

砂糖橘可溶性总糖可见-近红外光谱无损检测\*

代芬 洪添胜 岳学军 张昆 洪涯

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

【摘要】 在波长 450 ~ 2 500 nm 范围提取 189 个砂糖橘的漫反射光谱,使用 sym8 小波的 3 层分解对其进行去噪预处理,引入连续投影算法(SPA)对光谱进行压缩,从 2 051 个波长中初步提取 14 个优选波长,以这 14 个波长建立的多元线性回归模型(MLR)的预测相关系数为 0. 885 5,预测均方根误差为 0. 511 1,效果优于全谱偏最小二乘模型(PLS)。通过贡献值进一步筛选,提取 11 个特征波长,以这 11 个特征波长建立的 MLR 模型、PLS 模型和 BP 神经网络模型(BPNN)都与 14 个优选波长建立的相应模型效果相当。结果表明,连续投影算法结合贡献值筛选可以将波长变量数缩减到全谱变量的 0. 54%,简化定量模型的结构,增强模型精度和稳健性;同时被选择的波长物理意义明确,模型解释能力增强。

关键词: 砂糖橘 可溶性总糖 可见-近红外光谱 无损检测 连续投影算法 小波去噪  
中图分类号: S123; O657. 33 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0133-06

Nondestructive Examination of Sugar Content of Intact ‘Shatangju’ with Visible-near Infrared Spectroscopy Based on Variables Selection

Dai Fen Hong Tiansheng Yue Xuejun Zhang Kun Hong Ya

(Key Laboratory of Key Technology on South Agricultural Machinery and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

The reflectance spectra of 189 samples within 450 ~ 2 500 nm were collected. Firstly, the spectra were denoised using the orthogonal wavelet functions sym8 (level was 3). And then the spectra variables were compressed to 14 variables by successive projections algorithm (SPA). The MLR model with 14 variables as inputs could result in that prediction correlation coefficient was 0. 885 5 and prediction root mean square error was 0. 511 1. Then the group of wavelengths derived from SPA was screened by their contributions to the total sugar content. After screening on contribution, the number of wavelength variables dropped to 11. Finally, the MLR, PLS and BPNN calibration models were built with 11 wavelength variables as inputs and compared. The results demonstrated that wavelength variables were decreased to 0. 54 % of the original variables by SPA and screening on contribution, and this could help to make the model more concise and robust.

Key words Shatangju, Soluble sugar, Visible-near infrared spectroscopy, Nondestructive examination, Successive projections algorithm, Wavelet denoising

引言

砂糖橘又名十月橘,是广东省特色水果之一。其可溶性总糖含量对其口感有很大影响,是评价其

内部品质的重要指标。目前,国内外对水果总糖含量的检测都采用破坏性的化学方法,存在样品预处理繁琐,检测时间长,检测成本高等方面的问题<sup>[1]</sup>。寻求无损、快速

收稿日期: 2010-08-03 修回日期: 2010-10-21  
\* 国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(农科教发[2007]14号)和华南农业大学校长基金资助项目(2009K005)  
作者简介: 代芬,讲师,博士生,主要从事基于光谱分析的农产品无损检测研究,E-mail: sunflower@scau.edu.cn  
通讯作者: 洪添胜,教授,博士生导师,主要从事机电一体化和信息技术在农业中的应用研究,E-mail: tshong@scau.edu.cn

并且有效的砂糖橘总糖含量检测方法十分必要。

基于可见-近红外光谱分析的无损检测具有快速、简便、可在线检测等特点,能快速检测水果内部品质,如糖度、酸度、硬度、可溶性固形物含量等<sup>[2~7]</sup>。由于可见-近红外光谱主要是倍频和合频的吸收,光谱信息重叠严重,因此必须在纷繁复杂的光谱信息中剔除冗余信息,提取有用信息。从应用的角度,期望能找出快速估测被测成分含量的模型,提高模型精度和建模效率,并从模型的稳健性方面考虑提高其抗干扰性。而从大量的光谱信息中提取特征波长,并使用特征波长建模,则可以较好地满足建模精度和稳健性要求。连续投影算法(successive projections algorithm,简称 SPA)是一种变量提取方法。它能够利用向量的投影分析,寻找含有最低限度冗余信息的变量组,并使变量之间的共线性达到最小,提高建模速度和效率<sup>[8~12]</sup>。

本文在波长为 450 ~ 2 500 nm 范围内采集 189 个砂糖橘样本的漫反射光谱,并采用小波分析方法对其进行去噪预处理。然后从提高建模效率、减少建模变量的角度引进连续投影算法,并结合贡献值筛选原理,提取砂糖橘可溶性总糖在可见-近红外区的特征波长,并将其应用在砂糖橘可溶性总糖测量的定量校正模型中。

## 1 材料和方法

### 1.1 样本制备

从超市购买一批产自广东省四会市的砂糖橘,将其洗净擦干,剔除损伤样本,最后得到 189 个无损样本,依次贴上标签备用。

### 1.2 光谱采集仪器

实验使用美国 ASD 公司的 FieldSpec 3 光谱仪,其测量光谱范围为 350 ~ 2 500 nm,采样间隔为 1.4 nm(350 ~ 1 000 nm)和 2 nm(1 000 ~ 2 500 nm),光谱分辨率为 3 nm(350 ~ 1 000 nm)和 10 nm(1 000 ~ 2 500 nm),扫描次数 10 次,数据间隔 1 nm,并配有自带光源的接触式反射探头。光源是与光谱仪配套的 14.5 V 卤素灯。分析软件为 ASD View Spec Pro、Unscrambler 9.8 和 Matlab 7.8.0。

### 1.3 光谱采集

经分析研究表明,相对于较远的距离,近距离测量得到的定量分析模型效果较好<sup>[6]</sup>。因此采用接触式的反射探头采集砂糖橘表面反射光谱。在每个砂糖橘的赤道部位取 3 点进行测量,每个点相隔 120°。每个点扫描 30 次,计算 30 个光谱数据平均值作为这一点的光谱。然后将 3 个点的光谱平均作为整个砂糖橘的漫反射光谱。在采集光谱之前,事

先要进行光谱仪预热、优化和白板校正。在采集过程中,每隔 15 ~ 20 min 要重新进行白板校正。189 个砂糖橘的光谱数据如图 1 所示。

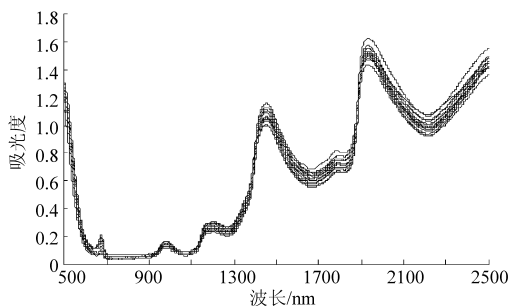


图 1 189 个砂糖橘样品的原始光谱图

Fig. 1 Original spectrogram of 189 'shatangju' samples

### 1.4 可溶性总糖测定

采用日本 ATAGO 公司 PAL-1 型数显手持式糖度计对砂糖橘的可溶性总糖进行测量。将砂糖橘样本放入打浆机内打碎,从打碎的样本中取 2 ~ 3 滴滤液滴至 PAL-1 型数显手持式糖度计的测量区域内进行读数,重复两次取平均值。

### 1.5 小波去噪

小波分析用于降噪的过程一般是先把信号分解成小波系数。由于一般信号的能量主要集中在低频部分,所以应保留逼近系数,而噪声能量主要集中在高频部分,所以应对小波系数取阈值,将低于阈值幅度的小波系数置零,可在很大程度上滤除噪声。最后利用小波重建方法恢复出降噪后的原始信号。图 2 为样本的原始光谱和使用 sym8 小波经过 3 层分解去噪后的光谱。

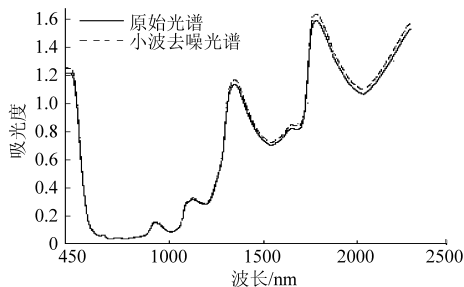


图 2 原始光谱和 sym8 小波去噪后的光谱

Fig. 2 Original sample spectrum and sample spectrum denoised by wavelet sym8

### 1.6 连续投影算法

连续投影算法作为一种新兴的波长选取方法,能够有效消除众多波长变量之间的共线性影响,寻找含有最少冗余信息的变量组。

连续投影算法的步骤如下:

(1) 初始化:迭代次数  $n = 1$  (第 1 次迭代时),在光谱矩阵中任选一列向量  $\mathbf{x}_j$ ,记为  $\mathbf{x}_{k(0)}$ ,其中  $j$  是波长变量, $k(0)$  是迭代初值。

(2) 集合  $S$  定义为

$$S = \{j, 1 \leq j \leq K \text{ 且 } j \notin \{k(0), \dots, k(n-1)\}\}$$

即还没有被选进波长链的列向量。分别计算  $\mathbf{x}_j$  对  $S$  中向量的投影向量

$$\mathbf{P}_{x_j} = \mathbf{x}_j - (\mathbf{x}_j^T - \mathbf{x}_{k(n-1)}^T) \mathbf{x}_{k(n-1)} (\mathbf{x}_{k(n-1)}^T - \mathbf{x}_{k(n-1)}^T)^{-1}$$

(3) 记录最大投影的序号为

$$k(n) = \arg(\max \| \mathbf{P}_{x_j} \|) \quad (j \in S)$$

(4) 将最大的投影作为下轮的投影向量

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{P}_{x_j} \quad (j \in S)$$

(5)  $n = n + 1$ , 如果  $n < N$ , 回到步骤(2)循环计算, 其中  $N$  为最大迭代次数。

这样得到  $N \times K$  对波长组合, 对每一对  $\mathbf{x}_{k(0)}$  和  $N$  所决定的组合分别建立多元回归模型, 使用验证均方根误差来决定所建模型的优劣。选出最小的验证均方根误差, 它所对应的  $\mathbf{x}_{k(0)}$  和  $N$  即为最佳的波长组合。

1.7 贡献值筛选

分析连续投影算法可知, 投影过程中每个序列的选取并没有考虑待测成分的信息, 这将导致所优选出的波长序列, 可能存在对待测成分不敏感的波长<sup>[8-9]</sup>。鉴于此, 对连续投影优选出的波长序列与待测成分建立一个多元线性回归模型

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_Lx_L$$

式中下角  $L$  表示波长数。

其残差平方和  $Q$  为

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$$

每次去掉一个波长参与模型的建立, 并分别计算新建模型的残差平方和, 记为  $Q_1, Q_2, \dots, Q_L$ 。从而得到各个波长对应的贡献值  $C_i$  为

$$C_i = (Q_i - Q) / Q \quad (i = 1, 2, \dots, L)$$

将波长按照贡献值的大小重新排序, 依次剔除序列中贡献值最小的波长并建立新的多元回归模型, 当所建模型的预测精度有较大幅度的降低时(以显著水平为 0.25 的  $F$  检验作为标准<sup>[8-9]</sup>), 即停止剔除。

2 结果与分析

2.1 基于小波去噪的光谱预处理

可见-近红外光谱区(450 ~ 2 500 nm)主要是由含氢基团的倍频和合频吸收峰组成, 吸收强度弱、灵敏度低、吸收带较宽且重叠严重<sup>[1]</sup>。不同光谱预处理方式建立的模型结果相差很大, 不同样品需采用不同的预处理方法。本文以砂糖橘为研究对象, 比较了多种光谱预处理方法对全样本 PLS 建模效果的影响, 其中 PLS 方法采用内部交叉验证。部分比

较结果如表 1 所示。

表 1 不同预处理的全样本 PLS 模型效果比较  
Tab.1 Comparison of PLS model with different pretreatments

| 预处理               | 校正集     |              | 验证集     |              |
|-------------------|---------|--------------|---------|--------------|
|                   | 校正均方根误差 | 校正相关系数 $R_c$ | 验证均方根误差 | 验证相关系数 $R_v$ |
| 无                 | 0.445 6 | 0.919 7      | 0.507 1 | 0.895 1      |
| 一阶导数              | 0.416 9 | 0.930 1      | 0.585 8 | 0.857 0      |
| 多元散射校正            | 0.463 6 | 0.912 8      | 0.532 3 | 0.883 8      |
| 基线校正              | 0.437 7 | 0.922 7      | 0.512 2 | 0.893 1      |
| sym8(2 层分解)       | 0.444 4 | 0.920 2      | 0.510 8 | 0.893 3      |
| sym8(3 层分解)       | 0.442 0 | 0.921 1      | 0.506 7 | 0.895 9      |
| sym8(4 层分解)       | 0.463 8 | 0.912 7      | 0.518 2 | 0.890 0      |
| 一阶求导 + DB2(4 层分解) | 0.492 1 | 0.901 1      | 0.560 5 | 0.869 7      |

前期多次比较结果显示, 多种常规光谱预处理方法都不能有效地提取砂糖橘漫反射光谱中的有用信息, 甚至使得模型的精度和稳健性下降。其中求一阶导数的预处理方法, 虽然产生了高达 0.930 1 的校正相关系数和低至 0.416 9 的校正均方根误差, 但是该模型采用全交叉验证得到的验证相关系数只有 0.857 0, 验证均方根误差却达 0.585 8, 这表明经过一阶求导处理后的光谱所建立的 PLS 模型, 其稳定性很差, 因此一阶求导的预处理方法并不适用于砂糖橘光谱数据的处理。

而采用 sym8 小波去噪, 通过 3 层分解, 然后取软阈值, 最后重构的去噪光谱产生了 0.921 1 的  $R_c$  和低至 0.442 0 的校正均方根误差, 该模型采用全交叉验证得到的  $R_v$  为 0.895 9, 验证均方根误差低至 0.506 7, 同时  $R_c$  与  $R_v$  比较接近。这说明采用小波变换去噪法很好地保留了光谱信号的特征尖峰点, 又较好地抑制了光谱噪声, 是最适合于本研究的光谱预处理方法。

2.2 校正集与预测集的划分

SPXY 算法是一种常用的样品集分类方法, 它与 Kennard-Stone 算法类似。Kennard-Stone 算法通过计算各个样品吸光度值之间的欧氏距离, 选择出样品集中最具有代表性的样品作为定标集。而 SPXY 算法不仅考虑了样品集吸光度值的欧氏距离, 同时也综合考虑了各样品浓度之间的欧氏距离, 使所选择的定标集样品针对某种特定成分, 使其更具有代表性<sup>[8]</sup>。经过 SPXY 算法划分出的校正集和预测集统计结果如表 2 所示。

表 2 砂糖橘样本可溶性总糖含量

Tab.2 Contents of total soluble sugars in ‘Shatangju’

| 样本集 | 样本数 | 最小值<br>/°Brix | 最大值<br>/°Brix | 平均值<br>/°Brix | 标准<br>误差/% |
|-----|-----|---------------|---------------|---------------|------------|
| 校正集 | 159 | 10.5          | 15.8          | 12.927 3      | 1.164      |
| 预测集 | 30  | 10.9          | 15.0          | 13.115 6      | 1.019      |

2.3 基于连续投影算法的可见-近红外优选波长提取

首先采用 SPA 对校正集 159 个样本全波段光谱共 2 051 个变量进行处理,将光谱变量减至 14 个,数据量只有原来的 0.68%,验证均方根误差最小为 0.488 4,如图 3 中白色方块所示。大大简化了后续的建模工作,同时也有利于提高模型的稳健性。

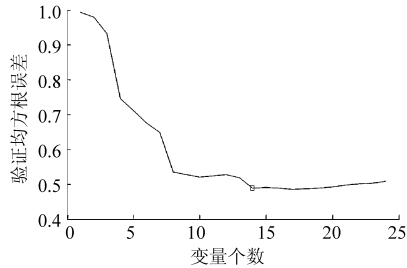


图 3 验证均方根误差随变量个数的变化情况  
Fig.3 RMSECV variations with different variables numbers

图 4 表示使用 SPA 对砂糖橘的光谱数据进行压缩后,筛选得到的波长分别是 455、462、505、531、574、613、692、1 208、1 328、1 397、1 935、2 014、2 117 和 2 495 nm。可溶性糖中 O—H 键的伸缩振动和变形振动产生的吸收峰在近红外谱区是在 1 440、2 080 nm,与提取出的部分波长点靠近,这进一步说明了这种方法提取变量具有合理性。

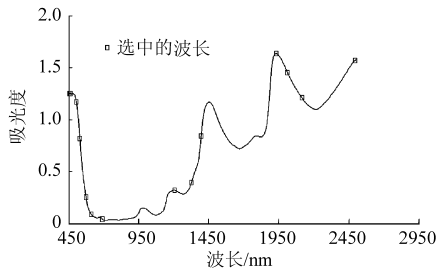


图 4 SPA 筛选出的波长  
Fig.4 Wavelength selected by SPA algorithm

SPA 是通过计算吸光度矩阵中某一波长对其他波长的投影,选取投影量最大的波长作为该波长序列中的下个波长,序列中的每个波长都与其前一个波长相关性最小,最大程度消除共线性对模型的影响,降低模型复杂度。由于投影过程中每个序列的选取并没有考虑待测成分的信息,这将导致所优选出的波长序列,可能存在对待测成分不敏感的波长,剔除其中对待测成分贡献不大的波长,将进一步降低模型的复杂度<sup>[9]</sup>。因此再对这 14 个波长建立多

元线性回归模型,分别计算各个波长点的贡献值,按从大到小的顺序排列如表 3 所示。

表 3 各个波长的贡献值

Tab.3 Contributory value of each wavelength

| 波长/nm | 贡献值     | $R_c$   | 波长/nm | 贡献值     | $R_c$   |
|-------|---------|---------|-------|---------|---------|
| 2 117 | 0.612 6 | 0.868 0 | 531   | 0.136 6 | 0.909 0 |
| 2 014 | 0.545 4 | 0.873 9 | 692   | 0.128 1 | 0.909 7 |
| 1 208 | 0.287 9 | 0.896 1 | 613   | 0.077 5 | 0.913 9 |
| 1 328 | 0.249 5 | 0.899 4 | 505   | 0.015 1 | 0.919 1 |
| 1 397 | 0.202 1 | 0.903 4 | 2 495 | 0.008 0 | 0.919 7 |
| 574   | 0.151 2 | 0.907 7 | 455   | 0.004 0 | 0.920 1 |
| 1 935 | 0.139 4 | 0.908 7 | 462   | 0.000 4 | 0.920 3 |

注: $R_c$ 为剔除该波长后模型校正相关系数

由表 3 可见,贡献值大的波长主要分布在近红外光谱的合频区和第 1 倍频区,信息量丰富。波长为 2 117、2 014 nm 的光谱变量对模型的贡献值最大,剔除后模型的相关系数下降也最显著,正处于砂糖橘可溶性糖中 O—H 键的伸缩振动和变形振动的吸收峰附近位置。而 1 328、1 397 nm 对模型的贡献值也较大,对模型的相关系数影响也较为显著,正处于砂糖橘可溶性糖中 O—H 键伸缩振动的第 1 倍频附近位置。贡献值较小的波长点 455、462、2 495 nm 均处于光谱的边缘,由于测量仪器的原因,通常含有较大噪声,信息量较少。使用贡献值大的波长组合建立多元线性回归模型,比较新模型和剔除波长前的模型精度,当预测精度显著下降时,停止剔除。最终得到贡献值较大的前 11 个波长作为砂糖橘可溶性总糖的优选波长组合。

2.4 建模精度的比较与分析

表 4 为预测集 30 个样本由 7 个校正模型得到的预测值与实验室测量值之间的相关系数  $R_p$  和预测均方根误差。

由表 4 可见,用 2 051 个光谱变量建立的全谱 PLS 模型产生了 0.846 1 的预测相关系数和 0.565 3 的预测均方根误差。经过 SPA 方法初选出的 14 个波长建模时,多元线性回归模型虽然简单,但产生了高于全谱 PLS 模型的精度,这说明虽然只是从 2 051 列光谱变量中提取了 14 列变量,但却包含了光谱矩阵的绝大部分信息,同时还去除了无用信息的干扰。但根据 14 个波长建模时,PLS 模型采用了 Unscrambler 9.8 软件自动选取的前 9 个主成分,并没有很好概括对可溶性总糖敏感的所有信息,信息量有所丢失,导致建模精度大幅下降。而采用 14 个波长建立的 BP 神经网络模型 BPNN 则产生了略低于全谱 PLS 模型的精度。

表 4 7 个校正模型比较

Tab.4 Comparison of seven calibration models

| 建模及波长筛选方法          | 波长数量  | $R_p$   | 预测均方根误差 |
|--------------------|-------|---------|---------|
| 全谱 PLS             | 2 051 | 0.846 1 | 0.565 3 |
| PLS + SPA          | 14    | 0.801 7 | 0.616 8 |
| MLR + SPA          | 14    | 0.875 5 | 0.511 1 |
| BPNN + SPA         | 14    | 0.832 4 | 0.511 6 |
| PLS + SPA + 贡献值筛选  | 11    | 0.873 4 | 0.515 9 |
| MLR + SPA + 贡献值筛选  | 11    | 0.873 4 | 0.515 9 |
| BPNN + SPA + 贡献值筛选 | 11    | 0.838 0 | 0.589 0 |

经过贡献值进一步筛选之后,得到最终的 11 个波长作为砂糖橘可溶性总糖的特征波长。图 5 为使用 11 个波长建立的 MLR 模型对预测集样本预测值和实测值的对应关系图。使用这 11 个波长建模时,MLR 模型和 PLS 模型的结果完全相同,并且精度与 14 个波长建立的 MLR 模型相当。这说明贡献值筛选剔除了对待测成分不敏感的波长,进一步简化了模型。11 个波长建立的 BPNN 模型精度略低,但与 14 个波长建模时的精度相当。

3 结束语

研究了基于变量选择的砂糖橘可溶性总糖可见-

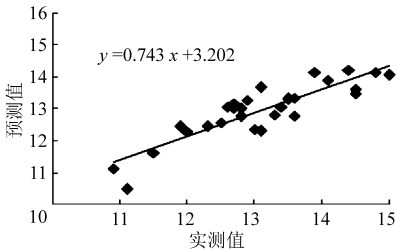


图 5 11 个波长建立的 MLR 模型对预测集样本的预测值与实测值对应关系

Fig.5 Prediction value and real value of samples in MLR model established by 11 wavelengths

近红外光谱检测。连续投影算法能够对光谱数据进行有效压缩,能从原 2 051 个波长中提取出 14 个优选波长组合,使用信息量只有原来的 0.68%,同时使 MLR 模型精度高于全谱 PLS 模型精度,达到预测相关系数为 0.875 5,预测均方根误差为 0.511 1。单独使用连续投影算法无法消除对待测成分信息不敏感的波长,联合使用贡献值筛选,可进一步简化模型,从 14 个波长继续压缩到 11 个波长,使用信息量只有原来的 0.54%,同时保持 MLR 和 PLS 模型的精度与 14 个波长时的 MLR 模型相当。研究表明连续投影算法结合贡献值筛选法能减少建模变量,提高建模效率,为简化可见-近红外光谱模型提供了一种新方法。

参 考 文 献

1 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2005.

2 洪添胜,乔军, Ning Wang, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2):151 ~ 155.

Hong Tiansheng, Qiao Jun, Wang Ning, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2):151 ~ 155. (in Chinese)

3 洪添胜,李震,吴春胤,等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11):280 ~ 285.

Hong Tiansheng, Li Zhen, Wu Chunyin, et al. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11):280 ~ 285. (in Chinese)

4 Lu Huishan, Liu Yande, Fu Xiaping. Application Fourier transform near infrared spectrometer in rapid estimation of soluble solids content of intact citrus fruits[C]//The 2005 ASAE Annual International Meeting, Beijing, 2005.

5 Slaughter D C, Thompson J F, Tan E S. Nondestructive determination of total and soluble solids in fresh prune using near infrared spectroscopy [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003,28(3): 437 ~ 444.

6 刘燕德, 陈兴苗, 孙旭东. 可见/近红外漫反射光谱无损检测南丰蜜桔维生素 C 的研究[J]. 光谱学与光谱分析. 2008, 28(10):2 318 ~ 2 320.

Liu Yande, Chen Xingmiao, Sun Xudong. Nondestructive measurement of vitamin C in Nanfeng tangerine by visible/near-infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10):2 318 ~ 2 320. (in Chinese)

7 孙通,应义斌,刘魁武,等. 梨可溶性固形物含量的在线近红外光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11):2 536 ~ 2 539.

Sun Tong, Ying Yibin, Liu Kuiwu, et al. Online detection of soluble solids content of pear by near infrared transmission spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(11):2 536 ~ 2 539. (in Chinese)

8 黄凌霞,吴迪,金航峰,等. 基于变量选择的蚕茧茧层量可见-近红外光谱无损检测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 231 ~ 236.

Huang Lingxia,Wu Di,Jin Hangfeng, et al. Non-destructive detection of cocoon shell weight based on variable selection by visible and near infrared spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE,2010,26(2):231~236. (in Chinese)

9 高洪智,卢启鹏,丁海泉,等. 基于连续投影算法的土壤总氮近红外特征波长的选取[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(11):2 951~2 954.

Gao Hongzhi,Lu Qipeng,Ding Haiquan, et al. Choice of characteristic near-infrared wavelengths for soil total nitrogen based on successive projection algorithm [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(11):2 951~2 954. (in Chinese)

10 孙旭东,章海亮,欧阳爱国,等. 南丰蜜桔可溶性固形物近红外特征波段选择[J]. 农业机械学报,2009,40(7):129~132.

Sun Xudong,Zhang Hailiang,Ouyang Aiguo, et al. Selection of NIR characteristic wavelength bands for soluble solids content in Nanfeng mandarin fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7):129~132. (in Chinese)

11 张巧杰,张军. 基于小波变换的大米直链淀粉波长选择方法[J]. 农业机械学报,2010,41(2):138~142.

Zhang Qiaojie, Zhang Jun. Region selecting methods of near infrared wavelength based on wavelet transform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):138~142. (in Chinese)

12 陈斌,孟祥龙,王豪. 连续投影算法在近红外光谱校正模型优化中的应用[J]. 分析测试学报,2007,26(1):66~69.

Chen Bin, Meng Xianglong, Wang Hao. Application of successive projections algorithm in optimizing near infrared spectroscopic calibration model [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2007, 26(1):66~69. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 132 页)

2 高荣海,赵秀红,郑艳,等. 大豆异黄酮糖苷和苷元免疫功能研究[J]. 粮油与油脂,2008(7): 43~44.

Gao Ronghai, Zhao Xiuhong, Zheng Yan, et al. Study on immunity fuction of soybean isofavone glycosides and aglycones [J]. Oils and Fats, 2008(7): 43~44. (in Chinese)

3 Mariusz K P, Jun Y, Yukihiko I. Daidzein and genistein but not their glucosides are absorbed from the rat stomach [J]. FEBS Letters, 1999, 447(2):287~291.

4 Kenneth D R S, Nadine M B, Linda Z N, et al. Evidence for lack of absorption of soy isoflavone glycosides in humans, supporting the crucial role of intestinal metabolism for bioavailability [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2002, 76(2):447~453.

5 Toru I, Mariusz K P, Sachiko O, et al. Soy isoflavone aglycones are absorbed faster and in higher amounts than their glucosides in humans [J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(7):1695~1699.

6 熊冬梅,邓泽元,刘蓉,等. 高效液相色谱法测定银杏保健品中总黄酮[J]. 食品科学,2009, 30(22):256~259.

Xiong Dongmei, Deng Zeyuan, Liu Rong, et al. Determination of total flavonoids in *Ginkgo biloba* health products by HPLC [J]. Food Science, 2009, 30(22):256~259. (in Chinese)