

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.041

# 鲜枣内部综合品质光谱评价指标建立与分析

孙海霞 张淑娟 薛建新 刘蒋龙 赵旭婷

(山西农业大学工学院, 太谷 030801)

**摘要:**为实现鲜枣内部综合品质的在线无损快速检测,利用可见/近红外光谱漫反射技术,针对完熟期壶瓶枣的内部品质,包括含水率、可溶性固形物含量、硬度、可溶性蛋白质含量、维生素C含量5项指标,分别采用竞争性自适应重加权算法(CARS)提取特征波长并建立最小二乘-支持向量机(LS-SVM)预测模型,硬度预测模型的相关系数和均方根误差分别为0.9452和41.6849,其余品质预测模型的相关系数均在0.9230及以上、均方根误差均在3.7792及以下。在此基础上,对5项品质指标进行了相关性分析,表明在0.01或0.05水平上两两指标间存在极显著或显著的相关性,故采用因子分析法构建了内部综合品质评价指标,建立了CARS-LS-SVM预测模型,结果表明该模型的相关系数和均方根误差分别为0.9241和6.0635,预测精度较高。研究表明,所建立的CARS-LS-SVM模型可有效实现鲜枣内部综合品质的评价。

**关键词:**鲜枣;内部综合品质;特征提取;可见/近红外光谱

**中图分类号:**S123;S665 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2017)09-0324-06

## Establishment and Analysis of Internal Comprehensive Quality Spectral Evaluation Index for Fresh Jujube

SUN Haixia ZHANG Shujuan XUE Jianxin LIU Jianglong ZHAO Xuting  
(College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** A non-destructive method for on-line determining the internal comprehensive quality of Huping jujube fruit was investigated based on visible/near-infrared reflection spectrum. Moisture content, soluble solid content, firmness, soluble protein content and vitamin C content were respectively used as internal indexes to assess the quality of Huping jujube at full ripe stage. Competitive adaptive reweighted sampling (CARS) was applied to select sensitive wavelengths. Models of the least squares-support vector machines (LS-SVM) were built based on the sensitive wavelengths respectively. The model of firmness showed that the correlation coefficient of prediction was 0.9452 and root mean square error of prediction was 41.6849. The other four models obtained the better results with the correlation coefficient of each prediction over 0.9230 and root mean square error of each prediction from 0.2674 to 3.7792. Then, the correlation was analyzed between the quality indexes. The results indicated that an extremely significant or a significant correlation was revealed between any two indexes in the  $P < 0.01$  or  $P < 0.05$  levels. Therefore, factor analysis was carried out on five internal quality index of fresh jujube to develop the internal comprehensive quality index, and the CARS-LS-SVM model of this index was established. The results indicated that the correlation coefficient of prediction was 0.9241 and root mean square error of prediction was 6.0635. This research showed that the established CARS-LS-SVM model was effective to realize evaluation of the internal comprehensive quality on fresh jujube. This research provided theoretical basis for on-line, rapid and non-destructive detection on internal comprehensive quality of fresh jujube.

**Key words:** fresh jujube; internal comprehensive quality; feature extraction; visible/near-infrared spectrum

收稿日期:2017-01-02 修回日期:2017-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(31271973)

作者简介:孙海霞(1985—),女,博士生,主要从事农产品无损检测研究,E-mail:sunhaixia1121@126.com

通信作者:张淑娟(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农产品无损检测研究,E-mail:zshujuan@263.net

## 引言

在果品品质<sup>[1-2]</sup>评价中,含水率、可溶性固形物含量影响果实的内部口感,硬度影响果肉质度,蛋白质含量、维生素含量影响果实的营养成分,上述指标直接影响水果的定级和定价。

近年来,近红外光谱技术已成功应用于水果内部品质检测中,国内外许多学者做了相关研究。JUNIOR等<sup>[3]</sup>建立了新鲜巴西莓的干物质含量与傅里叶变换近红外漫反射光谱数据的偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)模型,从侧面验证了水果中含水率与近红外光谱数据之间的对应关系。在此基础上,研究者还对巴西莓的花青素含量和可溶性固形物含量进行了相应的检测研究<sup>[4]</sup>。MANIWARA等<sup>[5]</sup>利用可见光和短波近红外光谱建立多变量PLSR预测模型,同时实现对百香果的可溶性固形物含量、可滴定酸含量、抗坏血酸含量、乙醇浓度、果皮硬度等指标的建模分析,可溶性固形物含量预测效果最好且相关系数达到0.923;抗坏血酸含量不适合采用该模型预测,其余指标预测效果良好。张淑娟等<sup>[6]</sup>利用近红外光谱技术针对鲜枣的可溶性固形物含量建立了全波段偏最小二乘模型进行预测分析,相关系数和预测均方根误差分别为0.8874和1.0889。上述研究主要在静态条件下进行。为在生产实际中推广使用,SALGUERO-CHAPARRO等<sup>[7-8]</sup>、MENDOZA等<sup>[9]</sup>、XU等<sup>[10]</sup>、JIE等<sup>[11]</sup>已分别实现了对橄榄、苹果、梨、西瓜的在线检测。以上研究中多采用近红外光谱技术,通过建立单一品质模型进行检测,少有针对多项内部品质建立综合品质评价指标,对水果进行多指标同步检测的研究。

本文以壶瓶枣为研究对象,利用Field Spec3型光谱仪采集漫反射光谱数据,分别针对含水率、可溶性固形物含量、硬度、可溶性蛋白质含量、维生素C含量提取特征波长并建立最小二乘-支持向量机预测模型;分析以上5项指标的相关性并运用因子分析法构建内部综合品质评价指标,然后提取特征波长,建立最小二乘-支持向量机预测模型,并分析其预测精度,旨在建立反映鲜枣内部综合品质信息的快速无损检测模型,为实现鲜枣品质多指标同步在线检测奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集

以从山西省太谷县小白村果园采集的160个颜色均匀的完熟期壶瓶枣为实验样本,采后当天运达

实验室并筛选成熟度、大小、形状相对一致的果实,剔除异形果、损伤果和软果,以保证果实的物性初始状态相对一致,降低果实之间个体差异对实验结果的影响。最终选择实验样本153个,按照3:1的比例随机分成校正集(117个)和预测集(36个)。

### 1.2 内部品质指标测定

对所有鲜枣样本进行5项内部品质指标的测定。含水率的测定按GB/T 5009.3—2010中的直接干燥法进行;可溶性固形物含量的测定按GB/T 12295—90进行;维生素C含量的测定按GB/T 6195—86进行;可溶性蛋白质含量的测定采用考马斯亮蓝法(染料法)<sup>[12]</sup>;硬度真实值的测定采用美国FTC公司生产的TMS-PRO型食品物性分析仪(质构仪)进行,探头插入点与光谱采集位点相对应<sup>[13]</sup>,测试探头为直径2 mm的圆平头,测前速率和测后速率均为3 mm/s,测中速率为2 mm/s,触发力为5 g。

测定5项理化指标的基本统计值见表1。

表1 壶瓶枣样本不同理化指标的基本统计值  
Tab.1 Statistics of different indicators for Huping jujube samples

参数	数值			
	最大值	最小值	均值	标准差
含水率/%	72.83	60.09	67.35	3.01
可溶性固形物质量分数/%	32.60	18.30	24.60	3.30
维生素C含量/(mg·g <sup>-1</sup> )	5.56	1.09	2.79	1.24
蛋白质含量/(mg·g <sup>-1</sup> )	28.77	7.64	16.68	6.34
硬度/g	1 066.80	492.48	804.40	127.31

### 1.3 可见/近红外光谱数据采集

利用美国ASD(Analytical Spectral Device)公司生产的Field Spec3型光谱仪(采样范围为350~2 500 nm)采集153个壶瓶枣样本的漫反射光谱数据,如图1所示。整个光谱曲线有较高反射率,各光谱曲线的反射率虽有显著差异但有相似变化趋势。960 nm、1 400 nm波长处,光谱线下凹,形成2个明显的水分吸收峰;680 nm、1 148 nm等多处波长处也有较弱的吸收峰。1 500~2 500 nm间光谱曲线谱带复杂、重叠多、反射率较低,与350~1 100 nm相比,总体走势较平缓,没有明显吸收峰,波峰和波谷没有

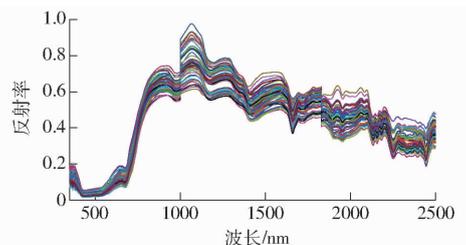


图1 样本光谱曲线

Fig.1 Spectrum curves of samples

剧烈的起伏。350 ~ 450 nm、2 400 ~ 2 500 nm 波段的各条光谱曲线反射率有较小差异,交错在一起很难区分,为边缘波段,有较低信噪比,在后续的研究中应剔除。

#### 1.4 光谱数据分析

在光谱数据的处理和分析中,利用 Matlab R2012b 软件(美国 The MathWorks 公司)实现竞争性自适应重加权算法(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)提取特征波长和最小二乘-支持向量机(Least squares - support vector machines, LS - SVM)建模。

##### 1.4.1 特征波长提取方法

竞争性自适应重加权算法<sup>[14-15]</sup>是一种变量选择方法,以自适应重加权采样技术和指数衰减函数为核心,在偏最小二乘模型优选出的极值回归系数基础上,利用十字交叉法优选出多个模型子集中的交叉验证均方根误差最小的模型为最优变量。

##### 1.4.2 预测模型

最小二乘-支持向量机<sup>[16-18]</sup>克服了神经网络结构复杂且容易出错等方面的不足;与原支持向量机相比,将求解二次规划问题转化为直接求解线性方程组,降低了计算复杂度。

#### 1.5 内部品质指标值统计分析

利用 SPSS19.0 软件对所测定的各内部品质指标的相关数据加以分析。

##### 1.5.1 显著性检验

皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)的显著性双侧检验主要应用于正态分布情形下的相关性检验、非正态分布情形下的大样本相关性检验等分析中,较斯皮尔曼(Spearman)等方法的检验效能高。

##### 1.5.2 因子分析

因子分析法的前提是经 KMO 检验和 Bartlett 球形度检验是否适合做因子分析,核心为对若干综合指标进行因子分析并提取公因子,再以每个因子的方差贡献率作为权数,该权数与对应因子的得分相乘,再将所得乘数相加,以此来构造得分函数。其中,公因子反映了各变量中所含原始信息能被综合品质指标表示的程度。

KMO 检验用于比较变量间的简单相关系数和偏相关系数,当所有变量间的简单相关系数平方和远大于偏相关系数平方和时,KMO 值越接近于 1,所有变量越适合做因子分析,当 KMO 值小于 0.5 时表示不适合做因子分析。Bartlett 球形度检验近似于  $\chi^2$  检验,用于检验相关系数矩阵是否为单位矩阵,即各变量的独立性,当显著性值  $P$  小于 0.05 时,表明各变量不独立,适合做因子分析。

##### 1.5.3 主成分分析

主成分分析法是一种数据降维技术,将原来的多个相关变量重新组合成较少的几个不相关的新变量,使新变量尽可能地反映原来变量的信息。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单一品质指标预测

#### 2.1.1 特征波长提取

针对鲜枣样本 450 ~ 2 400 nm 间的原始光谱数据,采用 CARS 法分别提取鲜枣 5 项品质指标的特征波长。含水率的特征波长提取过程中,首先设定采样次数为 50 次,对模型贡献率大的变量,在采样次数的增加过程中,回归系数会被放大和保留,反之会逐渐消失和淘汰;在变量筛选过程中,随采样次数的不断增加,变量数由 1 951 个逐渐减少到 14 个;在采样次数变化过程中,当采样次数为 36 时,模型的交叉验证均方根误差最小,为 1.913,此时保留下来的变量即为所提取的特征波长,共 14 个。同理,在可溶性固形物质量分数的特征波长选择模型中,当采样次数为 38 次时,交叉验证均方根误差最小为 2.176,提取到的特征波长数为 11 个;在维生素 C 含量的特征波段选择模型中,当采样次数为 34 次时,交叉验证均方根误差为 0.517,提取到的特征波长数为 18 个;在蛋白质含量的特征波长选择模型中,当采样次数为 41 次时,交叉验证均方根误差为 6.692,提取到的特征波长数为 7 个;在硬度的特征波长选择模型中,当采样次数为 34 次时,交叉验证均方根误差为 68.874,提取到的特征波长数为 19 个。各品质指标运用 CARS 算法提取到的特征波长见表 2。

表 2 鲜枣品质指标的 CARS 优选特征波长

Tab.2 Characteristic wavelengths selected by CARS models of fresh jujube quality indexes

品质指标	个数	特征波长/nm
含水率	14	598,606,655,917,923,960,1 090,1 104,1 940,2 207,2 210,2 213,2 277,2 364
可溶性固形物质量分数	11	740,762,770,779,789,796,815,1 139,1 921,1 928,1 932
维生素 C 含量	18	456,489,656,687,728,963,987,994,996,1 030,1 048,1 058,1 607,1 781,1 794,1 802,2 332,2 351
蛋白质含量	7	623,999,1 395,2 108,2 221,2 271,2 392
硬度	19	753,960,1 005,1 067,1 148,1 770,1 865,1 904,1 993,2 008,2 084,2 153,2 236,2 265,2 272,2 300,2 316,2 320,2 331

### 2.1.2 特征波长建模分析

分别以 CARS 提取到的各品质指标的特征波长作为模型输入量,各品质指标值为输出量,建立 LS-SVM 模型。各项品质指标的预测结果见表 3,含水率、可溶性固形物质量分数、维生素 C 含量、蛋白质含量、硬度特征波长预测模型的相关系数分别为 0.923 0、0.936 3、0.974 9、0.934 2、0.945 2,预测集均方根误差分别为 1.173 9、1.191 6、0.267 4、3.779 2、41.684 9。

表 3 鲜枣品质指标的 CARS-LS-SVM 模型预测结果

Tab.3 Prediction results of quality indexes of fresh jujube by CARS-LS-SVM models

品质指标	校正集的 相关系数	校正集均 方根误差	预测集的 相关系数	预测集均 方根误差
含水率	0.934 9	1.049 3	0.923 0	1.173 9
可溶性固形物质量分数	0.944 1	1.015 7	0.936 3	1.191 6
维生素 C 含量	0.989 4	0.212 4	0.974 9	0.267 4
蛋白质含量	0.959 9	3.223 0	0.934 2	3.779 2
硬度	0.954 0	38.445 0	0.945 2	41.684 9

表 4 鲜枣品质指标间的显著性分析

Tab.4 Significant analysis between quality indexes of fresh jujube

	含水率	可溶性固形物质量分数	维生素 C 含量	蛋白质含量	硬度
含水率					
可溶性固形物质量分数	0.005 3 **				
维生素 C 含量	0.000 8 **	0.007 0 **			
蛋白质含量	0.006 8 **	0.011 0 *	0.035 0 *		
硬度	0.015 0 *	0.039 0 *	0.026 0 *	0.045 0 *	

注: \*\*表示在 0.01 水平上具有极显著的相关性; \* 表示在 0.05 水平上具有显著的相关性。

各变量间有较强的偏相关性,适合进行因子分析。用主成分分析法提取特征值,各变量公因子方差见表 5。

表 5 各指标公因子方差

Tab.5 Statistics of factors variance extracted by quality indexes

	含水率	可溶性固形物质量分数	维生素 C 含量	蛋白质含量	硬度
初始	1	1	1	1	1
提取	0.888	0.816	0.867	0.899	0.939

由表 5 可知,5 项指标的公因子方差均在 0.8 以上,表明所提取的公因子对各指标变量均有较好的解释能力。对因子分析中主成分特征值和累计贡献率进行分析,见表 6。前 2 个因子的累计贡献率已达到 82.738%,已能较好地反映原始变量的主要信息。

为了考察多项品质指标间的相互作用并进行综合评价,利用回归方法计算成分的得分系数矩阵,结果见表 7。

## 2.2 内部综合品质指标预测

### 2.2.1 内部综合品质指标建立

刘嘉芬等<sup>[19]</sup>测定完熟期鲜枣的可溶性固形物含量和含水率之和为不受品种影响的相对恒定数值,说明各品质指标间可能存在一定的相关性,故对鲜枣进行了 5 项品质指标间的相关性分析。采用皮尔逊相关系数的显著性双侧检验进行显著性分析,分析结果见表 4。由表 4 可知,5 项品质指标两两之间在 0.01 或 0.05 水平上存在极显著或显著的相关性,说明根据某一品质指标所建立的模型必然会受到其他多项品质指标的影响。其中,在 0.01 水平上的含水率与维生素 C 含量之间的相关性最好。由于各项指标之间两两相关,为更好地表征鲜枣内部综合品质信息,拟建立一个综合评价指标,更全面地表征光谱与鲜枣内部品质间的对应关系。

所有样本的各项指标原始变量经 Bartlett 球形度检验的 P 值为 0.02,小于 0.05,说明各变量间不独立;经 KMO 检验的系数为 0.684,大于 0.5,表明

表 6 鲜枣因子分析中主成分特征值及贡献率

Tab.6 Factor analysis of principal component characteristic value and contribution in fresh jujube

成分	特征值	因子贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.516	50.315	50.315
2	1.621	32.423	82.738
3	0.569	11.377	94.115
4	0.205	4.099	98.214
5	0.089	1.786	100

表 7 成分得分系数矩阵

Tab.7 Coefficient matrix of basic information of common factors

品质指标	含水率 $X_1$	可溶性固形物 质量分数 $X_2$	维生素 C 含量 $X_3$	蛋白质 含量 $X_4$	硬度 $X_5$
成分矩阵 1	0.941	0.809	0.844	0.668	-0.087
成分矩阵 2	0.380	-0.186	0.346	0.044	0.893

由表 7 可知,其成分矩阵的 2 个主因子得分 ( $I_1, I_2$ ) 表达式为

$$I_1 = 0.941X_1 + 0.809X_2 + 0.844X_3 + 0.668X_4 - 0.087X_5 \quad (1)$$

$$I_2 = 0.380X_1 - 0.186X_2 + 0.346X_3 + 0.044X_4 + 0.893X_5 \quad (2)$$

由表6可知,所建立鲜枣内部综合品质指标  $I$  的表达式为

$$I = 0.50315I_1 + 0.32423I_2 = 0.5967X_1 + 0.3468X_2 + 0.5369X_3 + 0.3504X_4 + 0.2457X_5 \quad (3)$$

其中,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  分别为含水率、可溶性固形物质量分数、维生素 C 含量、蛋白质含量、硬度经标准化处理后的值。

## 2.2.2 内部综合品质指标预测模型建立

### 2.2.2.1 特征波长提取

针对鲜枣样本 450 ~ 2 400 nm 间的原始光谱数据, CARS 提取内部综合品质指标特征波长的过程见图2, 当采样次数为 29 次时, 其特征波长选择模型的交叉验证均方根误差最小, 为 9.532。提取到的特征波长为 660、721、784、832、999、1 102、1 712、1 950、2 275、2 287、2 300、2 386 nm, 共 12 个。

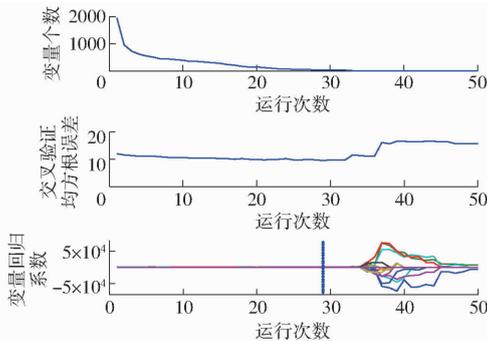


图2 CARS 提取特征波长过程图

Fig.2 Key variables screening by CARS

各品质指标的特征吸收峰会根据果品的温度、压力、内部存在化学物质的不同而发生一定的位置偏移<sup>[20-21]</sup>。因此,所提取的综合品质指标特征波长可能发生了一定量的位置偏移。结合表2可知,660 nm 和 721 nm 可能分别是维生素 C 含量的特征波长 656 nm 和 728 nm 位置发生偏移所致;784 nm 可能与可溶性固形物质量分数的特征波长 789 nm 或 779 nm 的位置偏移有关;999 nm 与蛋白质含量的特征波长相重合;1 102、1 950、2 287 nm 可能分别与含水率的特征波长 1 104、1 940、2 277 nm 的位置偏移有关;2 275 nm 可能与硬度的特征波长 2 272 nm 的位置偏移有关,2 300 nm 与硬度的特征波长相重合。因此,根据内部综合品质指标所提取到的 12 个特征波长中,含有根据各项单一品质所提取到的特

征波长,可以全面表征出 5 项品质的信息。

### 2.2.2.2 内部综合品质指标特征波长建模分析

将 CARS 提取到的内部综合品质指标特征波长作为模型输入量,将基于因子分析法所构建的内部综合品质指标值作为输出量,建立 LS-SVM 预测模型,判别结果见图3,预测集的相关系数和均方根误差分别为 0.924 1 和 6.063 5,说明该模型的预测精度较高。

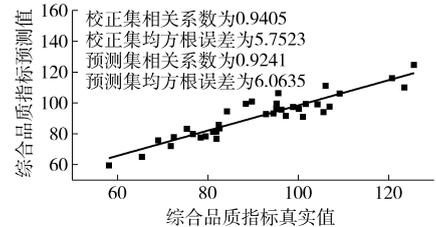


图3 鲜枣综合品质的 CARS-LS-SVM 模型预测结果

Fig.3 Prediction results of comprehensive index of fresh jujube by CARS-LS-SVM models

GB/T 22345—2008《鲜枣质量等级》中对鲜枣内部品质仅在可溶性固形物指标上做了规定,在口感检验中通过品尝确定果实是否脆甜适口,没有针对其他质量如果实质地、营养成分等确定明确的综合定量评价标准。而综合评价指标的建立,不仅揭示了各品质指标间的相互作用,更全面地表征了鲜枣的内部综合品质信息,而且解决了鲜枣内部品质综合评价不能定量分析的问题,并为鲜枣内部综合评价标准体系的构建提供了基础。内部综合品质检测模型的建立,解决了各单一品质检测模型同步实现有较大难度的问题,实现了多项品质的同步综合检测,并且简化了检测模型,提高了预测能力和运算速度。

## 3 结论

(1) 含水率、可溶性固形物质量分数、可溶性蛋白质含量、维生素 C 含量、硬度的 CARS-LS-SVM 模型的预测集相关系数分别为 0.923 0、0.936 3、0.934 2、0.974 9、0.945 2,均方根误差分别为 1.173 9、1.191 6、3.779 2、0.267 4、41.684 9。

(2) 鲜枣的 5 项品质指标间两两相关,利用因子分析法构建了鲜枣内部综合品质的评价指标,实现了内在品质的综合定量评价;并建立了 CARS-LS-SVM 模型,实现了对内部综合品质的预测,且预测集相关系数和均方根误差分别达到了 0.924 1 和 6.063 5,为实现鲜枣内部综合品质的实时快速准确分级奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 NICOLAI 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.
- 2 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 276 – 285.  
GONG Liyan, MENG Xianjun, LIU Naiqiao, et al. Evaluation of apple quality based on principal component and hierarchical cluster analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(13): 276 – 285. (in Chinese)
- 3 JÚNIOR L C C, NARDINI V, KHATIWADA B P, et al. Classification of intact açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) and jucara (*Euterpe edulis* Mart.) fruits based on dry matter content by means of near infrared spectroscopy[J]. *Food Control*, 2015, 50: 630 – 636.
- 4 JÚNIOR L C C, NARDINI V, WALSH K B. Quality evaluation of intact açaí and jucara fruit by means of near infrared spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 112: 64 – 74.
- 5 MANIWARA P, NAKANO K, BOONYAKIAT D, et al. The use of visible and near infrared spectroscopy for evaluating passion fruit postharvest quality[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 143(2): 33 – 43.
- 6 张淑娟, 张海红, 赵艳茹, 等. 鲜枣可溶性固形物可见/近红外光谱检测建模方法比较[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 108 – 112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120321&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120321&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.021.  
ZHANG Shujuan, ZHANG Haihong, ZHAO Yanru, et al. Comparison of modeling methods of fresh jujube soluble solids measurement by NIR spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 108 – 112. (in Chinese)
- 7 SALGUERO-CHAPARRO L, BAETEN V, ABBAS O, et al. On-line analysis of intact olive fruits by vis-NIR spectroscopy: optimisation of the acquisition parameters[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 112(3): 152 – 157.
- 8 SALGUERO-CHAPARRO L, PENA-RODRIGUEZ F. On-line versus off-line NIRS analysis of intact olives[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2014, 56(2): 363 – 369.
- 9 MENDOZA F, LU R F, CEN H Y. Grading of applies based on firmness and soluble solids content using Vis/SWNIR spectroscopy and spectral scattering techniques[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 125: 59 – 68.
- 10 XU H R, QI B, SUN T, et al. Variable selection in visible and near-infrared spectra: application to on-line determination of sugar content in pears[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 142 – 147.
- 11 JIE D F, XIE L J, RAO X Q, et al. Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 90(3): 1 – 6.
- 12 BRADFORD. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248 – 254.
- 13 薛建新, 张淑娟, 孙海霞, 等. 可见/近红外光谱结合软化指标快速判定沙果货架期[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 169 – 173. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130828&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130828&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.028.  
XUE Jianxin, ZHANG Shujuan, SUN Haixia, et al. Detection of shelf life of *Malus asiatica* using near-infrared spectroscopy and softening index[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 169 – 173. (in Chinese)
- 14 梁琨, 杜莹莹, 卢伟, 等. 基于高光谱成像技术的小麦籽粒赤霉病识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 309 – 315. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160241&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160241&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.041.  
LIANG Kun, DU Yingying, LU Wei, et al. Identification of fusarium head blight wheat based on hyperspectral imaging technology [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 309 – 315. (in Chinese)
- 15 李江波, 郭志明, 黄文倩, 等. 应用 CARS 和 SPA 算法对草莓 SSC 含量 NIR 光谱预测模型中变量及样本筛选[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2): 372 – 378.  
LI Jiangbo, GUO Zhiming, HUANG Wenqian, et al. Near-infrared spectra combining with CARS and SPA algorithms to screen the variables and samples for quantitatively determining the soluble solids content in strawberry [J]. *Spectroscopy and Spectra Analysis*, 2015, 35(2): 372 – 378. (in Chinese)
- 16 石吉勇, 胡雪桃, 朱瑶迪, 等. 基于近红外光谱技术的醋醅中常见杆菌快速识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 245 – 250. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160232&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160232&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.032.  
SHI Jiyong, HU Xuetao, ZHU Yaodi, et al. Rapid identification of common bacilli in vinegar culture based on near-infrared spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 245 – 250. (in Chinese)
- 17 ROBLES G, PARRADO-HERNÁNDEZ E, ARDILA-REY J, et al. Multiple partial discharge source discrimination with multiclass support vector machines[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 55: 417 – 428.
- 18 KISI O, PARMAR K S. Application of least square support vector machine and multivariate adaptive regression spline models in long term prediction of river water pollution[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 104 – 112.
- 19 刘嘉芬, 高丽, 单公华. 枣果发育过程中可溶性总糖和水分含量的变化[J]. *落叶果树*, 2007, 39(5): 11 – 12.  
LIU Jiafen, GAO Li, SHAN Gonghua. Changes of total soluble sugar and water content during development of Chinese jujube fruit [J]. *Decid Fruits*, 2007, 39(5): 11 – 12. (in Chinese)
- 20 VANDERMEULEN D L, RESSLER N. A near-infrared method for studying hydration changes in aqueous solution: illustration with protease reactions and protein denaturation[J]. *Arch of Biochemistry and Biophysics*, 1980, 205(1): 180 – 190.
- 21 DELWICHE S R, PITT R E, NORRIS K H. Sensitivity of near-infrared absorption to moisture content versus water activity in starch and cellulose[J]. *Cereal Chemistry*, 1992, 69(1): 107 – 109.