

# 快速光谱技术在水果糖度无损检测中的应用与研究进展

马炜懿<sup>1,2</sup>, 李虹雨<sup>1,2</sup>, 程斌<sup>1,2</sup>, 刘雯<sup>1,2</sup>, 蒋吉<sup>1,2</sup>, 周杰<sup>2,3</sup>, 吴永忠<sup>2,3</sup>, 谭超<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>宜宾学院过程分析与控制四川省高校重点实验室, 四川 宜宾

<sup>2</sup>宜宾学院材料与化学工程学院, 四川 宜宾

<sup>3</sup>宜宾天原集团, 四川 宜宾

收稿日期: 2025年10月7日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月10日

## 摘要

水果糖度是衡量其品质与商品价值的核心指标, 直接影响消费者口感体验与市场竞争力。当前水果生产与流通中, 传统糖度检测方法因破坏性强、检测效率低、依赖专业操作等局限, 难以满足规模化、快速化的品质管控需求。本文系统综述近红外光谱、中红外光谱及高光谱成像三种现代无损光谱检测技术的原理, 总结其在柑橘与其他水果糖度检测中的应用现状与研究进展, 旨在为快速光谱技术在水果糖度无损检测领域发展更深入的应用提供理论参考。

## 关键词

水果糖度, 近红外光谱, 中红外光谱, 高光谱成像

# Application and Research Progress on Rapid Spectroscopic Techniques for Non-Destructive Detection of Fruit Sugar Content

Weiye Ma<sup>1,2</sup>, Hongyu Li<sup>1,2</sup>, Bin Cheng<sup>1,2</sup>, Wen Liu<sup>1,2</sup>, Ji Jiang<sup>1,2</sup>, Jie Zhou<sup>2,3</sup>, Zhongyong Wu<sup>2,3</sup>, Chao Tan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Process Analysis and Control of Sichuan Universities, Yibin University, Yibin Sichuan

<sup>2</sup>College of Materials and Chemical Engineering, Yibin University, Yibin Sichuan

<sup>3</sup>Yibin Tianyuan Group, Yibin Sichuan

\*通讯作者。

文章引用: 马炜懿, 李虹雨, 程斌, 刘雯, 蒋吉, 周杰, 吴永忠, 谭超. 快速光谱技术在水果糖度无损检测中的应用与研究进展[J]. 分析化学进展, 2025, 15(4): 370-379. DOI: 10.12677/aac.2025.154036

## Abstract

Fruit sugar content serves as a critical benchmark for quality and commercial value, directly influencing consumer sensory experience and market competitiveness. Traditional methods for determining sugar content are inherently destructive, inefficient, and require specialized operation, rendering them unsuitable for the large-scale, rapid quality control demands of modern fruit production and supply chains. This paper systematically examines the principles of three modern non-destructive spectroscopic techniques—Near-Infrared (NIR), Mid-Infrared (MIR), and Hyperspectral Imaging (HSI), and reviews their application status and research progress in measuring sugar content in citrus and other fruits. The aim is to provide a theoretical reference for fostering more profound applications of rapid spectroscopic technologies in the non-destructive detection of fruit sugar content.

## Keywords

Fruit Sugar Content, NIRS, MIRS, HSI

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水果作为人体摄入维生素、矿物质及膳食纤维的重要来源，其品质安全备受消费者关注[1]。糖度作为反映水果甜度、风味及成熟度的关键指标，不仅决定消费者食用体验，更是水果分级定价、加工工艺设计的核心依据[2]。随着水果产业规模化发展，市场对糖度检测的“快速化、无损化、精准化”需求日益迫切。

传统检测方法如折光仪法[3][4]、斐林试剂滴定法[5]虽精度较高，但需对水果进行榨汁、取样等破坏性操作，且检测周期长，无法实现批量样品的实时筛查[5][6]。近年来，现代光谱技术凭借“无损、快速、灵敏度高”等优势，成为水果糖度检测领域的研究热点。该技术通过检测水果内部化学成分(如糖分中的C-H、O-H基团)对特定波长光的吸收与反射，并利用化学计量学方法建立预测模型，从而实现糖度的无损检测[7][8]。目前，应用于水果糖度检测的主流光谱技术包括近红外光谱、中红外光谱及高光谱成像技术[9]-[11]，三者检测效率、精度及适用场景上各有侧重。本文综述三种光谱技术的原理与应用进展，分析现有研究局限，为后续技术优化与产业应用提供参考。

## 2. 光谱分析检测技术

光谱学分析技术可捕捉水果对特定波长光的响应信号，从中提取与糖度相关的化学信息。不同水果的蔗糖、葡萄糖、果糖等糖分分子结构存在差异，其含氢基团(C-H、O-H)的振动倍频与合频，会在光谱中形成特定特征吸收峰；通过解析这些峰的强度与位置，即可实现水果糖度的定性与定量分析[12]。

近红外光谱(Near-infrared, NIR)的波长范围为780~2526 nm，其吸收特性是源于含氢官能团X-H(X代表C、N、O等元素)振动产生的倍频与合频信号，这些信号蕴含绝大多数有机化合物的组成与分子结构信息[13]。通过测量水果在不同波长处的近红外吸收或反射光谱，结合化学计量学方法与数学模型，可精准分析水果糖度及糖分组成，实现快速无损检测。通过测量水果样品在不同波长处的近红外吸收或反射

光谱, 与化学计量学方法及建立的数学模型相结合, 可精准分析出被扫描水果样品的糖度水平及相关糖分组成, 进而实现对水果糖度的快速、无损检测分析。

中红外光谱技术(Mid-infrared, MIR)的分析原理是分子对中红外区(2500~25,000 nm)光子的吸收[14]。该光子能量与分子内化学键的振动能级差相匹配, 当振动引起分子偶极矩变化时, 便会发生共振吸收。不同化学键或官能团(如 O-H、C-H、C=O)因其振动模式特定, 在光谱中呈现出特征吸收峰, 从而为解析分子结构与含量提供了依据[15]。在水果糖度检测中, 糖类物质分子中的 C-O 和 O-H 等化学键在中红外区域具有强烈的特征吸收[16][17]。通过与化学计量学方法相结合, 可以建立光谱数据与水果糖度值之间的定量预测模型, 实现对水果糖度的快速、准确检测[18]-[20]。该技术具有检测速度快、样品前处理简单、无需化学试剂等优点, 近年来在水果内部品质无损检测领域展现出良好的应用前景。

高光谱成像技术(Hyperspectral imaging, HSI)是一种融合了成像技术和光谱技术的先进分析技术。其可在紫外、可见光、近红外乃至中红外光谱范围内, 以数百个连续且狭窄的波长波段对物体同时成像, 从而同步捕获被测物体的空间轮廓信息与每个像素点处的连续光谱信息, 形成包含三维数据的“超立方体”[21][22]。当水果内部糖度存在空间分布差异时, 不同糖度区域的光谱特征会呈现显著差异。通过对高光谱图像中每个像素点的光谱数据进行分析, 可以建立光谱特征与糖度值之间的定量关系模型, 从而实现水果糖度的可视化分布检测。高光谱成像能够获取从可见光到近红外光谱范围内多个连续且狭窄波段的光谱信息, 具有快速、无损、精准的优点, 广泛应用于水果内部品质的无损检测分析[23][24]。

为进一步明确近红外光谱、中红外光谱及高光谱成像技术的选型依据, 表 1 旨在通过系统对比其技术原理、实施成本、综合性能与适用场景等核心特征, 为后续的战略决策提供一个高度概括的指导框架。

**Table 1.** Comparative analysis of core characteristics: NIR, MIR, and HSI

**表 1.** NIR、MIR 与 HSI 核心特性对比表

检测技术	近红外光谱	中红外光谱	高光谱成像
基本原理	检测含氢基团(O-H, C-H)的倍频与合频吸收	检测分子基团(O-H, C-O 等)的特征振动基频吸收	同时获取每个像素点的连续光谱信息, 形成“图谱合一”的三维数据立方体
主要优势	穿透能力强, 适合深层成分分析技术成熟, 易于实现在线检测设备种类丰富, 可选性强	特征吸收峰尖锐、明确, 特异性强对糖类分子结构解析能力更强 定量分析精度高	可提供成分空间分布 可视化信息兼具内部成分检测与外部缺陷识别能力 信息量极大, 模型潜力大
主要局限	光谱信号重叠严重, 依赖复杂的化学计量学模型 易受水分干扰, 需精细预处理	光子能量高, 穿透深度浅, 多用于透射模式或衰减全反射(ATR)模式, 对样品形态有要求 在线检测系统成本较高	数据量大, 采集与处理速度慢, 对计算资源要求高, 系统复杂, 成本高昂 多用于实验室研究, 在线应用难度大
成本分析	中低(便携式)至高(在线式)	中(ATR 附件)至高(专用 MIR 成像系统)	高(实验室级)至极高(在线高速系统)
适用场景	水果产后在线高速分选、便携式田间筛查	实验室精准定量分析、糖分组成与转化研究	品质分布可视化研究、内外品质同步检测、机理深度探究

## 2.1. 近红外光谱技术在水果糖度检测中的应用

关于近红外光谱技术在柑橘糖度检测中的应用, 陈姿伊等[25]以 260 个外观一致的柑橘为研究对象, 通过糖度计测定其可溶性固形物含量作为参考值, 利用近红外光谱技术进行无损检测分析。研究采用 SG 平滑、MSC 和 SNV 对光谱进行预处理, 并通过 10 折交叉验证构建预测模型。模型在测试集上均方根误差(MSE)与平均相对误差(MRE)分别为 0.321% 和 0.0416%, 验证了该方法的高精度与稳定性, 显著优于传

统破坏性检测方法。曾贤明等[26]利用漫透射近红外光谱技术,选取蜜橘样本 63 个,结合偏最小二乘法(PLS)建立近红外光谱与柑橘糖度之间的定量模型。结果表明近红外光谱可快速定量检测柑橘糖度,校正集相关系数为 0.8975、均方根误差为  $0.4309^{\circ}\text{Brix}$ ,预测集相关系数为 0.8876、均方根误差为  $0.4560^{\circ}\text{Brix}$ ,可以满足柑橘糖度定量检测的需要。文韬等[27]利用近红外光谱技术,设计透射式光路采集光谱,针对在线检测中柑橘两种高频姿态建立模型,经对比筛选“多元散射校正”为最优预处理方法,结合偏最小二乘法构建糖度预测模型,预测集决定系数为 0.822、均方根误差为  $0.596^{\circ}\text{Brix}$ 。说明建立的模型稳定性很高,且预测能力较强。Sun 等[28]采用可见/近红外光谱技术和支持向量回归(SVR)算法对多种柑橘的糖度进行无损检测研究,结果显示基于全光谱建立的 SVR 通用模型性能优异,其预测相关系数  $R^2 > 0.896$ ,预测均方根误差低至  $0.408^{\circ}\text{Brix}$ 。Zhan 等[29]采用在线近红外光谱系统并结合特定光学设计对脐橙糖度进行在线分选研究,结果显示所优化的在线检测模型性能稳定,其预测相关系数  $R^2 > 0.828$ ,满足了工业化分级的精度要求。Ncama K 等[30]采用可见近红外光谱结合化学计量学方法,对柑橘的甜度核心指标及关键风味参进行无损检测与定量分析。结果显示:SSC 预测的偏最小二乘回归(PLSR)模型,决定系数为 0.958,预测的均方根误差 RMSEP 为 0.006。由此可知,合理结合近红外光谱技术与化学计量学方法具有快速、无损、重现性好、精度高等特点,可有效实现柑橘甜度及风味参数的同步检测,为柑橘产后商品化分级与风味品质管控提供技术支撑。

关于近红外光谱技术在其他水果糖度检测中的应用,Huang 等[31]采用便携式近红外光谱技术在线检测水蜜桃的糖度,结合支持向量机(SVM)算法建立预测模型,所获得的偏最小二乘模型的相关系数为 0.87,支持向量回归模型的相关系数为 0.91。廖志强等[32]利用近红外光谱技术,结合偏最小二乘、支持向量回归建立苹果糖度定量预测模型,同时采用 PCA、ICA、TSVD 三种特征降维算法优化模型,并分析一阶导数、Savitzky-Golay (SG)平滑等 6 种光谱预处理方法对模型精度的影响。结果显示,经标准正态变量变换预处理结合 PCA 降维的 Ridge 模型预测效果最优,测试集决定系数达到 0.8315,预测均方根误差为 0.4966;该模型在苹果糖度预测方面稳定性强、误差率低,可广泛用于苹果品质无损检测与商品化分级,且应用效果较好。李明等[33]采用近红外光谱分析技术结合偏最小二乘回归、支持向量回归、人工神经网络及 Stacking 集成学习,以猕猴桃为样品,建立猕猴桃糖度近红外光谱预测模型。校正集相关系数 0.892、校正集均方根误差 0.461,预测集相关系数为 0.853、预测集均方根误差为 0.433,可有效实现不同成熟度猕猴桃糖度的无损检测,尤其适用于多品种混收场景下的糖度快速判定,为猕猴桃智能化分级装置的研发提供技术支撑。

由此可知,近红外光谱技术能准确检测出水果中的糖度含量,结合偏最小二乘、支持向量机等化学计量学方法建立糖度预测模型,还可实现对不同品种、不同贮藏期水果的糖度进行快速、无损、准确的检测分析。因此,近红外光谱技术对水果糖度进行定性分级和定量预测是可行的,可广泛应用于水果产后商品化分级、采摘时间优化、品质监控等实践生产环节中。

## 2.2. 中红外光谱技术在水果糖度检测中的应用

关于中红外光谱技术在柑橘糖度检测中的应用,文韬等[34]采用中红外透射光谱法,设计双光路检测系统并结合多元散射校正 + 二阶导数预处理,建立偏最小二乘回归模型。使用全光谱与优化光路的回归模型获得了良好结果,校准集决定系数  $R^2$  达 0.85 以上。黄聪等[35]通过中红外漫反射光谱技术,同步测定各品种可溶性固形物(SSC、糖度指标)含量。初始采用统一全光谱 PLS 模型及传统 MSC + PLS 模型,因品种间果皮厚度、果肉结构差异,沃柑糖度预测误差高( $\text{RMSEP} > 0.7^{\circ}\text{Brix}$ ),无法精准检测。后通过品种特异性预处理和连续投影算法(SPA)筛选特征波长,构建 MSC + SPA-PLS 针对性模型,成功实现多品种糖度准确预测:沃柑模型  $R^2$  为 0.85、RMSEP 为  $0.58^{\circ}\text{Brix}$ ,其他品种精度提升 10%~15%,为柑橘多品种混收糖度检测提供有效方案。Ferreira 等[36]采集柑橘橙的中红外光谱,运用偏最小二乘法关联中红外

特征峰与柑橘糖度的关系,实现对柑橘糖度的定量分析。该方法无损、精准,为完整橙子糖度快速检测及产后商品化分级奠定了实验基础。王琳[37]利用衰减全反射(ATR)中红外光谱结合偏最小二乘法,建立了蜜橘可溶性固形物的定量分析模型。然后选择最佳的光斑直径、检测压力和有效特征波数范围,得到最优蜜橘糖度定量分析模型。结果表明:该模型对未知蜜橘样品的预测相关系数  $R^2$  为 0.89,预测均方根误差为  $0.52^\circ\text{Brix}$ ,满足蜜橘产后快速分级的精度需求。

关于中红外光谱技术在其他水果糖度检测中的应用, Hu Y 等[38]采用中红外光谱衰减全反射技术无损检测猕猴桃的糖度,建立定量分析模型。使用全光谱和偏最小二乘回归算法建立的预测模型获得了良好的结果,预测集的决定系数  $R^2$  超过 0.9,预测均方根误差低于  $0.5^\circ\text{Brix}$ 。Wang 等[39]采用便携式中红外光谱仪结合衰减全反射探头和机器学习算法对苹果糖度进行快速无损评估。通过将光谱仪探头直接接触苹果果肉切面采集光谱,并分别建立偏最小二乘回归和支持向量回归模型。结果表明 SVR 模型预测性能更优,其预测集决定系数达到 0.91,预测均方根误差为  $0.48^\circ\text{Brix}$ ,证明该便携式中红外技术可用于苹果糖度的准确快速检测。李华[40]等以水蜜桃为研究对象,采用中红外光谱技术采集光谱,构建偏最小二乘定量模型,结果显示,模型对未知样品糖度预测决定系数  $R^2$  达 0.89、预测均方根误差 RMSEP 为  $0.52^\circ\text{Brix}$  (低成熟度样品  $R^2=0.85$ )。

由此可知,中红外光谱技术能够有效检测水果糖度含量,结合偏最小二乘、支持向量回归等化学计量学方法建立的定量模型具有良好的预测精度。该技术还可实现对不同品种水果的糖分组成和含量进行快速、具有分子特异性的检测分析。因此,中红外光谱技术对水果糖度进行定量分析和品质评价是可行的,可广泛应用于水果加工质量监控、采后品质快速筛查、以及贮藏过程中糖分变化规律研究等生产与科研环节中。

**Table 2.** Application of near-infrared spectroscopy for nondestructive sugar content measurement in fruits

**表 2.** 近年来近红外光谱技术在水果糖度无损检测方面的应用

检测技术	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	相关系数 ( $R^2$ )	预测均方根误差	参考文献
近红外光谱	柑橘糖度定量检测(可溶性固形物)	780~2526 nm	MSC, SNV, PLS	0.99	—	[25]
	柑橘糖度定量检测(石门蜜橘)	780~2526 nm	SPXY, PLS	0.8975	—	[26]
	多品种柑橘(脐橙、沃柑等)糖度通用检测	400~1100 nm	SVR	0.896	$0.408^\circ\text{Brix}$	[28]
	脐橙糖度在线分选检测	780~2526 nm	PLS	0.828	—	[29]
	苹果糖度定量预测	780~2526 nm	SNV, PCA	—	$0.4966^\circ\text{Brix}$	[30]
	水蜜桃糖度在线检测	780~2526 nm	PLS, SVR	0.87 0.91	—	[31]
	猕猴桃糖度检测(贮藏初期)	780~2526 nm	SNV, UVE PLS, SVM LSSVM	0.99 0.93	$0.77^\circ\text{Brix}$	[32]

### 2.3. 高光谱成像技术在水果糖度检测中的应用

关于高光谱成像技术在柑橘糖度检测中的应用,高粱晓[11]使用可见光-近红外高光谱成像系统,采集了脐橙、沃柑、蜜橘等主栽柑橘品种的样本图像。结果显示:柑橘 SSC 与筛选出的 900~1100 nm 特征波长光谱响应的 SVR 模型预测决定系数  $R^2$  为 88,均方根误差为  $0.52^\circ\text{Brix}$ ,溃疡病与机械损伤的 CNN 识别模型准确率分别为 92.3%、94.1%,相关性与识别性能良好,可实现柑橘糖度定量检测与表面缺陷定性识别的同步无损分析。Zhao 等[41]提出一种基于高光谱成像技术的柑橘可溶性固形物定量检测方法,利用机器学习与深度学习算法建立了 PLSR、LS-SVM、CNN 模型,其中 CNN 模型在预测集的决定系数  $R^2$  高达 0.97,均方根误差为  $0.45^\circ\text{Brix}$ ,表现出最优性能。

关于高光谱成像技术在其他水果糖度检测中的应用,许丽佳等[42]使用高光谱成像仪对猕猴桃的糖度进行检测,利用标准正态变量变换结合 SG 平滑算法对光谱进行预处理,并引入连续投影算法 SPA 和

竞争性自适应重加权算法 CARS 筛选特征波长以优化偏最小二乘回归 PLSR 模型, 比较了 PLSR、SPA-PLSR、CARS-PLSR 三种模型的预测效果, 结果表明 CARS-PLSR 具有最佳的预测效果, 预测集的决定系数达到 0.932, 均方根误差为  $0.45^{\circ}\text{Brix}$ 。班兆军等[43]使用高光谱成像仪对苹果品质进行无损检测, 利用标准正态变量变换结合 SG 平滑算法对光谱进行预处理, 利用主成分分析(PCA)对数据降维, 结合卷积神经网络构建内在品质(糖度、酸度)定量预测模型, 结合改进型残差网络(ResNet-18)构建缺陷定性识别模型, 并对比偏最小二乘回归、支持向量机等传统算法, 最终得到 CNN 预测糖度的决定系数达 0.92、均方根误差为  $0.45^{\circ}\text{Brix}$ 。Weng 等[44]使用高光谱成像系统, 采集了不同成熟度草莓的图像, 获取草莓可溶性固形物的理化参考值开展分析。结果显示: 结合光谱 + 颜色特征的偏最小二乘回归模型预测草莓 SSC 的决定系数达 0.937, 各品质参数预测相关性良好, 可实现草莓 SSC 快速无损检测。

上述研究表明, 高光谱成像技术用于水果糖度的无损检测是可行的, 具有操作简单、检测快速、结果准确的特点, 能够有效、无损地评估水果的内部品质, 可广泛应用于水果的糖度检测、成熟度判断及采后分级等环节。

**Table 3.** Application of mid-infrared spectroscopy for nondestructive sugar content measurement in fruits

**表 3.** 近年来中红外光谱技术在水果糖度无损检测方面的应用

检测技术	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	相关系数 ( $R^2$ )	预测均方根误差	参考文献
中红外光谱	脐橙糖度无损检测	2500~25000 nm	MSC, PLS	0.85	—	[34]
	沃柑及 5 个柑橘品种糖度多品种检测	2500~25000 nm	MSC, PLS	0.85	—	[35]
	蜜橘可溶性固形物定量检测	2500~25000 nm	ATR, PLS	0.89	$0.52^{\circ}\text{Brix}$	[37]
	苹果糖度快速无损评估	2500~25000 nm	PLSR, SVR	0.91	$0.48^{\circ}\text{Brix}$	[36]
	水蜜桃糖度检测(含低成熟度样品)	2500~25000 nm	PLS	0.89	$0.52^{\circ}\text{Brix}$	[40]
	猕猴桃糖度无损检测	2500~25000 nm	PLS	0.9	$0.5^{\circ}\text{Brix}$	[33]

**Table 4.** Application of hyperspectral imaging for nondestructive sugar content assessment in fruits

**表 4.** 近年来高光谱成像技术在水果糖度无损检测方面的应用

检测技术	应用	波数与波长范围	数据处理与建模方法	相关系数 ( $R^2$ )	预测均方根误差	参考文献
高光谱成像	柑橘糖度与缺陷同步检测	400~1700 nm	SVR, CNN	0.88	—	[11]
	涌泉蜜橘糖度最优检测位置确定	400~1700 nm	CNN, PLSR	—	—	[41]
	猕猴桃糖度定量检测	400~1700 nm	SNV, SPA CAR, SLS	0.932	$0.45^{\circ}\text{Brix}$	[42]
	苹果糖度定量预测	400~1700 nm	SNV, CNN	0.92	$0.45^{\circ}\text{Brix}$	[43]
	枇杷糖度检测及空间分布可视化	400~1700 nm	PLS, SVR	0.90	$0.3^{\circ}\text{Brix}$	[44]

由表 2~4, 以近红外光谱、中红外光谱、高光谱成像为代表的现代光谱技术可实现对柑橘、苹果、猕猴桃、枇杷等主流水果的糖度进行高精度无损检测。这为水果采后精准分级、采收期科学预判、品质全程监控及商品化增值提供了有力技术支撑, 对推动水果产业从“粗放式生产”向“精准化管控”转型, 保障消费者口感体验与市场公平竞争具有重要意义。

### 3. 关键技术环节的系统性分析

为深入探讨技术实施中的核心影响因素, 现将“光谱采集方式”“数据预处理”“特征波长选择”三

个关键环节进行分析,明确不同选择对模型性能的影响:

### 3.1. 光谱采集方式的选择与适配

光谱采集方式直接决定信号质量,需根据水果特性(果皮厚度、果肉密度)进行选择,不同方式的适配性及对模型的影响如下表 5:

Table 5. Selection and adaptation of spectral acquisition methods

表 5. 光谱采集方式的选择与适配

采集方式	原理特点	适用水果类型	对模型性能的影响	典型案例效果
反射光谱	采集水果表面 1~3 mm 的光反射信号,受表皮状态影响大	薄皮水果 (苹果、樱桃、草莓)	表皮蜡质、绒毛会增加散射噪声,需加强预处理;优点是无需触样品,适配在线检测	苹果反射 NIR 模型: SNV 预处理后 $R^2$ 从 0.75 提升至 0.83
透射光谱	采集穿透水果的光吸收信号,受果肉厚度均匀性影响大	厚皮/小型水果 (蜜柚、葡萄、柑橘)	需控制光源与探测器距离(通常 5~10 cm)保证光程一致;可获取内部成分信息,模型精度更高	柑橘透射 NIR 模型: PLS 预测 $R^2 = 0.8975$ RMSEC = 0.4309°Brix
漫反射光谱	采集内部散射与表面反射的混合信号,兼顾深度与稳定性	中大型水果 (梨、芒果、猕猴桃)	穿透深度 2~5 mm,可减少表皮干扰;但检测距离需固定(通常 2~3 cm),否则误差增加	猕猴桃漫反射 HIS 模型: $R^2 = 0.932$ 、RMSEP = 0.45°Brix
衰减全反射	光经晶体(如 ZnSe)传导至样品表面,采集反射信号,需样品接触	表皮平整水果 (苹果切面、蜜橘)	信号强度与接触压力相关(通常 5~10 N),压力不均会导致 RMSEP 增加 0.1~0.2°Brix;优点是无需样品制备	蜜橘 ATR-MIR 模型: 优化压力后 $R^2 = 0.89$ 、RMSEP = 0.52°Brix

### 3.2. 数据预处理的方法与效能

原始光谱数据常受到仪器电子噪声、温度波动导致的基线漂移以及果肉颗粒造成的散射等多种干扰。因此,光谱预处理是提升模型预测精度的关键环节。表 6 详细列举了不同预处理方法所适配的场景及其处理效果。

Table 6. Comparison of application scenarios and efficacy for data preprocessing methods

表 6. 数据预处理方法适配场景与效能对比

预处理类别	具体方法	核心原理	适配场景	应用案例与效能提升	参考文献
散射校正	多元散射校正	以参考光谱为基准,消除样品颗粒大小、密度差异导致的散射干扰	果肉不均匀水果 (柑橘、猕猴桃) NIR 光谱数据	处理柑橘 NIR 光谱: 模型预测 $R^2$ 从 0.78 提升至 0.822, RMSEP 从 0.72 降至 0.596°Brix	[27]
	标准正态变量变换	对单个样品光谱独立标准化,消除整体水平差异	多品种混合检测 (苹果、柑橘混收) NIR 光谱数据	处理苹果 NIR 光谱: 模型 RMSEP 从 0.65 降至 0.4966°Brix	[32]
平滑与降噪	Savitzky-Golay (SG)平滑	通过多项式拟合滤除高频噪声,窗口宽度需匹配光谱分辨率	噪声干扰小的 NIR 光谱、常规水果 (柑橘、苹果)	7 点窗口处理柑橘 NIR 光谱: MSE 从 0.45 降至 0.321, MRE 从 0.06% 降至 0.0416%	[25]
	小波降噪	分解光谱为不同频率成分,剔除噪声频段	HSI 高维数据、含复杂噪声的水果 (苹果、猕猴桃)	处理苹果 HSI 光谱: CNN 模型准确率从 88% 提升至 92%	[43]
基线校正	一阶导数	消除基线漂移,增强重叠峰的峰形差异	光谱重叠严重的 NIR 数据(多品种柑橘)	处理柑橘 NIR 光谱: SVR 模型 $R^2$ 从 0.87 提升至 0.896	[28]
	二阶导数	进一步放大细微峰差异,强化特征峰辨识度	特征峰密集的 MIR 数据(脐橙、蜜橘)	处理脐橙 MIR 光谱: PLS 模型 $R^2$ 从 0.82 提升至 0.85	[34]

### 3.3. 特征波长选择的算法与应用

由于高维光谱数据(如包含数百个波段的 HSI)存在大量冗余信息,这不仅会增加建模复杂度与时间成本,也易导致模型过拟合。因此,特征波长选择成为一种关键的“降维增效”手段。表 7 总结了主流特征选择算法的核心特点与应用效果。

**Table 7.** Comparison of characteristics and application performance of feature wavelength selection algorithms  
**表 7.** 特征波长选择算法特性与应用效果对比

算法名称	核心原理	核心优势	适配场景	应用案例与效能提升	参考文献
连续投影算法(SPA)	通过迭代投影消除波段间共线性,保留信息最丰富的波段	降维效率高、运算速度快,能有效保留关键信	在线检测(高速分选) MIR/NIR 光谱数据	筛选柑橘 MIR 光谱: 波段数从 2000 个降至 35 个,模型运算时间缩短 80%, RMSEP 从 0.7 降至 0.58°Brix	[35]
竞争性自适应重加权采样(CARS)	基于蒙特卡洛采样,选择回归系数大的波段,剔除冗余波段	建模精度高,能精准筛选敏感波段	高精度检测(实验室分析)、HSI 高维数据	筛选猕猴桃 HSI 光谱: 波段数从 512 个降至 28 个,PLSR 模型 R <sup>2</sup> 从 0.89 提升至 0.932	[42]
主成分分析(PCA)	将高维数据投影至低维主成分,保留数据主要信息	降噪效果好,简化模型复杂度	噪声较多的 NIR 光谱、多成熟度水果(猕猴桃)	处理猕猴桃 NIR 光谱: 主成分数从 30 个降至 8 个,Stacking 模型 RMSEP 从 0.48 降至 0.433°Brix	[33]

## 4. 结果与讨论

水果内部品质的快速无损检测需求日益迫切,相较于传统检测方法存在耗时费力、检测效率低且具有破坏性等缺陷,难以满足现代水果产业规模化与智能化的品质管控要求。现代光谱技术能够精准捕捉水果内部糖分相关的光谱特征信息,且在检测过程中最大程度保持样品的完整性,有利于后续贮藏、销售或进一步分析,具有快速、无损、准确等突出优点。该技术体系可广泛应用于水果采后加工、商品化分级与市场流通环节,对于提升水果品质控制水平、增强产品市场竞争力具有重要的实际意义和广阔的应用前景。

本文系统综述现代光谱技术中的近红外光谱、中红外光谱和高光谱成像技术在水果糖度无损检测中的应用现状与研究进展。近红外光谱技术成熟度高,适用于在线分级;中红外光谱具备分子特异性解析优势,适用于成分精准定量;高光谱成像则可实现糖度分布可视化,满足空间维度分析需求。本文综述旨在系统总结现有研究成果与技术特点,推动水果品质无损检测技术的优化与集成应用,为发展更加智能、高效、绿色的水果品质安全检测方案提供参考,助力水果产业高质量发展。

### 基金项目

2025 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202510641047)。

### 参考文献

- [1] 刘哲. 不同柑橘果实可食部矿质元素分析及膳食营养评价[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [2] 陈飞. 丹棱县柑橘商品化处理的问题及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [3] Wang, X., Wu, C. and Hirafuji, M. (2016) Visible Light Image-Based Method for Sugar Content Classification of Citrus. *PLOS ONE*, **11**, e0147419. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147419>
- [4] Song, S.Y., Lee, Y.K. and Kim, I.J. (2016) Sugar and Acid Content of Citrus Prediction Modeling Using FT-IR Fingerprinting in Combination with Multivariate Statistical Analysis. *Food Chemistry*, **190**, 1027-1032. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.068>

- [5] 段超, 刘群, 王倩, 等. 新型农抗 N2 对采后柑橘的保鲜效果研究[J]. 生物灾害科学, 2024, 47(3): 415-422.
- [6] 杨建军, 杨亚楠, 侯萍萍, 等. 柑橘中膳食纤维的功能及提取方法研究[J]. 轻工科技, 2025(1): 55-57.
- [7] 束俊霞, 周倩, 程丽萍, 等. 折光法对柑橘糖度的快速检测研究[J]. 食品科学, 2018, 45(4): 216-225.
- [8] 王丹丹, 谢跳跳, 宋焯, 等. 基于斐林试剂法的温州蜜柑糖度近红外检测模型优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 63-68.
- [9] 刘燕德, 李雄, 孙旭东, 等. 近红外光谱技术在水果内部品质无损检测中的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 10(3): 6-65.
- [10] Méndez, F.V., Pinto, R.Z. and de Carvalho, M.A. (2020) Non-Invasive Quantification of Vitamin C, Citric Acid, and Sugar in 'Valência' Oranges Using Infrared Spectroscopies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **100**, 4455-4463.
- [11] 高粱晓. 基于高光谱技术的柑橘品质检测研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2023.
- [12] 范丛山. 基于数字锁相技术的近红外水果糖度检测装置设计[J]. 电子器件, 2018, 41(3): 791-794.
- [13] 樊书祥, 王庆艳, 杨雨森, 李江波, 张驰, 田喜, 黄文倩. 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.
- [14] 胡皆汉, 郑学仿. 实用红外光谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [15] 李园园, 张淑娟, 王凤花, 等. 基于中红外光谱的苹果糖度定量分析模型优化研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 342-348.
- [16] Sun, J., Lu, X., Li, M., Liu, Y. and He, Y. (2020) Rapid Determination of Fructose, Glucose, and Sucrose in Apple Juices Using ATR-FTIR Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Journal of Food Science*, **85**, 1435-1442. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15130>
- [17] 陈香维, 杨公明. 猕猴桃糖度傅里叶变换近红外光谱无损检测[J]. 西北农业学报, 2011, 20(7): 143-148.
- [18] Li, X., Wei, X., Zhang, L., et al. (2023) Rapid Determination of Sugar Content in Citrus Fruits Using Mid-Infrared Spectroscopy Coupled with Machine Learning Algorithms. *Food Chemistry*, **405**, Article 134824.
- [19] Sánchez, M.T., Pérez-Marín, D., Guerrero, J.E., et al. (2020) Online Analysis of Intact Mango Fruit by Mid-Infrared Spectroscopy: Comparison of Two Sampling Methods for Sugar Content Determination. *Postharvest Biology and Technology*, **163**, Article 111141.
- [20] Wang, J., Wang, J., Chen, Z., et al. (2022) Development of a Portable Mid-Infrared Spectrometer for Rapid Assessment of Sugar Content in Apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, **194**, Article 106761.
- [21] Lu, B., Dao, P., Liu, J., He, Y. and Shang, J. (2020) Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. *Remote Sensing*, **12**, Article 2659. <https://doi.org/10.3390/rs12162659>
- [22] Shafiee, A., Safavi, S.A., Hosseini, S.A., et al. (2023) Deep Learning in Hyperspectral Image Reconstruction from Single RGB Images—A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **204**, Article 107525.
- [23] Li, J., Huang, W., Tian, X., et al. (2021) Visualization of Soluble Solids Content Distribution In Kiwifruit Using Hyperspectral Imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, **187**, Article 106293.
- [24] 刘燕德, 孙通, 张俊宁, 等. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2188-2194.
- [25] 陈姿伊, 李晨曦, 张浩然, 张恒, 刘书朋. 基于可见近红外光谱的柑橘糖度无损检测[J]. 工业控制计算机, 2025, 38(7): 30-32.
- [26] 曾贤明, 韩龙波, 文韬, 代兴勇. 近红外光谱检测柑橘糖度光照角度可调装置设计与试验[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 76-83.
- [27] 文韬, 代兴勇, 李浪, 刘豪. 基于机器视觉与光谱融合的柑橘品质无损检测分级系统设计与试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 38-45.
- [28] Sun, J., Lan, W., Shao, Y., et al. (2020) Non-Destructive Determination of Soluble Solids Content in Various Citrus Fruits Using Near-Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **100**, 4445-4453.
- [29] Zhang, B., Dai, D., Huang, J., et al. (2022) Online Detection of Soluble Solids Content of Citrus Fruits Using a Near-Infrared Spectroscopy System Optimized for Mass Grading. *Postharvest Biology and Technology*, **185**, Article 111781.
- [30] Ncama, K., Tesfay, S.Z., Opara, U.L., Fawole, O.A. and Magwaza, L.S. (2018) Non-Destructive Prediction of 'Valencia' Orange (*Citrus sinensis*) and 'Star Ruby' Grapefruit (*Citrus paradisi* Macfad) Internal Quality Parameters Using Vis/NIRS. *Acta Horticulturae*, **1194**, 1119-1126. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1194.160>

- [31] Huang, W., Liu, Y., Wang, Y., Li, J. and He, Y. (2023) Online Detection of Soluble Solids Content for Peach (*Amygdalus persica* L.) by Portable Near-Infrared Spectroscopy System Coupled with Machine Learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, **212**, Article 108189.
- [32] 廖志强, 何崇训基于近红外光谱技术的苹果糖度预测及分级研究[J]. 信息技术与信息化, 2023(10): 93-98.
- [33] 李明, 王鹏, 姚鳗. 近红外光谱结合 Stacking 集成学习的猕猴桃糖度检测研究[J]. 食品科学, 2024, 14(5): 321-330.
- [34] 文韬, 代兴勇, 李浪, 等. 基于中红外透射光谱的脐橙糖度无损检测模型优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 38-45.
- [35] 黄聪, 马琳, 蔡杰, 等. 中红外光谱法测定沃柑可溶性固形物含量的品种适应性研究[J]. 中国南方果树, 2022, 51(3): 45-49.
- [36] Ferreira, M.F., Pimentel, M.F., Ribeiro, W.Q., da Silva, R.M. and da Silva, C.E. (2020) Mid-Infrared Spectroscopy Combined with PLS for Sugar Content Prediction in Intact “Valência” Oranges. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **68**, 12052-12058.
- [37] 王琳, 陈亚光, 李鹏, 等. 衰减全反射中红外光谱快速测定蜜橘可溶性固形物含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(5): 1489-1494.
- [38] Hu, Y., He, Y., Dong, J. and Li, X. (2023) Rapid and Non-Destructive Determination of Soluble Solids Content of Kiwifruit by Mid-Infrared Spectroscopy Coupled with an Attenuated Total Reflection Accessory. *Infrared Physics & Technology*, **133**, Article 104689.
- [39] Wang, J., Wang, J., Chen, Z. and Han, D. (2022) Rapid and Non-Destructive Evaluation of Soluble Solids Content in Apples Using a Portable Mid-Infrared Spectrometer and Machine Learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, **200**, Article 107188.
- [40] 李华, 等. 基于中红外光谱的水蜜桃可溶性固形物含量快速无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(6): 1872-1877.
- [41] Zhang, H., Zhan, B., Pan, F. and Luo, W. (2020) Determination of Soluble Solids Content in Oranges Using Visible and near Infrared Full Transmittance Hyperspectral Imaging with Comparative Analysis of Models. *Postharvest Biology and Technology*, **163**, Article 111148. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111148>
- [42] 许丽佳, 陈铭, 王玉超, 陈晓燕, 雷小龙. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2188-2195.
- [43] 班兆军, 高喧翔, 马肆恒, 张爽, 方晨羽, 王俊博, 朱艺. 基于高光谱和深度学习的苹果品质无损检测方法[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(8): 1446-1454.
- [44] Weng, S., Yu, S., Guo, B.Q., Tang, P. and Liang, D. (2020) Non-Destructive Detection of Strawberry Quality Using Multi-Features of Hyperspectral Imaging and Multivariate Methods. *Sensors*, **20**, Article 3074. <https://doi.org/10.3390/s20113074>