DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.12.011

基于光谱技术与光学仿真的柚果在线检测托盘设计与试验

Design and experiment of online detection pallets for pomelo fruit based on spectral technique and optical simulation

孙潇鹏[1,2] 徐 赛[2,3] 陆华忠[1,3]

SUN Xiao-peng[1,2] *XU Sai*[2,3] *LU Hua-zhong*[1,3]

(1. 华南农业大学工程学院,广东 广州 510642;2. 广东省农业科学院农产品公共监测中心,广东 广州 510642;3. 广东省农业科学院,广东 广州 510642)

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong* 510642, *China*;
2. *Agricultural Products Public Monitoring Center of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong* 510642, *China*;
3. *Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong* 510642, *China*)

摘要:采用 Trace pro 软件对柚果及配套传送托盘模型进行光学仿真分析,设计一款适用于柚果在线检测的传送托盘。通过结构优化和材料替换等方法,对仿真结果中辉度/照度值较高的托盘模型,进行实物加工。柚果置于不同类托盘上,自主搭建光谱平台分别采集柚果漫透射光谱进行试验对比。以试验结果最优的托盘配合柚果进行光谱采集,光谱经预处理,连续投影算法提取光谱特征波段,建立柚果可溶性固形物含量的偏最小二乘回归法的预测模型,最佳预测决定系数为 0.957;预测均方根误差为 0.271 °Brix。结果表明,模型的预测能力好、预测精度高,传送托盘设计合理。

关键词:可见/近红外光谱;光学仿真;在线检测;可溶性固形物含量;传送托盘

Abstract: Combined with optical simulation analysis of Trace pro software, a delivery tray suitable for online detection of pomelo fruit is designed. Through the method of structure optimization and material replacement, the tray model with high irradiance/illumination value in the simulation results was processed in kind pomelo fruit was placed on a tray, and the diffuse transmission spectra of pomelo fruit were collected and compared on an independent spectral platform. The optimal tray with test results and pomelo fruit were used for spectral collection. After the spectral data pretreatment, the spectral characteristic points were extracted by continuous projection algorithm (SPA), and the prediction model of PLSR was established for the soluble solid content (SSC) of pomelo fruit. The optimal prediction determination coefficient R_{pre}^2 was 0.957. The root means square error (RMSEP) was 0.271 °Brix. The results show that the prediction ability and accuracy of the model are better, and the design of the transfer tray is reasonable.

Keywords: VIS/NIR spectroscopy; optical simulation; online detection; delivery tray; soluble solid content

可见/近红外光谱检测技术作为一种无损、快速的检测方法,近年来在农产品品质检测中得到了广泛应用[1-3]。然而,对于柚果等大型厚皮类水果而言,由于体积大,皮厚,光谱透射难[4-6],在线检测难度大,内部品质检测准确率低[7-9],其品质仍靠人工鉴别,正确分辨率不高。目前,国内外厚皮类水果内部品质检测的研究,水果的光谱在线检测,通常采用动态传输以保证检测效率,但易造成机械损伤,通过托盘传送有益于水果在相对稳定的检测环境下完成光谱在线检测。李雄等[10]在可见/近红外漫透射在线检测装置中为柚果提供果杯进行在线检测。郭志明等[11]在透射光谱在线检测系统中为苹果提供

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31901404);广东省农业科学院院新兴学科团队建设项目(编号:201802XX);广东省重点领域研发计划项目(编号:2018B020240001);广州市科创委项目(编号:201904010199);广东省农业科学院院长基金面上项目(编号:201920)

作者简介:孙潇鹏,男,华南农业大学在读博士研究生。

通信作者:徐赛(1991—),男,广东省农业科学院助理研究员,博士。E-mail:294504658@qq.com

收稿日期:2019-09-27

果托进行在线检测。但对柚果的果杯或果托,并未进行参数设计、仿真分析等深入研究,则无法判断果杯或果托是否符合柚果的光谱在线检测。笔者前期试验发现,大型厚皮水果的透射光谱信息较弱,托盘的设计参数会对柚果透射光谱信息采集造成影响。

为提高柚果在线检测输送的稳定性,并减少托盘对光谱信息采集的干扰,试验拟以柚果为研究对象,从柚果的形态特征入手,通过光学仿真和光谱采集试验相结合的方法,优化设计柚果传送托盘,并对该托盘进行柚果漫透射光谱采集,光谱特征选取,建立柚果可溶性固形物含量的偏最小二乘法回归预测模型[12],以期为厚皮类水果内部品质在线检测提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

从梅州市柚果果园取果后,立即运回广东省农业科学院农产品公共监测中心开展试验。去除有外表损伤、有伤疤或不规则的样品后,采用湿毛巾将柚果擦净、自然晾干,并于室温(19～21 ℃)下存 24 h。剩余 120 个柚果的外形参数如表 1 所示。

表 1　120 个柚果的形态特征†

Table 1　Morphological characteristics of 120 pomelo fruits

项目	质量/g	体积/mL	横径/mm	纵径/mm	夹角/(°)
最大值	1 704.06	2 430.00	164.71	207.30	21.50
最小值	882.10	1 500.00	130.17	138.35	7.00
平均值	1 157.40	1 904.50	143.65	172.16	17.00
标准差	156.67	204.35	7.52	14.48	4.44

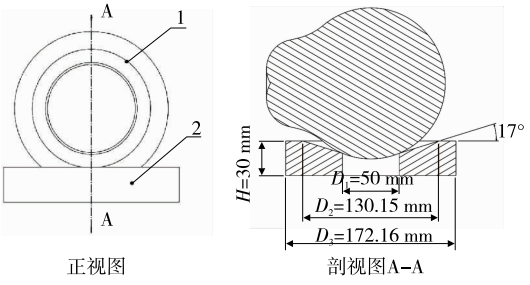
† 夹角:如图 1 所示,柚果在该姿态下,弧面外切线与水平面的夹角。

1.2　传送托盘的设计

以柚果的外形参数为基础,经计算,如图 1 所示,D_1(内径)设置为 50 mm;D_2 设置为柚果的横径最小值,即 130.15 mm;D_3 设置为柚果的纵径平均值,即 172.16 mm。H 为托盘厚度,即 30 mm。倒角为柚果与水平面夹角均值,即 17°。托盘的初始材料为橡胶。

1.3　托盘应用光谱平台与试验仪器

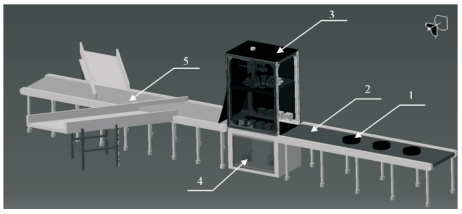
1.3.1　托盘应用光谱平台　根据试验要求,自主搭建光谱试验平台(见图 2),由计算机、光谱试验箱体、光谱仪、光纤、光源和积分球等组成,光源使用 100 W 石英卤素灯(12 组),光源入射角为 45°。柚果置于传送托盘上,通过皮带传送装置传送至光谱采集装置,光谱采集装置采集光谱的原理,如图 3 所示。中控系统通过数据分析和模型预测,将柚果及传送托盘传输至品质分级装置进行柚果分级。



1. 柚果模型　2. 传送托盘

图 1　传送托盘的设计

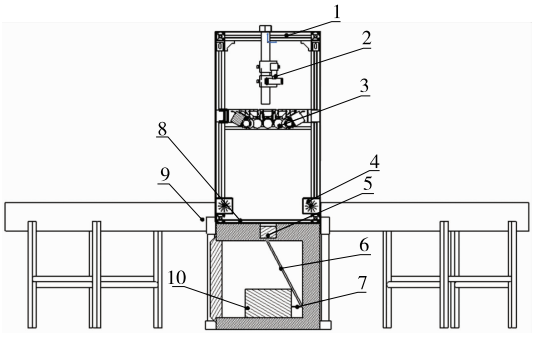
Figure 1　Design of transfer tray



1. 传送托盘　2. 皮带传动装置　3. 光谱采集装置(包括:箱体、光谱仪、光源、光纤和积分球等)　4. 中控系统(计算机等)　5. 品质分级装置

图 2　不同检测环境下的光谱平台

Figure 2　Spectrum platforms in different detection environments



1. 箱体　2. 机器视觉装置　3. 光源　4. 风扇　5. 积分球　6. 光纤　7. 光谱仪　8. 皮带传送装置　9. 品质分级装置　10. 计算机

图 3　光谱采集装置的原理示意图

Figure 3　Schematic diagram of spectral acquisition device

1.3.2　试验仪器

光谱仪:QE-Pro 型(测量波长 400～1 100 nm)和 NIR-QUEST 型(测量波长 900～1 700 nm),美国海洋光学公司;

糖度仪:PAL-Grape Must(Brix)型, ATAGO(爱拓)中国分公司;

天平:HTP312 型,上海花潮电器有限公司;

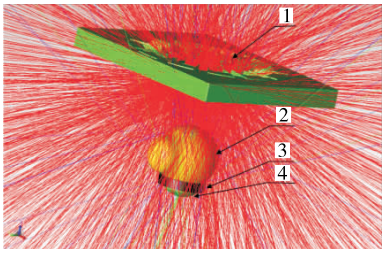
游标卡尺:精度 0.01 mm,上海申韩量具有限公司;

万能角度尺:测量角度 0～320°,上海恒量量具有限

公司。

1.4 传送托盘的光学仿真

托盘完成初步设计后，建立传送托盘三维仿真模型，进行参数优化。通过 Trace pro 软件模拟光谱检测环境进行仿真分析，然后对仿真结果进行试验验证。如图 4 所示，建立仿真模型。柚果材质设置为植物纤维，托盘材质设置为橡胶。对照明装置进行光源等参数设置。根据积分球的工作原理，模型采用更为简易的聚光镜[13]，目的在于将不同方向的光信号聚集增强。图 4 中红色线条为灯泡的光束照射路径，蓝色和绿色为受托盘影响的光束被反射和折射路径。通过分析所得辉度/照度图判定聚光镜接收到光强的最大值、平均值和最小值，如图 5 所示。



1. 光源　2. 柚果模型　3. 传送托盘　4. 聚光镜

图 4　光学仿真模型及效果

Figure 4　Optical simulation model and effect

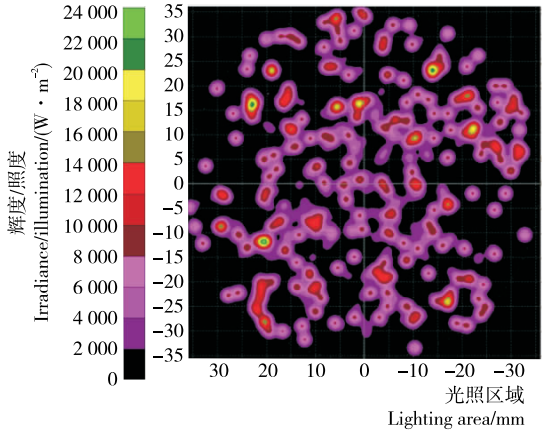


图 5　辉度/照度图

Figure 5　Irradiance/illumination distribution

1.5 柚果传送托盘的光谱平台试验

启动光谱试验平台，预热 15 min 使设备达到稳定的工作状态，采用 Spectra Suite(Ocean Optics Ins.，USA)软件，设置积分时间、平均次数等，获取和存储光谱数据。将托盘置于光谱平台内，样本光谱采集前，需使用平台配套的白板与黑板，分别贴住积分球进行光谱仪校正。将柚果放置在托盘上，每采集一次旋转 90°，取 4 次光谱的平均值作为该样本的光谱数据。

基于柚果的漫透射光谱信息，作为柚果内部品质的研究参数[14]。在光谱平台内，配套以试验结果最优的传送托盘，采集 120 个柚果样本在 400～1 700 nm 波长下的漫透射光谱数据，如图 6 所示。按式(1)计算柚果样本的透射率。

$$T = \frac{I_s - I_b}{I_w - I_b} \times 100\% \ , \tag{1}$$

式中：

T——采集样本的透射率，%；

I_s——采集样本的光谱强度，cd；

I_w——放置白板的光谱强度，cd；

I_b——放置黑板的光谱强度，cd。

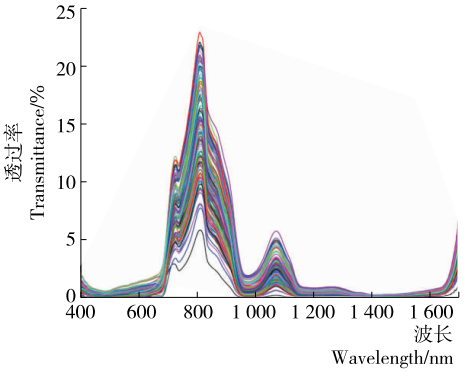


图 6　120 个柚果的可见/近红外漫透射原始谱图

Figure 6　The original spectrum of visible/near-infrared diffuse transmission of 120 pomelo fruits

原始光谱需进行光谱预处理，削弱各种无关信息与背景噪声对目标光谱的影响，以达到提高光谱分辨率，提高模型稳健性等目的。选取图 6 中 650～1 350 nm 波长范围的光谱数据进行预处理。光谱预处理有卷积平滑法、导数光谱法和多元散射校验法等。卷积平滑法可降低光谱采集过程中随机白噪声的干扰；在消除光谱基线漂移方面，导数光谱法可有效地消除基线和其他背景的干扰；多元散射校验法(MSC)和标准正态变换法(SNV)可消除因样品的不均匀性产生散射引起的光谱差异。

1.6 标准理化值测定

采用糖度仪测量样本的可溶性固形物含量，从样本的检测点提取部分果肉，挤出果汁，用胶头滴管将果汁滴于糖度仪检测镜面，读取并记录数值，每个样本测量 3 次后取平均值，结果如表 2 所示。

1.7 预测模型评价

预测模型评价是验证模型预测值的精度和可信度，判断模型的优劣以及是否发生过拟合，所建立的模型必须经过验证后才具有意义。常用的模型评价指标：校正均方根误差(RMSEC)、决定系数(R^2)和预测均方根误差(RMSEP)等。其中 R^2 值越接近 1，模型的回归或预测结果越好；RMSEP 越小，表明模型的预测能力越强。

表 2　柚果的可溶性固形物含量统计

Table 2　Statistics of pomelo'ssoluble solids content

样本组	数量	可溶性固形物含量/°Brix			
		最小值	最大值	平均值	标准差
校正集	80	6.43	13.57	10.51	1.506
预测集	40	6.44	13.60	10.49	1.519

2　结果与讨论

2.1　传送托盘的参数优化与光谱试验

为验证托盘参数优化的合理性,设置不同尺寸参数的托盘进行光学仿真对比分析,如表 3～5 所示。由表 3 可知,随着内径的增加,辉度/照度均值(AVE)随之增加,当内径为 80 mm 时,辉度/照度均值达到最大。如继续增大内径尺寸,托盘会发生内部结构失效,导致光谱透过率过高、数据失真等问题。由表 4 可知,当内径为 80 mm 时,改变厚度,辉度/照度值随之改变,但辉度/照度值变化规律不明显。由表 5 可知,内径 80 mm,厚度 20 mm,外径 100 mm 的传送托盘,辉度/照度的 MAX 和 AVE 值均最大。对参数优化前后的托盘进行实物加工,如图 7 所示。

表 3　托盘内径与辉度/照度值的关系

Table 3　Relation between inner diameter of tray and Irradiance/illumination value

内径/mm	外径/mm	厚度/mm	最小值/(W·m^{-2})	最大值/(W·m^{-2})	平均值/(W·m^{-2})
50	130	20	4.261 5E−008	21 466	2 583.9
60	130	20	2.623 4E−007	24 534	2 536.9
70	130	20	4.436 9E−007	25 987	2 538.4
80	130	20	7.497 5E−007	23 515	2 958.9

表 4　托盘厚度与辉度/照度值的关系

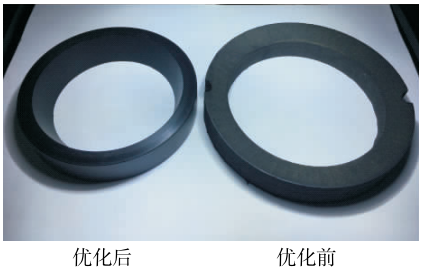
Table 4　Relation between thickness of tray and Irradiance/illumination value

厚度/mm	外径/mm	内径/mm	最小值/(W·m^{-2})	最大值/(W·m^{-2})	平均值/(W·m^{-2})
12	130	80	2.202 9E−007	23 043	3 050.8
14	130	80	3.053 2E−007	20 648	2 828.6
16	130	80	9.016 9E−007	20 375	2 793.1
18	130	80	2.194 3E−007	19 693	2 579.6
20	130	80	7.497 5E−008	23 515	2 958.9

表 5　托盘外径与辉度/照度值的关系

Table 5　Relation between external diameter of tray and Irradiance/illumination value

外径/mm	内径/mm	厚度/mm	最小值/(W·m^{-2})	最大值/(W·m^{-2})	平均值/(W·m^{-2})
100	80	20	4.399 2E−008	26 935	4 519.7
110	80	20	3.377 7E−008	26 466	4 509.4
120	80	20	1.354 7E−008	25 953	4 491.9
130	80	20	1.306 6E−008	25 578	4 357.2



优化后　　优化前

图 7　参数优化前后的柚果托盘对比图

Figure 7　Comparison of pomelo fruit tray before and after parameter optimization

2.2　传送托盘的材料替换与光谱试验

由于采用橡胶的传送托盘,采集漫透射光谱数据不理想,则对传送托盘进行材料替换仿真分析,仿真结果如表 6 所示。由表 6 可知,托盘采用聚甲基丙烯酸甲酯和聚丙烯酸酯相较于原始材料橡胶,辉度/照度的 MAX 和 AVE 值均有提升,聚甲醛树脂的仿真效果最好。

对参数优化后,4 种材料的传送托盘进行加工,在传送托盘上放置柚果,分别进行光谱采集试验,如图 8 所示,采用聚甲醛树脂的托盘,在 400～850 nm 的可见光波段,柚果光谱的透过率最高。在近红外波段,采用聚甲基

表 6　托盘材料与辉度/照度值的关系

Table 6　Relation between material type of tray and Irradiance/illumination value

材料类型	外径/mm	厚度/mm	最小值/(W·m^{-2})	最大值/(W·m^{-2})	平均值/(W·m^{-2})
聚甲基丙烯酸甲酯	100	20	8.551 8E−007	27 131	4 521.4
橡胶	100	20	4.399 2E−008	26 935	4 519.7
聚甲醛树脂	100	20	2.084 5E−007	27 893	4 657.5
聚丙烯酸酯	100	20	1.750 9E−007	27 419	4 567.3
丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物	100	20	3.257 4E−007	24 798	4 143.9

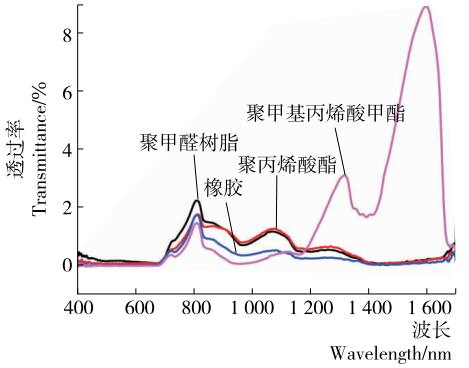


图 8　采用不同材料托盘的柚果漫透射光谱对比图

Figure 8　Comparison of pomelo diffuse transmission spectra with trays of different materials

丙烯酸甲酯的托盘，柚果光谱的透过率最高，但聚甲基丙烯酸甲酯属于透光材料，即使采用黑色，对光谱采集也存在一定的影响，最终得到托盘和柚果夹杂在一起光谱，故不可采用。

综上所述，当传送托盘尺寸参数设置为：外径 100 mm，内径 80 mm，厚度 20 mm 时，选择聚甲醛树脂，即为试验所需的最优方案。

2.3　建模结果与分析

2.3.1　柚果可溶性固形物含量预测模型　光谱预处理后，采用偏最小二乘回归法(PLSR)建立回归模型，预测结果如表 7 所示。由表 7 可知，采用 3 点卷积平滑(SG-smooth)处理原始漫透射光谱，再经一阶微分(1 Derivative)预处理后，建立回归模型[15]，模型的预测效果最优，RMSEP 为 0.512 °Brix，R_{pre}^2 为 0.851。

表 7　不同预处理条件的偏最小二乘回归模型

Table 7　Partial least squares regression model with different pretreatment conditions

预处理	校验		预测	
	R_{cal}^2	RMSEC	R_{pre}^2	RMSEP
卷积平滑	0.482	0.930	0.411	0.996
标准正态变换	0.717	0.695	0.658	0.763
多元散射校正	0.714	0.692	0.670	0.743
卷积平滑+1 阶导数	0.917	0.376	0.851	0.512

2.3.2　特征波长选取与预测模型优化　对预处理后的 650～1 350 nm 光谱数据，运用连续投影法(SPA)提取的特征波段[16]，如图 9 所示。共计 18 个波长变量，即：650，705，766，782，807，841，887，961，1 056，1 100，1 122，1 165，1 244，1 278，1 316，1 335 和 1 345。

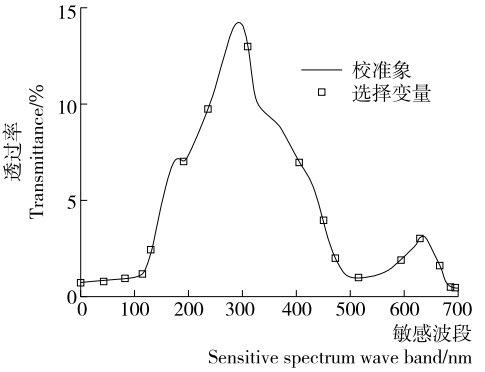
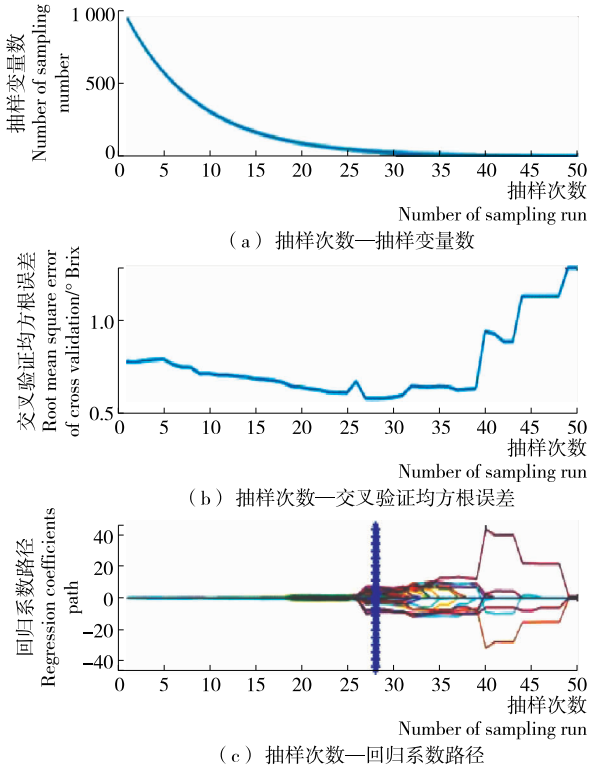


图 9　SPA 特征变量选取

Figure 9　Characteristic variables selected by successive projections algorithm

稳定性竞争自适应重加权采样(SCARS)算法可对无信息变量进行有效去除和共线性变量进行有效压缩，达到提高模型稳健性的目标[17]。SCARS 算法中，设置采样次数为 1 000，交互验证主成分因子为 3，采样率为 0.8。对波长变量选择时，根据文献[18]将 N(蒙特卡罗模拟数值)，Nmcs(蒙特卡罗抽样次数)及采样率分别设置 500，50，0.7。

图 10(a)是 SCARS 算法选取的波长变量随抽样次数的变化趋势图。随着抽样次数的增加，波长变量由快到慢呈递减趋势。由图 10(b)可知，随着抽样次数的增加，交叉验证均方根误差(RMSECV)值减少，是因为“欠拟合”现象发生，已剔除受仪器影响且较敏感的波长变量；当交叉验证均方根误差值达到最小，之后又呈递增趋势，是因为“过拟合”现象发生，已剔除最优子集中，部分受不同仪器影响且不敏感的波长变量。“过拟合”与“欠拟合”的连接处，即为最优变量子集。图 10(c)为波长变量稳定度轨迹图，即变量的稳定度随抽样次数的变化趋势，得到 RMSECV 的最优变量子集，由绿色星柱标出。最优变量



（a）抽样次数—抽样变量数

（b）抽样次数—交叉验证均方根误差

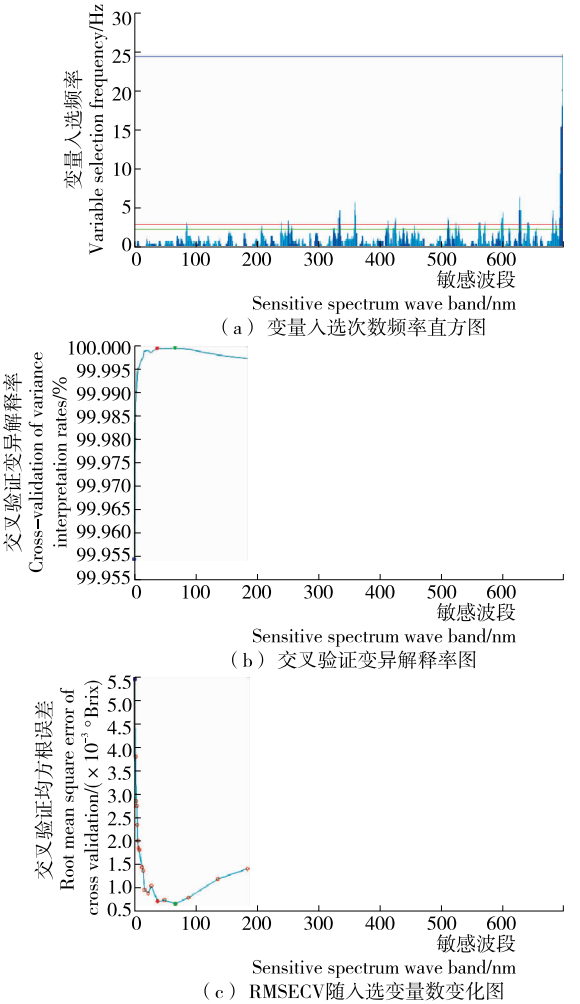
（c）抽样次数—回归系数路径

图 10　SCARS 算法选择特征变量

Figure 10　Characteristic variables selected by SCARS

子集为第 27 个变量子集，最优变量子集中包括 36 个波长变量，即：880，891，892，917，919，960，961，962，963，978，979，980，1 028，1 041，1 047，1 066，1 069，1 113，1 117，1 118，1 119，1 134，1 161，1 162，1 163，1 164，1 199，1 201，1 202，1 203，1 210，1 219，1 220，1 221，1 222 和 1 306。

遗传(GA)算法中，群体数目为 30，交叉概率为 50%，变异概率为 1%，迭代次数为 100，对预处理后的 650～1 350 nm 光谱数据进行变量优选[19]。如图 11(a)所示，为变量入选次数频率直方图，其中绿线表示全局最小 RMSECV 的变量数位置，红线表示与全局最小 RMSECV 统计不显著的最小变量数位置。图 11(b)为交叉验证变异解释率，随着入选变量数增加，值逐渐增大，最终达到峰值，维持在相对平稳的阶段，或者略微下降。红绿点的意义同图 11(a)红绿线。图 11(c)为 RMSECV 随入选变量数变化图，GA遗传算法最终优选出共计38个波长变



（a）变量入选次数频率直方图

（b）交叉验证变异解释率图

（c）RMSECV随入选变量数变化图

图 11　GA 算法选择特征变量

Figure 11　Characteristic variables selected by GA

量，即 734，889，900，982，983，984，1 008，1 009，1 011，1 062，1 073，1 074，1 075，1 160，1 161，1 173，1 211，1 212，1 220，1 247，1 248，1 249，1 276，1 277，1 278，1 290，1 291，1 330，1 331，1 332，1 336，1 342，1 343，1 344，1 345，1 346，1 347 和 1 348，交叉验证变异解释率为 99.999 2，即图中红点位置。

建立 SPA-PLSR、SCARS-PLRS、GA-PLSR 和 PLSR 模型，并用 40 个预测样品对模型进行预测，结果如表 8 所示。由表 8 可知，SPA-PLSR、SCARS-PLRS 和 GA-PLSR 相较于PLSR，预测精度均有较大提升。GA-PLSR

表 8　不同模型的预测结果

Table 8　The prediction results by different models

预处理	变量	方法	校验		预测	
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{pre}^2	RMSEP
平滑＋1 阶导数	18	SPA-PLSR	0.934	0.382	0.905	0.402
平滑＋1 阶导数	36	SCARS-PLSR	0.936	0.329	0.913	0.341
平滑＋1 阶导数	38	GA-PLSR	0.976	0.189	0.957	0.271
平滑＋1 阶导数	700	PLSR	0.917	0.376	0.851	0.512

模型的 $R_{pre}^2=0.957$；RMSEP＝0.271 °Brix，预测精度最佳。

3 结论

从柚果的形态特征入手，通过 Trace pro 光学仿真和光谱采集验证，设计柚果传送托盘。为降低传送托盘对光谱试验的影响，对传送托盘进行参数优化，分别从外径、内径和厚度尺寸进行对比试验。为提高柚果光谱透过率，对传送托盘进行结构优化和材料替换，进行对比试验，验证该方法的可行性。传送托盘的最终设计参数为：外径 100 mm、内径 80 mm、内部夹角 17°、聚甲醛树脂且厚度 20 mm，采用该托盘在可见/近红外光谱平台，采集 120 颗柚果在 400～1 700 nm 波长范围内的柚果漫透射光谱数据。采用卷积平滑、标准正态变换和多元散射校正等方法对光谱进行预处理，选用 SPA、SCARS 和 GA 进行光谱特征选取，建立柚果可溶性固形物含量预测模型。结果显示，经卷积平滑和一阶导数预处理，建立 GA-PLRS 预测模型，决定系数为 0.957；预测均方根误差为 0.271 °Brix，预测精度最佳。该托盘运用于柚果在线检测，可实现批量柚果在品质流水线的快速无损检测，预测准确性和稳定性更好。

参考文献

[1] 田海清，应义斌，徐惠荣，等. 西瓜可溶性固形物含量近红外透射检测技术[J]. 农业机械学报，2007，38(5)：111-113.

[2] 韩东海，刘新鑫，鲁超. 苹果内部褐变的光学无损伤检测研究[J]. 农业机械学报，2006，37(6)：86-88.

[3] GOLIC M，WALSH K B. Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stonefruit for total soluble solids content[J]. Analytica Chimica Acta，2006，555(2)：286-291.

[4] FAN Shu-xiang，GUO Zhi-ming，ZHANG Bao-hua，et al. Using Vis/NIR diffuse transmittance spectroscopy and multivariate analysis to predicate soluble solids content of apple[J]. Food Analytical Methods，2016，9(5)：1 333-1 343.

[5] ITO H，FUKINO-ITO N，HORIE H，et al. Non-destructive detection of physiological disorders in melons using near infrared (NIR) spectroscopy[J]. Acta Horticulturae，2004(654)：229-234.

[6] GUTHRIE J A，LIEBENBERG C J，WALSH K B. NIR model development and robustness in prediction of melon fruit total soluble solids[J]. Australian Journal of Agricultural Research，2006，57：1-8.

[7] MARUO T，ITO T，TERASHIMA A，et al. Nondestructive evaluation of ripeness and soluble solids content in melon and watermelon fruits using laser[J]. Acta Horticulturae，2002(588)：373-377.

[8] 田海清，王春光，张海军，等. 蜜瓜品质光谱检测中异常建模样品的综合评判[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(11)：2 987-2 991.

[9] MAGWAZA L S，OPARA U L. Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products：A review[J]. Scientia Horticulturae，2015，184：179-192.

[10] 李雄，刘燕德，欧阳爱国，等. 基于近红外的柚子品种判别和糖度检测通用模型[J]. 发光学报，2019，40(6)：808-814.

[11] 郭志明，黄文倩，陈全胜，等. 苹果腐心病的透射光谱在线检测系统设计及试验[J]. 农业工程学报，2016，32(6)：283-288.

[12] QIAN Man，HUANG Wen-qian，WANG Qing-yan，et al. Assessment of influence detective position variability on precision of near infrared models for soluble solid content of watermelon[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis，2016(6)：1 700-1 705.

[13] IVAN M，MAXIMINO A A，TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Appl Opt，2006，45(10)：2 265-2 272.

[14] ZHU Nan-nan，SUN Zhi-rong，QU Ji-xu，et al. Analysis and identification of integral structure of *Dendrobium officinale kimura* et migo，*Dendrobium nobile* lindl. and *Dendrobium chrysotoxum* lindl. and their extracts by infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2018，38(1)：308-313.

[15] 刘燕德，朱丹宁，吴明明，等. 玉露香梨可溶性固形物近红外漫透射光谱在线检测[J]. 食品与机械，2016，32(10)：115-119，163.

[16] WU Di，SHI Hui，WANG Song-jing，et al. Rapid prediction of moisture content of dehydrated prawns using online hyperspectral imaging system[J]. Analytica Chimica Acta，2012，726(9)：57-66.

[17] 刘国海，夏荣盛，江辉，等. 一种基于 SCARS 策略的近红外特征波长选择方法及其应用[J]. 光谱学与光谱分析，2014，34(8)：2 094-2 097.

[18] ZHENG Kai-yi，LI Qing-qing，WANG Jia-jun，et al. Stability competitive adaptive reweighted sampling (SCARS) and its applications to multivariate calibration of NIR spectra[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems，2012，112(6)：48-54.

[19] SUN Qian，WANG Jia-hua，HAN Dong-hai. Improving the prediction model of protein in milk powder using GA-PLS combined with PC-ANN arithmetic[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2009，29(7)：1 818-1 821.