DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.03.015

基于高光谱成像技术的灵武长枣常见缺陷检测

Detection of common defects in jujube fruit using hyperspectral imaging

王婉娇　贺晓光　王松磊　刘贵珊　吴龙国

WANG Wan-jiao　HE Xiao-guang　WANG Song-lei　LIU Gui-shan　WU Long-guo

(宁夏大学农学院,宁夏 银川　750021)

(*School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

摘要:以灵武长枣为研究对象,利用高光谱成像技术结合主成分分析法(principal component analysis,PCA)和最小噪声分离法(minimum noise fraction,MNF)对长枣缺陷进行快速检测与识别,主要探讨样本背景对缺陷识别的影响。首先,采集虫眼、裂痕、正常枣的高光谱图像,利用 PCA 法和 MNF 法分别对其降维去噪,选择虫眼与正常枣的 PC1 和 M1 图像、裂痕枣的 PC2 和 M2 图像进行缺陷识别,经 PCA 分析后的缺陷识别率均为 100%,MNF 处理后的识别率分别为 69.2%,56.8%,100%;随后对其高光谱图像进行掩模去背景,再对其降维去噪后检测识别,PCA 后的识别率均为 100%,MNF 后的识别率分别为 73.1%,65.9%,100%。结果表明:利用高光谱成像技术结合两种降维去噪法对长枣常见缺陷的识别是可行的,背景干扰对于 PCA 法的缺陷识别不影响,其识别效果优于 MNF 法,且去背景后的 MNF 法缺陷识别率较未去背景的有所提高,为后续长枣缺陷的在线检测提供理论依据。

关键词:高光谱成像技术;主成分分析;最小噪声分离;掩模;长枣;缺陷

Abstract: A hyperspectral imaging technology combined with the principal component analysis (PCA) and the minimum noise fraction (MNF) methods were developed for the detection of common defects in Lingwu long jujubes, and investigated the influence of the background to recognition of defects. Firstly, the hyperspectral images of jujube samples (insect hole, crack and intact jujubes) were acquired. Secondly, the PCA and MNF methods were used to reduce dimensionality of hyperspectral images and to separate the noise from signals effectively. The PC1 and M1 images of insect hole and intact jujube, PC2 and M2 images of crack jujube were selected to distinguish different type of jujubes. By the PCA method, the classification rates of three kinds of jujubes all were 100%. And by the MNF method, the classification rates of insect hole jujubes, crack jujubes and intact jujubes were 69.2%, 56.8%, 100%, respectively. Then, the masked original hyperspectral images were to remove the effect of background and analyzed by the PCA and MNF method again. The classification rates by the PCA method were all 100%, and the classification rates by the MNF method were 73.1%, 65.9%, 100%, respectively. The results showed that the hyperspectral imaging technology combined with PCA and MNF methods were feasible. The influence of the background by the MNF method to defect recognition was slight and the impact to defect recognition by the PCA method gained the advantage over the MNF method. The recognition rate of the MNF method combined with background mask was better than that of no background mask, and to provide the theory basis for the common defects of online detection in future.

Keywords: hyperspectral imaging; principal component analysis; minimum noise fraction; masking; long jujubes; defect

灵武长枣又名马牙枣,产于宁夏灵武,是宁夏具有地方特色的农产品之一。色红个大,果实呈长椭圆形或圆柱形,果鲜味美,质地酥脆,为鲜食水果的"果中之王",营养丰富,具有良好的养生功效,深受消费者喜欢,成为宁夏特色产品之一[1]。因其在生长发育过程中不可避免会受到各种病虫害和自然环境的影响,出现虫害裂痕等常见缺陷,从而影响长枣的销售量和可食率。而传统的人工与机械的检测手段耗时费力、效率低,对枣果易造成损伤,并且卫生质量难以达标,无法满足其商品化需求,制约了宁夏长枣产业的长远发展[2]。为了保证并促进枣果产业的迅速发展,长枣的采后检测显得尤为重要,不但要降低检测成本,同时对检测技术也提出了更高的要求,可实时、在线、快速、无损地检测长枣品质的光谱技术成为了目前研究的热点。

近红外光谱技术在农产品品质检测方面应用广泛,但是检测区域局限,且无法获取待测样品的图像信息。新一代集中了光学、光电子学、电子学、信息处理、计算机科学等领域

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAF07B06);国家自然科学基金资助项目(编号:31060233);2011 年度宁夏回族自治区科技攻关计划项目(编号:20110501)

作者简介:王婉娇(1990—),女,宁夏大学在读硕士研究生。
E-mail:604358543@qq.com

通讯作者:贺晓光

收稿日期:2015-01-08

的无损检测技术——高光谱成像技术，具有“快速、准确、无损、环保”等优势，可同时获取农产品的光谱与图像信息，并对其综合品质进行全面、快速、无损的检测，弥补传统检测法的缺陷与近红外光谱技术的不足，满足了对农产品常见缺陷进行实时、快速、无损检测的需求[3]。近年来，国内外学者利用高光谱成像技术对农产品检测做了大量的研究。Kangjin Lee[4]、Xing Juan[5]、Yasasvy N[6]、Qin Jian-wei[7]等分别利用高光谱图像技术检测苹果表面斑点缺陷、樱桃虫害、草莓损伤、柑桔溃烂等；苏文浩[8]、薛龙[9]、思振华[10]等分别利用高光谱图像技术检测马铃薯外部缺陷、梨表面压伤、羊肉表面污染等。目前，对枣类品质方面的研究越来越积极，余克强[11]、刘聪[12]、吴龙国[13]等分别利用高光谱成像技术实现了鲜枣裂纹的位置及大小信息特征的定性判别和定量识别的研究、应用近红外光谱建立了室温贮藏下鲜枣内部霉菌菌落总数变化的动力学模型、对灵武长枣的含水量进行了无损检测研究，并对比了不同建模效果，从而优选出最佳预测模型，为今后的长枣品质在线检测提供了理论依据。而结合光谱技术对枣类缺陷方面的主要研究有：王斌[14]、徐爽[15]、Zhang Shu-juan[16]等利用高光谱成像技术对腐烂、病害及正常的梨枣进行了建模分类；研究了长枣表面虫害的检测与识别；通过建立多元散射校正—连续投影—主成分分析—最小二乘支持向量机模型对新鲜枣细微损伤进行辨别。以上研究中关于高光谱图像处理的方法大多是 PCA 法，目前对于 MNF 法应用于农产品无损检测方面的研究鲜有报道，而关于样本背景对图像识别的影响方面的研究少见。

本试验利用近红外高光谱成像系统对 120 个样本枣进行图像采集，采用 PCA 法与 MNF 法结合未去背景与掩模去背景两种算法模型对长枣进行识别检测，以探讨利用高光谱成像技术结合 PCA 法与 MNF 法对长枣缺陷识别的可行性，研究两种降维去噪方法的掩模去背景与不去背景对长枣缺陷识别是否存在差异，以探讨样本背景干扰对高光谱图像缺陷识别的影响，从而优选出更适合的算法模型，以提高长枣缺陷检测的精确度，实现商品的优质优价。

1 材料与方法

1.1 试验材料

宁夏灵武长枣，通过手摘方式采摘了 120 个样本，其中虫眼枣 26 个，裂痕枣 44 个，正常枣 50，置于 4 ℃冰箱贮藏；试验时，将所有样本从冰箱中取出，进行清洗、晾干、编号，采集高光谱图像信息。

1.2 试验装置

高光谱成像光谱仪（北京卓立汉光仪器有限公司）。该高光谱成像系统由 5 部分组成，包括成像光谱仪（Imspector N17E 型，芬兰 Spectral Imaging Ltd 公司）、CCD 相机（Models XC-130 100 Hz 型，以色列 Ophir Optronics Solutions Ltd 公司）、光纤卤素灯（HSIA-LS-TDIF 型，北京 Zolix 公司）、电控载物平台（PSA200-11-X 型，北京 Zolix 公司）、计算机（联想 Inter(R) Core i7-2600CPU@3.40 GHz，RAM 4.00 G）。其波长范围为 900～1 700 nm，可获取 256 个波段光谱，光谱分辨率为 5 nm，图像分辨率为 320×300。

1.3 数据采集分析软件

高光谱图像数据的采集为设备自带的 Spectral-SENS 软件；数据处理采用 ENVI4.6（Research System Inc.，Boulder，Colo.，USA）软件；目标识别采用 Matlab R2009b（The Mathworks Inc，Natick，MA，USA）软件。

1.4 采集高光谱图像

1.4.1 图像标定 由于各波段下的光源强度分布不均、待检对象形态各异以及传感器中暗电流的存在，导致在光源强度分布较弱的波段下采集到的图像噪声明显，造成数据信息冗余，且不同波长下图像的亮度存在较大差异，因此，需要对获得的高光谱图像进行黑白标定[17]。标定公式如下：

$$R=\frac{I-D}{W-D} \tag{1}$$

式中：

I——样本原始光谱图像；

W——全白的标定图像；

D——全黑的标定图像；

R——经过标定后的光谱图像。

1.4.2 参数确定 为保证图像质量，针对存在表征差异的不同水果，采集图像前需设定合适的参数。为避免高光谱图像分辨率失真，保证图像清晰度，通过 CCD 相机的扫描频率确定电控位移平台的测试速度和距离[18]。经过反复调试和比对，最终确定测试参数：光源的稳流设置为 6.2 A，扫描距离为 180 mm，曝光时间为 10 ms，物距约为 385 mm，扫描速度设定为 15 mm/s。

1.4.3 图像采集 对样本枣进行分类编号，每 8 个长枣样本为一组，按照一定的顺序排列放置于电控位移平台上，关闭暗箱门，连接电机，电控位移平台通过移动，扫描获取样本枣的高光谱图像，图 1 所示为样本枣的原始图像与采集分割后单个枣的高光谱图像对比图。

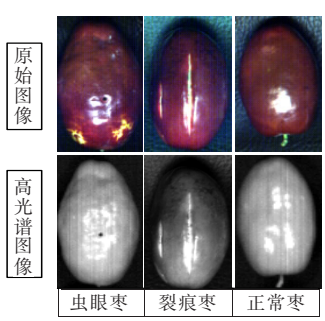

图 1 样本枣的原始图像与高光谱图像

Figure 1 The original images and hyperspectral image

1.5　数据处理方法

1.5.1　主成分分析　主成分分析法(principal component analysis,PCA),又被称为主分量分析法,在数学上也被称为 K-L 变换,是一种对多维数据进行有效降维的统计方法。它借助于正交线性变换,从大量冗余数据中筛选出少数互不相关的主成分信息重新组合成一组新的内容互不重叠的主成分图像,减少重复信息的同时又使图像信息得到增强,保留了对方差贡献最大的特征,尽可能在原始信息损失最小的前提下将多变量变换为尽可能少的互不相关的新变量,达到数据降维的目的[19]。由主成分分析原理可知,每个 PC 图像都是基于协方差等于零的前提下由高光谱所有波段下的原始图像与对应的权重系数乘积之和形成的[20],如式(2)所示:

$$PC_m = \sum_{i=1}^{n} a_i I_i (0 \leqslant n \leqslant 256, m \leqslant n) \quad (2)$$

式中:

PC_m——第 m 主成分图像;

a_i——第 i 个权重系数;

I_i——第 i 个波段图像;

n——原始图像波段数。

1.5.2　最小噪声分离　最小噪声分离法[21](minimum noise fraction,MNF)是由 Green 和 Berman 提出的,是一种能够有效降低高光谱数据维数和分离噪声的方法;即以最大化信噪比(signal to noise ratio,SNR)为衡量准则对主成分变换进行改进,不但能判断图像数据的内在特征维数,而且能将目标和噪声有效地分离出来[22]。采用最小噪声分离变换就是为了得到一系列信噪比由大到小排列的新图像,去除噪声的同时还可降低数据之间的相关性。MNF 法本质上是含有两次 PCA 处理的正交变换,但跟主成分分析又有明显差异,MNF 变换后得到的向量元素间无相关性,第一分量集中了大量样本信息,MNF 处理过的图像按照信噪比从大到小排列,质量随着波段数的增加逐渐下降,从而可降低噪声对图像质量的影响[23],其原理如式(3)所示:

$$\boldsymbol{T}_{MNF} = \boldsymbol{PV}(\boldsymbol{P} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{D}_{\boldsymbol{N}}^{-1/2}; \boldsymbol{D}_{\boldsymbol{N}} = \boldsymbol{U}^{T} \sum\nolimits_{\boldsymbol{N}} \boldsymbol{U}) \quad (3)$$

式中:

$\boldsymbol{T}_{MNF}$——MNF 的变换矩阵;

$\boldsymbol{P}$——变换矩阵;

$\boldsymbol{U}$——由特征向量组成的正交矩阵;

$\sum_{\boldsymbol{N}}$——噪音的协方差矩阵;

$\boldsymbol{D}_{\boldsymbol{N}}$——$\sum_{\boldsymbol{N}}$ 的特征值按照降序排列的对角矩阵;

$\boldsymbol{T}$——转置变换;

$\boldsymbol{V}$——由特征向量组成的正交矩阵。

2　结果与分析

2.1　图像数据分析

本试验中,采用设备自带的 Spectral-SENS 软件获取样本枣的高光谱图像,通过 ENVI4.6 数据处理软件对 120 个长枣图像进行主成分分析和最小噪声分离。图 2 为未掩模与掩模后长枣的前 3 个主成分图(PC1～PC3)和最小噪声分离图(M1～M3)。

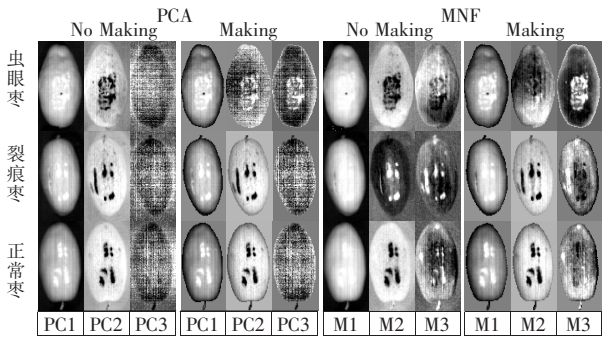

图 2　掩模前后的 PC 图与 M 图

Figure 2　PC and M images before and after the mask

由图 2 可知:① 掩模后的图像,可以降低背景噪声的干扰,使枣果轮廓更加清晰;② 对于正常枣、裂痕枣、虫眼枣的 PC 图来说,3 种类型长枣的 PC3 图像噪声干扰比较严重,轮廓模糊,缺陷部位难以进行识别;正常枣与虫眼枣的 PC1 相比 PC2 而言,包含枣果大部分特征信息,轮廓清晰,并且虫眼部位特征突出;而裂痕枣的 PC1 图虽然轮廓清晰,但光照影响严重,相反 PC2 图缺陷位置明显易于进一步识别。因此,选择正常枣与虫眼枣的 PC1 图、裂痕枣的 PC2 图进行后期图像识别。③ 对于正常枣、裂痕枣、虫眼枣的 M 图来说,3 种类型枣的 M 图比 PC 图更加清晰,噪音干扰小;通过对比 3 种类型的 M1～M3 图发现,虫眼枣的 M1 图像优于 M2、M3 图,虫眼部位与正常部位对比明显;裂痕枣的 M1 图像亮斑覆盖面积大,缺陷部位显示不明显,不利于缺陷的检测识别,M3 图像光照与缺陷部位重合,不利于进一步识别;正常枣的 M1 图像轮廓清晰,易于进行识别;因此,选择正常枣与虫眼枣的 M1 图像、裂痕枣的 M2 图像进行识别。

综上所述,选取正常枣、虫眼枣、裂痕枣的 PC 与 M 图像分别为 PC1、PC1、PC2,M1、M1、M2,进而进行后期的图像识别。

2.2　特征目标识别

通过对主成分图像与最小噪声图像的分析,利用 Matlab 软件对正常枣与虫害枣的 PC1、M1,裂痕枣的 PC2、M2 图像进行逐一识别。以裂痕枣为例,采用最小噪声分离法对掩模与未掩模的 M 图像进行分析,见图 3。首先,对裂痕枣选择进行掩模(阈值 0.2),获得掩模图像;然后分别对未掩模与掩模的裂痕枣图像进行最小噪音分离,得到 M1～M3 图,选取 M2 经图像取反、二值化、膨胀、连通度分析等方法进行图像识别;最终以图中缺陷位置是否出现白色为识别标准,缺陷部位白色出现,判为识别;未出现白色,则认为未识别。同理,对正常枣和虫眼枣进行识别,虫眼枣以虫眼部位是否出现白点为识别标准(杂点忽略不计),而正常枣则以未出现白点为识别。

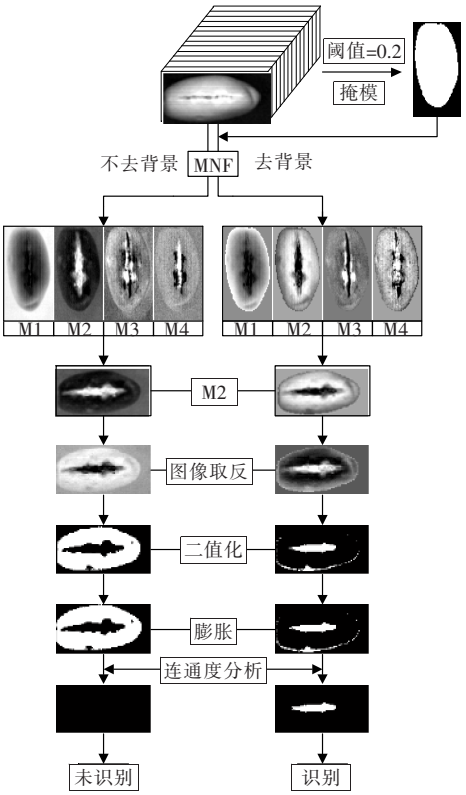

图 3 虫害识别流程图

Figure 3 Flow chart of insect pests recognition

2.3 目标识别结果

根据虫害识别流程图(图 3)的步骤对 120 个长枣逐个进行了识别,如识别结果(表 1)所示,正常枣、虫眼枣、裂痕枣经 PCA 法处理后,掩模与未掩模的识别率相同,说明不受背景干扰;而 3 种类型长枣经 MNF 法处理,正常枣的识别不受背景的影响,裂痕枣与虫眼枣受背景影响显著,虫眼枣、裂痕枣未掩模的识别率分别为 69.2%,56.8%;而掩模后的识别率分别为 73.1%,65.9%。通过对结果分析可知:正常枣的 PCA 与 MNF 识别效果相同,同时不受背景的影响;而裂痕枣、虫眼枣的 PCA 与 MNF 的识别效果差异明显,MNF 分析受背景影响显著,主要可能是背景中噪音信息造成的。

表 1 样本枣的识别结果†

Table 1 Sample date identification results

枣类型	样本数/个	PCA		MNF	
		NM	M	NM	M
虫害枣	26	100	100	69.2	73.1
裂痕枣	44	100	100	56.8	65.9
正常枣	50	100	100	100	100
合计	120	300	300	226	239

† NM. 未掩模去背景;M. 掩模去背景。

3 结论

本试验采用高光谱成像技术结合 PCA 法与 MNF 法,对比了掩模去背景与未掩模去背景长枣高光谱图像的缺陷识别效果,探讨了样本背景对高光谱图像缺陷识别的影响,结果表明:对于正常枣而言,无论是 PCA 法还是 MNF 法,背景对识别效果的影响不显著。对于裂痕枣与虫眼枣的 MNF 法识别,掩模效果显著,虫眼枣的识别率由 69.2%增加到 73.1%,裂痕枣的识别率从 56.8%增长到 65.9%。而且,通过对比 2 种分析方法可以看出,PCA 法对长枣的缺陷识别效果优于 MNF 法。

本试验对灵武长枣的虫眼枣、裂痕枣及正常枣的识别结果 PCA 方法效果优于 MNF 方法,但在本文中没有体现出 MNF 法的优势。其原因主要有:① 受样本自身表皮影响:枣果面积小,颜色暗,且表面光滑易导致得到的高光谱图像缺陷周围形成亮斑,由于缺陷部位对光的吸收使得缺陷部位不明显,而 PCA 法作用于高光谱图像后恰好又将亮斑影响滤去,使得缺陷部位较明显突出,从而易被识别;② 由于高光谱仪器内部光源的安装及结构因素,使得面积本来就小的枣果表面覆盖亮斑,影响部分高光谱图像的采集效果,从而导致后续程序处理中因为不同方法在原理上的区别而存在差异;③ 在实际应用中,高光谱图像数据的降维压缩一般倾向于主成分分析法,但当需要识别和分离数据中的噪声,降低高光谱数据处理计算量时,MNF 发挥的去噪作用会更好。而本次试验得到的结果,并非说明 MNF 法没有 PCA 法好,本研究在图像处理方法上为长枣常见缺陷的快速无损检测提供了导向和数据支持,并从侧面说明了可能 PCA 法更适合灵武长枣的缺陷识别。下一步将对 MNF 法进行深入的研究应用,并尝试采集大量样本,进一步去验证该识别算法的可靠性,以及探究如何能更好的发挥并体现 MNF 法应用于农产品无损检测方面的潜在优势。

参考文献

1 徐爽,何建国,易东,等. 基于高光谱图像技术的长枣糖度无损检测[J]. 食品与机械,2012,28(6):168~170.

2 刘燕德,张光伟. 高光谱成像技术在农产品检测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(5):223~242

3 Johnson Ⅲ Owen N, Slidell Mark, Kreishman Peter, et al. Hyperspectral imaging: an emerging technology as a potential novel adjunct in assessing peripheral perfusion deficits and success of lower extremity revascularizations[J]. Journal of the American College of Surgeons(S1072-7515), 2008, 207(3): S114.

4 Kangjin Lee, Sukwon Kang, Stephen R Delwiche, et al. Correlation analysis of hyperspectral imagery for multispectral wavelength selection for detection of defects on apples[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(2): 90~96.

5 Xing Juan, Guyer Daniel, Ariana Diwan, et al. Determining optimal wavebands using genetic algorithm for detection of internalinsect infestation in tart cherry[J]. Sens. & Instrumen. Food Qual, 2008,28(2):161~167.

6 Yasasvy Nanyam, Ruplal Choudhary, Lalit Gupta, et al. A decision-fusion strategy for fruit quality inspection using hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering,2012,111(1):118~125.

(下转第 86 页)

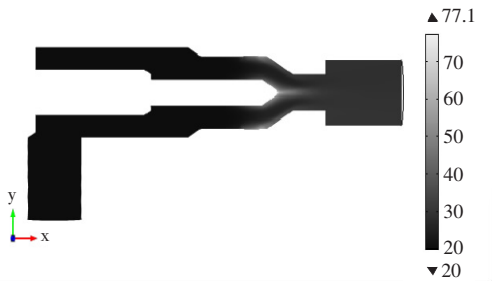

图 6　同轴处理室温度分布切片图

Figure 6　The slice of temperature distribution in the coaxial treatment chamber

4　结论

随着高压脉冲电场杀菌技术的发展,同轴处理室因处理量大的特点已成为工业规模杀菌系统的发展方向。本研究对自主设计制造的同轴处理室构建了三维模型,并利用 COMSOL 的耦合场分析功能对电场、流场及温度场进行了仿真分析。从仿真中可以看出,除了正电极内圆边缘处的电场强度不均匀以外,处理室内的其他部分电场强度比较均匀。处理室内的死区问题没有很好地解决,特别是在负电极杆的尖角处,这对杀菌效果极为不利。

结合仿真的结果,并根据试验过程中的具体问题,对增强杀菌效果,改善处理室的应用做以下建议:① 对同轴处理室的正电极内圆进行倒圆角,减小尖峰电场对 PEF 杀菌系统造成的影响,但是圆角半径不宜过大;② 在中试规模应用和工业化应用时,应将多个同轴处理室连接进行连续处理,既能保证处理时间,又能使充分混合的流体物料得到处理。

参考文献

1　平雪良,刘翠,杨瑞金,等. 高压脉冲电场静态处理室的研制[J]. 食品与生物技术学报,2010,29(2):193～196.

2　Mastwijk H C, Bartels P V. Integrated modular design of a pulsed electrical field treatment chamber: U. S. Patent 6,178,880[P]. 2001—01—30.

3　Jaeger H, Meneses N, Moritz J, et al. Model for the differentiation of temperature and electric field effects during thermal assisted PEF processing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 109～118.

4　方婷. 高压脉冲电场杀菌动力学及处理室改进研究[D]. 福州:福建农林大学, 2008.

5　解效白, 陈炜峰. 电磁脉冲高场强杀菌处理室的研制[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 13 081～13 084.

6　孙学兵, 方胜. 高压脉冲电场杀菌的工业化展望[J]. 食品与机械, 2002(1): 6～8.

7　Lindgren M, Aronsson K, Galt S, et al. Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2002, 3(3): 233～245.

8　Gerlach D, Alleborn N, Baars A, et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(4): 408～417.

9　Buckow R, Schroeder S, Berres P, et al. Simulation and evaluation of pilot-scale pulsed electric field (PEF) processing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(1): 67～77.

10　金伟,平雪良,吉祥,等. 高压脉冲电场共场杀菌处理室性能仿真与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(19):39～47.

(上接第 65 页)

7　Qin Jian-wei, Thomas F B, Mark A R, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2):183～191.

8　苏文浩,何建国,刘贵珊,等. 近红外高光谱图像技术在马铃薯外部缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械,2013,29(5):1～9.

9　薛龙,黎静,刘木华. 利用高光谱图像技术检测梨表面碰压伤的实验研究[J]. 粮油加工,2009(4):136～138.

10　思振华,何建国,刘贵珊,等. 基于高光谱图像技术的羊肉表面污染无损检测[J]. 食品与机械,2013,29(5):75～79.

11　余克强,赵艳茹,李晓丽. 基于高光谱成像技术的鲜枣裂纹的识别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(2):532～537.

12　刘聪,郭康权,张强,等. 基于近红外光谱的室温贮藏下鲜枣霉菌污染动力学模型[J]. 农业工程学报,2013,29(1):278～284.

13　吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于近红外高光谱成像技术的长枣含水量无损检测[J]. 光电子·激光,2014,25(1):135～140.

14　王斌,薛建新,张淑娟. 基于高光谱成像技术的腐烂、病害梨枣检测[J]. 农业机械学报,2013,44(1):205～209.

15　徐爽,易东. 利用高光谱成像技术检测长枣表面虫伤[J]. 电子制作,2013(21):47～48.

16　Zhang Shu-juan, Zhang Hai-hong, Zhao Yan-ru, et al. A simple identification model for subtle bruises on the fresh jujube based on NIR spectroscopy[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013,58(3～4): 545～550.

17　吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于 NIR 高光谱成像技术的长枣虫眼无损检测[J]. 发光学报,2013,11(34):1 527～1 532.

18　赵杰文,刘剑华,陈全胜,等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报,2008, 39(1):106～109.

19　Lu Ren-fen. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images[J]. Sens & Instrumen Food Qual, 2007(1): 19～27.

20　蔡健荣,王建黑,陈全胜,等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报,2009,25(1):127～131.

21　Green A A, Berman M, Switzer P, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65～74.

22　肖雄斌,厉小润,赵辽英. 基于最小噪声分离变换的高光谱异常检测方法研究[J]. 计算机应用于软件, 2012,29(4):125～128.

23　赵杰文,陈全胜,林颢,等. 现代成像技术及其在食品、农产品检测中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2010:72～74.