

可更换探头的手持式多果品内部品质无损检测仪研究

郭文川^{1,2} 纪同奎¹ 张宗逸¹ 周一航¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了实现多果品内部品质的现场无损快速检测,基于多光谱技术设计了一种可更换探头的手持式多果品内部品质无损检测仪。该检测仪的硬件系统由主机和多光谱采集探头组成。主机包括微处理器、电源管理模块、稳压驱动模块及输入输出模块。多光谱采集探头由 12 个不同波长的发光二极管和数字光电传感器组成。在 MDK 5.0 开发环境下用 C 语言开发了检测仪的软件。利用开发的检测仪分别采集了“华优”猕猴桃和“雪”梨的漫反射多光谱,并基于偏最小二乘法建立了预测猕猴桃和梨的可溶性固形物含量(SSC)和硬度的模型。将预测模型导入到检测仪后对仪器的性能进行了测试。结果表明,该检测仪对猕猴桃 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 1.51% 和 5.13 N,对梨 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 0.52% 和 4.57 N,检测时间在 2 s 以内,可通过更换探头实现对多种果品内部品质的无损快速检测。

关键词: 猕猴桃; 梨; 内部品质; 多光谱; 检测仪

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0403-07 **OSID:** 

Handheld Non-destructive Detector for Internal Quality of Multi-fruits with Replaceable Probe

GUO Wenchuan^{1,2} JI Tongkui¹ ZHANG Zongyi¹ ZHOU Yihang¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the improvement of consumption level, the internal quality of fruit has become an important factor to attract consumers. However, the traditional methods used to measure soluble solids content (SSC) and firmness are destructive. To realize rapid non-destructive detection on the internal quality of multi-fruits, a handheld non-destructive detector for internal quality of multi-fruits with replaceable probe was developed. The hardware system of the detector consisted of a host and a multi-spectral acquisition probe. The host included a microprocessor, a power management module, a voltage regulator drive module and an input and output module. The multi-spectral acquisition probe included 12 light emitting diodes (LEDs) at different wavelengths and a digital optoelectronic sensor. The software system of the detector was developed in C language in the development environment at MDK 5.0. The diffuse reflectance multi-spectral of “Huayou” kiwifruit and “Xue” pear were collected by the developed detector, and the prediction models for SSC and firmness were established based on the partial-least-squares regression. After downloading the model into the detector, the detection performance of the detector was tested. The results showed that the root mean square errors of SSC and firmness prediction for kiwifruit were 1.51% and 5.13 N, and the root mean square errors of SSC and firmness prediction for pear were 0.52% and 4.57 N. Moreover, the measurement could be realized in 2 s. The measurement on the internal quality of multi-fruits was realized by replacing the probe of the detector.

Key words: kiwifruit; pear; internal quality; multi-spectral; detector

0 引言

评价水果内部品质的主要指标有可溶性固形物含量(Soluble solids content, SSC)和硬度。SSC 决定了水果的糖度^[1],而硬度决定了水果的成熟度以及耐贮性^[2]。传统检测水果 SSC 和硬度的方法是破坏性抽样检测^[3],其操作繁琐、耗时,难以满足现场实时检测的需求。因此,研发一种水果内部品质无损快速检测仪对于指导水果的生产和销售具有重要意义。

可见/近红外光谱检测技术是一种基于可见/近红外光传输原理的无损检测方法,其能够准确反映检测样本内部含氢基团信息。水果内部组分含有丰富的含氢基团,因此常用可见/近红外光谱技术无损检测水果的内部品质^[4-5]。现有研究表明,可见/近红外光谱技术可以无损检测水果的 SSC^[6-7]、硬度^[8-9]和干物质含量^[10-11]等。因此有学者基于可见/近红外光谱技术研发出便携式水果内部品质检测仪^[12-14],但检测仪采用的核心器件多为微型光谱仪和滤光片,导致功耗和成本较高。多光谱技术的发展使低成本水果品质检测仪的研发成为可能。但目前基于多光谱技术的水果内部品质检测仪大多只能检测单一品种的水果^[15-16],限制了检测仪的实用

性。因此研发一款低功耗、低成本的手持式多果品内部品质无损检测仪具有重要意义。

本文基于多光谱技术,以猕猴桃和梨为研究对象,研发用于检测猕猴桃和梨内部品质的专用多光谱采集探头;进而开发一种可更换探头的手持式多果品内部品质无损检测仪,以实现一仪多测的目的。

1 检测仪设计

1.1 硬件系统设计

图 1 为手持式多果品内部品质无损检测仪的硬件结构图。该检测仪由主机和多光谱采集探头组成,二者通过多孔直插接口连接。主机由微处理器、电源管理模块、稳压驱动模块及输入输出模块组成。多光谱采集探头由发光二极管(Light emitting diode, LED)和数字光电传感器组成。微处理器用于控制和管理检测仪的其他模块,并处理光谱数据和计算预测结果;电源管理模块用于给检测仪提供工作电源和实现充放电管理;稳压驱动模块用于给各个模块提供稳定的工作电压和电流;输入/输出模块用于实现人机交互和数据传输。多光谱采集探头采集原始光谱信号,并将数字光电传感器返回的数字光强信号输送至微处理器的采集端口。

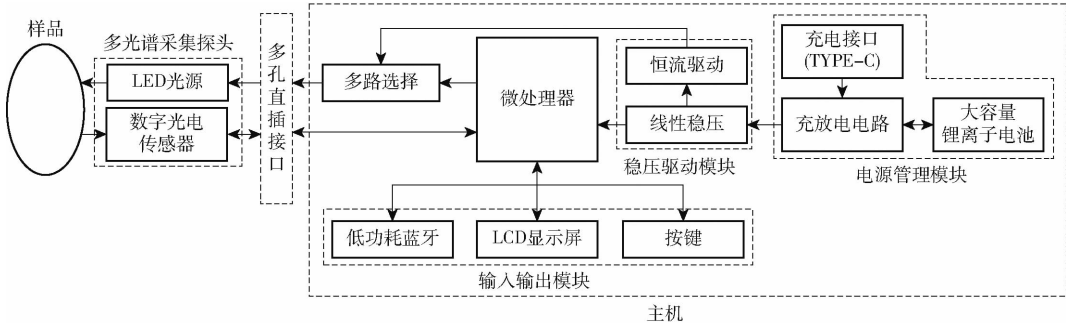


图 1 检测仪硬件结构图

Fig.1 Structure diagram of hardware of handheld detector

1.1.1 微处理器

微处理器是检测仪的核心。本检测仪以高性能 Crotex M4 为内核的 32 位单片机 STM32F429IGT6 为微处理器。该微处理器自带 256 KB 的 SRAM、1 024 KB 的 Flash ROM、3 个 12 位的独立 ADC 通道和 8 个 UART,并有专门的电源管理监控外设,以保证系统在低功耗下运行。

1.1.2 电源管理模块

电源管理模块由锂离子电池、充放电电路和充电接口组成,主要负责检测仪的电源供给以及充放电管理。锂离子电池容量为 2 500 mA,输出电压为 3.7 V。充放电电路如图 2 所示。以 IP5036 为电源管理芯片,IP5036 内有稳压模块,可将锂离子电池

输出的 3.7 V 电压稳定在 5.0 V。充电接口为 TYPE - C 接口,支持数据传输和软件算法的升级。

1.1.3 稳压驱动模块

稳压驱动模块由线性稳压电路和恒流驱动电路组成。在线性稳压电路中,分别采用芯片 AMS1117 和芯片 REF3130 将 5.0 V 电压稳定在 3.3 V 和 3.0 V,以满足不同模块电源的需求。

恒流驱动电路由恒流芯片和电流调制电路组成,其作用是为多光谱采集探头中的 LED 提供恒定的工作电流,以保证 LED 每次的发光强度一致,提高检测仪的准确性和稳定性。恒流芯片采用 CN5711。该芯片可通过设置电流调制电路的电阻使恒定输出的电流稳定在 0.03 ~ 1.5 A。恒流芯片

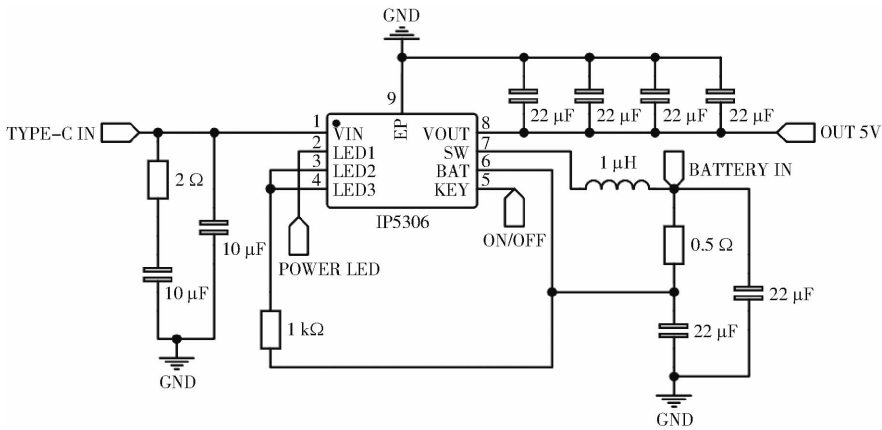


图 2 充放电电路图

Fig. 2 Charging and discharging circuit diagram

输出电流的计算方法为

$$I_{LED} = 360U_{VOP}/R_{ISET} \tag{1}$$

式中 R_{ISET} ——电流调制电路中设置的电阻阻值,Ω

U_{VOP} ——芯片工作电压,取 5 V

I_{LED} ——给 LED 光源提供的工作电流,A

1.1.4 输入输出模块

输入输出模块由 5 个按键、1 个显示屏和 1 个蓝牙芯片组成。按键包括电源按键、测量按键和用于果品检测模式选择的功能按键。显示器采用液晶显示器 (Liquid crystal display, LCD), 其分辨率为 128 像素×160 像素。蓝牙芯片选用成本低、功耗小的 BT-04E, 可以实现检测仪软件算法的远程升级和无线数据传输。

1.1.5 多光谱采集探头

多光谱采集探头由多个特征波长的 LED 光源和数字光电传感器组成。以猕猴桃和梨为对象分别设计了针对两种果品的多光谱采集探头。基于前人对猕猴桃和梨特征波长筛选的研究, 确定了用于检测猕猴桃内部品质的 12 个 LED 峰值波长分别为 640、680、740、780、810、830、840、850、890、900、960、980 nm^[17-18], 用于检测梨内部品质的 12 个 LED 峰值波长为 660、680、700、740、750、810、840、900、940、980、1 020、1 080 nm^[19-20]。LED 采用尺寸为 3.5 mm×2.8 mm×0.8 mm 的贴片型 LED (沃森光电有限公司), 功率为 0.3 W。数字光电传感器采用贴片型传感器 TSL2561 (TAOS 公司, 奥地利)。该传感器的响应波长为 500~1 100 nm, 其内置模数转换器, 可将采集的漫反射光信号以数字信号输出。

LED 以数字光电传感器为中心沿圆周分布。基于前人对光源最佳入射角度的研究^[21], 多光谱采集探头中 LED 的入射角为 45°。采集多光谱时, 每个 LED 依次开启, 数字光电传感器依次采集不同特

征波长下的多光谱 (即数字光强信号), 并送至微处理器。为了防止灰尘和外界光的干扰, 在多光谱采集探头的前端安装有防尘玻璃和遮光罩。

1.1.6 整体结构设计

图 3 为检测仪的主机、多光谱采集探头以及检测仪的原型机。主机与探头的分离式结构使检测仪实现了一机多头、一仪多测的功能。



图 3 检测仪实物图

Fig. 3 Physical drawing of handheld detector

1.2 软件系统设计

在 MDK 5.0 开发环境下用 C 语言开发检测仪的软件。软件主要由主函数、初始化函数、键盘扫描函数、光谱采集函数、模型计算函数、显示函数和无线传输函数组成。初始化函数用于设置各个模块所用到的接口工作模式及各个寄存器的配置; 键盘扫描函数用于检测是否有按键按下以及具体按键, 以执行相应的功能; 光谱采集函数用于依次开启不同波长的 LED, 并采集和保存检测样本对应的多光谱; 模型计算函数用于将多光谱带入模型中进行计算, 以得到检测样本 SSC 和硬度的预测值; 显示函数用于将检测结果、电量以及当前检测仪的工作状态等显示在 LCD 显示屏上; 无线传输函数用于将检测结果通过蓝牙上传至物联网平台。

2 试验材料与方法

2.1 材料

以“华优”猕猴桃 (以下简称猕猴桃) 和“雪”梨

(以下简称梨)为试验样本。所用的猕猴桃和梨样本分别采自陕西省杨凌区的某两个果园。每种水果共用样本 2 批,其中用第 1 批建立预测 SSC 和硬度的模型,并验证模型的性能,第 2 批用于测试检测仪的性能。共用猕猴桃样本 764 个,其中第 1 批 573 个,试验持续 16 d;第 2 批 191 个,试验持续 7 d。共用梨样本 720 个,其中第 1 批 570 个,试验持续 16 d,第 2 批 150 个,试验持续 7 d。测试期间,所用样本置于室温($(22 \pm 1)^\circ\text{C}$)下贮藏。

2.2 试验方法

2.2.1 样本漫反射多光谱采集方法

在采集样本的多光谱前,先将检测仪预热约 10 min。然后将反射率大于 99% 的聚四氟乙烯校正白板放在多光谱采集探头前面,采集 12 个特征波长下该白板的多光谱,记为 T_w 。进而将探头对准果品的赤道部位,采集 12 个特征波长下的样本多光谱,记为 T_s 。根据 T_w 和 T_s 计算样本的漫反射多光谱 T_c ($T_c = T_s/T_w$)。对每个样本同一位置重复测量 3 次,以 3 次测量的平均值作为测量结果。

2.2.2 样本 SSC 和硬度测量

在采集样本的多光谱后,用削皮器削去采集点处的果皮,然后用探头直径为 8 mm 的 GY-4 型数字硬度计(乐清市爱德堡仪器有限公司)测量果肉的硬度。进而用 Model PR-101 α 型数字折射仪

(ATAGO 株式会社,日本)测量采集点处样本的 SSC。每个样本重复 3 次,以 3 次测量的平均值作为测量结果。

2.3 预测模型建立

以漫反射多光谱为输入,以 SSC 和硬度为输出,采用 X-Y 距离的样本划分法(Sample set partitioning based on joint $x-y$ distance,SPXY),按照 3:1 的比例将猕猴桃和梨的第 1 批样本划分为用来建立模型的校正集和验证模型性能的验证集,而将第 2 批样本作为测试仪器性能的测试集。采用偏最小二乘法(Partial least square regression,PLSR)建立预测 SSC 及硬度的模型。以校正相关系数 R_c 、预测相关系数 R_p 、校正均方根误差和预测均方根误差评价模型的性能。

3 结果与分析

3.1 样本统计结果

所用猕猴桃和梨样本 SSC 和硬度统计结果如表 1 所示。由表 1 可知,所用样本的 SSC 和硬度均有较大的变化范围,尤其是猕猴桃硬度,其变异系数超过 50%,说明样本分布较广。另外,对于每个内部品质指标,校正集的范围均大于验证集和测试集,说明样本集划分以及样本使用比较合理。

表 1 所用猕猴桃和梨样本内部品质统计结果

Tab.1 Statistical results of internal quality of used kiwifruit and pear samples							
果品种类	内部品质	样品批次	样本数	样本集	范围	平均值 $\pm$ 标准差	变异系数/%
猕猴桃	SSC	第 1 批	430	校正集	5.5% ~ 18.5%	(13.6 $\pm$ 3.2)%	23.5
			143	验证集	5.9% ~ 18.2%	(13.5 $\pm$ 3.0)%	22.2
		第 2 批	191	测试集	6.3% ~ 18.2%	(13.3 $\pm$ 3.0)%	22.6
	硬度	第 1 批	430	校正集	2.1 ~ 69.0 N	(23.7 $\pm$ 18.3) N	77.2
			143	验证集	2.1 ~ 65.3 N	(22.8 $\pm$ 16.9) N	74.1
		第 2 批	191	测试集	2.2 ~ 63.1 N	(28.3 $\pm$ 15.4) N	54.4
梨	SSC	第 1 批	428	校正集	8.9% ~ 12.8%	(11.4 $\pm$ 0.8)%	7.0
			142	验证集	9.7% ~ 12.3%	(11.2 $\pm$ 0.6)%	5.4
		第 2 批	150	测试集	9.4% ~ 12.6%	(11.0 $\pm$ 0.7)%	6.4
	硬度	第 1 批	428	校正集	19.9 ~ 51.6 N	(32.9 $\pm$ 10.2) N	31.0
			142	验证集	23.3 ~ 46.9 N	(35.7 $\pm$ 8.9) N	24.9
		第 2 批	150	测试集	23.4 ~ 50.9 N	(36.2 $\pm$ 7.2) N	19.9

3.2 漫反射多光谱的结果与分析

图 4 为部分猕猴桃、梨的漫反射多光谱图。由图 4a 可以看出,各猕猴桃样本具有相似的漫反射多光谱,其中在 680 nm 和 960 nm 处有明显的吸收峰。前者主要与猕猴桃果皮中的叶绿素有关^[22],而后者主要与猕猴桃中的水和碳水化合物相关^[23]。梨的吸收峰也出现在 680 nm 和 960 nm。两种果品相比,梨的漫反射率

高于猕猴桃,这可能是由于梨表面比猕猴桃光滑^[24]。

3.3 建模结果

所建 PLSR 模型对猕猴桃和梨的 SSC 和硬度的预测结果如表 2 所示。由表 2 可知,对猕猴桃的预测性能优于梨,其原因可能在于梨表面较为光滑,其果皮表面直接反射的杂散光会给多光谱信息带来噪声,进而影响了模型的预测精度。

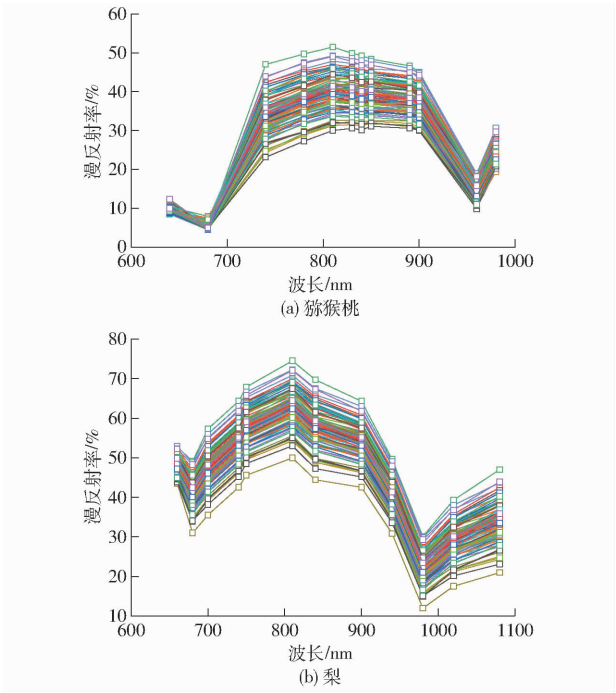


图 4 猕猴桃和梨的漫反射多光谱图

Fig. 4 Diffuse reflectance multi-spectral of kiwifruit and pear

3.4 检测仪性能测试

3.4.1 检测仪稳定性测试

将预测模型导入到检测仪后,任取 5 个猕猴桃和 5 个梨测试检测仪的稳定性。用开发的检测仪重复 10 次测量每个样品的 SSC 和硬度,计算每个样品测量值的标准偏差和变异系数,结果表明,对于猕猴

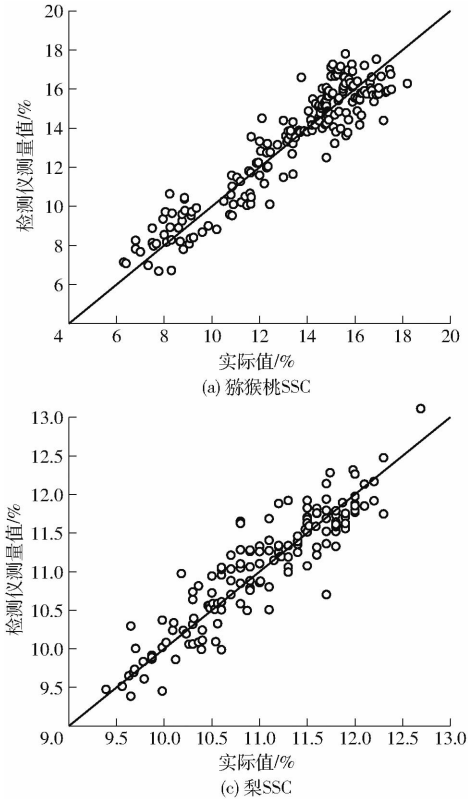


表 2 建模结果

果品种类		校正集		验证集	
		R_c	均方根误差	R_p	均方根误差
猕猴桃	SSC	0.93	1.22%	0.88	1.45%
	硬度	0.92	4.29N	0.84	4.89N
梨	SSC	0.82	0.46%	0.80	0.48%
	硬度	0.81	3.78N	0.78	3.97N

桃的 SSC 和硬度,最大标准偏差分别为 0.08% 和 0.16 N,最大变异系数分别为 0.83% 和 0.54%;对于梨的 SSC 和硬度,最大标准偏差为 0.12% 和 0.36 N,最大变异系数为 1.20% 和 0.90%。所有样品最大变异系数小于 1.20%,说明检测仪具有良好的稳定性。

3.4.2 检测仪准确性测试

利用测试集中的样本对检测仪的准确性进行测试。图 5 为检测仪测量值与样本实际值的散点图,所有点都均匀地分散在 45°线两侧。该检测仪对猕猴桃 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 1.51% 和 5.13 N,测量值与实际值的相关系数分别为 0.86 和 0.81;对梨 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 0.52% 和 4.57 N,测量值与实际值的相关系数分别为 0.79 和 0.76。结果表明,所开发的检测仪能够较准确地测量猕猴桃和梨的 SSC 及硬度,且检测时

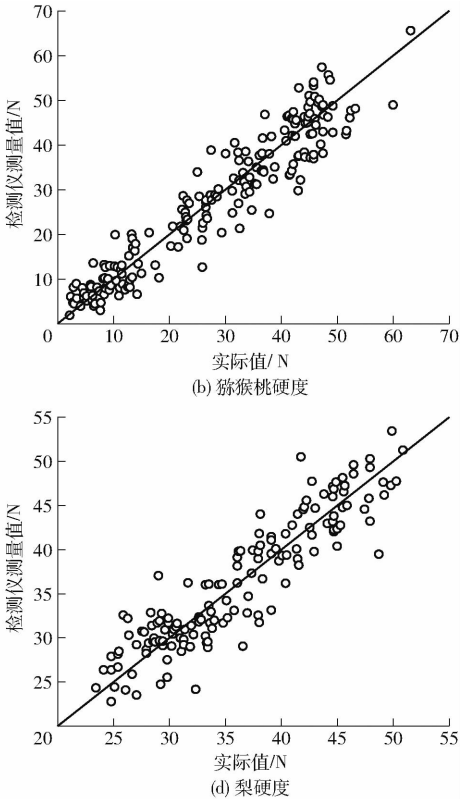


图 5 猕猴桃和梨 SSC 和硬度检测仪测量值与其实际值比较

Fig. 5 Measured SSC and firmness vs their actual values of kiwifruit and pear

间均在 2 s 以内。

4 结 论

(1)开发了适用于检测多果品内部品质的检测仪。该检测仪由主机和多光谱采集探头组成。主机包括微处理器、电源管理模块、稳压驱动模块及输入输出模块;多光谱采集探头包括 LED 和数字光电传感器。

(2)建立了预测猕猴桃和梨 SSC 及硬度的 PLSR 模型,该模型对猕猴桃 SSC 和硬度的预测均方根误差分别为 1.45% 和 4.89 N,对梨 SSC 和硬度的预测均方根误差分别为 0.48% 和 3.97 N。

(3)该检测仪对猕猴桃 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 1.51% 和 5.13 N,对梨 SSC 和硬度的测量均方根误差分别为 0.52% 和 4.57 N,检测时间在 2 s 以内,且具有良好的稳定性。

参 考 文 献

[1] 王转卫,迟茜,郭文川,等. 基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 348-354.
WANG Zhuanwei, CHI Qian, GUO Wenchuan, et al. Internal quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 348-354. (in Chinese)

[2] 高升,王巧华,施行,等. 便携式红提葡萄多品质可见/近红外检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 308-319.
GAO Sheng, WANG Qiaohua, SHI Hang, et al. Design and test of portable red globe grape extraction multi-quality visible/near infrared detector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 308-319. (in Chinese)

[3] GUO W, ZHAO F, DONG J. Nondestructive measurement of soluble solids content of kiwifruits using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 38-47.

[4] GUO W, GU J, LIU D, et al. Peach variety identification using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 297-303.

[5] 窦文卿,柴春祥,鲁晓翔. 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 354-359.
DOU Wenqing, CHAI Chunxiang, LU Xiaoxiang. Research progress of non-destructive detection technique in fruit quality evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 354-359. (in Chinese)

[6] XIA Y, HUANG W, FAN S, et al. Effect of spectral measurement orientation on online prediction of soluble solids content of apple using Vis/NIR diffuse reflectance[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 467-477.

[7] 乔鑫,彭彦昆,王亚丽,等. 手机联用的苹果糖度便携式检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 491-498.
QIAO Xin, PENG Yankun, WANG Yali, et al. Design of portable device for testing sugar content of apples combined with mobile phones[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 491-498. (in Chinese)

[8] MA T, XIA Y, INAGAKI T, et al. Rapid and nondestructive evaluation of soluble solids content (SSC) and firmness in apple using Vis-NIR spatially resolved spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 173(14): 111417.

[9] CAVACO A M, PINTO P, ANTUNES M, et al. ‘Rocha’ pear firmness predicted by a Vis/NIR segmented model[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 42(2): 142-148.

[10] LU Q, TANG M, CAI J, et al. Long-term prediction of Zhonghua kiwifruit dry matter by near infrared spectroscopy[J]. Science Asia, 2010, 36(3): 210-215.

[11] TRAVERS S, BERTELSEN M G, PETERSEN K K, et al. Predicting pear (cv. Clara Frijs) dry matter and soluble solids content with near infrared spectroscopy[J]. LWT—Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1107-1113.

[12] 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): 12982.

[13] 樊书祥,王庆艳,杨雨森,等. 水果糖度可见-近红外光谱手持式检测装置开发与试验[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3058-3063.
FAN Shuxiang, WANG Qingyan, YANG Yusen, et al. Development and experiment of a handheld visible/near infrared device for nondestructive determination of fruit sugar content[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10): 3058-3063. (in Chinese)

[14] 王加华,陈卓,李振茹,等. 洋梨硬度的便携式可见/近红外漫透射检测技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 129-133.
WANG Jiahua, CHEN Zhuo, LI Zhenru, et al. Evaluation of european pear (*Pyrus communis* L.) firmness based on portable Vis/NIR transmittance technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 129-133. (in Chinese)

[15] 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 Mengsheng, et al. Design of apple quality integrated non-destructive testing device based on multi-band LED light source[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 326–332. (in Chinese)
- [16] YANG B, GUO W, HUANG X, et al. A portable, low-cost and sensor-based detector on sweetness and firmness grades of kiwifruit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105831.
- [17] SINGH H, SRIDHAR A, SAINI S S. Ultra-low-cost self-referencing multispectral detector for non-destructive measurement of fruit quality[J]. Food Analytical Methods, 2020, 13(10): 1879–1893.
- [18] 刘卉, 郭文川, 岳绒. 猕猴桃硬度近红外漫反射光谱无损检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 145–149.
LIU Hui, GUO Wenchuan, YUE Rong. Non-destructive detection of kiwifruit firmness based on near-infrared diffused spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 145–149. (in Chinese)
- [19] XIA Y, FAN S, TIAN X, et al. Multi-factor fusion models for soluble solid content detection in pear (*Pyrus bretschneideri* ‘Ya’) using Vis/NIR online half-transmittance technique[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 110: 103443.
- [20] 朱伟兴, 江辉, 陈全胜. 特征波长筛选在近红外光谱测定梨硬度中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 368–372.
ZHU Weixing, JIANG Hui, CHEN Quansheng. Application of characteristic wavelengths selection in determination of pear firmness by near infrared (NIR) spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 368–372. (in Chinese)
- [21] TAN Z, XIE J, CHEN J, et al. Optimization of detection device geometry for NIR spectroscopy using a three-layered model of stone fruit[J]. Optical Review, 2016, 23(5): 1–7.
- [22] MCGLONE V A, JORDAN R B, MARTINSEN P J. Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for ‘Royal Gala’ apple[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 25(2): 135–144.
- [23] NICOLAÏ B M, BEULLENS K, BOBELYN E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(2): 99–118.
- [24] 刘卉. 猕猴桃、桃和梨品质的近红外漫反射光谱无损检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
LIU Hui. Nondestructive detection of kiwifruits, peaches and pears quality based on near-infrared spectroscopy analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
-

(上接第 329 页)

- [34] IRVINE J, LAW B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests[J]. Global Change Biology, 2010, 8(12): 1183–1194.
- [35] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 43–52.
ZHOU Zhenghu, WANG Chuankuan. Changes in carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry between soil and microorganisms during ecosystem succession[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(12): 43–52. (in Chinese)
- [36] HAIMING T, XIAO P X, WEN G T, et al. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on soil organic carbon and carbon management index under a double-cropping rice system in Southern China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49: 1–14.
- [37] WANG F, XU M, STEDTFELD R D, et al. Long-term effect of different fertilization and cropping systems on the soil antibiotic resistome[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(22): 13037–13046.
- [38] ROWINGS D W, GRACE P R, KIESE R, et al. Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest[J]. Global Change Biology, 2012, 18(2): 726–738.
- [39] SCHAUFLEER G, KITZLER B, SCHINDLBACHER A, et al. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61(5): 683–696.
- [40] GREGO S, MARINARI S, MOSCATELLI M C, et al. Effect of ammonium nitrate and stabilised farmyard manure on microbial biomass and metabolic quotient of soil under *Zea mays* L[J]. Agricoltura Mediterranea, 1998, 128(2): 132–137.
- [41] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB, qCO₂) [J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 265–269.
ZHOU Yan, XU Xiangen, WANG Feng, et al. Soil microbial biomass, microbial respiration and its quotient values (qMB, qCO₂) at different elevations in Wuyi Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2): 265–269. (in Chinese)
- [42] 靳宁, 张东彦, 李振海, 等. 基于多光谱卫星模拟波段反射率的冬小麦水分状况评估[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 243–252.
JIN Ning, ZHANG Dongyan, LI Zhenhai, et al. Water condition assessment of winter wheat based on reflectance of simulated band by multi-spectral satellite[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 243–252. (in Chinese)