

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1116.002

网络出版时间:2011-12-16 11:16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1116.002.html>

脐橙糖度近红外光谱在线检测的建模变量优选

蔡丽君, 刘燕德, 万常斓

(华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

[摘要] **【目的】**采用小波压缩结合遗传算法, 优选脐橙糖度近红外光谱在线检测的建模变量, 提高在线检测精度。**【方法】**利用近红外光谱检测装置采集脐橙样品的光谱, 并将其转换为反射比光谱, 在 700.28~933.79 nm 波段, 利用小波变换将一阶微分处理后的近红外反射比光谱变量压缩成小波系数变量。经遗传算法优选后, 建立偏最小二乘法(PLS)模型, 并对该模型的预测结果进行评价。**【结果】**利用小波压缩结合遗传算法优选变量建立的脐橙糖度 PLS 模型, 预测效果最优, 模型的相关系数为 0.759, 模型预测均方根误差为 0.468 °Brix。**【结论】**采用小波压缩结合遗传算法对变量进行优选, 可提高脐橙糖度近红外光谱在线检测的精度。

[关键词] 近红外光谱; 小波压缩; 遗传算法; 在线检测; 脐橙糖度

[中图分类号] O657.3;S123

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)01-0215-06

Selection of NIR variables for online detecting sugar content of navel orange

CAI Li-jun, LIU Yan-de, WAN Chang-lan

(School of Mechatronics and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: **【Objective】**In order to improve the precision of detecting sugar content of navel orange by online near infrared (NIR) spectroscopy, wavelet transform and genetic algorithm were applied to select the NIR variables. **【Method】**Spectra was measured in near infraed diffuse reflectance mode using the dynamic spectra detecting system. In the wavelength range of 700.28—933.79 nm, the first derivative spectra were compressed into the variables of wavelet coefficient by wavelet transform (WT). The partial least squares (PLS) models were developed with the variables selected by genetic algorithm (GA). The prediction was used to evaluate the predictive ability of the models. **【Result】**By comparison the predictive performance of the PLS model for navel orange SSC that developed with the variables using WT and GA variables was the best. The correlation coefficient (r) of predictive mode was 0.759, and the root mean square error of prediction (RMSEP) was 0.468 °Brix. **【Conclusion】**The experiment showed that the precision for detecting sugar content of navel orange by WT, GA and online NIR technique was improved.

Key words: near infrared spectroscopy; wavelet transform compress; genetic algorithm; online detecting; sugar content of navel orange

赣南脐橙果大形正、光洁美观、风味浓郁, 深受消费者欢迎。糖度是评价赣南脐橙品质的重要指标

之一^[1], 但传统破坏式的糖度测量方法耗时费力且效率低, 难以满足自动化生产的要求。近红外光谱

* [收稿日期] 2011-07-14

[基金项目] 国家自然科学基金项目(61178036); 科技部农业科技成果转化资金项目(2011GB2C500008); 江西省对外科技合作计划项目(2009BHB15200); 江西省主要学科学术和技术带头人培养对象计划项目(2009DD00700)

[作者简介] 蔡丽君(1987—), 男, 江西新干人, 在读硕士, 主要从事水果品质近红外检测研究。E-mail: caili1005@163.com

[通信作者] 刘燕德(1967—), 女, 江西泰和人, 教授, 博士, 主要从事智能无损检测研究。E-mail: jxliuyd@163.com

(NIR)技术具有快速、无损及样品无需前处理等优点,已经被用于水果内部品质检测^[2-6]、在线分级等^[7]。

由于脐橙个体差异较大,NIR 在反映了被测样品的特征信息的同时,也受到样品非目标信息及背景和仪器噪声干扰,导致各种信号交叉重叠严重,光谱信噪比低,直接采用原始光谱全波段建立的模型维度大、精度低。因此,光谱数据压缩、信息变量优选一直是 NIR 应用研究领域的热点问题之一^[8-11]。常用的光谱数据压缩方法有傅立叶变换(FT)^[12]、主成分分析(PCA)^[13-15]、偏最小二乘法(PLS)^[16]等,由于不同信号在光谱中的能量分布不同,变化激烈信号的能量主要分布在高频区,而变化缓慢信号的能量主要分布在低频区,采用以上几种方法对原始光谱数据进行压缩时很难完全同时保留高频和低频信号。小波变换(WT)是近几年发展起来的一种新的信号处理方法,利用小波变换能将信号分解成集中原始光谱信号大部分能量的低频部分和反映原信号变化特性的高频部分,忽略能量很小的频率部分,从而实现 NIR 数据的压缩^[17-18]。以往研究主要采用压缩后光谱数据直接建模,但由于还存在无关信息变量,因此进行信息变量优选是非常必要的。常用的信息变量优选方法有遗传算法(GA)、区间偏最小二乘法(iPLS)及其衍生算法^[19-22]。GA 作为一种变量筛选方法,具有很大的搜索优势,适应性很广,在搜索空间不大时,可以寻找到可靠的全局最优变量组合。

本研究采用 WT 结合 GA,将脐橙的在线 NIR 数据压缩,并优选与糖度相关的小波系数矩阵,建立脐橙糖度 PLS 模型,以期提高脐橙糖度近红外光谱在线检测的精度。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验所采用的脐橙样品从江西南昌的某水果批发市场购得,将购回的 110 个脐橙表皮灰尘等清理干净,依次编号,并在室温(20 ℃)和 60%湿度的实验室环境下放置 24 h,待测样品温度达到室温后,在线采集 NIR。光谱采集时尽量避免擦伤或伤疤等缺陷部位。110 个试验样品分为建模集和预测集,其中 80 个样品作为建模集,剩余 30 个未参与建模的样品作为预测集,用于评价模型的预测能力。

1.2 试验装置及光谱采集

NIR 在线检测装置如图 1 所示,该装置为华东

交通大学机电工程学院光机电技术及应用研究所研制,由一台机器视觉分级装置改造而成,主要包括:CCD 微型光谱仪(USB2000+,Oceanoptics INC., USA)、卤钨灯(12 V/50 W,飞利浦电子贸易服务有限公司,上海)、光纤(芯径 1 000 μm,长度 2 m, Oceanoptics INC, USA)、可编程控制器(PLC)(FX2N-32MR,南昌三夏自动化科技有限公司,南昌)、光电接近开关(E3F-DS10C4,洞头飞跃科技有限公司,宁波)、速度可调样品输送线、计算机等。输送线的速度约为 5 个/s(每秒过 5 个脐橙),由变频器和异步电动机控制。卤钨灯发射的光线经过直径为 40 mm 的圆柱套筒,以约 50 mm 的光斑照射至脐橙样品表面。光纤探头与垂直方向的角度约为 30°,至输送线的距离约为 120 mm。由光电接近开关和 PLC 共同控制触发电源开/闭,以触发 CCD 微型光谱仪采集脐橙样品的漫反射光谱。脐橙样品在输送线上随机放置,每个脐橙样品重复采集 3 次光谱,取平均光谱作为每个脐橙样品的最终光谱;CCD 微型光谱仪参数积分时间设置为 25 ms,光谱的采集和存储利用自行编写的软件完成。

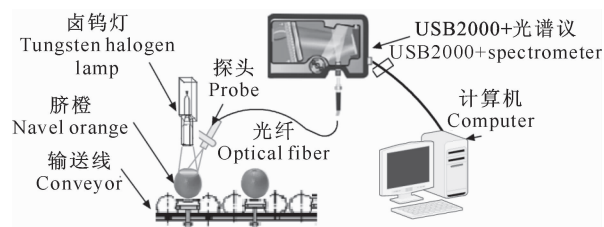


图 1 近红外光谱在线检测装置的示意图

Fig. 1 Sketch diagram of online near-infrared spectroscopy detection equipment

1.3 糖度测量

脐橙样品的糖度用数字式折射仪 PR-101α(Atago Co. Ltd., Tokyo, Japan)进行测量。于每个脐橙样品光谱采集完成后,将其去皮并切成小块放入榨汁机榨汁过滤,取 1 滴果汁滴于数字折射仪的测试窗口上,重复取样测量 3 次,取平均值作为脐橙样品糖度的测定值。

1.4 数据处理及模型评价

采用化学计量学软件 unscrambler 8.0 (CAMO, Trondheim, Norway)和 Matlab 7.0(The mathworks Inc., Natick, MA)进行数据处理。采用外部验证对数学模型性能进行评价,由模型预测相关系数(r)和预测均方根误差(RMSEP)进行评价。 r 越高, RMSEP 越小,则模型的预测能力越强。

2 数据分析与建模

2.1 光谱数据的预处理

采用基于脐橙样品光谱的基准波长点的反射比法^[23],将采集到的脐橙样品光谱转换为反射比光谱(图 2),取信噪比较好的光谱波段(700.28~933.79 nm)共 720 个变量进行计算。由图 2 可知,脐橙近

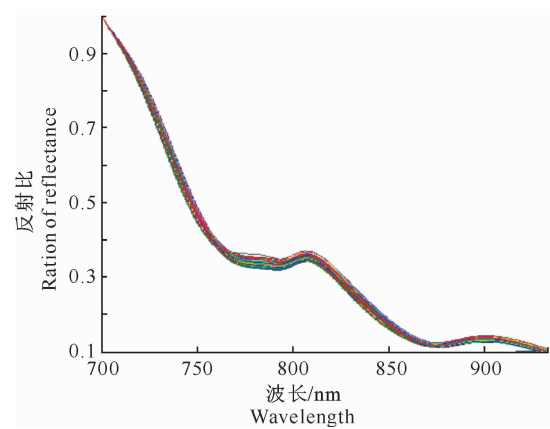


图 2 脐橙在线近红外反射比的原始光谱
Fig. 2 Original online NIR spectra of navel orange based on ration of reflectance

2.2 光谱数据的小波压缩

采用经一阶微分处理后的光谱,选用信息较为丰富的 700.28~933.79 nm 波段共 720 个波长点变量进行计算,由于 WT 要求输入变量数为 2^N ,因此剩余 304 个变量用零补足,即每个脐橙样品的光谱数据包含为 2^{10} 个变量。采用 Daubechies 小波函数直接对建模集中的每个样品的一阶微分光谱进行小波变换,并将变换后的小波系数从大到小进行排序,将一阶微分光谱阵变换为小波系数阵。依次增加排序后的小波系数的数量并建立 PLS 预测模型,同时利用交叉验证优化 PLS 的主成分因子数,计算 r 和 RMSEP 并保存。通过对以上各数目小波系数 PLS 模型的 r 和 RMSEP 进行比较,并进行误差分析,选取最佳的保留数目和优化后的主成分因子数,将优化好的参数和保留的小波系数数目作为脐橙糖度 PLS 模型的输入变量。

用于建立 PLS 模型的小波系数变量数目与 RMSEP 的关系如图 4 所示。由图 4 可见,当小波系数变量数为 30 时,脐橙糖度 NIR 在线预测 PLS 模型的 RMSEP 为 0.488°Brix ;与经一阶微分处理后的反射比原始光谱相比,参与建立 PLS 模型的变量数由 720 个减少为 30 个,对应的 PLS 模型的 r 由

红外反射比原始光谱在 811.53 和 903.62 nm 附近有 2 个较为明显的吸收峰,为消除背景信息干扰,分辨重叠峰,采用一阶微分(Savitzky-Golay,17 点)对近红外反射比原始光谱数据进行预处理。一阶微分处理后的光谱如图 3 所示。由图 3 可见,经一阶微分处理后,在近红外光谱波段,信息更加丰富和凸显。

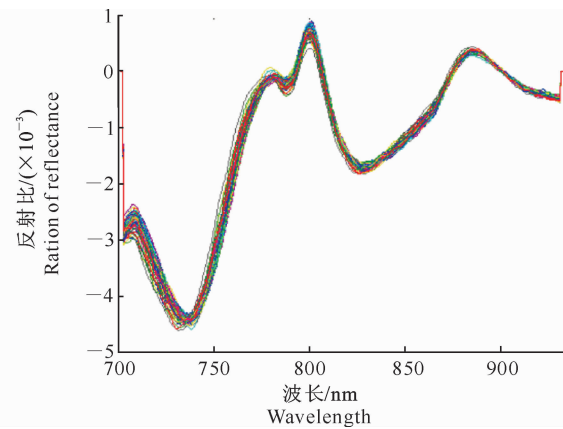


图 3 脐橙在线近红外反射比原始光谱的一阶导数光谱
Fig. 3 First derivative online NIR spectra of navel orange based on ration of reflectance

0.717 提高到 0.734。

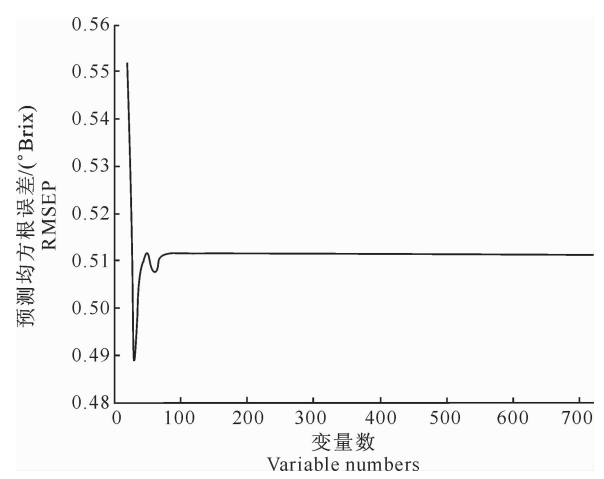


图 4 脐橙糖度预测模型的 RMSEP 与小波系数变量数的关系
Fig. 4 Plots of RMSEP of navel orange SSC and variable numbers by WT compress for prediction meti rods

2.3 变量的 GA 优化

在小波压缩产生的 30 个小波系数变量中,有 12 个变量是由于小波压缩过程补零而得到的,所以此部分小波系数很小,可予以剔除,最后共剩余 18 小波系数变量。将 80 个建模集样品的小波系数组成 80 行 18 列的变量矩阵,作为 GA 的输入变量矩

阵。GA 的参数设置为:群体数目 30,交叉概率 0.50,变异概率 0.01,迭代次数 100,独立运行次数 100。

将输入变量矩阵与相应样品的脐橙糖度测量值组成的列向量导入软件 Matlab 7.0,依照上述参数独立运行 GA 100 次,每次输入 0~1 二进制编码字

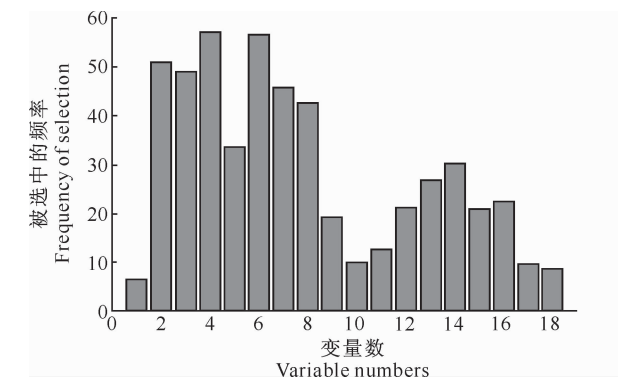


图 5 参与建立 PLS 模型的不同变量被选中的频率
Fig. 5 Plots of frequency of selection for different variables using PLS methods for navel orange SSC

2.4 脐橙糖度 PLS 模型的建立及预测结果评价

采用 80 个建模集样品,分别应用一阶微分处理后的 720 个光谱变量、小波压缩后的 30 个小波系数变量和 GA 优化后的 13 个小波系数变量,采用 PLS 建立脐橙糖度 NIR 在线检测数学模型。

采用 30 个未参与建模的预测集样品,分别检验由原始光谱、小波压缩和小波压缩结合 GA 所建立的 PLS 模型的预测能力,结果如表 1 所示。

由图 7 及表 1 可知,利用小波压缩结合 GA 优选的 13 个小波系数变量建立的脐橙糖度 NIR 在线检测 PLS 模型的预测效果最优。与反射比原始光谱建立的脐橙糖度 PLS 模型相比,WT 结合 GA 建立的 PLS 模型预测集相关系数 r 从 0.717 提高到 0.759, RMSEP 从 0.522 降低到 0.468 °Brix。

表 1 基于不同变量优化方法建立的脐橙糖度 PLS 模型的预测结果评价					
Table 1 Predictive result of navel orange SSC by different variable optimization methods					
模型优化方法 Optimization method	预处理 Pretreatment	小波函数 Function	变量数 Variable numbers	预测集 相关系数 r	预测集均 方根误差/(°Brix) RMSEP
原始光谱 Origin	一阶微分 1st derivative	—	720	0.717	0.522
小波压缩 WT compress	一阶微分 1st derivative	Daubechies 函数 Daubechies function	30	0.734	0.488
小波压缩结合遗传算法 WT-GA	一阶微分 1st derivative	Daubechies 函数 Daubechies function	13	0.759	0.468

3 讨 论

本研究结果表明,脐橙近红外反射比原始光谱

符串,计算每个变量被标识为 1 的概率,得到每个变量被选中的频率如图 5 所示。由图 6 可知,随着参与建立 PLS 模型变量数目的增加,模型预测糖度的 RMSEP 在逐渐减小;当变量数目为 13 时,模型预测的 RMSEP 达到最小,故选择被选中频率较高的前 13 个变量作为输入变量。

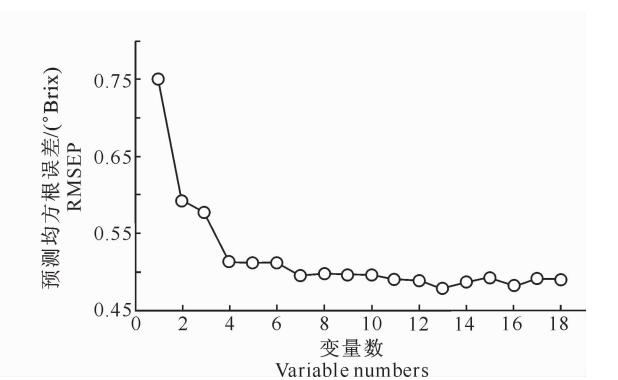


图 6 经 GA 优化后脐橙糖度预测模型 RMSEP 与建模变量数的关系
Fig. 6 Relationship plots between RMSEP and variable of numbers by GA of selection for navel orange SSC

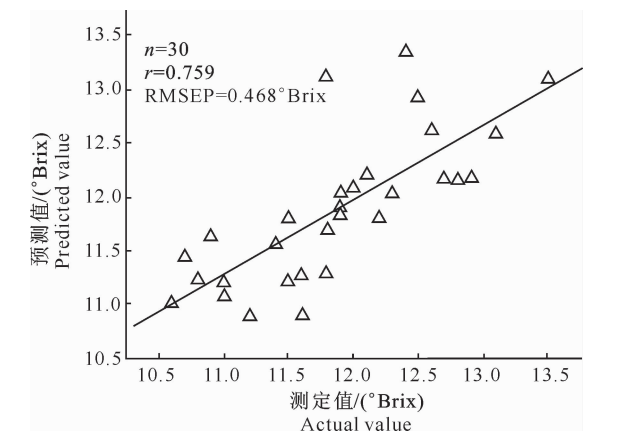


图 7 小波压缩结合遗传算法建立的脐橙糖度 PLS 模型的预测值与测定值之间拟合结果
Fig. 7 Predictive result of WT compress and GA of selection for different variables for navel orange SSC

经一阶微分处理后,采用 WT 结合 GA 建立的脐橙糖度近红外光谱在线检测 PLS 模型,其预测集 $r=0.759$, RMSEP=0.468 °Brix。与原始光谱建立的

PLS模型相比,该模型的预测效果较好。尽管如此,但仍不如静态下建立的模型模效果好。刘燕德等^[13]在静态下建立的赣南脐橙可溶性固形物含量近红外光谱检测模型的预测集 $r = 0.903$, RMSEP = 0.696°Brix ,检测效果优于本研究所建立的模型,其原因可能是在动态环境下,装置的振动、环境条件不稳定及杂散光等的影响导致的。同时,脐橙的果皮较厚,光源功率也较小,因此能够穿透果皮而携带脐橙内部可溶性固形物信息的光信号较少,故其预测效果低于苹果、梨等果皮较薄的水果。孙通等^[24]建立的梨可溶性固形物含量的近红外光谱在线检测模型 $r = 0.9488$, RMSEP = 0.548°Brix 。由以上结果比较可知,脐橙糖度在线检测模型的精度还需要进一步提高,可以通过采用适当算法对建模变量进行优选,提取脐橙近红外光谱的有效信息变量,以简化预测模型并提高模型的预测精度。

4 结 论

本研究采用 WT 结合 GA,在光谱 $700.28 \sim 933.79 \text{ nm}$ 波段对脐橙在线检测的近红外光谱有效信息变量进行了优选,从原始光谱的 720 个变量中,优选出了 13 小波系数变量,并考察了变量优选结果对脐橙糖度近红外光谱在线检测精度的影响。结果表明,WT 结合 GA 不仅能够简化数学模型,减少参与建模的变量数目,而且提高了脐橙糖度近红外光谱在线检测精度,PLS 预测模型的 r 为 0.759, RMSEP 为 0.468°Brix 。本研究结果对开展水果品质近红外光谱在线检测具有重要的参考价值和实际意义。

[参考文献]

- [1] 刘燕德,郝勇,蔡丽君.无损光电检测技术原理及应用[J].华东交通大学学报,2010,27(6):36-46.
- Liu Y D, Hao Y, Cai L J. Principle and Application of opto-electronics non-destructive testing technology [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2010, 27(6): 36-46. (in Chinese)
- [2] 章海亮,孙旭东,郝勇,等.近红外漫反射无损检测梨果糖度及 pH 值的研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(4):128-132.
- Zhang H L, Sun X D, Hao Y, et al. Study on nondestructive detecting sugar content and pH value of pear by using near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(4): 128-132. (in Chinese)
- [3] 陆辉山,傅霞萍,谢丽娟,等.可见/近红外光估测完整柑橘水果

- 可溶性固形物含量的研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(9):1727-1730.
- Lu H S, Fu X P, Xie L J, et al. Estimation of soluble solids content of intact citrus fruit by Vis/NIR spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(9): 1727-1730. (in Chinese)
- [4] 刘燕德,罗吉,欧阳爱国.可见光光谱检测赣南脐橙糖度研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(3):569-572.
- Liu Y D, Luo J, Ouyang A G. Visible transmittance technique for rapid analysis of sugar content of fresh navel orange juice [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3): 569-572. (in Chinese)
- [5] Liu Y D, Sun X D, Zhang H L, et al. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeng mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(S1): 10-14.
- [6] Liu Y D, Sun X D, Zhou J M, et al. Linear and nonlinear multivariate regressions for determination sugar content of intact Gannan navel orange by Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2010, 51(11/12): 1438-1443.
- [7] Miller W M, Zude-Sasse M. NIR-based sensing to measure soluble solids content of Florida citrus [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(3): 321-327.
- [8] 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[J].化学进展,2004,16(4):528-542.
- Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. Progress and application of spectral data pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique [J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(4): 528-542. (in Chinese)
- [9] 夏俊芳,李培武,李小昱,等.不同预处理对近红外光谱检测脐橙 V_c 含量的影响[J].农业机械学报,2007,38(6):107-111.
- Xia J F, Li P W, Li X Y, et al. Effect of different pretreatment method of nondestructive measure vitamin C content of umbilical orange with near-infrared spectroscopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 107-111. (in Chinese)
- [10] Sun X, Zhang H, Gong Z, et al. Spectral pretreatment and wavelength selection for soluble solids content in Gannan navel orange [J]. Sensor Letters, 2010, 8(1): 140-144.
- [11] Zou X, Zhao J, Malcolm J W P, et al. Variable selection methods in near-infrared spectroscopy [J]. Anal Chim Acta, 2010, 667(1/2): 14-32.
- [12] 吕群波,袁艳,相里斌.傅里叶变换成像光谱数据压缩[J].光子学报,2008,37(3):573-576.
- Lü Q B, Yuan Y, Xiang L B. Fourier transform imaging spectral data compression [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(3): 573-576. (in Chinese)
- [13] 刘燕德,陈兴苗,欧阳爱国.可见/近红外光谱法无损检测赣南脐橙可溶性固形物[J].光学学报,2008,28(3):478-481.
- Liu Y D, Chen X M, Ouyang A G. Non-destructive measurement of soluble solid content in Gannan navel orange by visi-

- ble/near-infrared spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 478-481. (in Chinese)
- [14] Liu Y, Sun X, Ouyang A G. Nondestructive measurement of soluble solid content of navel orange fruit by visible-NIR spectrometric technique with PLSR and PCA-BPNN [J]. *LWT Food Science and Technology*, 2010, 43(4): 602-607.
- [15] 夏俊芳, 李小昱, 李培武, 等. 小波变换在脐橙维生素 C 含量近红外光谱预测中的应用 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1760-1766.
- Xia J F, Li X Y, Li P W, et al. Application of wavelet transformation in umbilical orange vitamin C content prediction with near-infrared spectroscopy [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1760-1766. (in Chinese)
- [16] 刘燕德, 罗吉, 陈兴苗. 可见/近红外光谱的南丰蜜桔可溶性固形物定量分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(2): 119-122.
- Liu Y D, Luo J, Chen X M. Analysis of soluble solids content in Nanfeng mandarin fruit with near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 119-122. (in Chinese)
- [17] 张广军, 李丽娜, 李庆波, 等. 基于小波变换的噪声及背景同时去除方法在血糖近红外无创检测中的应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(2): 107-110.
- Zhang G J, Li L N, Li Q B, et al. Application of denoising and background elimination based on wavelet transform to blood glucose noninvasive measurement of near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(2): 107-110. (in Chinese)
- [18] 单杨, 朱向荣, 徐青松, 等. 近红外光谱结合小波变换-径向基神经网络用于奶粉蛋白质与脂肪含量的测定 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(2): 128-132.
- Shan Y, Zhu X R, Xu Q S, et al. Determining the contents of fat and protein in milk powder by using near infrared spectroscopy combined with wavelet transform and radical basis function neural networks [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(2): 128-132. (in Chinese)
- [19] 邹小波, 赵杰文. 用遗传算法快速提取近红外光谱特征区域和特征波长 [J]. *光学学报*, 2007, 27(7): 1316-1321.
- Zou X B, Zhao J W. Methods of characteristic wavelength region and wavelength selection based on genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1316-1321. (in Chinese)
- [20] 王加华, 李鹏飞, 曹楠宁, 等. 基于 iPLS 原理最优优化区间的桃糖度组合权重 PLS 模型研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(5): 386-391.
- Wang J H, Li P F, Cao N N, et al. Study on the combination weight PLS model for determining SSC of peach based on the optimal information regions obtained from iPLS methods [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(5): 386-391. (in Chinese)
- [21] 李鹏飞, 王加华, 曹楠宁, 等. BiPLS 结合 GA 优选可见/近红外光谱 MLR 变量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10): 2637-2641.
- Li P F, Wang J H, Cao N N, et al. Selection of variables for MLR in Vis/NIR spectroscopy based on BiPLS combined GA [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2637-2641. (in Chinese)
- [22] 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 X D, Zhang H L, Ouyang A G, 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)
- [23] Yang Y, Chen W, Shi Z, et al. Reference point of floating-reference method for blood glucose sensing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(4): 421-42.
- [24] 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): 2536-2539.
- Sun T, Ying Y B, Liu K W, et al. Online detection of soluble solids content of pear by near infrared transmission spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(11): 2536-2539. (in Chinese)