

山药内部品质无损快速检测装置设计与实验

王威^{1,2} 李永玉^{1,2} 彭彦昆^{1,2} 马劭瑾^{1,2} 吴继峰^{1,2} 张悦湘^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

摘要: 随着山药加工产业的发展,山药品质快速无损检测分级对产业链的健康发展具有实用意义。以研发山药多品质无损快速检测装置为目的,基于可见/近红外局部漫透射原理,根据山药特殊外观特点设计了山药专用检测探头,通过对比实验设计光路,研制了一种手持式山药多品质无损检测装置。装置整体尺寸为 150 mm × 80 mm × 150 mm,质量约 590 g。基于研发装置采集了 150 个山药的光谱信息,采集的光谱经多元散射校正 (Multiplicative scatter correction, MSC) 后再利用随机蛙跳算法 (Shuffled frog leaping algorithm, SFLA) 筛选特征波长,建立了山药干物质、淀粉、蛋白质含量的偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 预测模型,其干物质、淀粉、蛋白质含量的验证集相关系数分别为 0.965 3、0.967 5、0.956 3,均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 分别为 1.09%、0.83%、0.15%,剩余预测偏差 (Residual predictive deviation, RPD) 分别为 3.67、3.50、3.37。基于 Qt 开发工具利用 C 语言编写了实时分析控制软件,并将预测模型植入装置中,进行了外部验证。利用研发装置对 50 个未参与建模的山药样品干物质、淀粉、蛋白质含量进行了 5 次重复检测,其变异系数分别为 1.0% ~ 1.2%、1.5% ~ 1.7%、1.4% ~ 1.6%;50 个山药样本干物质、淀粉、蛋白质含量装置检测结果和标准理化值最大残差绝对值分别为 1.83%、1.64%、0.26%。结果表明,研发的手持式山药多品质无损检测装置可以满足现场实时检测需求。

关键词: 山药; 局部漫透射; 品质参数; 无损检测

中图分类号: S379.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)02-0495-08

OSID:



Design and Test of Non-destructive Rapid Testing Device for Internal Quality of Yam

WANG Wei^{1,2} LI Yongyu^{1,2} PENG Yankun^{1,2} MA Shaojin^{1,2} WU Jifeng^{1,2} ZHANG Yuexiang^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Agricultural Products Processing Technology and Equipment R&D Sub-center, Beijing 100083, China)

Abstract: As a tuber crop with the same origin as medicine and food, yam is becoming more and more favored by people. With the development of yam processing industry, rapid non-destructive testing and grading of yam quality is of great practical significance to the healthy development of the industrial chain. For the purpose of developing a multi-quality non-destructive rapid detection device for yam, based on the principle of visible/near-infrared local diffuse transmission, a special detection probe for yam was designed according to the special appearance characteristics of yam, and a hand-held multi-quality nondestructive testing device for yam was developed by designing the optical path through comparative experiments. The overall dimensions of the device were 150 mm × 80 mm × 150 mm and the weight was about 590 g. Based on the spectral information of 150 yams collected by the R&D device, the collected spectra were corrected by multiplicative scatter correction (MSC), and then the characteristic wavelengths were screened by the shuffled frog leaping algorithm (SFLA) to establish partial least squares regression (PLSR) prediction model of dry matter, starch and protein content of yams, the correlation coefficients of the validation set of dry matter, starch and protein were 0.965 3, 0.967 5 and 0.956 3, respectively, and the root mean square errors were 1.09%, 0.83% and 0.15%, respectively. Based on the Qt development tool, the real-time analysis and control software was written in C language, and the

收稿日期: 2024-01-23 修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600101-06)

作者简介: 王威(1999—),男,博士生,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: wang13033989056@163.com

通信作者: 李永玉(1971—),女,副教授,博士生导师,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究,E-mail: yyli@cau.edu.cn

prediction model was implanted into the device for external verification. The dry matter, starch and protein contents of 50 yam samples not participating in the modeling were detected five times by using the R&D device, and the coefficients of variation were 1.0% ~ 1.2%, 1.5% ~ 1.7% and 1.4% ~ 1.6%, respectively. The absolute values of the maximum residuals of the dry matter, starch and protein of 50 yam samples were 1.83%, 1.64% and 0.26%, respectively. The results showed that the handheld yam multi-quality non-destructive testing device can meet the needs of real-time detection in the field.

Key words: yam; local diffuse transmission; quality parameters; non-destructive testing

0 引言

山药是淀粉含量较高的块茎类作物,具有药、食两用功能。山药对调节脾胃、增强免疫、延缓衰老等有着药理作用,具有良好的市场前景和产品开发潜力。目前市面上常见的山药加工产品有山药淀粉、山药切片、山药脆片等,山药的淀粉、干物质与蛋白质含量等直接影响山药产品的品质及产量^[1-2],特别是对储运、加工等有着较大的影响,山药品质的快速无损检测分级对山药生产、加工、销售等领域具有实用意义。

随着山药加工产业的发展,国内外学者针对山药及其制品进行了快速检测相关研究,目前主要集中于山药以及山药饮片、山药粉末等制品的产区鉴别^[3-13]等。2020年《中国药典》明确规定以山药内部含量为标准对山药药材进行分级管理的规范^[14],部分山药制品生产企业也对山药的含水率、蛋白质含量进行了相关规定^[15],但是目前尚未见到对山药内部成分的无损快速检测相关研究报道。现今,我国山药生产加工销售行业对山药品质的检测分级,主要通过人工方法根据外观进行分级或以传统检测方法抽样检测内部品质,针对山药品质无损检测装置的开发未见相关报道。

本文基于可见/近红外局部漫透射原理,根据山药细长的外部形状以及表面凹凸不平特殊外观特点,设计山药专用检测探头,通过对比实验设计光路,实现不同直径山药特征信息的采集稳定性,以解决山药特征信息采集困难问题。同时,研制手持式山药多品质无损检测装置,建立山药主要品质预测模型,编写实时控制分析软件,以实现山药内部品质的一键式无损实时检测。

1 硬件设计

装置主要由光谱采集模块、光源模块、控制与显示模块、供电模块及外围电路等组成,如图1所示。山药的断面为白色,内部质地较为均匀,因此本研究采用局部漫透射的采集方式获取山药内部光谱信息。两个光源发射的光子45°径向射入样品,基于

山药外部特性设计的专用检测探头紧贴样品并从样品底部采集透过样品的光谱信息并传入微型光谱仪,传入的光信号通过光谱仪转换为数字信号传送给控制模块,控制模块再根据内部植入的山药各品质参数预测模型分析计算各品质参数,并在屏幕上实时显示结果和保存。

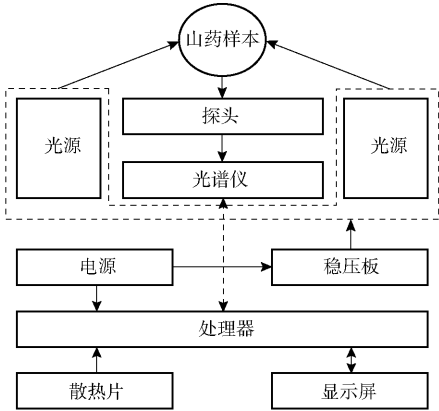


图1 检测装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of detection device

1.1 光谱采集模块

光谱采集模块是检测装置的核心部件,包含光谱仪和探头部分。山药外观呈圆柱形,长60~80 cm,一般食用部分直径20~30 mm,外皮呈黑褐色,表皮上有小疙瘩凹凸不平。山药光谱采集模块的关键是根据山药表皮特点设计专用探头使其紧贴样品表面,并保证采集不同直径山药样品时光谱信息的稳定性。为进一步分析光源不同入射角度对样品光谱信息的影响,设计了光入射角分别为30°、45°、90°的山药光谱采集系统,如图2所示。

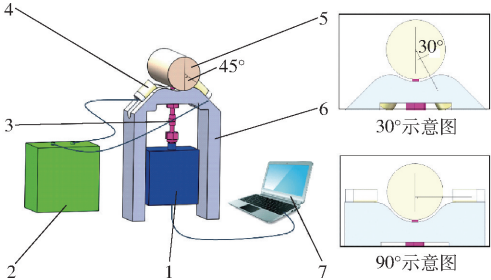


图2 采集系统示意图

Fig. 2 Schematic of acquisition system

1. 光谱仪 2. 电源 3. 短轴光纤 4. 光源 5. 山药样品 6. 支架 7. 计算机

1.1.1 光谱仪选型

山药主要成分为淀粉、水分和蛋白质,水分特征波段在 970 nm 波长附近^[16-17],878 nm 波长附近为淀粉的特征吸收峰^[18],815 nm 处的波长被指定为第 4N-H 泛音,这是蛋白质特征波长^[19]。综合分析选择分辨率为 2.2 nm、波长为 645 ~ 1 085 nm 的美国 OceanInsight 公司生产的 Ocean ST 光谱仪,所选光谱仪波长范围可以覆盖主要内部指标的响应区间。该光谱仪质量为 70.4 g,整体尺寸为 42.1 mm × 40.3 mm × 26.6 mm,适合研发手持式检测装置。

1.1.2 探头设计

光谱采集系统中检测探头直接影响采集数据的稳定性。因山药表面上不均匀分布着颗粒状凸起,为确保检测探头紧贴样品采集透过样品的光谱信息,应尽可能减小探头和山药接触面积,使探头嵌入到凸起疙瘩之间。本研究探头光纤直径为 3 mm,在山药表面随处可以找到适宜检测部位,如图 3a 所示。根据便携式检测装置的需要,设计光纤长度为 36 mm,这种短轴光纤可以有效避免空间占用问题,且不会弯折影响信号接收。将光纤探头固定在如图 3b 所示的弧面上,探头露出弧面 3 mm,避免山药表面凸起的颗粒状疙瘩造成探头与样品贴合不严、漏光等问题。

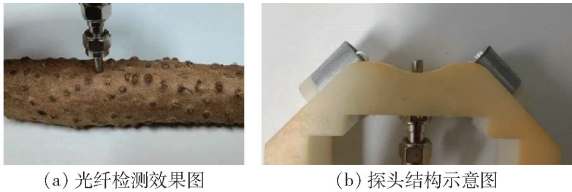


图3 检测探头设计

Fig. 3 Illustration designs of inspection probe

1.2 光源模块

1.2.1 光源选型

选取波长为 360 ~ 2 500 nm 的卤素灯作为光源,包含可见光和近红外光区域,覆盖光谱仪的检测波长范围。另外,山药作为含水率较高的根茎类作物,温度过高会对内部成分造成不可逆的影响^[20],同时为避免表面发生灼伤,光源温度控制在 50℃ 以下。不同功率光源的光强对比结果和光源开启时长与温度变化曲线如图 4 所示,通过对比分析最终选用 2.1 W 超高亮卤素灯(美国 WelchAllyn 公司)作为装置光源。

1.2.2 光入射角度确定

基于如图 1 所示的光谱采集系统,对同一山药样品采集了入射角度分别为 30°、45°、90°的山药局部透射光谱信息,重复采集 5 次取平均作为原始光

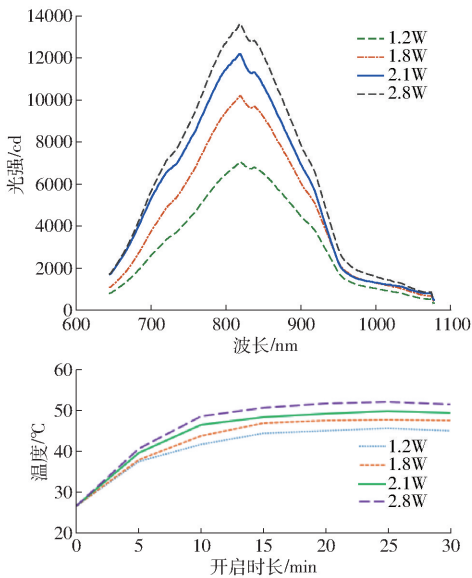


图4 光源模块功率选择

Fig. 4 Light source module power selection

谱,采集的不同入射角的山药光谱如图 5 所示。结果显示,入射角为 30°和 90°时光强相对较低,得到的光谱信息相对容易受到噪声的影响。入射角为 45°时光强最高,信噪比相对较高。为进一步对比分析不同入射角对检测结果的影响,选取 40 个山药样本采集了 3 种不同入射角的光谱信息,分别建立了干物质含量(质量分数)的偏最小二乘预测模型,结果如表 1 所示。结果显示,入射角为 45°时预测模型结果最佳,其校正集和验证集相关系数分别为 0.963 8、0.939 8,均方根误差分别为 0.94%、1.36%,完全符合不同入射角度下的光强对比分析结果。因此便携式山药品质检测装置的光源入射角确定为 45°。

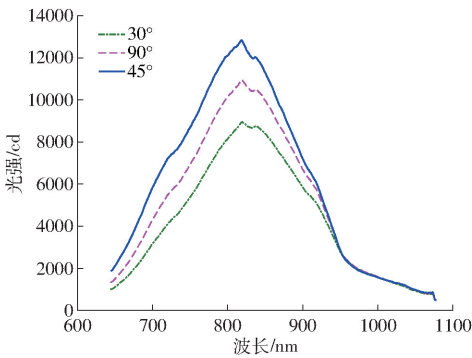


图5 不同入射角光强对比

Fig. 5 Comparison of light intensity at different incidence angles

1.3 控制与显示模块

选择 raspberry3B + 作为装置的总控模块,raspberry3B + 环境适应性强,处理速度快,可以有效缩减程序运行时间,高速高效完成检测工作。通过raspberry3B + 连接3.2inch电阻式触摸显示屏

表 1 不同入射角度干物质含量建模结果

Tab.1 Modeling results for different incidence angles				
入射角/ (°)	校正集相 关系数	校正集均 方根误差/%	验证集相 关系数	验证集均方 根误差/%
30	0.937 8	1.22	0.859 5	1.97
45	0.963 8	0.94	0.939 8	1.36
90	0.935 1	1.25	0.910 9	1.66

作为装置的显示模块,显示模块承担人机交互和信息显示的功能,可以实时监测光谱曲线是否异常。为保证装置能够长时间正常运行,raspberry3B + 的 CPU 部位额外搭载了散热片,可对 raspberry3B + 的主板进行降温,避免温度过高造成宕机。

1.4 供电模块

便携式装置的供电模块应该保证装置室外工作的需求,本研究选用可充电式锂电池作为装置的供电模块。光谱仪、控制器、显示器输入电压均为 5 V,光源输入电压为 3.3 V,选用输出电压为 5 V 的可充电锂电池,电池通过并联电路分别向控制器部分以及光源部分供电。其中树莓派功耗约为 5 W,光源约为 4.2 W,经计算选择电量为 6 A·h 的锂电池,可以满足户外连续工作约 3 h。

2 软件开发

基于 Qt5 在 raspberry3B + 进行交互式软件的开发,采用 C 语言编写了实时分析控制软件,软件流程如图 6a 所示。软件控制系统各模块协同工作,采集光谱前点击黑白参考按钮对光谱仪进行校正,通过外部触发按钮或点击屏幕采集按钮启用光谱仪进行光谱采集,采集完成后,系统自行调用预植入的数学模型进行结果分析,并将山药品质的预测结果及光谱曲线实时显示在显示屏上。该软件可实现一键式操作,同时具有光谱信息和结果保存等功能,人机交互界面如图 6b 所示。点击检测按钮到将结果显示在显示屏上所需时间约 2 s。

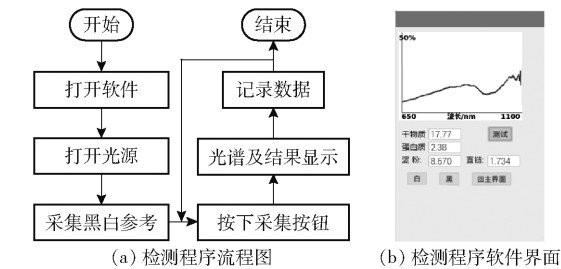


图 6 检测流程及检测界面图

3 整机设计及光谱采集稳定性测试

3.1 整机结构设计

整机设计是在保证装置各模块正常运行的前提下,合理利用装置内部空间。硬件结构布局如图 7a

所示,将光谱仪与 raspberry3B + 远离发热较高的光源,固定在装置中部,避免温度过高出现故障。检测装置实物图如图 7b 所示,整体尺寸为 150 mm × 80 mm × 150 mm,质量约为 590 g。

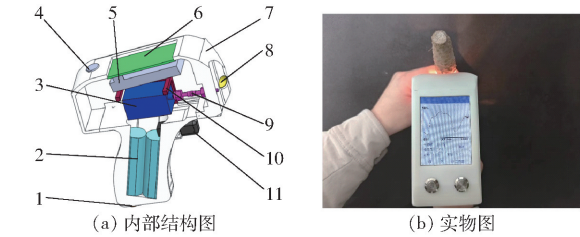


图 7 手持式山药多品质检测装置示意图

Fig.7 Schematics of handheld yam multi-quality detection device

- 1. 充电孔 2. 电池 3. 光谱仪 4. 开关 5. 处理器 6. 屏幕
- 7. 外壳 8. 光源 9. 短轴光纤 10. 光谱仪支架 11. 外部触发按钮

3.2 装置的光谱信息采集稳定性

基于所搭建的便携式山药多品质无损检测装置,选取直径为 20.5 ~ 29.4 mm 的 13 个山药样本,每个样本重复采集 5 次光谱,分析其变异系数以验证装置对不同直径样本的检测稳定性,结果如图 8 所示。不同直径山药样品变异系数为 0.24% ~ 0.68%,即检测装置可以有效保证不同尺寸山药光谱的稳定性。

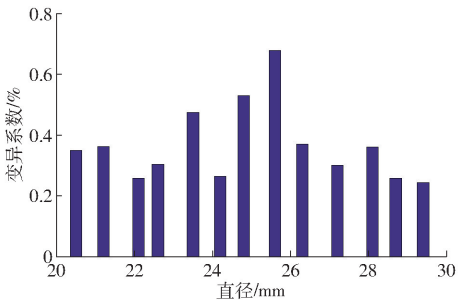


图 8 检测系统对不同尺寸山药检测的变异系数

Fig.8 Coefficient of variation of detection system for different sizes of yams

4 山药多品质参数预测模型建立

4.1 实验材料

选用 150 个市售铁棍山药作为实验材料,在 4℃ 冷藏保存,实验前为消除温度影响将待测山药样本在室温(20℃)环境中放置 24 h 以上。

4.2 实验方法

光谱采集:采集前将仪器光源打开预热 15 min,采集黑白参考并保存。将探头嵌入山药表面疙瘩状凸起间的缝隙,紧贴表面光滑部分进行采集,重复采集 3 次光谱后取均值作为该山药原始光谱。

理化值测定:采用文献[21 – 23]方法测定山药样品干物质、淀粉、蛋白质含量。基于本研究的采集系统设计,光源所能覆盖的山药长度为约 30 mm,如图 9 所示。因此,测定理化值时以探头与山药接触部位为中心,选取长度为 30 mm 的山药段作为本次理化值测定的有效样本。

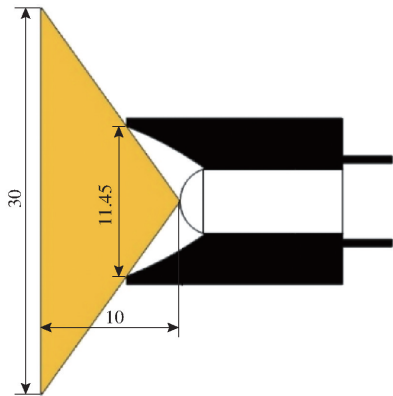


图 9 山药有效检测长度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of effective detection length of yam

4.3 样本集划分

基于 KS 算法,按照比例 3: 1,将 150 个铁棍山药样品划分为校正集和验证集,干物质、淀粉、蛋白质含量的理化值分布如表 2 所示。

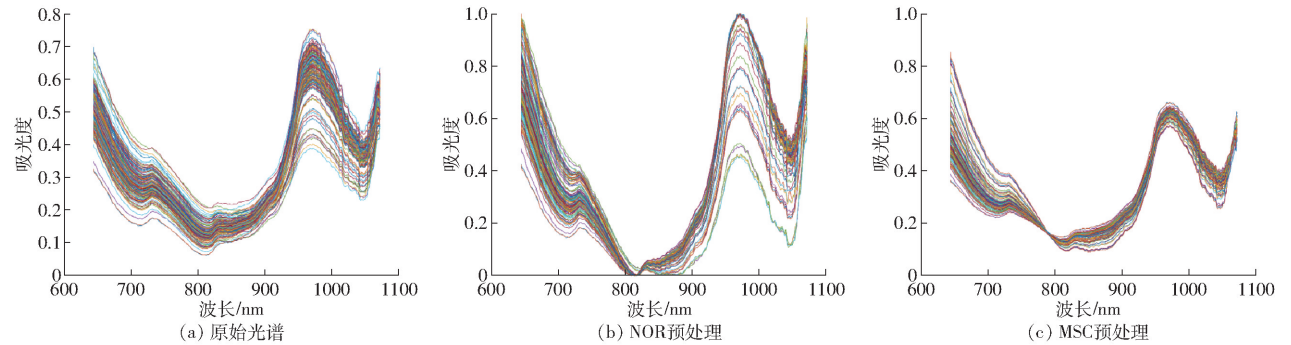


图 10 山药光谱曲线

Fig. 10 Yam spectral curves

基于 150 个铁棍山药光谱与理化值,建立了干物质、淀粉、蛋白质含量的 PLS 预测模型。结果如表 3 所示。经 NOR 与 MSC 预处理后的建模结果显著优于原始光谱,其中 MSC 预处理对山药干物质、淀粉、蛋白质含量的预测结果相对较好,其验证集的相关系数分别为 0.946 6、0.942 1、0.930 4,验证集均方根误差分别为 1.28%、0.98%、0.19%,剩余预测偏差分别为 3.12、2.96、2.66。

全光谱建模所有波长点都参与计算会加大处理负担并影响处理器的计算速度,因此本研究采用 SFLA 算法对样本光谱进行特征波长筛选。SFLA 算法通过多次迭代,计算每个变量被选择的概率,以被选概率高的变量为特征波长^[26]。MSC 处理后的全

表 2 KS 算法划分山药样本集数据统计

Tab. 2 Data statistics of yam samples using KS algorithm to divide sample set

参数	校正集			验证集		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
干物质含量	12.44	27.51	21.28	11.53	27.18	20.96
淀粉含量	9.18	19.90	15.25	8.03	19.52	15.05
蛋白质含量	1.46	3.36	2.54	1.52	3.30	2.50

4.4 山药品质预测模型建立

基于所研发装置采集 150 个铁棍山药样品光谱曲线,原始光谱曲线如图 10a 所示。为减少外部不相关因素的干扰,剔除噪声并提取有用信息,提高预测模型的精度,本研究分别用归一化 (Normalize, NOR)、MSC 等对山药光谱进行了预处理,结果如图 10b、10c 所示。与原始光谱相比 NOR 预处理消除了光程变化对光谱信息的影响,有效减弱了噪声^[24],凸显了在波长 970、878 nm 等附近的水分、淀粉的吸收特征。MSC 预处理可以有效消除因颗粒大小及颗粒分布不均所引起的光谱散射的影响^[25],与 NOR 相比凸显了波长 815、878 nm 等处蛋白质、淀粉的吸收特征,显著缩小了 970 nm 附近水分的吸收特征,说明山药样品内部淀粉等小颗粒物质的光散射对水分吸收峰的影响比较大。

表 3 不同预处理方式下山药品质 PLS 建模结果

Tab. 3 PLS modeling results of yam quality under different pretreatment methods

参数	预处理方式	校正集	校正集均	验证集	验证集	剩余
		相关系数	方根误差差/%	相关系数	均方根误差/%	
干物质含量	无	0.941 8	1.11	0.937 3	1.40	2.86
	MSC	0.978 4	0.68	0.946 6	1.28	3.12
	NOR	0.960 5	0.92	0.943 8	1.32	3.03
淀粉含量	无	0.933 6	0.88	0.921 2	1.18	2.46
	MSC	0.968 8	0.61	0.942 1	0.98	2.96
	NOR	0.959 5	0.69	0.942 0	1.00	2.90
蛋白质含量	无	0.915 4	0.16	0.914 1	0.20	2.53
	MSC	0.943 6	0.13	0.930 4	0.19	2.66
	NOR	0.926 9	0.15	0.916 5	0.20	2.53

光谱 1 516 个波长点按被选概率进行排列,依据被选概率从高到低选取不同数量的波长点作为建模变量,通过所建模型的均方根误差表征模型效果。如图 11 所示,在 200 个波长点处模型效果最优,因此本研究选取被选概率最高的前 200 个波长点作为特征波长。

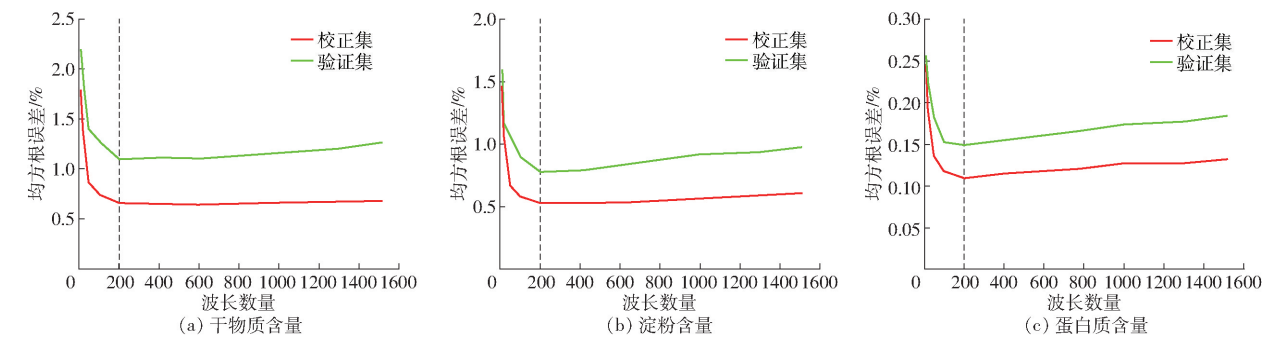


图 11 特征波长数量筛选结果

Fig. 11 Characteristic wavelength number filtering result plots

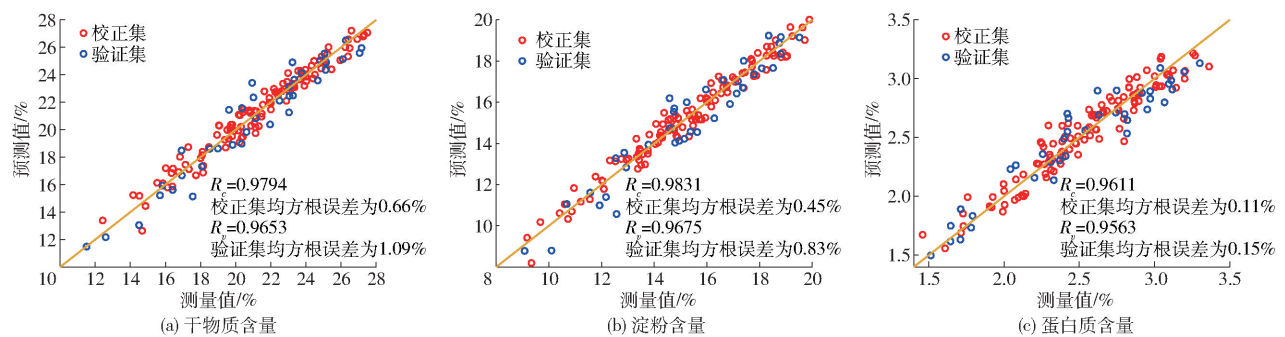


图 12 山药品质模型预测结果散点图(MSC-SFLA)

Fig. 12 Scatter plots of yam quality model results (MSC-SFLA)

5 便携式山药多品质无损检测装置验证

基于研发的便携式山药品质无损检测装置,选取 50 个未参于建模的铁棍山药样本进行了外部验证。基于研发装置分别对每个样本同一部位重复检测 5 次干物质、淀粉、蛋白质含量,并分析其变异系数以验证装置稳定性。如图 13 所示,干物质含量变异系数为 1.0% ~ 1.2%,淀粉含量变异系数为 1.5% ~ 1.7%,蛋白质含量变异系数为 1.4% ~

基于 SFLA 算法筛选出的 200 个特征波长点对各品质参数分别建立了 PLS 预测模型,结果如图 12 所示,与全波段光谱建模结果相比,干物质、淀粉、蛋白质含量的验证集均方根误差明显下降,分别为 1.09%、0.83%、0.15%,剩余预测偏差分别提升到 3.67、3.50、3.37。

1.6%。说明该装置对干物质、淀粉、蛋白质含量的检测稳定性较好。

为验证研发装置的检测精度,对每个山药样品干物质、淀粉、蛋白质含量的装置预测结果与其标准理化值进行了残差分析,结果如图 14 所示。干物质、淀粉、蛋白质含量最大残差绝对值分别为 1.83%、1.64%、0.26%。以上结果表明,研发的便携式山药多品质无损检测装置的检测精度可以满足现场实时检测需求。

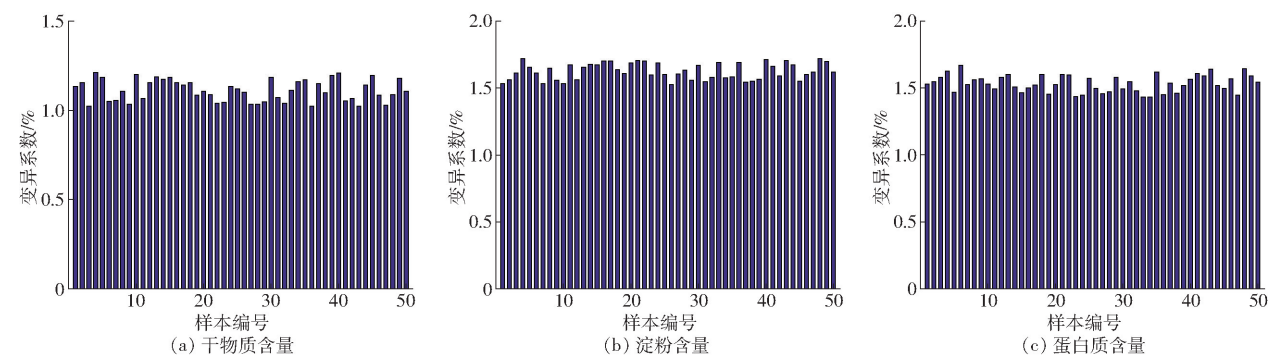


图 13 变异系数分布图(外部验证)

Fig. 13 Coefficient of variation distribution map (external validation)

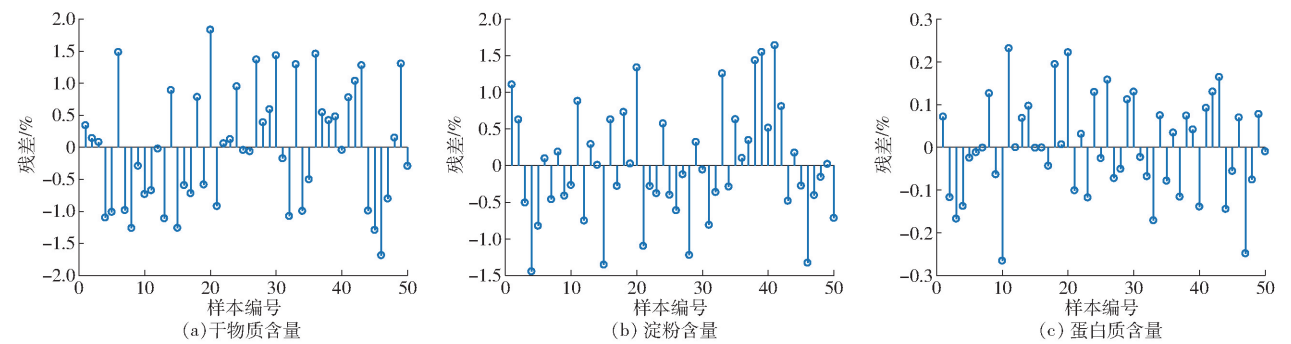


图 14 残差分析图(外部验证)

Fig. 14 Residual analysis diagram (external validation)

6 结论

(1)设计了手持式山药多品质无损快速检测装置。基于可见/近红外局部漫透射原理,根据山药外观特点设计了山药专用检测探头,实现了不同直径山药特征信息的采集稳定性。装置包括光源模块、光谱采集模块、控制模块、供电模块、显示模块,整个装置尺寸为 150 mm×80 mm×150 mm,质量约 590 g。

(2)基于研发装置建立了山药干物质、淀粉、蛋白质含量的预测模型。采集 150 个山药样本光谱,原始光谱通过 MSC 预处理后,使用 SFLA 筛选出特征波长,建立了山药内部品质的 PLS 预测模型,干物质、淀粉、蛋白质含量的验证集相关系数分别为

0.965 3、0.967 5、0.956 3,均方根误差分别为 1.09%、0.83%、0.15%,剩余预测偏差分别为 3.67、3.50、3.37。

(3)基于 C 语言开发了实时分析控制软件,并将预测模型植入装置中,进行了外部验证。利用研发装置选取 50 个未参与建模的山药样本,对其干物质、淀粉、蛋白质含量进行了检测,每个样品重复检测 5 次,其干物质、淀粉、蛋白质含量变异系数分别为 1.0%~1.2%、1.5%~1.7%、1.4%~1.6%;50 个山药样本的干物质、淀粉、蛋白质含量装置检测结果与标准理化值最大残差绝对值分别为 1.83%、1.64%、0.26%。结果表明,研发的手持式山药多品质无损检测装置可以满足现场实时检测需求。

参 考 文 献

[1] 曾介玉,黄浚源,黎攀,等. 山药的加工及综合利用研究进展[J]. 食品科技,2022, 47(4): 62–68.
ZENG Jieyu, HUANG Junyuan, LI Pan, et al. Advances in the processing and comprehensive utilization of yam[J]. Food Science and Technology,2022, 47(4): 62–68. (in Chinese)

[2] 林晓丽,郎凯瞳,郑宝东,等. 山药营养功能特性及其产品开发现状[J]. 食品与发酵工业,2023, 49(6): 339–346.
LIN Xiaoli, LANG Kaitong, ZHENG Baodong, et al. Research progress of functional properties of Chinese yam and development of its products[J]. Food and Fermentation Industries,2023, 49(6): 339–346. (in Chinese)

[3] ADESOKAN M, ALAMU E O, OTEGBAYO B, et al. A review of the use of near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) techniques for the non-destructive quality assessment of root and tuber crops[J]. Applied Sciences,2023, 13(9): 5226.

[4] ALAMU E O, NUWAMANYA E, CORNET D, et al. Near-infrared spectroscopy applications for high-throughput phenotyping for cassava and yam: a review[J]. International Journal of Food Science and Technology,2021, 56(3): 1491–1501.

[5] EHOUNOU A E, CORNET D, DESFONTAINES L, et al. Predicting quality, texture and chemical content of yam (*Dioscorea alata* L.) tubers using near infrared spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy,2021, 29(3): 128–139.

[6] 龚海燕,白雁,宋瑞丽,等. 近红外光谱结合聚类分析鉴别铁棍山药和白玉山药[J]. 中国医院药学杂志,2010,30(9):735–737.
GONG Haiyan, BAI Yan, SONG Ruili, et al. The discrimination of Tiegun Yam and Baiyu Yam using near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy,2010, 30(9): 735–737. (in Chinese)

[7] 龚海燕,宋瑞丽,李珊,等. 近红外光谱结合一致性检验对铁棍山药的鉴别研究[J]. 计算机与应用化学,2010,27(7):967–969.
GONG Haiyan, SONG Ruili, LI Shan, et al. The discrimination of Tiegun Yam using NIR combine conformity test[J]. Computers and Applied Chemistry,2010, 27(7): 967–969. (in Chinese)

[8] SOUMA C, OKUMURA O, KATO J, et al. Nondestructive evaluation of quality (percentage dry matter and viscosity) of Chinese yam by photo sensor[J]. Bulletin of Hokkaido Prefectural Agricultural Experiment Stations,2007(91): 15–22.

[9] ZHUANG H, NI Y, KOKOT S. A. Comparison of near- and mid-infrared spectroscopic methods for the analysis of several nutritionally important chemical substances in the Chinese yam (*Dioscorea opposita*): total sugar, polysaccharides, and flavonoids[J]. Applied Spectroscopy,2015, 69(4): 488–495.

[10] 白雁,龚海燕,宋瑞丽,等. 近红外漫反射光谱法快速测定山药药材中多糖的含量[J]. 中成药,2010, 32(1): 110–112.
BAI Yan, GONG Haiyan, SONG Ruili, et al. Near-infrared diffuse reflectance spectrometry was used to rapidly determine the content of polysaccharides in yam medicinal materials[J]. Chinese Traditional Patent Medicine,2010, 32(1): 110–112. (in Chinese)

- [11] 白雁, 龚海燕, 宋瑞丽, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定山药药材中水、醇浸出物含量[J]. 中国现代应用药学, 2010, 27(2): 163–166.
BAI Yan, GONG Haiyan, SONG Ruili, et al. Quantitative analysis on extracts by water and ethanol in rhizoma dioscoreae by near-infrared diffuse reflection spectroscopy[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2010, 27(2): 163–166. (in Chinese)
- [12] 杜敏, 吴志生, 巩颖, 等. 基于近红外光谱技术的道地山药快速无损分析[J]. 世界中医药, 2013, 8(11): 1277–1279.
DU Min, WU Zhisheng, GONG Ying, et al. Non-destructive analysis of genuine Chinese yam by near infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. World Chinese Medicine, 2013, 8(11): 1277–1279. (in Chinese)
- [13] 李长滨, 牛畅伟, 苏丽, 等. 不同产地山药的近红外鉴别和差异分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(15): 175–181.
LI Changbin, NIU Changwei, SU Li, et al. Identification and variance analysis of Chinese yam from different origins by near infrared spectroscopy[J]. Food Research and Development, 2022, 43(15): 175–181. (in Chinese)
- [14] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 1088.
- [15] 河北佳露食品科技有限公司. 山药干制品: Q/HBJL 0001 S—2021[S]. 2021.
- [16] 侯瑞, 吉海彦, 饶震红, 等. 基于近红外光谱的活体植物叶片水分检测仪器[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2): 92–96.
HOU Rui, JI Haiyan, RAO Zhenhong, et al. Water detection instrument design for living leaves based on near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Sup. 2): 92–96. (in Chinese)
- [17] 张东兴, 刘江, 杨丽, 等. 基于 VIS–NIR 的播种沟内土壤水分测量传感器研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 218–226.
ZHANG Dongxing, LIU Jiang, YANG Li, et al. Soil moisture measurement sensor research in seeding ditch based on VIS–NIR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 218–226. (in Chinese)
- [18] 丁继刚, 韩东海, 李永玉, 等. 基于可见/近红外漫透射光谱的马铃薯黑心病及淀粉含量同时在线无损检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1909–1915.
DING Jigang, HAN Donghai, LI Yongyu, et al. Simultaneous non-destructive on-line detection of potato black-heart disease and starch content based on visible/near infrared diffuse transmission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1909–1915. (in Chinese)
- [19] WU D, NIE P, HE Y, et al. Spectral multivariable selection and calibration in visible-shortwave near-infrared spectroscopy for non-destructive protein assessment of spirulina microalga powder[J]. International Journal of Food Properties, 2013, 16(5): 1002–1015.
- [20] 张薇, 王泽槐, 许静芬. 淮山药微波干燥过程温度水分的特征变化研究[J]. 中药材, 2005(9): 21–25.
ZHANG Wei, WANG Zehuai, XU Jingfen. Study on model of heat and mass transfer in dioscorea opposita with microwave drying technique[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2005(9): 21–25. (in Chinese)
- [21] 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, 2016.
- [22] 徐昌杰, 陈文峻, 陈昆松, 等. 淀粉含量测定的一种简便方法——碘显色法[J]. 生物技术, 1998(2): 41–43.
XU Changjie, CHEN Wenjun, CHEN Kunsong, et al. A simple method for determining the content of starch-iodine colorimetry [J]. Biotechnology, 1998(2): 41–43. (in Chinese)
- [23] 国家标准化管理委员会. 食品中蛋白质的测定: GB/T 5009.5—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [24] 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)
- [25] 鲁兵, 王旭峰, 何珂, 等. 椰糠基质有效氮近红外检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 316–324.
LU Bing, WANG Xufeng, HE Ke, et al. Design and test of near infrared detecting instrument for available nitrogen in coco-peat substrate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 316–324. (in Chinese)
- [26] 刘莉, 陶红燕, 方静, 等. 基于近红外高光谱的梨叶片炭疽病与黑斑病识别[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 221–230.
LIU Li, TAO Hongyan, FANG Jing, et al. Identifying anthracnose and black spot of pear leaves on near-infrared hyperspectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 221–230. (in Chinese)