doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.030

便携式红提葡萄多品质可见/近红外检测仪设计与试验

高　升[1,2]　王巧华[1,2]　施　行[1,2]　李庆旭[1,2]

(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

摘要:基于可见/近红外漫反射光谱分析技术,设计了便携式生长期红提葡萄多品质参数无损检测仪,该仪器由光谱采集探头、光谱仪、卤素灯光源、锂电池、控制器及外围电路等部分组成,仪器尺寸为 200 mm×160 mm×150 mm,方便携带。以生长期内的红提葡萄果粒为研究对象,采集 400~1 000 nm 的可见/近红外漫反射光谱信息,对原始光谱进行预处理和特征波长提取,分别建立了红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的最优偏最小二乘回归(PLSR)预测模型,所建各指标的最优 PLSR 预测模型的预测集相关系数分别为 0.954 5、0.977 8、0.987 8、0.945 6、0.902 8,均方根误差分别为 1.012 2°Brix、2.022 5%、0.074 7、7.281 3 N、0.979 9%。基于 MFC 开发工具,运用 C++语言编写了仪器实时分析处理软件,将所建红提葡萄多品质参数的最优 PLSR 预测模型植入硬件装置中,实现了生长期红提葡萄果粒的多品质参数一键式无损检测。经检验测试,果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率预测集相关系数 R_p 分别为 0.941 4、0.968 7、0.976 8、0.934 8、0.900 6,预测集均方根误差分别为 1.156 7°Brix、2.364 5%、0.098 6、8.357 1 N、1.105 1%,且该检测仪一次检测时间不超过 2 s,说明该仪器可完成生长期红提葡萄果粒的实时无损检测。

关键词:红提葡萄;内部多品质参数;可见/近红外光谱;无损检测;便携式仪器

中图分类号:S371　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)02-0308-12　　**OSID**:

Design and Test of Portable Red Globe Grape Extraction Multi-quality Visible/Near Infrared Detector

GAO Sheng[1,2]　WANG Qiaohua[1,2]　SHI Hang[1,2]　LI Qingxu[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*

2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affaris*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Based on the visible/near infrared diffuse reflectance spectroscopy technology, a portable nondestructive detector for red globe grape extraction multi-quality parameters in growth period was designed. The instrument included a spectrum acquisition probe, a spectrometer, a halogen lamp light source, a lithium battery, a controller and peripheral circuits. The size of the whole instrument was 200 mm×160 mm×150 mm, which was convenient to carry. The red globe grape extracted fruit grains in the growing period were selected as research objects, and visible/near infrared diffuse reflectance spectral information in the range of 400 nm to 1 000 nm was collected, the original spectrum was preprocessed and the characteristic wavelength was extracted, and the optimal partial least squares regression (PLSR) prediction models of SSC, total acid, pH value, firmness and moisture content of red globe grape extracted fruits were respectively established. The correlation coefficients of the prediction set of the optimal PLSR prediction model for each index were 0.954 5, 0.977 8, 0.987 8, 0.945 6 and 0.902 8, respectively, and the root mean square error was 1.012 2°Brix, 2.022 5%, 0.074 7, 7.281 3 N and 0.979 9%, respectively. Based on MFC development tools, instrument real-time analysis and processing software was written by C++ language, and the optimal PLSR prediction model with multiple quality parameters of red globe grape extract was implanted into hardware device, thus realizing one-touch non-destructive detection of multiple quality parameters of red globe grape extract during growth period. After

收稿日期:2020-04-01　修回日期:2020-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31871863)、湖北省自然科学基金项目(2012FKB02910)和湖北省研究与开发计划项目(2011BHB016)

作者简介:高升(1988—),男,博士生,主要从事农产品无损智能检测技术及装备研究,E-mail:401116575@qq.com

通信作者:王巧华(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事农产品智能检测技术与装备研究,E-mail:wqh@mail.hzau.edu.cn

inspection and testing, the predicted set and correlation coefficient of SSC, total acid, pH value, firmness and moisture content of red globe grape extracted fruit grains of the tester were 0.941 4, 0.968 7, 0.976 8, 0.934 8 and 0.900 6, respectively. The root mean square error of the prediction set was 1.156 7° Brix, 2.364 5%, 0.098 6, 8.357 1 N and 1.105 1%, respectively. And the primary detection time of the detector was less than 2 s. The results show that the instrument can realize the real-time nondestructive detection of red globe grape fruits during the growing period.

Key words: red globe grape; internal multi-quality parameters; visible/near infrared spectroscopy; nondestructive detection; portable instruments

0　引言

葡萄是常见的水果之一，据 2017 年国家统计局的数据，我国当年葡萄总产量达 1.308×10^{10} t[1]。红提为葡萄常见品种，其颗粒饱满、果肉坚实，红提香甜可口、富含较多的营养物质。

红提内部品质评价指标主要包括维生素 C 含量、可溶性固形物含量(Solube solids content, SSC)、总酸(Total acid, TA)含量、糖酸比、芳香物质种类和含量等[2]。可溶性固形物和总酸含量是水果的重要品质之一，决定了果实的风味，也是反映水果成熟度的重要指标[3]。采后红提果实质地不断发生变化，内部组织变软，风味变差[4]，损伤的果粒更加容易腐烂，因此水果的硬度(Firmness index, FI)也是判断果蔬成熟度和贮运品质的一个重要指标，硬度决定了水果的耐贮性和成熟度[5]。含水率(Moisture content, MC)作为果蔬重要的衡量指标，对果蔬的品质、质构及风味产生较大的影响，含水率也是葡萄腐败变质的重要原因，及时检测葡萄果粒的含水率，根据含水率挑选出将要腐烂的果实，对保护周边好的果粒、延长贮藏时间至关重要[6]。水果内部品质常规检测方法主要是破坏性抽样检测，繁琐、费时，且检测后的样品因组织遭到严重破坏而不能销售和食用，存在诸多弊端。红提可溶性固形物含量、总酸含量、pH 值、硬度和含水率的常规测定方法各不相同，同时获取这 5 种品质指标参数需要做不同的试验，无法同时进行多指标检测。因此迫切需要一种高效、无损的红提品质检测技术及仪器。

近几年，光谱技术已广泛应用于水果和蔬菜内部品质的无损检测[7-11]，文献[12]对采后鲜食葡萄糖度进行了可见-近红外光谱的检测，建立 PLSR(偏最小二乘回归)模型的决定系数为 0.82、预测标准差 0.83% Brix。文献[13]采用高光谱成像技术测定 7 个品种鲜食葡萄的内部指标(包括 pH 值、TA 含量、SSC)和感官属性，认为该技术能较好地预测葡萄的内部品质指标。文献[2]利用 USB2000 + 型光谱仪采集红提 400 ~ 1 000 nm 透过率光谱，并建立随机森林预测模型，糖度、酸度的验证集相关系数分别为 0.956 8、0.940 5，结果表明，模型具有较高的准确性。上述研究均属于试验研究，检测仪器尺寸较大，不利于实际应用和推广。随着近红外光谱在农产品品质检测中的应用和普及，国内外学者设计了针对特定作物的便携式光谱检测仪器[14-19]。目前，针对生长期多参数同时检测的研究尚未见报道，且缺少针对红提果粒的便携式内部品质检测仪器研究。

水果果实发育过程分为生长、成熟和衰老 3 个阶段，生长阶段和成熟阶段又称为生长期[20]。本文基于可见/近红外光谱分析技术，设计便携式红提果粒多品质参数无损检测仪，编写实时检测软件，通过光谱预处理和特征波长提取分别建立可溶性固形物含量、总酸含量、pH 值、硬度和含水率最优预测模型，并将其植入便携式检测仪，通过试验对检测仪器的稳定性和精准性进行验证，以期实现红提品质的实时无损检测。

1　检测仪硬件设计

1.1　工作原理

针对红提果粒尺寸不一、果实较小等问题，专门设计了用于红提果粒的光谱采集探头。便携式红提果粒多品质参数无损检测仪采集生长期红提果粒样品的可见/近红外漫反射光谱信息，检测红提果粒的可溶性固形物含量、总酸含量、pH 值、硬度和含水率等主要指标，检测仪工作原理如图 1 所示。将塑料吸盘放置到红提果粒上，光谱采集端分为环形光源和光谱采集内圈光纤两部分。Y 型光纤的一个端口连接卤素灯光源，利用光纤将光传输到样品采集端，在样品采集端以环形光的形式照射到红提果粒样品上，经红提样品反射的光被样品采集端中间的光谱采集内圈光纤接收，通过 Y 型光纤把光谱信息传入光谱仪。光谱仪将光谱信号转换为数字信号传送给 ARM 处理器，处理器根据内部建立的红提果粒各品质参数预测模型分析采集的数字信号，计算后在屏幕上实时显示红提果粒各品质参数的具体数值，得出相应的预测结果并保存。

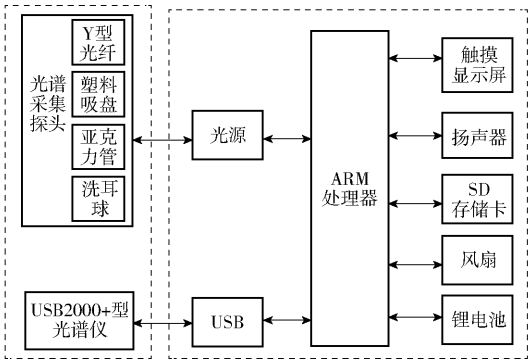


图 1 检测仪工作原理图

Fig. 1 Working principle diagram of detection instrument

1.2 硬件设计

便携式红提果粒多品质参数检测仪通过采集红提果粒的光谱信息,利用仪器内部嵌入的内部品质预测模型,实现红提果粒可溶性固形物含量、总酸含量、pH 值、硬度和含水率多品质参数的无损检测。该仪器主要包括光谱采集探头、光谱仪、卤素灯光源、锂电池和控制器及外围电路等部分。检测仪的整体尺寸为 200 mm × 160 mm × 150 mm,质量为 1 000 g,在脱离电源的情况下,该仪器可独立工作 2.5 h。硬件设计如图 2 所示。

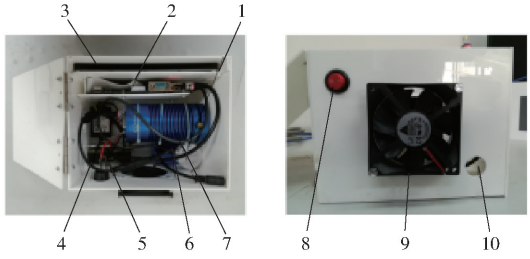
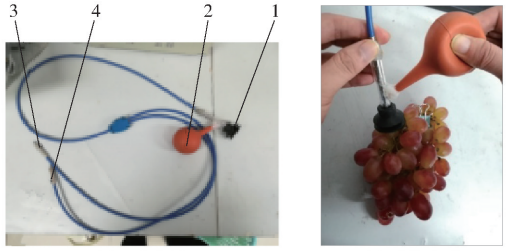


图 2 仪器实物图

Fig. 2 Instrument physical map

1. 扬声器 2. ARM 板 3. 显示屏 4. 电压转换模块 5. 稳压模块 6. 锂电池 7. 卤素灯光源 8. 开关按钮 9. 风扇 10. 锂电池充电接口

光谱采集探头主要由 Y 型光纤、塑料吸盘、亚克力管、洗耳球 4 部分组成。Y 型光纤由两根独立的光纤组成,Y 型光纤探头由环形光源和内圈光纤两部分组成,一根光纤将光源发出的光传输到光纤探头的环形光源,环形光纤发出的环形光均匀地照射在红提果粒上;内圈光纤将检测器采集到经红提果粒漫反射作用产生的光返回传送给光谱仪,采集获得红提果粒的内部品质信息。中间 Y 型光纤探头封装在亚克力的密封管内,孔内中空,在其装有探头的端头安装塑料吸盘,亚克力密封管的中部开有小孔,洗耳球安装在小孔上,亚克力密封管的另外一端进行密封。当洗耳球吸气时,Y 型光谱的探头与果粒在吸力的作用下紧密接触,进行光谱采集。塑料吸盘吸附在果粒表面,可有效去除大部分的外界光照干扰信息。光谱采集探头及采集方式如图 3 所示。



(a)Y型光纤 (b)采集方式

图 3 光谱采集探头及采集方式

Fig. 3 Spectrum acquisition probe and acquisition mode

1. 塑料吸盘 2. 洗耳球 3. 光源接口 4. 光谱仪接口

卤素灯光源选择美国海洋光学公司的 HL - 2000 - FHSA 型可调卤钨灯光源,其尺寸为 62 mm × 60 mm × 150 mm,质量为 500 g,该光源的波段为 360 ~ 2 000 nm,功率为 20 W,该光源可以通过 SMA905 型连接头直接与光纤进行连接,且光源安装有可调节光照强度的调节旋钮,内部装有冷风扇保持散热。

选择美国海洋光学公司的 USB2000 + 微型光纤光谱仪,其探测器的类型为高信噪比的线阵 CCD,有效的波长范围为 480 ~ 1 100 nm。可通过 USB 进行参数设置、数据传输和提供供电。光谱仪的放置位置及便携式仪器内部结构如图 4 所示。



图 4 便携式仪器内部结构图

Fig. 4 Internal structure diagram of portable instrument

选择以 S3C6410 为核心的 ARM11 处理器作为检测装置的微型控制器。外围电路主要包括 USB 接口电路、触摸显示屏、电压转换装置、扬声器和风扇。其中,USB 接口主要用于光谱仪的通讯、参数设置、数据传输等。触摸显示屏主要实现对仪器的控制和信息显示,扬声器可在完成一次完整检测后播报提示检测完成,风扇可对整个装置进行散热。红提果粒内部品质检测仪实物如图 5 所示。

2 模型构建

2.1 试验材料

在湖北省武汉市小宛葡萄园选取 10 棵处于生

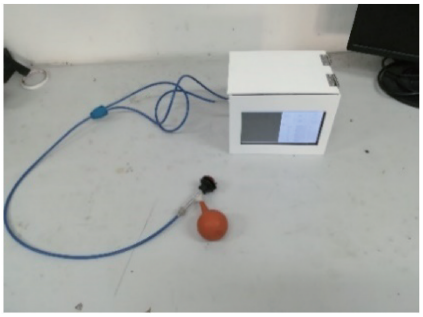


图 5　红提果粒内部品质检测仪实物图

Fig. 5　Physical map of red globe grape fruit internal quality detector

长期的红提植株并编号，采集试验样品时，将每次采集的葡萄串按照植株的号码进行编号，样品于试验当天采摘。试验周期从红提开花后生长发育的第 61 天（2019 年 6 月 30 日）持续到第 116 天（2019 年 8 月 24 日）。因红提生长成熟的周期大约为 60 d，参考当地果农的经验，确定每隔 5 d 进行 1 次采样，每次采集试验样品为 10 串葡萄，共采样 12 次。分别从前 10 棵采集的红提串试验样品中，在每串的上部、中部、下部，各挑选 3 粒（每串共 9 粒红提）大小相近、完好无损的红提果粒，作为红提果粒 SSC、总酸含量、pH 值指标检测的试验样品，每个试验样品包含 3 颗红提果粒，分别测定 3 颗红提果粒的光谱信息，并将 3 颗红提果粒的光谱信息进行平均后作为本样品的光谱信息，同样在进行标准理化值的测定时，将相应的 3 颗红提果粒挤汁、搅匀后的汁液作为一个样品进行测定。在每串葡萄的上部、中部、下部，各挑选 1 粒，作为红提果粒硬度指标检测的试验样品，红提果粒含水率的指标检测与硬度检测相同。每串葡萄可分别获得 3 个样本数据（每个样本数据包括红提果粒可溶性固形物含量、总酸含量、pH 值、硬度和含水率指标）。将编号后的样品放入恒温恒湿箱中保存 12 h，恒温恒湿箱温度设置为（22 ± 1）℃，相对湿度为 65%。

2.2　试验方法

2.2.1　光谱采集

直接在室内自然状态下进行光谱采集。设置红提果粒检测仪器参数：积分时间 100 ms，平均次数 4 次，平滑宽度 3 nm。将红提串平放在桌子上，当洗耳球吸气时，Y 型光谱的探头与果粒紧密接触，进行光谱采集，保存采集光谱数据。为消除光谱仪及外界光照的影响，去除光谱首尾两端的部分波段，选择波长范围 400 ~ 1 000 nm 共 1 806 个波长点，进行分析处理。每串挑选 15 颗果粒进行光谱采集，整个试验共采集 12 次，总计 120 串葡萄，经过处理，总共得到 1 080 个样品的光谱数据，每个内部品质参数各有 360 个样品。

2.2.2　标准理化值测定

对红提果粒样品进行光谱采集后立即进行红提果粒标准理化值的测定，在进行红提果粒 SSC、总酸含量、pH 值测定时，将采集完光谱的样品（3 颗红提果粒）分别放入到红提果粒挤压装置（压蒜器）挤汁，再用纱布进行果汁的过滤，然后进行果汁的搅拌，最后将挤压搅拌后的果汁进行 SSC、总酸含量、pH 值的测定。

SSC 测定参照文献[21]。总酸含量测定参照文献[22]。pH 计测定前先进行开机稳定（0.5 h）和校准。将测定完 SSC 和总酸含量后剩余的果汁，进行 pH 值的测定。硬度测定则是将进行光谱检测后的红提样品横向放置在质构仪的试验台上，采用 P100/R 型探头，设置测前速度为 2.0 mm/s，测试速度为 1.0 mm/s，测后速度为 2.0 mm/s，起始力设置为 0.05 N，压缩距离为 8.0 mm，对红提果粒进行横向压缩，压缩部位为红提的中部位置。在进行压缩时，随着位移的增大，果粒受到的压力显著增大，当压缩到一定的位置时，果实在较大的压力下会出现脆断，压力迅速减小，试验取在整个压缩过程中果粒所能承受的最大压力作为评判果实硬度的指标。将采集完光谱的红提样品立即进行含水率的测定，测定参照文献[23]。

2.3　模型建立及评价方法

PLSR 预测模型通过最小化偏差平方和对曲线进行线性拟合，结合了多元线性回归、相关分析和主成分的优点。模型的准确性和稳定性由校正集相关系数 R_c 及均方根误差（RMSEC）、预测集相关系数 R_p 及均方根误差（RMSEP）、残差预测偏差（RPD）进行模型性能的评价。相关系数越接近 1，均方根误差越接近 0，模型的预测性能及稳定性越好。RPD 的评价指标：RPD 小于 1.5 表示预测性能较差；1.5 ~ 2.0 之间表示模型可以预测低值和高值；2.0 ~ 2.5 之间表示可以进行粗略的定量预测；2.5 ~ 3.0 或更高的值表示具有良好的预测精度。

2.4　光谱模型建立

2.4.1　光谱预处理及样品集划分

通常为了保证模型的准确性，需要对原始光谱（RAW）进行光谱预处理。本研究中采用的光谱预处理方法包括标准正态变量变换（Standard normal variable transformation，SNV）、Savitzky - Golay 卷积平滑处理法（Savizky - Golay smooth，S_G）、移动平均法（Moving-average method，MA）和归一化（Normalization，Nor）等。以红提的 SSC 为例阐述光谱预处理的过程。

从图 6 中可以得出,在原始光谱中所有红提样品的光谱都呈现出相同的变化趋势,光谱曲线中存在明显的吸收峰,分别为 678 nm 和 970 nm,其中,678 nm 的吸收峰对应叶绿素的吸收,与生长期果皮颜色特征相关联[24],而 970 nm 吸收峰对应水和—OH 键的二倍频吸收峰[25]。546、612 nm 处出现尖峰,是因为外界光线较强且红提果粒皮薄,还存在一定的外界光照等干扰信息。红提样品的光谱强度存在差异,但无法直接识别品质的好坏,需要通过对光谱数据建立相应的模型来预测品质指标。

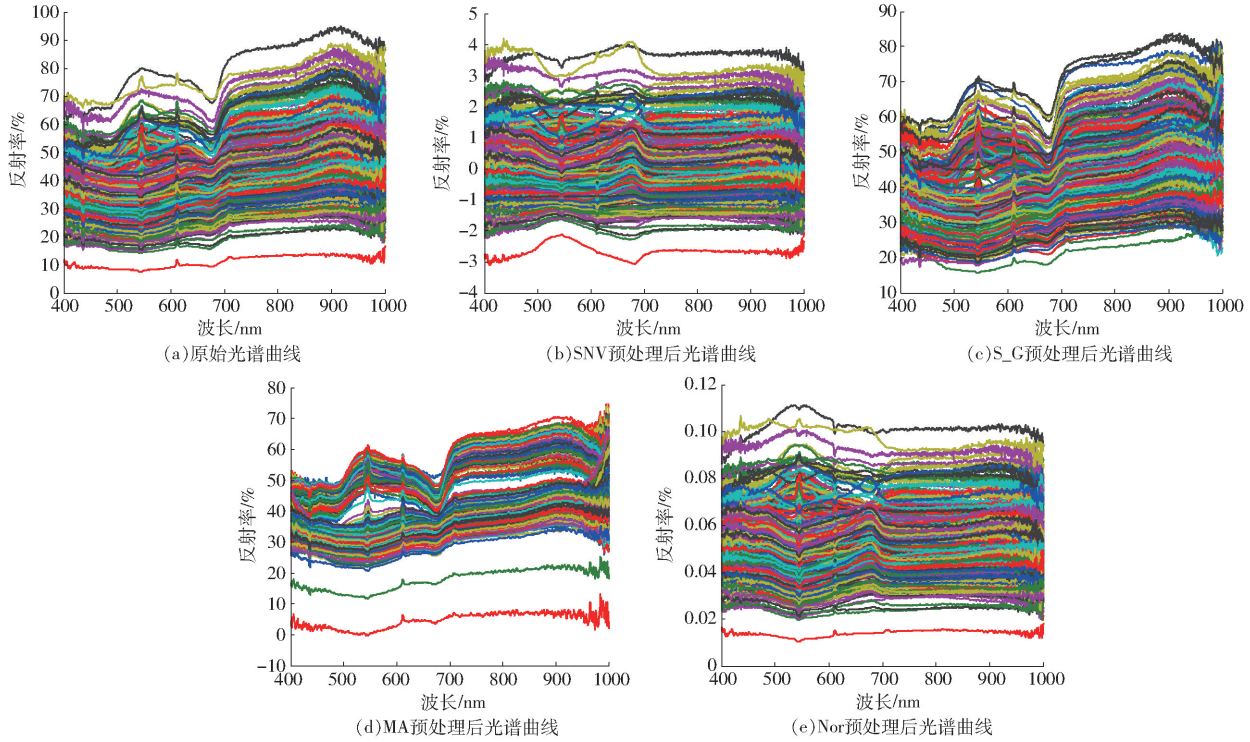


图 6 红提漫反射光谱

Fig. 6 Diffuse reflectance spectrum of red globe grape

KS(Kennard – Stone)算法作为常用的样本划分算法,利用变量空间之间的相对欧氏距离找出样品集中差异较大的样品选入校正集,其余相近的样品选入预测集。试验中每个指标共采集了 360 份红提样本,按照 3∶1比例利用 KS 算法划分为 270 个校正集样本,90 个预测集样本。从表 1 中可以看出,SSC 的分布范围为 4.5 ~ 19.0°Brix,校正集和预测集的平均值分别为 11.9、11.7°Brix;总酸质量分数分布范围为 2.254% ~ 37.663%,校正集和预测集的平均值分别为 10.185%、9.868%;pH 值分布范围为 2.68 ~ 4.62,校正集和预测集的平均值分别为 3.64、3.55;硬度分布范围为 9.414 ~ 121.305 N,校正集和预测集的平均值分别为 33.620、31.975 N;含水率分布范围为 83.15% ~ 96.52%,校正集和预测集的平均值分别为 89.54%、89.68%。表明数据的分布范围较广,通过 KS 划分的数据集分布较为合理,可提高预测模型的稳定性。

由表 2 可得,在红提 SSC 预测模型中,原始光谱经过 MA 预处理后所建的 PLSR 模型效果最好,R_p 和 RMSEP 分别为 0.924 6 和 1.306 0°Brix。在红提 TA 质量分数预测模型中,原始光谱所建的PLSR模型效果最好,R_p 和 RMSEP 分别为 0.976 4 和 2.165 7%。在红提 pH 值预测模型中,原始光谱经过 MA 预处理后所建的 PLSR 模型效果最好,R_p 和 RMSEP 分别为 0.982 7 和 0.093 9。在红提硬度预测模型中,原始光谱经过 Nor 预处理后所建的 PLSR 模型效果最好,R_p 和 RMSEP 分别为 0.908 1 和 9.378 0 N。在红提含水率预测模型中,原始光谱经过 S_G 预处理后所建的 PLSR 模型效果最好,R_p 和 RMSEP 分别为 0.842 7、1.231 0%。对于红提的 SSC 和 pH 值,原始光谱经过 MA 预处理后模型的预测精度明显提高,选取原始光谱经过 MA 预处理进行特征波长提取和

表 1 生长期红提样品利用 KS 算法划分样本集的数据统计

Tab. 1 Data statistics of red globe grape samples in growing period by KS algorithm

品质参数	校正集			预测集		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
SSC/°Brix	4.5	18.5	11.9	4.50	19.0	11.7
TA 质量分数/%	2.254	37.663	10.185	2.438	36.171	9.868
pH 值	2.68	4.62	3.64	2.75	4.51	3.55
FI/N	9.414	121.305	33.620	13.149	110.847	31.975
MC/%	83.20	96.52	89.54	83.15	95.39	89.68

表 2　采用不同预处理方法的全波长 PLSR 预测模型

Tab. 2　Full-wavelength PLSR prediction model using different preprocessing methods

指标	预处理方法	主因子数	校正集		预测集		RPD
			R_c	RMSEC	R_p	RMSEP	
SSC	RAW	7	0.916 9	1.337 5°Brix	0.911 3	1.412 7°Brix	2.325 4
	SNV	7	0.914 8	1.353 1°Brix	0.910 5	1.419 8°Brix	2.322 1
	S_G	8	0.926 8	1.257 9°Brix	0.910 3	1.418 5°Brix	2.281 5
	MA	12	0.926 7	1.259 0°Brix	0.924 6	1.306 0°Brix	2.382 6
	Nor	7	0.914 8	1.353 0°Brix	0.910 5	1.419 8°Brix	2.316 8
TA 质量分数	RAW	10	0.976 9	2.157 0%	0.976 4	2.165 7%	4.635 2
	SNV	10	0.977 2	2.142 4%	0.975 5	2.216 2%	4.563 4
	S_G	10	0.976 7	2.166 9%	0.971 7	2.353 6%	4.080 3
	MA	16	0.976 1	2.191 2%	0.949 5	3.112 7%	2.974 8
	Nor	8	0.969 8	2.463 3%	0.973 8	2.257 1%	4.512 0
pH 值	RAW	14	0.981 6	0.102 1	0.946 5	0.167 4	2.840 2
	SNV	14	0.982 2	0.100 4	0.947 3	0.165 3	2.873 5
	S_G	14	0.987 3	0.085 1	0.964 5	0.136 8	3.593 8
	MA	15	0.987 5	0.084 3	0.982 7	0.093 9	5.384 6
	Nor	13	0.979 4	0.108 1	0.943 4	0.171 4	2.764 0
FI	RAW	8	0.936 7	8.156 8N	0.906 9	9.441 8N	2.313 9
	SNV	8	0.935 5	8.231 8N	0.907 5	9.424 0N	2.323 8
	S_G	10	0.934 7	8.431 4N	0.898 6	9.774 7N	2.167 8
	MA	6	0.921 1	9.021 0N	0.893 2	10.064 6N	2.141 2
	Nor	8	0.935 1	8.258 7N	0.908 1	9.378 0N	2.325 2
MC	RAW	6	0.869 7	1.187 3%	0.833 8	1.251 7%	1.567 4
	SNV	6	0.869 4	1.188 5%	0.841 5	1.230 8%	1.623 4
	S_G	6	0.870 5	1.184 0%	0.842 7	1.231 0%	1.644 7
	MA	11	0.880 3	1.141 3%	0.833 9	1.254 6%	1.586 4
	Nor	6	0.869 1	1.190 1%	0.833 4	1.253 7%	1.567 7

建模。对于红提的 TA 质量分数，经过预处理所建模型的预测精度反而降低，后续利用原始光谱进行特征波长提取和建模分析。

2.4.2　特征波长提取

（1）CARS

经过预处理的原始光谱通过 KS 算法划分后采用竞争性自适应加权算法（Competitive adaptive reweighted sampling，CARS）[26] 分别提取红提的 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的特征波长，以 SSC 特征波长的选取为例，因 CARS 算法运行方法相似，下文只阐述 CARS 算法对特征波长的选取过程，如图 7 所示。本研究设定蒙特卡罗采样为 50 次，采用 5 折交叉验证法计算。由图 7b 可知，交互验证均方根误差（RMSECV）随着取样运行次数增加先减小后增大：当 RMSECV 逐渐减小时，表明光谱数据中部分无用的信息被剔除；当 RMSECV 逐渐增大时，表明光谱数据中有用的重要信息被剔除。因此，取采样 50 次所建立的 PLSR 模型中所对应的最小 RMSECV 作为最优结果，由图 7b 可知，当 RMSECV 达到最小值时，各变量的回归系数位于

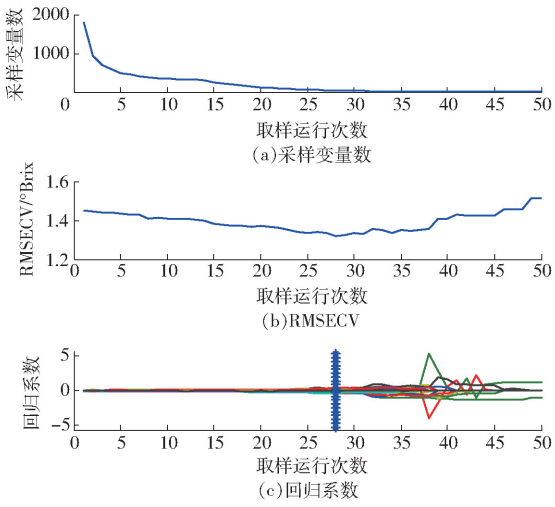


图 7　基于 CARS 算法的红提 SSC 特征波长选取图

Fig. 7　Characteristic wavelength selection charts of SSC in red globe grape extraction based on CARS algorithm

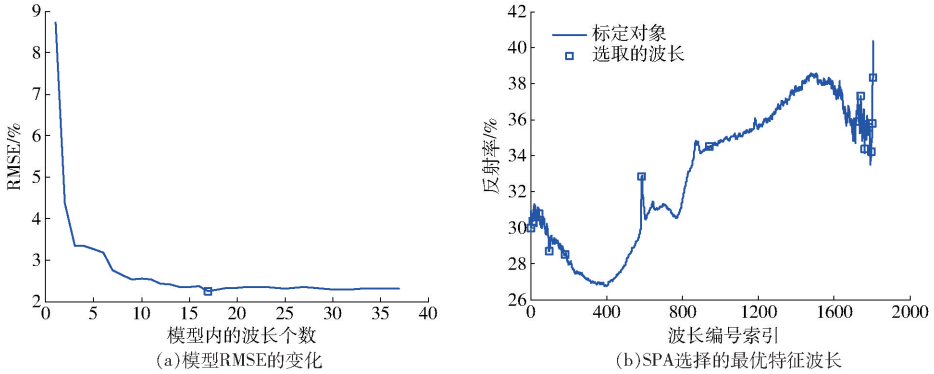
图 7c中竖直线位置，采样运行 28 次。

（2）SPA

连续投影算法（Successive projection algorithm，SPA）[27] 是一种可有效消除变量共线性的算法。KS 算法划分后的经过预处理原始光谱通过 SPA 优选

出波长序列分别建立红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的 PLSR 模型。

以红提的总酸质量分数为例简要阐述 SPA 选取特征波长的过程。根据 SPA 的原理,利用均方根误差(RMSE)来决定所建模型的优劣,均方根误差越小模型的稳定性越好、精度越高。RMSE 随着波长个数的变化,会不断的波动,如图 8a 所示,选择 RMSE 最小值对应的波长个数为 17,作为最优的波长个数,选取的波长在原始光谱中的索引如图 8b 所示,所选波段占原始光谱信息的 0.941%。



(a)模型RMSE的变化 (b)SPA选择的最优特征波长

图 8 基于 SPA 算法的红提总酸质量分数特征波长选取图

Fig. 8 Characteristic wavelength selection charts of TA content in red globe grape extraction based on SPA algorithm

(3)UVE

以利用无信息变量消除算法(Uninformative variable elimination, UVE)[28]提取红提果粒 SSC 特征波长建立 PLSR 模型为例,应用 UVE 对经过预处理光谱数据进行有效信息提取,UVE 的原理是将一定数目的随机噪声矩阵加入光谱矩阵,通过 PLSR 交叉验证建立模型,得到一组回归系数矩阵,波长变量的稳定性指数是利用该系数矩阵的平均值除以该系数矩阵的标准差,波长变量的稳定性指数小于某一阈值时则被剔除。设定噪声矩阵稳定性指数最大值的 99% 作为剔除阈值,图像黄色曲线代表光谱变量的稳定性指数,红色曲线代表噪声变量的稳定性指数,两水平虚线为变量的选择阈值(±11.05),虚线内部为无用信息被消除,外部为有用信息,选取结果如图 9 所示,所对应的波长为选择的特征波长。通过 UVE 共选择 1 360 个特征波长。

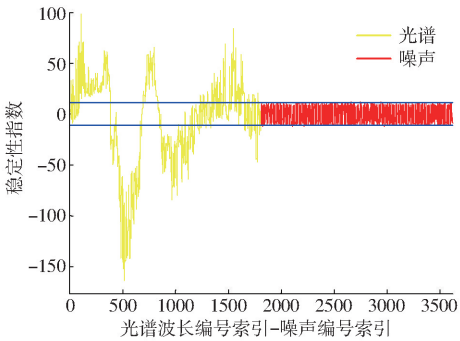


图 9 基于 UVE 算法的红提 SSC 特征波长选取图

Fig. 9 Characteristic wavelength selection chart of SSC in red globe grape extraction based on UVE algorithm

2.4.3 基于特征波长提取方法的 PLSR 模型效果

由表 3 可知,在原始光谱经过预测处理后建立的红提 SSC、总酸质量分数、pH 值的 PLSR 模型中,所建模型的校正集的相关系数与预测集的相关系数相差不大,在原始光谱经过预测处理后建立的硬度和含水率的 PLSR 模型中,所建模型的校正集的相关系数与预测集的相关系数相差较大。在原始光谱经过预测处理后建立的红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的 PLSR 模型中,建模所用的特征波长数量较多,需要进行特征波长的提取进一步提高模型的稳定性和预测性能。对于红提果粒 SSC 指标,经过 MA-UVE-SPA 所建 PLSR 模型的 R_c、R_p 和 RPD 都明显大于其他特征波长提取方法建立的 PLSR 模型,模型效果较好;对于红提果粒总酸质量分数指标,经过 RAW-UVE-SPA 所建 PLSR 模型的 RPD 为 5.051 2,明显大于其他特征波长提取方法建立的 PLSR 模型,模型效果较好;对于红提果粒 pH 值指标,经过 MA-CARS-SPA 所建 PLSR 模型的 R_p 和 RPD 明显大于其他特征波长提取方法建立的 PLSR 模型,模型效果较好;对于红提果粒硬度指标,经过 Nor-SPA 所建 PLSR 模型的 R_p 和 RPD 明显大于其他特征波长提取方法建立的 PLSR 模型,模型效果较好;对于红提果粒含水率指标,经过 S_G-CARS-SPA 所建 PLSR 模型的 RPD 为 2.125 9,明显大于其他特征波长提取方法建立的 PLSR 模型,模型效果较好;红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值和含水率的最佳模型都是通过二次波长提取的方法,红提果粒 SSC、总酸质量分数的最佳模型的特征波长提取方法为 UVE-SPA。红提果粒 pH 值和含水率的最佳模型的特征波长提取方法为 CARS-SPA,硬度的最佳模型的特征波长提取方法为 SPA。SSC、总酸质量分数、pH 值所建最佳模型的校正集

和预测集的相关系数均大于 0.950，而硬度和含水率所建最佳模型的校正集和预测集的相关系数都低于 0.950，SSC、总酸质量分数和 pH 值所建最佳模型预测性能明显好于硬度和含水率所建模型，红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率最优预测模型的 RPD 分别为 3.150 1、5.051 2、6.572 5、2.922 2 和 2.125 9，通过近红外光谱技术，可以准确地预测红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率内部指标。

进行特征波长提取后，所建红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率指标的最优模型最优特征波长如表 4 所示。

表 3　基于不同特征波长提取方法建立的 PLSR 模型效果

Tab.3　Effects of PLSR models based on different feature band extraction methods

指标	特征波长提取方法	因子数	特征波长个数	校正集		预测集		RPD
				R_c	RMSEC	R_p	RMSEP	
SSC	MA	12	1 806	0.926 7	1.259 0°Brix	0.924 6	1.306 0°Brix	2.382 6
	MA－CARS	9	42	0.932 7	1.172 0°Brix	0.931 5	1.181 5°Brix	2.506 8
	MA－SPA	7	18	0.931 4	1.179 3°Brix	0.928 0	1.279 2°Brix	2.436 5
	MA－CARS－SPA	10	25	0.923 3	1.286 6°Brix	0.921 4	1.282 6°Brix	2.186 8
	MA－UVE－SPA	20	26	0.954 8	1.046 1°Brix	0.954 5	1.012 2°Brix	3.150 1
TA 质量分数	RAW	10	1 806	0.976 9	2.157 0%	0.976 4	2.165 7%	4.635 2
	RAW－CARS	9	74	0.977 5	2.129 1%	0.974 0	2.259 1%	4.353 7
	RAW－SPA	12	17	0.962 4	2.740 8%	0.961 0	2.359 1%	4.253 7
	RAW－CARS－SPA	13	19	0.974 2	2.278 6%	0.973 8	2.259 5%	4.342 8
	RAW－UVE－SPA	11	21	0.978 9	2.083 3%	0.977 8	2.022 5%	5.051 2
pH 值	MA	15	1 806	0.987 5	0.084 3	0.982 7	0.093 9	5.384 6
	MA－CARS	11	37	0.984 6	0.093 6	0.982 7	0.093 3	5.406 2
	MA－SPA	20	45	0.987 0	0.085 9	0.984 6	0.087 9	5.707 5
	MA－CARS－SPA	10	15	0.988 1	0.085 1	0.987 8	0.074 7	6.572 5
	MA－UVE－SPA	20	46	0.987 9	0.082 9	0.982 1	0.095 0	5.298 9
FI	Nor	8	1 806	0.935 1	8.258 7N	0.908 1	9.378 0N	2.325 2
	Nor－CARS	20	74	0.955 6	8.859 2N	0.932 2	8.213 3N	2.705 2
	Nor－SPA	14	14	0.957 5	6.690 4N	0.945 6	7.281 3N	2.922 2
	Nor－CARS－SPA	12	74	0.953 8	6.997 2N	0.931 8	8.194 6N	2.668 7
	Nor－UVE－SPA	10	14	0.928 4	8.659 6N	0.927 2	8.243 0N	2.541 9
MC	S_G	6	1 806	0.870 5	1.184 0%	0.842 7	1.231 0%	1.644 7
	S_G－CARS	11	37	0.909 3	1.001 0%	0.858 4	1.165 9%	1.735 2
	S_G－SPA	6	11	0.862 8	1.216 2%	0.855 6	1.176 3%	1.674 0
	S_G－CARS－SPA	12	16	0.906 3	1.016 6%	0.902 8	0.979 9%	2.125 9
	UVE－SPA	6	6	0.856 3	1.242 4%	0.848 3	1.201 1%	1.666 0

表 4　红提不同指标 PLSR 预测模型的最优特征波长

Tab.4　Optimal feature wave points for different red globe grape index PLSR prediction models

指标	建模方法	波长/nm
SSC（26 个）	MA－UVE－SPA	403.11、406.82、407.93、409.41、415.33、435.99、611.35、839.09、922.09、962.79、964.84、968.34、970.68、976.78、979.39、982.29、982.86、984.31、985.75、987.19、987.77、988.92、990.07、996.09、997.52、998.95
TA 质量分数（21 个）	RAW－UVE－SPA	417.92、434.15、435.99、460.55、530.03、545.76、601.92、657.35、732.36、848.23、923.90、945.69、958.97、962.20、963.96、973.30、975.04、975.62、982.58、987.77、990.07
pH 值（15 个）	MA－CARS－SPA	426.04、434.88、435.62、485.68、617.62、687.36、896.91、948.65、949.25、971.26、977.94、982.58、985.46、988.05、997.8
FI（14 个）	Nor－SPA	403.85、410.89、435.99、529.32、546.11、678.19、744.30、909.09、985.75、986.90、987.77、988.34、989.49、991.79
MC（16 个）	S_G－CARS－SPA	423.46、440.40、522.14、617.62、683.29、797.57、874.75、933.49、956.92、960.44、961.32、969.22、973.01、979.68、982.00、984.02

3　检测仪软件开发

软件系统的设计主要根据系统的硬件平台选择方便开发的嵌入式操作系统（如 Linux、WinCE、Android 等），编写相应的应用程序，完成对整个系统的搭建。因美国海洋光学公司提供了 WinCE 嵌入式操作平台的驱动程序，方便后续程序的开发，因此该 ARM 处理器选择 WinCE 嵌入式操作系统。首先

在计算机上搭建 Visual Studio 2005 开发环境,安装相应的 SDK(Software development kit)开发包,进行 WinCE 嵌入式操作系统下应用程序的开发。编写 WinCE 系统下的应用程序,主要完成光谱仪采集参数的设置、光谱数据采集和存储,根据采集到的光谱数据建立红提内部指标的检测模型,计算并得到测试样品的内部指标,在液晶显示屏上显示结果。整个检测程序的流程如图 10 所示。

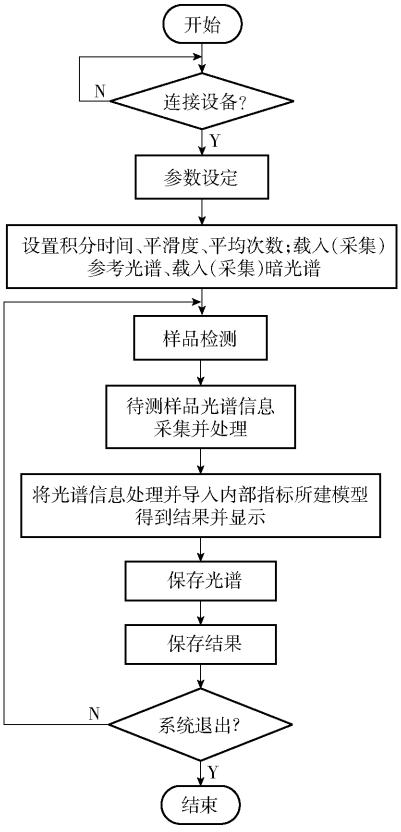


图 10 整个检测程序的流程图

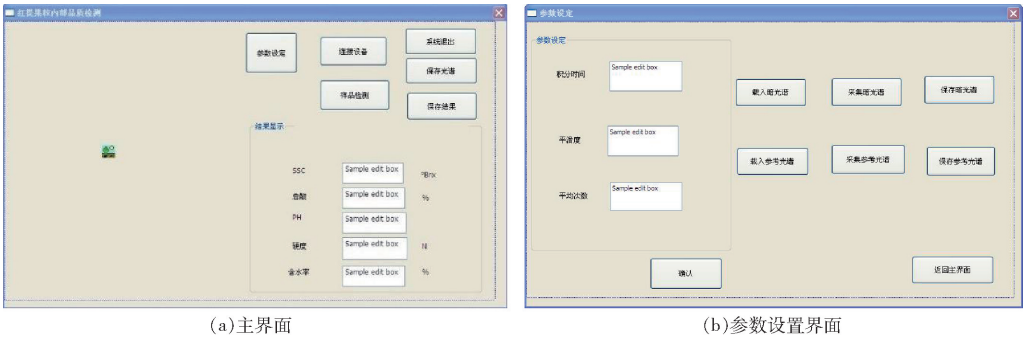
Fig. 10 Flow chart of entire test procedure

在 WinCE 系统下的程序运行结果显示界面如图 11所示。图 11a 为主界面,主要完成光谱仪的连接、光谱曲线显示、光谱采集、数据处理和结果显示等;图 11b 为参数设置界面,主要包括光谱采集积分时间、平均次数、平滑度的设置。为简化光谱采集操作步骤,系统默认自动导入储存的参考光谱和暗光谱,或根据实际情况重新采集暗光谱或参考光谱。参数设置完成后返回主界面。设定完相应的采集参数后,每次对样品进行光谱采集试验时,按照上文的红提果粒采集步骤进行光谱采集,当按下样品检测按键,光谱仪采集样品的光谱信息并将光谱反射率曲线实时显示到触摸屏幕上,系统根据建立好的内部品质检测模型,计算样品的相应指标含量,并将测量结果实时显示到触摸屏幕的界面上。并在 SD 存储卡上保存测量结果及光谱信息。在样品检测完成后,扬声器实时播报“测试完成”的语音,提示本次操作顺利完成,该检测仪可同时获取红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率 5 个参数的值,其检测时间小于 2 s,实现了快速无损检测。

4 试验验证

试验材料为生长期的红提果粒,挑选方法同红提果粒试验材料的选择方法。并利用搭建的便携式红提果粒内部品质检测仪进行试验,将得到的结果与理化测量值进行分析,红提果粒的各指标采集 80 个试验样品。每个样品重复采集 3 次,以 3 次红提果粒的 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率预测结果的变异系数衡量仪器的稳定性。

由图 12 可知,红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率预测集的相关系数 R_p 分别为 0.941 4、0.968 7、0.976 8、0.934 8、0.900 6;预测集的 RMSEP 分别为 1.156 7°Brix、2.364 5%、0.098 6、8.357 1 N、1.105 1%,表明模型有较好的检测精度。每个样品重复预测 3 次,红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率预测结果的最大变异系数分别为 0.085、0.079、0.064、0.098 和 0.092,表明模型有较好的稳定性和重复性。虽然预测结果的相关系数稍低于植入模型的结果,但两者差距较小,可能与采集时外界环境的影响有关。利用便携式红提果粒内部品质检测仪测定的结果与真实结果相差不大,达到了设计仪器的要求。



(a)主界面 (b)参数设置界面

图 11 红提果粒检测程序软件界面

Fig. 11 Red globe grape fruit detection program software interface

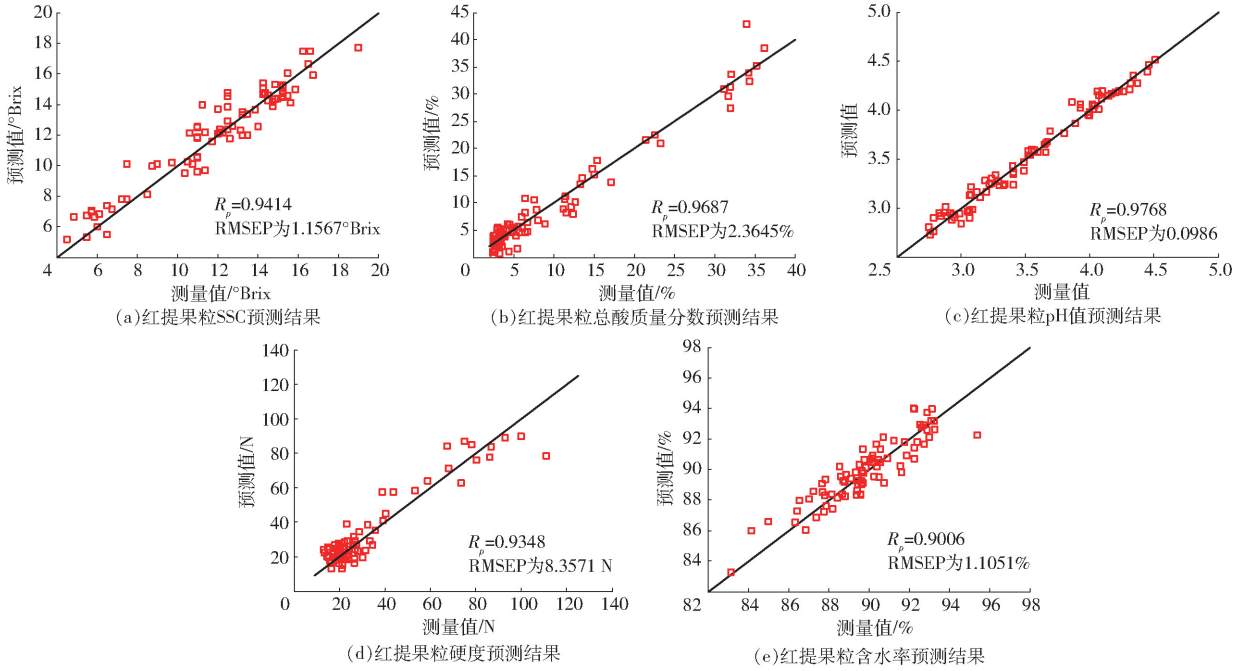


图 12　便携式红提果粒内部品质检测仪验证

Fig. 12　Verification of internal quality detector of portable red fruit

5　结论

(1)基于可见/近红外漫反射光谱,根据生长期红提果粒的大小及形状特征,设计了便携式红提果粒多品质参数检测仪,该仪器主要由光谱采集探头、光谱仪、卤素灯光源、锂电池和控制器及外围电路等部分组成。仪器尺寸为 200 mm × 160 mm × 150 mm,在脱离电源的情况下,该仪器可独立工作 2.5 h,满足野外工作要求。

(2)采集生长期红提 400 ~ 1 000 nm 的可见/近红外漫反射光谱信息,对原始光谱进行预处理和特征波长提取,分别建立了红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的最优 PLSR 预测模型,所建红提果粒的 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的最优 PLSR 预测模型的预测集相关系数分别为 0.954 5、0.977 8、0.987 8、0.945 6、0.902 8,均方根误差分别为 1.012 2° Brix、2.022 5%、0.074 7、7.281 3 N、0.979 9%。

(3)应用 MFC 开发工具,基于 C + + 语言编写了仪器实时分析处理软件。将所建红提 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的最优 PLSR 预测模型植入硬件装置中,实现了生长期红提果粒多品质参数的一键式无损检测,检测仪可同时获取红提果粒 5 个参数的值,检测时间不超过 2 s,实现了快速无损检测。

(4)验证了红提果粒多品质参数检测仪的检测精度和稳定性。红提果粒 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的预测集相关系数分别为 0.941 4、0.968 7、0.976 8、0.934 8、0.900 6,预测集均方根误差分别为 1.156 7° Brix、2.364 5%、0.098 6、8.357 1 N、1.105 1%,预测结果的最大变异系数分别为 0.085、0.079、0.064、0.098 和 0.092。结果表明,该仪器可完成生长期红提果粒的 SSC、总酸质量分数、pH 值、硬度和含水率的实时无损检测。

参　考　文　献

[1]　国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社,2018.

[2]　许锋,付丹丹,王巧华,等. 基于 MCCV - CARS - RF 建立红提糖度和酸度的可见-近红外光谱无损检测方法[J]. 食品科学,2018,39(8):149 - 154.
XU Feng,FU Dandan,WANG Qiaohua,et al. Nondestructive detection of sugar content and acidity in red globe table grapes using visible near infrared spectroscopy based on Monte - Carlo cross validation-competitive adaptive reweighted sampling - random forest (MCCV - CARS - RF)[J]. Food Science,2018,39(8):149 - 154. (in Chinese)

[3]　ZHANG D Y,XU L,WANG Q W,et al. The optimal local model selection for robust and fast evaluation of soluble solid content in melon with thick peel and large size by vis - NIR spectroscopy[J]. Food Analytical Methods,2019,12(1):136 - 147.

[4]　田海龙,张平,农绍庄,等. 基于 TPA 测试法对 1 - MCP 处理后葡萄果实质构性能的分析[J]. 食品与机械,2011,27(3):104 - 107.
TIAN Hailong,ZHANG Ping,NONG Shaozhuang,et al. Analysis on texture properties of treated grape fruit with 1 - MCP based on TPA test[J]. Food & Machinery,2011,27(3):104 - 107. (in Chinese)

[5] 邓云,吴颖,李云飞. 温度和相对湿度对采后葡萄浆果硬度的影响[J]. 食品科学,2007,28(3):46 - 49.
DENG Yun, WU Ying, LI Yunfei. Effects of temperature and relative humidity on postharvest grapes berry firmness[J]. Food Science, 2007, 28(3): 46 - 49. (in Chinese)
[6] 朱丹实,张巧曼,曹雪慧,等. 湿度条件对巨峰葡萄贮藏过程中水分及质构变化的影响[J]. 食品科学,2014,35(22):340 - 345.
ZHU Danshi, ZHANG Qiaoman, CAO Xuehui, et al. Effect of relative humidity on the changes in water and texture of Kyoho grape during storage[J]. Food Science, 2014, 35(22): 340 - 345. (in Chinese)
[7] 何嘉琳,乔春燕,李冬冬,等. 可见-近红外高光谱成像技术对灵武长枣 VC 含量的无损检测方法[J]. 食品科学,2018,39(6):194 - 199.
HE Jialin, QIAO Chunyan, LI Dongdong, et al. Non-destructive detection of vitamin C content in "Lingwu Changzao" jujubes (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Lingwu Changzao) using visible near infrared hyperspectral imaging[J]. Food Science, 2018, 39(6): 194 - 199. (in Chinese)
[8] 韩东海,常冬,宋曙辉,等. 小型西瓜品质近红外无损检测的光谱信息采集[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):174 - 178.
HAN Donghai, CHANG Dong, SONG Shuhui, et al. Information collection of mini watermelon quality using near-infrared non-destructive detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 174 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130730&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.030. (in Chinese)
[9] 孙通,许文丽,林金龙,等. 可见/近红外漫透射光谱结合 CARS 变量优选预测脐橙可溶性固形物[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(12):3229 - 3233.
SUN Tong, XU Wenli, LIN Jinlong, et al. Determination of solube solids content in navel orange by vis/NIR diffuse transmission spectra combined with CARS method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3229 - 3233. (in Chinese)
[10] 徐惠荣,李青青. 皇冠梨糖度可见/近红外光谱在线检测模型传递研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):312 - 317.
XU Huirong, LI Qingqing. Calibration model transfer between visible/NIR spectrometers in sugar content on-line detection of crown pears[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 312 - 317. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170939&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.039. (in Chinese)
[11] LI X, WEI Y, XU J, et al. SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 143(4): 112 - 118.
[12] PARPINELLO G P, NUNZIATINI G, ROMBOL A D, et al. Relationship between sensory and NIR spectroscopy in consumer preference of table grape (cv Italia)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 83(3): 47 - 53.
[13] BAIANO A, TERRACONE C, PERI G, et al. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87: 142 - 151.
[14] 王文秀,彭彦昆,郑晓春,等. 便携式猪肉营养组分无损实时检测装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):303 - 311.
WANG Wenxiu, PENG Yankun, ZHENG Xiaochun, et al. Portable nondestructive detection device for nutrient components of pork[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 303 - 311. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170938&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.038. (in Chinese)
[15] 孙宏伟,彭彦昆,林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. 农业工程学报,2015,31(20):268 - 273.
SUN Hongwei, PENG Yankun, LIN Wan. Development of a portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of fresh pork[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 268 - 273. (in Chinese)
[16] 王凡,李永玉,彭彦昆,等. 便携式番茄多品质参数可见/近红外检测装置研发[J]. 农业工程学报,2017,33(19):295 - 300.
WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun. Development of portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of tomato by visible and near-infrared[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 295 - 300. (in Chinese)
[17] 王凡,李永玉,彭彦昆,等. 便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):348 - 354.
WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Hand-held device for non-destructive detection of potato quality parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 348 - 354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180742&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.042. (in Chinese)
[18] 刘亚超,李永玉,彭彦昆,等. 便携式大米多品质参数无损检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):351 - 357.
LIU Yachao, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Portable rapid nondestructive detecting instrument for multi-quality parameters of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 351 - 357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20190838&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.038. (in Chinese)
[19] 杨彪,杜荣宇,杨玉,等. 便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):180 - 186.
YANG Biao, DU Rongyu, YANG Yu, et al. Design of portable nondestructive detector for chlorophyll content of plant leaves[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 180 - 186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20191220&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.020. (in Chinese)

[20] 王转卫. 基于介电频谱与光谱技术的水果内部品质无损检测方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
[21] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法: NY/T 2637—2014[S]. 北京: 中国标准出版社,2014.
[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 食品中总酸的测定: GB/T 12456—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2017.
[24] ELMASRY G,WANG M,ELSAYED A,et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. Journal of Food Engineering,2007,81(1):98 – 107.
[25] LI Jiangbo,HUANG Wenqian,ZHAO Chunjiang,et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/Nir spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering,2013,116(2):324 – 332.
[26] 李江波,彭彦昆,陈立平,等. 近红外高光谱图像结合 CARS 算法对鸭梨 SSC 含量定量测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2014,34(5):1264 – 1269.
LI Jiangbo, PENG Yankun, CHEN Liping, et al. Near-infrared hyperspectral imaging combined with CARS algorithm to quantitatively determine soluble solids content in "Ya" pear[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2014,34(5):1264 – 1269. (in Chinese)
[27] YE S F, WANG D, MIN S G. Successive projections algorithm combined with uninformative variable elimination for spectral variable selection[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2008,91(2):194 – 199.
[28] 刘燕德,肖怀春,孙旭东,等. 柑桔叶片黄龙病光谱特征选择及检测模型[J]. 农业工程学报,2018,34(3):180 – 187.
LIU Yande, XIAO Huaichun, SUN Xudong, et al. Spectral feature selection and discriminant model building for citrus leaf Huanglongbing[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):180 – 187. (in Chinese)

(上接第 282 页)

[21] 范雪梅, 戴廷波, 姜东, 等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 63 – 67.
FAN Xuemei, DAI Tingbo, JIANG Dong, et al. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and water logging from anthesis to maturity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 63 – 67. (in Chinese)
[22] 王朝辉,王兵,李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(8): 1339 – 1343.
WANG Zhaohui,WANG Bing,LI Shengxiu. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1339 – 1343. (in Chinese)
[23] LI F S,KANG S Z,ZHANG J H, et al. Effects of atmospheric CO_2 enrichment, water status and applied nitrogen on water and nitrogen-use efficiencies of wheat [J]. Plant and Soil, 2003, 254(2): 279 – 289.
[24] ZHU X K, GUO W S, FENG C N, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different enduses [J]. Plant Nutrition & Fertilizing Science, 2005, 11(2): 148 – 154.
[25] SCHENK M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. Plant and Soil, 1996, 181(1): 131 – 137.
[26] 侯有良, O'BRIEN L, 钟改荣. 小麦不同器官氮素累积分布动态规律的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 493 – 499.
HOU Youliang, O'BRIEN L, ZHONG Gairong. Study on the dynamic changes of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(4): 493 – 499. (in Chinese)

(上接第 293 页)

[40] 梁建财, 史海滨, 李瑞平,等. 覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4):98 – 105.
LIANG Jiancai, SHI Haibin, LI Ruiping,et al. Effect of mulching on salinized soil freezing and thawing characteristics and autumn irrigation quality[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):98 – 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.015. (in Chinese)
[41] 蔡太义, 张合兵, 黄会娟,等. 不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2128 – 2135.
CAI Taiyi, ZHANG Hebing, HUANG Huijuan, et al. Effects of cropping systems using straw mulching on photosynthetic physiology of spring maize during different rates[J]. Journal of Agro-Environment Science,2012, 31(11):2128 – 2135. (in Chinese)
[42] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. 生态学报,2015, 35(8):2676 – 2685.
YANG Changgang, CHAI Shouxi, CHANG Lei. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(8):2676 – 2685. (in Chinese)