

手持式黄油桃可溶性固形物可见近红外光谱检测设备研制

朱文杰^{1,2}, 黄文倩², 祝清震¹, 樊书祥^{2*}

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘 要: 桃在鲜果市场中占有重要份额。可溶性固形物含量 (soluble solid content, SSC) 是衡量桃品质的重要参数, 是挑选优质桃以及预测最佳采摘时期的重要决策依据。该研究开发了一款基于可见近红外光谱技术的手持式黄油桃 SSC 无损检测设备。该设备的硬件系统主要由微型光谱仪、卤素灯、OLED 显示屏、微控制器以及自主设计的驱动电路组成。为了评估所开发设备的检测性能, 采用北京平谷区种植黄油桃作为样品进行验证。首先, 获取校正集样品在 680~940 nm 范围内的可见近红外光谱, 经 5 点平均平滑和最大值归一化对光谱预处理建立黄油桃 SSC 偏最小二乘回归模型并用于预测集样本的 SSC 分析, 预测相关系数和均方根误差分别为 0.947 和 0.728%, 单果检测时间不超过 2 s。为了提高模型精度和稳定性, 将校正集和预测集合并后作为新的校正集进行建模, 并将重新构建的模型对独立验证集进行预测, SSC 预测值与实测值的相关系数为 0.906, 均方根误差为 0.732%。采用分段直接校正算法将主机模型传递到从机。经过模型传递后, 从机对独立验证集 SSC 的预测值与实测值的相关系数和均方根误差分别为 0.865 和 0.919%。该手持式 SSC 检测设备可将 SSC 预测数据以蓝牙方式传输到手机客户端, 借助手机定位功能, 在地图上实现黄油桃 SSC 空间可视化分布。研究表明, 该手持式 SSC 无损检测设备可以实现黄油桃 SSC 的准确测量, 借助模型传递算法, 实现了模型在不同设备间的有效传递, 避免了重复建模, 可为该设备批量生产节约大量成本, 具有广阔的应用前景。

关键词: 无损检测; 模型; 可见近红外光谱; 可溶性固形物; 黄油桃

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306134

中图分类号: TS251.7; S237

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0286-07

朱文杰, 黄文倩, 祝清震, 等. 手持式黄油桃可溶性固形物可见近红外光谱检测设备研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 286-292. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306134 <http://www.tcsae.org>

ZHU Wenjie, HUANG Wenqian, ZHU Qingzhen, et al. Development of a handheld yellow nectarine soluble solid content detection device based on Vis/NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 286-292. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306134 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国桃的种植面积和产量均居世界首位^[1-2]。桃属于呼吸跃变型水果, 采摘后呼吸较为旺盛, 短时间内可食用组织就会发生变化, 导致口感降低, 最终失去营养价值^[3]。桃果实软化快, 贮藏性低等缺点严重限制了桃产业的发展。品质实时检测对于保障桃产业的健康发展具有重要意义。北京市平谷区是著名的桃之乡。近年来广泛种植的黄油桃, 表皮以黄色为主, 鲜亮、光滑, 无绒毛, 果肉黄色, 口感风味好, 深受消费者喜爱。

可溶性固形物含量 (soluble solid content, SSC) 是决定水果采收时间的关键因素^[4-7], 也可用于间接估计水果的成熟度和质量。更为重要的是, SSC 已经渐渐取代颜色、大小、是否存在缺陷等外部品质, 成为决定消费者购买意愿和水果价格的关键因素之一^[8]。传统的 SSC 评估通常是以破坏性方式进行^[9], 虽然可以提供准确的测量结果, 但只能用于少量取样且耗时长。因此, 开发一种可靠的无损设备测定桃子的 SSC 尤为重要。

当前, 许多非接触式传感技术如可见近红外光谱、高/多光谱成像、电子鼻、电介质技术已被用于检测新鲜水果中的 SSC^[10-11]。在这些技术中, 可见近红外光谱技术凭借无损、快速、样品制备简单等特点, 已经成为水果内部品质检测应用最为广泛的技术, 并逐渐应用到商业化的水果分拣装备上实现在线快速检测^[12-15]。

与在线检测设备以及实验室台式近红外光谱检测仪器相比, 手持式检测设备携带方便, 快速准确, 价格低廉, 受到小型加工企业和果农的青睐。手持式检测设备除了可用在包装车间进行采后粗略分级外, 还可用于田间水果成熟期的 SSC 检测, 对管理水果生产, 把握生长趋势, 指导后续施肥, 保证优质水果的产出率和水果质量具有重要意义。当前, 国外如久保田株式会社、Atago、FELIX、Sunforest 等公司推出了相应的水果 SSC 快速检测产品^[16], 但价格普遍较高, 模型不易维护, 使用成本高, 限制了其推广和使用。因此, 开发具有自主知识产权、低成本的手持式可见近红外光谱检测设备具有积极而深远的意义, 具有良好的推广前景和经济效益。

国内研究人员也开展了相关研究。借助于小型商用光谱仪以及自行设计的探测光纤、探头等装置, YANG 等^[17], GUO 等^[18] 设计和开发了手持式检测设备, 并实现了猕猴桃、油桃和杏等水果 SSC 的检测。FAN 等^[19] 开发了背带式检测设备, 同时引入动态黑白校正机制, 有效提高了光谱的稳定性, 实现了对苹果 SSC 的有效检测。

收稿日期: 2023-06-20 修订日期: 2023-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2002202)

作者简介: 朱文杰, 研究方向为基于近红外光谱的水果品质检测。

Email: zhuwenjie2024@163.com

*通信作者: 樊书祥, 博士, 副研究员, 研究方向为农产品无损检测技术。

Email: fansx@nrcita.org.cn

王凡等^[20]设计了一种用于番茄颜色、硬度、总酸和总糖的测量装置。郭志明等^[21]采用波长范围 900~1 700 nm 的 DLP2010NIR 光谱采集模块,实现了番茄 SSC 和番茄红素的检测。此外, YU 等^[22]通过使用线性可变滤波器和 CMOS 探测器检测梨的 SSC。赵娟等^[23]确定了用于 SSC、可滴定酸和硬度检测的关键特征波长,进而开发了一款基于选定的 10 个共享特征波长的 LED 和光电二极管的便携式设备,实现了上述指标较好的检测,相关系数均大于 0.75。郭文川等^[24]开发了探头可替换的手持式检测设备,根据不同水果类型,探头内置不同个数和波长的 LED,结合数字光电传感器,实现了对梨以及猕猴桃 SSC、硬度的有效检测。

而基于特征波长的多光谱检测设备只能检测一种果蔬,且由于光谱分辨率低,检测精度和仪器稳定性均不能和微型光谱仪相比。另外,已有的检测设备往往针对同一台设备进行分析,缺少仪器间模型传递和共享,对于仪器后续批量开发和生产缺少相关技术支持。

因此,本研究基于可见近红外微型光谱仪,开发一套手持式 SSC 检测设备并用于平谷黄油桃的 SSC 分析。采用多批次样品对设备的精度进行验证,同时,借助模型传递算法,探讨模型在两台设备间的传递,实现模型在同型号设备间的共享。

1 检测设备开发

基于可见近红外光谱分析技术自主开发的手持式 SSC 检测设备如图 1 所示,由主机以及配套的白板盖、遮光罩和充电器构成。主机结构呈枪型结构,尺寸 17 cm×14 cm×3.5 cm,由黑色尼龙材料 3D 打印而成。通过获取水果的可见近红外光谱信息实现水果 SSC 无损快速检测。该设备主要由硬件系统和软件系统构成。



1. 白板盖 2. 遮光罩 3. 主机 4. 充电器
1. Whiteboard cover 2. Glare shield 3. Host 4. Charger

图 1 手持式 SSC 检测设备实物图

Fig.1 Physical picture of handheld SSC detection device

1.1 硬件系统

手持式 SSC 检测装置的硬件系统如图 2 所示。

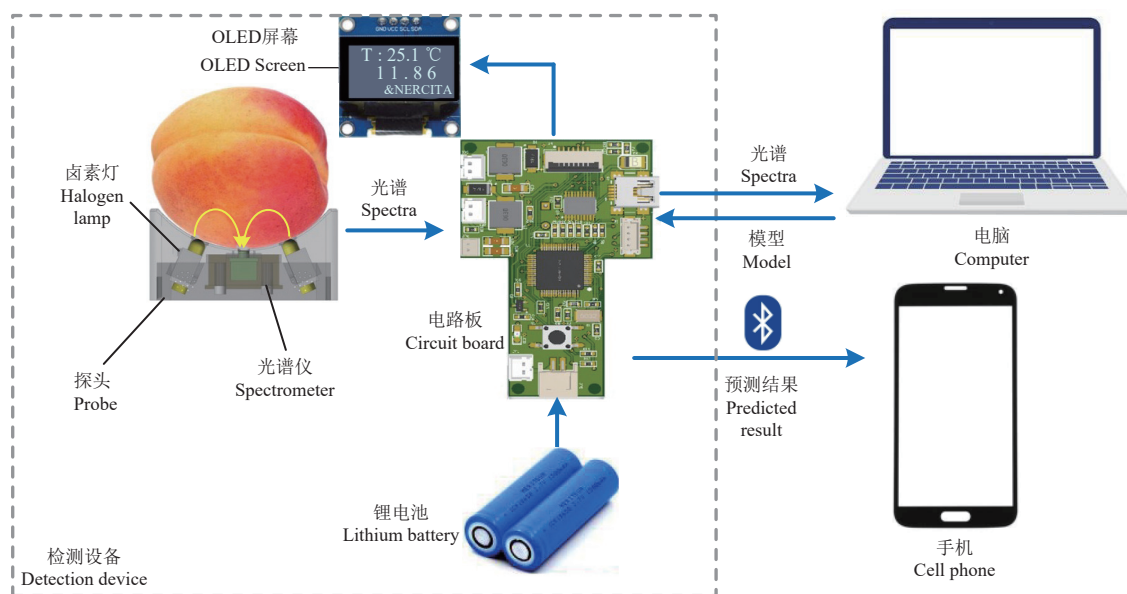


图 2 手持式 SSC 检测设备件系统

Fig.2 Hardware system of handheld soluble solid content detection device

(1) 卤素灯。作为手持式 SSC 检测设备的一个重要组成部分,光源在仪器能否获得稳定的光谱方面起着关键作用。在充分比较市面多款卤素灯后,最终选择与该检测器适配且功率只有 1.5W 的卤素灯 (997 418, Welch Allyn, 美国)。

(2) 光谱仪。随着微机电技术的发展,光谱仪呈现小型化、低成本、专业化的特点,为开发手持式水果内部品质检测提供了坚实基础。本文使用波长范围为 640~1 050 nm 范围的微型光谱仪 (C11708MA, Hamamatsu, 日本) 采集水果的光谱信息。其大小仅为

27.6 mm×16.8 mm×13 mm, 质量仅为 9 g, 非常适合小型仪器的开发。

(3) 可更换探头。为了获得尽可能多的与水果 SSC 相关的光谱信息,本设备使用漫透射模式获得水果光谱信息。2 个卤素灯分布在光谱仪两侧,卤素灯的光与水果发生作用后被距离卤素灯 16 mm 的接收孔下面的微型光谱仪接收 (图 2)。探头可拆卸,可以根据不同水果类型进行更换以适用不同水果的光谱采集。探头配有白板盖和遮光罩。每次试验前,将白板盖套在探头上,完成白参考采集以用于光谱的白参考校正。遮光罩用于

室外采集时遮挡阳光等杂散光以提高光谱信噪比。

(4) 电路板。选择 STM32 作为微处理器。外围电路包括光谱仪驱动电路、卤素灯驱动电路、电源管理电路、通讯接口电路(串口、蓝牙)等。

(5) OLED (organic electroluminescence display) 显示屏, 用于显示 SSC 含量的预测值。为了减少检测仪的尺寸和成本, 屏幕大小为 0.96 寸。显示屏通过 SPI 接口与电路板相连。

(6) 锂电池, 该检测装置的供电由可充电锂电池提供, 电池容量为 6 000 mA·h, 工作时间约为 2.5~3.0 h。

1.2 软件系统

软件系统在 Keil 5 平台上开发, 由 C 语言编写完成, 主要实现光谱数据采集、SSC 预测值计算、显示, 以及与上位机、手机端进行通讯, 将光谱数据或检测结果分别传输到上位机、手机端。

上位机软件由 LabView 编写, 并通过串口与手持式检测设备进行通信, 主要完成模型正式建立前光谱数据按照既定积分时间进行采集, 以及将光谱保存到上位机。

手机端程序主要在 Android 下开发, 用于蓝牙接收检测设备传输的 SSC 预测值, 并结合手机定位系统得到的经纬度坐标, 将 SSC 值显示在百度地图上。

2 数据采集与模型构建

2.1 试验材料

本研究中使用的黄油桃均采自北京平谷区大华山镇的桃园。第一批和第二批次分别采摘 158 和 95 个, 品种为澳优, 分别作为校正集和预测集。第三批次采摘 180 个用作独立验证集, 品种为晚黄油。采摘后将样本放置在冷藏箱中, 并于当天运回北京市农林科学院智能装备技术研究中心的无损检测实验室, 编号后放置在 26 °C 室温条件下储存 24 h, 以减少温度对黄油桃光谱测量的影响。

2.2 光谱采集

打开检测设备预热 5 min, 将白板盖放置在探头上方, 采集此时对应的白参考光谱 (R_w)。然后依次将每个样品的赤道部位紧贴探头, 采集此时的样品光谱 (R_s)。积分时间设置为 500 ms。为了提高光谱的稳定性, 将获取的 3 次光谱的平均值作为样本的最终光谱。单果检测时间小于 2 s。共采用 2 台手持式设备, 其中一台作为主机, 另外一台作为从机。主机用来评估设备对黄油桃 SSC 的检测精度。从机用来评估模型的传递性能。

2.3 黄油桃 SSC 含量的测定

桃的 SSC 随着贮藏时间和贮藏环境的不同而变化。因此, 为了获得更准确的数据, 在光谱采集完成后立刻进行 SSC 测量。在光谱测量位置切取厚度约 1~2 cm 的带皮果肉, 用纱布包裹, 然后用手动榨汁机挤压到干净的烧杯中, 搅拌均匀后, 用胶头滴管吸取果汁滴在数字折光仪 (PR-101a, ATAGO, 日本) 上测量 SSC。为了提高测量准确性, 每次测量后用蒸馏水冲洗数字折光仪和烧杯, 并用纸巾擦干。对每个样品果汁进行 3 次测量, 取 3 次测量的平均值作为该样品的实际 SSC 值。

2.4 光谱数据预处理

由于光谱数据不仅包含样品的化学信息, 还包含仪

器噪声和杂散光等无关信息^[25], 所以需要对原始光谱进行预处理。首先按式 (1) 对原始光谱数据进行白校正得到透射率光谱 (T_r)。考虑到光谱首尾两端较为明显的噪声信号, 取 680~940 nm 波段进行后续分析。

$$T_r = \frac{R_s}{R_w} \quad (1)$$

2.5 PLSR 预测模型

偏最小二乘回归 (partial least square regression, PLSR) 是目前可见近红外光谱分析中使用最广泛的一种多元线性回归方法^[26], 该方法对光谱矩阵 X 及浓度矩阵 Y 进行分解, 同时考虑两者之间的联系, 加强对应计算关系, 从而获得最佳的校正模型^[27]。在使用 PLSR 建立模型时, 要选择参与建模的潜变量 (latent variable, LV) 的最佳数量, 以避免欠拟合或过拟合。LV 数量是建立 PLSR 模型的关键参数。本研究根据校正集样本 10 折交互验证的均方根误差 (root mean square error of cross-validation, R_{MSECV}) 的最小值确定最佳预处理方法和最佳潜变量数量。

2.6 PDS 模型传递算法

由于制造工艺、测试环境的不同, 同一样品在不同近红外光谱仪器上的响应不完全一致, 使得一台机器上建立的模型在其他设备上达不到检测要求导致模型不能通用^[28]。分段直接校正 (piecewise direct standardization, PDS) 算法是 WANG 等^[29]提出的一种广泛使用的有标样模型传递方法。有标样模型传递算法通常选择若干样本作为标准样品, 建立主机标准样品光谱与从机标准样品光谱的对应关系, 进而对从机光谱进行校正后再采用主机模型进行检测。PDS 是在 DS 的基础上进行的改进, 选取一部分窗口数据计算转换矩阵。为了代替全谱波长点的运算, 在一个预先设置的窗口内使用局部光谱进行模型传递。首先设定一个宽度为奇数的窗口 (中心点为第 i 个波长), 选取窗口宽度内的从机光谱矩阵, 采用 PLSR 算法计算该光谱矩阵与主机光谱第 i 个波长点的转换系数。通过循环窗口, 得到最终的转换矩阵。通过转换矩阵对未知样品的光谱数据进行转化, 实现主机模型在从机上的使用。窗口大小对于 PDS 的性能至关重要, 该值太大会保留太多冗余信息。反之, 窗口中的光谱则无法保持足够的结构信息。本研究尝试考察窗口宽度为 3、9、15、21、31 个波长点对传递结果的影响。同时采用 Kennard-Stone 算法从主机校正集光谱中选择 5、10、15、……75、80 个样本作为标准样并考虑不同数量的标准样对传递结果的影响。为进行 PDS 模型传递, 采用 3 次样条插值算法使得主机和从机的波长点数一致。

2.7 模型性能评估指标

为了评价所建模型的性能, 本文采用相关系数和均方根误差用来评估黄油桃光谱数据和 SSC 含量所建立的回归模型的预测效果。校正集的相关系数 (correlation coefficient of calibration, R_c)、预测集的相关系数 (correlation coefficient of prediction, R_p) 和验证集相关系数 (correlation coefficient of validation, R_v) 越大, 越接近于 1, 说明相关性越强, 预测结果越好。校正集的均方根误差 (root mean square error of calibration, R_{MSEC})、预测集的均方根误差 (root mean square error of

prediction, R_{MSEP}) 和验证集均方根误差 (root mean square error of validation, R_{MSEV}) 越小, 模型准确率越高^[30]。

3 结果与分析

3.1 样本统计结果

表 1 列出了 3 次试验所用黄油桃的 SSC 统计情况。由表 1 可知, 所用样本的 SSC 均有较大的变化范围, 校正集的 SSC 范围相对于预测集和验证集略小。

表 1 试验黄油桃 SSC 统计结果

Table 1 Statistical results of SSC of used yellow nectarines				
样本集 Sample set	品种 Variety	数量 Number	范围 Range/%	标准差 Standard deviation
校正集	澳优	158	7.8~15.7	1.72
预测集	澳优	95	5.7~15.6	2.21
验证集	晚黄油	185	7.1~15.3	1.60

3.2 检测模型构建

通过对比不同光谱预处理算法对黄油桃光谱数据的处理结果发现, 使用 5 点平均平滑结合最大值归一化可以获得较好的效果 (图 3)。本试验对校正集进行交互验证分析, 交互验证的相关系数 (R_{cv}) 和均方根误差 (R_{MSECV}) 分别为 0.920 和 0.674% (图 4), 最优潜变量个数为 10。将模型回归系数及相应的预处理算法写入检测设备的软件系统。

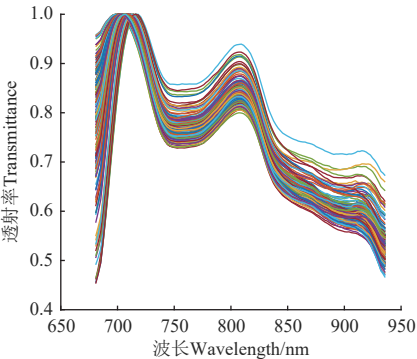


图 3 经过预处理后黄油桃的透射率光谱

Fig.3 The transmittance spectra after preprocessing methods

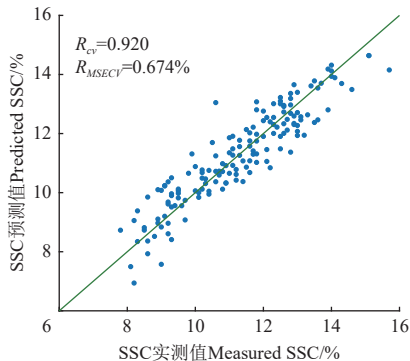


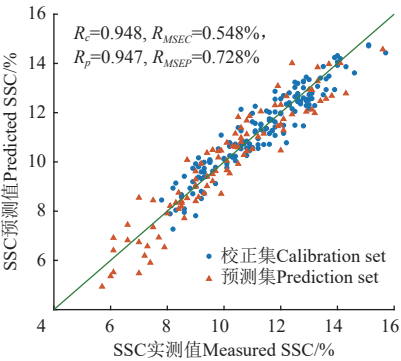
图 4 校正集交互验证结果

Fig.4 Results of cross-validation of calibration set

3.3 检测设备预测精度验证

开机完成白参考光谱采集后, 将预测集样本依次放置在探头上方, 点击触发按键, 通过显示屏读取该样品

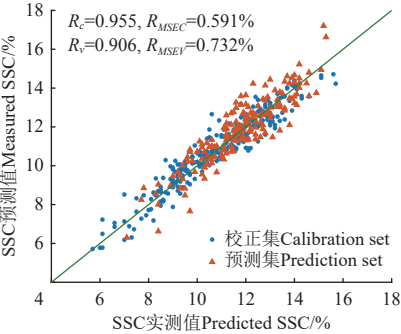
的 SSC 预测值并记录。待所有样品检测完成后, 采用 2.3 节方法获取预测集样本检测部位实际 SSC 值并记录。检测结果如图 5 所示, 对预测集样本 SSC 检测的 R_p 和 R_{MSEP} 分别为 0.947 和 0.728%。同时从图中还可以看出, 预测集样本拥有比校正集更宽的 SSC 范围, 尤其在 6%~8% 这一区间。因此, 为了更好地用于后续未知样本的 SSC 检测, 将校正集和预测集合并后, 组成 SSC 范围更大的新的校正集用于黄油桃 SSC 检测模型的构建并用于验证集样本的预测。模型构建过程同 3.2 节。新构建的模型对验证集 SSC 的检测结果如图 6 所示, 对应的 R_v 和 R_{MSEV} 分别为 0.906 和 0.732%, 对比已有检测结果^[31], 证明该手持式设备可以满足黄油桃 SSC 的快速、准确分析。本研究采用了多批次黄油桃样本作为试验对象, 对检测设备的精度进行了验证, 该处理方式比将同批次样本随机分配成校正集和预测集更具有挑战性^[32]。对多批次样本的有效检测也说明本设备具有较好的检测精度和较高的稳定性。



注: R_c 、 R_{MSEC} 、 R_p 、 R_{MSEP} 分别表示校正集相关系数、校正集均方根误差、预测集相关系数、预测集均方根误差。
Note: R_c , R_{MSEC} , R_p and R_{MSEP} represent correlation coefficient and root mean square error of calibration set and prediction set, respectively.

图 5 预测集 SSC 实测值和预测值散点图

Fig.5 Scatter plot of measured and predicted values of yellow nectarine SSC in prediction set



注: R_v 、 R_{MSEV} 分别表示验证集相关系数、验证集均方根误差。
Note: R_v and R_{MSEV} represent correlation coefficient and root mean square error of validation set, respectively

图 6 验证集黄油桃 SSC 实测值和预测值散点图

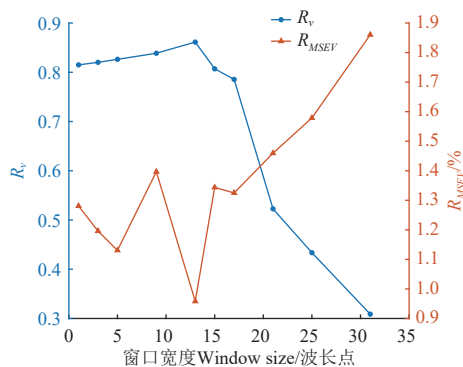
Fig.6 Scatter plot of the measured and predicted values of yellow nectarine SSC in validation set

基于特征波长的多光谱手持式检测设备往往根据特定水果的 SSC 检测优选特征波长, 因此所选波长具有特定性。本研究开发的手持式检测设备的核心装置为卤素灯和微型光谱仪, 其光谱覆盖范围为 640~

1 050 nm, 由于含有更多光谱波段, 因此可适用于尺寸接近的不同类型水果的 SSC 检测。如黄油桃、苹果、柑橘等。对更大或更小尺寸的水果, 由于本装置采用模块化设计, 可以采取更换探头的方式实现 SSC 的检测。借助该设备, 可以帮助果农估算黄油桃最佳采摘时间, 对收获后的黄油桃进行分级与收购定价, 对市场上的样品进行抽检等。

3.4 主机模型到从机传递结果

从上述新构建的校正集中选取不同数量样本作为模型传递的标准样品, 并考察不同窗口宽度下从机对独立验证集样本的 SSC 预测结果。图 7 展示了标准样本数量为 75 的条件下, 从机对验证集 SSC 预测的 R_v 、 R_{MSEV} 随不同窗口宽度的变化情况。从图中可以看出, 不同参数组合对预测结果的影响较大。窗口宽度为 13 时 R_v 最高, R_{MSEV} 最低。图 8 展示了从机对验证集黄油桃 SSC 的预测结果。对比主机对验证集的检测结果可知, 虽然从机对黄油桃 SSC 的检测精度略有下降, 但是模型传递算法避免了从机重复建模所消耗的大量时间和样品, 缩短了开发时间, 可节约大量成本, 对于设备的批量开发和推广应用具有积极意义。



注: R_v 、 R_{MSEV} 分别表示验证集相关系数、验证集均方根误差。
Note: R_v and R_{MSEV} represent correlation coefficient and root mean square error of validation set, respectively.

图 7 从机验证集的 R_v 和 R_{MSEV} 随窗口宽度的变化

Fig.7 Variation of R_v and R_{MSEV} in validation set obtained by the slave device with different window size

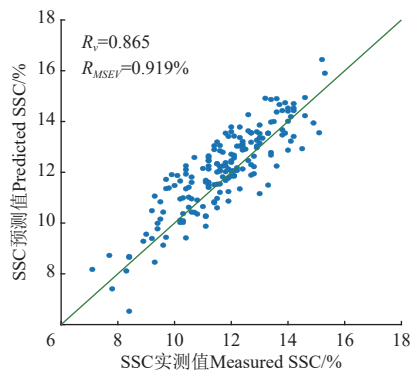


图 8 从机验证集 SSC 实测值和预测值散点图

Fig.8 Scatterplot of measured and predicted SSC values obtained by slave device in validation set

3.5 黄油桃 SSC 空间可视化分布

利用所研制的手持式 SSC 检测设备, 在平谷区桃园现场测量树上黄油桃 SSC 值, 同时以蓝牙传输到手机客

户端, 记录 SSC 预测值以及手机当前定位的经纬度信息, 借助百度地图应用接口, 在百度地图的显示该位置下的黄油桃 SSC 预测值, 实现黄油桃 SSC 空间分布可视化, 如图 9 中红色水滴为采集位置, 红色方框内的数字代表该位置下的黄油桃 SSC 预测值。目前手机定位的精度为 2~10 m^[33], 但随着智能手机芯片和天线的不断升级, 以及定位算法的改进, 定位精度会得到大幅度提高。借助该功能, 可助力果园精细化管理, 为果园管理者提供更优质的决策服务。



图 9 黄油桃 SSC 空间可视化结果

Fig.9 Schematic diagram of spatial visualization distribution of yellow nectarine SSC

4 结 论

(1) 开发了一种基于可见近红外光谱的手持式黄油桃 SSC 检测设备。基于平谷地区生产的黄油桃构建的 PLSR 检测模型并对独立验证集的黄油桃 SSC 进行检测, 模型相关系数和均方根误差分别为 0.906 和 0.732%, 单果检测时间小于 2 s, 可以满足黄油桃 SSC 实时评价的需求。

(2) 借助 PDS 模型传递算法, 实现了从机对验证集样品的高效检测, 相关系数和均方根误差分别为 0.865 和 0.919%。但传递后模型的精度还有待进一步提升。

[参 考 文 献]

- [1] 贾云云, 王越辉, 白瑞霞, 等. 光照对桃果实内在品质的影响研究进展[J]. 江西农业学报, 2020, 32(12): 30-36.
JIA Yunyun, WANG Yuehui, BAI Ruixia, et al. Research progress on the effects of light on internal quality of peach fruit[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2020, 32(12): 30-36. (in Chinese with English abstract)
- [2] 戴瀚铖, 成纪予. 不同品种鲜切桃贮藏期品质变化与主成分分析[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 85-92.
DAI Hancheng, CHENG Jiyu. Changes in quality of fresh-cut peaches of the same variety during storage and principal component analysis[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 85-92. (in Chinese with English abstract)
- [3] 贾晓昱, 邵丽梅, 李金金, 等. 桃贮藏技术的研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(3): 96-104.
JIA Xiaoyu, SHAO Limei, LI Jinjin, et al. Research progress of peach storage technology[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(3): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [4] DANIELA E, BARBARA S, PETER R, et al. The potential of

- near infrared spectroscopy (NIRS) to trace apple origin: Study on different cultivars and orchard elevations[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147(1): 123-131.
- [5] LI X, LI C, SUN J, et al. Dynamic changes of enzymes involved in sugar and organic acid level modification during blueberry fruit maturation[J]. *Food Chemistry*, 2020, 309: 125617.
- [6] JAWAD U, GAO L, GEBREMESKEL H, et al. Expression pattern of sugars and organic acids regulatory genes during watermelon fruit development[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109102.
- [7] TILAHUN S, CHOI H R, PARK D S, et al. Ripening quality of kiwifruit cultivars is affected by harvest time[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 261: 108936.
- [8] LI L, PEENG Y, YANG C, et al. Optical sensing system for detection of the internal and external quality attributes of apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 162: 111101.
- [9] LI J, SUN D, CHENG JH. Recent advances in nondestructive analytical techniques for determining the total soluble solids in fruits: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2016, 15(5): 897-911.
- [10] CORTES V, BLASCO J, ALEIXOS N, et al. Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 138-148.
- [11] 贾文坤, 李孟楠, 王亚雷, 等. 电子鼻技术在果蔬检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(2): 410-418. JIA Wenshen, LI Mengnan, WANNG Yalei, et al. Application of electronic nose technology in fruit and vegetable inspection[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2016, 7(2): 410-418. (in Chinese with English abstract)
- [12] FAN S, LI J, XIA Y, et al. Long-term evaluation of soluble solids content of apples with biological variability by using near-infrared spectroscopy and calibration transfer method[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 151: 79-87.
- [13] HUANG H, YU H, XU H, et al. Near infrared spectroscopy for on/in-line monitoring of quality in foods and beverages: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(3): 303-313.
- [14] TIAN X, LI J, YI S, et al. Nondestructive determining the soluble solids content of citrus using near infrared transmittance technology combined with the variable selection algorithm[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020(1): 48-57.
- [15] XU H, QI B, SUN T, et al. Variable selection in visible and near-infrared spectra: Application to on-line determination of sugar content in pears[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 142-147.
- [16] 李江波, 张保华, 樊书祥, 等. 图谱分选技术在农产品质量和安全评估中的应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 2021.
- [17] YANG B, GUO W, LI W, et al. Portable, visual, and nondestructive detector integrating Vis/NIR spectrometer for sugar content of kiwifruits[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(2): e12982.
- [18] GUO W, LI W, YANG B, et al. A novel noninvasive and cost-effective handheld detector on soluble solids content of fruits[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 257: 1-9.
- [19] FAN S, WANG Q, TIAN X, et al. Non-destructive evaluation of soluble solids content of apples using a developed portable Vis/NIR device[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 193(4): 138-148.
- [20] 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, et al. Development of a portable tomato multi-quality parameter visible/near-infrared detection device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(19): 295-300. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭志明, 陈全胜, 张彬, 等. 果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 245-250. GUO Zhiming, CHEN Quansheng, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectroscopy detection system for fruit and vegetable quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 245-250. (in Chinese with English abstract)
- [22] YU X, LU Q, GAO H, et al. Development of a handheld spectrometer based on a linear variable filter and a complementary metal-oxide-semiconductor detector for measuring the internal quality of fruit[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2016, 24(1): 69-76.
- [23] 赵娟, 全朋坤, 张猛胜, 等. 基于特征 LED 光源的苹果多品质参数无损检测装置研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 326-332. ZHAO Juan, QUAN Pengkun, ZHANG Mangsheng, et al. Research on a nondestructive inspection device for multiple quality parameters of apples based on characteristic LED light source[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 326-332. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郭文川, 纪同奎, 张宗逸, 等. 可更换探头的手持式多果品内部品质无损检测仪研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 403-409. GUO Wenchuan, JI Tongkui, ZHANG Zhongyi, et al. Research on handheld multi-fruit internal quality nondestructive inspection instrument with replaceable probes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2023, 54(2): 403-409. (in Chinese with English abstract)
- [25] 高荣强, 范世福, 严衍禄, 等. 近红外光谱的数据预处理研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(12): 1563-1565. GAO Rongqiang, FAN Sifu, YAN Yanlu, et al. Data preprocessing study of near-infrared spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(12): 1563-1565. (in Chinese with English abstract)
- [26] Andersson, M. A comparison of nine PLS1 algorithms [J]. *Journal of Chemometrics*, 2009, 23(10): 518-529.
- [27] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [28] 倪力军, 韩明月, 张立国, 等. 基于稳定一致波长筛选的无标样近红外光谱模型传递方法[J]. *分析化学*, 2018, 46(10): 1660-1668. NI Lijun, HAN Mingyue, ZHANG Liguang, et al. A model transfer method for scale-free near-infrared spectra based on stable and consistent wavelength screening[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 46(10): 1660-1668. (in Chinese with English abstract)
- [29] WANG Y, Veltkamp D, et al. Multivariate instrument

- standardization[J]. *Analytical Chemistry*, 1991, 63(23): 2750-2756.
- [30] LI J, HUANG W, ZHAO C, 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.
- [31] 陈玥瑶, 夏静静, 韦芸, 等. 近红外光谱法无损检测平谷产大桃品质方法研究[J]. *分析化学*, 2023, 51(3): 454-462.
- CHEN Yueyao, XIA Jingjing, WEI Yun, et al. A method for nondestructive detection of peach quality in Pinggu by near-infrared spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 51(3): 454-462. (in Chinese with English abstract)
- [32] CAVACO A M, PIRES R, ANTUNES M D, et al. Validation of short wave near infrared calibration models for the quality and ripening of 'Newhall' orange on tree across years and orchards[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 141: 86-97.
- [33] 杨士立. 基于内部传感器信息辅助的智能手机高精度定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- YANG Shili. A Study on High-Precision Positioning of Smartphones Based on Internal Sensor Information Assistance[D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese with English abstract)

Development of a handheld yellow nectarine soluble solid content detection device based on Vis/NIR spectroscopy

ZHU Wenjie^{1,2}, HUANG Wenqian², ZHU Qingzhen¹, FAN Shuxiang^{2*}

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Peach occupies an important share in the worldwide fresh fruit market. Soluble solid Content (SSC) is an important parameter for measuring peach quality. It is one of the most important internal properties that influence the consumer purchasing decision on fresh fruit and best picking period. Therefore, a handheld yellow nectarine SSC non-destructive detection device was developed based on visible and near-infrared spectroscopy technology. The hardware system of the device was mainly composed of a micro-spectrometer, two halogen lamps, an OLED display, a microcontroller, and a self-designed driven circuit. The real-time analysis and control software of microcontroller was written in C language with the help of Keil 5 development tool. Combined with the spectrum acquisition program written by LabView, the spectra of fruit sample were collected by the developed device. Yellow nectarines planted in Pinggu area in Beijing were used as fruit samples to evaluate the detection performance of the developed device. First of all, the visible and near-infrared spectra of samples in calibration set were obtained in the range of 680-940 nm. After pre-treated by average smoothing (window size=5) and maximum normalization, the spectra were used to develop a partial least squares (PLS) model for SSC prediction. The calibration and cross validation results obtained by the developed model had fairly good correlation coefficients and low prediction errors. To evaluate the robustness and accuracy of the developed model, the model was then applied to assess the SSC of samples in prediction set. The correlation coefficients and the root mean square error were 0.947 and 0.728%, respectively. The detection time of single fruit should not exceed 2 s. In order to improve the accuracy and stability of the model, the samples in calibration set and prediction set were combined as a new calibration set to develop an SSC prediction model, followed by the validation using an independent validation set. The results indicated that the correlation coefficient and the root mean square error of SSC prediction for yellow nectarine were 0.906 and 0.732%, respectively. However, the direct use of a calibration model built by one instrument to another instrument was impracticable, therefore, a calibration transfer or model transfer methods were needed to share a calibration model between same kinds of instruments. Calibration transfer was a mathematical method that made the spectrum measured by different samples or instruments as consistent as possible. Piecewise direct standardization (PDS) is a multivariate full-spectrum standardization method, which works in a similar principle to the DS algorithm, has become the most wide-used calibration transfer method. It was used to transfer the calibration model developed by the master device to the slave device in this study. After the model was transmitted from the master device to the slave device, the SSC was successfully predicted by the slave device, with the correlation coefficient and the root mean square error for SSC prediction in validation set of 0.865 and 0.919%, respectively. In addition, the developed handheld SSC detection device could transmit SSC prediction value by Bluetooth to cell phone application written by Android language, which achieved the visualization of SSC values on Baidu map based on the predicted SSC values and the mobile phone's own positioning information. The overall results of this study showed that the developed handheld detection device can achieve accurate and non-destructive measurement of yellow nectarine SSC. With the help of the model transfer algorithm, the model can be shared and effectively transferred between different devices, avoiding repeated modelling and saving a lot of time and money. The developed device could meet the demand for rapid, non-destructive, and on-site detection of fruit internal quality. There are good prospects for wide application of the developed handheld detection device.

Keywords: non-destructive; model; visible and near-infrared spectroscopy; soluble solids content; yellow nectarine