Hans Journal of Food and Nutrition Science 食品与营养科学, 2026, 15(6), 648-656
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjfns
https://doi.org/10.12677/hjfns.2026.156067

Hans汉斯

快速光谱技术在水果品质无损检测中的应用

贺　丹[1]，傅文佳[1]，李虹雨[1]，陈　立[2]，邱　笛[1]，谭　超[1*]

[1]宜宾学院过程分析与控制四川省教育厅高校重点实验室，四川　宜宾
[2]和光同程光伏科技(宜宾)有限公司，四川　宜宾

收稿日期：2026年9月28日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

快速光谱技术凭借无损、高效、多指标同步获取的突出优势，已成为水果采后品质管控领域最具应用潜力的技术方向之一。水果糖度与硬度是决定其食用品质、贮运性能和商品价值的核心指标，但传统理化检测方法破坏性强、通量低、时效性差，难以满足现代果品产业对规模化快速分选和全链条品质监控的现实需求。本文系统综述了近红外光谱和高光谱成像两类快速光谱技术的检测原理与技术特点，梳理了其在水果糖度与硬度无损检测中的应用现状与研究进展，并以猕猴桃等代表性水果的糖度与硬度检测为重点，总结了各类技术的适用条件与局限。综合分析表明，快速光谱技术对水果糖度的预测已趋于实用化，而硬度检测仍受限于复杂物理属性与光谱响应之间的间接关联，模型泛化能力有待进一步提升。未来研究应聚焦于多模态光谱信息融合、深度学习建模策略及低成本专用化仪器开发，以推动快速光谱技术从实验室研究向产业规模化应用的实质性转化。

关键词

水果品质，近红外光谱，高光谱成像，猕猴桃

Application of Rapid Spectral Technology in Non-Destructive Detection of Fruit Quality

Dan He[1], Wenjia Fu[1], Hongyu Li[1], Li Chen[2], Di Qiu[1], Chao Tan[1*]

[1]Key Laboratory of Process Analysis and Control of Sichuan Provincial Department of Education, Yibin University, Yibin Sichuan
[2]Heguang Tongcheng Photovoltaic Technology (Yibin) Co., Ltd., Yibin Sichuan

Received: September 28, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

*通讯作者。

文章引用: 贺丹, 傅文佳, 李虹雨, 陈立, 邱笛, 谭超. 快速光谱技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(6): 648-656. DOI: 10.12677/hjfns.2026.156067

Abstract

Rapid spectroscopic technologies, with the prominent advantages of non-destructiveness, high efficiency, and simultaneous acquisition of multiple indicators, have emerged as one of the technical directions with the greatest application potential in the field of postharvest quality control of fruits. Fruit sugar content and firmness are the core indicators that determine their edible quality, storage and transportation performance, and commercial value. However, traditional physical and chemical detection methods are characterized by high destructiveness, low throughput, and poor timeliness, making it difficult to meet the practical demands of the modern fruit industry for large-scale rapid sorting and whole-chain quality monitoring. This paper systematically reviews the detection principles and technical characteristics of two types of rapid spectroscopic technologies, namely near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging, sorts out their application status and research progress in the non-destructive detection of fruit sugar content and firmness, and summarizes the applicable conditions and limitations of various technologies with a focus on the detection of sugar content and firmness of representative fruits such as kiwifruit. Comprehensive analysis shows that the prediction of fruit sugar content by rapid spectroscopic technologies has tended to be practical, while the detection of firmness is still limited by the indirect correlation between complex physical properties and spectral responses, and the generalization ability of the models needs to be further improved. Future research should focus on multi-modal spectral information fusion, deep learning modeling strategies, and the development of low-cost specialized instruments, so as to promote the substantive transformation of rapid spectroscopic technologies from laboratory research to large-scale industrial applications.

Keywords

Fruit Quality, NIRS, HSI, Kiwi

Copyright © 2026 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

水果糖度与硬度是决定其商品价值、食用体验和贮运寿命的核心品质参数[1]。糖度直接反映果实的风味积累水平[2]，硬度则与成熟状态、耐贮性及货架期管理密切相关。采后商品化处理中，对这两项指标的快速准确评估是实现分级定价、品质追溯和损耗控制的基础。然而，传统检测方法如，折光仪测糖[3]与质构仪穿刺测硬[4]均属破坏性检测，消耗样品、效率低，难以满足大批量在线分选和实时品质监控的需求，这一矛盾推动了水果品质无损检测技术的发展。

光谱分析技术基于物质对特定波长电磁辐射的选择性吸收原理，可在无损条件下获取果实内部化学成分与物理状态信息。近二十年来，随着微型光谱器件与化学计量学方法的进步，以近红外光谱(NIRS)[5]和高光谱成像(HSI) [6]为代表的快速光谱技术已从实验室验证走向产业示范。NIR 凭借成本适中、穿透力强和检测速度快的优势，率先在水果分选线上实现商品化部署；HSI 以图谱合一为特征，将光谱分析从“单点均值”拓展至“空间分布”，为品质异质性研究提供了新维度[7]。值得注意的是，糖度与硬度虽同为目标指标，但与光谱信息的关联机制差异显著：糖度直接对应糖分子中含氢基团的光谱吸收，路径短、强度高；硬度作为宏观力学属性，需经水分迁移和细胞壁降解等中间过程间接反映，链条长、干扰多。这从根本上解释了糖度预测精度普遍优于硬度的原因，也对硬度检测方法的设计提出了更高要

求。本文以水果糖度与硬度检测为主线，综述两种光谱技术的原理与应用进展，分析现有局限，为后续技术优化与产业应用提供参考。

2. 光谱学分析检测技术

近红外光谱与高光谱成像同属振动光谱范畴，但信息获取方式与应用定位差异明显。前者以单点快速测量为主，侧重整果平均品质的高通量获取；后者以图谱融合为特征，侧重品质空间异质性的精细表征。二者在检测速度与信息维度上形成互补。

近红外光谱(Near infrared spectroscopy, NIRS)的工作区间为780~2526 nm，其吸收源于含氢官能团X-H (X为C、N、O等)振动的倍频与合频信号，可反映绝大多数有机化合物的组成与结构信息[8]。可溶性糖中的O-H基团在960 nm和1450 nm附近产生特征吸收，吸收强度与糖浓度呈稳定定量关系，是近红外测糖的物理基础[9]。硬度检测则依赖间接路径：果实软化时细胞壁果胶降解，水分由结合态向自由态迁移，吸收峰形与峰位随之改变；同时叶绿素降解和类胡萝卜素积累在可见/近红外过渡区留下光谱痕迹[10]。采集近红外吸收或反射光谱并结合化学计量学与校正模型，可将这些同步变化的代理信号转化为硬度定量预测。该技术穿透力可达果肉数毫米至数厘米，仪器成熟，检测速度毫秒级，前处理简单且无需化学试剂。

高光谱成像技术(Hyperspectral imaging, HSI)则将近红外或可见/近红外光谱与二维成像结合，在400~1000 nm或更宽区间内以数百个连续窄波段对果实表面同步成像，获取每个像素点的空间坐标与光谱信息，形成三维“超立方体”[11]。这种图谱合一结构使其能够回答“品质参数在哪里、分布如何”。糖度检测中，逐像素分析光谱并建立定量模型，可将预测值映射回图像空间，生成糖度分布图，揭示果肩、果腰、果顶间的品质梯度。硬度检测中，其优势在于识别局部软化与早期瘀伤——这类局域异常在整果平均光谱中易被稀释，而在高光谱图像中表现为像素级光谱突变。该技术快速、无损且具空间分辨能力，在水果内部品质可视化检测中应用前景广阔。

两类光谱技术在波段范围、信息维度、检测速度及品质指标响应能力等方面存在显著差异，其核心特性对比如表1所示。

Table 1. NIR vs HSI core feature comparison table
表1. NIR，HSI核心特性对比表

对比维度	近红外光谱(NIRS)	高光谱成像(HSI)
波段范围	780~2526 nm	400~2500 nm
光谱类型	倍频与合频振动(X-H基团)	连续窄波段光谱(各像素点独立光谱)
信息维度	一维(单点平均光谱)	三维(空间二维 + 光谱一维，图谱合一)
样品前处理	无需或极少，整果直接测量	无需，整果直接成像
糖度检测能力	定量预测成熟，精度高，可测总可溶性固形物	可预测糖度并绘制空间分布图
硬度检测能力	通过水分状态和色素等代理信息间接预测，精度中等	擅长局部软化与早期瘀伤识别，整果均值预测精度一般
核心优势	仪器成熟、成本适中、穿透力强、速度最快、工程化程度最高	空间分辨能力独特，品质可视化与缺陷定位能力突出
主要局限	峰形重叠，对硬度的预测基础是间接关联，模型泛化有挑战	数据维度高、处理慢、设备昂贵，高速在线应用受制约
当前主要角色	水果糖度在线分选与硬度便携检测的主力技术	品质空间分布表征、瘀伤识别与科研场景的高端工具

2.1. 近红外光谱技术在水果品质检测中的应用

关于近红外光谱技术在猕猴桃品质检测中的应用，梁子兆等[12]以海沃德、金桃和徐香猕猴桃为研究对象，构建了可溶性固形物、可滴定酸、色泽及硬度的光谱预测模型。经一阶导数与标准正态变量变换预处理，结合竞争性自适应重加权采样与偏最小二乘法，模型精度显著提升，其中可溶性固形物预测最优。偏最小二乘(PLS)假设光谱信号与品质指标呈近似线性关系，该假设与糖度的直接分子吸收机制匹配度高，因此糖度预测效果突出；但硬度属于间接代理响应，光谱–硬度内在关系呈现复杂非线性，线性模型拟合能力受限，这也是该研究中硬度预测效果弱于糖度的内在原因。该研究验证了光谱技术在多品种、多参数同步检测中的可行性。王佳欣等[13]以猕猴桃可溶性固形物与硬度为研究对象，构建了近红外光谱预测模型并开展跨品种、跨年份迁移研究。经迁移学习校准传递后，模型预测精度显著提升，且对小样本目标域适应性良好。传统全局模型默认不同品种、年份样本的光谱–品质映射关系保持不变，但实际中果皮色素、细胞壁组分差异会改变光谱响应。迁移学习不再强制共享全部模型参数，仅做局部参数微调，更符合果品真实理化变异规律，缓解了不同样本域分布偏移问题。该研究验证了光谱技术在跨品种、跨年份通用化检测中的可行性；卷积神经网络擅长捕捉光谱局部波段特征与非线性耦合关系，但该类模型属于纯数据驱动，不内置分子吸收先验；当训练集样本多样性不足时，极易学习到果皮颜色、果形等无关干扰特征而非真实品质信号，存在“伪拟合”风险。刘婷婷等[14]以猕猴桃糖度与品种为研究对象，构建了近红外光谱结合卷积神经网络的预测模型。经光谱预处理后，糖度等级预测与品种鉴别准确率显著提升。该研究验证了光谱技术结合深度学习在猕猴桃内部品质与品种同步检测中的可行性；Altieri 等[15]以采前黄肉猕猴桃为研究对象，构建了近红外光谱结合理化数据的成熟度评估模型。可溶性固形物与硬度预测精度良好，其中可溶性固形物更为稳健；人工神经网络在成熟度分类中表现最优。该研究验证了光谱技术结合人工智能在果实成熟度无损判别中的应用潜力。

关于近红外光谱技术在其他水果品质检测中的应用，徐杭等[16]以富士苹果为研究对象，构建了近红外吸收光谱结合机器学习算法的糖度定量模型。经蚁群优化算法筛选特征波长后，预测精度与稳定性优于多种对比方法。该研究验证了光谱技术结合智能优化算法在水果糖度快速无损检测中的可行性；王君怡等[17]以贮藏期百香果为研究对象，构建了近红外漫反射光谱结合机器学习的品质预测模型。经预处理与特征波长筛选后，果皮硬度与果汁可溶性固形物均获良好预测。该研究验证了光谱技术在百香果贮藏品质快速无损检测中的可行性；Guo 等[18]以多产地库尔勒香梨为研究对象，构建了近红外光谱结合迁移学习的可溶性固形物预测模型。比较多种预处理与建模策略后，迁移学习模型在跨产地预测中表现良好，仅需少量目标域样本即可获得较高精度。该研究验证了光谱技术结合迁移学习在不同产地果实品质无损检测中的适用性。

由此可见，近红外光谱技术结合化学计量学与机器学习方法，能够快速、无损地检测水果的可溶性固形物、硬度、成熟度及外部损伤等品质指标。从机理层面看，当待测指标与光谱存在直接分子吸收关联时，线性模型即可获得稳定结果；而针对硬度这类间接代理指标，样本间基体变异会打破模型内在假设，单纯更换复杂模型很难从根源消除偏差。在猕猴桃、苹果等多种水果中，通过合适的预处理、特征波长筛选和建模策略，模型在品种判别、贮藏期区分和成熟度分类等场景中均表现出良好的精度与稳定性。因此，近红外光谱技术可有效用于水果品质分级与定量预测，在采后分级、贮运监控和损伤识别等环节具有广泛的应用前景。

2.2. 高光谱成像技术在水果品质检测中的应用

高光谱得到的是整幅果实像素集合，包含果皮、果斑、果萼等无效像素，模型默认 ROI 内光谱可以

代表果肉品质，若 ROI 选取不当会引入大量表皮噪声，违背“光谱反映果肉内部品质”这一基本假设，这也是 ROI 选择对结果影响的根本原因。卞子晗等[19]以猕猴桃可溶性固形物为研究对象，构建了高光谱成像结合 ROI 优选的预测模型。光谱预处理与 ROI 特征均显著影响预测精度，其中赤道处小圆形区域效果最优。多元线性回归建立在波段之间相互独立的假设之上，但高光谱波段存在严重共线性，必须依靠特征筛选消除变量冗余，否则模型极易过拟合。尚静等[20]以猕猴桃主要品质指标为研究对象，构建了高光谱成像结合光谱预处理与特征波长筛选的预测模型。基于最优特征波长的多元线性回归模型对可溶性固形物、酸度、硬度和色差均具良好预测性能，并实现了品质指标的可视化分布。该研究验证了高光谱成像在猕猴桃多指标快速无损检测中的可行性。支持向量回归可以处理光谱与品质之间的非线性映射，适合硬度这类间接响应指标；但该模型对超参数高度敏感，超参数寻优容易过度适配当前数据集，迁移到新样本后性能会明显下滑。刘子涵等[21]以猕猴桃可溶性固形物为研究对象，构建了高光谱成像结合光谱预处理、特征波段提取与模型优化的预测模型。经预处理与特征筛选后，粒子群优化的支持向量回归模型预测精度最优。Xiao 等[22]以奇异果品质为研究对象，构建了高光谱融合结合化学计量学的预测模型。经预处理后，多源数据融合模型预测性能最佳。该研究验证了高光谱多源数据融合结合深度学习在奇异果品质快速无损评估中的有效性。

关于高光谱成像技术在其他水果品质检测中的应用，安婧等[23]以苹果内部品质为研究对象，构建了高光谱成像结合多种预处理、特征选择与建模算法的预测框架。不同品质指标对应的最优建模组合存在差异，多策略建模体系可实现多种指标的有效预测。该研究为苹果品质无损检测及便携式系统开发提供了参考；汪晓慧等[24]以水蜜桃糖分与硬度为研究对象，构建了高光谱荧光成像结合多种预处理、特征提取与建模算法的预测方法。高斯滤波预处理配合二次特征提取与相应回归模型预测效果最优。该研究验证了高光谱荧光成像在水蜜桃内部品质快速无损检测中的可行性；Wang 等[25]以田间柑橘成熟阶段为研究对象，构建了高光谱技术结合 ROI 选择、预处理与特征波长提取的判别模型。特定 ROI 配合神经网络模型可实现高准确率的成熟度判别。该研究验证了高光谱技术在柑橘田间原位快速评估中的可行性。

综上所述，高光谱成像技术同步获取图像与光谱信息，兼具无损、快速、信息量大的特点，近年来在水果品质检测中应用广泛。已有研究在猕猴桃、苹果等水果中，借助 ROI 优选、光谱预处理、特征波长筛选与多源数据融合等手段，提升了可溶性固形物、硬度等指标的预测精度，部分研究还实现了品质分布可视化与田间原位判别。总体而言，高光谱成像结合化学计量学与深度学习算法，弥补了传统破坏性检测的不足，减少了数据冗余，为水果品质无损检测与分级分选提供了可行路径。

3. 关键技术环节系统性分析

3.1. 光谱采集方式的选择与适配

在快速光谱检测中，采集方式决定信号来源与深度，直接影响建模可行性与稳健性。不同模式在信号深度、整果代表性、抗干扰能力和工程适用性上各有侧重。表 2 从原理特点、适用对象、模型性能影响及典型案例效果等方面对主要采集方式进行了比较。

3.2. 数据预处理的方法与效能

在光谱定量建模中，数据预处理连接原始信号与模型输入，主要作用是压制仪器噪声、校正散射干扰、消除基线漂移，并尽量保留与目标品质相关的光谱变异信息。不同方法的适用性取决于采集方式、样品表面状态及目标指标信号特征。表 3 按预处理类别归纳了常用方法，并结合典型案例说明其应用场景与效能。

Table 2. Spectral acquisition method comparison table
表 2. 光谱采集方式系统比较表

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
漫反射	采集表面反射光，信号浅，主要反映表皮及近表层信息，易受果皮颜色、曲率与粗糙度影响	果皮较薄、色素干扰较小的水果	信号与果肉品质相关性有限，模型易受表面状态干扰，稳健性不足	在苹果糖度检测中应用较多，结合预处理与特征筛选可取得较好预测效果
透射	光穿过整果，信号携带累积吸收信息，整果代表性最强，但衰减严重，对光源与探测器要求高	体积较小或果肉透光性较好的水果	理论上最能代表整果平均品质，有利于提升模型代表性；信噪比不足时精度下降	在小型水果整果品质检测中表现较优，对大果径或致密果肉水果适用性受限
高光谱成像	同步获取空间图像与光谱信息，可提取不同部位、形状、尺度的 ROI 光谱，实现品质参数空间分布表征	猕猴桃、苹果等多种水果，尤其适合品质异质性分析和局部缺陷识别	ROI 选择对精度影响显著；特征波长筛选与建模策略优化可大幅提升模型性能；可实现品质可视化	在猕猴桃、水蜜桃等水果品质检测中应用广泛，可实现内部品质的无损评估与可视化

Table 3. Comparison of application scenarios and efficacy for data preprocessing methods
表 3. 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	参考论文
散射校正	SNV	逐条光谱标准化，消除散射引起的乘性差异	整果测量，果皮状态差异大的场景	用于猕猴桃可溶性固形物全果 ROI 建模，有效提升预测精度	[20]
	MSC	以平均光谱为参照进行线性校正，修正散射路径差异	表面粗糙度不均、散射差异明显的场景	结合特征筛选与优化算法用于猕猴桃可溶性固形物预测，效果良好	[22]
平滑去噪	SG 平滑	窗口内多项式拟合，抑制高频噪声同时保留峰形	信噪比较低、高频抖动明显的场景	用于猕猴桃可溶性固形物与硬度指数建模，模型稳定性较好	[14]
	中值滤波 (MF)	窗口内中值替代中心值，去除脉冲噪声	高光谱成像中传感器偶发异常像素的场景	用于猕猴桃多品质指标深度学习预测，较传统模型预测性能提升	[23]
导数与基线校正	一阶导数 (FD)	消除常数型基线漂移，突出光谱斜率变化	基线平移明显、需增强重叠峰分辨率的场景	结合 SNV 用于多品种猕猴桃光谱特征校正，可溶性固形物预测精度较好	[13]
	基线校正 (BC)	扣除缓慢趋势项或荧光背景	背景干扰或荧光叠加明显的高光谱场景	用于苹果可滴定酸和淀粉含量预测，效果最佳	[24]

3.3. 特征波长选择的算法与应用

光谱数据常含数百至数千个波长变量，冗余信息会加重建模负担并引发过拟合，削弱泛化能力。因此，筛选与待测品质高度相关的特征波长，已成为近红外及高光谱检测中降维增效的关键环节。表 4 汇总了主流特征波长选择算法的原理、优势与适用场景，并结合应用案例说明其在提升模型精度与运算效率方面的实际效果。

Table 4. Comparison of characteristics and application performance of feature wavelength selection algorithms
表 4. 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	参考论文
连续投影算法(SPA)	迭代投影消除波段共线性，保留信息最丰富的波段	降维高效、运算快，能保留关键信息	在线检测、MIR/NIR 光谱数据	用于苹果维生素 C 含量检测，结合预处理与支持向量回归可获得最优预测效果	[24]
竞争性自适应重加权采样(CARS)	基于蒙特卡洛采样，优选回归系数大的波段，剔除冗余	建模精度高，可精准筛选敏感波段	高精度检测、HSI 高维数据	用于猕猴桃高光谱数据降维，显著减少波段数量并提升偏最小二乘模型预测精度	[13]
主成分分析(PCA)	将高维数据投影至低维主成分，保留主要信息	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	——	——
遗传算法(GA)	模拟自然选择与遗传变异，迭代优化变量子集	全局搜索能力强，适合复杂非线性问题	高维光谱数据、精度要求高的定量分析	用于百香果可溶性固形物检测，结合神经网络模型可获得较好预测效果	[18]

4. 结论与展望

水果糖度与硬度的快速无损检测是实现采后智能化分选与品质管控的关键环节。传统方法具有破坏性且效率较低，难以满足规模化、实时化的检测需求。近红外光谱与高光谱成像技术能够在不破坏样品的前提下获取果实内部理化信息，具有快速、无损、准确等优势，应用前景广阔。

已有研究表明，糖度检测技术相对成熟：可溶性固形物与含氢基团的光谱吸收直接对应，近红外模型精度普遍较高，结合特征波长筛选与机器学习后精度进一步提升，已具备在线分级条件；高光谱成像则实现了品质参数的空间分布可视化。相比之下，硬度检测仍存在模型稳健性不足、跨场景泛化能力有限等问题，其根本根源并非单纯算法不足，而是硬度属于宏观力学属性，光谱只能检测到果胶降解、水分迁移带来的间接代理信号，光谱响应与硬度之间不存在直接、唯一的定量对应关系；同时果皮、品种、贮藏条件会改变代理信号–硬度之间的映射关系，造成模型假设失效，因此无论线性还是非线性模型，跨场景泛化都面临固有障碍。仅依靠算法调优很难彻底突破该瓶颈。近红外光谱的优势在于检测速度与工程化程度，高光谱成像的优势在于空间分辨与可视化能力，二者结合是提升水果品质无损检测能力的重要方向。面向未来研究，不能停留在“换算法、调参数”的模式，应当从机理层面提出可操作的解决思路：一是发展机理约束建模，将糖分子 O-H 吸收、细胞壁降解相关波段归属作为先验知识嵌入建模流

程，区分真实理化信号与统计伪相关，提升模型可解释性；二是针对硬度指标，探索光谱与微力学传感多模态融合，弥补单一光谱只能获取间接代理信号的短板；三是建立多品种、多贮藏条件的标准化公共数据集，统一 ROI、预处理评价基准，降低小样本带来的过拟合风险。

基金项目

2026 年省级大学生创新创业训练计划项目(S202610641056)和宜宾学院本科工程(教学改革)项目。

参考文献

[1] 熊宇恒, 石明明, 李军, 等. 水果糖度无损检测技术研究综述[J]. 应用技术学报, 2025, 25(3): 294-299+312.

[2] 薛亚楠. 基于近红外光谱与深度学习的猕猴桃糖度分类及模型融合研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2025.

[3] 张志峰, 沈衍涛, 卢杰辉, 等. 基于近红外分光法的水果品质便携检测设备[J]. 自动化与仪表, 2026, 41(5): 127-130+160.

[4] 吴长达, 孙松丽, 吴斌, 等. 基于触觉感知的水果成熟度无损检测技术研究现状[J]. 科技风, 2026(4): 7-9+84.

[5] 郭志明, 桑伟兴, 杨忱, 等. 近红外光谱及成像在果品无损检测中的应用[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(5): 1-14.

[6] 郭欣悦, 陈国良, 朱良宽, 等. 基于高光谱成像技术的蓝莓糖度无损检测模型优化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 207-214.

[7] 张子申, 程红, 耿文娟, 等. 高光谱成像技术在水果品质检测中的应用研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(5): 52-66.

[8] 朱泽南, 程先辉, 石明明, 等. 近红外光谱无损鉴定水果方法[J]. 应用技术学报, 2025, 25(2): 177-184.

[9] Hu, S., Hong, W., Xie, J., Zhou, H., Wang, L. and Zhou, H. (2024) Non-Destructive Predictions of Sugar Contents in Litchis Based on Near-Infrared Spectroscopy and Stochastic Configuration Network. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **18**, 8063-8077. https://doi.org/10.1007/s11694-024-02787-1

[10] Jiang, Y., Ye, J., Zhou, L., Chen, M., Wei, Y., Jiang, S., *et al*. (2024) Cell Wall Metabolism during the Growth of Peach Fruit: Association of Hardness with Cell Wall Pectins. *Scientia Horticulturae*, **330**, Article 113058. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113058

[11] 李志成, 王鑫宇, 郑晓冬, 等. 光谱技术在果品无损检测中的研究进展[J]. 中国果菜, 2026, 46(3): 17-22.

[12] 梁子兆. 基于可见/近红外光谱的猕猴桃品质预测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商业大学, 2025.

[13] 王佳欣. 基于近红外光谱的猕猴桃可溶性固形物含量和硬度预测模型传递方法研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.

[14] 刘婷婷. 基于近红外光谱的猕猴桃糖度分级及品种鉴别技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2024.

[15] Altieri, G., Laveglia, S., Rashvand, M., Genovese, F., Matera, A., Mininni, A.N., *et al*. (2025) Portable NIR Spectroscopy Combined with Machine Learning for Kiwi Ripeness Classification: An Approach to Precision Farming. *Applied Sciences*, **15**, Article 6233. https://doi.org/10.3390/app15116233

[16] 徐杭, 于海龙, 张亚杰, 等. 近红外光谱结合随机森林算法的苹果糖度检测[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(13): 671-679.

[17] 王君怡. 基于近红外光谱技术的贮藏期间百香果品质检测研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.

[18] Guo, J., Liang, Q., Liu, Y., Zhang, H., Xu, Q., Xue, H., *et al*. (2026) An Efficient Detection Method for Soluble Solids Content of Multi-Origin Korla Fragrant Pears Based on Near-Infrared Spectroscopy Combined with Transfer Learning. *LWT*, **254**, Article 119727. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2026.119727

[19] 卞子晗, 陈谦, 李佳利, 等. 基于高光谱图像区域特征优选的猕猴桃可溶性固形物含量无损预测模型构建[J]. 食品科学, 2025, 46(24): 1-8.

[20] 尚静, 刘志洋, 谭涛, 等. 基于高光谱成像的猕猴桃主要品质指标的快速无损检测[J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 284-293.

[21] 刘子涵, 李明, 赵峙尧, 等. 基于高光谱成像技术和机器学习的猕猴桃果实可溶性固形物含量预测[J]. 果树学报, 2024, 41(12): 2606-2620.

[22] Xiao, Y., Yuan, D., Zou, Z., Li, M., Wang, Q., Zhen, J., *et al*. (2025) The Prediction of Kiwi Quality Attributes Based

on Multi-Source Data Fusion Comprehensive Analysis Model Using HSI and FHSI. *Journal of Food Composition and Analysis*, **144**, Article 107645. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107645

[23] 安婧, 韩俊英. 基于高光谱成像的苹果品质指标的无损检测方法[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(5): 973-981.

[24] 汪晓慧. 基于高光谱荧光成像技术的水蜜桃品质参数无损检测研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2023.

[25] Wang, Q., Lu, J., Wang, Y., Miao, F., Liu, S., Shui, Q., *et al*. (2025) In Situ Nondestructive Identification of Citrus Fruit Ripeness via Hyperspectral Imaging Technology. *Plant Methods*, **21**, Article No. 77. https://doi.org/10.1186/s13007-025-01354-z