HUANG Wenqian, ZHANG Chi, WANG Qingyan, XIAO Guangdong. Principles and applications of hyperspectral imaging technique in quality and safety inspection of fruits and vegetables[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10):2743-2751.
- [3] 杨杰. 我国苹果出口现状、问题及建议[J]. 果农之友, 2024(3): 114.  
YANG Jie. Current situation, problems and suggestions of China's apple exports[J]. Fruit Growers' Friend, 2024(3): 114.
- [4] 郭燕,梁俊,李敏敏,赵赵阳. 高效液相色谱法测定苹果果实中的有机酸[J]. 食品科学, 2012, 33(2):227-230.  
GUO Yan, LIANG Jun, LI Minmin, ZHAO Zhengyang. Determination of organic acids in apple fruits by HPLC[J]. Food Science, 2012, 33(2):227-230.
- [5] 熊春晖,余永新,焦逊,邵勇,贾莉,王淼,肖明,王静. 高光谱成像技术在农产品无损检测中的应用[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(1):109-122.  
XIONG Chunhui, SHE Yongxin, JIAO Xun, SHAO Yong, JIA Li, WANG Miao, XIAO Ming, WANG Jing. Application of hyperspectral imaging technology in nondestructive testing of agricultural products[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(1):109-122.
- [6] 刘丽,魏志峰,石彩云,高登涛,刘军伟,司鹏. 海藻水溶肥和黄腐酸水溶肥对富士苹果树体生长及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(5):893-901.  
LIU Li, WEI Zhifeng, SHI Caiyun, GAO Dengtao, LIU Junwei, SI Peng. Effects of alginate water soluble fertilizer and fulvic acid water soluble fertilizer on tree growth and fruit quality of Fuji apple[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(5):893-901.
- [7] 孙梅,付妍,徐冉冉,赵勇,陈兴海. 基于高光谱成像技术的水果品质无损检测[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(2):67-71.  
SUN Mei, FU Yan, XU Ranran, ZHAO Yong, CHEN Xinghai. Nondestructive inspect of fruit quality with hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 31(2):67-71.
- [8] 田有文,牟鑫,程怡. 高光谱成像技术无损检测水果缺陷的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(6):1-5.  
TIAN Youwen, MU Xin, CHENG Yi. Advancement of nondestructive detection of fruit defects based on hyperspectral imaging[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6):1-5.
- [9] 文静,张昂,马雯,金刚,徐国前. 高光谱技术在葡萄品质无损检测应用上的研究进展[J/OL]. 食品科学, 2024: 1-18(2024-04-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240430.1436.004>.  
WEN Jing, ZHANG Ang, MA Wen, JIN Gang, XU Guoqian. Research progress on the application of hyperspectral technology for non-destructive testing of grape quality[J/OL]. Food Science, 2024: 1-18(2024-04-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20240430.1436.004>.
- [10] 杨涵,陈谦,王宝刚,李文生,李文志,王炳策,钱建平. 利用高光谱技术预测采前猕猴桃干物质含量的可行性试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13):133-140.  
YANG Han, CHEN Qian, WANG Baogang, LI Wensheng, LI Wenzhi, WANG Bingce, QIAN Jianping. Feasibility of estimating the dry matter content of kiwifruits before being harvested using hyperspectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(13):133-140.
- [11] ELMASRY G, KAMRUZZAMAN M, SUN D W, ALLEN P. Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(11):999-1023.
- [12] 何馥娴,蒙庆华,唐柳,黄新,卢旭恒,王瑞扬,张克智,李钰. 高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(9):1590-1599.  
HE Fuxian, MENG Qinghua, TANG Liu, HUANG Xin, LU Xuheng, WANG Ruiyang, ZHANG Kezhi, LI Yu. Research progress in hyperspectral imaging technology for fruit quality detection[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(9):1590-1599.
- [13] 冯迪,纪建伟,张莉,刘思伽,田有文. 基于高光谱成像提取苹果糖度与硬度最佳波长[J]. 发光学报, 2017, 38(6):799-806.  
FENG Di, JI Jianwei, ZHANG Li, LIU Sijia, TIAN Youwen. Optimal wavelengths extraction of apple brix and firmness based on hyperspectral imaging[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(6):799-806.
- [14] 吴永清,李明,张波,张影全,郭波莉. 高光谱成像技术在谷物品质检测中的应用进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(5):165-173.  
WU Yongqing, LI Ming, ZHANG Bo, ZHANG Yingquan, GUO Boli. Application of hyperspectral imaging technology in grain quality detection[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(5):165-173.
- [15] JIAO Y P, LI Z C, CHEN X S, FEI S M. Preprocessing methods

- for near-infrared spectrum calibration[J]. *Journal of Chemometrics*, 2020, 34(11):e3306.
- [16] 孙华生, 李晓轩. 高维遥感图像的快速分类算法[J]. *测绘科学*, 2016, 41(8): 19-23.  
SUN Huasheng, LI Xiaoxuan. A fast classification algorithm for high-dimensional remote sensing images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(8): 19-23.
- [17] ZOU X B, ZHAO J W, POVEY M J W, HOLMES M, MAO H P. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 667(1/2): 14-32.
- [18] 邵亚杰, 汤秋香, 崔建平, 李晓娟, 王亮, 林涛. 融合无人机光谱信息与纹理特征的棉花叶面积指数估测[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(6): 186-196.  
SHAO Yajie, TANG Qiuxiang, CUI Jianping, LI Xiaojuan, WANG Liang, LIN Tao. Cotton leaf area index estimation combining UAV spectral and textural features[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 186-196.
- [19] RAVIKANTH L, JAYAS D S, WHITE N D G, FIELDS P G, SUN D W. Extraction of spectral information from hyperspectral data and application of hyperspectral imaging for food and agricultural products[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(1): 1-33.
- [20] WANG N N, SUN D W, YANG Y C, PU H B, ZHU Z W. Recent advances in the application of hyperspectral imaging for evaluating fruit quality[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(1): 178-191.
- [21] 贾敏, 欧中华. 高光谱成像技术在果蔬品质检测中的应用[J]. *激光生物学报*, 2018, 27(2): 119-126.  
JIA Min, OU Zhonghua. Application of hyperspectral imaging technique in quality inspection of fruits and vegetables[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2018, 27(2): 119-126.
- [22] ÇETIN N, KARAMAN K, KAVUNCUOĞLU E, YILDIRIM B, JAHANBAKHSI A. Using hyperspectral imaging technology and machine learning algorithms for assessing internal quality parameters of apple fruits[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2022, 230: 104650.
- [23] WANG F, ZHAO C J, YANG H, JIANG H Z, LI L, YANG G J. Non-destructive and in-site estimation of apple quality and maturity by hyperspectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 195: 106843.
- [24] TIAN Y, SUN J, ZHOU X, YAO K S, TANG N Q. Detection of soluble solid content in apples based on hyperspectral technology combined with deep learning algorithm[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(4): e16414.
- [25] LU R F. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images[J]. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2007, 1(1): 19-27.
- [26] 郑丽静, 聂继云, 李明强, 康艳玲, 匡立学, 叶孟亮. 苹果风味评价指标的筛选研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(14): 2796-2805.  
ZHENG Lijing, NIE Jiyun, LI Mingqiang, KANG Yanling, KUANG Lixue, YE Mengliang. Study on screening of taste evaluation indexes for apple[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(14): 2796-2805.
- [27] NICOLAÏ B M, BEULLENS K, BOBELYN E, PEIRS A, SAEYS W, THERON K I, LAMMERTYN J. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(2): 99-118.
- [28] LOVÁSZ T, MERÉSZ P, SALGÓ A. Application of near infrared transmission spectroscopy for the determination of some quality parameters of apples[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 1994, 2(4): 213-221.
- [29] MCGLONE V A, JORDAN R B, MARTINSEN P J. Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002, 25(2): 135-144.
- [30] PEIRS A, SCHEERLINCK N, TOUCHANT K, NICOLAI B M. Comparison of Fourier transform and dispersive near-infrared reflectance spectroscopy for apple quality measurements[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 81(3): 305-311.
- [31] 高升, 徐建华. 高光谱成像的红提总酸与硬度的预测及其分布可视化[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 327-336.  
GAO Sheng, XU Jianhua. Hyperspectral imaging for prediction and distribution visualization of total acidity and hardness of red globe grapes[J]. *Food Science*, 2023, 44(2): 327-336.
- [32] XU M, SUN J, CHENG J H, YAO K S, WU X H, ZHOU X. Non-destructive prediction of total soluble solids and titratable acidity in Kyoho grape using hyperspectral imaging and deep learning algorithm[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(1): 9-21.
- [33] RUNGPICHAYAPICHET P, NAGLE M, YUWANBUN P, KHUWIJITJARU P, MAHAYOTHEE B, MÜLLER J. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 159: 109-120.
- [34] 张芳, 邓照龙, 田有文, 高鑫, 王开田, 徐正玉. 基于高光谱成像技术的南果梨酸度无损检测方法[J]. *沈阳农业大学学报*, 2024, 55(2): 231-239.  
ZHANG Fang, DENG Zhaolong, TIAN Youwen, GAO Xin, WANG Kaitian, XU Zhengyu. Non-destructive testing method for acidity of Nanguo pear based on hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2024, 55(2): 231-239.
- [35] 孟庆龙, 尚静, 杨雪, 张艳. 基于 BP 网络的苹果硬度高光谱无损检测[J]. *包装工程*, 2020, 41(15): 14-18.  
MENG Qinglong, SHANG Jing, YANG Xue, ZHANG Yan. Nondestructive detection for hyperspectral imaging of apple

- firmness based on BP network[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(15):14-18.
- [36] 赵杰文,陈全胜, VITTAYAPADUNG S, CHAITIP S. 利用高光谱成像技术和多变量校正方法检测苹果的硬度[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):226-231.  
ZHAO Jiewen, CHEN Quansheng, VITTAYAPADUNG S, CHAITIP S. Determination of apple firmness using hyperspectral imaging technique and multivariate calibrations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11):226-231.
- [37] 查启明. 基于高光谱成像技术的苹果硬度、水分及可溶性固形物含量的无损检测研究[D]. 南京:南京农业大学, 2019.  
ZHA Qiming. Research on nondestructive testing of hardness, moisture and soluble solids content of apple based on hyperspectral imaging technology[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [38] CRICHTON S, SHRESTHA L, HURLBERT A, STURM B. Use of hyperspectral imaging for the prediction of moisture content and chromaticity of raw and pretreated apple slices during convection drying[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(7):804-816.
- [39] SHRESTHA L, CRICHTON S O J, KULIG B, KIESEL B, HENSEL O, STURM B. Comparative analysis of methods and model prediction performance evaluation for continuous online non-invasive quality assessment during drying of apples from two cultivars[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 18:100461.
- [40] 张保华. 基于机器视觉和光谱成像技术的苹果外部品质检测方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016.  
ZHANG Baohua. Study on the external quality inspection of apples by using computer vision and spectral imaging[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [41] 程国首, 肉孜·阿木提, 郭俊先, 胡光辉, 李俊伟, 亢银霞, 石碧. 基于高光谱图像的新疆红富士苹果颜色分级研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(9):1616-1623.  
CHENG Guoshou, Rouzi Amuti, GUO Junxian, HU Guanghui, LI Junwei, KANG Yinxia, SHI Zhai. Study on color sorting for Xinjiang Fuji apples by using hyperspectral imaging technology[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(9):1616-1623.
- [42] 郭俊先, 饶秀勤, 程国首, 胡光辉, 李俊伟, 石碧, 亢银霞. 基于高光谱成像技术的新疆冰糖心红富士苹果分级和糖度预测研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2012, 35(1):78-86.  
GUO Junxian, RAO Xiuqin, CHENG Guoshou, HU Guanghui, LI Junwei, SHI Zhai, KANG Yinxia. Prediction of the sugar degree and grading of Xinjiang Fuji apple by hyper-spectral imaging techniques[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2012, 35(1):78-86.
- [43] GARRIDO-NOVELL C, PÉREZ-MARIN D, AMIGO J M, FERNÁNDEZ-NOVALES J, GUERRERO J E, GARRIDO-VAIRO A. Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(2):281-288.
- [44] KERESZTES J C, GOODARZI M, SAEYS W. Real-time pixel based early apple bruise detection using short wave infrared hyperspectral imaging in combination with calibration and glare correction techniques[J]. *Food Control*, 2016, 66:215-226.
- [45] BARANOWSKI P, MAZUREK W, WOZNIAK J, MAJEWSKA U. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(3):345-355.
- [46] ZHANG B H, HUANG W Q, LI J B, ZHAO C J, LIU C L, HUANG D F, GONG L. Detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging and MNF transform[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5):1367-1372.
- [47] 沈宇, 房胜, 郑纪业, 王风云, 张琛, 李哲. 基于高光谱成像技术的富士苹果轻微机械损伤检测研究[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(2):144-150.  
SHEN Yu, FANG Sheng, ZHENG Jiye, WANG Fengyun, ZHANG Chen, LI Zhe. Detection of slight mechanical damage of fuji apple fruits based on hyperspectral imaging technology[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(2):144-150.
- [48] 蒋金豹, 尤笛, 汪国平, 张政, 门泽成. 苹果轻微机械损伤高光谱图像无损检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(7):2224-2228.  
JIANG Jinbao, YOU Di, WANG Guoping, ZHANG Zheng, MEN Zecheng. Study on the detection of slight mechanical injuries on apples with hyperspectral imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(7):2224-2228.
- [49] 赵娟, 彭彦昆, 赵松玮, 宋育霖. 基于高光谱技术检测苹果外观缺陷[J]. *食品安全质量检测学报*, 2012, 3(6):681-684.  
ZHAO Juan, PENG Yankun, ZHAO Songwei, SONG Yulin. Detection of defects in apples based on hyperspectral imaging technology[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2012, 3(6):681-684.
- [50] 孟庆达. 基于高光谱成像技术的苹果可溶性固形物含量与缺陷检测[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.  
MENG Qingda. Detection of SSC and external defects of apples by using hyperspectral imaging[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [51] 刘思伽, 田有文, 冯迪, 张芳, 崔博. 基于高光谱成像的苹果病害无损检测方法[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(5):634-640.  
LIU Sijia, TIAN Youwen, FENG Di, ZHANG Fang, CUI Bo. Nondestructive detection method of hyperspectral imaging for apple disease[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, 47(5):634-640.
- [52] 崔惠桢. 基于高光谱技术的苹果炭疽病早期诊断方法研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022.  
CUI Huizhen. Research on early diagnosis of apple anthracnose based on hyperspectral technology[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.

- [53] 田有文,程怡,王小奇,栗庆吉. 基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取[J]. 农业工程学报,2014,30(12):132-139.  
TIAN Youwen, CHENG Yi, WANG Xiaoqi, LI Qingji. Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 132-139.
- [54] 刘木华,药林桃,赵杰文. 一种快速无损检测水果农药残留方法的试验研究[C]//中国农业机械学会. 农业机械化与新农村建设: 中国农业机械学会 2006 年学术年会论文集(下册), 2006: 1452-1455.  
LIU Muhua, YAO Lintao, ZHAO Jiewen. The study of detecting pesticide residual in fruit surface using laser hyperspectral imaging[C]//Chinese Society for Agricultural Machinery. Agricultural Mechanization and New Rural Construction: Proceedings of the 2006 Annual Conference of the Chinese Society for Agricultural Machinery (Volume II), 2006: 1452-1455.
- [55] 乔琦. 基于高光谱-电子鼻的苹果农残自动化检测研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.  
QIAO Qi. Research on automatic detection of pesticide residues in apple based on hyperspectral and electronic nose[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021.
- [56] JIANG B, HE J R, YANG S Q, FU H F, LI T, SONG H B, HE D J. Fusion of machine vision technology and AlexNet-CNNs deep learning network for the detection of postharvest apple pesticide residues[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 1: 1-8.
- [57] 陈龙跃,段丹丹,王凡,孟翔宇,赵冲,钱英军. 高光谱成像技术在水果品质无损检测中的研究进展[J]. 广东农业科学, 2023, 50(7): 83-94.  
CHEN Longyue, DUAN Dandan, WANG Fan, MENG Xiangyu, ZHAO Chong, QIAN Yingjun. Research progress of non-destructive testing of fruit quality by hyperspectral imaging technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(7): 83-94.
- [58] 袁旭林,郑纪业,赵贤,段玉林,王风云. 苹果任意姿态下高光谱图像感兴趣区域选取方法[J]. 山东农业科学, 2022, 54(6): 131-140.  
YUAN Xulin, ZHENG Jiye, ZHAO Xian, DUAN Yulin, WANG Fengyun. Method for selecting regions of interest for hyperspectral images of apples in arbitrary pose[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(6): 131-140.
- [59] 谈文艺. 基于高光谱成像技术的苹果外部损伤精确识别与分级方法研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.  
TAN Wenyi. Research on accurate identification and classification method of apple external damage based on hyperspectral imaging technology[D]. Harbin: Helongjiang University, 2018.