

# 基于光谱特性分析的冬枣渐变损伤研究

吴姝, 王琨, 王超 (苏州经贸职业技术学院机电技术学院, 江苏苏州 215009)

**摘要** 为了较早地对冬枣损伤进行预测, 减少冬枣内部损伤引起的储藏损失, 以山东沾化冬枣为研究对象, 对冬枣内部隐性损伤直至表面微观损伤的渐变光谱特性进行研究, 利用高光谱成像系统采集每个冬枣在同一试验条件下的各个损伤时期的高光谱图像, 得到波长在 390~1 090 nm 的 512 幅高光谱分量图像, 从表面微观损伤的感兴趣区域反推内部隐性损伤的感兴趣区域, 并获取各个损伤时期的光谱信息, 通过 3 组差谱分析并交叉验证, 确定变化较大的 8 个波长, 再根据冬枣内部的主要成分变化确定 4 个波长, 最终选取 528.5、547.4、573.9、702.7、727.2、755.7、880.2、942.6、982.7、518.5、863.0、973.4 nm 12 个波长作为冬枣渐变损伤的特征波长。利用偏最小二乘法分析建立判别模型, 并对预测集的 83 个样本(无损伤 27、第 1 阶段损伤 12、第 2 阶段损伤 12、第 3 阶段损伤 12、第 4 阶段损伤 10、第 5 阶段损伤 10)进行预测, 检测精度依次为 100%、58.3%、66.7%、83.3%、100%、100%, 总体检测精度为 86.7%。

**关键词** 冬枣; 渐变损伤; 光谱特性; 特征波长; 偏最小二乘法

中图分类号 TP 391.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)24-0191-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.24.054



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Study on the Development of Bruises on Winter Jujube Based on Spectrum Characteristics Analysis

WU Shu, WANG Kun, WANG Chao (School of Mechanical & Electric Technology, Suzhou Institute of Trade & Commerce, Suzhou, Jiangsu 215009)

**Abstract** In order to predict the damage of winter jujube earlier and reduce the storage loss, Shandong Zhanhua winter jujube were taken as the research object to study the gradual spectral characteristics of the hidden damage from winter jujube to the microscopic damage on the surface. Hyperspectral images of each period of each jujube under the same test conditions at various damage periods were collected to obtain 512 hyperspectral component images with wavelengths in the range of 390-1 090 nm, and internal hidden damage was inferred from the surface micro-damage area of interest and the spectral information of each injury period were obtained. Through three sets of differential spectrum analysis and cross-validation, 8 wavelengths with large changes were determined, and then 4 wavelengths were determined according to the main component changes in winter jujube. Finally, 528.5, 547.4, 573.9, 702.7, 727.2, 755.7, 880.2, 942.6, 982.7, 518.5, 863.0, 973.4 nm 12 wavelengths were selected as the characteristic wavelength of the gradual damage of winter jujube. A partial least squares analysis method was used to establish a discriminant model, and 83 samples of the prediction set (no damage 27, first stage damage 12, second stage damage 12, third stage damage 12, fourth stage damage 10, fifth Stage damage 10) for prediction, the detection accuracy was 100%, 58.3%, 66.7%, 83.3%, 100%, 100%, and the overall detection accuracy was 86.7%.

**Key words** Winter jujube; Gradual damage; Spectrum characteristics; Characteristic wavelength; Partial least squares method

冬枣在采摘和运输过程中极易造成各类损伤, 其中的碰压伤、撞伤在受伤初期, 冬枣表面无法显现出这类隐性损伤。这类损伤在人工或机器视觉分选时很难被发现, 入库储藏后, 隐性损伤逐步变化, 冬枣很快出现溃烂, 严重影响了冬枣的储藏期和储藏效益。

高光谱成像分析技术, 可在一系列波长上获取被测对象大量的窄带光谱图像<sup>[1-5]</sup>, 从高光谱图像上获取相应的光谱信息, 通过光谱分析, 可对被测物的内部成分进行综合的定性和定量分析<sup>[6-7]</sup>。Wang 等<sup>[8]</sup>采集 400~720 nm 的鲜枣高光谱图像, 运用逐步判别分析方法确定鲜枣缺陷的 3 个特征波长, 利用少数敏感波段建立鲜枣缺陷的判别模型; 总体分类精度达到 97%。Cho 等<sup>[9]</sup>利用高光谱荧光成像技术对樱桃番茄的表皮损伤进行检测, 基于方差分析和主成分分析优化荧光波段, 最终实现樱桃番茄的损伤检测, 检测精度>99%。Nanyam 等<sup>[10]</sup>采集 400~2 500 nm 的草莓高光谱图像信息, 利用决策融合方法对草莓的损伤区域进行检测, 结果表明该方法能有效识别草莓的损伤区域与非损伤区域。王斌等<sup>[11]</sup>利用高光谱成像技术对腐烂、病害及正常的梨枣进行分类, 使用光谱近似系数为特征参数, 运用逐步判

别分析法进行建模, 分类准确率达 99.12%。余克强等<sup>[12]</sup>采集了 380~1 030 nm 的鲜枣裂纹位置及大小, 分别采用 3 种方法进行特征波长的提取, 结合图像处理对裂纹进行识别, 同时采用 3 种方法对特征波长进行建模并比较结果。

以上方法验证了高光谱技术在水果损伤检测方面的可行性, 但现有方法仅是对水果表面已经显现出的损伤、裂纹等微观损伤进行检测, 并未对水果的内部损伤进行研究, 无法提早预测水果内部损伤; 且水果损伤在不同发展阶段有不同的光谱特性, 上述方法并未完全考虑各个发展阶段下水果损伤的特征波长。笔者拟以冬枣为研究对象, 对冬枣损伤渐变过程的光谱特性进行研究。

## 1 材料与方法

**1.1 样本处理与试验设置** 试验样本选用从市场上购买的无明显缺陷的山东冬枣, 通过显微镜对冬枣进行人工筛选, 确认无缺陷的作为冬枣样本, 将筛选出的一部分冬枣与光滑的硬质地面轻轻碰撞, 使其表面无任何明显损伤, 但其内部已经造成轻微的损伤, 该类样本作为冬枣的隐性损伤样本。对每一个冬枣样本进行编号并标注日期, 如图 1 所示。

该研究所采用的高光谱图像采集系统的组成在已有文献<sup>[13]</sup>中提出。基于该高光谱图像采集系统, 获得波长在 390~1 090 nm 的 512 幅冬枣的高光谱图像。

通过 Spectral-Cube V2.75 软件进行高光谱图像采集的

**基金项目** 苏州经贸职业技术学院院级项目(YJ-QN1903)。

**作者简介** 吴姝(1989—), 女, 江苏镇江人, 讲师, 博士, 从事农产品无损检测技术研究。

**收稿日期** 2020-04-20



图1 冬枣损伤样本

Fig.1 The damage samples of winter jujubes

方法和试验标定方法在已有文献<sup>[13]</sup>中给出,根据实时的试验条件,最终确定高光谱图像采集的试验参数:物距 25 cm;相机曝光时间 10 ms;平台移动速度 2 mm/s。

确定以上试验参数后,按照样本编号顺序进行高光谱图像采集,完成采集的冬枣样本放回保鲜袋,送回冰箱储藏。每间隔 2 d 对冬枣样本进行一次图像采集,且样本的放置位置、采集参数、光源强度都与之前的保持一致,直至冬枣样本表面显现损伤即停止图像采集。在采集过程中,可根据采集的图像质量进行重新标定。

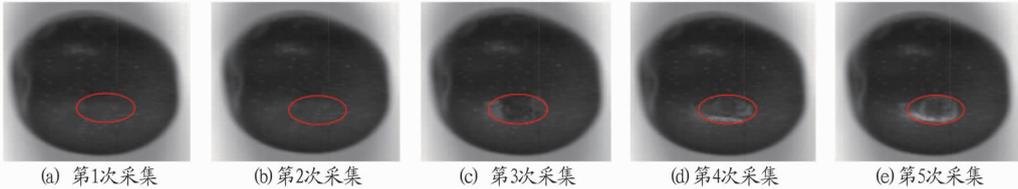


图2 各个损伤阶段的冬枣图像及损伤感兴趣区域

Fig.2 Images of Dongzao in each damage stage and the damaged area of interest

1.2.2 冬枣损伤光谱信息获取及预处理。根据图 2 确定的各个损伤区域,分别计算各个感兴趣区域(ROI)的平均灰度值,得到各个损伤阶段的冬枣光谱信息,5 条光谱曲线如图 3 所示,波长为 390~1 090 nm。

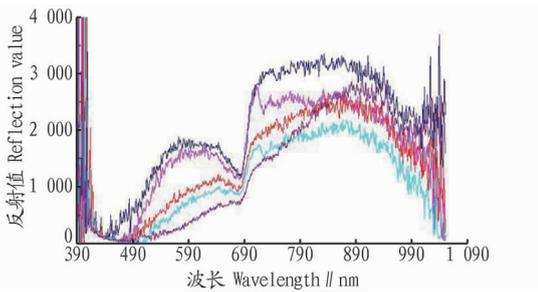


图3 5个不同损伤阶段下的原始光谱曲线

Fig.3 Original spectral curves of five damage stages

观察计算得出的光谱曲线,光谱曲线前后两端的噪声较大,并且 5 条曲线的光滑度不够,给数据分析造成较大的困难。因此,剔除前后两端噪声数据,并且采用周期为 10 的移动平均法对该原始光谱数据进行预处理,移动平均值公式为

$$a_n = \frac{a_n + a_{n+1} + \dots + a_{n+9}}{10} \text{ (周期为 10)}, \text{ 结果如图 4 所示。}$$

## 2 结果与分析

2.1 特征波长分析 对原始数据进行噪声剔除和平滑处理

## 1.2 数据分析与预处理

1.2.1 冬枣损伤区域的确定。如图 2 所示为同一个冬枣在同一位置、同一采集参数条件下,每间隔 2 d 采集的高光谱冬枣损伤图像,共采集 5 次(记为阶段 1、阶段 2、阶段 3、阶段 4、阶段 5)。图 2a~e 依次为冬枣初期损伤直至轻微损伤的 5 次采集的高光谱图像。由图 2a、b 可知,前 2 次采集的冬枣图像表面并未显现出任何损伤,图 2c、d 采集的冬枣图像表面已经显现出轻微损伤,但损伤区域较不明显,图 2e 的冬枣图像表面显现出较明显的损伤;从采集的冬枣图像比较可知,前 4 次采集的冬枣图像上无法显现出损伤或损伤区域不明显,无法完全分辨出其损伤特征,故不能准确判定该冬枣损伤部位的感兴趣区域,因此也无法准确地获取其光谱信息。所以该研究采取损伤表面反推方法对冬枣损伤区域进行界定。

首先对图 2e 的冬枣图像进行损伤感兴趣区域的划分,并在图中用红色圈表示,确定其损伤区域后,将同样大小的红色圈分别在前几次采集的冬枣图像上进行同位置的划分感兴趣区域,即冬枣各个阶段的损伤感兴趣区域均被确定,如图 2 所示。

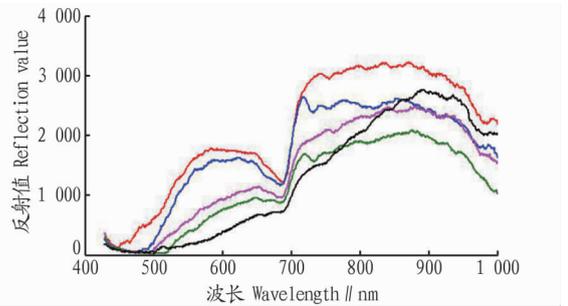


图4 预处理后的光谱曲线

Fig.4 Spectral curve after pretreatment

后,依然包含较大的数据量,其中非有效特征波长对识别和分类都造成了一定的困难,为了精简数据量,提高分类识别精度,首先将对预处理后的数据进行特征波长的分析。

冬枣微观损伤特征波长提取方法已有文献<sup>[13]</sup>提出,但不适用于该研究所述的渐变损伤特征波长的研究,若按照前文献中所述的特征波长提取方法进行特征波长的筛选,无法完全考虑各个损伤时期内敏感波长变化这一因素。所以,该研究针对渐变损伤这一特定因素,提出相应的特征波长分析方法。

差谱分析是一种简单有效的光谱数据处理方法,从差谱的波峰处能有效寻找到光谱的差异性(变化较大的特征波长点),即光谱数据的局部最大值。该方法完全适合该研究渐变损伤光谱数据的分析,能有效从各个损伤阶段的光谱数据

中确定冬枣渐变损伤的特征波长点。

对5次测量的光谱数据分别进行差谱分析,将差谱曲线分成3组,第1组为第1阶段与后4个阶段之间的差谱,记为1-2、1-3、1-4、1-5;第2组为第2阶段与后3个阶段之间的差谱,记为2-3、2-4、2-5;第3组为第3阶段与后2个阶段、第4阶段与第5阶段的差谱,记为3-4、3-5、4-5。

(1)第1组差谱分析。如图5所示为第1组差谱曲线, $I_{\text{差}1}=|I_1-I_2|$ 、 $I_{\text{差}2}=|I_1-I_3|$ 、 $I_{\text{差}3}=|I_1-I_4|$ 、 $I_{\text{差}4}=|I_1-I_5|$ 。图中的波峰附近为变化较大的波长点,根据4条差谱曲线的分析,最终确定变化较大的20个波长点,在图5中由红色虚线标出,分别为487.3、518.5、528.5、537.3、547.4、562.5、573.9、702.7、727.2、730.5、755.7、777.8、794.8、813.1、863.0、880.2、906.7、942.6、973.4、982.7 nm。

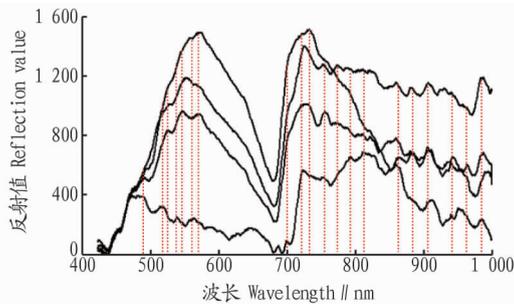


图5 第1组差谱曲线

Fig.5 Difference spectral curve of the first group

(2)第2组差谱分析。如图6所示为第2组差谱曲线, $I_{\text{差}1}=|I_2-I_3|$ 、 $I_{\text{差}2}=|I_2-I_4|$ 、 $I_{\text{差}3}=|I_2-I_5|$ 。基于第1组差谱分析方法对第2组差谱进行分析,在图6中用黑色竖线标出在第2组差谱中变化较大的7个波长点,分别为547.4、566.3、573.9、702.7、727.2、755.7、759.6 nm。

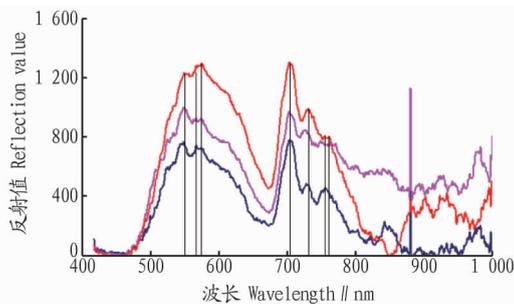


图6 第2组差谱曲线

Fig.6 Difference spectral curve of the second group

(3)第3组差谱分析。如图7所示为第3组差谱曲线, $I_{\text{差}1}=|I_3-I_4|$ 、 $I_{\text{差}2}=|I_3-I_5|$ 、 $I_{\text{差}3}=|I_4-I_5|$ 。方法同第1组差谱分析,在图7中用黑色竖线标出在第3组差谱中变化较大的11个波长点,分别为501.0、528.5、547.4、573.9、585.2、702.7、727.2、865.7、880.2、901.4、942.6 nm。

(4)3组差谱结果交叉验证。将3组差谱分析的结果进行交叉验证,综合筛选后,剔除只在其中一组中发生较大变化的波长点。表1为所选出的所有波长点在3组中交叉验证的结果。由表1可知,最终选取8个变化较大的敏感波长,分别为528.5、547.4、702.7、727.2、573.9、942.6、880.2、755.7 nm。

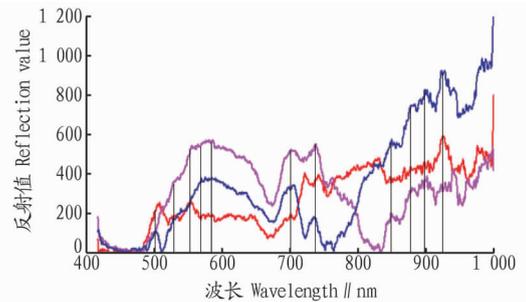


图7 第3组差谱分析

Fig.7 Difference spectral curve of the third group

表1 3组差谱结果交叉验证

Table 1 Cross validation the differential spectrum results of the three groups

编号 No.	波长 Wavelength nm	组1 Group 1	组2 Group 2	组3 Group 3
1	487.3	✓		
2	501.0			✓
3	518.5	✓		
4	528.5	✓		✓
5	537.3	✓		
6	547.4	✓	✓	✓
7	562.5	✓		
8	566.3		✓	
9	573.9	✓	✓	✓
10	585.3			✓
11	702.7	✓	✓	✓
12	727.2	✓	✓	✓
13	730.5	✓		
14	755.7	✓	✓	
15	759.6		✓	
16	777.8	✓		
17	794.8	✓		
18	813.1	✓		
19	863.0	✓		
20	865.7			✓
21	880.2	✓		✓
22	901.4			✓
23	906.7	✓		
24	942.6	✓		✓
25	973.4	✓		
26	982.7	✓		

在冬枣损伤的渐变过程中,其内部主要成分同样发生改变,一般水果的品质参数主要包括糖度、酸度、蛋白质、水分和叶绿素<sup>[14]</sup>。波长981.520 nm附近的波峰反映了水果内部糖度的变化<sup>[15]</sup>;862 nm附近的波峰反映了水果内部酸度的变化<sup>[16]</sup>;970 nm处的波峰反映了水果内部含水率的变化<sup>[17]</sup>,即确定冬枣内部成分变化的敏感波长分别为:糖度982.7、518.5 nm;酸度863.0 nm;水分973.4 nm。

**2.2 建立模型** 结合分析得到的12个特征波长518.5、528.5、547.4、573.9、702.7、727.2、755.7、863.0、880.2、942.6、973.4、982.7 nm,利用偏最小二乘分析方法建立冬枣损伤的判别模型。设定分类变量:0代表无损伤冬枣,1代表损伤冬枣。建模结果如图8所示。由图8可知,模型决定系数 $R^2$ 为0.99,均方根误差为0.012。

图9为该模型系数,结合分析得到的12个特征波长,给出偏最小二乘回归方程为 $y = -0.459 + 5.261 \times 10^{-4} x_1 + 2.495 \times 10^{-5} x_2 - 3.676 \times 10^{-4} x_3 - 7.653 \times 10^{-4} x_4 + 1.355 \times 10^{-3} x_5 - 3.011 \times 10^{-4} x_6 - 3.639 \times 10^{-4} x_7 +$

$3.282 \times 10^{-4} x_8 - 1.964 \times 10^{-4} x_9 + 3.902 \times 10^{-4} x_{10} + 9.186 \times 10^{-5} x_{11} - 3.612 \times 10^{-4} x_{12}$ 。式中,  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$  分别为波长 518.5、528.5、547.4、573.9、702.7、727.2、755.7、863.0、880.2、942.6、973.4、982.7 nm 处的反射值。

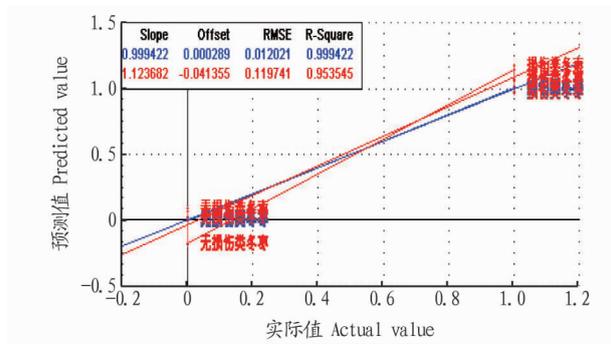


图8 偏最小二乘回归

Fig.8 Partial least squares regression

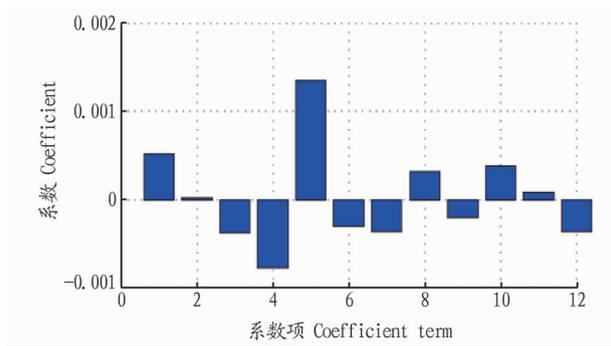


图9 模型系数

Fig.9 Model coefficient

运用该判别模型对未参与建模的预测集进行分析,其结果如图10所示。各个损伤阶段的分类结果如表2所示。从图10可以看出,无损伤冬枣的判别效果较好,根据所建模型,无损伤冬枣的  $y$  判别值均在0附近,而损伤冬枣则出现一些偏差,并未均集中在1附近。再结合表2可知,当冬枣的损伤并未显现时,检测效果较差,说明此模型能针对冬枣的隐形损伤进行检测,但是效果还有待提高,判别模型也有待修正。

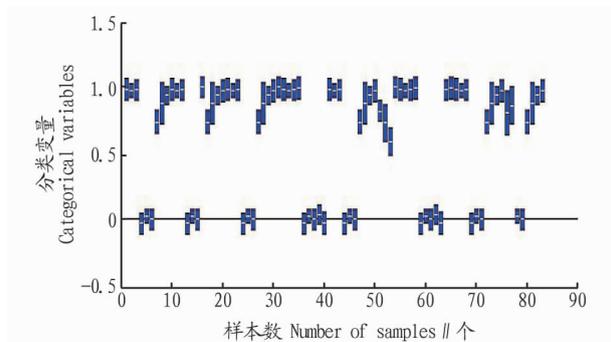


图10 偏最小二乘模型预测结果

Fig.10 Prediction results by partial least squares model

### 3 结论

利用高光谱分析技术对冬枣渐变损伤的光谱特性进行研究,并结合偏最小二乘分析方法对冬枣样本进行分类,结

论如下:

表2 各类损伤分类结果

Table 2 Classification results of various types of damage

冬枣类型 Winter jujube type	样本数 Number of samples // 个	判别正确数 Correct number of discrimination // 个	正确率 Correct rate %
无损伤 No damage	27	27	100
阶段 1 Stage 1	12	7	58.3
阶段 2 Stage 2	12	8	66.7
阶段 3 Stage 3	12	10	83.3
阶段 4 Stage 4	10	10	100
阶段 5 Stage 5	10	10	100
综合 Comprehensive	83	72	86.7

(1) 基于差谱分析和内部成分变化,确定了冬枣渐变损伤的12个特征波长,分别为518.5、528.5、547.4、573.9、702.7、727.2、755.7、863.0、880.2、942.6、973.4、982.7 nm。

(2) 根据12个特征波长,结合偏最小二乘分析方法建立冬枣损伤的判别模型,并对预测集进行预测,其各个损伤阶段的分类精度依次为58.3%、66.7%、83.3%、100%、100%。

### 参考文献

- LEEMANS V, DESTAIN M F. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects [J]. Journal of food engineering, 2004, 61(1): 83-89.
- NICOLAÏ B M, BEULLENS K, BOBELYN E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review [J]. Postharvest biology and technology, 2007, 46(2): 99-118.
- LIU Y D, YING Y B. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of 'Fuji' apples [J]. Postharvest Biol Technol, 2005, 37(1): 65-71.
- YING Y B, LIU Y D. Nondestructive measurement of internal quality in pear using genetic algorithms and FT-NIR spectroscopy [J]. Journal of food engineering, 2008, 84(2): 206-213.
- SHAO Y N, HE Y, GÓMEZ A H, et al. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heatwave' (*Lycopersicon esculentum*) quality characteristics [J]. Journal of food engineering, 2007, 81(4): 672-678.
- LONG R L, WALSH K B. Limitations to the measurement of intact melon total soluble solids using near infrared spectroscopy [J]. Aust J Agric Res, 2006, 57(4): 403-410.
- GOWEN 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.
- 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.
- CHO B K, KIM M S, BAEK I S, et al. Detection of cuticle defects on cherry tomatoes using hyperspectral fluorescence imagery [J]. Postharvest biology and technology, 2013, 76: 40-49.
- NANYAM Y, CHOUDHARY R, GUPTA L, et al. A decision-fusion strategy for fruit quality inspection using hyperspectral imaging [J]. Biosystems engineering, 2012, 111(1): 118-125.
- 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(S1): 205-209.
- 余克强, 赵艳茹, 李晓丽, 等. 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.
- 魏新华, 吴姝, 范晓冬, 等. 基于高光谱成像分析的冬枣微观损伤识别 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 242-246.
- 李民赞. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 刘燕德, 应义斌, 傅霞萍. 近红外漫反射用于检测苹果糖度及有效酸度的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(11): 1793-1796.
- 刘燕德. 水果糖度和酸度的近红外光谱无损检测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.