

# 高光谱成像结合 BP 网络无损检测李子的硬度

孟庆龙<sup>1,2</sup>, 张艳<sup>2</sup>, 尚静<sup>1,2</sup>

- (1. 贵阳学院食品与制药工程学院, 贵州 贵阳 550005;
2. 贵阳学院农产品无损检测工程研究中心, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:**以“红”李子和“青”李子为研究对象,提出了基于高光谱成像技术结合误差反向传播(error Back Propagation, BP)网络无损检测李子硬度的方法。采用高光谱图像采集系统获取了李子样本的高光谱图像,并提取了感兴趣区域的平均光谱反射率;综合比较了不同光谱预处理方法(一阶导数(derivative)、标准正态变换(SNV)和多元散射校正(MSC))对BP网络模型检测效果的影响;并利用主成分分析方法对预处理后的光谱数据进行降维,以提取能反映李子硬度的特征光谱。研究表明:derivative预处理后的光谱具有较好的李子硬度校正能力( $R_c = 0.939$ ,  $RMSEC = 0.153$ ),而SNV预处理后的光谱具有较好的李子硬度预测能力( $R_p = 0.723$ ,  $RMSEP = 0.580$ );采用主成分分析法选择了累计贡献率超过99.99%的主成分作为样本集特征光谱数据,很好地实现了光谱数据的降维,提升了BP网络模型的运行效率。这表明高光谱成像技术结合BP网络可实现李子硬度的无损检测。

**关键词:**遥感;无损检测;高光谱成像;BP网络;李子;硬度

**中图分类号:**0657.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.010

## Nondestructive detection on firmness of plums based on hyperspectral imaging and BP network

MENG Qing-long<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, SHANG Jing<sup>1,2</sup>

- (1. Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang 550005, China;
2. The Research Center of Nondestructive Testing for Agricultural Products, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

**Abstract:** The nondestructive detection on firmness of “Red” and “Green” plums is proposed based on hyperspectral imaging technology combined with error back propagation (BP) network. The hyperspectral imaging system is used to collect the hyperspectral image of plums, and the average spectral reflectance of the region of interest (ROI) is acquired. Then the effectiveness of BP network model using derivative, standard normal variation (SNV) and multi-scatter calibration (MSC) is compared and evaluated. Finally, the characteristic spectrum of firmness of plums are extracted by principal component analysis (PCA). The results show that the preprocessing effect of derivative on spectral reflectivity has the best calibration ability of firmness of plums ( $R_c = 0.939$ ,  $RMSEC = 0.153$ ), and the preprocessing effect of SNV on spectral reflectivity has the best prediction ability of firmness of plums ( $R_p = 0.723$ ,  $RMSEP = 0.580$ ). And principal components with cumulative contribution rate of 99.99% are selected as the characteristic spectral data in the sample set by principal component analysis, and the dimensionality reduction of the spectral data is well realized, leading to improving the efficiency of BP network model. This study indicates that hyperspectral imaging technology combined with BP network is effective for detection on firmness of plums.

**Key words:** remote sensing; nondestructive detection; hyperspectral imaging; BP network; plums; firmness

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61505036);贵州省科技计划项目(No. 黔科合基础[2019]1010);贵州省普通高等学校工程研究中心(No. 黔教合KY字[2016]017);贵阳市科技局贵阳学院专项资金(No. GYU-KYZ[2018]01-08)资助。

**作者简介:**孟庆龙(1989-),男,讲师,博士,主要研究方向为基于高光谱成像技术的农产品无损检测。E-mail: scumql@163.com

**通讯作者:**张艳(1977-),女,副教授,硕导,主要从事农产品无损检测研究。E-mail: Eileen\_zy001@sohu.com

**收稿日期:**2018-12-26

## 1 引言

李子味酸,能促进胃酸和胃消化酶的分泌,并能促进胃肠蠕动,因而有改善食欲,促进消化的作用,新鲜李子中含有丰富的氨基酸,有利尿消肿的作用,对肝硬化有辅助治疗效果。李子中含有多种营养成分,有养颜美容、润滑肌肤的作用,深受广大消费者的青睐。果实硬度是评价李子成熟度的主要指标之一,硬度大则李子脆,硬度小则李子多汁。不同消费者的口感有所不同,因此检测李子的硬度不仅有助于指导消费,而且对于指导李子的采收时间、采后储藏和加工都具有重要的意义。传统的检测李子硬度的方法是采用探头压入果肉进行测量<sup>[1]</sup>,该方法的缺点是有损检测。因此,开发研制一种无损、快速、高效的李子硬度检测方法在李子品质检测领域中具有广泛的应用前景。近年来,高光谱成像技术是一种集光谱信息和图像信息与一身的新兴的无损检测技术<sup>[2-4]</sup>,其中基于高光谱成像技术的无损检测以其无损、快速、高效等诸多优点深受广大科研工作者的青睐,被广泛应用于食品行业、医药行业以及化工行业等各个领域<sup>[5-12]</sup>。国内外研究学者已利用高光谱成像技术开展了关于苹果<sup>[13-14]</sup>、桃<sup>[15-16]</sup>、蓝莓<sup>[17-18]</sup>和梨<sup>[1,19]</sup>等水果硬度的无损检测研究,并取得了较好的研究成果。而采用高光谱成像技术结合 BP 网络模型预测李子硬度的研究目前尚未见报道。

本文以“红”李子和“青”李子为实验材料,采用高光谱图像采集系统获取采后储藏期间李子的高光谱图像,并提取感兴趣区域的反射光谱。然后采用化学计量学和 BP 网络提出了基于高光谱成像的李子硬度的预测方法,以期为李子硬度的检测提供一种无损、快速、高效的方法。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料及样本硬度测量

实验所用“红”李子和“青”李子购买于当地的沃尔玛超市,从买回来的李子中挑选大小均匀一致且完好无损的“红”李子样本 120 个和“青”李子样本 60 个。将所有李子样本依次编号后放在室温( $22 \pm 2$ )℃下储藏,每隔 1 天取样一次,每次取样 45 个(其中“红”李子 30 个、“青”李子 15 个),共 180 个样本。

李子硬度的测量选用杭州绿博仪器有限公司的

GY-4 型数显果实硬度计,测量时选用直径为 7.9 mm 的探针,计量单位为千克(kg)。将李子样本去皮后,利用 GY-4 测量李子样本的硬度值,每个样本分别测量 2 次求平均值,作为该样本的硬度值。

### 2.2 高光谱图像采集系统

实验使用的高光谱图像采集系统(GaiaField-F-V10,四川双利合谱科技有限公司),结构示意图如图 1 所示。该系统主要包括:1-CCD 相机(Imperx IPX-2M30,像素为  $1392 \times 1040$ ),2-成像光谱仪(Inspector V10, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland),3-镜头(HSIA-OL23,焦距:23 mm),4-漫反射光源(HSIA-LS-T-200W),5-精密防尘型电动平移台(HSIA-T400-IMS),6-暗箱(Gaia Sorter)和 7-计算机。其中,成像光谱仪的分辨率为 3.5 nm,  $F$  数为 2.8,图像空间分辨率为  $696 \times 700$ ,光谱采集范围为 400~1000 nm;漫反射光源为四个 200 W 溴钨灯,采用梯形结构安装于暗箱中。

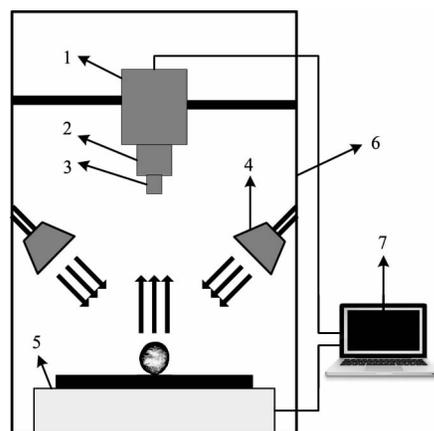


图 1 高光谱图像采集系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of hyperspectral imaging acquisition system

### 2.3 高光谱图像采集与黑白校正

将李子样本放在电动平移台上,根据实验要求,首先,调整系统参数,以确保采集的图像清晰且不失真。经过多次调整和优化,最终确定 CCD 相机的曝光时间是 12.6 ms,相机镜头与样本距离为 40 cm,电动平移台的移动速度是 1.35 cm/s。然后,对待检测样本逐一扫描,采集所有李子样本的高光谱图像。

由于暗箱中暗电流的存在,不同波段条件下光源强度分布不均匀以及李子样本的形状差异等都会导致在光照强度较弱波段采集到的图像包含较大的噪声,故需对采集到的高光谱图像进行黑白校正,以消除部分噪声的影响。即在与样本采集相同的系统

条件下,首先,扫描标准白色校正板,得到全白的标定图像  $W$ ;然后,盖上相机的镜头盖进行图像采集得到全黑的标定图像  $B$ ;最后,按照下面校正公式完成图像标定,采集得到的原始图像  $I$  变成校正图像  $R$ ,即:

$$R = \frac{I - B}{W - B} \quad (1)$$

式中, $I$  为李子样本的原始高光谱图像; $W$  为白板的漫反射图像; $B$  为暗图像; $R$  为校正后的高光谱图像。

#### 2.4 光谱数据的预处理

常见的光谱数据预处理方法包括:一阶导数(derivative)、标准正态变换(Standard Normal Variation, SNV)和多元散射校正(Multi-scatter Calibration, MSC)等<sup>[20]</sup>。其中 derivative 预处理方法可以有效地消除原始光谱数据中存在的线性背景平移;而 SNV 预处理方法常用来校正原始光谱数据中因散射而引起的误差;在 MSC 预处理方法认为光谱数据集中的每一条光谱都应该与“理想”光谱成线性关系,但是真正的“理想”光谱是无法得到的,通常可以采用样本光谱数据集的平均光谱来近似。本实验在 MATLAB R2016b 软件中实现对原始光谱数据的预处理。

#### 2.5 建模方法和模型评价

BP 网络是一种多层前馈神经网络,是目前应用最广泛的人工神经网络模型之一。其输入信号从输入层经隐含层到输出层,能够实现输入与输出之间的高度非线性映射。如果输出层得不到期望输出,根据预测误差调整网络权值和阈值,使 BP 网络预测输出不断逼近期望输出,从而使网络误差平方和达到最小。

以校正集样本的相关系数( $R_c$ )和均方根误差(RMSEC)以及预测集样本的相关系数( $R_p$ )和均方根误差(RMSEP)作为评价模型性能的指标。一个好的模型应该具有较大的  $R_c$  和  $R_p$  值以及较小的 RMSEC 和 RMSEP 值。

#### 2.6 数据分析

高光谱图像数据采集软件应用的是 Spectral SENS(Spectral Imaging Ltd., Finland),采集得到的李子高光谱图像数据采用 ENVI 5.4(Research System Inc., USA)和 MATLAB R2016b 等软件进行处理与分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 感兴趣区域选择

为了保证在高光谱图像中选择的感兴趣区域中有且仅有李子样本信息,通过求取李子果实区域和背景区域中所有采样点下光谱的平均值,选择样本和背景反射率差异大的波段及其对应的反射率值作为区分样本区域和背景的阈值条件。图 2 给出了李子样本区域和背景区域的光谱反射率,从图中可以看出,在波长 821.26 nm 处李子样本区域的光谱反射率值均大于 0.29,而背景区域的光谱反射率值均小于 0.29。因此,在选择感兴趣区域时,本试验选择特征波长为 821.26 nm,反射率阈值为 0.29,得到其中三个李子样本的高光谱图像中选择的感兴趣区域如图 3 所示,从图 3 可以看出,只有李子样本区域被选中作为感兴趣区域。

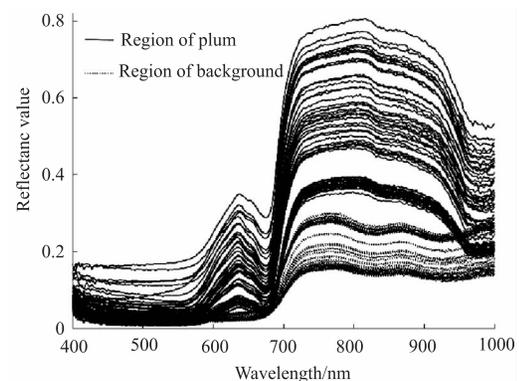


图 2 李子样本区域和背景区域光谱反射率曲线

Fig. 2 The spectral reflectance curves of the plums and background areas

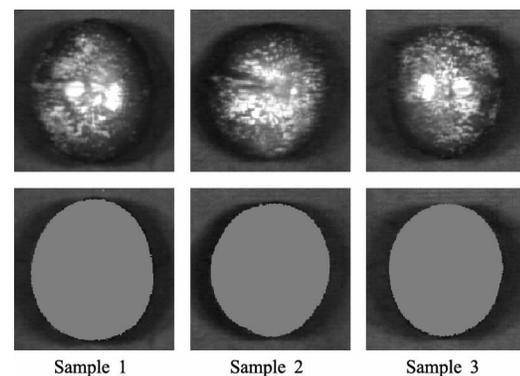


图 3 李子样本的感兴趣区域

Fig. 3 The region of interest of the plums

#### 3.2 光谱特征分析及预处理

李子样本感兴趣区域的原始光谱反射率曲线如图 4(a) 所示。从图 4(a) 中可以看出,在 600 ~ 1000 nm 波段内,“红”李子和“青”李子的平均光谱曲线的变化趋势基本一致,在 680 ~ 710 nm 波段内

急剧上升,在 720 ~ 930 nm 波段内平均光谱反射率较高,在 930 ~ 1000 nm 波段出现吸收谷。在 675 nm 处具有明显的吸收峰,主要由李子表面叶绿素的吸收引起的,反映了李子的表面颜色信息,而 980 nm 处的吸收峰则主要由李子中的水分吸收所引起的,反映了李子的水分含量信息<sup>[21]</sup>。

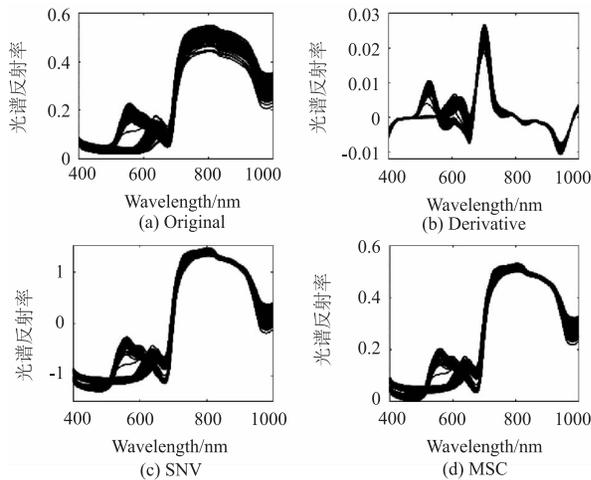


图 4 李子样本的光谱反射曲线

Fig. 4 The spectral reflectance curves of the plums

在建立预测模型之前需对原始光谱数据进行预处理,以减少噪声的干扰,提高模型的预测精度和稳定性。经过 derivative、SNV 和 MSC 预处理后的光谱反射率曲线如图 4(b) ~ (d) 所示。将原始光谱以及经过 derivative、SNV 和 MSC 预处理后的光谱数据作为 BP 网络模型的输入,建立不同的 BP 网络模型。由于 BP 网络随机选取初始权值,因此采用 60 次重复建模结果的平均值作为最终结果,BP 网络模型对李子硬度的检测结果如表 1 所示。

表 1 基于不同光谱预处理方法的 BP 模型对李子硬度的检测结果

Tab. 1 Firmness prediction results from BP model based on different spectra preprocessing

| spectra preprocessing | $R_c$ | RMESC | $R_p$ | RMESP |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| original              | 0.919 | 0.207 | 0.715 | 0.598 |
| derivative            | 0.939 | 0.153 | 0.681 | 0.701 |
| SNV                   | 0.923 | 0.196 | 0.723 | 0.580 |
| MSC                   | 0.925 | 0.193 | 0.715 | 0.630 |

从表 1 可以得出,derivative-BP 网络模型具有最高的  $R_c$ (0.939) 和最小的 RMESC (0.153),说明 derivative-BP 网络模型具有最好的校正性能。而

SNV-BP 网络模型具有最高的  $R_p$ (0.723) 和最小的 RMSEP(0.580),说明 SNV-BP 网络模型具有最好的预测性能。derivative-BP 网络模型的校正性能以及 SNV-BP 网络模型的预测性能均优于基于原始光谱数据建立的 original-BP 网络模型,即对原始光谱数据进行预处理,可以有效提高 BP 网络模型的预测精度和稳定性。

### 3.3 BP 网络模型建模结果

通过以上三种光谱预处理方法对李子原始光谱的处理结果可知,derivative 预处理后的光谱具有较好的李子硬度校正能力,而 SNV 预处理后的光谱具有较好的李子硬度预测能力。本试验进一步采用主成分分析方法对李子原始光谱数据进行降维,以便提升 BP 网络模型的运行效率。因此,为了保证 BP 网络模型的预测精度,本试验选取 PCA 变换后主成分得分的累计贡献率超过 99.99% 的主成分作为样本集特征光谱,不仅提高了 BP 网络模型的运行效率,而且也保证了模型的预测精度。采用主成分分析对经过 derivative 预处理以及 SNV 预处理后的光谱进行 PCA 变换,将 PCA 变换后主成分得分的贡献率超过 99.99% 的主成分作为 BP 网络模型的输入,同样采用 60 次重复建模结果的平均值作为最终结果,如表 2 所示。

表 2 基于特征光谱的 BP 模型对李子硬度的检测结果

Tab. 2 Firmness prediction results from BP model based on the characteristic spectrum

| spectra preprocessing | variables | $R_c$ | RMESC | $R_p$ | RMESP |
|-----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| derivative            | 256       | 0.939 | 0.153 | 0.681 | 0.701 |
| derivative 预处理后特征光谱   | 19        | 0.914 | 0.215 | 0.647 | 0.756 |
| SNV                   | 256       | 0.923 | 0.196 | 0.723 | 0.580 |
| SNV 预处理后特征光谱          | 16        | 0.901 | 0.251 | 0.660 | 0.741 |

从表 2 可以看出,基于特征光谱建立的 BP 网络模型对李子硬度的预测性能稍微劣于基于全光谱的结果,然而,从 derivative 预处理和 SNV 预处理后的 256 个光谱波段中分别选择了 19 个和 16 个特征变量作为 BP 网络的光谱输入,明显提升了 BP 网络模型的运行效率。由此表明基于全光谱和特征光谱建立的 BP 网络对李子硬度的无损检测均具有良好的校正和预测能力,可应用于李子硬度的无损检测。

其中,李子硬度的实测值和预测值如图5所示。

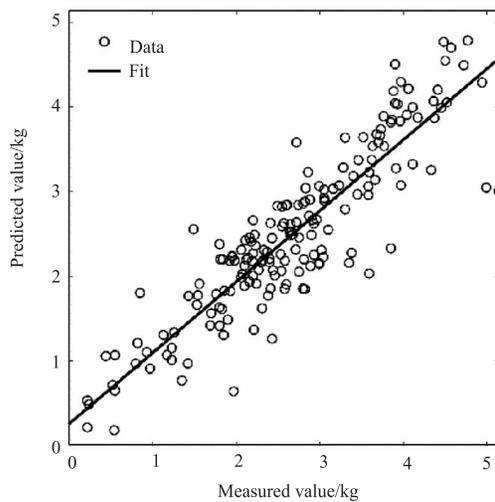


图5 李子硬度的预测结果

Fig. 5 Prediction results of firmness of plums

#### 4 结论

本文提出了基于高光谱成像技术的李子硬度的无损检测方法。综合比较了不同光谱预处理方法对BP网络模型检测效果的影响,得出 derivative 预处理后的光谱具有较好的李子硬度校正能力,而 SNV 预处理后的光谱具有较好的李子硬度预测能力;并利用主成分分析方法对预处理后的光谱数据进行降维,以提取能反映李子硬度的特征光谱,比较了基于全光谱和提取的特征光谱建立的BP网络模型对李子硬度预测性能的影响,特征光谱的提取有利于简化模型及提高模型的运算速度。基于全谱建立的BP网络模型的预测性能最好,其  $R_p$  和 RMSEC 分别为 0.723 和 0.580。本文将高光谱成像技术结合BP网络应用于无损检测李子的硬度,为实现李子内部品质的无损检测技术提供了研究基础。

#### 参考文献:

- [1] ZHU Weixing, JIANG Hui, CHEN Quansheng. Application of characteristic wavelengths selection in determination of pear firmness by near infrared (NIR) spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 368-372. (in Chinese)  
朱伟兴,江辉,陈全胜. 特征波长筛选在近红外光谱测定梨硬度中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 368-372.
- [2] DAI Q, SUN D W, XIONG Z, et al. Recent Advances in data mining techniques and their applications in hyperspectral image processing for the food industry [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(5): 891-905.
- [3] LI J L, SUN D W, CHENG J H. Recent advances in non-destructive analytical techniques for determining the total soluble solids in fruits: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2016, 15(5): 897-911.
- [4] CHENG J H, SUN D W. Recent applications of spectroscopic and hyperspectral imaging techniques with chemometric analysis for rapid inspection of microbial spoilage in muscle foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(4): 478-490.
- [5] 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.
- [6] WU Longguo, HE Jianguo, HE Xiaoguang, et al. Research progress of hyperspectral imaging technology in non-destructive detection of fruit [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 990-996. (in Chinese)  
吴龙国,何建国,贺晓光,等. 高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 990-996.
- [7] YANG D, HE D D, LU A X, et al. Detection of the freshness state of cooked beef during storage using hyperspectral imaging [J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(10): 2286-2301.
- [8] Sineenart S, Sontisuk T. Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 215: 97-103.
- [9] Erkinbaev C, Henderson K, Paliwal J. Discrimination of gluten-free oats from contaminants using near infrared hyperspectral imaging technique [J]. Food Control, 2017, 80: 197-203.
- [10] Mo C, Kim G, Kim M S, et al. Fluorescence hyperspectral imaging technique for foreign substance detection on fresh-cut lettuce [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 97(12): 3985-3993.
- [11] Siedliska A, Baranowski P, Zubik M, et al. Detection of pits in fresh and frozen cherries using a hyperspectral system in transmittance mode [J]. Journal of Food Engineer-

- ing,2017,215;61-71.
- [12] Dong Jinlei, Guo Wenchuan. Nondestructive detection of soluble solid content of postharvest kiwifruits based on hyperspectral imaging technology [J]. Food Science, 2015, 36(16):101-106. (in Chinese)  
董金磊, 郭文川. 采后猕猴桃可溶性固形物含量的高光谱无损检测 [J]. 食品科学, 2015, 36(16):101-106.
- [13] Feng Di, Ji Jianwei, Zhang Li, et al. Optimal wavelengths extraction of apple brix and firmness based on hyperspectral imaging [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(6):799-806. (in Chinese)  
冯迪, 纪建伟, 张莉, 等. 基于高光谱成像提取苹果糖度与硬度最佳波长 [J]. 发光学报, 2017, 38(6):799-806.
- [14] Mendoza F, Lu R, Cen H. Grading of apples based on firmness and soluble solids content using Vis/SWNIR spectroscopy and spectral scattering techniques [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1):59-68.
- [15] Guo Wenchuan, Dong Jinlei. Nondestructive detection on firmness of peaches based on hyperspectral imaging and artificial neural networks [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6):1530-1537. (in Chinese)  
郭文川, 董金磊. 高光谱成像结合人工神经网络无损检测桃的硬度 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(6):1530-1537.
- [16] Fu X P, Ying Y B, Zhou Y, et al. Application of NIR spectroscopy for firmness evaluation of peaches [J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2008, 9(7):552-557.
- [17] Li Rui, Fu Longsheng. Nondestructive measurement of firmness and sugar content of blueberries based on hyperspectral imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1):362-366. (in Chinese)  
李瑞, 傅隆生. 基于高光谱图像的蓝莓糖度和硬度无损测量 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(Supp. 1):362-366.
- [18] Leiva-Valenzuela G A, Lu R, Aguilera J M. Assessment of internal quality of blueberries using hyperspectral transmittance and reflectance images with whole spectra or selected wavelengths [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 24:2-13.
- [19] Li B C, Hou B L, Zhang D W, et al. Pears characteristics (soluble solids content and firmness prediction, varieties) testing methods based on visible-near infrared hyperspectral imaging [J]. Optik, 2016, 127(5):2624-2630.
- [20] Ni Lijun, Zhang Liguang. Basic chemometrics and its application [M]. Shanghai: East China University of Science And Technology Press, 2011:64-69. (in Chinese)  
倪力军, 张立国. 基础化学计量学及其应用 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2011.
- [21] Huang Wenqian, Chen Liping, Li Jiangbo, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):272-277. (in Chinese)  
黄文倩, 陈立平, 李江波, 等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):272-277.