

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.025

农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势^{*}

彭彦昆 张雷蕾

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 高光谱成像技术作为光学无损检测的一种新技术在农畜产品品质安全检测中被广泛关注和应用。综述了高光谱无损检测技术的研发现状。在果蔬品质安全检测上,高光谱成像技术可用于组成分分析、食用指标测定、质量分级评定等内部品质检测和外部形态特征识别、表面缺陷及污染物检测、冻伤检验等外部品质判定,以及农药残留、致病菌污染等安全评定。在生鲜肉检测应用方面,包括营养品质的组成成分分析、食用品质如嫩度、大理石花纹、新鲜度等指标评价以及生鲜肉在微生物污染等安全品质的评定。分析了高光谱无损检测技术的现状及问题,并针对目前农畜产品无损检测的发展趋势进行前景展望。

关键词: 农畜产品 品质安全 高光谱成像技术 无损检测

中图分类号: S123; X954 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0137-09

Advancement and Trend of Hyperspectral Imaging Technique for Nondestructive Detection of Agro-product Quality and Safety

Peng Yankun Zhang Leilei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As one of the most important optical nondestructive detection technologies, hyperspectral imaging technology was widely used for assessing for agro-product quality and safety. At first, the advancement on hyperspectral imaging technology of agricultural and livestock products quality and safety was reviewed. The research and application of this technology in fruits and vegetables are wide, including internal quality detection, such as nutritional component analysis, eating quality evaluation and real-time online quality classification; external quality detection that consists characteristics identification, surface defect and chilling injury inspection; and detection of pesticides residue. In respect of fresh meet quality and safety detection, the hyperspectral imaging technology was investigated to develop application technologies and inspection equipments, including real-time analysis of nutritional components, online evaluation of meat eating quality parameters such as tenderness, marbling and freshness, and rapid evaluation of meat safety attributes such as microbial contamination and bacteria total viable count. Finally, the status and issues of hyperspectral technology were analyzed. Its development trend prospects was presented in the nondestructive detection of agricultural and livestock products.

Key words: Agro-products Quality and safety Hyperspectral imaging technology Nondestructive detection

引言

农畜产品作为人们赖以生存的食物,其质量安

全是食品食安全的基础,成了食品安全的重中之重,是当前最受人们关注的重大民生问题。优质安全的农畜产品,越来越受到消费者广泛重视和追求,逐渐

收稿日期: 2012-12-07 修回日期: 2012-12-17
^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH04B00)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201003008)
作者简介: 彭彦昆,教授,博士生导师,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究, E-mail: ypeng@cau.edu.cn

赢得市场青睐。主要农畜产品有水果、蔬菜、生鲜肉等,其质量参数包括物理属性、化学属性和生物属性。物理属性主要有外观的大小、形状、质量、色泽、硬度等;化学属性主要有营养成分、新鲜度、成熟度等;生物属性是指致病性细菌等。农畜产品安全的主要检测指标是指有毒有害杂质掺入等物理性污染;农药残留、兽药残留、重金属超标等化学性污染;致病性细菌、病毒以及毒素等生物性污染。为了优化农畜业种植养殖的品种、质量,提高质量安全水平,保证农畜产品供给的安全性、可靠性、食用性,实现农畜产品质量安全的快速无损检测具有重要现实意义。

无损检测技术是近年在农业中快速发展的新兴高新检测技术,能使样品检测后仍然可以销售和食用,不损害生产者的经济效益,具有极大的商业化实用潜力。特别是,光学无损检测技术具有无损、快速、可在线 3 个技术特征,并且易于与机械技术、电子技术和计算机技术相融合,是最重要的农畜产品无损检测技术之一。与此同时,无损检测技术可替代人工用于过冷和过热、有毒的环境,成为该领域最新的研究热点。目前,应用于农畜产品质量安全检测的光学技术主要有 4 种:图像检测技术、近红外线检测技术、高光谱成像检测技术和激光拉曼光谱技术等。图像检测技术把外部特征等具体信息高速地输送给计算机进行图像信息的实时处理、识别,从而实现外观质量的综合评价,但是对于农产品内部品质参数和安全性能无法进行准确检测^[1]。近红外线检测技术发展相对较为成熟,但是其分析结果准确性受温度等多种因素的影响,从复杂、重叠、变动的背景中提取弱信息,干扰因素比较多,需要不断改进研究方法^[2]。另外由于检测范围所限,一般仅用于质地均匀的农畜产品。高光谱检测技术将图像技术与光谱技术融为一体,虽然起步较晚,但是随着其功能提高和应用需求,在农畜产品品质检测和安全评定上呈现出极大的优越性,是无损检测最具潜力的新方法之一^[3-4]。

鉴于篇幅所限,本文主要就高光谱无损检测技术在果蔬、生鲜肉等主要农畜产品的质量安全检测的应用研究进展进行归纳综述,阐述存在的主要问题,并展望今后的发展趋势。

1 高光谱成像技术无损检测原理

基于高光谱仪的高光谱成像是在纳米级的光谱分辨率上,可以在紫外到近红外(200~2 252 nm)光谱覆盖范围内,以几十至数百个波长同时对物体连

续成像,实现物体的空间信息、光谱信息、光强度信息的同步获得。其中采集方式主要有反射、透射、散射和荧光 4 种模式。图 1a 为高光谱成像系统的基本构成,主要包括高光谱仪、CCD 相机、光源和计算机。根据被测参数可选择波长覆盖范围不同的光谱仪(如 UV 200~400 nm, VIS/NIR 450~1 100 nm, NIR 900~1 700 nm), CCD 相机的光谱范围要与光谱仪相匹配,光源要求稳定和均匀。

通过光谱仪或检测样品移动,可以对检测样品连续扫描 N 次,就可得到该检测样品 N 条扫描线处的高光谱图像。如图 1b 所示,将采集到的高光谱线扫描图像表达为三维立方体图像,即“hypercube”图像,图中 x 、 y 表示空间位置, λ 表示波长。高光谱立方体图像含有被检测样品的图像信息和光谱信息,即它包含了每一有效波长下的图像,同时又表达了每一检测位置的光谱。

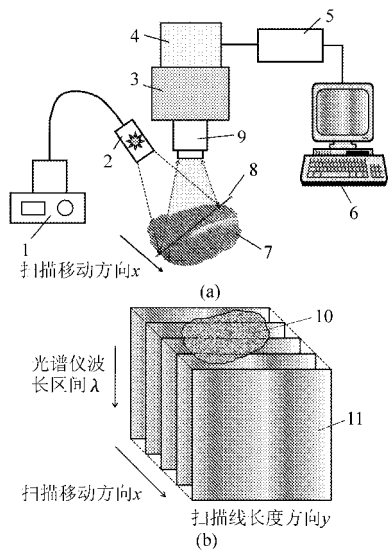


图 1 高光谱无损检测系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system for nondestructive detection
(a) 高光谱成像系统 (b) 高光谱立方体图像

1. 光源调节器 2. 光源 3. 高光谱成像光谱仪 4. CCD 数码相机 5. 相机控制接口 6. 计算机 7. 被测样品 8. 扫描线 9. 可变焦距镜头 10. 某波长处样品图像 11. 某扫描线位置高光谱图像(N 个)

利用高光谱立方体图像中的光谱信息,结合光谱解析和数学建模方法,可以预测和评估被检测样品每一点的内部品质安全属性(如糖度、水分等)。利用高光谱立方体图像中的图像信息,结合图像处理方法,可以检测样品的表面品质安全属性(如伤痕、形态等)。因此,利用高光谱技术,通过一次连续扫描,可以同时无损检测农畜产品的内部和外部品质安全参数,实现多参数实时在线检测。

2 果蔬品质安全高光谱无损检测技术的研究进展

果蔬内部品质检测是果蔬流通中的重要环节,对于果蔬在采后加工、运输、贮藏和销售过程起着重要作用,能够有效保障果蔬内在价值。基于果蔬光学特性的高光谱无损检测受到了国内外学者广泛关注,在该领域取得了较大的进展^[5]。应用高光谱成像的方法既能实现无损检测,又能快速准确地获取反映果蔬外部品质的图像信息和其内部品质的光谱信息。高光谱成像技术在国外相对发展较早,20世纪90年代末开始应用于农产品品质无损检测^[6]。

2.1 果蔬内部品质检测的研究与应用

针对果蔬内部品质无损检测,高光谱成像技术主要应用在水分、淀粉、色素等影响果蔬营养品质的组成成分分析,可溶性固形物、酸度、糖度及硬度等影响果蔬口感风味的食用指标测定,以及根据新鲜度、成熟度等对果蔬进行质量分级评定。

果蔬的营养品质主要取决于果蔬的化学组成,与果蔬贮藏特性和采后保鲜密切相关。高光谱成像技术对果蔬化学成分的分析,主要集中在水分、糖、淀粉、色素等。Peirs等^[7]利用高光谱近红外反射成像系统,采用第一主成分图像的阈值来鉴别苹果中淀粉和非淀粉,有效地实现了快速无损检测。洪添胜等^[8]利用高光谱图像系统,提取雪花梨中糖和水的光谱响应和形态特征参数,获取样品含糖量和含水率的敏感水分吸收光谱带,结合人工神经网络建立雪花梨含糖量和含水率预测模型,预测相关系数分别为0.996和0.94,利用投影图像面积预测雪花梨质量准确率为93%。Menesatti等^[9]进行深入研究,应用1 000~1 700 nm近红外高光谱成像技术结合RGB彩色图像,采用偏最小二乘法判别分析苹果中自由淀粉含量,准确率为81%。邹小波等^[10]提取近红外高光谱图像中50像素×50像素感兴趣区域(ROI)的平均光谱,分别与黄瓜叶中叶绿素a、叶绿素b、 β -胡萝卜素和叶黄素4种色素建立偏最小二乘(PLS)预测模型,快速检测了新鲜黄瓜叶片色素含量。此外,苹果粉质化程度是衡量其内部品质的一个重要因素,国内也有学者对该项指标作了相关研究^[11-12]。

果蔬的风味、质地和口感,决定消费者的喜好程度,与糖度、酸度、可溶性固形物等食用性指标密切相关。Lu等^[13]采用500~1 000 nm高光谱散射特征光谱,建立“Red Haven”和“Coral Star”2种桃子硬度的预测模型,获得了有效的预测结果。ElMasry等^[14]应用400~1 000 nm可见/近红外高光谱成像

系统,根据偏最小二乘回归模型的 β 系数选出最佳波长,再利用多元线性回归方法建立草莓水分、总可溶性固形物和pH值的预测模型,预测相关系数分别达到0.87、0.80、0.92。Noh等^[15]采用408 nm的连续波激光作为激发光,应用激光诱导荧光高光谱成像技术对苹果品质属性进行评估,通过获取苹果表面在1、2、3、4和5 min不同激光时间下的荧光散射图像,建立可溶性固形物、酸度、颜色3个参数的预测模型,预测相关系数在0.75到0.94之间。Peng等^[16]获取苹果表面波长范围为50~1 000 nm的高光谱空间散射曲线,利用洛伦兹分布函数对其进行拟合,将得到的洛伦兹3参数(渐近值、半波带宽、峰值)组合作为散射特征光谱建立预测模型,对苹果硬度和可溶性固形物(SSC)的2个品质参数进行预测,校正集的预测结果分别为0.89和0.88。周竹等^[17]利用竞争性自适应重加权算法(CARS)与连续投影算法(SPA)相结合方法,用27个变量建立多元线性回归模型,预测集相关系数为0.86,提高了高光谱成像技术检测马铃薯干物质的精度。一般单一指标很难全面反映农产品的综合品质。单佳佳等^[18]将高光谱技术的图像信息和光谱信息相结合,通过提取感兴趣区域480~1 016 nm波段平均反射光谱,利用偏最小二乘回归法建立苹果糖分含量预测模型,验证集相关系数为0.92,同时又对第一主成分图像与794 nm图像相减后进行去噪和阈值分割处理,摔伤检测率为92.6%,实现苹果内部品质和外品质同时检测。该研究为自动化在线检测技术的开发奠定理论基础。

果蔬成熟度是果蔬分级与保鲜的重要评价指标之一。传统的果蔬成熟度判定方法主要是通过抽样进行破坏性检测,无法满足果蔬快速分级分选需求。通过高光谱技术检测果蔬的内部品质从而准确判断果蔬的成熟度^[19]。Polder等^[20]运用396~73 nm波长范围内光谱成像技术预测5种不同成熟度的番茄,分级评定错误率从原来的51%降低到了19%,研究结果表明光谱图像对番茄成熟度判别能力比普通RGB图像更强。Rajkumar等^[21]以波长范围为400~1 000 nm的高光谱成像技术,采用偏最小二乘回归对采集的光谱数据进行分析,根据预测残差平方选出一些最佳波段,并利用多元线性回归方法建立预测模型,香蕉可溶性固形物含量、含水率和硬度的预测相关系数分别为0.85、0.87和0.91,实现了香蕉成熟度的判定。Cen等^[22]利用波长范围515~1 000 nm的高光谱成像系统获取桃表面的吸收和散射特征光谱,采用扩散方法建立预测模型,同时检测硬度、可溶性固形物含量(SSC)和颜色3个指标,取

得了满意的效果,为桃成熟度判定提供了一个可靠的方法。上述研究表明,高光谱成像技术的成功应用为果蔬高效、快速、在线分级生产线研发提供了可靠保证。

2.2 果蔬外部品质判定的研究与应用

高光谱成像技术在果蔬外部品质无损检测领域体现了巨大的优越性,主要集中在外部特征识别、表面缺陷及污染物检测、冻伤检验。

对于果蔬的大小、色泽、质量等感官特征识别,高光谱成像技术发挥了极其重要作用。程国首等^[23]提取苹果高光谱图像中波长 713、793 和 852 nm 处的 3 幅图像,采用波段比算法,有效地检测出新疆红富士苹果大小。Sugiyama 等^[24]利用近红外光谱图像对蓝莓外来杂物进行鉴别,获取了 1 268 nm 和 1 317 nm 两个最佳波长下的吸收图像,采用判别式函数和阈值对图像进行二值化,通过二值化图形能清晰地将果皮、茎、叶等外来杂物从蓝莓中辨别出来。

果蔬表面缺陷和污染严重影响果蔬品质和附加值,是生产者和消费者一直都很重视的问题,尤其是轻微损伤、病虫害、粪便污染等难以识别的情况,如何对其进行快速、无损检测已经成为国内外学者的研究热点^[25]。美国农业部仪器与传感技术实验室 (Instrumentation and sensing laboratory, ISL) 的 Kim 等^[26]研制了一套高光谱成像系统,光谱范围为 430 ~ 930 nm,光谱分辨率为 10 nm,空间分辨率为 1 mm,该系统可以获取反射图像和荧光图像,为农产品品质安全无损检测研发了新型检测装备。Mehl 等^[27]基于上述系统检测 4 种不同品种苹果表面缺陷和污染,空间分辨率为 0.5 ~ 1.0 mm,波长范围为 430 ~ 900 nm,成功地检测出苹果表面的腐烂、擦伤、污斑、伤疤等缺陷状况以及真菌感染、土壤污染情况。Xing 等^[28-29]尝试将高光谱成像技术应用于苹果表面损伤检测。由于苹果果蒂/果柄的凹陷区在图像上与表面缺陷的差别不大,在分析中很容易造成误判,Xing 等^[30]将反射和荧光两种采集模式结合使用,很好地分辨出苹果果蒂/果柄和瘀伤组织。Ariana 等^[31]应用高光谱成像技术,提取波长 400 ~ 675 nm 反射信息用于检测黄瓜外部颜色和波长 675 ~ 1 000 nm 透射信息用于内部缺陷检测,从而很好地实现了黄瓜采摘时受到的机械损伤和外部颜色的同时检测。国内学者也进行了许多努力,在果蔬缺陷等外部品质判定方面取得了一定的研究成果。蔡健荣等^[32]利用高光谱图像技术结合两步主成分分析算法,优选出 571、652 和 741 nm 3 个特征波长,用于检测柑橘果锈的正确率达到 90%。李江波

等^[33]利用波长 400 ~ 1 100 nm 高光谱成像技术,通过选出 5 个最佳波段 (630、685、720、810 和 875 nm),采用特征波段主成分分析法与波段比算法相结合的方法,从带有不同缺陷的柑橘类水果中快速识别出溃疡果。随后,李江波等^[34]又利用荧光高光谱成像检测技术,采用最佳指数 OIF 理论获得了识别腐烂果的最优波长组合,并基于最优波长的比图像及双阈值分割算法,对脐橙早期腐烂果的识别率达到 100%。上述研究能促进果蔬表面缺陷快速识别提供,提高分选效率。

受天气、温度、湿度等因素影响,水果蔬菜在运输、贮藏过程中易造成冻坏,冻伤后的果蔬由于植物组织被破坏,不仅丧失营养价值,改变原有的口感风味,还会产生有毒物质。Liu 等^[35]同时获取 700 ~ 850 nm 可见/近红外区域光谱信息和图像信息,采用波长比值 (811 nm/756 nm) 和主成分分析法分别对黄瓜冻伤进行检测,发现 2 种方法的准确率均在 90% 以上。ElMasry 等^[36]利用高光谱成像技术 (波长 400 ~ 1 000 nm) 结合人工神经网络分析方法,选出 717、751、875、960 和 980 nm 5 个最优波长,用于检测苹果冻伤,准确率达 98%。

2.3 果蔬安全评定的研究与应用

在果蔬生产、贮运、加工及销售过程中,必须加强果蔬食用安全的监测和控制。现有评定果蔬食用安全性的方法存在费时、复杂、前处理过程繁琐等不足,因而需要寻求一种快速无损的评定方法。基于高光谱成像技术的果蔬安全评定,主要包括农药残留检测 (杀菌剂、杀虫剂、植物生长调节剂等)、致病性细菌等微生物感染及产生的毒素致腐等方面。薛龙等^[37]以脐橙为研究对象,初步探讨了应用高光谱图像技术检测水果表面农药残留的方法。随后,薛龙等^[38]以激光诱导荧光结合高光谱图像技术为手段检测脐橙表面的敌敌畏农药残留,应用支持向量机 (SVM) 方法在最佳光谱区间的基础上建立预测模型,预测集的相关系数为 0.810 1。陈菁菁等^[39]搭建了高光谱荧光成像检测系统,在 400 ~ 1 100 nm 波长范围内获取叶菜表面毒死蜱的高光谱荧光图像,通过 ENVI 4.3 软件对其进行分析,发现毒死蜱在波长 437 nm 附近产生荧光发射光谱,该研究为进一步研发快速、精确的农药残留检测仪器提供理论依据。

果蔬贮运中的微生物病害是引起果蔬商品腐烂和品质下降的主要原因之一。Gomez-Sanchis 等^[40]在不采用紫外线诱导可见荧光激发的情况下,利用高光谱成像系统获取柑橘表面光谱图像,基于线性判别分析的特征提取方法选出 20 个最佳波长,采用

有效波段选择结合分类回归树模型 (CART) 进行图像分割,成功检测出由霉菌污染引起柑橘腐败,检测率达 91%。上述研究表明高光谱成像技术在果蔬品质安全无损检测中有很大的应用潜力。

3 生鲜肉品质安全高光谱无损检测技术的研究进展

生鲜肉品质安全,直接影响消费者的身体健康,同时也影响着整个畜牧养殖和生产行业的发展。随着光学技术的发展,生鲜肉品质安全检测能力实现了一个新的跨越。高光谱成像技术应用于肉品检测的时间不长,但由于具备快速、无损、高效的检测优越性,在生鲜肉品质安全评价这一领域拥有巨大潜力。基于高光谱成像技术的生鲜肉无损检测研究,主要包括生鲜肉的化学成分分析、食用品质评价、质量分级评定、品种鉴定判断以及安全性指标评价等方面^[41]。

3.1 生鲜肉营养成分分析的研究与应用

生鲜肉中的各种营养成分对其品质有重大影响。肌肉水分含量、分布及其持水性关系肉的品质和风味,脂肪的多少及脂肪酸的组成直接影响肉的嫩度和多汁性^[42]。Qiao 等^[43]利用波长 430 ~ 1 000 nm 范围的高光谱成像技术,针对滴水损失、pH 值、颜色 3 个参数各自选出 6 个特征波长,结合神经网络建立预测模型,预测相关系数分别为 0.77、0.55、0.86。Barbin 等^[44]应用 900 ~ 1 700 nm 近红外区域的高光谱成像系统,获取猪肉表面的光谱信息,经一阶、二阶导数、标准归一化和多元散射校正处理后结合偏最小二乘回归 (PLS),建立猪肉颜色参数、pH 值、滴水损失预测模型,预测相关系数分别达到 0.93、0.87 和 0.83。最近,他们又以同一系统应用于猪肉等级划分,将猪肉按肉质划分为 PSE、RFN 和 DFD,发现 3 个质量等级猪肉在 6 个波长 (960、1 074、1 124、1 147、1 207 和 1 341 nm) 处有明显反射差异,结合主成分分析法对这些特征波长进行建模分析,最后得到的分级准确率达到 96%^[45]。由于高光谱图像技术在胴体分级和肉品质估测方面的研究刚刚起步,准确率和相关性还有待提高。随着新型无损检测硬件技术的不断发展,通过光谱技术有望进一步实现畜禽生鲜肉的在线分级。

3.2 生鲜肉食用品质检测和等级评定的研究与应用

食用品质^[23]是肉品最重要的品质指标之一,直接影响生鲜肉的商品价值,大都从嫩度、大理石花纹、色泽和新鲜度等几个方面进行评价。生鲜肉的肉色鲜红、质地鲜嫩、大理石纹状具佳、脂肪白色而有光泽、味道鲜美,具有很高的食用价值。

大理石花纹是一切肌肉范围内可见的肌肉脂肪的分布状况,是确定肉类质量等级的主要指标。肉质的高光谱图像研究在快速评估胴体尤其是牛肉大理石花纹方面取得了一定的进展。Qiao 等^[46]通过主成分分析法对 430 ~ 1 000 nm 全波段进行降维,利用得到的 5、10、15 个主成分数据作为输入变量,以猪肉大理石花纹等级作为输出变量,结合二阶矩角建立神经网络模型,对 40 个样本的大理石花纹进行成功分级,评分范围 3 ~ 5 分。Kohler 等^[47]利用基于傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 的显微成像系统,结合多元图形分析,提出一种识别结缔组织的方法,为后续应用高光谱成像技术检测牛肉大理石花纹奠定良好理论基础。为了提高检测的精度和准确性,国内学者开展了进一步的深入探索和研究。高晓东等^[48]组建了 400 ~ 1 100 nm 高光谱线扫描成像系统,通过牛肉脂肪和瘦肉在各个波段处反射比的最大值,确定 530 nm 为特征波段,提取特征波段处牛肉大理石花纹的 3 个特征参数 (大颗粒脂肪密度、中等颗粒脂肪密度和小颗粒脂肪密度),建立大理石花纹等级评判预测模型,结果表明多元线性回归模型 (MLR) 比正则判定函数模型好,获得 85% 的分级准确率。上述研究表明将高光谱成像技术应用于生鲜肉大理石花纹等级评定是可行的,为今后生鲜肉在其他食用品质无损检测奠定了良好的研发基础。

嫩度是指肉在食用时口感的老嫩,反映了肉的质地,是消费者评判肉质优劣最常用的指标。嫩度的不同决定着肉的等级档次,直接影响着肉的食用价值和商品价值。Naganathan 等^[49~50]搭建了 400 ~ 1 000 nm 范围内的可见/近红外高光谱成像系统,对提取的感兴趣区域图像采用主成分分析法进行分析,牛肉嫩度被分为 3 个等级:柔软 ($SSF \leq 205.80\text{ N}$)、中等 ($205.80\text{ N} < SSF < 254.80\text{ N}$)、坚硬 ($SSF \geq 254.80\text{ N}$),分级准确率为 96%。Naganathan 等又搭建了波长 900 ~ 1 700 nm 范围的近红外高光谱成像系统,结合偏最小二乘回归法,对牛肉嫩度分级准确度达 77%。虽然精度不如之前高,但是找到与牛肉脂肪、蛋白质和吸水性相关的特征波长,为今后的研究提供有价值的参考。近年来,国内研究学者在肉品嫩度检测上有了新的技术突破。彭彦昆等^[51]研发的一种肉品嫩度无损检测的高光谱检测方法 with 系统。在此基础上,吴建虎等^[52]开发了一套高光谱散射成像系统对牛肉嫩度进行检测。吴建虎等^[53]获取牛肉表面的高光谱散射图像,用逐步回归法选择 430、496、510、725、760 和 828 nm 6 个波长建立了多元线性回归模型,对牛肉嫩度预测相关系数为

0.96,同时以嫩度 6.0 kg 为界将样本分为嫩牛肉和粗糙牛肉 2 类,建立了正则判别函数对牛肉嫩度分级,分级准确率为 87%。2012 年,Wu 等^[54]利用高光谱成像技术结合多元线性回归方法预测牛肉嫩度和颜色,65 个样本取自 33 头 2 岁以上的牛肉胴体,牛肉嫩度预测相关系数为 0.91,颜色参数(L^* , a^* , b^*)相关系数分别为 0.96、0.96 和 0.97。该研究为实现新鲜牛肉的多品质参数在线检测提供了理论和应用基础。

新鲜度是衡量生鲜肉是否符合食用要求的客观标准,可以综合地反映产品营养性、安全性和嗜好性的可靠程度。Li 等^[55]利用高光谱成像技术结合偏最小二乘法对猪肉新鲜度进行评价,将获取的反射光谱经过洛伦兹函数拟合后进行建模,对 TVB-N、pH 值和颜色参数的预测相关系数分别为 0.90 和 0.72,对颜色参数(L^* , a^* , b^*)的预测相关系数分别为 0.55、0.41 和 0.53。张雷蕾等^[56]应用 470 ~ 1 000 nm 波长范围的高光谱成像技术,从获取的猪肉表面高光谱图像提取反射光谱,经过 2 次 Savitzky-Golay (S-G) 平滑,建立偏最小二乘回归 (PLSR) 的预测模型,对挥发性盐基氮 (TVB-N) 的预测相关系数达到 0.90,多元散射校正 (MSC) 处理模型对 pH 值预测相关系数为 0.79。上述方法对实现肉品的新鲜度无损快速检测提供了应用基础。

3.3 生鲜肉安全评定的研究与应用

由于肉类本身富含营养物质和水分,极易腐败变质,以及在屠宰加工及销售的过程中,缺乏良好的卫生条件和冷藏设施,出售时随着放置时间的延长而使生鲜肉的卫生安全情况变得错综复杂。高光谱成像技术应用于生鲜肉的安全评定,包括肉的表面污染、腐败酸败变质、毒素药物残留等安全性指标评价。

美国农业部农业研究机构 (USDA-ARS) 的研究小组开发了一套高光谱成像检测系统,用于在线实时检测家禽胴体污染。Park 等^[57]应用高光谱成像系统检测家禽在屠宰中体腔内的粪便污染,选取波长 565 nm 和 517 nm 处的图像,通过波段比、阈值分割和中值滤波等图像处理算法,污染物识别率达到 93%。随后,Park 等^[58]又利用同一系统检测家禽表面的粪便和饮食物污染,采用两波段比值算法的检测准确率达到 96%。Park 等^[59]通过不断尝试和改进,最新开发出一套在线扫描高光谱系统,该系统能够检测到 10 mg 的粪便污染,检测速度为每分钟 140 只家禽,实现家禽污染物实时在线快速检测。Chao 等^[60]应用高通量光谱成像系统对屠宰线上健康与不健康鸡肉进行鉴别,通过检测商业屠宰线上

100 000 多只鸡胴体,发现鉴别出健康鸡肉的准确率超过 99%,不健康鸡肉为 96%。

由于肉本身含有有机营养物质,为腐败微生物的生长繁殖提供了良好的营养物质,在适宜的环境下,微生物大量繁殖,使肉类发生一系列复杂变化,最终导致生鲜肉腐败变质。彭彦昆等^[61]利用高光谱成像系统,选取 480、525、650、720 和 765 nm 5 个最佳波长的光谱特征,采用支持向量机的方法,对猪肉细菌总数 (TVC) 进行预测,得到的相关系数为 0.87。还探讨了高光谱成像技术在牛肉微生物腐败上的可行性^[62]。王伟等^[63]比较偏最小二乘回归 (PLSR)、人工神经网络 (ANNs) 和最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 3 种建模方法,验证了高光谱成像技术结合 LS-SVM 可以有效地预测生鲜猪肉中细菌总数。陶斐斐等^[64]分析猪肉表面菌落总数与 400 ~ 1 100 nm 波长范围内相应高光谱图像的关系,结合多元线性回归和偏最小二乘回归方法分别建立预测模型,预测集相关系数分别为 0.89 和 0.86。Tao 等^[65]利用 400 ~ 1 100 nm 的高光谱成像技术,获取猪肉表面的高光谱散射光谱曲线,用洛伦兹分布函数对其进行拟合,获得 3 参数 a (渐近值)、 b (峰值)、 c (半波带宽),利用单参数 a 和三参数组合 (a 、 b 、 c) 结合多元线性回归建立预测模型,对大肠杆菌污染的预测相关系数分别为 0.88 和 0.84。这些实验研究证明了高光谱技术可以较好地定量预测生鲜肉的菌落总数以及大肠杆菌。

4 结论

(1) 高光谱成像无损检测作为一种非接触检测技术,广泛应用于农畜产品品质检测和安全评价领域。随着深入地研究和广泛地应用,高光谱成像技术的强大功能和优势逐渐体现出来,与此同时一些问题和难点亟待解决和突破:①当检测探头与被测样品的距离发生变化时,检测到的原始数据在光的反射强度上具有明显的差异,并对预测精度带来较大影响。因此,基于机电技术,使检测探头与被测样品保持一定的距离是必要的,目前仍是待解决的技术难点。②采集参数设置和环境条件对采集光谱数据产生较大影响。采集参数设置包括采集精度、扫描次数和采集距离等,环境因素包括环境温度和湿度、光照条件,以及样品本身的温度。因此,需要充分考虑采集参数设置和测试环境对检测精度的影响,需要采取偏差校正措施,设置最优化的匹配参数。③高光谱图像数据信息量大,存在大量冗余的多重共线性信息等问题。因此,在提高预测模型精度、降低高光谱数据冗余、加快检测分析速度以及选

择更佳的特征波段算法等一系列问题上,需要加强解决能力。

(2)从发展前景来看,主要朝着突破技术难点和拓展实际应用两方面发展,今后的研究重点主要集中于以下几点:①在技术发展上,农畜产品多参数同时检出、内外部品质安全指标同时评价、动态检测和品质分选分级一体化技术,在无损检测领域更备受关注,将具有更大的研究价值和发展空间。②在功能完善上,通过将高光谱成像与其他新型无损检

测技术有机融合,集成优化现有检测手段,充分利用多元信息,全面提高农畜产品的检测精度、速度和可靠性,实现农畜产品品质安全指标的综合评价。③在实际应用上,研发操作简单的、功能齐全的自动化全程质量控制的新型实时检测装置、在线检测装备和智能监控系统,将其投入到农畜产品快速无损检测的实际运用中,完善我国农畜产品优质生产和快速检测技术体系,促进农畜产品生产向优质化、标准化、安全化和产业化方向健康发展。

参 考 文 献

- 1 Kumar Patel K, Kar A, Jha S N, et al. Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(2): 123 ~ 141.
- 2 Wang W B, Paliwal J. Near-infrared spectroscopy and imaging in food quality and safety[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2007, 4(1): 193 ~ 207.
- 3 Kim M S, Chao K, Chan D E, et al. Line-scan hyperspectral imaging platform for agro-food safety and quality evaluation: system enhancement and characterization[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 703 ~ 711.
- 4 Kim M S, Chen Y R, Mehl P M. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 721 ~ 729.
- 5 Lorente D, Aleixos N, Gomez-Sanchis J, et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(4): 1 121 ~ 1 142.
- 6 Martinsen P, Schaare P. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 1998, 14(3): 271 ~ 281.
- 7 Peirs A, Scheerlinck N, Baerdemaeker J D, et al. Starch index determination of apple fruit by means of a hyperspectral near infrared reflectance imaging system[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2003, 11(5): 379 ~ 389.
- 8 洪添胜,乔军,Ning Wang,等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151 ~ 155.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 151 ~ 155. (in Chinese)
- 9 Menesatti P, Zanella A, D'Andrea S, et al. Supervised multivariate analysis of hyper-spectral NIR images to evaluate the starch index of apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 2(3): 308 ~ 314.
- 10 邹小波,陈正伟,石吉勇,等. 基于近红外高光谱图像的黄瓜叶片色素含量快速检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 152 ~ 156.
Zou Xiaobo, Chen Zhengwei, Shi Jiyong, et al. Rapid detection of cucumber leaves pigments based on near infrared hyperspectral image technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 152 ~ 156. (in Chinese)
- 11 黄敏,朱启兵. 基于SVD的苹果粉质化高光谱散射图像特征提取[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 767 ~ 770.
Huang Min, Zhu Qibing. Feature extraction of hyperspectral scattering image for apple mealiness based on singular value decomposition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 767 ~ 770. (in Chinese)
- 12 赵桂林,朱启兵,黄敏,等. 基于高光谱图像技术的苹果粉质化LLE-SVM分类[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2 739 ~ 2 743.
Zhao Guilin, Zhu Qibing, Huang Min, et al. LLE-SVM classification of apple mealiness based on hyperspectral scattering image[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(10): 2 739 ~ 2 743. (in Chinese)
- 13 Lu R F, Peng Y K. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 167 ~ 171.
- 14 ElMasry G, Wang N, ElSayed A, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(1): 98 ~ 107.
- 15 Noh H K, Lu R F. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(2): 193 ~ 201.
- 16 Peng Y K, Lu R F. Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1): 52 ~ 62.
- 17 周竹,李小昱,高海龙,等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128 ~ 133,185.
Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Gao Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by

- hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 128 ~ 133, 185. (in Chinese)
- 18 单佳佳,彭彦昆,王伟,等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140 ~ 144. Shan Jiajia, Peng Yankun, Wang Wei, et al. Simultaneous detection of external and internal quality parameters of apples using hyperspectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 140 ~ 144. (in Chinese)
- 19 Polder G, Heijden G W, Young I T. Tomato sorting using independent component analysis on spectral images[J]. Real-time Imaging, 2003, 9(4): 253 ~ 259.
- 20 Polder G, Heijden G W, Young I T. Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 1 155 ~ 1 161.
- 21 Rajkumar P, Wang N, Elmasry G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194 ~ 200.
- 22 Cen H, Lu R, Mendoza F A, et al. Assessing multiple quality attributes of peaches using optical absorption and scattering properties[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(2): 647 ~ 657.
- 23 程国首,郭俊先,肉孜·阿木提,等. 基于高光谱图像技术预测苹果大小[J]. 农机化研究, 2012, 34(6): 108 ~ 112.
- 24 Sugiyama T, Sugiyama J, Tsuta M, et al. NIR spectral imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among blueberries[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(3): 244 ~ 252.
- 25 Lu R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 523 ~ 530.
- 26 Kim M S, Chen Y R, Mehl P M. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 721 ~ 729.
- 27 Mehl P M, Chen Y R, Kim M S, et al. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 67 ~ 81.
- 28 Xing J, Baerdemaeker J. Bruise detection on 'Jonagold' apples using hyperspectral imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(2): 152 ~ 162.
- 29 Xing J, Bravo C, Jancsok P T. Detecting bruises on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(1): 27 ~ 36.
- 30 Xing J, Karoui R, Baerdemaeker J D. Combining multispectral reflectance and fluorescence imaging for identifying bruises and stem-end/calyx regions on Golden Delicious apples[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2007, 1(1): 105 ~ 112.
- 31 Ariana D P, Lu R F. Evaluation of internal defect and surface color of whole pickles using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 583 ~ 590.
- 32 蔡健荣,王建黑,黄星奕,等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 26 ~ 30. Cai Jianrong, Wang Jianhei, Huang Xingyi, et al. Detection of rust in citrus with hyperspectral imaging technology[J]. Opto-electronic Engineering, 2009, 36(6): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 33 李江波,饶秀勤,应义斌,等. 基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 222 ~ 228. Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Detection of navel oranges canker based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 222 ~ 228. (in Chinese)
- 34 李江波,王福杰,应义斌,等. 高光谱荧光成像技术在识别早期腐烂脐橙中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 142 ~ 146. Li Jiangbo, Wang Fujie, Ying Yibin, et al. Application of hyperspectral fluorescence image technology in detection of early rotten oranges[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(1): 142 ~ 146. (in Chinese)
- 35 Liu Y, Chen Y R, Wang C Y, et al. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of chilling injury in cucumbers: spectral and image analysis[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 101 ~ 111.
- 36 ElMasry G, Ning W, Vigneault C, et al. Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52(1): 1 ~ 8.
- 37 薛龙,黎静,刘木华. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2 277 ~ 2 280. Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on Navel orange surface by using hyperspectral imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2 277 ~ 2 280. (in Chinese)
- 38 薛龙,庄宏,黎静,等. 基于激光诱导荧光高光谱技术无损检测脐橙表面敌敌畏残留[J]. 中国农机化, 2012(1): 189 ~ 193.
- 39 陈菁菁,彭彦昆,李永玉,等. 基于高光谱荧光技术的叶菜农药残留快速检测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(14): 1 ~ 5.
- 40 Gomez-Sanchis J, Gomez-Chova L, Aleixos N, et al. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by penicillium digitatum in mandarins[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1): 80 ~ 86.
- 41 彭彦昆,张雷蕾. 光谱技术在生鲜肉品质安全快速检测的研究进展[J]. 食品安全质量检测技术, 2010, 27(2): 62 ~ 72. Peng Yankun, Zhang Leilei. Advancement of rapid detection of meat quality and safety by using spectral imaging technology[J].

- Food Safety Quality Detection Technology, 2010, 27(2): 62 ~ 72. (in Chinese)
- 42 Kamruzzaman M, ElMasry G, Sun D W, et al. Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 714: 57 ~ 67.
- 43 Qiao J, Wang N, Ngadi M O, et al. Prediction of drip-loss, pH, and color for pork using a hyperspectral imaging technique[J]. *Meat Science*, 2007, 76(1): 1 ~ 8.
- 44 Barbin D, Elmasry G, Sun D W, et al. Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2012, 719: 30 ~ 42.
- 45 Barbin D, Elmasry G, Sun D W, et al. Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork[J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 259 ~ 268.
- 46 Qiao J, Ngadi M O, Wang N, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(1): 10 ~ 16.
- 47 Kohler A, Bertrand D, Martens H, et al. Multivariate image analysis of a set of FTIR microspectroscopy images of aged bovine muscle tissue combining image and design information[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, 389(4): 1 143 ~ 1 153.
- 48 高晓东, 吴建虎, 彭彦昆等. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[J]. *农产品加工·学刊*, 2009(10): 33 ~ 37.
- 49 Naganathan G K, Grimes L M, Subbiah J, et al. Partial least squares analysis of near-infrared hyperspectral images for beef tenderness prediction[J]. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2008, 2(3): 178 ~ 188.
- 50 Naganathan G K, Grimes L M, Subbiah J, et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(2): 225 ~ 233.
- 51 彭彦昆, 江发潮. 肉制品嫩度无损检测的超光谱成像系统及检测方法: 中国 101178356[P]. 2008-05-14.
- 52 吴建虎, 彭彦昆, 陈菁菁, 等. 基于高光谱散射特征的牛肉品质参数的预测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1 815 ~ 1 819.
- Wu Jianhu, Peng Yankun, Chen Jingjing, et al. Study of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing beef quality characteristics[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 1 815 ~ 1 819. (in Chinese)
- 53 吴建虎, 彭彦昆, 江发潮, 等. 牛肉嫩度的高光谱法检测技术[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 135 ~ 138.
- Wu Jianhu, Peng Yankun, Jiang Fachao, et al. Profiles for prediction of beef tenderness[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12): 135 ~ 138. (in Chinese)
- 54 Wu J H, Peng Y K, Li Y Y, et al. Prediction of beef quality attributes using VIS/NIR hyperspectral scattering imaging technique [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(2): 267 ~ 273.
- 55 Li Y Y, Zhang L L, Peng Y K, et al. Hyperspectral imaging technique for determination of pork freshness attributes [C] // *Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety III*, 2011: 1 ~ 9.
- 56 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 254 ~ 259.
- Zhang Leilei, Li Yongyu, Peng Yankun, et al. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(7): 254 ~ 259. (in Chinese)
- 57 Park B, Lawrence K C, Windham W R, et al. Multispectral imaging system for fecal and ingesta detection on poultry carcasses [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2004, 27(5): 311 ~ 327.
- 58 Park B, Lawrence K C, Windham W R, et al. Detection of cecal contaminants in visceral cavity of broiler carcasses using hyperspectral imaging[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(4): 627 ~ 635.
- 59 Park B, Lawrence K C, Windham W R. Performance of hyperspectral imaging system for poultry surface fecal contaminant detection[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3): 340 ~ 348.
- 60 Chao K, Yang C C, Kim M S, et al. High throughput spectral imaging system for wholesomeness inspection of chicken[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008, 24(4): 475 ~ 485.
- 61 Peng Yankun, Wang Wei. Prediction of pork meat total viable bacteria count using hyperspectral imaging system and support vector machines [C] // *Food Processing Automation Conference Proceedings 2008*, 2008: 198 ~ 208.
- 62 Peng Y K, Zhang J, Wang W, et al. Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(2): 163 ~ 169.
- 63 王伟, 彭彦昆, 张晓莉, 等. 基于高光谱成像的生鲜猪肉细菌总数预测建模方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 411 ~ 415.
- 64 陶斐斐, 王伟, 李永玉, 等. 冷却猪肉表面菌落总数的快速无损检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3 405 ~ 3 409.
- 65 Tao F F, Peng Y K, Li Y Y, et al. Simultaneous determination of tenderness and *Escherichia coli* contamination of pork using hyperspectral scattering technique[J]. *Meat Science*, 2012, 90(3): 851 ~ 857.