

小波变换在脐橙维生素 C 含量近红外光谱预测中的应用

夏俊芳¹, 李小昱¹, 李培武², 王 为¹, 丁小霞²

(¹华中农业大学工程技术学院, 武汉 430070; ²中国农业科学院武汉油料作物研究所, 武汉 430062)

摘要: 【目的】探索快速检测柑橘 Vc 含量的方法。【方法】利用不同分解水平的 Daubechies3 小波变换, 对 100 个脐橙整果样品的近红外光谱信号进行了消噪处理, 并利用消噪后的重构光谱对脐橙 Vc 含量进行了偏最小二乘法交叉验证。【结果】小波分解尺度水平不同, 偏最小二乘法交叉验证效果各不相同, 在分解水平为 4 时效果最好, 其预测值与标准值的相关系数 R 达到 0.9574, 交叉验证预测均方差 RMSECV 仅为 3.9 mg/100g。比较了 11 种光谱预处理方法, 其中, 小波消噪后的偏最小二乘法交叉验证模型预测效果最好, 预测值与真值的相关系数性最好。【结论】小波消噪后建立的近红外光谱模型能准确地对脐橙 Vc 含量进行无损快速的定量分析。

关键词: 脐橙; 近红外光谱; 小波消噪; 偏最小二乘法

Application of Wavelet Transformation in Umbilical Orange Vitamin C Content Prediction with Near-Infrared Spectroscopy

XIA Jun-fang¹, LI Xiao-yu¹, LI Pei-wu², WANG Wei¹, DING Xiao-xia²

(¹ Engineering and Technology Department of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; ² Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062)

Abstract: 【Objective】The objective of this study is to quest for a method to measure vitamin C content of orange. 【Method】Based on wavelet transformation by different decomposing levels, the near-infrared spectroscopy signals of 100 intact orange samples were do-noised and some PLS-CV (partial least squared-cross validation) operations were proposed for the prediction of umbilical orange Vc (Vitamin C) content with the reconstructed spectra after do-noised. 【Result】The PLS-CV results were not the same when the wavelet decomposing level was different. PLS-CV result was the best at a wavelet decomposing level of 4. Its R was 0.9574, and its RMSECV was 3.9 mg/100g. The 11 different pretreatment methods of Spectroscopy were compared, and the wavelet transformation do-noised PLS-CV results were the best. The correlation of prediction value and true value were the best. 【Concluded】The FT-NIR model treated by wavelet do-noised is feasible in prediction of Vc content of umbilical orange rapidly and nondestructively.

Key words: Umbilical orange; Near infrared spectroscopy; Wavelet do-noised; Partial least squared

0 引言

【研究意义】维生素 C (Vc) 含量是衡量脐橙营养品质的重要指标之一。目前, 国内外对脐橙 Vc 含量的测定通常采用有损的化学方法, 存在样品预处理操作繁琐, 耗费大量化学试剂, 检测周期长和成本高等问题。近红外光谱 (NIRS) 分析技术是近年来国内

外发展很快的一种新型定性、定量分析方法, 具有分析速度快、分析成本低、不破坏样品、便于实现在线分析等优点^[1]。【前人研究进展】该方法农业、食品、烟草、饲料、医药、化学化工、纺织工业等领域得到了日益广泛的应用^[2~5]。刘燕德等以 120 个红富士苹果为标准样品并结合偏最小二乘法, 应用近红外漫反射光谱技术快速检测苹果糖度和有效酸度, 建立了苹

收稿日期: 2006-10-31; 接受日期: 2007-03-30

基金项目: 湖北省科技攻关项目 (2004AA101D07)

作者简介: 夏俊芳 (1963-), 女, 湖北武汉人, 博士研究生, 研究方向为智能化检测技术。E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn。通讯作者李小昱 (1953-), 女, 陕西西安人, 教授, 研究方向为智能化检测技术。E-mail: lixiaoyu@mail.hzau.edu.cn。通讯作者李培武 (1962-) 男, 山东济南人, 研究员, 研究方向为油料作物检测技术。Tel: 027-61158087

果糖度、有效酸度的定量预测数学模型, 研究表明, 应用近红外光谱漫反射技术对苹果糖度和有效酸度的无损检测具有可行性^[6]。Gómez^[7]、Lammertyn^[8]等建立了苹果的近红外光谱及其总酸、pH、糖分、纤维质等参数的关系, Maurizio Ventura^[8]、Steinmetz^[9]、Ann Peirs^[10]、Lu Renfn^[11]、V Andrew^[12]等先后在不同波长范围内对苹果中的可溶性固形物含量、糖度、酸度、坚实度和成熟度等品质的近红外检测进行了研究, Clark^[13]、Andrew^[14]对苹果水心病的近红外光谱检测方法进行了探讨, Ann Peirs^[15]、Lammertyn^[16]、Kleynen^[17]等就湿度、光源、波长变化对近红外光谱检测水果品质的影响作了较深入的研究。Carlomagno^[18]、Sirinnapa Saranwong^[19]、Ze' ev Schmilovitch^[20]、Clark^[21,22]、Daniel G. Fraser^[23]和 Andrew^[24,25]等研究了用近红外光谱检测桃、芒果、鳄梨、猕猴桃、柑橘等水果采后品质的方法, 均得到了比较满意的结果。【本研究的切入点】迄今为止, 用近红外光谱检测脐橙 Vc 含量的研究未见报道。由于脐橙的 Vc 含量较低, 采集的原始近红外光谱吸收信号微弱、谱带重叠、低含量成分谱峰被高含量成分谱峰掩盖, 以及存在信号噪声、样品背景和杂散光等问题, 如果直接使用原始光谱信号进行定量分析, 这些信号的存在会影响最终分析结果的准确性。因此, 必须对原始光谱信号进行预处理, 以消除各种干扰。【拟解决的关键问题】本研究以小波变换对脐橙整果的原始近红外光谱进行消噪处理, 通过偏最小二乘法 (PLS) 建立数学模型, 快速无损检测脐橙的 Vc 含量。

1 材料与方法

1.1 材料

为了探索预测模型的适应性, 试验用脐橙样品为江西省定南县、湖北省宜昌市、秭归县 3 个地区的果园多棵树上随机采摘的 6 个品种成熟脐橙, 采后用塑料薄膜袋封装, 冷藏于温度为 5℃、湿度为 70% 的人工气候箱中, 每周在相同时间从 6 个品种中随机抽取 12~16 个脐橙进行近红外光谱测定, 同时测定这批脐橙的 Vc 含量, 作为建立模型时的标准值, 共检测 15 周 220 个脐橙。从 220 个脐橙中选出 100 个有代表性的样品组成样品集, 样品集的直径范围: 65~95 mm; 重量范围: 123~360 g; Vc 含量化学值范围: 20.8~89.15 mg/100 g。

1.2 主要仪器

BRUKER FT-NIR (VECTOR33N 型) 近红外光

谱仪, 配置 OPUS 分析软件、Pbs 检测器、镀金积分球、样品旋转器、12 mm 石英样品杯。测定条件: 波数为 12 000~4 000 cm^{-1} , 数据点 1 960 个, 分辨率 8 cm^{-1} , 扫描次数为 64 次。

1.3 检测方法

1.3.1 光谱采集 在室温条件下, 近红外仪预热 20 min 后, 将脐橙整果置于石英样品杯口上部并适当压紧, 测量部位选在脐橙最大横向直径处, 每个样品在“赤道”部位相对 90° 进行 4 次光谱采样, 采样时尽量避免表面明显的斑点、疤痕等缺陷。用 OPUS 软件对 4 条光谱取平均值后, 作为原始光谱数据, 样品原始光谱如图 1 所示。由图 1 可知, 由于柑橘样品产地、品种、颜色不同, 因此每个样品的 NIR 谱图差异较大, 在波数为 12 000~9 500 cm^{-1} 段, 存在很大的噪声, 主要反映柑橘皮的信息。

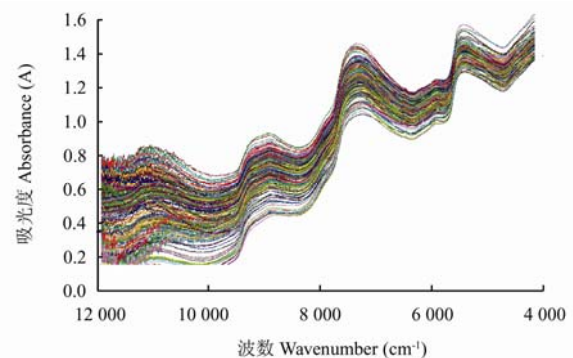


图 1 脐橙样品原始光谱图

Fig. 1 Original average spectroscopy of orange

1.3.2 Vc 含量测定 根据 GB/T 6195-86 水果、蔬菜维生素 C 含量测定法, 采用 2, 6-二氯酚酚滴定法测定脐橙 Vc 含量。单个样品光谱扫描后, 放入组织捣碎机捣碎, 准确称取 10 g 捣碎样品, 移至 100 ml 容量瓶中, 加入适量草酸 (浓度为 1%) 护色, 再用蒸馏水定容, 取 5 ml 过滤液于三角瓶中, 用标定好的 2, 6-二氯酚酚溶液滴定至粉红色, 根据消耗的 2, 6-二氯酚酚计算出 Vc 含量。

1.4 光谱小波变换消噪原理

小波变换是将交织在一起的不同频率组成的混合信号用分辨率不同的窗口分解成对应的不相同频率的块信号, 并对大小不同的频率成分采用相应的时域(或空域) 取样步长, 从而不断“聚焦”对象的任意微小细节, 对特殊频率范围的噪声或慢背景进行滤波处理, 对信号具有自适应性, 甚至可以对信频等其它干扰进

行平滑处理, 在光谱信号的平滑滤噪、去除背景、数据压缩以及重叠信号解析中得到越来越多的应用^[26~28]。

小波是指满足一定条件的函数 $\Psi(t)$ 通过平移和伸缩产生的一个函数族 $\Psi_{a,b}(t)$:

$$\Psi_{a,b(t)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left|\frac{t-b}{a}\right| \quad (1)$$

式中: a 为尺度参数 (scale parameter), 用于控制伸缩 (dilation); b 为平移参数 (translation parameter), 用于控制位置 (position); $\Psi(t)$ 为小波基或小波母函数。

在光谱分析信号的 WT 处理中, 一般使用的是离散型小波变换, 离散小波定义 $a=a_0^m$ ($a_0>1, m \in \mathbb{Z}$), $b=nb_0a_0^m$ ($b_0 \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{Z}$), 则:

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \Psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (2)$$

式中: 一般取 $a_0=2, b_0=1$, 此时称为二进小波。

对于等波长间隔的 k 个离散光谱数据点 x_1, x_2, \dots, x_k , 其离散二进小波变换为:

$$WT_X(m,n) = \sum_{i=1}^k 2^{-m/2} \Psi(2^{-m}t_i - n)x_i \quad (3)$$

(3) 式说明 WT 实际是将离散信号在小波函数上的投影, 不同的 m, n 代表不同的分辨率和不同的时域, 即不同分解尺度水平, 消噪效果不同。某信号小波分解后将从原来的空间投影到小波空间, 由于 WT 的特点, 在小波空间的系数有部分系数特别小, 对信号的表示没有意义, 如果将小的系数去除, 在重构的信号中不会丢失有意义的信息。因此, WT 可用于数据的压缩数据。对原始数据进行小波压缩后, 可采用小波系数代替原始数据, 利用多元校正方法建立模型。取较大的小波系数组成新的数据矩阵代替原始数据矩阵, 可以大大降低数据量, 既能有效地消除噪声, 又能提高多元校正的速度, 同时, 采用较少的变量建模, 有利于减少模型的随机性并提高预测精度。通常使用的小波函数有 Daubechies 小波、Haar 小波、二进小波等, 其中, Daubechies (dbn) 小波基在光谱分析中是最常用的十分有效的离散型小波^[29~31]。

建模及评价方法: 近红外光谱定量分析是通过建立样品吸光度与浓度之间的数学校正模型而实现的。常用的建模方法有多元线性回归 (MLR)、主成分回归 (PCR)、偏最小二乘法 (PLS) 和人工神经网络 (ANN) 等方法。偏最小二乘法 (PLS) 利用主成分

分析, 将吸光度矩阵和浓度矩阵先分别分解为特征向量和载荷向量, 用交互校验法确定最佳主成分数, 然后建立吸光度矩阵与浓度矩阵的数学模型, 是目前应用较多的一种多元校正方法。因此, 本研究采用偏最小二乘法建模, 模型评价指标采用相关系数 (R) 和内部交叉验证均方差 (RMSECV), 计算公式 (4)~

$$R^2 = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \right\} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{RMSECV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(\hat{y}_i - y_i) / y_i]^2}{N}} \times 100 \quad (5)$$

(4)~(5) 式中: N 为样品数; \hat{y}_i 为第 i 个样品的组分的回归值; y_i 为第 i 个样品的组分的标准值。

在优化模型时, 对同一样品集的同组分, 相关系数 (R) 越大、内部交叉验证均方差 (RMSECV) 越小, 则 PLS 算法所提取的光谱信息与分析组分的相关性越好, 所建模型的预测能力和稳健性越高。

2 结果与分析

2.1 小波变换消噪效果评价

将原始光谱数据导入 MATLAB6.5 小波分析工具箱中, 根据光谱信号的性质, 选择具有正交性和离散小波变换功能的 Daubechies3 (db3) 小波, 分别对信号进行 2、3、4、5、6、7、8 尺度水平分解和消噪, 消噪时选取固定软阈值 (fixed form soft threshold), 消噪后的重构光谱信号经 OPUS 分析软件优化, 得到反映脐橙 Vc 含量最优光谱波段为 7 501.7~5 449.8 cm^{-1} 。各水平消噪后的最优波段光谱如图 2 所示。由图 2 可以看出不同尺度水平分解, 光谱消噪结果明显不同, 特别是 8 水平 (db3-8), 过度分解高频信号, 滤除了大部分有用信息, 不能表征物质的光谱吸收特征和成分含量; 4 水平 (db3-4) 分解消噪效果最佳, 既保留了物质成分的有用信息, 又有效地消除了干扰噪声。

2.2 脐橙 Vc 含量预测结果

将各尺度水平小波消噪优化后的光谱用 PLS 法建立光谱与 Vc 含量的关系模型, 建模时采用内部交叉验证法, 依次以样品集中的一个样品作为待测样品, 用其余样品建立关系模型并预测样品的 Vc 含量

(prediction value), 得出预测值与标准值之间的相关系数 (R), 计算预测值与标准值的校正均方差 (RMSECV), 判别所建预测模型的精确性 (表 1)。

表 1 中, Level 为小波分解尺度水平; R 为预测值与标准值的相关系数; RMSECV 为内部交叉验证均方差; Rank 为主成分维数; N 为光谱优化波数。从表 1 可以得知, 2、3、4 分解尺度水平 PLS 法所建模型的预测效果较好, 均可用作脐橙 Vc 含量的检测, 且随分解水平的增加, 预测值与标准值的相关系数逐渐提

高, 内部交叉验证均方差逐渐减少, 其中, 尤以 4 尺度水平的模型预测效果最好, 相关系数 R 达到 0.9574, 100 个预测样品的 RMSECV 仅为 3.9 mg/100g。从 5 尺度水平开始, 预测值与真值的相关系数逐渐下降, 内部交叉验证均方差逐渐增加, 其中 8 尺度水平的模型预测效果最差, 相关系数 R 仅为 0.4237, RMSECV 则达到 13.4 mg/100g。这说明分解尺度水平为 4 的小波变换后的光谱最能反映脐橙 Vc 含量的信息, 所建模型预测精度最高。

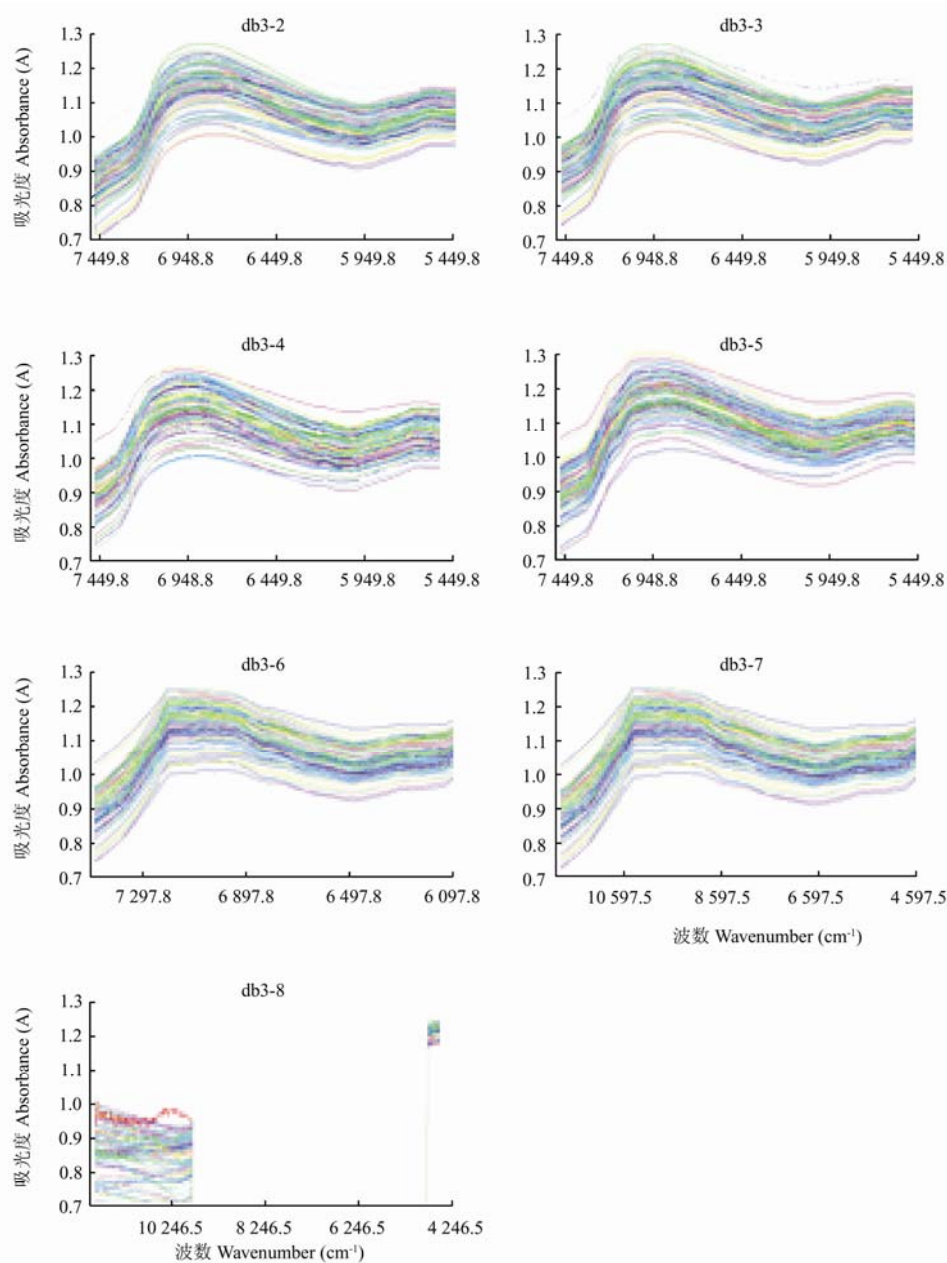


图 2 小波消噪优化光谱

Fig. 2 Optimize spectroscopy by wavelet do-noised

表 1 各尺度水平分解消噪 PLS 建模预测结果

Table 1 The prediction result of PLS models in different decomposing levels

尺度水平 Level	预测值 Prediction value (mg/100g)	相关系数 <i>R</i>	均方差 RMSECV (mg/100g)	主成分维数 Rank	光谱优化波数 N (cm ⁻¹)
2	24.26~79.49	0.9368	4.72	8	7501.7~5449.8
3	24.10~88.58	0.9335	4.84	8	7501.7~5449.8
4	23.82~89.03	0.9574	3.9	8	7501.7~5449.8
5	31.86~84.94	0.8339	7.45	8	7501.7~5449.8
6	29.58~79.54	0.7556	8.84	8	7501.7~6097.8
7	29.77~87.42	0.58	11	6	11998.9~4597.5
8	48.82~60.34	0.4237	13.4	1	11998.9~9746.5 4601.3~4246.5

表 2 各预处理光谱 PLS 建模预测结果

Table 2 The result of PLS models in different pretreatment method

预处理方法 Pre-treatment method	决定系数 <i>R</i> ²	相关系数 <i>R</i>	预测均方差 RMSECV (mg/100g)
WT	0.9166	0.9574	3.9
MMN	0.8026	0.8959	6
COE	0.7944	0.8913	6.12
FD	0.7883	0.8879	6.21
MSC	0.7765	0.8812	6.38
VN	0.7577	0.8705	6.64
SLS	0.7435	0.8623	6.84
FD+MSC	0.7082	0.8415	7.29
FD+VN	0.7071	0.8409	7.3
FD+SLS	0.5632	0.7505	8.92
SD	0.4454	0.6674	10.1

3 讨论

分别选择常数偏移消除 (constant offset elimination, COE)、直线差值 (stright line subtraction, SLS)、矢量归一化 (vector normalization, VN)、最小最大归一化 (min-max normalization, MMN)、多元散射校正 (multiplication scattering correction, MSC)、一阶导数 (first derivative, FD)、二阶导数 (second derivative, SD) 等预处理方法对脐橙原始光谱数据进行预处理, 同样采用 PLS 法建模, 与小波消噪预处理建模结果进行比较 (表 2)。结果表明, 11 种预处理方法所建模型中, 小波消噪后的模型预测效果最好, 预测值与真值的相关系数最好, *R* 达到 0.9574, 预测样品的内部交叉验证均方差最小, RMSECV 仅为 3.9mg/100g。由此可得出, 小波消噪是脐橙 Vc 含量检测的近红外光谱预处理的有效方法。

在利用小波分析进行信号消噪处理时, 阈值选择是信号消噪处理中的一个关键因素, 除本文研究中使用的软阈值方法外, 阈值选取还有硬阈值方法。在本研究中, 仅对脐橙的原始光谱信号进行了软阈值方法

消噪处理, 关于选择硬阈值的消噪效果, 有待继续研究。同时, 针对不同的信号, 不同的噪声强度和分解层次, 阈值选取也是不同的, 应具体问题具体分析。

Danbueshies (dbn) 小波基是一个函数族, 本研究中, 仅用 db3 小波对脐橙的原始光谱信号进行了消噪处理, 未对 db2、db4、db5、... 等小波消噪处理效果进行比较, 后续研究中, 可进行对比研究, 以便找出消噪效果最佳的 Danbueshies 小波基, 建立精确度更高的脐橙 Vc 含量预测模型。

4 结论

以脐橙的定量分析为例, 探讨了利用小波变换消噪提取脐橙 Vc 含量近红外信息特征的方法, 通过 db3 小波多尺度水平分解消噪和 PLS 法建模, 得出 db3 小波 4 尺度水平变换所建模型预测精度最高, 预测值与真值的相关系数为 0.9574, 内部交叉验证均方差为 3.9 mg/100 g, 最能反映脐橙 Vc 含量信息光谱波段为 7 501.7~5 449.8 cm⁻¹。通过 11 种预处理方法建模比较, 得出小波消噪预处理方法最佳。由此可以证明, 小波变换后的近红外光谱可以有效地无损快速检测脐

橙 Vc 含量。

References

- [1] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 134-142.
Xu G T, Yuan H F, Lu W Z. Development of modern near infrared spectroscopic techniques and its applications. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, 20(2): 134-142. (in Chinese)
- [2] 练文柳, 吴名剑, 孙贤军, 何智慧. 不同预处理方法对烟草近红外光谱预测模型的影响. 烟草科技, 2005, 211(2): 19-23.
Lian W L, Wu M J, Sun X J, He Z H. Influence of date pre-processing on NIR prediction model for tobacco chemical composition. *Tobacco Science*. 2005, 211(2): 19-23. (in Chinese)
- [3] 陈华才, 陈星旦. 近红外光谱在药物领域的应用与研究进展. 中国计量学院学报, 2003, 14(4): 261-267.
Chen H C, Chen X D. Application and researches of near-infrared spectroscopy in the pharmaceutical filed. *Journal of China Institute of metrology*, 2003, 14(4): 261-267. (in Chinese)
- [4] 王多加, 周向阳, 金同铭, 胡祥娜, 钟娇娥, 吴启堂. 近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用. 光谱学与光谱分析, 2004, 24: 447-450.
Wang D J, Zhou X Y, Jin T M, Hu X N, Zhong J E, Wu Q T. Application of near-infrared spectroscopy to agriculture and food analysis. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24: 447-450. (in Chinese)
- [5] 杨 忠, 江泽慧, 费本华, 刘君良. 近红外光谱检测技术及其在木材科学中的应用. 林业科学, 2005, 41(4): 177-182.
Yang Z, Jiang Z H, Fei B H, Liu L J. Application of near. infrared spectroscopy to wood science. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 177-182.(in Chinese)
- [6] 刘燕德, 应义彬. 基于 MATLAB 语言的苹果糖度近红外光谱定量分析. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 1371-1374.
Liu Y D, Ying Y B. Quantitative analysis of near spectra in apple sugar content based on MATLAB. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(10): 1371-1374. (in Chinese)
- [7] Gómez A H, He Y, Pereira A G. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of *Satsuma mandarin* using Vis/NIR-spectroscopy techniques. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77: 313-319.
- [8] Ventura M, de Jager A, de Putter H, Roelofs P M M. Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy(NIRS). *Postharvest Biology and Technology*, 1998, 14: 21-27.
- [9] Steinmetz V, Roger J M, Moltó E, Blasco J. On-line fusion of color camera and spectrophotometer for sugar content prediction of apples. *Agricultural Engineering Research*, 1999, 73: 207-206.
- [10] Peirs A, Scheerlinck N, Nicolai B M. Temperature compensation for near infrared reflectance measurement of apple fruit soluble solids contents. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30: 233-248.
- [11] Lu R F, Guyer D E, Beaudry R M. Determination of firmness and sugar content of apples using near-infrared diffuse reflectance. *Journal Texture Studies*, 2000, 31: 615-630.
- [12] McGlone V A, Jordan R B, Seelye R, Clark C J. Dry-matter- a better predictor of the post-storage soluble solid in apples? *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28: 431-435.
- [13] clark C J, McGlone V A, Jordan R B. Detection of Brown heart in Brae burn apple by transmission NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28: 87-96.
- [14] McGlone V A, Martinsen P J, Clark C J, Jordan R B. on-line detection of Brownheart in Braeburn apples using near infrared transmission measurements. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37: 142-151.
- [15] Peirs A, Scheerlinck N, Nicolai B M. Temperature compensation for near infrared reflectance measurement of apple fruit soluble solids contents. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 3: 233-248.
- [16] Lammertyn J, Peirs A, de Baerdemaeker J, Nicolai B. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 8: 121-132.
- [17] Kleynen O, Leemans V, Destain M-F. Selection of the most efficient wavelength bands for 'Jonagold' apple sorting. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 3: 221-232.
- [18] Carlomagno G, Capozzo L, Attolico G, Distanto A. Non-destructive grading of peaches by near-infrared spectrometry. *Infrared Physics and Technology*, 2004, 46: 23-29.
- [19] Saranwong S, Sornsrivichai J, kawano S. Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from it harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 31: 137-145.
- [20] Schmilovitch Z, Mizrach A, Hoffman A, Egozi H, Fuchs Y. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 19: 245-252.
- [21] Clark C J, McGlone V A, Reguejo C, White A, Woolf A B. Dry matter determination in 'Hass' avocado by NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 29: 300-307.

- [22] Clark C J, McGlone V A, de silva H N, Manning M A, Burdon J, Mowat A D. Prediction of storage disorders of kiwifruit based on visible-NIR spectral characteristics at harvest. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 32: 147-158.
- [23] Fraser D G, Jordan R B, Künnemeyer R, McGlone V A. Light distribution inside mandarin fruit during intend nudity assessment by NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 27: 185-196.
- [24] McGlone V A, Jordan R B, Seelye R, Martinsen P J. Comparing density and NIR methods for measurement of kiwifruit dry matter and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*. 2002, 26: 191-198.
- [25] McGlone V A, Kawano S. Firmness, dry-matter and soluble-solids assessment of post harvest kiwifruit by NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 1998, 13: 131-141.
- [26] 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用. *化学进展*, 2004, 16(4): 528-542.
Chu X L, Yuan X L, Lu W Z. Progress and application of spectral date pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique. *Progress in Chemistry*, 2004, 16(4): 528-542. (in Chinese)
- [27] 陈 斌. 基于小波变换的方便面含油率近红外光谱检测技术. *农业机械学报*, 2001, 32(6): 75-76.
Chen B. Improvement on predicting precision of oil content noodles with near-infrared spectroscopy treated by wavelet transformation. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2001, 32(6): 75-76. (in Chinese)
- [28] 田高友, 袁洪福, 刘慧颖, 陆婉珍. 小波变换在近红外光谱分析中的应用进展. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(6): 1111-1114.
Tian G Y, Yuan H F, Liu H Y, Lu W Z. The application of wavelet transform in near infrared spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2003, 23(6): 1111-1114. (in Chinese)
- [29] 王 芳, 陈 达, 邵学广. 小波变换和偏最小二乘法在烟草常规成分预测中的应用. *烟草科技*, 2004, (3): 31-34.
Wang F, Chen D, Shao X G. Application of wavelet transform and partial least square in prediction of common compositions in tobacco samples. *Tobacco Science & Technology*. 2004, (3): 31-34. (in Chinese)
- [30] 田高友, 袁洪福, 刘慧颖, 陆婉珍. 小波变换用于近红外光谱性质分析. *分析化学*, 2004, 32(9): 1125-1130.
Tian G Y, Yuan H F, Liu H Y, Lu W Z. Application of wavelet transform on the near infrared analysis. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2004, 32(9): 1125-1130. (in Chinese)
- [31] 祝诗平, 王一鸣, 张小超. 小波消噪及其小麦蛋白质含量近红外光谱分析中的应用. *西南农业大学学报 (自然科学版)*, 2003, 25(6): 522-525
Zhu S P, Wang Y M, Zhang X C. Wavelet denoising theory and its application in wheat protein concentration prediction with near infrared spectroscopy analysis. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*. 2003, 25(6): 522-525. (in Chinese)

(责任编辑 曲来娥)