

文章编号:1001-5078(2013)12-1329-07

· 综述与评论 ·

农产品病虫害高光谱成像无损检测的研究进展

田有文,程 怡,吴 琼,牟 鑫
(沈阳农业大学信息与电气工程学院,辽宁 沈阳 110866)

摘 要:高光谱成像是一种新兴的无损快速检测技术,可以同时获取研究对象的图像和光谱信息,集成了光谱分析和图像处理的优势,已成为农产品病虫害信息快速、无损检测的重要手段之一,在农产品的溃疡病、褐斑病、白粉病、黑星病、腐烂、虫蛀等病虫害无损检测中的应用越来越广泛。本文简述了高光谱成像系统,总结分析了其在水果、蔬菜、肉类、谷物等农产品病虫害无损检测中的国内外最新研究进展,提出了农产品病虫害高光谱成像技术检测的未来研究方向,以期对相关研究人员的研究工作提供参考。

关键词:高光谱成像;农产品;病虫害;无损检测

中图分类号:S123 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.02

Research progress on hyperspectral imaging in nondestructive detection of agricultural products disease and pest

TIAN You-wen, CHENG Yi, WU Qiong, MU Xin

(College of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Hyperspectral imaging is an innovative nondestructive and rapid detection technology. It can get the image and spectral information of the researched object at the same time. It integrates the advantages of spectroscopic analysis and imaging processing. Hyperspectral imaging has been more and more widely used in nondestructive detection for agricultural products' disease and pest such as canker, leaf spot, powdery mildew, scab, spoilage, and so on. In this paper, the system of hyperspectral imaging is presented briefly. The latest progress of hyperspectral imaging in detecting agricultural products' disease and pest is investigated, including fruit, vegetable, meat and corn. Finally, the development direction of future research in agricultural products disease and pest detection using hyperspectral imaging is proposed, which provides references for related researchers.

Key words: hyperspectral imaging; agricultural products; disease and pest; nondestructive detection

1 引 言

农产品在储藏或加工中,有时会受到有害生物的侵染或不良环境的影响,从而其正常新陈代谢受到干扰,生理机能、组织结构发生一系列的变化,以至呈现反常的病变、虫害症状,如枯萎、腐烂、斑点、霉粉、花叶、虫蛀等^[1-2],这将造成农产品的产量下降、品质降低。解决此问题的关键是对农产品病虫害进行无损检测与早期预警,这对于推动农业高效、安全、持续发展具有十分重要的意义。

近年来,国内外一些学者采用机器视觉、光谱分

析、高光谱成像等光学技术开展了农产品病虫害无损检测的研究。机器视觉是利用三个可见波段(红、蓝、绿)来获取农产品病虫害的纹理、大小、颜色、形状等特性,以识别病虫害^[3-4],但其不能反应

基金项目:辽宁省“博士后集聚工程”项目(No. 2011921012);辽宁省教育厅科学技术研究项目(No. L2011114);辽宁省科学事业公益研究基金项目(No. 2012005015)资助。

作者简介:田有文(1968-),女,副教授,博士后,研究方向为图像识别,光谱分析在农业智能信息处理中的应用研究。E-mail:youwen_tian10@163.com

收稿日期:2013-03-30

农产品病虫害的化学或生物参数,从而影响其检测效果。光谱技术能检测农产品病虫害的生化信息^[5],但其只能检测样本的一部分。当农产品发生病虫害时,其空间参数分布不均匀,光谱信息不能代表整个农产品信息^[6]。高光谱成像技术结合了机器视觉和光谱技术的优势,可同时获取研究对象的空空间信息和光谱信息,已在农产品的品质检测方面得到广泛应用^[7-8],对农产品病虫害的内外部特性也可快速、无损地检测。此外,高光谱成像技术还有独特的优势,其可对每个图像的像素点提供上千波长的光谱信息,同时可对农产品进行可视化表达,生成生化参数分布图来展示感兴趣区域的参数分布。本文主要是结合高光谱成像技术在水果、蔬菜、肉类以及谷物等农产品病虫害无损检测研究应用方面最新研究成果,进行系统的总结与分析,供同行研究者借鉴。

2 高光谱成像系统

一个典型的基于光谱仪的“推扫式”高光谱成像系统主要包括光谱仪、相机、平移台、光源和计算机等^[9],如图 1 所示。利用 CCD 与光谱仪相结合获取待测样品的图像以及不同波长的连续光谱。通常光谱仪的光谱测量范围有三种类型,分别是 400 ~ 1000nm、900 ~ 1700nm 和 900 ~ 2500nm。样品放在平移台上移动,光源一般是卤素灯或 LED 光源。计算机用于控制平移台和处理数据。

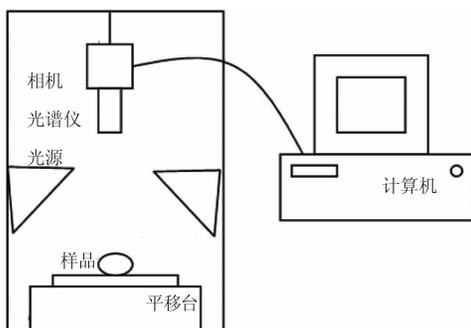


图 1 高光谱成像系统

Fig. 1 Hyperspectral imaging system

当检测对象以固定的速度垂直于成像光谱仪主轴平面移动时,通过高光谱成像采集系统对检测对象进行光谱图像采集。采集的高光谱图像可以用 3D 立方体来表示,如图 2 所示。 λ 坐标轴表示波长信息, x 和 y 坐标轴表示二维平面像素信息^[10],高光谱图像既具有某个特定波长下的图像信息,又具有某个特定像素在不同波长下的光谱信息。

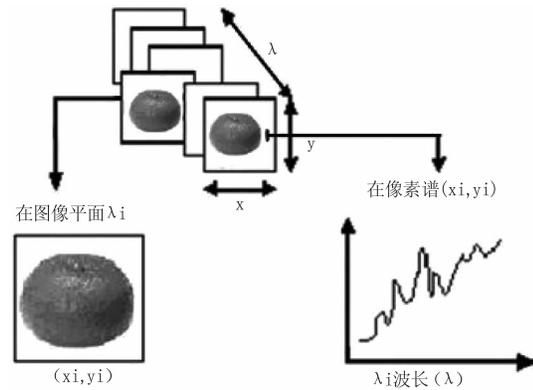


图 2 高光谱图像数据块

Fig. 2 Hyperspectral image data block

3 国外的研究进展

3.1 水果病虫害检测

水果在贮存过程中,有时会受到病虫害的侵染,从而引起水果产量与品质的降低,同时染有病虫害的水果对食品安全也会造成不良影响。尽管许多学者利用 X 射线、机器视觉等技术对水果病虫害进行无损检测^[11-15],但这些技术仅是获取了图像信息,没有反映待测物的光谱信息。而高光谱成像技术不仅能获得待测物的图像信息,还能获得反映其内部的光谱信息。据此国外一些学者应用高光谱成像技术对水果病虫害的判别进行了一些探索研究工作^[16-20]。

柑橘溃疡病是一种世界性重要病害,严重影响柑橘的产量和品质。Jianwei Q 等^[16]通过高光谱反射图像进行分析检测柑橘溃疡病。测量波长范围选为 400 ~ 900 nm 之间,采用主成分分析(PCA),选取了四个有效波段(553, 667, 718 和 858 nm),用图像处理 and 分类算法检测正常柑橘与病害柑橘,检测准确率为 92.7%。之后 Jianwei Q 等^[17]又采用优化的光谱信息散度(SID)对柑橘的病害溃疡病进行检测研究,优化阈值选为 0.008。试验结果得出正常柑橘与感染了溃疡病柑橘的检测分类精度达到 96.2%。这些研究结果表明,高光谱成像技术可用于从其他混杂疾病中鉴别柑橘溃疡病。

在包装阶段早期检测感染青霉菌的柑橘类水果是非常重要的,因为受感染的一少部分会导致大量水果感染,从而造成重大经济损失。Gómez-Sanchis. J 等^[18]用高光谱成像系统研究了感染青霉菌柑橘类水果的早期检测。波长范围选为 720 ~ 1020 nm。通过多元回归分析和遗传算法等,选择最佳相关波段 20 个。然后进行线性判别分析(LDA),成功检测感染青霉菌的柑橘正确率平均为 89.6%。作者还运用了分类回归树(CART)的方

法,对腐烂水果的检测准确率总是在91%以上。

李江波等^[19]为了有效早期检测腐烂水果,采用高光谱荧光成像以脐橙为研究对象对早期腐烂果进行早期检测。作者采用最佳指数OIF理论提取腐烂果的最优波段组合(498.6和591.4 nm)。采用最优波长的比图像及双阈值分割算法识别正常脐橙与腐烂脐橙,正确识别率达到100%。研究采用的波段少,利于实现在线检测。

象鼻虫是引起樱桃重大损失的害虫之一。Xing J等^[20]利用高光谱透视图象和反射光谱数据研究酸樱桃的内部虫害(象鼻虫)的无损检测,测量波长范围分别为580~980 nm和590~1550 nm。采用遗传算法(GA)方法优化选择两组最优反射光谱波段(780,850,1315,1430 nm和780,850,1070 nm),最后采用偏最小二乘判别分析法正确识别樱桃的内部虫害的准确率分别为82.11%和81.3%。同时研究发现使用高光谱透射成像方法不能很好地检测出虫害的樱桃。

目前应用高光谱成像技术开展水果病虫害的无损检测研究已经取得了一些理论成果,为进一步探索水果生产加工自动分级奠定了基础。但利用高光谱成像研究的水果种类还比较少,大部分研究是针对柑橘病害的检测,对于其他水果的研究几乎为空白。另外主要集中于水果表面病虫害研究,而对水果内部病虫害的无损检测还没有有效的方法。

3.2 蔬菜病虫害检测

蔬菜在种植和贮存运输时,由于受生长环境或运输环境的影响,比较容易发生病虫害^[21],从而给农业生产带来比较大的损失。而实时、灵敏、可靠的病虫害检测有利于尽早进行病虫害防治,提高农作物产量和质量,减少经济损失。蔬菜发生病虫害时会引发菜体的颜色、形状和内部组织结构变化,进而引起其图谱信息的变化,因此可以利用成像光谱技术对蔬菜病虫害情况进行检测^[22-29]。

洋葱酸皮病是最严重的细菌性病害之一,能侵染大多数品种的洋葱。Wang W等^[22]利用短波近红外高光谱反射图像对洋葱的酸皮病进行无损检测,波长范围选为950~1650 nm。通过主成分分析选取了两个最优波段(1070和1400 nm),利用这两个最优波段下的图像分别采用两种判别方法进行分析,一种方法为Fisher判别分析法,检测出感染伯克霍尔德氏菌的洋葱准确率达80%。另一种方法是利用支持向量机分析判别,结果表明可以辨别健康和感染伯克霍尔德氏菌的洋葱准确率达87.14%。

甜菜褐斑病、白粉病和锈病是影响甜菜生产的世界性重要病害^[23]。Mahlein A-K等^[24]利用高光谱成像技术对甜菜叶片的褐斑病、白粉病和锈病进行了无损检测。采用高光谱成像获取波长范围为400~1000 nm甜菜的高光谱图像,连续检测甜菜叶片感染病菌后病症的变化。作者提取某一像素点的光谱,采用光谱角制图分类的方法,对染病8、11、14、17、20天后的甜菜褐斑病、白粉病和锈病分别进行了分类,健康叶片与病变叶片最高正确分类率分别为98.9%、97.2%和61.7%。

马铃薯黑星病是一种表皮疾病,严重影响马铃薯的品质和价格。Dacal-Nieto A等^[25]应用高光谱成像技术检测马铃薯黑星病。采用支持向量机(SVM)和随机分类对映射在马铃薯块茎中的每个像素进行分类,通过光谱多维数据处理,结合SVM分类器对其马铃薯黑星病进行检测,准确度达97.1%。

蘑菇的机械损伤、冻伤等不会影响人们的健康,但会降低市场销售吸引力,产生重大的经济损失。Gaston E等^[26]通过高光谱成像技术对蘑菇的褐斑病和机械损伤进行无损检测。利用偏最小二乘判别分析法(PLSDA)和决策树对正常蘑菇和染有褐斑病的蘑菇、受机械损伤的蘑菇的光谱图像进行分析判别,正确率达95%以上。Aoife A. Gowen等^[27]利用高光谱成像检测白蘑菇的冻害。在400至1000 nm的波长范围内,采集蘑菇样品的高光谱图像,通过主成分分析和线性判别分析方法对健康蘑菇和冻害蘑菇进行分类。研究结果为健康蘑菇分类正确率达100%,冻害蘑菇分类正确率达97.9%。对解冻害45分钟后的蘑菇分类准确率达95%以上。

高光谱成像技术主要通过研究蔬菜正常图谱与病虫害图谱的差异,建立模型来检测蔬菜病虫害情况。目前高光谱成像技术应用于蔬菜病虫害的研究已经取得了一些成果,成为研究蔬菜病虫害情况的先进手段之一。但离实际生产应用还有一定的差距。

3.3 肉类病害检测

在肉类食品加工时,生鲜肉类的腐败及细菌感染指数超标,会变成致病菌危害大众,严重影响着食品安全,因此肉类的安全问题已经得到人们的广泛关注。早在1998年,美国农业部仪器与传感实验室(ILS)就进行了应用高光谱图像检测肉类品质的研究,进而很多学者开始了相关研究^[30-36]。

牛肉的腐败是由于微生物酶活动而分解和代谢

的结果。Peng Y 等^[32]研究了牛肉的腐败分解问题。利用高光谱成像技术,在反射率图像中获取 400 ~ 1100 nm 的光谱区域,采用多元线性回归分析洛伦兹参数与活细菌总数下的不同波谱的关系,构建每克牛肉的活细菌总数预测模型,得到最佳预测相关系数 R^2 为 0.96。

Du Z 等^[33]提出了一种特征降维的高光谱图像分析方法用于检测家禽屠体的皮肤肿瘤的光谱波段选择。作者推导出一组回归方程快速计算波段间的差异,以进行波段降维。然后运用支持向量机检测家禽屠体的皮肤肿瘤,最终得出了 90.6% 的检出率,满足畜禽加工业的要求,同时为实时处理节约计算量。

猪肉是市场上重要的肉类产品,其在冷藏过程中受不良条件的影响易产生不良细菌的生长,从而影响产品的质量和安全。Barbin DF 等^[34]利用近红外(NIR)高光谱成像技术检测猪肉腐败变质情况。通过获取 900 ~ 1700 nm 的波段范围的光谱区域,用偏最小二乘法(PLS)分析猪肉内含总活菌数(TVC)和嗜冷菌数(PPC)的对数值与光谱信息的关系,回归分析得到相关系数 R^2 分别为 0.86 和 0.89,对腐败猪肉的检测精度超过 95%。

Feng YZ 等^[35]利用高光谱成像技术检测感染肠杆菌的鸡片。获取全波长的光谱范围 930 ~ 1450 nm,利用二阶导数和加权 PLS 回归系数(BW)的组合选择重要波长为 930,1121 和 1345 nm,由此建立预测鸡片的肠杆菌数量的模型,分析得到相关系数 R^2 分别为 0.89,0.86 和 0.87。另外给出了鸡片上肠杆菌预测分布图。

王伟等^[36]利用高光谱成像技术结合相应的建模方法预测生鲜猪肉中细菌总数(TVC)。通过最小二乘支持向量机(LS-SVM)建模,与标准平板菌落计数法所检测 TVC 的相关系数分别为 0.9872 和 0.9426,校正均方根误差和预测标准均方根误差分别为 0.2071 和 0.2176。研究结果表明,高光谱成像技术结合 LS-SVM 预测建模方法可快速、非破坏预测生鲜猪肉。

上述研究结果表明高光谱成像技术能够实现肉类病菌的快速无损检测。肉类病菌的无损检测主要是通过研究光谱特征与病菌个数之间的相关性,建立模型来预测病害情况,检测肉类病害的发生发展情况。但应用高光谱成像技术开展肉类病菌的检测研究主要以鸡肉、牛肉与猪肉为对象集中于实验室研究,因此有必要进行其他肉类病虫害光谱辐射特

性的深入研究。

3.4 谷类病虫害检测

谷物感染病虫害会产生严重的问题,将会快速降低其产量和品质。而且由真菌产生的毒枝菌素是有毒的,对人类和动物的营养是有害的。因此健康谷物和感染病虫害谷物应在收获时可靠分离。谷物感染病虫害时,其外观特征和内在特性与健康谷物有明显差别,故可采用高光谱成像技术对谷物病虫害进行无损检测。

Yao H 等^[37]利用高光谱成像的黄绿色荧光(BGYF)对玉米粒的黄曲霉毒素病害进行检测。分析玉米粒的高光谱 BGYF 响应,初步结果显示在 500 ~ 515 nm 的波长范围内对黄曲霉毒素识别较为明显,并且可检测到不正常的玉米粒内核。

Del Fiore. A 等^[38]用高光谱成像方法来检测玉米真菌感染。运用主成分分析法,对波长进行选择和处理分析,得到 4 个特征波长为 410 nm、470 nm、535 nm 和 945 nm。然后通过方差分析(ANOVA)和费舍尔显著性差异(LSD)测试,得到玉米真菌感染检测准确率达 95%。

Singh CB 等^[39]利用近红外(NIR)光谱成像区分正常小麦与虫蛀小麦的损害。发现 1000 ~ 1600 nm 波段范围内存在差异,通过主成分分析得到最佳波长(1101.69 和 1305.05 nm),结合直方图并使用线性判别分析(LDA)和二次判别分析(QDA)对健康小麦与虫蛀小麦判别,结果表明正确分类率达 85% ~ 100%。

Chandra B. Singh 等^[40]利用近红外高光谱成像系统检测小麦虫害。通过近红外高光谱成像系统(波长范围为 900 ~ 1700nm)采集正常小麦和被米象虫、甲虫等害虫侵蚀的小麦的图谱信息。然后进行高光谱数据降维,提取统计和直方图特征参数,由线性分类、二次判别分析(QDA)和 BP 神经网络(BPNN)分类,结果表明健康小麦正确识别率为 96.4%,虫蛀麦粒的精准率达 91.1% ~ 100%。

Min Huang 等^[41]利用高光谱透射成像技术检测虫蛀大豆。高光谱透射图像采集的波长范围为 400 ~ 1000 nm,提取四个统计图像特征(最小值、最大值、平均值和标准差),采用支持向量数据描述(SVDD)方法进行分类。采用 SVDD 对正常大豆与虫蛀大豆分类的准确度达到了 95.6%。研究表明高光谱成像技术可以准确检测出虫蛀的大豆。

储藏中的谷物极易发生虫害,造成的经济损失也很大。因此张洪涛^[42]等利用近红外高光谱成像

系统研究了仓储小麦活虫的检测。应用相邻波长指数法对 1320 至 1680 nm 之间的 110 个波长的高光谱图像进行分析,选出最优波长为 1417.2 nm,采用双区域连通阈值面积比的区域生长法进行判别,即当粮虫的双区域连通阈值面积比大于 0.5 时,判别为活虫。结果显示可正确的识别仓储粮虫和死虫的准确率达 100%。

高光谱成像技术对谷物病虫害的检测主要是基于室内的实验研究,已经取得的成果表明利用高光谱成像进行谷物病虫害无损检测具有可行性,但这方面的研究还需进一步深入。如高光谱成像空间分辨率有待进一步提高,谷物感染病虫害空间分布进一步精细化,为谷物病虫害防治提供更有效的技术手段。

3.5 其他农产品检测

烟草病害一直是人们关注的热点。Yusuf BL 等^[43]利用高光谱成像采集的 380 ~ 1030 nm 波长之间的数据,检测烟草植物黑胫病。由光谱灵敏度的反射率的参数被用于发现用于确定和评价由黑柄真菌的损害水平的最优波长,通过主成分分析(PCA)得到 283 和 330 nm 对应的频带中的 730 和 790 nm 的波长是最有用的判别黑胫病严重性级别。

Wang J 等^[44]利用高光谱反射成像的方法检测冬枣果实的外部虫害,获取光谱区域为 400 ~ 720 nm。通过逐步判别分析来确定有效波长。根据研究结果,98% 的完整无虫害的冬枣和 94% 有虫害冬枣被检测出来,整体检测的正确率达 97%。

综上所述,国内外研究学者应用高光谱成像技术进行水果、蔬菜、肉类以及谷物等农产品病虫害的无损检测方面做出了一些探索性研究工作,针对不同的农产品病虫害提出了一些算法,取得了较好的检测率。

4 结论与展望

高光谱成像技术是传统成像技术和光谱技术有机融合形成的一项新的无损检测技术,通过光谱中的每个波段记录一个图像,也能反映每个空间像素点的光谱信息,从而弥补了传统光谱分析与成像技术的缺点。已取得的研究成果表明高光谱成像能同时获取研究对象的光谱信息和空间分布信息,可快速、准确地进行农产品病虫害无损检测,充分展示了高光谱成像技术的优势和潜力。但高光谱图像技术应用于农产品病虫害无损检测的研究是刚兴起的研究热点,该技术在该领域的研究还有许多方面有待进一步探索:

(1) 高光谱成像技术对农产品病虫害的检测主要集中于实验室的理论研究,已经取得的成果表明利用高光谱成像技术进行农产品病虫害检测具有可行性,但对于在实际生产现场应用高光谱成像对农产品病虫害实时检测以实现自动分级还面临着许多困难,如光谱成像仪复杂、昂贵,图谱数据难以批量处理、选择的波长过多。所以应研究简化光谱成像仪,优化软件算法,优选 2 ~ 3 个波长,开发手持式光谱成像分析仪,以实现农产品病虫害实时快速的无损检测,为农产品加工实用化和产业化提供技术支撑。

(2) 目前大多研究团队多是利用高光谱反射、荧光对农产品病害(如白粉病、灰霉病、溃疡病、黑星病、腐烂等)进行无损检测,并取得较好的预测结果,但由于高光谱成像技术的局限性,不能反映研究对象的内部物理结构,应用高光谱成像对农产品的内部虫害检测研究成果几乎空白。对于农产品的内部虫害的无损检测必须结合其他成像技术,如 X-ray 成像技术、荧光成像技术等,使高光谱成像与这些成像技术优势互补,因此多种技术如何有效融合以实现农产品的内部虫害无损检测的研究空间也是很大的。

(3) 目前检测农产品病虫害信息基本上都是静态信息,而不是监视农产品病虫害发生、发展过程的动态信息。同时对农产品病虫害的空间分布特征的研究还较少。在今后的研究中一方面应注重连续监测农产品受病虫侵染情况,以客观反映农产品受病虫害后的变化规律。另一方面加强图像处理算法与光谱分析方法融合的研究,使农产品受病虫害侵染情况的空间分布研究更加精细化,为农产品病虫害的预报预警提供技术支撑。

随着图像处理技术、光谱分析技术、信息技术等快速发展和深度融合,高光谱成像技术在农产品病虫害无损检测方面有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Brader B, Lee R C, Plarre R, et al. A comparison of screening methods for insect contamination in wheat[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2002, 38 (1): 75 - 86.
- [2] Camargo A, Smith J S. Image pattern classification for the identification of disease causing agents in plants [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 66 (2): 121 - 125.
- [3] Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Li Peiwu, et al. Near-infrared spec-

- tral detection of moldy chestnut based on GA-LSSVM and FFT [J]. *Trans of the ASAE*, 2011, 27(3): 331 - 335. (in Chinese)
- 周竹, 李小昱, 李培武, 等. 基于 GA-LSSVM 和近红外傅里叶变换的霉变板栗识别 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 331 - 335.
- [4] Zayas, I Y, Flinn, P W. Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision [J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41: 883 - 888.
- [5] Perez Mendoza, J., Throne, J. E., Dowell, F. E., Baker, J. E. Detection of insect fragments in wheat flour by near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2003, 39: 305 - 312.
- [6] Feng Yaoze, Sun Dawen. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(11): 1039 - 1058.
- [7] Peng Yanying, Sun Xudong, Liu Yande. Research progress of hyperspectral imaging in nondestructive detection of fruits and vegetables quality [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(6): 586 - 592. (in Chinese)
- 彭彦颖, 孙旭东, 刘燕德. 果蔬品质高光谱成像无损检测研究进展 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(6): 586 - 592.
- [8] Zhu Rongguang, Ma Benxue, Gao Zhenjiang, et al. Research progress in nondestructive detection of livestock product quality based on hyperspectral imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1067 - 1071. (in Chinese)
- 朱荣光, 马本学, 高振江, 等. 畜产品品质的高光谱图像无损检测研究进展 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(10): 1067 - 1071.
- [9] Gowena A A, O' Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(12): 590 - 598.
- [10] Mahesh S, Manickavasagan A, Jayas D S, et al. Feasibility of near-infrared hyperspectral imaging to differentiate Canadian wheat classes [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(1): 50 - 57.
- [11] Harvey, R B. The x-ray inspection of internal defects of fruits and vegetables [J]. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, 1937, 35: 156 - 157.
- [12] Thomas P, Kannan A, Degwekar T V H, et al. Non-destructive detection of seed weevil-infested mango fruits by X-ray imaging [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1995, 5(1-2): 161 - 165.
- [13] Sergio Cubero, Nuria Aleixos, Enrique Moltó, et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2011, (4): 487 - 504.
- [14] Munoz Marf J, Bruzzone L, Camps Valls G. A support vector domain description approach to supervised classification of remote sensing images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 2007, 45(8): 2683 - 2692.
- [15] LU R F, PENG Y K. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2): 161 - 171.
- [16] Jianwei Q, Thomas F. Burks, Moon S. Kim. Citrus canker detection using hyperspectral reflectance imaging and PCA-based image classification method [J]. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2008, 2(3): 168 - 177.
- [17] Jianwei Q. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(2): 183 - 191.
- [18] Gómez Sanchis J, Gómez Chovab 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.
- [19] 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)
- 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.
- [20] Xing J, Guyer D, Ariana D, et al. Determining optimal wavebands using genetic algorithm for detection of internal insect infestation in tart cherry [J]. *Instrumentation for Food Quality*, 2008, 2(3): 161 - 167.
- [21] LI Baoju. Research and prospect of vegetable diseases in China [J]. *China Vegetables*, 2006, (1): 1 - 5. (in Chinese)
- 李宝聚, 我国蔬菜病害研究现状与展望 [J]. *中国蔬菜*, 2006, (1): 1 - 5.
- [22] Wang W, Li C, Tollner EW, et al. Shortwave infrared hyperspectral imaging for detecting sour skin (*Burkholderia cepacia*)-infected onions [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 38 - 48.
- [23] Mahlein A K, Steiner U, Dehne H W, et al. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases [J]. *Oerke in Precision Agriculture*, 2010, (11): 413 - 431.
- [24] Mahlein A K, Ulrike Steiner, Christian Hillnhütter, et al. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases [J]. *Plant*

- Methods,2012,(8):3-12.
- [25] Dacal Nieto A, Formella A, Carrión P. Common scab detection on potatoes using an infrared hyperspectral imaging system[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, 6976:303-312.
- [26] Gaston E, Frias JM, Cullen P, et al. Visible near-infrared hyperspectral imaging for the identification and discrimination of brown blotch disease on mushroom (*agaricus bisporus*) caps[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2010, 18(5):341-353.
- [27] Aoife A. Gowen, Masoud Taghizadeh, Colm P. O'Donnell. Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(1):7-12.
- [28] Ataş M, Yardımcı Y, Temizel A. A new approach to aflatoxin detection in chili pepper by machine vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 87:129-141.
- [29] Y Liu, Y R Chen, C Y Wang, et al. Development of simple algorithm for detection of chilling injury in cucumbers from visible/near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Appl. Spectrosc.*, 2005, 59(1):78-85.
- [30] Lu R F, Chen Y R. Hyperspectral imaging for safety inspection of food and agricultural products[C]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3544:121-133.
- [31] Bosoon Park, Kurt C Lawrence. Performance of hyperspectral imaging system for poultry surface fecal contaminant detection[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3):340-348.
- [32] Peng Y, Zhang J, Wu J, et al. Hyperspectral scattering profiles for prediction of the microbial spoilage of beef[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(2):163-169.
- [33] Du Z, Jeong MK, Kong SG. Band selection of hyperspectral images for automatic detection of poultry skin tumors[J]. *Automation Science*, 2007, 4(3):332-339.
- [34] Barbin DF, ElMasry G, Sun DW, et al. Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 17(1):180-191.
- [35] Feng YZ, ElMasry G, Sun DW, et al. Near-infrared hyperspectral imaging and partial least squares regression for rapid and reagentless determination of *Enterobacteriaceae* on chicken fillet[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2-3):1829-1836.
- [36] Wang Wei, Peng Yankun, Zhang Xiaoli. Study on modeling method of total viable count of fresh pork meat based on hyperspectral imaging system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2010, 30(2):311-317. (in Chinese) 王伟, 彭彦昆, 张晓莉. 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.
- [37] Yao H, Hruska Z, Brown RL, et al. Hyperspectral bright greenish-yellow fluorescence (BGYF) imaging of aflatoxin contaminated corn kernels[C]. *Proc. SPIE 6381, Optics for Natural Resources, Agriculture, and Foods*, 63810B, doi:10.1117/12.686217.
- [38] Del Fiore A, Reverberi M, Ricelli A, et al. Early detection of toxigenic fungi on maize by hyperspectral imaging analysis[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 144(1):64-71.
- [39] Singh CB, Jayas DS, Paliwal J, et al. Detection of insect-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Journal of Stored Products*, 2009, 45(3):151-158.
- [40] Chandra B. Singh, Digvir S. Jayas, Jitendra Paliwal, et al. Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 73(2):118-125.
- [41] Min Huang a, Xiangmei Wana, Min Zhang, et al. Detection of insect-damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1):45-49.
- [42] Zhang Hongtao, Mao Hanping, Han Lühua. Detection of live *Sitophilus oryzae* (L.) in stored wheat by near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(8):263-268. (in Chinese) 张洪涛, 毛罕平, 韩绿化. 近红外高光谱成像技术检测粮仓米象活虫[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8):263-268.
- [43] Yusuf BL, He Y. Application of hyperspectral imaging sensor to differentiate between the moisture and reflectance of healthy and infected tobacco leaves[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(29):6267-6280.
- [44] Wang J, Nakano K, Ohashi S, et al. Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(4):345-351.