

高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展

何馥娴¹, 蒙庆华^{1*}, 唐柳¹, 黄新¹, 卢旭恒¹, 王瑞扬¹, 张克智¹, 李钰²

(¹南宁师范大学物理与电子学院, 南宁 530029; ²广西水果技术指导站, 南宁 530012)

摘要: 高光谱成像(Hyperspectral Image, HSI)技术通过将成像和光谱这两种经典光学传感技术集成到一个系统中, 可以同时提供空间和光谱信息。因此, 高光谱成像具有快速和无损检测水果的物理形态特征以及内在化学和分子信息的能力, 以便进行质量安全分析和检测。总结了近10年来高光谱成像技术在水果质量检测方面的研究进展与应用。描述了高光谱成像系统的基本原理和系统组件, 总结了高光谱数据采集、预处理、建模的常用方法, 并对用于检测水果外观特征和内在特性例如硬度、可滴定酸度(titratable acidity, TA)、可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)、水分含量(moisture content, MC)的方法进行了综述。同时指出了应用于水果质量检测的高光谱成像技术今后的发展趋势和研究方向, 以期为水果产业智能化提供参考。

关键词: 水果品质; 高光谱成像; 化学计量学; 可溶性固形物含量; 光谱定性分析; 光谱定量分析

中图分类号: S66 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2021)09-1590-10

Research progress in hyperspectral imaging technology for fruit quality detection

HE Fuxian¹, MENG Qinghua^{1*}, TANG Liu¹, HUANG Xin¹, LU Xuheng¹, WANG Ruiyang¹, ZHANG Kezhi¹, LI Yu²

(¹School of Physics and Electronics, Nanning Normal University, Nanning 530029, Guangxi, China; ²Guangxi Fruit Technical Guidance Station, Nanning 530012, Guangxi, China)

Abstract: Fruit has rich nutritional value, which occupies a large proportion in human production and life. It can not only help fruit growers to gain economic value, but also provide all kinds of nutrients needed by people of all ages. According to the World Food and Agriculture Organization (WFAO), the global annual fruit production is about 800 million tons, and fruit consumption is also increasing year by year. With increasing the economic value of the industry, fruit sales also consider how to meet customers' demand for fruit quality. The fruit quality has become the common concern from fruit suppliers and consumers. At present, fruit quality inspection by artificial vision is still widely used, but it is a subjective, time-consuming, laborious, cumbersome and inaccurate method. The commonly used instrument detection means are mainly analytical and chemical methods, like mass spectrometry and high performance liquid chromatography. However, they also have many limitations, for instance, being destructive, time-consuming and unable to process large numbers of samples, and require large amounts of time to prepare samples. Therefore, it is vital and necessary to apply accurate, reliable, efficient and non-destructive alternative methods to evaluate fruit quality and other quality-related attributes. Hyperspectral image (HSI) can provide spatial and spectral information, in the continuous range of wavelengths to produce a series of high resolution image information, and the data with one dimension spectral information and two dimensions spatial information, can constitute the three-dimension hyperspectral cube,

收稿日期: 2021-03-09 接受日期: 2021-06-10

基金项目: 广西科技计划重点研发计划(桂科 AB17292082); 广西科技计划项目(桂科 AD20238059); 广西百色高新区引导项目(K-YS-ST-2018-01)

作者简介: 何馥娴, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为高光谱成像技术。Tel: 13941748496, E-mail: hfxcici@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 18169600226, E-mail: mqhgx@163.com

and therefore, each pixel of hyperspectral image can save the corresponding position of the spectral information. The obtained spectrum has the function of reflecting the information about this particular pixel. Hyperspectral image can quickly and nondestructively detect the physical and morphological characteristics of fruits as well as the inherent chemical and molecular information, and is becoming a powerful analytical tool for fruit quality detection. This paper reviews the progress and application in hyperspectral imaging for fruit quality evaluation in the last ten years, and the latest progress and application in hyperspectral imaging system for the detection, classification and visualization of fruit quality and safety attributes are introduced. The basic principle and main instrument composition of hyperspectral imaging system are introduced. The methods of hyperspectral data acquisition, preprocessing and modeling are summarized. In addition, the methods for measuring the external and internal characteristics of fruit, such as firmness, titratable acidity (TA), soluble solids content (SSC) and moisture content (MC) in the last ten years are also discussed and tabulated. The fruit real-time monitoring system based on hyperspectral imaging technology is expected to meet the requirements of modern industrial control and sorting system in the near future and provide reference for the intellectualization of fruit industry. The research progress in hyperspectral imaging technology for fruit quality detection is as follows: (1) Fruit scratch detection based on hyperspectral imaging technology mainly focuses on apple, kiwifruit, strawberry, jujube and other fruits, among which apple scratch detection is the most popular. The introduction of hyperspectral imaging technology improves the prediction efficiency of fruit bruising to distinguish bruising from normal fruits and bruising with different depth. However, image processing techniques should be used with caution when using hyperspectral techniques to detect minor abrasions. In addition, the above research is limited to a few varieties of a certain type of fruit, so it is necessary to further study more fruit materials of different varieties. (2) The hyperspectral imaging system has been successfully applied to the chilling injury identification of apples, peaches and jujubes, but there are few literatures on the chilling injury identification of tropical and subtropical fruits that are more susceptible to chilling injury. (3) The spatial resolution technique of hyperspectral imaging has a very wide range of evaluation on fruit hardness, which has been used to measure the hardness of most fruits, such as apples, peaches, bananas, pears, cherries, persimmons, plums, mangoes, blueberries, etc. In addition, the classification of fruit maturity based on hardness also shows great potential, but it needs to be further improved by increasing population size, secondary sampling method and improving measurement conditions. (4) Hyperspectral absorption imaging technology can be used to evaluate the content of soluble solids in apples. However, the current research is limited to the equatorial position of the apple. In order to obtain more reliable and comprehensive prediction results, different algorithms need to be used to deal with more different positions of the apple. Future research will focus on the surface distribution of solid materials based on hyperspectral reflection imaging systems. In addition, in order to improve the calculation speed and modeling accuracy, it is necessary to reduce the high dimension of hyperspectral data. Future research should explore further data mining to reduce redundant hyperspectral data without losing valuable information, extend the feasibility of new algorithms to develop stable predictive models, and improve the accuracy of the models. (5) The hyperspectral imaging technology to predict fruit TA content is rarely used, mainly including oranges and mangoes, and TA is more used to predict fruit ripening time. (6) The accurate prediction of fruit moisture content by hyperspectral imaging technology has not been satisfactory, and it still needs to be further explored.

Key words: Fruit quality; Hyperspectral imaging; Chemometric; Soluble solids content; Qualitative spectrometric analysis; Quantitative spectrometric analysis

水果的综合质量检测包括外观检测和内在特性的测定。外部缺陷包括擦伤、冷害等,这些缺陷在很大程度上会降低水果质量水平,造成巨大的经济损失。内部特征包括硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸度、水分含量等,这些都与水果香气、口感和口味有很大关系,而且其中一些成分对身体有很大益处,这意味着内部特征在质量检测中起着主导作用^[1-3]。

传统上,基于外部特征的水果质量检测系统严重依赖于人工操作,既耗时又费力且不够客观。同时,水果内部质量的测量主要依赖于破坏样品和使用化学试剂进行化学分析。近年来,计算机视觉技术已用于监测水果的质量变化。计算机视觉系统捕获的质量特征主要突出与其形状大小、颜色和纹理特征密切相关的外部视觉特性^[4-5]。关于水果内部属性的定性和定量测定,已经采用了包括反射、透射、荧光和拉曼散射测量的光谱方法,来提供对水果质量和安全问题的直接检测。然而,上述方法中单点检测的弱点限制了它们在均匀样品中的应用^[6-7]。因此,在水果质量检测过程中应用一种实时、准确、无损的检测技术来量化每个质量参数,同时保证水果的安全性已成为迫切需要。如今的局限性可以通过引入高光谱成像技术来解决。本文将对高光谱成像技术在水果质量检测方面的研究进展与应用展开讨论。介绍高光谱成像系统的主要仪器组成,以及数据采集、光谱预处理和建模的常用方法。通过介绍用于检测水果外观特征和内部特性的方式及其建模方法,提出高光谱成像技术的挑战和未来发展趋势,以便更好地将高光谱成像技术应用于水果无损检测

领域。

1 高光谱技术原理

1.1 高光谱成像系统及其系统组件

高光谱成像涉及成像和光谱两个方面内容。该技术可以在连续的波长范围内产生一系列高分辨率图像信息,这些数据具有二维(2D)空间信息和一维(1D)光谱信息,构成了三维(3D)数据立方体,如图1所示。其中, x 轴和 y 轴代表2D平面, λ 轴代表波长轴。因此,高光谱图像中的每个像素都保存相应位置的光谱信息,获得的光谱具有反映该特定像素信息的功能^[8-9]。

典型的HSI系统由电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)相机、光谱仪、照明单元和配备有图像采集软件的计算机组成。高光谱成像系统如图2所示。

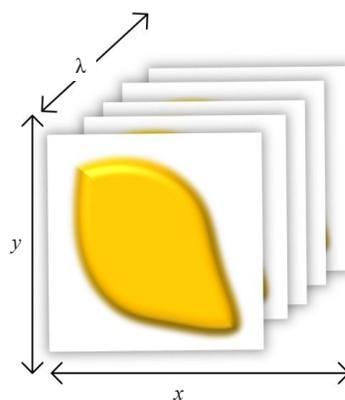


图1 高光谱数据

Fig. 1 Hyperspectral image

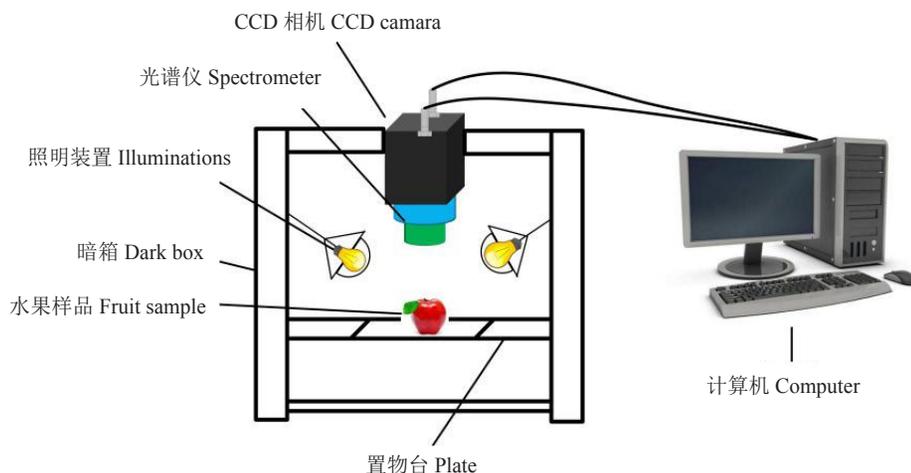


图2 高光谱成像系统

Fig. 2 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

1.2 形态校准

在高光谱图像采集中,由于曝光时间、载物台移动速度和焦距的不同,普通水果表皮的粗糙度、颜色和光泽在影响图像采集方面各有差异。因此,根据不同水果的特点,确定图像采集的参数尤为重要。由于水果中光强分布不均匀,形状多样,在光源强度较弱的波长下,获取的图像通常具有较大的噪声,这给数据处理带来了冗余信息。因此,需要使用黑白板来校准高光谱图像^[10]。

1.3 化学计量学方法

1.3.1 光谱预处理 为了将仪器和检测环境的干扰噪声和背景等非质量信息降至最低,需要进行光谱预处理,如均值中心化(Mean Centering)、平滑、多元散射校正(Multiplicative Scatter Correction, MSC)、标准正态变量变换(Standard Normal Variate, SNV)、去趋势(Detrending, DT)、导数处理、光谱滤波等,以提高原始数据质量,用于后续分析^[11]。

1.3.2 波长筛选方法 原始高光谱数据立方体包含几十到几百个波段,这给计算机带来了巨大的存储和处理压力。因此,选择保存最佳波段是数据简化和模型优化的重要步骤,以此提高分析速度。目前在定量与定性分析中,波长选择的方法主要有相关系数法、方差分析法、无信息变量消除法(Elimination of Variables, UVE)、竞争性自适应权重取样法(Competitive Adaptive Reweighted Sampling, CARS)、连续投影算法(Successive Projections Algorithm, SPA)和遗传算法(Genetic Algorithms, GA)^[12]等。

1.3.3 建模方法

建模方法可分为定量建模方法和定性建模方法。定量建模方法也称多元定量校正方法。在光谱分析中常用的方法包括多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)、主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)、人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[13]等方法。定性分析问题需要用到化学计量学中的模式识别方法。这种方法通常包括三类:有监督的方法、无监督的方法、光谱检索方法。常用的分类方法包括:聚类分析、深度优先搜索(Depth First Search, DFS)和判别分析(Discriminant Analysis, DA)等。高光谱数据分析流程如图3所示。

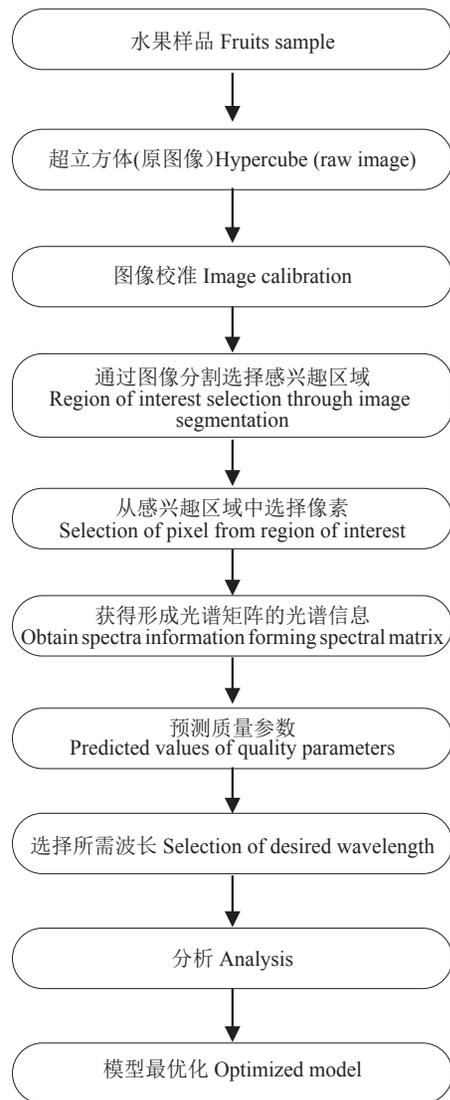


图3 高光谱数据分析流程

Fig. 3 Flow chart of hyperspectral data analysis

2 高光谱成像技术在水果质量检测中的应用

水果质量既包括外观、颜色等外部属性,也包括硬度和可溶性固形物含量(SSC)等内部质量参数。高光谱成像技术用于捕捉与内部质量相关的各种光谱和空间信息。高光谱成像在水果品质参数预测中的应用如表1所示,表明了高光谱技术在水果品质无损检测中应用非常广泛^[1-2,14-28]。

2.1 外部特征

2.1.1 擦伤 在收获和运输时出现在水果表面的表皮擦伤是水果最严重的外部缺陷之一,在研究中备受关注。它影响水果的外观、质地和颜色,并促使水分流失。擦伤的斑点增加了细菌和真菌污染的风险,降低了消费者的接受程度。擦伤区域的化学变

表 1 高光谱成像在水果质量上的应用

Table 1 Hyperspectral imaging applications for fruit quality parameters in fruits

水果 Fruit	质量参数 Quality parameters	波长 Wavelength/nm	化学计量学 Chemometrics	模型精度评价(相关系数/交叉验证 均方根误差/预测均方根误差) Evaluation of model accuracy (R/RMSECV/RMSEP)	参考文献 Reference
草莓 Strawberry	擦伤 Bruise	960~1700	DFS	85.30%~97.67%	[2]
草莓 Strawberry	擦伤 Bruise	650~720	SVM	96.91%	[15]
草莓 Strawberry	成熟 Maturity	380~1030, 874~1734	SVM	91.67%(380~1030 nm) 80%(874~1734 nm)	[28]
柑橘 Orange	腐败 Rotten	400~1100	ANN	98.3%~99.31%	[27]
蓝莓 Blueberry	硬度和 TSS Firmness & TSS	500~1000	PLS	0.23~1.55	[20]
荔枝 Lychee	SSC, pH	600~2500	PLSR	0.91~1.27(SSC) 0.29~0.31(pH)	[25]
苹果 Apple	擦伤 Bruise	400~2500	PCA	87%	[14]
苹果 Apple	绵软 Mealiness	600~100	PLS	74.6%~86.7%	[18]
苹果 Apple	硬度和 SSC Firmness&SSC	680~980	分层进化算法与 PLSR Hierarchical evolutionary algorithm and PLSR	6.4(硬度 Firmness) 0.83(SSC)	[21]
苹果 Apple	硬度和 SSC Firmness&SSC	500~1000	PLS	5.9~8.7(硬度 Firmness) 0.7~0.9(SSC)	[22]
苹果 Apple	硬度、SSC、可滴定酸度 Firmness & SSC & Titratable acidity	500~1000	PCA, ANN	8.57(硬度 Firmness) 1.19(SSC) 0.8(TA)	[26]
葡萄 Grape	pH, SSC	400~1000	PLSR	0.79~0.89 (pH) 0.9~0.94(SSC)	[24]
柿 Persimmon	硬度 Firmness	460~1020	PLSR	3.66~3.89	[23]
桃 Peach	冷害 Chilling injury	400~1000	PLS~DA, ANN, SVM	85.37%(IV) 96.11%(III)99.29%(II)	[17]
桃 Peach	硬度 Firmness	515~1000	PLSR	0.83~0.87	[19]
香蕉 Banana	含水量、SSC 和硬度 Moisture content & SSC & Firmness	400~1000	MLR	0.87(含水量 Moisture content)0.85(SSC) 0.91(硬度 Firmness)	[1]
枣 Jujube	擦伤 Bruise	918~1678	PCA	100%	[16]

化会导致其反射特性的变化。因此,通过比较同一物体上不同空间位置的光谱,可以很容易地检测到擦伤区域。

Siedliska 等^[29]对苹果擦伤进行无损检测,在构建水果损伤的监督分类模型时,采用了高光谱数据的二阶导数预处理和基于相关性的特征选择算法。测试集的成功率超过 95%,验证集的成功率超过 90%。在模型中,正确分类的实例的百分比非常高,从测试集的 98.2%到 100%,到验证集的 93%。

吴龙国等^[16]对长枣擦伤进行无损检测,采用近

红外(Near Infrared Reflection, NIR)波段获取 300 个长枣反射图像,提取并分析各类型长枣光谱曲线,选择波段范围 918~1678 nm 进行主成分分析,通过权重系数提取特征波长,然后对特征波长下图像进行主成分分析,选择最优的主成分图像进行识别。最后,对未识别的长枣图像采用波段比算法进一步进行识别。NIR 波段碰伤枣的识别率为 100%。

Keresztes 等^[30]开发了一个基于 HSI 的实时像素早期苹果碰伤检测系统。为了克服 HSI 光照均匀性较差的限制,对几种反射率校准和预处理技术进行

了比较,以校正眩光并最大化信噪比。通过一阶导数和均值中心化的最佳组合,以及图像后处理,该系统能够在像素级以98%的精度检测30个苹果中的新擦伤,每个苹果的处理时间低于200 ms。

Liu等^[15]对草莓进行缺陷识别,采用最小噪声分数(Minimum Noise Fraction, MNF)变换对高光谱图像数据进行处理,并定位和分离缺陷区域并进行光谱提取。基于水果的目标缺陷区域建立质量参数和光谱特征之间的联系。光谱归一化后,擦伤草莓的光谱区域为650~720 nm,并通过连续投影算法从整个波长范围中选择8个最佳波长。开发了线性和非线性算法来识别草莓中的缺陷类型。结果表明,基于全波长的SVM模型具有最高的识别准确率,标定准确率为96.91%,预测准确率为92.59%。

上述研究结果表明,基于高光谱成像技术的水果擦伤检测主要集中在苹果、猕猴桃、草莓、枣等水果,其中对苹果的擦伤检测最多。对于区分擦伤和正常水果以及不同深度的擦伤,高光谱成像技术的引入提高了水果擦伤的预测效率。然而,在使用高光谱检测较小面积擦伤时,应谨慎使用图像处理技术。此外,以上研究仅限于某类水果的几个品种,因此需要进一步研究更多不同品种的水果材料。

2.1.2 冷害 冷害是指由水果和蔬菜组织冰点以上的不适低温造成的伤害。大多数热带和亚热带水果都对冷害敏感。在低温条件下,水果组织容易受到损伤,导致代谢活性发生改变。在敏感物种中,可以观察到表面点蚀、变色、萎蔫、风味丧失甚至腐烂。

Elmasry等^[11]对苹果冷害进行识别,建立了一个蛇果苹果冷害识别模型,利用反向传播神经网络方法,准确率为98.4%,该模型可进一步应用于苹果硬度的预测。

Sun等^[17]对桃子冷害进行评价,采用高光谱反射成像(400~1000 nm)并结合化学计量学方法,建立PLS-DA、ANN和SVM判别模型,用于二类(“非冷害”和“冷害”)、三类(“非冷害”“轻度冷害”和“重度冷害”),四类(“非冷害”“轻度冷害”“中度冷害”和“重度冷害”)分类模式。结果表明,使用全波长时,神经网络模型对预测集的分类率最高,四类、三类和二类分类的准确率分别为85.37%、96.11%和99.29%。此外,通过连续投影算法选择的6个最佳波长用作偏最小二乘法、费希尔线性判别分析、ANN和SVM模型的输入。另外,还通过转换图像

的主成分分析算法,生成了冷害区域的空间分布图。结果表明,高光谱反射成像技术用于桃子冷害的无损检测是可行和有效的,甚至可以在食用和加工前进行多波长的检测。

Lu等^[32]研究发现光谱分辨率为5.03 nm的20 mm·s⁻¹高光谱成像系统具有较高的扫描效率,更适合检测青枣冷害。基于最优光谱特征,线性判别分析模型对二类(“非冷害”和“冷害”)和三类(“非冷害”“轻度冷害”和“重度冷害”)分类的总体准确率分别达到98.3%和93.3%。

以上结果表明,高光谱成像系统已经成为一个能够基于几个波段检测水果冷害的自动系统,并已经成功地应用于苹果、桃、枣的冷害识别,但对于更易感冷害热带和亚热带水果的冷害识别文献还比较少。

2.1.3 组织特性 除了水果的擦伤和冷害之外,其他组织特性如多汁性和咀嚼性与其感官质量密切相关。苹果绵软是一种组织障碍,其特征是缺乏汁液和组织疏松。Huang等^[18]在600~1000 nm范围内使用HSI系统检测金冠苹果绵软,使用硬度和多汁性这两个参数作为指标。偏最小二乘分类模型对“绵软”和“非绵软”苹果的准确率为74.6%~86.7%。利用局部线性嵌入算法进行特征提取,偏最小二乘法的总体分类性能为80.4%,而分类模型的准确率为82.5%。总的来说,高光谱成像有很好的二级分类(绵软,非绵软)结果。对于在长货架期内处理的“粉状”苹果的两级分类,获得了更好的结果(93%的准确性)。

然而,这项技术仍然不能准确地确定硬度和多汁性方面的粉质水平,也不能区分不太严重的粉质苹果。

2.2 内部质量

2.2.1 硬度 果实硬度是水果新鲜度和成熟度的主要质地属性,也是表征水果机械性能的一般质量参数,尤其是那些多汁的水果,如浆果和李子,它随水果的种类变化很大。

在大多数情况下,硬度与成熟时间成反比。在果实成熟过程中,由于细胞间黏附的减少、中间薄层的溶解和薄壁细胞壁的弱化,硬度降低,最终导致细胞壁修饰酶丧失膜完整性。

在众多水果中,苹果在硬度检测中受到了极大的关注。Wang等^[31]为了建立更好的苹果硬度预测

模型提出了高光谱散射成像中的模型融合概念,旨在提高预测精度。在这项研究中,两个波长选择算法—非信息变量消除(UVE)和监督仿射传播聚类(Supervised Affinity Propagation, SAP),首次用于提取重要的波段。基于所选波段建立了相应的偏最小二乘模型,即UVE-PLS模型和SAP-PLS模型。借助于数据融合的神经网络,将上述两个模型结合起来形成最终的融合模型。结果表明,融合模型的预测性能($R_p = 0.828$)比UVE-PLS模型的预测性能($R_p = 0.805$)和SAP-PLS模型的预测性能($R_p = 0.814$)都有所提高。许多关于高光谱散射技术的研究可用于检测水果硬度。

Cen等^[19]为了对桃质量进行检测,使用推扫式高光谱成像系统获取了500个红星桃的高光谱反射图像。基于具有交叉验证的PLSR和主成分分析预测模型,在515~1000 nm获得了0.749的良好相关系数。

Leiva-Valenzuela等^[20]为了检测蓝莓的硬度,使用推扫式高光谱成像系统,在500~1000 nm的光谱范围内,从两个水果方向(即茎和花萼末端)的302个蓝莓中获取高光谱反射图像。从每个蓝莓的高光谱图像的感兴趣区域(Region of Interest, ROI)提取平均光谱。预测模型是基于交叉验证的偏最小二乘法开发的,并用25%的样本进行了外部测试。与SSC预测($R = 0.79$)相比,获得了更好的硬度预测($R = 0.87$)。

丁佳兴等^[24]对灵武长枣硬度进行无损检测,采用SNV预处理算法效果最优,其PLSR模型的交叉验证相关系数(R_{cv})为0.820 7,交叉验证均方根误差(RMSECV)为9.963 0。利用SPA、CARS和UVE法从全光谱的125个波长中分别选取出29个、31个和31个特征波长。而基于全光谱建立的LS-SVM模型效果最优,其预测相关系数(R_p)为0.955 5,预测均方根误差(RMSEP)3.828 2。

以上研究表明,高光谱成像的空间分辨技术对于水果硬度的检测范围非常广泛,已用于测量苹果、桃、香蕉、梨、樱桃、柿、李子、杧果、蓝莓等大部分水果的硬度。此外,基于硬度对水果成熟度进行分类也展现出了极大的潜力,但还需要通过增加群体规模、二次抽样方法和改善测量条件等方法进行进一步改进。

2.2.2 可溶性固形物含量(SSC) 可溶性固形物含

量(SSC),也称为总可溶性固形物含量(Total Soluble Solids, TSS),是甜味测量的重要指标。一般来说,果实的采收成熟度是基于化学成分和果实内外性状,重要的组成因素之一就是总可溶性固形物含量(TSS)。TSS是水质中的总悬浮物,由可溶性糖、酸和其他可溶性物质组成。总可溶性固形物和酸的比率是水果味道的一个指标。水果中的可溶性固形物含量是一个重要的品质参数,可以通过高光谱成像技术在较短的时间内进行准确检测^[35-37]。

为了开发一种更有针对性、无损、快速的苹果TSS识别技术,Huang等^[21]研究了苹果TSS高光谱散射预测的最佳波长选择。在他们的研究中,选择了与子空间分解和PLSR耦合的分层进化算法(HEA)来确定最佳波长。对于预测总散射截面,使用16个最佳波长的模型比使用 $R^2 = 0.643$ 和 $RMSEP = 0.008 3$ 的全光谱模型产生更好的结果, $R^2 = 0.676$ 和 $RMSEP = 0.007 8$ 。结果表明,HEA方法为最佳波长选择提供了一种有效的手段,提高了预测苹果可溶性固形物含量的模型性能。

在另一项研究中,黄文倩等^[38]为了测量苹果内SSC含量,通过HSI技术在400~1000 nm的有效波长下利用SPA-MLR模型检测TSS,并且 R^2 、RMSEP、RPD分别为0.950 1、0.308 7和4.476 6。因此,SPA-MLR模型在苹果的TSS在线检测和便携式仪器的开发方面具有巨大的潜力。

Mo等^[39]利用近红外高光谱成像建立苹果内部可溶性固形物含量的偏最小二乘回归(PLSR)模型。在400~1000 nm范围内,从高光谱吸收图像中提取了苹果薄片的反射光谱。为三种不同的测量/采样设计开发了SSC绘图的预测模型,这些设计在用于苹果SSC测量和光谱平均的感兴趣区域(Region of Interests, ROIs)的数量和大小上有所不同。通过使用从苹果的更少但更大的区域而不是从更多但更小的区域测量/平均的光谱和SSC,提高了PLSR模型的准确性。

总体结果表明,高光谱吸收成像技术可用于检测苹果内部可溶性固形物含量。然而,目前的研究仅限于苹果的赤道位置,为了得到更可靠、更全面的预测结果,需要利用不同的算法对苹果的更多不同位置进行处理。未来的研究将集中在基于高光谱反射成像系统的固态物质的表面分布。此外,为了提高计算速度和建模精度,还需要降低高光谱数据的

高维度。未来的研究应挖掘进一步的数据,以减少冗余的高光谱数据而不损失有价值的信息,扩展新算法的可行性以开发稳定的预测模型,并提高模型的精度和准确度。

2.2.3 可滴定酸度 酸度是水果味道和质量的主要决定因素。有机酸是水果酸味的主要因素,这些化合物在成熟过程中由于较高的呼吸作用而减少。成熟期水果中的有机酸主要是苹果酸、柠檬酸和酒石酸。

Cayuela等^[40]为了预测橙子中可滴定酸度,在两个反射光谱区(350~2500 nm和1100~2300 nm)使用近红外光谱。研究表明,在橙子中,透明质酸随反射率测量的水果方向不同而不同。

Rungpichayapichet等^[41]测定了杧果果实的可滴定酸度。利用160个杧果在450~998 nm可见光和近红外区的相对表面反射光谱数据,通过偏最小二乘法回归分析,建立了预测模型。HSI数据与TA存在很高的相关性($R^2 = 0.81$, $RMSE = 0.24\%$)。

利用高光谱成像技术预测水果TA含量的水果种类还比较少,主要包括橙子和杧果,TA更多的是用来预测水果的成熟时间。

2.2.4 水分含量 水果的水分含量对质量和安全特性有着至关重要的影响。一般来说,水果的MC随着它们的成熟过程而变化。

Rajkumar等^[1]使用来自反射率采集模式的高光谱图像来估算香蕉在三种储存温度(20℃、25℃和30℃)下不同成熟期的含水量。采集的图像用白色和黑色参考图像归一化,并用于提取400~1000 nm的光谱信息。利用偏最小二乘校正模型建立光谱反射率与含水量之间的关系。含水量的变化呈线性关系,因为果实的含水量随着成熟期的延长而增加。

高光谱成像技术对水果水分含量的准确预测还没有令人满意的研究结果,仍需要深入探究。

3 发展趋势

尽管在水果质量检测过程中,与强大的化学计量学相结合的高光谱成像技术使笔者从繁重的测量和繁琐的计算中解脱出来,但在将高光谱成像技术应用于实践时仍有一些障碍需要克服。首先,之前构建的模型应用到另一个HSI系统时,应该仔细进行模型转换。其次,样本的特性也可能给质量分类和预测带来一些问题。一方面,由于大多数水果(例

如,圆形苹果或圆柱形香蕉)的形态变化而导致的光谱变化削弱了模型的能力;另一方面,样品所具有的干扰(例如,茎和花萼对擦伤检测的干扰)可能会降低分类的准确性^[42-44]。

随着硬件和软件技术的进步,具有低成本和快速检测特性的高光谱成像系统是有望实现的。在今后应用高光谱对水果质量进行无损检测的过程中应注重以下几个方面的研究:

(1)目前,基于高光谱图像关键波段的多光谱成像受到了广泛关注。由于多光谱成像系统具有相对较低的仪器成本和较高的分析速度,有望在工业领域中得到广泛应用。

(2)HSI可以在不同的模式下执行,每种模式在提供特定的样本信息方面都有自己的优势。因此,以多模式方式运行的未来高光谱成像系统通过提供关于同一物体的更全面的信息将具有良好的潜力。

(3)仍然需要改进成像处理算法,以进一步提高该技术的效率,挖掘其降低计算和图像分析成本的潜力,能够快速、实时、准确地确定水果中重要化学成分。

(4)更要鼓励业界采用比当前在线多光谱技术更可靠、更灵活的分类解决方案,但建议进一步优化照明和硬件条件,以进一步减少眩光的影响和提高处理速度,进而促进高光谱成像在水果快速和无损质量检测中的广泛应用。

4 结 论

综述了近10年来高光谱成像在水果质量检测方面的研究进展与应用,涵盖了水果的内外属性,外部属性包括擦伤、冷害等,内部特征包括硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸度、水分含量等。在过去的几十年里,现代无损检测技术,包括光谱和成像技术得到了发展。在光谱技术方面,高光谱技术作为一种快速方便的工具,在这些无损检测技术中成本最低,适用于测定皮薄或内部结构均匀的水果。就成像技术而言,高分辨率成像技术是预测内部质量的有力工具,只需选择几个波长即可获得很好的结果。高光谱成像技术使水果的无损检测以及在线分类和分级成为可能。

参考文献 References:

- [1] RAJKUMAR P, WANG N, ELMASRY G, RAGHAVAN G,

- GARIEPY Y. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(1): 194-200.
- [2] NANYAM Y, CHOUDHARY R, GUPTA L, PALIWAL J. A decision-fusion strategy for fruit quality inspection using hyperspectral imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 118-125.
- [3] YANG L, GAO H Q, MENG L W, FU X P, DU X Q, WU D, HUANG L X. Nondestructive measurement of pectin polysaccharides using hyperspectral imaging in mulberry fruit[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 1-10.
- [4] LIU J H, SUN X, YOUNG J M, BACHMEIER L A, NEWMAN D J. Predicting pork loin intramuscular fat using computer vision system[J]. *Meat Science*, 2018, 143: 18-23.
- [5] WAN P, TOUDESCHI A, TAN H Q, EHSANI R. A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 146: 43-50.
- [6] PU Y Y, SUN D W, BUCCHERI M, GRASSI M, CATTANEO T, GOWEN A. Ripeness classification of banana fruit (*Musa acuminata*, aa): a comparison study of visible spectroscopy and hyperspectral imaging[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(8): 1693-1704.
- [7] JIE D F, WU S, WANG P, LI Y, YE D P, WEI X. Research on citrus grandis granulation determination based on hyperspectral imaging through deep learning[J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(2): 280-289.
- [8] CHENG J H, NICOLAI B, SUN D W. Hyperspectral imaging with multivariate analysis for technological parameters prediction and classification of muscle foods: A review[J]. *Meat Science*, 2017, 123: 182-191.
- [9] 蒙庆华. 基于 MEMS 技术的 128×128 阵列 F-P 腔可调谐红外滤波器设计与制备研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- MENG Qinghua. Design and fabrication of the F-P cavity tunable infrared filter with 128 × 128 array based on MEMS technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [10] LIU D, SUN D W, ZENG X A. Recent advances in wavelength selection techniques for hyperspectral image processing in the food industry[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 7(1): 307-323.
- [11] 任东, 翟芳芳, 陆安祥. 近红外光谱分析技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 34-36.
- REN Dong, ZHAI Fangfang, LU Anxiang. Near infrared spectroscopy and its application[M]. Beijing: Science Press, 2016: 34-36.
- [12] RAVIKANTH L, JAYAS D S, WHITE N, 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.
- [13] BARBIN D, ELMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork[J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 259-268.
- [14] 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.
- [15] LIU Q, SUN K, PENG J, XING M K, PAN L Q, TU K. Identification of bruise and fungi contamination in strawberries using hyperspectral imaging technology and multivariate analysis[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 11(5): 1518-1527.
- [16] 吴龙国, 王松磊, 康宁波, 何建国, 贺晓光. 基于高光谱成像技术的灵武长枣缺陷识别[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 281-286.
- WU Longguo, WANG Songlei, KANG Ningbo, HE Jianguo, HE Xiaoguang. Non-destructive detection of defects in *Zizphus jujube* Mill cv. Lingwu changzao based on near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 281-286.
- [17] SUN Y, GU X Z, SUN K, HU H J, XU M, WANG Z J, TU K, PAN L Q. Hyperspectral reflectance imaging combined with chemometrics and successive projections algorithm for chilling injury classification in peaches[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2017, 75: 557-564.
- [18] HUANG M, LU R F. Apple mealiness detection using hyperspectral scattering technique[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 58(3): 168-175.
- [19] CEN H Y, LU R F, MENDOZA F A, ARIANA D P. Peach maturity/quality assessment using hyperspectral imaging-based spatially resolved technique[C]. *Spie Defense, Security & Sensing*, 2011.
- [20] LEIVA-VALENZUELA G A, LU R F, AGUILERA J M. Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(1): 91-98.
- [21] HUANG M, LU R F. Optimal wavelength selection for hyperspectral scattering prediction of apple firmness and soluble solids content[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(4): 1175-1182.
- [22] MENDOZA F, LU R F, ARIANA D, CEN H Y, BAILEY B. Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 62(2): 149-160.
- [23] MUNERA S, BESADA C, BLASCO J, CUBERO S, SALVADOR A. Astringency assessment of persimmon by hyperspectral imaging[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 125: 35-41.
- [24] BAIANO A, TERRACONE C, PERI G, ROMANIELLO R. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-

- chemical and sensory characteristics of table grapes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87: 142-151.
- [25] PU H B, LIU D, WANG L, SUN D W. Soluble solids content and pH prediction and maturity discrimination of lychee fruits using visible and near infrared hyperspectral imaging[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 235-244.
- [26] NOH H K, LU R. UV/blue Light-induced fluorescence for assessing apple quality[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2010, 35(2): 124-131.
- [27] GÓMEZ-SANCHIS J, MARTÍN-GUERRERO J D, SORIA-OLIVAS E, MARTINEZ-SOBER M, MAGDALENA-BENEDITO R, BLASCO J. Detecting rotteness caused by *Penicillium* genus fungi in citrus fruits using machine learning techniques[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 780-785.
- [28] ZHANG C, GUO C D, LIU F, KONG W W, HE Y, LOU B G. Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberry with support vector machine[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 179: 11-18.
- [29] SIEDLISKA A, BARANOWSKI P, MAZUREK W. Classification models of bruise and cultivar detection on the basis of hyperspectral imaging data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106: 66-74.
- [30] 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.
- [31] ELMASRY G, WANG N, VIGNEAULT C. Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52(1): 1-8.
- [32] LU H D, YU X J, ZHOU L J, HE Y. Selection of spectral resolution and scanning speed for detecting green jujubes chilling injury based on hyperspectral reflectance imaging[J]. Applied Sciences, 2018, 8(4): 523.
- [33] WANG S, HUANG M, ZHU Q B. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 1-7.
- [34] 丁佳兴, 吴龙国, 何建国, 刘贵珊, 强锋. 高光谱成像技术对灵武长枣果皮强度的无损检测[J]. 食品工业科技, 2016, 24: 58-68.
- DING Jiaying, WU Longguo, HE Jianguo, LIU Guishan, QIANG Feng. Non-destructive determination of pericarp break force of Lingwu long jujube by hyperspectral imaging technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 24: 58-68.
- [35] FAN S X, ZHANG B H, LI J B, LIU C, HUANG W Q, TIAN X. Prediction of soluble solids content of apple using the combination of spectra and textural features of hyperspectral reflectance imaging data[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 51-61.
- [36] TIAN X, LI J B, WANG Q Y, FAN S X, HUANG W Q. A bi-layer model for nondestructive prediction of soluble solids content in apple based on reflectance spectra and peel pigments[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1055-1063.
- [37] 李钰. 发展广西水果加工的对策研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2): 429-436.
- LI Yu. Study on countermeasure for further developing fruit processing industry in Guangxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(2): 429-436.
- [38] 黄文倩, 李江波, 陈立平, 郭志明. 以高光谱数据有效预测苹果可溶性固形物含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2843-2846.
- HUANG Wenqian, LI Jiangbo, CHEN Liping, GUO Zhiming. Effectively predicting soluble solids content in apple based on hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2843-2846.
- [39] MO C, KIM M S, KIM G, LIM J, DELWICHE S R, CHAO K L, LEE H, CHO B K. Spatial assessment of soluble solid contents on apple slices using hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2017, 159: 10-21.
- [40] CAYUELA J A, WEILAND C. Intact orange quality prediction with two portable NIR spectrometers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(2): 113-120.
- [41] RUNGPICHAYAPICHET P, NAGLE M, YUWANBUN P, KHUWIJTJARU P, MAHAYOTHEE B, MULLER J. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2017, 159: 109-120.
- [42] SERRANTI S, BONIFAZI G, LUCIANI V. Non-destructive quality control of kiwi fruits by hyperspectral imaging[C]. SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2017.
- [43] SUN M J, ZHANG D, LIU L, WANG Z. How to predict the sugariness and hardness of melons: a near-infrared hyperspectral imaging method[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 413-421.
- [44] LI J L, SUN D W, CHENG J H. Recent advances in nondestructive analytical techniques for determining the total soluble solids in fruits: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(5): 897-911.