



无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展

刘妍^{1,2}, 周新奇¹, 俞晓峰^{1,2}, 李永强¹, 韩双来^{1,2*}

(1. 聚光科技(杭州)股份有限公司, 杭州 310051; 2. 杭州谱育科技发展有限公司, 杭州 311305)

摘要 果蔬品质是影响其市场价格和消费者满意度的重要因素之一。无损检测技术作为快速、低成本的质量评价方法,为果蔬品质检测提供了一种有效手段。本文综述了无损检测在果蔬品质检测领域中的相关应用研究,从检测原理、应用情况和技术特点3个方面对近红外光谱检测技术、机器视觉检测技术、高光谱成像检测技术、声学分析检测技术、电子鼻检测技术、介电性质分析检测技术、核磁共振检测技术等无损检测技术在果蔬品质检测中的研究情况进行总结,同时分析了各项技术目前存在的问题,并对未来的应用前景做出展望,以期对果蔬无损检测应用研究提供参考。

关键词 无损检测技术; 果蔬产品; 品质评价; 研究进展

中图分类号 S-1

文献标志码 A

Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2020,46(1):27-37

LIU Yan^{1,2}, ZHOU Xinqi¹, YU Xiaofeng^{1,2}, LI Yongqiang¹, HAN Shuanglai^{1,2*} (1. Focused Photonics (Hangzhou) Inc., Hangzhou 310051, China; 2. Hangzhou Puyu Technology Development Co., Ltd., Hangzhou 311305, China)

Abstract The quality of fruit and vegetable products is one of the important factors affecting market prices and customer satisfaction. Nondestructive testing techniques provide a rapid way to perform quality evaluation at a relatively low cost. Considering the rapid development of nondestructive testing techniques, some relevant literatures are reviewed in this paper. The principles, applications, characteristics and problems of near infrared spectroscopy technology, machine vision, hyperspectral imaging analysis, acoustic detection, electronic nose, dielectric properties analysis and nuclear magnetic resonance technology are briefly highlighted and summarized. Based on above the review, this paper discusses the solutions further and explores future opportunities and prospects to form the latest reference for researchers.

Key words nondestructive testing techniques; fruit and vegetable products; quality evaluation; research progress

水果和蔬菜是人们日常生活中不可或缺的食物。随着我国农业供给侧改革和人民生活水平的提高,大众的消费观念从“吃得饱”的初级需求向“吃得好”的更高要求转变,对果蔬的品质也提出了

基金项目:“十三五”国家重点研发计划“果蔬产地商品化处理技术及装备研发示范”(2017YFD04013);浙江省重点研发计划“便携式多用途茶叶机械装备研发”(2017C02007)。

*通信作者(Corresponding author): 韩双来(<https://orcid.org/0000-0003-0247-419X>), E-mail: shuanglai_han@fpi-inc.com

第一作者(First author): 刘妍(<https://orcid.org/0000-0002-1206-3944>), E-mail: yan_liu@fpi-inc.com

收稿日期(Received): 2019-09-24; 接受日期(Accepted): 2020-02-22

更高要求。通常,果蔬品质主要包括:果蔬的大小、形态、色泽、表面损伤、表面缺陷等外部品质;果蔬的水分、糖度、酸度、可溶性固形物含量、淀粉含量、维生素含量等营养成分,新鲜度、成熟度、内部病变等内部品质。在传统检测过程中,果蔬外部品质主要通过人工感官评定,该方法简单,操作难度小,方便快捷,但评定结果变异大,不易量化且易受主观因素影响。果蔬内部品质主要通过理化分析方法检测,例如:水分含量的测定使用直接干燥法,可溶性固形物含量的测定使用折射仪法,酸度测定使用碱标准液滴定法,维生素C含量的测定使用高效液相色谱法。这些方法检测精度高,结果准确,但费用高,周期长,操作复杂,不易自动化。

果蔬品质无损检测技术是利用光、声、电、磁、力等的传感特性,在不损伤或者不影响检测对象物理化学性质的前提下,对果蔬产品的外部 and 内部品质信息进行获取和分析评价的一种技术。该技术可以保证检测对象的完整性,避免检测过程中样品成分和营养的损失,同时还具有检测速度快、检测成本低、能够实时在线检测等优点。目前,果蔬品质无损检测技术主要包括:光谱分析技术、机器视觉技术、光谱成像技术、介电性质分析检测技术、声学特性检测技术、核磁共振检测技术、电子鼻技术等。针对不同的检测对象和检测指标,这些无损检测技术各具优势。本文主要针对常见的果蔬品质无损检测技术的研究进展进行分析,并展望其发展趋势和前景。

1 近红外光谱检测技术

依照美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)规定,近红外光是指波长在780~2 526 nm波段的一段电磁波,习惯上又分为近红外短波(780~1 100 nm)和近红外长波(1 100~2 526 nm)2个区域。当近红外光照射在物体上时,物质内部的分子会吸收光子,从基态跃迁至激发态,产生吸收光谱。在这些物质分子中,含氢基团或官能团的倍频和合频吸收是近红外光谱信息的主要来源,因此,绝大多数的化学和生物样品在近红外区域均有相应的吸收带,通过分析这些吸收信息,可以实现对样品的定性或定量检测^[1]。

果蔬品质的近红外无损检测始于20世纪50年代。至21世纪初,近红外光谱检测技术在果蔬的水

分含量^[2]、蛋白质含量^[3]、维生素C含量^[4-6]、糖度^[7-9]、酸度^[10]、硬度^[11]等指标的定量分析和机械损伤^[12]、内部病变^[13-14]、褐变^[10,15-16]、新鲜度^[17]、成熟度^[18]的定性判别分析中已经取得了广泛的应用研究成果^[19-21]。然而,以上研究均基于实验室的台式近红外分析仪,无法满足在田间、仓储或运输过程中进行分析的要求。因此,随着微机电加工技术的发展,研究者们开始将应用开发研究聚焦在便携式近红外分析仪的开发、应用和模型数据云平台的构建上。

在便携式近红外分析仪的开发和应用研究中,陈建新^[22]基于海洋光学的PFS-1100地物光谱仪构建近红外光谱测试系统,以三星公司的S3C2440作为数据处理器,Linux作为操作系统,完成苹果硬度的便携式近红外光谱仪开发。该设备在检测状态下,工作时间可超过10 h,在待机状态下,可持续待机20 h;对设备的实际测试结果表明,苹果硬度实测值与设备测定值的决定系数为0.717 7,均方根误差为2.459 N,平均误差为4.133 4 N。裴军强^[23]选择USB2000+可见/近红外光谱仪、ARM嵌入式处理控制单元作为硬件系统基本构成,设计搭建便携式寒富苹果检测系统。该系统在实际样本的糖度检测中,绝对偏差值不超过15%。朱丹宁^[24]依托STS微型光谱仪研究开发了一款便携式近红外光谱仪用于苹果糖度检测,模型预测相关系数为0.911,均方根误差为0.532 °Brix。郭志明等^[25]设计了一套手持式近红外检测系统用于检测番茄可溶性固形物和番茄红素含量,模型相关系数分别为0.899和0.866,预测均方根误差分别为0.133%和2.508 mg/kg。为满足市场需求,商品化的便携式近红外分析仪被研制推出,目前的主流产品有美国Thermo Fisher Scientific的Phazir Rx系列、聚光科技(杭州)股份有限公司的SupNIR-1000系列、日本FANTEC的FT-20和FQA-NIR Gun、日本Kubota的K-BA100R和K-SS330等不同型号的产品。使用商业便携式近红外分析仪检测果蔬品质的相关研究见表1,从中可以看出,便携式近红外分析仪在果蔬品质检测中具有良好的准确度和稳定性。

在近红外云平台共享技术开发中,吴海卿等^[26]设计了一种基于云平台的近红外食品质量监测系统,能够自动完成数据采集、云端传送、光谱分析、性质预测、报告回送等功能。该系统的应用,可以弱化对用户的专业性要求,实现数据共享,降低成

表 1 商业便携式近红外分析仪在果蔬品质检测中的应用研究

Table 1 Application of commercial portable near-infrared (NIR) spectrometer in quality detection of fruits and vegetables

便携式近红外分析仪 Portable NIR spectrometer		检测对象 Detection subject	检测指标 Detection index	检测结果 Detection result	文献 Reference
型号 Type	公司 Company				
SupNIR-1000	聚光科技(杭州)	苹果	酸度、抗坏血酸	$R_p \geq 0.9$ $RMSEP \leq 0.45$	[27]
SupNIR-1520	聚光科技(杭州)	红枣	水分含量	平均偏差 0.41%	[28]
Micro NIR TM 1700	美国 JDSU	无花果	糖度 硬度	$R_p^2=0.51$ $R_p^2=0.57$	[29]
Phazir-1018	美国 Thermo Fisher Scientific	南非鳄梨	成熟度	$R^2=0.732$ $RMSEP=1.83$	[30]
LabSpec 4	美国 Analytical Spectral Devices Inc.	橙	可溶性固形物含量	$RMSEP=0.87$	[31]
			酸度	$RMSEP=0.13$	
			可滴定酸度	$RMSEP=2.47$	
			成熟度指数	$RMSEP=1.54$	
			果肉硬度	$RMSEP=1.82$	
			果汁体积	$RMSEP=8.38$	
			水果质量	$RMSEP=43.51$	
			果皮质量	$RMSEP=16.07$	
			果汁体积与水果质量比	$RMSEP=6.48$	
			水果和果汁颜色指数	$RMSEP=55.69$	
Luminar 5030	美国 Brimrose Corp		可溶性固形物含量	$RMSEP=1.12$	
			酸度	$RMSEP=0.40$	
			可滴定酸度	$RMSEP=2.07$	
			成熟度指数	$RMSEP=2.57$	
			果肉硬度	$RMSEP=1.53$	
			果汁体积	$RMSEP=12.13$	
			水果质量	$RMSEP=32.63$	
			果皮质量	$RMSEP=14.71$	

R_p : 相关系数; R_p^2 : 决定系数; $RMSEP$: 预测均方根误差。

R_p : Correlation coefficient; R_p^2 : Coefficient of determination; $RMSEP$: Root mean square error of prediction.

本。全朋坤^[32]搭建了苹果内部品质近红外检测平台,并实现了基于http协议的数据云平台记录。这些研究均打破了传统的单机版近红外光谱分析系统,以云计算为平台,构建公共、开放的近红外光谱分析系统,实现在云平台上的光谱输入输出、光谱预处理和定性定量分析。该技术可以促进近红外光谱检测技术的网络化,实现果蔬品质的远程管控与溯源。

近红外光谱检测技术具有简单、快捷、方便、低成本,以及可同时测定多项指标、能够实现在线无损检测等优点,但也存在对样品均匀性要求高、易受样品温度及检测部位影响等的局限。未来,在近红外光谱检测方法的开发上,需要增加对待测成分标准品的光学特性和特征吸收波段研究,同时,针对不同品类果蔬的差异,开发针对性的检测方法并形成标准,以提高检测技术的实用性和推广性;在近红外光谱检测装备的研发上,需要研究和制定台间差消除、温度修正、波长和能量校正的措施,在满

足检测要求的同时降低仪器成本,提高果蔬企业对仪器的接受度。

2 机器视觉检测技术

机器视觉检测技术是用计算机来模拟人类视觉功能进行检测的技术,主要是以计算机和图像获取设备为工具,由图像获取设备将检测对象的外部特征信息高速输送给计算机进行图像处理、分析和模式识别,从而实现对检测对象外观品质的综合评价^[33]。机器视觉不会有人眼的疲劳,却有着比人眼更高的精度和速度,在果蔬检测领域,多用于实现不同品质果蔬的分级分选检测。

近年来,基于机器视觉的果蔬品质分级分选技术已经取得了许多重要成果,检测指标主要有果蔬的颜色、表面缺陷、尺寸和形状、种类^[34]、成熟度^[35-37]、损伤度^[38]等。唐义华^[39]利用机器视觉技术对红提颜

色进行分级检测,分级准确率在94.7%以上。SOFU等^[40]设计了一套苹果自动分拣和品质检测系统,该系统能够采集和分析苹果在辊道输送机上滚动的4幅图像,在使用双通道的情况下,平均每秒可分选15个苹果。王风云等^[41]设计开发了一套基于机器视觉的双孢蘑菇的分级系统,并提出了基于分水岭和闭运算等处理的双孢蘑菇图像的大小分级算法,准确率为97.42%,破损率为0.96%,与人工分级相比,该方法的效率提高了38.86%。AGUILERA PUERTO等^[42]从3种不同视角下采集橄榄内果皮图像,在图像直方图的基础上获取特征向量,使用判别分析和神经网络2种分类技术分别进行分类测试,均获得良好的分类效果,对不同品种的样本分类准确度可达89%。

经过多年的研究,世界上已有多家公司研发、制造基于机器视觉检测技术的果蔬分级设备。例如,法国MAFRODA公司、意大利UNITEC公司、荷兰GREEFA公司和西班牙FOMESA公司等,都具有先进的视觉检测分拣技术,并实现了分选设备的产业化制造和市场销售。其产品检测分选范围广泛,可以处理蓝莓、苹果、樱桃、柑橘、橙、梨、苹果、番茄、圣女果、青椒等,分选后的产品具有出色的品质,为果蔬产业带来了巨大的经济效益。我国基于机器视觉检测技术的果蔬分级设备研究和开发目前还处于起步阶段,部分高校已经在该领域取得研究成果,例如浙江大学、中国农业大学、山东农业大学、宁夏大学等均研发出水果视觉检测分选设备,但多数处于项目示范应用阶段,未进行产业化生产和推广。机器视觉检测技术主要依赖于图像处理算法来进行图像分析,因此,改进算法,提高图像特征对农产品样本表征的准确性,提高机器视觉系统的处理效率和鲁棒性,是机器视觉检测技术急需解决的问题。同时,由于机器视觉的商业化应用多搭载于自动分选系统上,因此,获取快速动态状态下果蔬的全方位扫描信息、提高检测准确度和检测速度也是需要不断深入研究的课题。

3 高光谱成像检测技术

高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)检测技术是将光谱技术和成像技术结合,通过光谱仪或检测样品的移动,以紫外至近红外波段的光同时对

物体进行连续扫描,采集样品的空间信息、光谱信息和光强度信息,获得样品在每一有效波长下的图像信息和每一检测位置的光谱信息,实现对待测样品的快速无损检测。通过高光谱成像获得的数据为一个包括2个空间维度和1个波长维度的三维数据块^[43]。该数据块是由逐行扫描第二空间维度获得的,因此,HIS检测技术非常适合用于传输带上的样品品质检测和分级。

在果蔬品质检测方面,高光谱反射成像是最常见的类型,通常在可见/近红外(visible/near-infrared, Vis/NIR)(400~1 000 nm)或短波红外(1 000~2 500 nm)范围内,用于对果蔬内部品质和外部缺陷的检测^[44-45]。例如,张然采集了不同损伤程度的马铃薯HSI信息(468~1 000 nm),通过主成分分析选择区域特征明显的主成分图像,然后将筛选的图像与对图像贡献率最高的波段进行递推最小二乘处理,同时结合贝叶斯分类器模型进行识别分析,实现了对马铃薯外部冻伤、机械损伤、摔伤等损伤的识别^[46]。张梦芸进行了基于高光谱成像技术对蓝莓内部瘀伤检测的研究,使用卷积神经网络对高光谱图像进行分割,提高了检测的准确率并解决了蓝莓的摆放问题,对早期瘀伤的测试识别率达到81.1%^[47]。RADY等利用可见光/高光谱成像(400~900 nm)检测苹果蠹蛾侵染情况,对侵染的判别率达到86%^[48]。KERESZTES等开发了一个使用短波红外高光谱成像技术结合眩光矫正技术的早期苹果瘀伤的检测系统,准确度可达到98%,并且每个苹果的检测时间低于200 ms^[49]。WU等利用HSI技术获取枣的反射图像来识别枣的常见缺陷(昆虫传播和裂缝),通过筛选合适的分析波长进行模型建立,准确度达到96%^[50]。MOLLAZADE利用300~1 000 nm的高光谱成像系统检测纽扣蘑菇4个水平的表皮褐变,证明利用高光谱成像和化学计量学技术对蘑菇帽上不同程度的褐变进行分类是可行的^[51]。XIE等通过获取不同成熟度香蕉在380~1 023 nm波段的高光谱图像,建立偏最小二乘(partial least squares, PLS)模型来预测香蕉的颜色和硬度,实现对香蕉成熟度的判别^[52]。综合以往的研究可以看出,高光谱成像技术能够实现果蔬内外部品质的有效检测和判断。国内外已有许多公司开发出适用于果蔬行业的高光谱成像的检测设备,例如,芬兰SPECIM公司的工业高光谱相机FX系列、北京卓立汉光仪器有限公司

的高光谱成像仪,前者可搭载于果蔬分选生产线上,后者主要用于实验室研究。

高光谱成像技术在采集和处理图像数据的过程中,受限于仪器性能和处理速度的影响,该技术目前主要应用于基础性研究,并未广泛应用于工业的在线实时检测中。针对这一问题,需要从如下2方面进行改进:一是改进并升级高光谱成像技术的相关设备,提升其性能并降低其生产成本;二是针对全波段高光谱图像进行特征波长选取,以降低数据冗余量,减少高光谱图像的获取以及处理时间。未来,将高光谱技术与荧光技术、投射技术进行结合,进而对农产品内外品质进行综合评价也会成为HSI技术的一个主要研究方向。

4 声学分析检测技术

声学分析检测技术是利用检测对象的声学特性与其品质参数间的相应联系,从而根据声学特性对检测对象进行品质判断的一种技术。果蔬的声学特性是指果蔬产品在声波作用下的透射特性、散射特性、吸收特性、反射特性、衰减系数和传播速度及其本身的声阻抗与固有频率等^[53]。由于声学特性的不同,不同样品对声波吸收和散射会不同,导致声音的衰减程度不同,利用该规律可以实现果蔬内部品质的无损检测^[54]。

4.1 超声波检测技术

超声波是指频率大于20 kHz的声波,因其频率下限大于人的听觉上限而得名。超声波检测技术将已知的超声波能量传输到被测物料中,由于物料的组织结构特性、物理化学质量指标和质量属性会对超声波的传播产生影响,通过测量反射或透射的超声波信号可以检测物料的品质^[55]。通常,果蔬品质检测均利用小于500 kHz的低频超声波进行,其特点是频率高、能量低,可实现无损检测。

MIZRACH^[56]开发了一种无损超声检测系统,该系统利用一组低频探头来测量通过果皮短距离发送和接收的超声波信号,用于评价鳄梨、杧果成熟度和硬度等品质性状。其研究发现,超声波的衰减通过果皮和附着的果实组织传播,在果实成熟期和贮藏过程中随着果实的逐渐成熟和软化而发生变化;此外,通过定量地将超声波衰减测量值与果肉的生理参数联系起来,建立了超声波测量值与杧

果、鳄梨的果实硬度和成熟度等品质相关性状的关系。HAYDAR等^[57]应用超声波技术,以苹果的力学特性为品质因子,开发了一套便携式检测系统,主要由1对中心频率为40 kHz的收发换能器、1个信号产生单元、2个信号(输入和发送)的增益比和相位差测量单元、1个微控制器和1个液晶显示器组成;通过采用多元线性回归方法,建立了苹果的硬度、弹性模量、断裂能3个力学属性随超声波速度的变化以及超声波信号在整个果实中的衰减情况模型,相关系数分别为0.73、0.64、0.73,预测均方根误差分别为2.35 N、0.18 MPa、5.18 mJ,表明利用超声无损检测系统测量苹果的超声速度和衰减,可以无损地对苹果的力学性能进行评价。王艳萍^[58]设计开发了一套适用于低频超声实验的检测平台,通过收集沙窝萝卜的超声波图形,选定频谱图中的最大幅度值来对沙窝萝卜内部是否存在糠心进行判别,结果对无糠心和有糠心判别的准确率分别达到81.25%和75%。

超声波对气泡非常敏感,果蔬产品中存在的空隙和毛孔会通过散射而减弱穿过植物组织的声波,使超声检查数据复杂化,影响检测结果。另外,由于空气和超声探头之间的声阻相差较大,需要探针和产品之间直接接触或在两者之间使用凝胶。基于以上2个原因,超声波在很大程度上仍然是一种研究工具,在果蔬品质检测中的商业应用暂未成熟。

4.2 振动声学检测技术

振动声学检测技术是指通过收集物体撞击待测物质而产生的声音信号,提取有效的声音特征信息,将这些特征信息与待测物质自身的品质特性建立模型,从而实现利用声学信息对物质品质特性进行检测的技术。

在果蔬产品的品质检测中,振动声学检测技术多用于样品内部品质的检测。ABBASZADEH等通过敲击西瓜采集振动声学信号,采用频率响应函数方法,确定了深红色甜西瓜的硬度^[59]。IKEDA等通过测定西瓜表面的弹性波速度,对西瓜的硬度进行预测,发现西瓜表面弹性波速度与其感官硬度有较好的相关性:当西瓜的贮藏时间延长10 d后,弹性波的速度下降10%^[60]。FOERSTER等设计开发了一套带有集成传感器(压电薄膜或电容话筒)的样品架和机械激励装置(压电驱动器、微型电磁阀、微型锤)的声学检测装置,通过分析电容话筒收集的敲

击白芦笋的声信号,实现了对空心白芦笋的判别^[61]。王志鹏研究搭建了由压电梁式传感器进行信号激励和感测的无损检测装置,用于提取新疆库尔勒香梨的声振多响应参数,在稳定检测的条件下,检测模型对不同硬度香梨的判别正确率能够达到86.7%^[62]。

振动声学技术只适用于具有一定硬度或脆度的果蔬产品检测,对于较为柔软、敲击或碰撞不易产生声音且易受损伤的果蔬产品和硬度差异较大的果蔬产品则不适用。同时,在使用该技术进行检测的过程中,并不能完全保证敲击或碰撞产生声音信号的过程不会对产品造成损伤。因此,振动声学技术在果蔬品质检测的应用中存在一定的局限性,暂未实现商业化生产和推广。

5 电子鼻检测技术

电子鼻检测技术又称智能仿生嗅觉检测技术,是通过模拟生物嗅觉功能来实现对检测对象进行分析评价的一种技术。电子鼻系统主要由气体采样系统、传感器阵列、信号预处理、模式识别和气味表达5部分组成。其中,传感器阵列中的每个传感器对被测气体均有不同的灵敏度,当被测气体与传感器阵列发生作用时,便形成该气体的特征响应谱^[63]。通过分析所获取的特征响应谱,电子鼻能够实现气体或挥发性成分的定性或定量检测,为果蔬品种的判别及品质检测提供一种检测手段。

电子鼻在果蔬品质检测中的应用主要集中在果蔬新鲜度、成熟度和腐烂程度的检测,以及果蔬的品种、产地、损伤和病害判别。例如,REN等使用配有顶空采样系统的电子鼻检测富士苹果从不同高度掉落受到的损害的严重程度,证明电子鼻技术结合人工神经网络和多元分析算法能够实现对苹果损伤程度的有效判别^[64]。为提高判别成功率,LI等研究使用2台不同型号的电子鼻设备共同对苹果损伤程度进行预测,结果发现,使用协方差矩阵自适应进化策略进行特征层数据融合和使用贝叶斯网络作为分类器均能更好地实现对苹果的损伤识别和分类^[65]。JIA等使用德国AIRSENSE公司的PEN3电子鼻对新鲜苹果和接种了扩展青霉、黑曲霉的金冠苹果进行判别,筛选出了电子鼻中对腐败苹果的气味敏感的气体传感器W1S、W2S、W5S、W1W和W2W,同时,通过对比不同模式识别方法的建模效果,优选预

测效果最好的方法,对腐败苹果的判别率达到96.3%^[66]。随着生物技术、传感技术和电子技术的发展以及新型纳米材料的研发和应用,电子鼻的功能日益增强,体积越做越小,成本逐渐降低。目前,在果蔬品质检测中应用较多的商业化产品主要为德国AIRSENSE公司的PEN3、美国ISENSO公司的SuperNose、上海保圣电子鼻(Bosin CNose)等。应市场需要,优化传感器和电子鼻硬件设计、开发手持式产品是电子鼻研究中的热点。

6 介电性质分析检测技术

一般的果蔬产品都是介于导体和绝缘体之间的电介质,其内部存在大量的带电粒子从而形成生物电场。在外加电场作用下,果蔬内部各类化学物质所携带电荷的空间分布情况及数量均会发生变化,从而导致果蔬产品生物电场的分布及强度发生变化。因此,果蔬含水率、糖度、酸度、成熟度、新鲜度、损伤度等品质因素均会对其介电特性产生影响^[67-68]。介电性质分析检测技术就是通过筛选对果蔬品质指标变化敏感的介电性质参数,建立品质指标参数与介电性质参数间的相关关系模型,从而实现果蔬品质的检测。

目前,介电性质分析检测技术的应用研究主要集中在对果蔬产品的水分含量、硬度、成熟度、糖度、病虫害等内部品质情况的检测判别^[69]。例如,MCKEOWN等^[70]用开放式同轴探针和网络分析仪测量了洋葱在200 MHz至20 GHz范围内的介电性质,发现水分含量与较高频率下的介电常数呈线性相关;通过建立介电常数和损耗因子、水分含量的函数关系,实现了高精度($R^2=0.99$)预测洋葱的含水量。王若琳等^[71]通过分析‘秦冠’苹果的11个电学指标在100~3.98 MHz间13个频率点的特征值与水心病发病情况的关系,发现水心病引起果品的介电损耗系数、复阻抗相位角、串联等效电容、并联等效电容、相对介电常数及损耗因子共6个电学参数在100~ 1.0×10^4 Hz低频区的观测值高于健康苹果,为用电学方法检测水心病果品提供了理论依据。SOLTANI FIROUZ等^[72]采用带平行板电容采样的正弦波频率发生器,研究了不同成熟度的香蕉果实引起的电容差异,发现香蕉果实的相对介电常数与品质参数有关:青熟香蕉果实比全熟香蕉果实具有更

大的介电常数,其介电常数随成熟期的延长而降低。此外,通过二次回归建立介电常数与成熟度参数的定量模型,建立了一种快速、无损的香蕉果实成熟评价方法。

基于介电特性方法评价果蔬品质在原理上和技术上都具有可行性,但相关应用研究还未达到实用阶段。

7 核磁共振检测技术

核磁共振检测技术是利用原子核在特定磁场中能够从低能级跃迁到高能级时产生共振吸收现象,而对原子核进行探测的一种技术。目前,可用于核磁共振检测的原子核主要有 ^1H 、 ^{11}B 、 ^{13}C 、 ^{17}O 、 ^{19}F 、 ^{31}P ,最常用的为氢核^[73]。果蔬产品中的水、糖、油、淀粉等物质中都具有氢核,因此,核磁共振图像可以提供水分子、糖、类脂、脂肪的自旋密度分布信息以及自旋和细胞组织间的关系信息,利用核磁共振技术可以实现对果蔬成分的检测。

目前,多数的果蔬品质检测都是将样品置于恒定磁场强度低于0.5 T的磁场中进行低场核磁共振检测。例如:周水琴等^[74]采用核磁共振成像设备扫描得到新疆库尔勒香梨中部冠状面图像,使用MATLAB软件完成图像分割和中值滤波,然后采用自动阈值分割目标区域,并利用图像面积区域属性函数分离果核与褐变部分,以提取香梨褐变特征,并对误判褐变切片图像作了进一步分析与处理,实验结果表明,核磁共振成像技术对不同贮藏周期的正常与褐变香梨切片图像的识别准确率分别为84%和100%,且该方法对贮藏后期(6个月)香梨的褐变识别更有效。陈森等^[75]利用低场核磁共振技术对樱桃在常温储藏条件下的水分变化和迁移规律进行研究,结果表明,随着储存时间的延长,果皮与果肉分层,果肉水分逐渐向内迁移。FOUCAT等^[76]在-20℃低温状态下,测定了3种不同基因型番茄分别在处于绿色成熟期和红色成熟期时的低场核磁共振弛豫时间,通过分析不冻水的状态,可以在红色成熟阶段将3种不同基因型的番茄明显区分。TAGLIENTI等^[77]研究了猕猴桃采后贮藏过程中核磁共振成像参数、生理因素(呼吸和乙烯含量)和软化之间的关系,结果表明,核磁共振可以识别与水流动相关的微小质地变化,这些质地变化是由猕猴

桃软化引起的,通过识别该变化可以实现对猕猴桃成熟度的判别。

从目前的研究现状来看,核磁共振成像技术对果蔬品质的检测主要集中在水分的分布及流动性研究方面,具有穿透力强、分辨率高,不受样品状态、形状、大小的限制,检测结果准确度高、重复性好等优点,但也存在设备成本高、信号分析具有专门性和复杂性等缺点,不利于其在果蔬领域中的应用推广。

8 小结与展望

本文对几种常见的果蔬品质无损检测技术的基本原理、特点和应用研究现状进行了综述。可以看出,以上无损检测技术各具优势,克服了传统检测方法费时费力、操作烦琐、破坏样品的缺点,可作为快速有效的检测技术,应用于果蔬采后的在线检测、品质判断、过程控制和分级定价系统中。然而,除了近红外光谱检测技术目前的商品化程度和应用推广度较高外,其他无损检测技术对果蔬品质的检测还主要集中在实验室阶段,仍需要大量的理论研究和应用研究支撑和推动其应用化和产业化发展。

针对无损检测技术在果蔬品质检测中的应用推广问题,今后的研究可以从以下3个方面展开:1)在进行多技术融合应用研究的同时,要注重各个技术在应用中的机制解析和多技术数据融合、处理的算法研究,确保检测的准确度。例如:分析光、声、电、磁在不同果蔬组织中的吸收特性和传播途径;研究与检测项目相关的分子与光、声、电、磁的详细作用机制;分析影响检测结果的主要成分和结构参数;寻找最优的建模参数;优化现有的特征提取算法和建模算法,尝试新算法应用,建立稳定、可靠的校正模型等。2)在无损检测装备开发研究方面,要以实现自动化、系统化、网络化和关键器件国产化为目标,研发模块化、智能化、集中化的检测设备并将其物联网化。3)在果蔬检测应用示范推广方面,要平衡好检测方法的针对性和普适性要求。果蔬产品作为一种复杂的检测对象,不同的产地、生长环境、农艺条件、品种的个体间差异很大。因此,要针对不同的应用场景,收集代表性样品进行校正模型的建立,同时,要注重检测方法的标准化,以避免不同操作人员带来的误差。另外,要注重不同设备间模型转移方法的研究和优化,以满足实际推广要求。

未来,随着计算机技术、自动化控制技术、无损检测技术的不断发展,果蔬品质检测将实现全方位多项目检测同步化、检测方法及标准数字化、检测分级自动化和系统化,技术和设备从实验室研究向实际生产应用的转化也将越来越快。

参考文献(References):

- [1] 褚小立,刘慧颖,燕泽程,等.近红外光谱分析技术实用手册.北京:机械工业出版社,2016:6-7.
CHU X L, LIU H Y, YAN Z C, et al. *Practical Handbook of Near Infrared Spectroscopy*. Beijing: China Machine Press, 2016:6-7. (in Chinese)
- [2] 刘聪.基于近红外光谱的鲜枣品质检测及其安全判别研究.陕西,杨凌:西北农林科技大学,2013.
LIU C. Quality detection and safety discrimination of fresh jujube based on near infrared spectroscopy. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [3] 薛建新.基于光谱及成像技术的鲜枣品质检测研究.山西,太谷:山西农业大学,2016.
XUE J X. Study on quality detection of fresh jujube based on spectrum and imaging technology. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [4] NISHIYAMA I, YAMASHITA Y, YAMANAKA M, et al. Varietal difference in vitamin C content in the fruit of kiwifruit and other *Actinidia* species. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2004,52(17):5472-5475. DOI: 10.1021/jf049398z
- [5] SUN X D, DONG X L, CAI L J, et al. Visible-NIR spectroscopy and least square support vector machines regression for determination of vitamin C of mandarin fruit. *Sensor Letters*, 2012,10(1):506-510. DOI:10.1166/sl.2012.1891
- [6] OLIVEIRA-FOLADOR G, BICUDO M, ANDRADE E F, et al. Quality traits prediction of the passion fruit pulp using NIR and MIR spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 2018,95:172-178. DOI:10.1016/j.lwt.2018.04.078
- [7] 张帆,王倩,马智宏,等.西瓜可溶性糖和纤维素含量的近红外光谱测定.食品科学,2007,28(1):258-261. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.01.065
ZHANG F, WANG Q, MA Z H, et al. Content determination of sugar and fiber in watermelon by near-infrared spectroscopy. *Food Science*, 2007,28(1):258-261. (in Chinese with English abstract)
- [8] PÉREZ-MARÍN D, TORRES I, ENTRENAS J A, et al. Pre-harvest screening on-vine of spinach quality and safety using NIRS technology. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019,207:242-250. DOI: 10.1016/j.saa.2018.09.035
- [9] CHOI J H, CHEN P A, LEE B, et al. Portable, non-destructive tester integrating VIS/NIR reflectance spectroscopy for the detection of sugar content in Asian pears. *Scientia Horticulturae*, 2017,220:147-153. DOI:10.1016/j.scienta.2017.03.050
- [10] MANIWARA P, NAKANO K, OHASHI S, et al. Evaluation of NIRS as non-destructive test to evaluate quality traits of purple passion fruit. *Scientia Horticulturae*, 2019,257:108712. DOI:10.1016/j.scienta.2019.108712
- [11] 周丽萍.基于可见-近红外光谱技术的圣女果和苹果品质检测技术研究.陕西,杨凌:西北农林科技大学,2009.
ZHOU L P. Study on quality detection technology of cherry tomato and apple based on visible-near infrared spectroscopy. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] ZHANG S J, ZHANG H H, ZHAO Y R, et al. A simple identification model for subtle bruises on the fresh jujube based on NIR spectroscopy. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013,58(3/4):545-550. DOI:10.1016/j.mcm.2011.10.067
- [13] 刘新鑫.苹果水心病及褐变光学无损检测研究.北京:中国农业大学,2004.
LIU X X. Optical nondestructive detection of apple watercore disease and browning. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [14] 涂润林.基于光物性的鸭梨黑心病无损检测方法的研究.北京:中国农业大学,2004.
TU R L. Study on nondestructive detection of Yali black heart disease based on photophysical properties. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [15] LI G F. Nondestructive measurement model of apple internal browning based on FT-NIR spectroscopy. *Advanced Materials Research*, 2011,304:316-321. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.304.316
- [16] 赵志磊,王艳伟,贡东军,等.近红外光谱的李果实褐变鉴别方法研究.光谱学与光谱分析,2016,36(7):2089-2093. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2089-05
ZHAO Z L, WANG Y W, GONG D J, et al. Discrimination of plum browning with near infrared spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016,36(7):2089-2093. (in Chinese with English abstract)
- [17] 武小红,潘明辉,武斌,等.广义模糊K调和均值聚类的近红外光谱生菜储藏时间鉴别.光谱学与光谱分析,2016,36(6):1721-1725. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2016)06-1721-05
WU X H, PAN M H, WU B, et al. Discrimination of lettuce storage time using near infrared spectroscopy based on generalized fuzzy K-harmonic mean clustering. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016,36(6):1721-1725. (in Chinese with English abstract)
- [18] LI X L, WEI Y Z, XU J, et al. SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology. *Postharvest Biology and Technology*, 2018,143:112-118. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.05.003
- [19] 王转卫,迟茜,郭文川,等.基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测.农业机械学报,2018,49(5):348-354.

- DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.041
WANG Z W, CHI Q, GUO W C, et al. Internal quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018,49(5):348-354. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周玮婧. 近红外光谱在果蔬检测中的应用及研究进展. *安徽农业科学*, 2011,39(16):9842-9844,9847. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2011.16.056
ZHOU W J. Application and research development of near infrared spectroscopy in detecting fruit and vegetable. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011,39(16):9842-9844,9847. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王敏,付蓉,赵秋菊,等. 近红外光谱技术在果蔬品质无损检测中的应用. *中国农学通报*, 2010,26(5):174-178.
WANG M, FU R, ZHAO Q J, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy in nondestructive detection of fruits and vegetables quality. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010,26(5):174-178. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈建新. 基于近红外光谱的苹果硬度便携式检测设备研究. 陕西,杨凌:西北农林科技大学,2018.
CHEN J X. Research on portable apple hardness testing equipment based on near infrared spectroscopy. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [23] 裴军强. 便携式寒富苹果品质快速无损检测系统设计. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
PEI J Q. Design of portable Hanfu apple quality rapid nondestructive testing system. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [24] 朱丹宁. 薄皮水果糖度和货架期便携式检测方法研究. 南昌:华东交通大学,2018.
ZHU D N. Study on portable testing method for sugar content and shelf life of thin-skinned fruits. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郭志明,陈全胜,张彬,等. 果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计与试验. *农业工程学报*, 2017,33(8):245-250. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.033
GUO Z M, CHEN Q S, ZHANG B, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectrometer for determination of fruit and vegetable quality. *Transactions of the CSAE*, 2017,33(8):245-250. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴海卿,章关明,吴维华. 基于云平台的近红外食品质量监测技术. *仪表技术*, 2017(8):34-36,39. DOI:10.19432/j.cnki.issn1006-2394.2017.08.011
WU H Q, ZHANG G M, WU W H. Near infrared food quality monitoring technology based on cloud platform. *Instrument Technology*, 2017(8):34-36,39. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨帆,李雅婷,顾轩,等. 便携式近红外光谱仪测定苹果酸度和抗坏血酸的研究. *光谱学与光谱分析*, 2011,31(9):2386-2389. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593.2011.09.017
YANG F, LI Y T, GU X, et al. Determination of acidity and vitamin C in apples using portable NIR analyzer. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011,31(9):2386-2389. (in Chinese with English abstract)
- [28] 彭云发,彭海根,詹映,等. 近红外光谱对南疆红枣水分无损检测的研究. *食品科技*, 2013,38(11):260-263. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2013.11.059
PENG Y F, PENG H G, ZHAN Y, et al. Nondestructive testing of jujube water in south Xinjiang by NIRS. *Food Science and Technology*, 2013,38(11):260-263. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王允虎,孙蕾,王成忠,等. 便携式近红外光谱仪在鉴定无花果品质中建模效果研究. *齐鲁工业大学学报*, 2019(4):20-25. DOI:10.16442/j.cnki.qlgydxxb.2019.04.005
WANG Y H, SUN L, WANG C Z, et al. Modeling effect of portable near-infrared spectrometer in identification of fig quality. *Journal of Qilu University of Technology*, 2019(4):20-25. (in Chinese with English abstract)
- [30] BLAKEY R J. Evaluation of avocado fruit maturity with a portable near-infrared spectrometer. *Postharvest Biology and Technology*, 2016,121:101-105. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.06.016
- [31] CAYUELA J A, CARLOS W. Intact orange quality prediction with two portable NIR spectrometers. *Postharvest Biology and Technology*, 2010,58(2):113-120.
- [32] 全朋坤. 基于可见/近红外光谱的苹果内部多品质参数一体化便携式检测设备研发. 陕西,杨凌:西北农林科技大学,2019.
QUAN P K. Research and development of portable multi-quality parameter integrated detection equipment for apple based on visible/near infrared spectroscopy. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [33] 应义斌,饶秀勤,赵匀,等. 机器视觉技术在农产品品质自动识别中的应用研究进展. *农业工程学报*, 2000,16(3):4-8.
YING Y B, RAO X Q, ZHAO Y, et al. Advance on application of machine vision technique to automatic quality identification of agricultural products. *Transactions of the CSAE*, 2000,16(3):4-8. (in Chinese with English abstract)
- [34] IQBAL S M, GOPAL A, SANKARANARAYANAN P E, et al. Classification of selected citrus fruits based on color using machine vision system. *International Journal of Food Properties*, 2016,19(2):272-288. DOI:10.1080/10942912.2015.1020439
- [35] WEI Y R, CHANG L Y, LI L, et al. Prediction of sugar content in greenhouse muskmelon based on machine vision. *Acta Horticulturae*, 2012,957(957):173. DOI:10.17660/actahortic.2012.957.19
- [36] GUZMÁN E, BAETEN V, PIERNA J A, et al. Determination of the olive maturity index of intact fruits using image analysis. *Journal of Food Science & Technology*, 2015,52(3):1462. DOI:10.1007/s13197-013-1123-7

- [37] POURDARBANI R, GHASSEMZADEH H R, SEYEDARABI H, et al. Study on an automatic sorting system for Date fruits. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2015,14(1):83-90. DOI:10.1016/j.jssas.2013.08.006
- [38] KONDO N, AHMAD U, MONTA M, et al. Machine vision based quality evaluation of Iyokan orange fruit using neural networks. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2000,29(1/2):135-147. DOI:10.1016/s0168-1699(00)00141-1
- [39] 唐义华.红提品质无损检测技术研究.武汉:华中农业大学, 2016.
TANG Y H. Research on the non-destructive detection technology of red grape quality. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [40] SOFU M M, ER O, KAYACAN M C, et al. Design of an automatic apple sorting system using machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016,127:395-405. DOI:10.1016/j.compag.2016.06.030
- [41] 王风云,封文杰,郑纪业,等.基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验.农业工程学报,2018,34(7):256-263. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.033
WANG F Y, FENG W J, ZHENG J Y, et al. Design and experiment of automatic sorting and grading system based on machine vision for white *Agaricus bisporus*. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(7):256-263. (in Chinese with English abstract)
- [42] AGUILERA PUERTO D, MARTÍNEZ GILA D M, GÁMEZ GARCÍA J, et al. Sorting olive batches for the milling process using image processing. *Sensors*, 2015,15(7):15738-15754. DOI:10.3390/s150715738
- [43] 李江波,饶秀勤,应义斌.农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展.光谱学与光谱分析,2011,31(8):2021-2026. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2011)08-2021-06
LI J B, RAO X Q, YING Y B. Advance on application of hyperspectral imaging to nondestructive detection of agricultural products external quality. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011,31(8):2021-2026. (in Chinese with English abstract)
- [44] NICOLAÏ B M, DEFRAEYE T, DE KETELAERE B, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality. *Review of Food Science & Technology*, 2014,5(1):285-312. DOI:10.1146/annurev-food-030713-092410
- [45] WU D, SUN D W. Colour measurements by computer vision for food quality control: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 2013,29(1):5-20. DOI:10.1016/j.tifs.2012.08.004
- [46] 张然.基于高光谱成像技术的马铃薯外部损伤识别研究.银川:宁夏大学,2013.
ZHANG R. Identification of potato external damage based on hyperspectral imaging technology. Yinchuan: Ningxia University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [47] 张梦芸.基于光谱图像技术的蓝莓瘀伤检测研究.陕西,杨凌:西北农林科技大学,2019.
ZHANG M Y. Blueberry bruise detection based on spectral image technology. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [48] RADY A, EKRAMIRAD N, ADEDEJI A A, et al. Hyperspectral imaging for detection of codling moth infestation in GoldRush apples. *Postharvest Biology & Technology*, 2017,129:37-44. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.03.007
- [49] 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. *Food Control*, 2016,66:215-226. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.02.007
- [50] WU L G, HE J G, LIU G S, et al. Detection of common defects on jujube using Vis-NIR and NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 2016,112:134-142. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.09.003
- [51] MOLLAZADE K. Non-destructive identifying level of browning development in button mushroom (*Agaricus bisporus*) using hyperspectral imaging associated with chemometrics. *Food Analytical Methods*, 2017,10(8):1-12. DOI:10.1007/s12161-017-0845-y
- [52] XIE C Q, CHU B Q, HE Y. Prediction of banana color and firmness using a novel wavelengths selection method of hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 2018,45:132-140. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.10.079
- [53] 吕飞玲,应义斌.声学检测技术在农产品品质无损检测中的应用.农机化研究,2003(1):145-146. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2003.01.060
LÜ F L, YING Y B. Application of acoustic testing technology in nondestructive testing of agricultural product quality. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2003(1):145-146. (in Chinese)
- [54] 刘洋,罗印斌,马先红,等.基于声学技术在农产品品质评价中的应用研究现状.食品工业,2018,39(10):255-259.
LIU Y, LUO Y B, MA X H, et al. Application of acoustic technology in the quality evaluation of agricultural products. *The Food Industry*, 2018,39(10):255-259. (in Chinese with English abstract)
- [55] 罗贤清,陈建军,胡斌,等.超声波技术在食品安全检测中的新进展.农机化研究,2007(9):195-196,205. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2007.09.011
LUO X Q, CHEN J J, HU B, et al. The hitherto application of supersonic wave in food safety inspection. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(9):195-196,205. (in Chinese with English abstract)
- [56] MIZRACH A. Determination of avocado and mango fruit properties by ultrasonic technique. *Ultrasonics*, 2000,38:717-722. DOI:10.1016/s0041-624x(99)00154-7
- [57] HAYDAR V S, MOHAMMAD G P, DAVOOD M, et al. Ultrasonic based determination of apple quality as a nondestructive technology. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2018,21:22-26. DOI:10.1016/j.sbsr.2018.09.002
- [58] 王艳萍.基于超声检测的沙窝萝卜品质评价方法研究.天

- 津:天津科技大学,2017.
- WANG Y P. Study on quality evaluation method of Shawo radish based on ultrasonic detection. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [59] ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, YING Y B, et al. Nondestructive determination of watermelon flesh firmness by frequency response. *LWT-Food Science and Technology*, 2015,60(1):637-640. DOI:10.1016/j.lwt.2014.08.029
- [60] IKEDA T, CHOI P K, ISHII T, et al. Firmness evaluation of watermelon flesh by using surface elastic waves. *Journal of Food Engineering*, 2015,160:28-33. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.03.020
- [61] FOERSTER J, TRUPPEL I, BOCHOW-NEß O, et al. Comparison of acoustic sensor systems for quality analysis of asparagus using scanning laser vibrometry for visualization. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013,91:10-18. DOI:10.1016/j.compag.2012.11.007
- [62] 王志鹏. 香梨声振特性分析及内部品质的无损检测研究. 新疆,石河子:石河子大学,2016.
- WANG Z P. Analysis of sound and vibration characteristics and nondestructive detection of internal quality of fragrant pear. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [63] 于勇,王俊,周鸣. 电子鼻技术的研究进展及其在农产品加工中的应用. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(5):579-584.
- YU Y, WANG J, ZHOU M. Research developments of electronic nose and its application in processing of agriculture products. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2003,29(5):579-584. (in Chinese with English abstract)
- [64] REN Y M, RAMASWAMY H S, LI Y, et al. Classification of impact injury of apples using electronic nose coupled with multivariate statistical analyses. *Journal of Food Process Engineering*, 2018,41:e.12698. DOI:10.1111/jfpe.12698
- [65] LI C Y, HEINEMANN P, SHERRY R. Neural network and Bayesian network fusion models to fuse electronic nose and surface acoustic wave sensor data for apple defect detection. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2007,125(1):301-310. DOI:10.1016/j.snb.2007.02.027
- [66] JIA W S, LIANG G, TIAN H, et al. Electronic nose-based technique for rapid detection and recognition of moldy apples. *Sensors*, 2019,19(7):1526. DOI:10.20944/preprints201903.0008.v1
- [67] 郭文川. 果蔬介电特性研究综述. 农业工程学报,2007,23(5):284-289.
- GUO W C. Review of dielectric properties of fruits and vegetables. *Transactions of the CSAE*, 2007,23(5):284-289. (in Chinese with English abstract)
- [68] SOLTANI M, ALIMARDANI R, OMID M. Use of dielectric properties in quality measurement of agricultural products. *Nature and Science*, 2011,9(4):57-61.
- [69] 沈江洁,黄森,张院民. 基于果品介电特性的无损检测技术研究进展. 农机化研究,2011,33(5):16-19. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2011.05.046
- SHEN J J, HUANG S, ZHANG Y M. The research progress of non-destructive detection technology based on fruit dielectric properties. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011,33(5):16-19. (in Chinese with English abstract)
- [70] MCKEOWN M S, TRABELSI S, TOLLNER E W, et al. Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in *Vidalia* onions. *Journal of Food Engineering*, 2012,111(3):505-510. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2012.02.034
- [71] 王若琳,王栋,任小林,等. 基于电学特征的苹果水心病无损检测. 农业工程学报,2018,34(5):129-136. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.05.017
- WANG R L, WANG D, REN X L, et al. Nondestructive detection of apple watercore disease based on electric features. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(5):129-136. (in Chinese with English abstract)
- [72] SOLTANI FIROUZ M, ALIMARDANI R, OMID M. Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system. *Australian Journal of Crop Science*, 2010,4(6):443-447. DOI:10.1007/s12230-010-9138-3
- [73] 田靖,王玲. 核磁共振技术在农业中的应用研究进展. 江苏农业科学,2015,43(1):12-16. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.004
- TIAN J, WANG L. Application progress of nuclear magnetic resonance technology in agriculture. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015,43(1):12-16. (in Chinese)
- [74] 周水琴,应义斌,商德胜. 基于形态学的香梨褐变核磁共振成像无损检测. 浙江大学学报(工学版),2012,46(12):15-19. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2012.12.002
- ZHOU S Q, YING Y B, SHANG D S. Morphology based noninvasive detection for fragrant pears browning with magnetic resonance imaging. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012,46(12):15-19. (in Chinese with English abstract)
- [75] 陈森,孟兆磊,陈闰堃,等. 樱桃水分变化的低场核磁共振. 实验室研究与探索,2013,32(8):52-54. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2013.08.014
- CHEN S, MENG Z L, CHEN R K, et al. The change of moisture in cherry by low-field NMR. *Laboratory Research and Exploration*, 2013,32(8):52-54. (in Chinese with English abstract)
- [76] FOUCAT L, LAHAYE M. A subzero ¹H NMR relaxation investigation of water dynamics in tomato pericarp. *Food Chemistry*, 2014,158:278-282. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.02.100
- [77] TAGLIANTI A, MASSANTINI R, BOTONDI R, et al. Postharvest structural changes of Hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy. *Food Chemistry*, 2009,114(4):1583-1589. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.11.066