

叶菜失水条件下的高光谱图像特征分析研究

吴 琼^{1,2}, 陆安祥², 朱大洲³, 王 成³, 方晶晶¹, 纪建伟¹

(1. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100095;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘 要:通过采集小白菜、菠菜、油菜、娃娃菜这4种蔬菜的叶片,分别在失水0、10、24、48 h的状态下,利用成像光谱仪采集其光谱图像,对蔬菜叶片进行对比分析,利用高光谱成像技术对蔬菜新鲜度检测进行了初步探讨。结果表明:蔬菜在失水过程中,高光谱图像能反映其外观形态及内部叶绿素的光谱曲线变化,并利用主成分分析(PCA)方法实现对不同品种蔬菜叶片的分类定性判别的划分。从而说明利用高光谱成像来辨别蔬菜叶片新鲜度是可行的。

关键词:蔬菜;高光谱成像;失水;新鲜度;无损检测

中图分类号:TN 911.73 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)08-0005-05

蔬菜是商品性极强的农产品,而且以鲜销为主,产销链短、时限性强,卫生安全标准严、市场准入要求高,对标准化生产需求迫切。目前中国蔬菜产品的总量已经供过于求,今后蔬菜产业的发展要更多的依赖于扩大出口,推进标准化生产的时机已经成熟。经过几十年的努力,前人已经研究出一些蔬菜无损检测技术^[1],包括利用蔬菜的电学特性^[2]、光学特性^[3]、声波振动特性^[4]以及核磁共振技术^[5]、机器视觉技术^[6]、电子鼻技术^[7]和撞

击技术等^[8]。其中应用最广泛、最成功的检测方法是光学方法,它综合了光学传感器和数据处理技术,能对蔬菜品质进行高精度、高效率的检测和自动分选^[9]。从国外蔬菜目前的发展看,发达国家的蔬菜产业具有产业化程度高、科技含量高、蔬菜商品的国际市场竞争能力高等特征。他们通常都拥有自己独立的科研机构,并将其销售收入的10%左右投资于研究和开发领域,有的高达15%~20%。通过科研的高投入,保持其创新能力不断提高,保证自身始终处于科技创新的前沿,保持其在蔬菜知识产权领域中的垄断地位^[10]。国内也有一些专家学者近来开始关注对蔬菜的无损检测技术的研究。近年来国内外专家学者利用近红外光谱分析技术对蔬菜进行无损检测分析研究现状^[11-13]发现,虽然利用可见光投射和反射技术测定蔬菜品质始于20世纪50年代,但从目前国内外研究进展情况来看,研究成果还存在许多问题,尚有一定的缺陷与不足。由于蔬菜品种的多样性和品质的易腐变性,对其质检时限和环节提出了特殊要求,因此,尽管近红外光谱分析技术具有快速、绿色、环

第一作者简介:吴琼(1982-),女,辽宁辽阳人,博士,讲师,现主要从事农业信息化技术等研究工作。E-mail: wuqiong0615@sina.com.

责任作者:纪建伟(1963-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,现主要从事农业信息化技术等研究工作。E-mail: bage0615@sina.com.

基金项目:公益性行业(农业)科研专项资助项目(201003008);国家自然科学基金资助项目(31201125);北京市自然科学基金资助项目(4142019)。

收稿日期:2014-11-10

Abstract: Enzyme-linked immunosorbent assays (ELISA) was used as test material, to determine IAA, ABA, ZR and GA₃ contents and the ratio of these endogenous hormones, in order to study the relationship between cabbage cytoplasmic male sterility (CMS) and the content of endogenous hormones. These endogenous hormones were taken from buds of cytoplasmic male sterile line (CMS451) and its maintainer (Y03-6) during reproductive period. The results showed that the content of GA₃ and ZR in buds of CMS451 were lower than those of its maintainer, their contents increased first and decreased afterwards. IAA content of CMS451 was higher than that of its maintainer and decreased first and then increased while it continuously decreased in maintainer. The content of ABA in CMS451 was lower than that of its maintainer at mid-stage of microspore development, and was higher at the later stage. The results were concluded that, the abnormal hormone change in the bud development of cabbage CMS451 may be related to the microspore abortion.

Keywords: cabbage; cytoplasmic male sterility; endogenous hormone

保等特点,能对各种蔬菜进行定性和定量的分析,满足过程分析的要求^[14-15]。但近红外光谱容易受到取样位置(如不同的叶片部位)、装样条件等的影响,测定条件不易完全一致,易引起以系统误差为主的光谱不确定性。

高光谱成像技术是在可见/近红外光谱分析技术和机器视觉技术的基础上发展起来的,它将光谱分析技术和图像处理技术完美结合在一起。高光谱成像技术能获取图像中每个像素点的光谱,可对各个局部区域的光谱进行分析,也可通过准确提取不同波段下蔬菜的图像,选择特征波段下的图像,进行图像处理。高光谱成像技术图谱合一的优点使其在形态检测、组分诊断方面具有较大潜力,在研究个体差异性方面具有较大优势,最初主要用于航空、卫星遥感,随着其成本的降低,为近地应用提供了可能。

该试验利用高光谱成像技术图谱合一的优点,采用成像光谱仪获取不同品种的蔬菜在不同失水条件下的成像光谱,对不同品种蔬菜叶片的不同尺度、不同区域的特征进行分析,对在不同失水条件下的叶片营养组分信息分布情况进行诊断,旨在为建立对不同等级的蔬菜进行快速、无损检测提供方法探索。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用小白菜、菠菜、油菜、娃娃菜4种蔬菜的叶片在室内进行试验。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 每种蔬菜取具有代表性的6片叶,在常温下放置使其失水,分别在失水0、10、24、48 h的4个时间段,进行高光谱图像信息采集,其中失水0 h即对采集来的新鲜蔬菜立即测量。在采集4种蔬菜叶片的光谱图像信息时,每个叶片要正、反面各采集1次,取提取光谱反射率平均值。在采集蔬菜叶片的高光谱图像的同时,用机器视觉技术采集4种蔬菜叶片的可见光图像,以便后续对机器视觉成像效果与光谱成像效果的差异性进行对比分析。

1.2.2 高光谱成像系统 该研究采用的农业田间扫描成像光谱仪(pushbroom imaging spectrometer, PIS)由北京农业信息技术研究中心与中国科技大学联合研制,该系统由成像光谱仪、电机、导轨、可调式卤灯、外接笔记本电脑组成。光谱仪在应用之前,委托安徽光机所进行了定标和测试,确定了光谱仪每个通道的波长位置、光谱响应函数、辐射精度、空间定位等,以后会根据仪器性能的变化,相应的调整定标参数并定期定标,其主要性能参数为:光谱范围400~1 000 nm,光谱采样间隔0.7 nm,光谱分辨率2 nm,空间分辨率 ≥ 0.5 mm,图像分

辨率1 400(空间维) \times 1 024(光谱维),像元尺寸7.4 $\mu\text{m} \times$ 7.4 μm ,视场角16°。

1.2.3 蔬菜叶片光谱图像的采集和处理 试验选择19:00以后在密闭实验室进行,保证室内暗室环境,采用卤钨灯照射蔬菜叶片样品,避免日光灯及其它光源干扰,对4组不同失水时间段下的4个品种的蔬菜叶片进行正、反面光谱图像采集,每个品种测量6片叶,共24片叶。样品到光谱仪镜头的垂直高度为65 cm,导轨速度为2 mm/s,在卤钨灯光源照射下,成像光谱仪的成像范围宽度约为18 cm,设置好采集软件的各个参数,成像光谱仪的积分时间为160 ms,帧频为5 帧/s,试验装置如图1所示。成像光谱仪采集的原始数据是BMP格式的图片,要拼接成BIL格式的图像才可使用。处理过程:1)用自编的Matlab程序把BMP格式的图片拼接成BIL格式的整幅影像;2)采用遥感影像处理软件EVNI 4.4(the Environment for Visualizing Images)从原始的光谱图像中进行光谱提取。分别提取叶片叶基、叶中、叶尖光谱取平均值,作为目标叶的原始光谱值。反射率计算方法:分别对每种蔬菜单叶正、反面采集提取的高光谱反射率值,与同步测定的白板光谱反射率进行换算,计算出目标物的光谱反射率。 $\text{Ref}_{\text{目标}} = (\text{Rad}_{\text{目标}} / \text{Rad}_{\text{白板}}) \times \text{Ref}_{\text{白板}} \times 100\%$,式中: $\text{Ref}_{\text{目标}}$ 为通过白板反射率求得的目标物光谱反射率数据; $\text{Rad}_{\text{目标}}$ 为通过光谱仪测得的目标物辐亮度值; $\text{Rad}_{\text{白板}}$ 为通过光谱仪测得的白板的辐亮度值; $\text{Ref}_{\text{白板}}$ 为已知的白板标准反射率值。

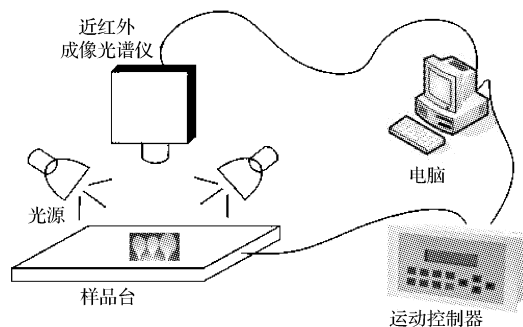


图1 蔬菜叶片实验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus photo of vegetable leaves

2 结果与分析

2.1 叶类蔬菜叶片的高光谱图像与机器视觉图像的对比分析

以油菜叶片为例,分别提取在680、550、450 nm处的高光谱合成彩色成像图,与利用相机拍摄的机器视觉彩色图进行对比分析,从图2、3可以看出,随着叶片在4个时间段下失水程度的加深,高光谱成像图与机器视觉图都可以清晰的表示出油菜叶片分别在失水0、10、24、48 h的叶片状态。失水时间越长,叶片萎缩,面积变小,叶片

周围发生褶皱。进一步将蔬菜叶片的高光谱成像图进行局部放大,圈定感兴趣的区域,提取其中的光谱原始光强值,能够进一步结合蔬菜叶片内部的组分信息变化对蔬菜叶片新鲜度进行分析。达到图谱合一化,这是其它单一分析技术难以达到的,表明基于高光谱成像可以从图像和光谱2个角度对蔬菜叶片的新鲜度进行分析,效果要优于机器视觉。

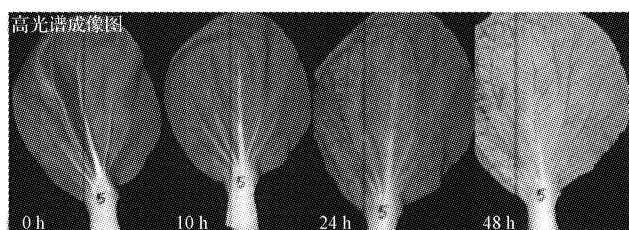


图2 油菜叶片不同失水时间段下的高光谱成像图

Fig. 2 Rape under the four water loss status spectral imaging RGB effect images

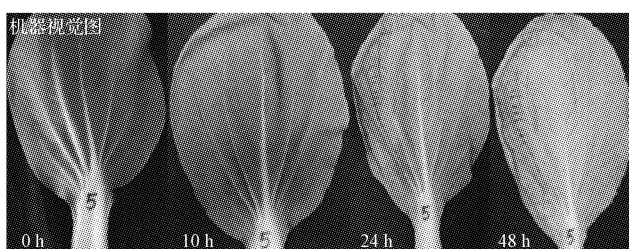


图3 油菜叶片不同失水时间段下的机器视觉图

Fig. 3 Rape under the four water loss status

2.2 不同失水时间的高光谱反射率曲线的对比分析

分别采集小白菜、菠菜、油菜、娃娃菜4个品种的蔬菜叶片分别在失水0、10、24、48 h的高光谱图像,提取同一时段下每个品种蔬菜叶片区域的原始平均光强值,并将其转换成反射率,计算出不同失水时间段下蔬菜叶片的平均光谱图,如图4(1)、(2)、(3)、(4)所示。在450~1 000 nm范围内,由于水分的特征吸收峰在1 300 nm附近,960 nm有微弱水分吸收峰的存在,但比较效果没有叶绿素特征效果明显,因此,该试验选用4种蔬菜叶片的叶绿素吸收光谱特征比较作为说明。小白菜、菠菜、油菜叶片内由于含有叶绿素,其光谱曲线呈典型叶绿素光谱曲线特征变化,在失水0、10、24 h后,小白菜与菠菜叶片内的叶绿素能减缓叶片水分的散失,所以其光谱反射率变化差异不是很明显,当失水48 h后,小白菜、菠菜的叶片已完全萎蔫,叶绿素沉降,其光谱曲线反射率为最低,与小白菜和菠菜相比较,油菜对于水分的缺失反应效果最为显著,随着水分的缺失,油菜叶片的光谱曲线变化规律在680 nm处的红边波段呈依次递增的趋势,这可能是由于随着油菜叶片内水分的缺失,油菜叶片内含有的油性因素导致了其光谱反射率逐渐增大的趋势。而娃娃菜由于叶片发黄无叶绿素,叶片内的水分在失水10 h时水分缺失现象急剧加重,其光谱曲线反射率降低最为明显,而在后期失水24 h和48 h后,已萎蔫的娃娃菜由于色素变化不大,导致其光谱曲线变化并无太大差异性。上述结果表明,利用高光谱成像技术可直观地对叶菜类蔬菜新鲜度等级进行分析。

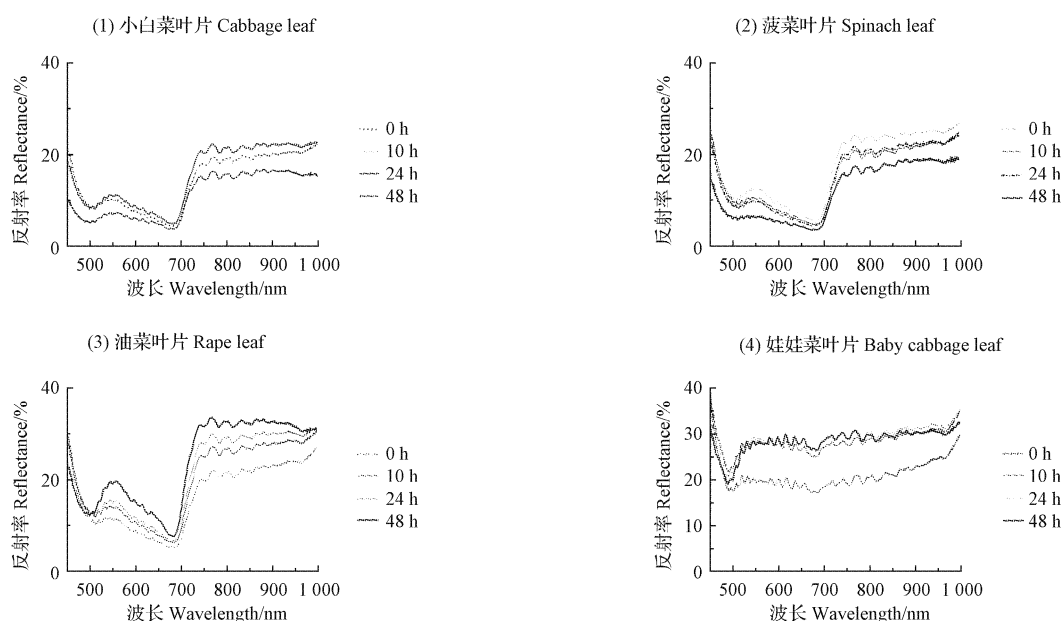


图4 4种不同叶菜叶片不同失水时间段下的光谱曲线对比

Fig. 4 Four different leaf vegetables spectral curve under different filtration time contrast image

2.3 不同品种蔬菜叶片的光谱曲线图对比分析

由于小白菜与菠菜在失水 10 h 情况下,叶片失水现象不是很显著,因此,该研究主要侧重于对失水 24 h 和 48 h 后,提取 4 种蔬菜叶片的平均光谱反射率变化情况进行分析研究。如图 5(1)、(2)所示,当 4 种蔬菜叶片分别在失水 24、48 h 的情况下,娃娃菜迅速缺失水分,导致其叶片平均光谱反射率曲线最高,而油菜随着油性因子的作用,其光谱反射率曲线偏高,小白菜与菠菜的叶片平均光谱反射率曲线随着水分的散失,叶片已成萎蔫状,所以其光谱曲线差异不大且相似,进而说明,采用高光谱成像技术对蔬菜叶片新鲜度的无损检测识别效果是非常显著的。

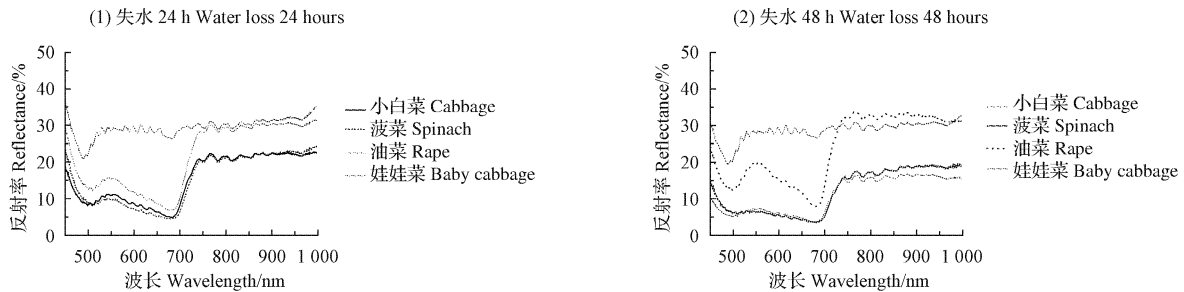


图 5 失水不同时段 4 种蔬菜叶片平均光谱曲线反射率对比分析

Fig. 5 Four vegetables leaf spectral reflectance curve contrast analysis under different water loss time

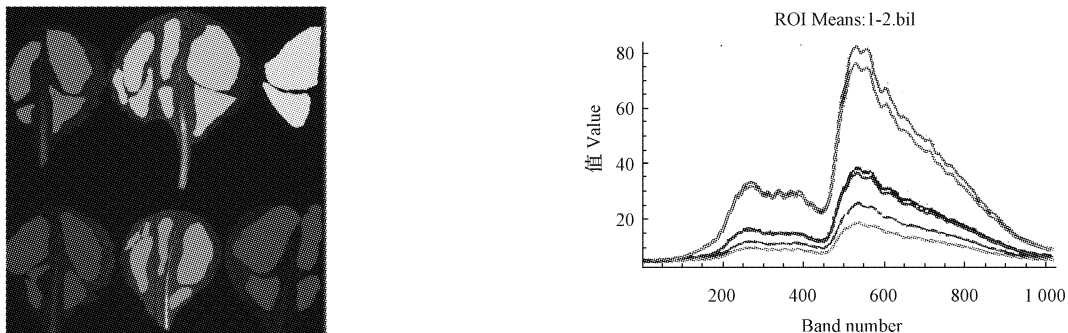


图 6 失水 48 h 4 种蔬菜叶片平均光谱光强值提取

Fig. 6 Average DN imaging spectra extraction image of four vegetables after 48 hours

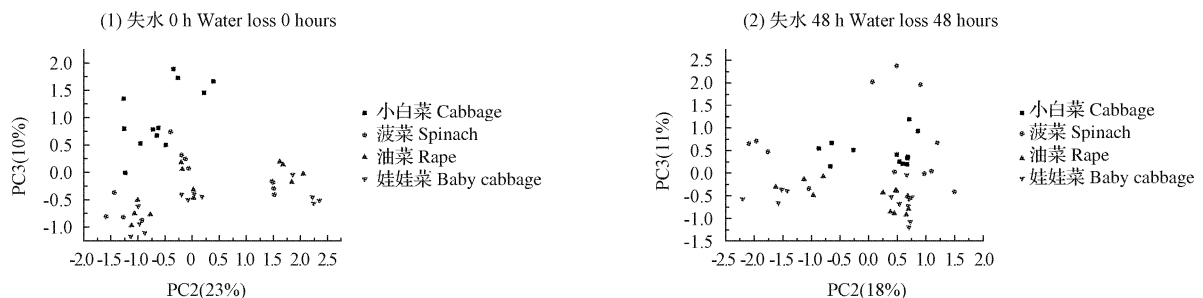


图 7 失水 0、48 h 后 4 种蔬菜叶片平均光谱反射率 PCA 分类结果

Fig. 7 Four vegetables leaf average spectral reflectance PCA classification results under water loss 0 hours and 48 hours

在 450~900 nm 特征波段下,由主成分分析结果可知,在叶菜新鲜的状态下,由于小白菜、菠菜、油菜、娃娃菜 4 种叶菜蔬菜叶片内分别含有大量水分及叶绿素等营养成分,叶菜光谱信息差异不大,利用 PCA 主成分分类后,品种区分不太明显,4 种蔬菜叶片的分类具有聚类倾向,且小白菜与菠菜、油菜、娃娃菜新鲜状态下分类较明显。随着蔬菜叶片水分的缺失,菠菜叶片失水最快,其次是小白菜,油菜叶片由于叶片内含有油性成分,在失水 24 h 后,叶绿素及水分的缺失变化幅度减小,因此在失水 48 h 后的分类识别中,从上到下依次划分为菠菜、小白菜、油菜、娃娃菜。可见,利用主成分分析方法对 4 种蔬菜叶片的失水程度进行分类识别时,叶片失水快的分类效果显著。这与上述利用高光谱成像的光谱反射率曲线对比分析结果一致。上述结果表明,利用主成分分析图可直观地对叶菜类蔬菜种类进行判别。

3 结论

高光谱图像技术是图像和光谱 2 种技术结合的产物,可以实现对蔬菜品种及成分的检测,是多种信息融合检测果蔬综合品质的首选方法。随着该技术的成熟和硬件成本的降低,必将在更多领域发挥重要的作用。

该试验获取 4 种蔬菜叶片分别在失水 0 h、失水 10 h、失水 24 h、失水 48 h 的光谱成像图,并与同时采集的机器视觉图进行对比分析,结果表明蔬菜在失水过程中,高光谱图像能反映其外观形态及内部叶绿素的变化,并通过比较 4 种蔬菜叶片在 4 个失水时间段下的光谱反射率曲线特征,可知利用高光谱成像技术可识别对叶菜类蔬菜失水程度进行分类判别。与此同时,通过对不同品种蔬菜叶片的光谱曲线图及主成分分布图进行分析,结果表明不同品种新鲜蔬菜的光谱差异较小,但随着失水程度的增加,不同品种蔬菜叶片的差异逐渐增大。该研究可为蔬菜储运过程中的质量管理提供技术支撑。

参考文献

- [1] 苏东林,李高阳,何建新,等. 近红外光谱分析技术在我国大宗水果品质无损检测中的应用研究进展[J]. 食品工业科技,2012(6):460-464.
- [2] Guo W C. Review of dielectric properties of fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(5):284-289.
- [3] Zhang L B, Hu H G, Ji S M, et al. Review of non-destructive quality evaluation technology for fruit and vegetable products [J]. Transactions of the CSAE,2005,21(4):176-180.
- [4] Yamamoto H, Iwamoto M, Haginuma S. Nondestructive acoustic impulse response method for measuring internal quality of apples [J]. Watermelons J Japan Soc Hort Sci,1981,50(2):247-261.
- [5] Hinshaw W S, Bottomley P A, Holland G N. A demonstration of the resolution of NMR imaging in biological systems[J]. Trans of the ASAE, 1979,35(3):1268-1269.
- [6] Rehkugler G E, Throop N. Apple sorting with machine vision[J]. Trans of the ASAE,1986,129(5):1388-1397.
- [7] Gardner J W, Bartlett P N. A brief history of electronic noses[Z]. Sensors and Actuators B,1994,18-19:211-220.
- [8] Armstrong P R, Brown G K, Timm E J. Non-destructive firmness measurement of soft fruit for comparative studies and quality control[Z]. Spanish Journal of Agricultural Research,1995:95-172.
- [9] Ying Y B, Liu Y D. Study and application of optical properties for non-destructive interior quality inspection of fruit[J]. Journal of Zhejiang University (Agric and Life Sci),2003,29(2):125-129.
- [10] Jin X L, Jin H J. Explore the status of foreign vegetable seed industry development[J]. Jilin Vegetables,2004(6):31-32.
- [11] Li D H, Xu Y M, Ji S J, et al. Near infrared spectra technique for non-destructive measurement of fruit and vegetable internal qualities[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment,2008(1):53-54.
- [12] Ma H J. Progress of near infrared spectroscopy on checking fruit quality [J]. Journal of Agricultural Sciences,2011,32(2):72-76.
- [13] Zhou W J. Application and research development of near infrared spectroscopy in detecting fruit and vegetable [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2011,39(16):9842-9847.
- [14] Ke Y, Dong H. Analytical chemistry manual spectral analysis III [M]. Beijing:Chemical Industry Press,1998:176.
- [15] Yang C M, Li N, Zhao X H, et al. Recent developments of NIRS technique for nondestructive measurement of fruit and vegetable interior quality [J]. Laser and Infrared,2009,39(11):1137-1141.

Research on the Leafy Vegetables Under the Condition of Water Loss Detection Based on the Hyperspectral Imaging

WU Qiong^{1,2}, LU An-xiang², ZHU Da-zhou³, WANG Cheng², FANG Jing-jing¹, JI Jian-wei¹

(1. College of Information and Electrification Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866; 2. Beijing Research Center for Agri-food Testing and Farmland Monitoring, Beijing 100095; 3. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097)

Abstract: Four kinds of vegetables were compared to analyze, including pakchoi cabbage, spinach, rape, and baby cabbage. The vegetable leaf was stored for water loss. The hyperspectral images were collected at 0 hours water loss, 10 hours water loss, 24 hours water loss, 48 hours water loss, respectively. The freshness change in the process of the vegetable storage by hyperspectral imaging was preliminary explored. The results showed that hyperspectral image could reflect the outer shape and inside chlorophyll change of vegetables during the water loss. And the result of the principal component analysis (PCA) method for the classification of different varieties of vegetables leaf showed that the differences of the spectral were increasing within the degrees of the water loss. The study provided a technical support for the quality management in the process of the vegetable storage and transportation.

Keywords: vegetable; hyperspectral imaging; water loss; freshness; non-destructive detection