

光照区域对近红外光谱在线检测柚子糖度的影响

Research on influence of light region on near infrared spectroscopy for online detection of sugar content of grapefruit

唐子叶 文韬 代兴勇 胡峰

TANG Ziyue WEN Tao DAI Xingyong HU Feng

(中南林业科技大学机电工程学院, 湖南长沙 410004)

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要: [目的] 提高近红外光谱技术在线检测柚子糖度的精度。 [方法] 采用自主研发的柚子在线无损检测设备采集 3 种光照区域的柚子的漫透射光谱数据, 在 650 ~ 950 nm 的波长范围内采用标准正交变量变换 (SNV)、多元散射校正 (MSC)、归一化 (normalize)、SG 一阶求导 (savitzky-golay first order derivative, SG-1st) 对原始数据进行预处理, 使用自适应性加权算法 (CARS) 筛选反映柚子糖度的光谱特征, 建立了偏最小二乘回归 (PLSR) 模型。使用未参与建模的 30 个柚子样本进行在线验证。 [结果] 光照区域 C 结合 SNV-CARS-PLSR 方法的建模效果最优。其预测集的决定系数为 0.95, 均方根误差为 0.30 °Brix。在线验证时决定系数为 0.90, 均方根误差为 0.58 °Brix。模型对于柚子糖度具有较强的在线检测能力。 [结论] 在光斑直径为 70 mm 且位于柚子赤道上方 20 mm 的光照区域 C 的条件下采集的柚子光谱数据所建立的预测模型能更有效地实现柚子糖度的在线预测。

关键词: 近红外光谱; 光照区域; 在线检测; 糖度; 柚子

Abstract: [Objective] To improve the accuracy of online measurement of sugar content of grapefruit by near infrared spectroscopy. [Methods] The pomelo online non-destructive testing equipment developed by ourselves was used to collect diffuse transmission spectrum data of pomelo in three light regions. In the wavelength range of 650 ~ 950 nm, orthonormal variable transformation (SNV), multiple scattering correction (MSC), Normalize, Savitzky-Golay first order derivative, SG-1st preprocessed the original data, used the adaptive weighting

基金项目: 湖南自然科学基金杰出青年基金项目 (编号: 2023JJ10099)

作者简介: 唐子叶, 男, 中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 文韬 (1983—), 男, 中南林业科技大学教授, 博士。

E-mail: twen@csuft.edu.cn

收稿日期: 2023-07-19 **改回日期:** 2024-03-08

algorithm (CARS) to screen the spectral characteristics of the grapefruit sugar content, and established a partial least squares regression (PLSR) model. 30 grapefruit samples that were not involved in the modeling were used for online verification. [Results] The modeling effect of light region C combined with SNV-CARS-PLSR method was the best. The coefficient of determination of the prediction set was 0.95 and the root-mean-square error was 0.30 °Brix. In online verification, the coefficient of determination was 0.90 and the root mean square error was 0.58 °Brix. The model had a strong ability to detect the sugar content of grapefruit on line. [Conclusion] The prediction model based on the spectral data collected under the condition that the light spot diameter is 70 mm and the light region C is 20 mm above the equator of the grapefruit can realize the online prediction of the sugar content of the grapefruit more effectively. **Keywords:** near infrared spectroscopy; light region; online detection; sugar content; grapefruit

近红外光谱 (near infrared spectroscopy, NIR) 分析技术因为具有无损、快速、便捷、无污染等众多优点, 已被广泛应用于评估苹果^[1-3]、梨^[4-5]、柑橘^[6-9]等水果的内部品质。尽管自 20 世纪末起, 近红外光谱作为一门分析技术已被应用于农产品业, 但使用近红外光谱技术高精度地检测农产品的内部品质仍然很困难, 这是由于缺乏考虑各类影响因素的稳健模型^[10]。

国内外学者对近红外光谱技术检测水果内部品质的影响因素做了很多研究: 姜小刚等^[11]研究了不同参数条件对近红外光谱预测苹果糖度模型的影响, 优化了动态在线装置的参数, 简化了模型, 提高了模型的稳定性。Qi 等^[12]使用手持式近红外检测设备, 研究了不同取样成分对近红外光谱测定富士苹果糖度的影响, 当模型使用来自外部果肉的糖度值时结果较好, 建议在采样时考虑水

果的光接收区域部分的样本。李雄等^[13]采集不同产地柚子的漫透射光谱数据,建立了3种产地柚子的定性判别模型与通用的糖度预测模型。Tian等^[14]为了描述柚子内的光穿透和分布,使用穿刺光纤的原始系统进行了3种不同的穿刺测量,利用偏最小二乘回归(PLSR)的交叉验证,评价了不对称光和糖度(SSC)分布的影响,通过消除光分布差异,平均光谱检测的模型获得了良好的性能。Jie等^[15]使用10个150W的卤钨灯作为光源,对在线采集到的西瓜的漫透射光谱数据进行了预测,相关系数为0.70。以上学者研究了在线采集速度、积分时间、取样位置等因素的影响,但未涉及到对光照区域的研究。目前对西瓜^[16-17]、柚子^[18-19]这类大体积的水果进行近红外在线预测糖度的设备中,为了能够使光线穿透水果并携带出更多的有效信息,需使用多个光源同时进行照射。当光源照射样本的不同区域时,会发生不同程度的散射和吸收,对携带出来的样本内部信息产生影响,从而对检测结果产生一定的影响。

研究拟利用自主研发的柚子在线无损检测设备,分别在3种光照区域下采集其漫透射光谱数据,建立柚子糖度的在线检测模型,应用PLSR法建立不同光照区域下的柚子糖度预测模型,分析光照区域对柚子糖度预测的影响,以为提升柚子糖度预测精度提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验所用柚子样品购自湖南长沙红星大市场的“老树香柚”,人工挑选出120个大小和颜色相近、表面无明显缺陷的样品,将样品表面清洗擦拭干净,并于样本顶部编号,在25℃的室温下放置24h,使柚子温度与外界环境温度保持基本一致。柚子样品按照3:1的比例划分出校正集和预测集,其中90个样品作为校正集以建立预测模型,30个样品作为预测集以验证模型。

1.2 柚子在线无损检测设备与光谱采集

研究所采用的在线检测系统如图1所示,该装置由水果托盘、输送带、卤素灯、光谱仪以及运动控制系统组成。在托盘(直径200mm)中心有一个直径为50mm的孔,托盘被放置在传送带上。该系统所用的光谱仪为美国OceanInsight公司生产的Maya2000Pro光谱仪,其测量波长范围为200~1100nm,光谱分辨率为2.8nm。托盘上放置了黑色环形海绵垫,避免光线通过样品与托盘之间的接触面直接进入准直镜中,同时可以适应不同尺寸的柚子,输送带中间安装有准直镜与配套的SMA905光纤(美国OceanInsight公司)。采用以STM32为核心研发的控制板作为下位机,通过电脑控制下位机,进而控制变频器(中达电通股份有限公司,型号VFD-M,0.55kW)控制三相异步电动机(威海泰富西玛电机有限

公司,型号YXM71M3-4,0.55kW)带动输送带,进行托盘输送。采用对射式光电门(欧姆龙自动化(中国)有限公司,型号:E3Z-T61A)检测托盘的位置,利用编码器(欧姆龙自动化(中国)有限公司,型号:E6B2-CWZ6C,500P/R)测量皮带速度。当光电门检测到托盘时,单片机进行延时后,触发光谱仪进行光谱采集,以确保采集到样本中心部位的光谱数据。延时时间按式(1)计算。

$$T = \frac{L_1 + \frac{d}{2} - V \times \frac{t}{2}}{V} \quad (1)$$

式中:

- T——单片机的延时时间,s;
- L₁——光电门与准直镜的水平距离,cm;
- d——托盘直径,cm;
- V——通过编码器所测得的输送带速度,cm/s;
- t——光谱积分时间,s。

光源采用8个24V、150W的卤素灯,以空间对角型方式对称布置在待测样品两侧,为了充分利用卤素灯功率和提高透射光强,每个卤素灯前均装有透镜,通过更换不同焦距的透镜,使得其在柚子上呈现出小光斑(直径约40mm)和大光斑(直径约70mm)。为了使在一个光照区域范围内有足量的光线穿透样本,携带出更多的有效信息,试验将使用4盏卤素灯同时照射出一个光照区域,即输送带同侧的1、2、3、4号卤素灯的光斑重合为一个区域,对侧的5、6、7、8号卤素灯亦是如此。通过改变光斑的直径与在柚子上的分布位置,形成A、B、C共3种不同光照区域,其中区域A、B、C的光斑直径分别为40,70,

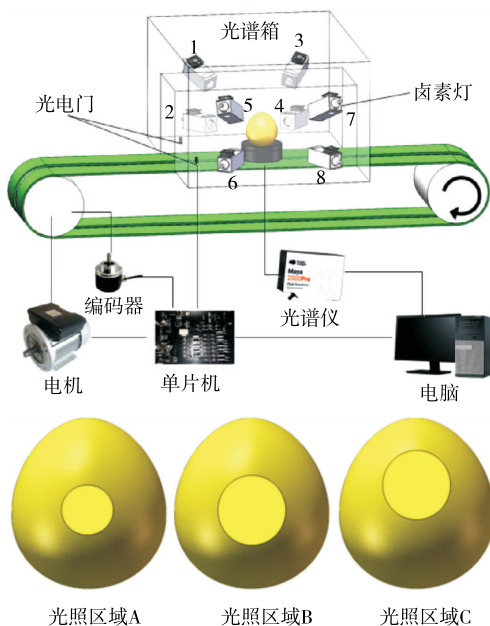


图1 近红外光谱系统

Figure 1 Near-infrared spectroscopy system

70 mm,在柚子上的位置分别为赤道部位、赤道部位、赤道往上 20 mm 处。

样本光谱采集前先将设备开机预热 30 min,待光源稳定后采集暗光谱与参比光谱,采用人工上果的方式,将柚子依次竖直放入托盘中,通过上位机软件控制电机转动带动托盘连续通过光谱箱,采集完一种区域下的柚子数据后,更换透镜,调整卤素灯的角度,切换为下一种光照区域模式,依次采集完 3 种光照区域下的样品光谱。光谱积分时间为 100 ms,平均采集次数为 1 次,滑动平均设置为 5,检测速度为 200 mm/s。每个柚子样本采集了 2 068 个波长的光谱,由于采集的光谱数据两端的信噪比较差,因此只保留 550~950 nm 波段上的 917 个波长的光谱数据。在 120 个柚子样本上共获取了 360 个光谱数据。研究中光谱数据采集采用 OceanView 软件实现,使用 Matlab2020a 和 Origin2021 软件分别进行数据处理与图形绘制。

由于存在光源强度分布不均匀、杂散光及系统电流等带来的噪声影响,每次采样需要利用参比光谱、暗光谱对采集的光谱进行校正,减小杂散光等因素的干扰影响,计算公式为:

$$T_{\lambda} = \frac{I_{\lambda} - R_d}{R_B - R_d} \tag{2}$$

式中:

I_{λ} ——样本光谱强度;

R_d ——暗光谱(暗环境下采集到的光谱作为暗光谱);

R_B ——参比光谱(从特氟龙材质的参比球上采集到的光谱);

T_{λ} ——样本的透射率光谱, %。

1.3 SSC 的测定

使用日本 ATAGO 公司的 PAL-1 型手持式糖度计对柚子的糖度进行测量。光谱数据采集完成后,先将柚子剥皮去籽,取其全部果肉,切成小块放入榨汁机中榨成汁,取 0.3 mL 左右果汁滴至 PAL-1 型数显手持式糖度计的测试窗口上测量其糖度(SSC)值,并读数记录,重复取样测量 3 次取其平均值作为柚子样品 SSC 的真实值。

1.4 光谱数据处理与分析

试验数据预处理与建模过程如图 2 所示。将 3 种不同光照区域下的原始光谱进行标准正交变量变换(standard normal variate, SNV)、多元散射校正(multiplicative scattering correction, MSC)、归一化(NOR)、SG 一阶求导(savitzky-golay first order derivative, SG-1st)等预处理,既能去除噪声又能增强其光谱特征;竞争性自适应权重取样(CARS)法能够从全光谱中提取出最具有代表性的特征波长,消除光谱数据的冗余信息,从而提高模型的预测精度;采用光谱-目标共生距离(sample set partitioning based on joint x-y distance, SPXY)算法按照 3 : 1 的比例将样本划分为校正集与预测集;偏最小二乘回归法(PLSR)是一种数学优化的方法,相对于其他的多元数据处理方法而言,PLSR 能很好地解决多重线性相关的问题。

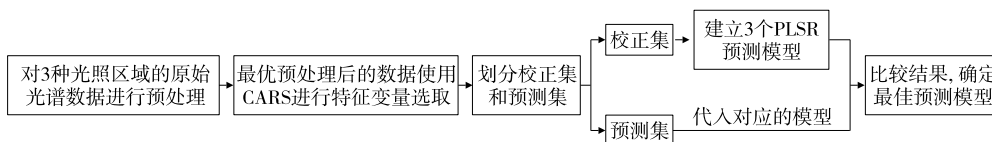


图 2 数据预处理与模型建立

Figure 2 Data preprocessing and model establishment

试验选择建模均方根误差(R_{MSEC})、预测均方根误差(R_{MSEP})、建模决定系数 R_c^2 以及预测决定系数 R_p^2 作为评价标准, R_{MSEC} 与 R_{MSEP} 越小, R_c^2 与 R_p^2 越高,模型的预测能力越强。 R_{MSEC} 、 R_{MSEP} 的计算公式:

$$R_{MSEC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_c} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n_c - f - 1}} \tag{3}$$

$$R_{MSEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_p} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n_p - 1}} \tag{4}$$

式中:

R_{MSEC} ——建模均方根误差, °Brix;

R_{MSEP} ——预测均方根误差, °Brix;

\hat{y}_i ——样本的模型预测值, °Brix;

y_i ——模型的实测值, °Brix;

n_c ——校正集样本数;

n_p ——预测集样本数;

f ——独立变量数。

2 结果与讨论

2.1 样本可溶性固形物含量统计结果

为使模型更加具有代表性,建模样本的糖度值(SSC)应尽可能涵盖预测样本的范围。如表 1 所示,研究中建模集柚子样品的 SSC 范围为 10.9~18.1 °Brix,预测样本的 SSC 范围为 11.2~17.2 °Brix,预测集的 SSC 范围在建模集之内,因此所建立的模型适用于预测集的样品。

表 1 校正集和预测集的划分结果

Table 1 Division results of correction set and prediction set

样本集	样本数	糖度值/°Brix			
		最大值	最小值	平均值	标准差
校正集	90	18.1	10.9	14.3	1.8
预测集	30	17.2	11.2	14.6	1.5

2.2 光照区域对结果的影响

原始光谱分析 3 种光照区域下采集的柚子原始光谱图与各区域下的平均光谱如图 3 所示,各区域的柚子

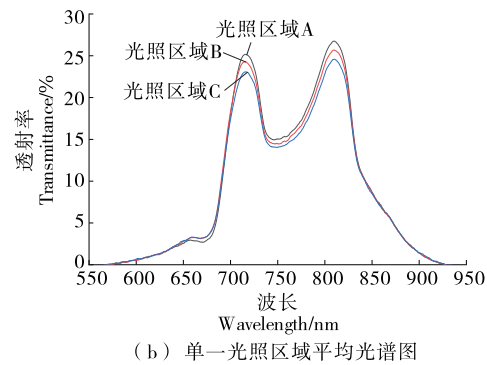
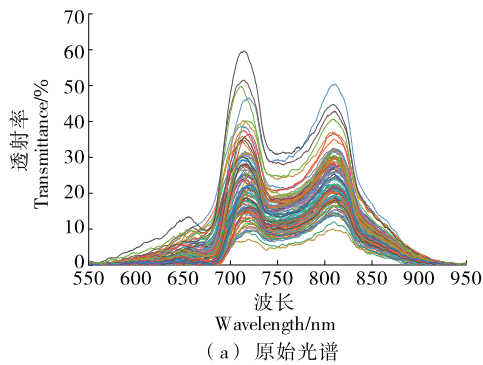


图 3 柚子近红外光谱图

Figure 3 Near infrared spectra of pomelo

2.3 不同预处理方法对比

为了减小杂散光等因素对建模结果的影响,提高模型的鲁棒性,采用无预处理(NONE)、标准正交变量变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、归一化(NOR)和 SG 一阶求导(SG-1st)进行预处理,并通过 PLS 交叉验证来评估预处理效果,表 2 为 3 种光照区域下柚子 SSC 偏最小二乘回归(partial least squares regression,PLSR)建模结果。由表 2 可知,经过标准正交标量变换后效果均最好。这可能是因为标准正交标量变换之后有效降低了表面散射效应和环境噪声等对近红外光谱产生的噪声影响;经过标准正交标量变换处理后的建模集和预测集,用于后续建立柚子糖度的预测模型。

2.4 CARS 变量优选

为了进一步精简模型和提高模型的预测精度,运用 CARS 算法,从标准正交标量变换后的光谱数据中进行特征波长的筛选,建立预测柚子 SSC 含量的模型。在运行 CARS 时,将蒙特卡罗采样运行的次数设置为 50,所选择的变量数由 5 倍交叉验证均方差 RMSECV 确定。光照区域 A、B、C 最终分别获得 72,54,63 个波长点。全波段与 CARS 变量选取后的建模结果如表 3 所示,经过 CARS 进行建模变量挑选后,光照区域 A、B、C 的预测集决定系数分别为 0.91,0.92,0.95,优于全波段建模的

有均 3 个吸收峰。在 650 nm 附近,主要是受叶绿素的影响,710,830 nm 附近的吸收峰可能是受水或 C—H 键官能团的影响^[20]。不同光照区域的柚子光谱曲线变化规律具有相似性,其中区域 A 的透射率整体上最大,区域 C 的透射率最小,区域 B 的透射率位于二者之间。这可能是因为卤素灯发出的总辐射功率不变,随着照射面积的增大,光线受柚子内部物质的碰撞、吸收与反射的机会增加,光线的穿透能力下降,透射率降低。光照区域 C 的位置处于柚子赤道上方位置,光程较远,柚子内部对光的吸收、折射作用更强,使得该区域的透射率最低。

表 2 基于不同预处理的 PLSR 交叉验证结果

Table 2 Cross-validation results of PLSR based on different pretreatment

预处理方法	光照区域	因子数	R_c^2	$R_{MSEC}/\text{°Brix}$	R_p^2	$R_{MSEP}/\text{°Brix}$
NONE	A	9	0.82	0.38	0.79	0.51
	B	8	0.83	0.31	0.81	0.54
	C	8	0.89	0.41	0.84	0.66
SNV	A	12	0.88	0.42	0.82	0.57
	B	11	0.90	0.54	0.85	0.92
	C	11	0.91	0.38	0.87	0.51
MSC	A	9	0.79	0.57	0.64	0.84
	B	7	0.75	0.54	0.70	0.73
	C	11	0.81	0.64	0.75	0.72
NOR	A	8	0.75	0.46	0.57	1.34
	B	7	0.76	0.67	0.64	0.94
	C	7	0.82	0.81	0.59	1.54
SG-1st	A	9	0.82	0.67	0.68	0.72
	B	8	0.86	0.51	0.75	0.66
	C	9	0.91	0.58	0.84	0.75

0.88,0.90,0.91,预测集均方根误差分别为 0.31,0.46,0.30 °Brix,优于全波段建模的 0.42,0.54,0.38 °Brix。这

可能是由于 CARS 算法剔除了较多的冗余信息,实现了光谱数据的压缩,降低了模型的复杂程度。CARS 模型结果的散点图如图 4 所示。

2.5 不同光照区域的柚子糖度在线检测外部验证试验

将 3 种光照区域的 SNV-CARS-PLSR 预测模型加载到在线检测设备中,依次进行不同光照区域对柚子糖度在线检测影响的外部验证实验。使用未参与到建模的 30 个柚子样本对模型进行验证,参数设置与建模时保持一致。验证结果如图 5 所示,在线预测柚子糖度时,光照

表 3 变量选取前后建模结果

Table 3 Modeling results before and after variable selection

光照区域	全波段		CARS	
	R_p^2	RMSEP/°Brix	R_p^2	RMSEP/°Brix
A	0.88	0.42	0.91	0.31
B	0.90	0.54	0.92	0.46
C	0.91	0.38	0.95	0.30

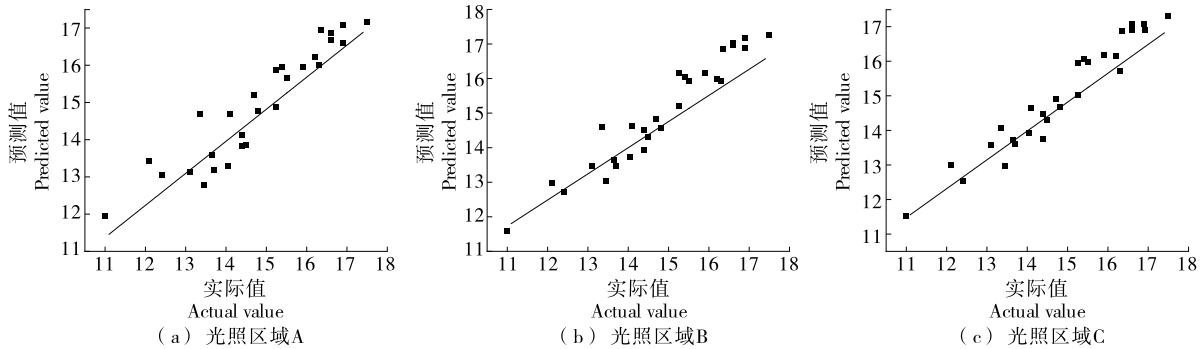


图 4 CARS 提取波长点后的 3 种光照区域的模型结果散点图

Figure 4 Scatter plots of model results of three light spot forms after CARS extraction of wavelength points

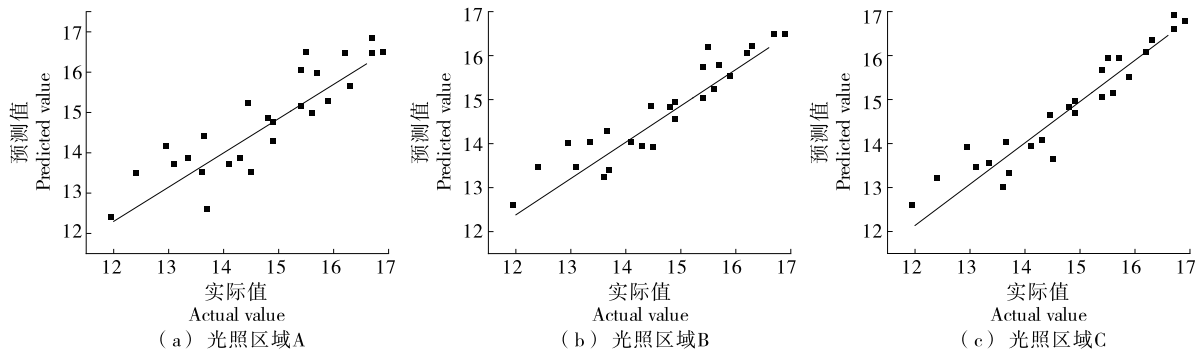


图 5 模型外部验证结果

Figure 5 External validation results of the model

区域 A、B、C 的糖度预测值与标准理化值的决定系数分别为 0.83, 0.86, 0.90, 预测均方根误差为 0.83, 0.61, 0.58 °Brix, 光照区域 C 对柚子的糖度预测结果更佳, 区域 B 的预测效果次之, 区域 A 的效果最差。这可能是因为较大的覆盖面积能携带出更多有效的柚子内部信息, 而区域 C 可能是因为光线在样本内部经过了更加充分的吸收、反射与折射作用, 携带着丰富的糖度信息, 使得其对柚子糖度的预测结果更好。

3 结论

为了提高利用近红外光谱在线检测柚子糖度的准确度, 通过自主研发的水果在线无损检测设备, 采用可见近红外光谱技术, 对比分析 3 种光照区域结合不同预处理方式对柚子中可溶性固形物含量在线检测精度的影响。

试验结果表明, 采用光照区域 C 建立的 SNV-CARS-PLSR 模型能更准确地在线预测柚子糖度。糖度模型预测的决定系数为 0.95, 预测均方根误差为 0.30 °Brix, 模型实际在线预测柚子糖度的决定系数为 0.90, 均方根误差为 0.58 °Brix。综上, 采用近红外光谱技术, 在光斑直径为 70 mm 且位于样本赤道上方 20 mm 处的光照区域 C 的条件下采集光谱数据并建立预测模型, 可提高柚子糖度的在线检测精度。后续将研究更多在线检测水果糖度时的影响因素, 讨论其对模型预测结果的影响。

参考文献

[1] 张立欣, 杨翠芳, 陈杰, 等. 基于变量优选的苹果糖分含量近红外光谱检测[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 112-118.
ZHANG L X, YANG C F, CHEN J, et al. Detection of sugar content

- in apple by near infrared spectroscopy based on variable optimization[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(10): 112-118.
- [2] 徐晓. 苹果检测姿态与双点检测对苹果可溶性固形物含量可见/近红外光谱在线检测的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 32-38.
- XU X. Research about the influences of apple detection posture and double-point detection on online SSC determination for apples by Vis/NIR spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 32-38.
- [3] 沈懋生, 赵娟. 基于近红外光谱技术检测苹果气调贮藏期可溶性固形物含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(17): 5 495-5 503.
- SHEN M S, ZHAO J. Detection of soluble solids content in apples during controlled atmosphere storage based on near-infrared spectroscopy[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(17): 5 495-5 503.
- [4] LIU X W, WU X, LI G L. Optimized prediction of sugar content in 'Snow' pear using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy combined with chemometrics[J]. *Spectroscopy Letters*, 2019, 52(7): 376-388.
- [5] SUN T, LIN H J, XU H R, et al. Effect of fruit moving speed on predicting soluble solids content of 'Cuiguan' pears (*Pomaceae pyriformis* Nakai cv. Cuiguan) using PLS and LS-SVM regression[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 51(1): 86-90.
- [6] 孟幼青, 翁海勇, 岑海燕, 等. 潜伏期柑橘黄龙病宿主糖代谢及近红外光谱特征[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(3): 428-435.
- MENG Y Q, WENG H Y, CENG H Y, et al. Carbohydrate metabolism and near-infrared spectral characteristics in asymptomatic Huanglongbing infected leaves[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(3): 428-435.
- [7] 张欣欣, 李尚科, 李跑, 等. 近红外光谱的不同产地柑橘无损鉴别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(12): 3 695-3 700.
- ZHANG X X, LI S K, LI P, et al. A nondestructive identification method of producing regions of citrus based on near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(12): 3 695-3 700.
- [8] 孙通, 莫欣欣, 刘木华. 果皮对脐橙可溶性固形物可见/近红外检测精度的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(5): 1 406-1 411.
- SUN T, MO X X, LIU M H. Effect of pericarp on prediction accuracy of soluble solid content in navel oranges by visible/near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(5): 1 406-1 411.
- [9] 宋杰. 基于脐橙位置状态分类识别的可溶性固形物在线检测研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 91-115.
- SONG J. Research of online detection of soluble solids content in navel orange based on position classification [D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 91-115.
- [10] POREP J U, MRUGALA S, MARTIN S, et al. Online determination of ergosterol in naturally contaminated grape mashes under industrial conditions at wineries [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8: 1 455-1 464.
- [11] 姜小刚, 朱明旺, 姚金良, 等. 基于近红外在线装置苹果糖度模型参数优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(1): 116-121.
- JIANG X G, ZHU M W, YAO J L, et al. Research on parameter optimization of apple sugar model based on near-infrared on-line device [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(1): 116-121.
- [12] QI S Y, OSHITA S, MAKINO Y, et al. Influence of sampling component on determination of soluble solids content of Fuji apple using near-infrared spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(5): 856-865.
- [13] 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.
- LI X, LIU Y D, OUYANG A G, et al. A general model for judging and brix detection of grapefruit variety based on near infrared[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(6): 808-814.
- [14] TIAN H, XU H R, YING Y B. Can light penetrate through pomelos and carry information for the non-destructive prediction of soluble solid content using Vis-NIRS? [J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 214(2 020): 152-164.
- [15] JIE D F, ZHOU W H, WEI X. Nondestructive detection of maturity of watermelon by spectral characteristic using NIR diffuse transmittance technique [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108718.
- [16] JIE D F, XIE L J, RAO X Q, et al. Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 90: 1-6.
- [17] 王世芳, 韩平, 崔广禄, 等. SPXY 算法的西瓜可溶性固形物近红外光谱检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(3): 738-742.
- WANG S F, HAN P, CUI G L, et al. The NIR detection research of soluble solid content in watermelon based on SPXY algorithm[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(3): 738-742.
- [18] 孙潇鹏, 刘灿灿, 陆华忠, 等. 基于可见—近红外透射光谱的蜜柚检测中影响因素分析[J]. *包装与食品机械*, 2022, 40(4): 1-7.
- SUN X P, LIU C C, LU H Z, et al. Analysis of influencing factors in the detection of honey pomelo based on visible-near infrared transmittance spectroscopy [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2022, 40(4): 1-7.
- [19] 孙潇鹏, 刘灿灿, 陆华忠, 等. 基于近红外透射光谱与机器视觉的蜜柚汁胞粒化分级检测[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(1): 37-45.
- SUN X P, LIU C C, LU H Z, et al. Detection of honey pomelo in different granulation levels based on near-infrared transmittance spectroscopy combined with machine vision[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(1): 37-45.
- [20] WORKMAN J. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy[J]. *Angewandte Chemie*, 2008, 47(25): 4 628-4 629.