

文章编号: 1005-0523(2018)04-0001-07

# 光谱诊断技术及其在农产品质量检测中的应用

刘燕德, 程梦杰, 郝 勇

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**农产品品质及其安全与消费者健康息息相关。农产品品质及安全指标的传统分析方法操作流程复杂且分析成本高。随着光谱和成像技术的快速发展,近红外光谱、拉曼光谱以及高光谱成像技术已广泛应用于农产品品质与安全的快速无损检测中。本文综述了光谱和成像技术在农产品品质与安全快速分析的最新研究进展,重点从水果、鸡蛋和辣椒内外部品质安全的近红外光谱检测、农药残留的拉曼光谱分析以及果树营养成分的高光谱成像检测三方面进行了综述。

**关键词:**近红外光谱;拉曼光谱;高光谱成像;品质与安全

**中图分类号:**SS-1

**文献标志码:**A

农产品品质与安全一直是社会关注的焦点问题。农产品品质与安全主要通过各种病害,品质劣变,细菌感染和农药残留进行检测评估,它关系到消费者的饮食安全和健康,是农产品最为重要的品质特征。加入世贸组织以来,一些国家和地区以品质问题和质量安全为由频频封杀我国出口农产品,导致我国出口农产品退货数量激增,损失惨重。当务之急通过提高农产品品质和安全的检测水平,才能增强我国农产品的国际竞争力,促进优质农产品出口。

传统的农产品品质和安全的检测方法存在劳动强度大、分析时间长、操作技术要求高以及受人为主观因素影响大等缺点。近年来,光谱分析技术发展迅速并在很多领域得到广泛应用,一方面得益于计算机技术和化学计量学的快速发展;另一方面是因为光谱在分析测定中的独具优势,如仪器操作较简单、分析速度快、非破坏性、样品制备量小、适应范围广等。随着光谱分析技术在农产品领域应用的普及以及分析模型精度的日益提高,光谱检测技术在农产品品质检测领域发挥了较大的作用,已得到世界范围内的广泛重视和研究,应用特点逐步向快速、准确、高通量以及仪器的便携化方向发展。

## 1 几种典型光谱诊断技术的基础理论

### 1.1 近红外光谱分析技术

近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)的波长范围为 780~2 500 nm,其基本原理主要是样品在近红外谱区对光的吸收强度与吸收光子数之间存在对应关系。可应用于检测样品中有机分子含氢基团的特征信息。农产品内部组分在近红外光谱区域具有较丰富的吸收频谱,因此可以通过近红外光谱分析技术对其品质进行检测。NIRS 分析技术具有分析速度快、无损、成本低且易于实现在线分析的特点,在农作物品种鉴别和农产品内部品质检测中的应用研究非常广泛。

收稿日期: 2018-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(31760344);江西省科技支撑计划资助项目(20121BBF60054);南方山地果园智能化管理技术与装备协同创新中心项目(赣教高字[2014]60号);江西省优势科技创新团队(20153BCB24002);江西省自然科学基金项目(2015ZBAB201003)

作者简介: 刘燕德(1967—),女,教授,博士生导师,研究方向为光电检测技术及智能化装置,机械电子工程和信息化技术。

目前,国内对农产品的分级主要采用基于近红外光谱的动态在线检测装置,该装置具有分析精度高和检测速度快的优点。然而由于体积庞大、操作复杂、对外部环境要求较高等原因,无法实现果品采收前预测和现场抽检,且价格普遍较贵。傅里叶变换近红外光谱仪是基于对干涉后的近红外光进行傅里叶变换的原理而开发的光谱仪器,与动态在线近红外分选装置相比,傅立叶变换近红外光谱仪具有快速、稳定、精确和环境适应性好等特点,更适用于实验室分析或样品的抽检。便携式水果品质无损检测装置具有体积小、携带方便且操作简单等特点,可实现果品采收前的预测,保证水果的采摘品质。

## 1.2 拉曼光谱分析技术

拉曼光谱的产生是由于化合物受光的照射后发生散射,反映物质的内部特征,每一种物质都有独特的特征拉曼光谱。当外部环境(温度、压力)发生变化时,通过拉曼光谱可以研究物质内部状态的变化,使得在可见光的范围内可以研究分子的振动和转动状态。拉曼光谱诊断技术是在拉曼效应基础上建立起来的表征分子结构的一门技术。拉曼光谱依据不同的检测原理可分为傅里叶变换拉曼光谱、表面增强拉曼光谱、共焦显微拉曼光谱以及激光共振拉曼光谱等,随着多方法联用拉曼技术的层出不穷,进一步拓展了拉曼光谱的应用领域。

## 1.3 高光谱成像技术

高光谱成像技术是基于非常多窄波段的影像数据技术,是一种传统的二维成像和光谱学有机融合的新兴学科。高光谱图像通常是一个三维的数据块,如图1所示, $x$ 和 $y$ 代表二维平面像素信息坐标轴,第三维( $\lambda$ 轴)是波段信息坐标轴,集样本的光谱信息和图像信息于一体。图像信息含有样本的形状、尺寸、缺陷等外部品质特征,光谱信息能充分反映样本内部的化学组成、物理结构的差异。

在地质、植被覆盖探测、大气遥感等很多领域,高光谱技术已有大量研究和应用,并取得了明显成效。在农业方面,高光谱也具有广阔的应用前景,作物的生理特性产生的光吸收形成的反射和透射可分析作物的生理信息,通过分析农产品的光谱信息,最后得出农产品的品质特性、病理特征和生长状况等有效信息。

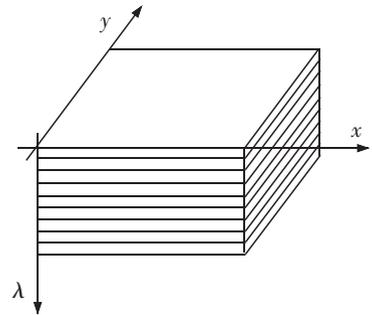


图1 高光谱图像三维数据块示意图

Fig.1 Schematic diagram of hyperspectral image 3D data block

## 2 近红外光谱分析技术在农产品品质无损检测中的应用

### 2.1 近红外光谱在水果品质检测中的应用

水果已成为继粮食、蔬菜之后的第三大种植业,在农村经济发展和农民增收中起到十分重要的作用。近年来,我国加大了果品的生产及产后处理技术的改进力度,使鲜果品质有了一定改善,但与发达国家对比,还存在较大差距,在鲜果上市前,绝大部分鲜果均未进行采后清理便以自然的形式、不封装、不分等次直接上市,严重影响果品销售价格,从而导致我国水果的国际市场竞争力较弱,出口量低。

#### 2.1.1 水果品质动态在线分选装置及应用

近红外在线分选装置示意图如图2所示,装置主要由三大部分组成:输送部件、光源系统和光谱采集部件。其中输送部件包括果盘、运输带、变频器和电动机等;光源系统主要包括稳压器、光源和光源固定架等;光谱采集部件主要包括光谱仪、光纤和探头等。水果品质近红外光谱动态在线分选装置的检测方式分为透射、漫反射和漫透射3种,透射检测方式中光源与检测器在样品的两侧,所采集的是完全穿透水果后的光谱信息,基本上反应水果内部品质信息;漫反射检测方式中光源和检测器在样品的同一侧,所采用光源的功率相对较小,光谱反应的是水果的局部信息,大多用来检测薄皮水果的品质;漫透射检测方式主要是由多个光源组合成光源系统对水果不同位置进行照射,检测器可以接受到水果大部分品质信息,可以有效地检测水

果内部品质。

目前,水果品质动态在线分选装置已应用于苹果、脐橙、柑橘、猕猴桃、西红柿、柚子、梨、草莓、哈密瓜等水果的在线检测。马广,等<sup>[1]</sup>利用近红外漫透射光谱对翠冠梨品质进行动态在线检测,采用 0.5 m/s 的传输速度获取翠冠梨的漫透射光谱,讨论了不同的数据处理方法对 PLS 模型性能的影响。Miller,等<sup>[2]</sup>利用近红外在线检测装置对柑橘糖度进行无损检测,检测速度为 5.5 个/s,利用神经网络算法建立颜色和糖度的混合模型得到较好的分析结果。孙通,等<sup>[3]</sup>采用漫透射式的动态在线分选装置对赣南脐橙的可溶性固形物(SSC)进行预测,检测速度为 0.3 m/s,结果表明采用 CARS-PLS 方法结合动态在线装置可得到较好的脐橙内部 SSC 预测结果。Clark,等<sup>[4]</sup>建立近红外透射在线分选装置,对 Braeburn 苹果的褐心病进行在线分选研究,结果表明该方法可以有效地去除患有褐心病的苹果。Kim,等<sup>[5]</sup>自行设计了一款针对柑橘成熟度和缺陷的近红外透射式在线检测装置,采用卤钨灯作为光源,成熟度的预测准确率为 91%,缺陷的预测准确率为 97%。刘燕德,等<sup>[6]</sup>为解决水果实时动态测量的需要,自主搭建了近红外动态测量装备对雪青梨糖度和酸度进行测量实验得到了较好的预测结果。

### 2.1.2 便携式水果品质无损检测装置及应用

基于近红外光谱分析技术的便携式水果品质无损检测装置分为三个模块:光路模块、数据处理模块和采集附件模块。便携式水果糖度无损检测装置可用于水果的糖度、酸度、硬度、病虫害和重量等指标的分析研究。杨帆,等<sup>[7]</sup>采用便携式近红外光谱检测仪对 112 个柑桔进行无损检测,采用加强正交信号校正(EOSC)结合广义回归神经网络的方法建立柑桔酸度的定量分析模型,结果表明使用 EOSC 法可以使模型有良好的预测能力,同时可以防止对数据造成过度的校正。Feng,等<sup>[8]</sup>使用 FANTECTMFQA-NIRGUN 便携式近红外光谱仪对猕猴桃的干物质(DM)、SSC 和果肉颜色(FH)进行了无损检测,其校正均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)分别为 0.60%, 0.90% 和 1.40%。Cayuela,等<sup>[9]</sup>采用一款商用便携式可见-近红外光谱仪结合 PLS 建模,对油桃的 SSC、硬度、水果重量和果皮颜色等相关指标进行了定量分析。油桃的 SSC、硬度、水果重量和果皮颜色的预测相关系数 R 分别为 0.95, 0.94, 0.91 和 0.81,分析精度较高。Guidetti,等<sup>[10]</sup>应用便携式可见-近红外光谱仪实验系统结合 PLS 建模,对葡萄样品鲜果和质地均匀的果浆成熟度指标(包括 SSC、可滴定酸度和 pH 值)和多酚成熟度指标(花青素和多酚含量)进行了检测,为葡萄相关品质的快速无损检测提供了一种有效的分析方法。

### 2.2 近红外光谱在鸡蛋品质无损检测中的应用

随着我国蛋鸡养殖的迅速发展,鸡蛋深加工技术的发展与产量严重失衡,蛋品的工业化水平低、分级精度不高,导致鸡蛋出口率低,在国际市场上缺乏竞争力。鸡蛋是一种富含大量蛋白质的食物,而蛋白质是由大量氨基酸通过氨基和羧基形成的肽键连接而成的肽链。这些成分主要是由 O-H、C-H、N-H 等含氢基团构成,而这些基团在近红外区域具有很强的吸收谱带。使用近红外光谱分析技术不仅可以检测出鸡蛋中与这些基团有关的各种成分如哈夫单位、蛋白高度、蛋黄指数、蛋黄高度等,而且可用于分析物质的密度、黏度、蛋壳厚度、硬度及有关样品的电学性质等,从而可对鸡蛋样品定量地描述或对新鲜度进行定性分析。刘燕德,等<sup>[11]</sup>利用 TENSOR 37 傅立叶变换近红外光谱仪采集不同储存时间下鸡蛋的漫透射光谱,对鸡蛋的哈夫单位、蛋白 pH 值、蛋白高度和蛋形指数等品质指标进行分析,结果表明随着储存时间的变化,各参数指标均与储存天数存在较高相关性,蛋白高度随着储存天数的增加逐渐变薄,蛋白 pH 值随着储存天数的增加上升

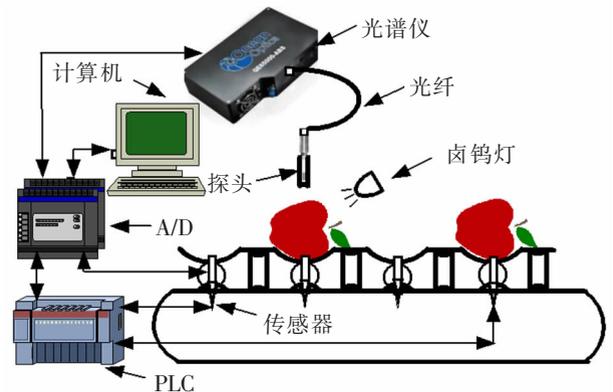


图2 近红外在线检测装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of near-infrared detection device

趋势逐渐趋于平衡。李海峰,等<sup>[12]</sup>利用可见/近红外漫反射光谱技术检测新鲜鸡蛋的 pH 值和蛋白质,结果表明 pH 值在 900~1 700 nm 波长范围内获得较好的分析模型,蛋白质在 400~1 000 nm 波长范围内得到较好的分析模型。孙艳文,等<sup>[13]</sup>研究了近红外光谱无损检测鸡蛋脂肪含量的方法,在近红外光谱全波段内采集鸡蛋样品的漫反射光谱图,可用于鸡蛋中脂肪含量的无损检测。段宇飞,等<sup>[14]</sup>采用微型光纤光谱仪对鸡蛋的哈夫单位(新鲜度)进行分析,分析结果表明,利用局部线性嵌入结合支持向量回归进行非线性建模,能够提高鸡蛋新鲜度的预测能力。

### 2.3 近红外光谱在辣椒品质分析中的应用

辣椒的营养成分丰富,含有大量的辣椒碱、胡萝卜素、辣椒红素、碳水化合物和矿物质等,尤其维生素 C 含量高居各类蔬菜榜首,既可鲜食、调味,也可入药,具有重要的经济价值和食疗保健作用。虽然我国辣椒产量最高,但在国际市场上竞争力却弱,频频遭遇西方国家的“绿色壁垒”而被拒之门外。商品化处理水平低、标准化低、安全性低以及耐贮藏性差是导致该结果的主要原因之一,也是长期以来制约我国辣椒产业化发展的瓶颈问题之一。传统的辣椒质量评定是基于颜色、形状、伤痕及大小等外部特征来判断的,或者是运用破坏性的方法抽样检测其成分,而近红外光谱无损检测是在不破坏样品的情况下对上述内部品质进行评价的方法。该技术不同于传统的化学分析方法,它利用分子选择性地吸收辐射光中某些频率波段的光,产生的吸收光谱,来判定其对应物质的含量,对样品不产生破坏。同时光谱采集所需时间很短,且无需样品预处理,对蔬菜生产过程及产后加工具有相当高的应用价值。

近年来大量的国内外学者利用近红外光谱技术对辣椒的 SSC、维生素 C、辣度、农药残留、辣椒掺色素等方面进行了研究。刘燕德,等<sup>[15]</sup>采用近红外光谱分析方法建立鲜辣椒 SSC 和维生素 C 含量的近红外定量分析模型,以 SSC 及维生素 C 含量等指标来反映鲜辣椒品质。覃方丽,等<sup>[16]</sup>采用近红外光谱技术对鲜辣椒中的 SSC 和维生素 C 含量进行检测和可行性探讨,两种组分均得到了较好的分析结果。Sánchez,等<sup>[17]</sup>研究评估了近红外反射光谱在辣椒农药残留检测的可行性,使用偏最小二乘判别分析(PLS-DA)建立有无杀虫剂的判别模型,模型的验证结果分别为 75%和 82%(分别为无农药和含杀虫剂的样品)。李沿飞,等<sup>[18]</sup>测定了干辣椒中辣椒碱和二氢辣椒碱的含量,并利用近红外光谱技术对干辣椒的辣度进行了评价。杜一平,等<sup>[19]</sup>采用近红外漫反射光谱对辣椒粉中的苏丹红进行快速鉴别及其含量的预测,结果表明采用 MSC-PCA 的方法可以方便、快速和准确地区分辣椒粉中有无苏丹红;辣椒粉中的苏丹红含量的 PLS 模型精度较好。

## 3 拉曼光谱在农药残留检测中的应用

农药残留是指在农药使用后,经过环境和生物体的净化和降解后,还残留在环境或生物体中有毒代谢物、降解物、微量农药原体等的总称。农药在保障农作物生产的同时,对环境和人类的安全产生巨大的威胁,特别是近些年来,人们片面追求农产品的产量,农药和化学肥料使用量不断增加,因农药残留过量而产生的食品安全问题时有发生。随着我国成功加入 WTO,欧美、日本等发达国家不断提高农药残留限量标准,使得我国农产品屡屡被国际市场拒之门外,导致出口大幅下降,对食品出口经济造成巨大冲击。当前,农药残留的检测方法主要包括气相色谱法、高效液相色谱法、酶抑制法、免疫分析法和生物传感器法等,这些方法的主要不足是检测速度慢且分析成本较高,需要专业人员进行操作。

拉曼光谱分析方法用于农药检测的主要依据为农药分子某些化学键的振动与拉曼特征位移具有对应关系,在一定的浓度范围内,代表农药分子化学基团特征峰的强弱及峰面积与农药的含量有一定的相关关系,因此可采用拉曼光谱法对农药残留进行定性定量分析。表面增强拉曼光谱(surface-enhanced raman spectroscopy, SERS)活性体系的不断进步以及光谱检测仪器的不断优化使得拉曼光谱的应用领域不断扩展。SERS 的检测条件温和,具有超灵敏性和高选择性,可应用于单分子和生物样品的检测。联用技术的发展使得 SERS 应用领域得到不断扩展。SERS 检测精度高、对环境污染小、检测速度快,在农药残留检测方面具有广阔的前景。

### 3.1 基于金属溶胶 SERS 技术的农药残留检测中的应用

SERS 技术的发展使得拉曼光谱在农药残留检测方面大有可为。获取高质量拉曼信号的前提条件是 SERS 活性基底的质量。一个理想的 SERS 基底具有如下特点,首先要有高的 SERS 活性,这要求控制好表面纳米粒子的大小和间距,使纳米粒子间的有效耦合能达到最大程度的提高;其次是基底表面的均匀性,纳米粒子在基底上要有有序的排列,同一基底的信号强度偏差不能太大;第三个特点是基底具有良好的重复性和稳定性,采用相同方法制备的不同批次基底信号强度偏差也不能太大;最后基底要保持清洁,对强弱吸附的分子都具有增强的功能,还可以实现对未知分子的检测。以金胶和银胶为代表的金属溶胶法是目前最常用的 SERS 基底的制备方法。

近年来,国内外众多学者以金属胶体为增强基底,采用 SERS 技术对农产品农药残留(包括亚胺硫磷、百草枯、氧化乐果、毒死蜱、甲基对硫磷以及福美双等)进行研究。吉芳英,等<sup>[20]</sup>以金/银核壳粒子为基底,在酸性、碱性及中性环境下获得不同浓度氧化乐果表面增强拉曼散射光谱,考察了基底表面分子吸附状态及酸碱环境对增强机理的影响,结果表明在酸性环境下,对  $2.0 \times 10^{-10}$  mol/L 浓度的氧化乐果仍具有显著的增强效果。Tang,等<sup>[21]</sup>以银溶胶为增强基底,检测三环唑、百草枯和氟硅唑混合的农药溶液,三种农药浓度分别为 0.01, 0.1 mg/L 和 2.85 mg/L,根据三种农药的特征拉曼位移,可以对农药进行定性判别。刘燕德,等<sup>[22-24]</sup>以银包金胶体颗粒为增强基底,检测脐橙、苹果、葡萄以及梨等水果表皮的农药残留,结果表明银包金胶粒子直径为 30 nm 包裹厚度 7 nm 时的增强效果最好,能检测出浓度 1.5 mg/L 的毒死蜱、甲基对硫磷和福美双。Aaron,等<sup>[25]</sup>采用 SERS 技术对多菌灵进行定量分析,农药溶液的浓度范围是 1~10 mol/L,在  $1\ 007\text{ cm}^{-1}$  和  $1\ 242\text{ cm}^{-1}$  处建立峰面积与甲基对硫磷浓度的定量模型,模型的预测相关系数为 0.855。Guerrini<sup>[26]</sup>以银溶胶为增强基底,分析氧化乐果和乐果的表面增强拉曼光谱特性,提出了乐果在银纳米粒子上可能被氧化而形成氧化乐果,检测出农药的浓度为  $10^{-5}$  mol/L。

### 3.2 基于 Klarite 芯片的 SERS 技术在农药残留检测中的应用

Klarite 芯片是由一系列排列有序的二维光子晶体组成,光子晶体是通过离子束刻蚀技术在硅基底表面刻蚀出来,刻蚀的晶体呈倒金字塔状,并在硅基底上镀金。Klarite 芯片使得表面等离子体效应可控,大大提高拉曼信号,同时还提高拉曼信号的稳定性和重现性,其不足之处是对残留农药的增强具有选择性。刘燕德,等<sup>[27]</sup>使用 Klarite 型芯片作为增强基底,对脐橙表皮乐果农药残留的拉曼光谱进行检测,结果表明脐橙表皮乐果农药样品在 Klarite 增强芯片上振动峰变化明显,峰强发生改变,且谱峰呈现展宽和频移,具有明显的增强效果。刘燕德,等<sup>[28]</sup>使用 Klarite 型芯片作为增强基底,采集的表面增强拉曼光谱与亚胺硫磷标准样品的拉曼峰位对比,在  $501, 1\ 014, 1\ 272\text{ cm}^{-1}$  和  $1\ 611\text{ cm}^{-1}$  位置的峰位得到增强。

## 4 高光谱分析技术在果树营养成分无损检测中的应用

叶片作为果树的最重要营养器官之一,其光合作用、蒸腾作用、合成作用与果树的生长息息相关。果树因营养元素异常或受到其他外界变量干扰时都会体现在叶片中叶绿素、水分、氮素等营养信息的变化。实时、准确、无损、快速的检测果树叶片营养信息状况,对果树长势检测、营养诊断与施肥、产量评估等应用中有非常重要的意义。果树叶片中的营养信息众多,成分复杂,包括叶绿素、水分、氮、磷、钾等。检测叶片各项指标的常规方法多为破坏性实验室测量,如分光光度法测叶绿素、烘干称重法测水分以及凯氏定氮法测氮素等。检测过程复杂繁琐,耗费大量人力物力,检测精度易受环境影响。

高光谱分析技术已经广泛应用于水稻、小麦、棉花、玉米、苹果、水稻、大豆等农产品的营养诊断与估产等方面。高光谱分析技术具有光谱合一、分辨率高以及波段多等特征,在实际应用中体现出快速、无损、高效的特点。刘燕德,等<sup>[29]</sup>以赣南脐橙为研究对象,利用高光谱成像技术结合遗传算法和连续投影算法实现了脐橙叶片叶绿素和水分的同时测量。黄双萍,等<sup>[30]</sup>以 117 株园栽罗岗橙为试验研究对象,在不同生长期采集柑橘健康叶片的高光谱,利用支持向量回归建立高光谱多元表达和氮素含量间的映射关系,试验结果表明叶片氮素模型预测值和实测值间具有较高的相关性。王植,等<sup>[31]</sup>以桃树鲜叶为研究对象,采用逐步回归法探讨

光谱反射率与叶片全氮含量间的相关关系,回归模型具有较好的相关性。

## 5 结论

近红外光谱、拉曼光谱以及高光谱成像技术由于其快速无损等特点已广泛应用于农产品品质与安全的检测,是实现农产品组成成分定性和定量分析最有效的手段之一,可瞬时完成多组分同时测定。然而,由于农产品品种的多样性、形状各异性、内部成分的复杂性且部分内部成分含量较低等原因,导致上述三种光谱分析技术对某些农产品的品质与安全指标的分析精度较低,需进一步借助于新型实验手段和化学计量学方法对其品质和安全指标的光谱信息进行增强和提取,进一步提高光谱诊断技术在农产品品质与安全分析中的实用性。

## 参考文献:

- [1] 马广,孙通. 翠冠梨坚实度可见/近红外光谱在线检测[J]. 农业机械学报,2013,44(7):170-173.
- [2] MILLER W M & ZUDE-SASSE M. NIR-based sensing to measure soluble solids content of Florida Citrus[J]. Applied Engineering in Agriculture,2004,20(3):321-327.
- [3] 孙通,许文丽,林金龙,等. 可见/近红外漫透射光谱结合 CARS 变量优选预测脐橙可溶性固形物[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(12):3229-3233.
- [4] CLARK C J,MCGLONE V A,JORDAN R B. Detection of Brownheart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology,2003,28(1):87-96.
- [5] KIM G Y,KANG S W,LEE K J, et al. Measurement of sugar contents in citrus using near infrared transmittance[C]//Key Engineering Materials,2004,270:1014-1019.
- [6] 刘燕德,应义斌,傅霞萍,等. 一种近红外光谱水果内部品质自动检测系统[J]. 浙江大学学报,2006,40(1):53-56.
- [7] 杨帆,邱晓臻,郝睿,等. 基于主成分正交信号校正算法和加强正交信号校正算法对柑桔酸度的检测[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(7):1931-1934.
- [8] FENG J,MEGLONE A V,et al. Assessment of yellow -fleshed kiwifruit (*Actinidia Chinensis* 'Hort16A') quality in pre and post -harvest conditions using a portable near -infrared spectrometer [J]. Hort Science,2011,46(1):57-63.
- [9] CAYUELA J A. Prediction of intact nectarine quality using a Vis/NIR portable spectrometer[J]. Inderscience Publishers,2011,2(2):131-144.
- [10] GUIDETTI R,BEGHI R,BO L. Evaluation of grape quality parameters by a simple Vis/NIR system[J]. Transactions of the Asabe,2010,53(53):477-484.
- [11] LIU Y D,ZHOU Y R,PENG Y Y. Detection of egg quality by near infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Optics & Precision Engineering,2013,21(1):40-45.
- [12] 李海峰,房萌萌. 可见/近红外光谱技术无损检测新鲜鸡蛋 pH 及蛋白质的研究[J]. 食品工业科技,2017,38(20):280-283.
- [13] 孙艳文,尹程程,李志成,等. 鸡蛋脂肪含量近红外光谱无损检测技术研究[J]. 食品工业,2016(9):177-180.
- [14] 段宇飞,王巧华,马美湖,等. 基于 LLE-SVR 的鸡蛋新鲜度可见/近红外光谱无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(4):981-985.
- [15] LIU YANDE,ZHOU YANRUI,PAN YUANYUAN. Determination of soluble solid contents and vitamin C of fresh peppers based on NIR spectrometry and least square support vector machines[J]. Optics & Precision Engineering,2014,22(2):281-288..
- [16] 覃方丽,闵顺耕,石正强,等. 鲜辣椒中糖份和维生素 C 含量的近红外光谱非破坏性测定[J]. 分析实验室,2003,22(4):59-61.
- [17] SUNCHEZ M T,FLORESROJAS K,GUERRERO J E,et al. Measurement of pesticide residues in peppers by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Pest Management Science,2010,66(6):580-586.
- [18] 李沿飞,胡羽,屠大伟,等. 近红外光谱技术快速无损测定干辣椒的辣度[J]. 食品科技,2013(1):314-318.
- [19] 杜一平,向春兰,黄子夏,等. 辣椒粉掺杂苏丹红的近红外光谱鉴别及其含量测定方法研究[J]. 计算机与应用化学,2013,30(1):36-38.

- [20] 吉芳英,黎司,虞丹尼,等. 氧化乐果的振动光谱及其表面增强拉曼散射研究[J]. 分析化学研究报告,2010,38(8):1127-1132.
- [21] TANG H R,LI Q Q,REN Y L,et al. Surface enhanced Raman spectroscopy signals of mixed pesticides and their identification [J]. Chinese Chemical Letters,2011,22(12):1477-1480.
- [22] 刘燕德,张宇翔,王海阳. 脐橙表皮两种混合农药残留的表面增强拉曼光谱定量检测[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(1):123-127.
- [23] 刘燕德,郝勇,蔡丽君. 无损光电检测技术原理及应用[J]. 华东交通大学学报,2010,27(6):36-46.
- [24] 欧阳思怡,叶冰,刘燕德. 表面增强拉曼光谱法在农药残留检测中的研究进展[J]. 食品与机械,2013,29(1):243-246.
- [25] AARON D S,CARL A. B. Detection of carbendazim by surface-enhanced Raman scattering using cyclodextrin inclusion complexes on gold nanorods[J]. Anal Chem,2009,81(8):2895-2903.
- [26] GUERRINI L,SANCHECORTE S,CRUZ V L. et al. Surface-enhanced Raman spectra of dimethoate and omethoate[J]. J Raman Spectrosc,2011,42:980-985.
- [27] YANDE LIU,BING YE,CHANGLAN WAN,et al. Determination of dimethoate and phosmet pesticides with surface-enhanced raman spectroscopy[J]. Spectroscopy Letters,2016,49(3):198-203.
- [28] YANDE LIU,HE B,ZHANG Y,et al. Detection of phosmet residues on navel orange skin by surface-enhanced raman spectroscopy[J]. Intelligent Automation & Soft Computing,2015,21(3):423-432.
- [29] 刘燕德,姜小刚,周衍华,等. 基于高光谱成像技术对脐橙叶片的叶绿素、水分和氮素定量分析[J]. 中国农机化学报,2016,37(3):218-224.
- [30] 黄双萍,洪添胜,岳学军,等. 基于高光谱的柑橘叶片氮素含量多元回归分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):132-138.
- [31] 王植,周连第,李红,等. 桃树叶片氮素含量的高光谱遥感监测[J]. 中国农学通报,2011,27(4):85-90.

## Application of Spectral Diagnoses Technology in Determination of Agricultural Products Quality

Liu Yande, Cheng Mengjie, Hao Yong

(School of Mechanotronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Jiangxi Nanchang 330013)

**Abstract:** The quality and safety of agricultural products are closely related to the health of consumers. The traditional analysis methods for the quality and safety indexes of agricultural products have complex operational procedures and high analytical costs. With the rapid development of spectroscopy and imaging technology, near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, and hyperspectral imaging technology have been widely used in the rapid non-destructive detection of agricultural product quality and safety. In the paper, the recent advances were summarized for rapid analysis of quality and safety indexes of agricultural products by using spectroscopy and imaging technology. Three aspects of the study were selective analyzed including the application of near-infrared spectroscopy in the internal and external quality and safety detection for fruits, eggs and pepper, Raman spectroscopy in the detection of pesticide residues, and the application of hyperspectral imaging technology in the determination of nutrient contents of fruit trees.

**Key words:** near-infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; hyperspectral imaging; quality and safety