

文章编号: 2096-3424(2025)02-0177-08

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2024.065

近红外光谱无损鉴定水果方法

朱泽南¹, 程先辉¹, 石明明¹, 邹军¹, 李军², 郭春风¹

(1. 上海应用技术大学 理学院, 上海 201418; 2. 上海潮勇科技有限公司, 上海 201900)

摘要: 鉴于水果品质的异质性以及消费者对高品质水果需求的持续增长, 相较于价格因素, 消费者在购买决策中更倾向于关注水果的品质属性。传统的水果品质分级方法主要依赖人工目测或简易机械筛选, 存在效率偏低、易导致机械损伤且运营成本较高等问题。因此, 光谱技术凭借其操作便捷性、检测精准性且具有非破坏性的优势, 作为一种创新方法, 在水果无损检测领域得到广泛应用, 有效契合市场需求。研究表明, 近红外光谱 (NIR) 兼具非破坏性与高效便捷的特点, 结合化学计量学方法的应用, 可在水果成分分析、成熟度判定及霉变检测等环节发挥重要作用。综述了 NIR 无损检测技术的理论基础与发展历程, 系统梳理了其分析流程与技术实现路径, 并列举了在水果糖度检测中的典型应用实例。

关键词: 水果; 无损检测; 化学计量学; 近红外光谱 (NIR) 检测

中图分类号: O433.5

文献标志码: A

Near infrared spectroscopy for non-destructive identification of fruits

ZHU Zenan¹, CHENG Xianhui¹, SHI Mingming¹, ZOU Jun¹, LI Jun², GUO Chunfeng¹

(1. School of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. Shanghai Chaoyong Technology Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Given the heterogeneity of fruit quality and the increasing consumer demand for high-quality fruit, consumers are more inclined to focus on the quality of fruit rather than its price. Traditional methods for classifying fruit quality mainly rely on manual visual inspection or simple mechanical sorting. This approach not only has low efficiency but also causes mechanical damage to fruits and results in higher operation costs. Consequently, spectral technology, recognized for its ease of operation, high accuracy, and non-destructive nature, has been widely adopted for non-destructive fruit inspection to meet consumer needs. Research has shown that near infrared spectroscopy (NIR) possesses non-destructive, convenient, and efficient characteristics, and, when combined with chemometric methods, has played an important role in analyzing fruit composition, determining the ripeness, and detecting mildew. This paper reviews the theoretical foundations and

收稿日期: 2024-07-22

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”农业科技领域项目(22N21900400、23N21900100)资助

作者简介: 朱泽南(2001-), 男, 硕士研究生。E-mail: Zz1nan010306@126.com

通信作者: 邹军(1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体封测及系统集成应用。E-mail: zoujun@sit.edu.cn

引文格式: 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.

Citation: ZHU Zenan, CHENG Xianhui, SHI Mingming, et al. Near infrared spectroscopy for non-destructive identification of fruits[J].

Journal of Technology, 2025, 25(2): 177-184.



development history of NIR non-destructive detection technology, and outlines the analytical processes and technical implementation paths of this technology, and provides examples of NIR spectroscopy's application in measuring the sugar content in fruits..

Key words: fruit; non destructive testing; chemometric methods; near infrared spectroscopy (NIR) detection

我国是水果生产大国,果树种植面积与水果总产量长期位居世界前列^[1]。作为人口第一大国,我国水果消费需求基数庞大且持续增长,形成了稳固的市场支撑体系。随着居民消费升级和生活品质提升,消费者对水果的多样化需求与品质期待同步攀升^[2]。在供需两旺的背景下,水果品质与安全监测体系的现代化转型显得尤为迫切。传统的人工抽检和半自动化检测模式存在效率低、主观性强、准确度不足等固有缺陷,难以适配规模化生产需求。得益于多学科交叉融合的技术进步,基于声、光、电、磁原理的新型检测手段应运而生^[3]。其中电子鼻传感技术、光谱分析技术、计算机视觉系统等无损检测技术凭借其高效、快速、无损的优势被广泛应用于水果品质检测中。相较于破坏性抽检,无损检测技术能实现全样本实时检测,既保障产品完整性又提升品质控制水平,对保障果品流通安全具有重要价值。

当前,果品无损检测技术主要有:近红外光谱(near infrared, NIR)、高光谱图像、智能感官仿生、声学特性检测和电学性质分析。其中, NIR 是一种应用最为广泛的水果内在品质的非破坏性测试方法^[4]。本文对 NIR 在水果无损检测方面的研究进展进行了综述。

1 NIR 检测原理与优势

NIR 是一种在水果检测方面无需化学预处理的绿色分析技术^[5]。20 世纪 60 年代,美国农业部将其用于水果内在品质检测,推动了其在农产品及食品加工领域的快速发展。该技术最初用于原

料鉴定,现已扩展至商品品质分析与监控系统,可实现快速识别与分级。NIR 广泛应用于石油化工、生物医药和现代农业等领域,是高效的品质检测工具^[6]。其在果品无损检测领域的核心优势体现在:基于含糖物质在近红外波段的特征吸收特性,通过构建定量关联模型,实现多参数同步检测。该技术是新兴的非破坏性检测手段,能准确测定果实糖度、酸度、可溶性固形物(soluble solids content, SSC)及维生素含量等,具有适应性好、无害、简便等优势^[7]。

1.1 NIR 分析技术的理论基础

可见光波段为 380~780 nm,近红外波段为 780~2 526 nm。在可见光区域,水果表皮色素对光波产生强烈吸收,形成显著的色泽响应。近红外光区通过捕捉含氢基团 X—H(X= C, N, O)的基频振动吸收特性,建立光谱特征与物质成分的关联响应,从而有效表征水果内部品质参数。研究表明,可见光和近红外光对水果具有良好穿透性和信息采集能力。基于这种复合光谱特性,研究人员已实现对水果的糖度、酸度、硬度、水分含量、成熟度、损伤及营养成分等多维度指标的定量检测,并通过大量实证数据验证了该技术的有效性^[8-17]。

NIR 检测方法主要包括了 3 种类型:全透射法、半透射法和漫反射法^[14],如图 1 所示。这 3 种方法各有其独特的应用场景和优势,广泛应用于食品品质监控、农业无损检测和医药成分分析等多个领域。

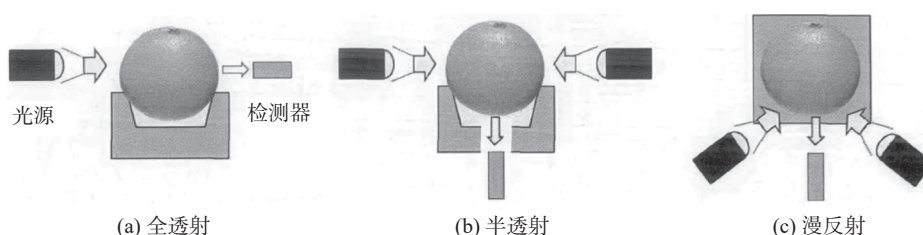


图 1 NIR 检测方式图^[14]

Fig. 1 Near infrared spectroscopy detection method diagram^[14]

透射法适用于透明或半透明样品,可获取内部成分信息;半透射法适用于透光度不强的样品,减小光谱损失,适合大尺寸、厚果皮水果;漫反射法适用于各种样品,既能获取样品表面特征信息,又能通过散射光分析揭示内部组分特性。针对小尺寸果实,可采用透射模式进行内部品质检测,辅以反射模式用于表面品质评估,形成互补性检测方案。这些方法根据样品特性和需求,为水果品质检测提供技术支持^[18]。

水果样本的光学特性与其内在组分密切相关。由于不同化学组分对特定波长光的吸收与散射特性存在差异,这种物质特异性响应会导致样本的NIR特征产生显著分异。研究表明,含氢基团(如C—H、N—H、O—H等等)的振动能级跃迁在近红外区会产生特征吸收谱带,这种分子指纹信息为水果样本的定性鉴别和定量分析提供了物理基础^[19-21],如图2所示。

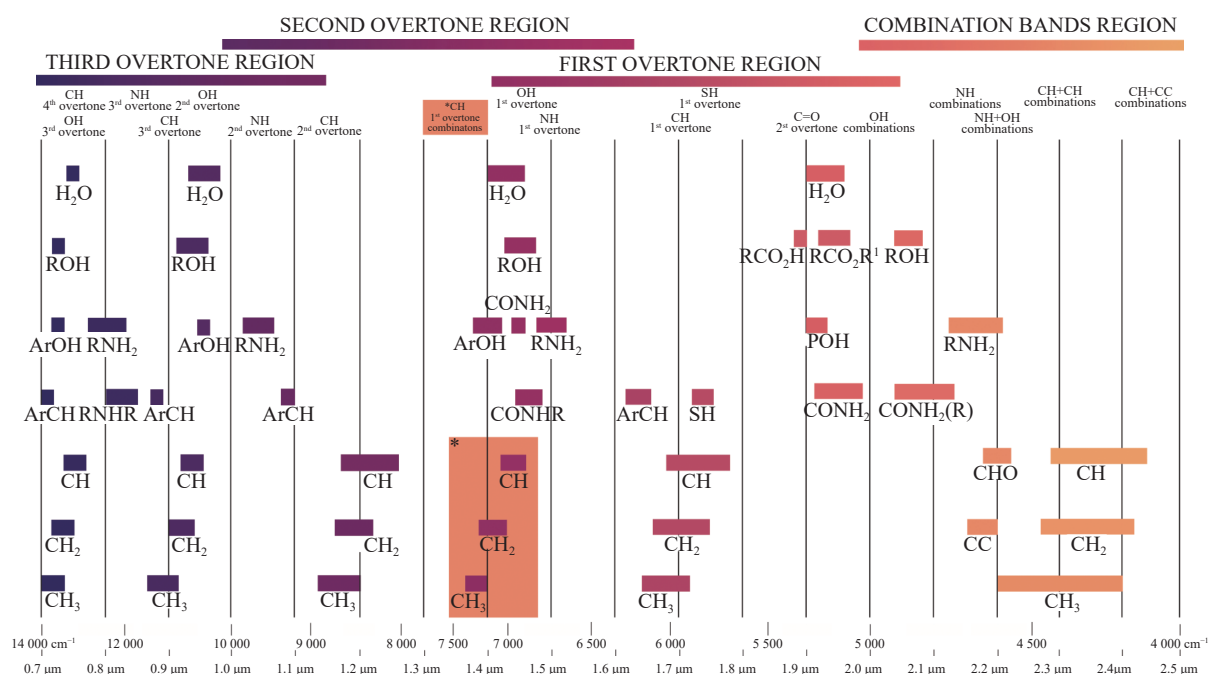


图2 NIR主要的吸收带和吸收位置^[6]

Fig. 2 Main absorption bands and absorption positions in near infrared spectrum^[6]

1.2 NIR技术在水果检测的发展与应用

1.2.1 水果成分无损检测

NIR技术能够快速准确检测水果的糖度和酸度。Jha等^[22]利用偏最小二乘法(partial least squares, PLS)和多元线性回归(multiple linear regression, MLR)构建苹果糖酸比预测模型,精度较高。孙炳新等^[23]构建红富士苹果酸含量预测模型,相关性达0.925。王转卫等^[24]结合近红外漫反射法和极限学习机-主成分分析(extreme learning machine - principal component analysis, ELM-PCA)优化算法,揭示了苹果成熟过程中内在品质与光谱特征参数的相关性。Xu等^[25]通过可见光-近红外光谱融合技术(visible and near infrared spectroscopy, VIS/NIRS)结合遗传算法(genetic algorithm, GA)和PLS模型,实现了对柚子水分及SCC的无损测定。研究表明,NIR技术可高效、

准确分析水果成分,具有重要应用价值。

1.2.2 水果熟度检测

通过检测果实内部品质指标,NIR技术可实现水果成熟度的快速评估。Olaoluwa等^[26]油梨成熟度与油脂含量、水分分布及SCC指标间的定量关系模型,实现了基于光谱特征的油梨成熟度无创评估。Chen等^[27]结合改进的PLS和移动窗口PLS,优化光程估计和模型参数,有效评估香橙成熟度。这些研究为水果成熟度评估提供了精准、高效的技术支持。

1.2.3 水果霉变检测

NIR分析技术在果品霉变检测中表现出良好效果。李顺峰等^[28]将近红外漫反射光谱与主成分分析(principal component analysis, PCA)及费舍判别分析(Fisher discriminant analysis, FDA)相结合,构建的霉变分类模型在验证集中达到

87.8% 的分类准确率。Tian 等^[29] 基于光谱自动校正技术, 通过反向传播人工神经网络 (backpropagation artificial neural network, BP-ANN) 与支持向量机 (support vector machine, SVM) 的集成建模, 使霉变识别精度提升至 90.2%。这些研究为果品品质检验提供了重要理论支持。

1.3 化学计量学方法在 NIR 分析中的应用

在利用 NIR 技术开展水果品质检测的过程中, 化学计量学方法为数据处理和模型优化提供了重要支持, 主要集中在以下 3 个方面:

1) 光谱预处理与波段甄别^[30]。针对水果特性, 通过去噪和平滑等方法提升光谱数据品质, 并筛选关键波段, 减少干扰, 提高检测精度。

2) 定量分析模型的构建^[31]。利用主成分回归 (principal component regression, PCR)、PLS 等方法建立糖度、酸度等品质参数的预测模型, 为水果无损检测提供精准技术支撑。

3) 模式识别技术的应用^[32]。结合 SVM、人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 等方法, 实现水果品种分类与品质分级, 增强品质评估和决策能力。

综合来看, 化学计量学方法在 NIR 分析中不仅提升了数据处理和模型建立的效率, 还为水果品质的快速、无损检测提供了强大的支持, 为进一步推动 NIR 技术的应用奠定了基础。

1.4 NIR 预处理方法

由于光谱数据易受环境因素影响, 常伴有噪声干扰和基线漂移现象, 导致测量精度下降和模型可靠性受损。光谱预处理通过系统修正干扰因素, 可显著提升谱图质量与预测精度。传统的光谱预处理方法主要包括: 多变量散射修正 (multiplicative scatter correction, MSC)^[32]、标准正态变换 (standard normal variate, SNV)^[33] 及平滑处理及微分运算等^[20]。

MSC 通过数学分解不同波段的多变量散射, 实现对不同波段的多变量散射的修正。SNV 则通过均值中心化与标准差归一化, 有效地克服了样本尺寸差异、光程差等因素带来的干扰。平滑处理采用 Savitzky-Golay 滤波等算法, 在保留特征信息的前提下提升信噪比, 实现信号优化^[20]。微分方法中, 一阶微分用于消除光谱漂移, 二阶微分用于校正线性相关的偏移。

在 NIR 分析中, 针对光谱漂移或偏移问题, 一阶微分能有效地克服不依赖于给定波长的偏移,

而二阶微分能有效地克服与给定波长呈线性相关的偏移。2 种方法协同作用, 可系统性提升光谱数据的稳定性与解析精度。

1.5 校正模型的选择

校正模型的选择是优化 NIR 应用效能的核心环节。通过化学计量学方法筛选特征波段, 可有效抑制光谱重叠和冗余信息对模型精度的影响^[34]。在复杂监测场景下 (如特征吸收峰强度微弱或信号信噪比偏低), 多光谱数据虽覆盖广泛波长范围, 但精准筛选关键波段成为提升模型性能的关键^[35]。

以水果品质检测为例, 在糖度、酸度和水分含量预测时, 通过优化特征吸收波段可显著抑制干扰光谱的耦合效应, 显著提升模型的稳定性和预测精度。这种特征波段选择不仅实现了光谱数据降维, 更为模型优化提供了技术支持, 确保 NIR 技术实现高精度、无损的品质检测^[36]。

1.6 定量分析的主要方法与水果无损检测的结合特点

水果无损检测的定量分析方法可分为线性与非线性 2 类。

常见的线性方法包括 PCR、逐步多元线性回归法 (stepwise multiple linear regression, SMLR) 以及 PLS。其中, PLS 凭借其通用性和标准化优势, 被广泛应用于糖度、酸度等品质参数的快速预测。其在处理光谱数据多重共线性问题时表现稳定, 但在处理强非线性关系时存在固有局限性, 适用于多样化样本的线性检测^[37]。

在苹果、柑橘等水果的品质检测中, PLS 法展现了其线性回归的高效性。特别是在样本特征具有线性可加性的情况下, 该方法通过最大化协方差实现数据降维, 在糖度、酸度和 SSC 预测中表现出良好的预测稳定性^[38]。然而当水果内部品质参数呈现显著非线性波动时 (如成熟度梯度变化), PLS 的线性假设会导致模型偏差累积, 造成预测精度下降^[39]。

非线性方法通过引入核技巧突破线性假设限制, 典型代表如 SVM 采用径向基函数 (radial basis function, RBF) 核映射, 可捕捉光谱特征的高维非线性流形^[40]。结合 GA 等特征选择策略, 能有效提取与品质参数呈非线性关联的光谱特征, 显著提升模型的泛化性能。这种方法在样本特性分布复杂或存在显著非线性效应时表现尤为突出^[41]。

方法学对比表明: PLS 等线性方法适用于标准化检测流程中的快速预测, 而 SVM 等非线性能

更好地解析复杂品质变化^[42]。实际检测中可采用“PLS 特征筛选+SVM 建模”的混合策略:先通过 PLS 提取线性敏感特征,再利用 SVM 构建非线性预测模型,从而实现检测效率与预测精度的协同优化^[43]。

1.7 NIR 分析技术的定性分析方法

定性分析方法通过光谱数据的特征提取与比对,实现水果品质参数的分类和鉴别。

1) 鉴别分析法:采用 TQ Analyst 化学计量学软件结合 PCA 和马氏距离判别法,建立多维光谱特征空间。研究表明,该方法对苹果的成熟度分级中表现出优异的分类分析性能,有效区分不同成熟阶段的样本^[44]。

2) 标准检索法:通过比对待测样本在某些特定波段(或多个波段)的光谱特征,与已知标准样本的光谱进行匹配,找到最接近的标准样本。在柑橘品种的鉴别中,该方法可通过关键波段的光

谱比对,实现品种快速判别。同时,该方法还可有效区分不同产区的水果样本^[45]。

3) 质量控制对比检索法:构建标准化质量光谱模板,通过光谱残差分析与异常检测算法,识别偏离正常模式的样本。在水果无损检测中,该方法通过对比健康样本与损伤样本的光谱差异(如霉变引起的木质素特征峰变化),实现异常样本的在线剔除。其核心价值在于将传统人工质检转化为客观光谱诊断^[46]。

2 NIR 法测定流程

NIR 法通过建立光谱吸收率与水果品质参数(如糖度、酸度等)的量化关系,实现定量分析;或基于光谱特性与相似性进行定性分类。该方法可快速确定样品组分含量或类别归属,是水果无损检测的重要技术路径,如图 3 所示。

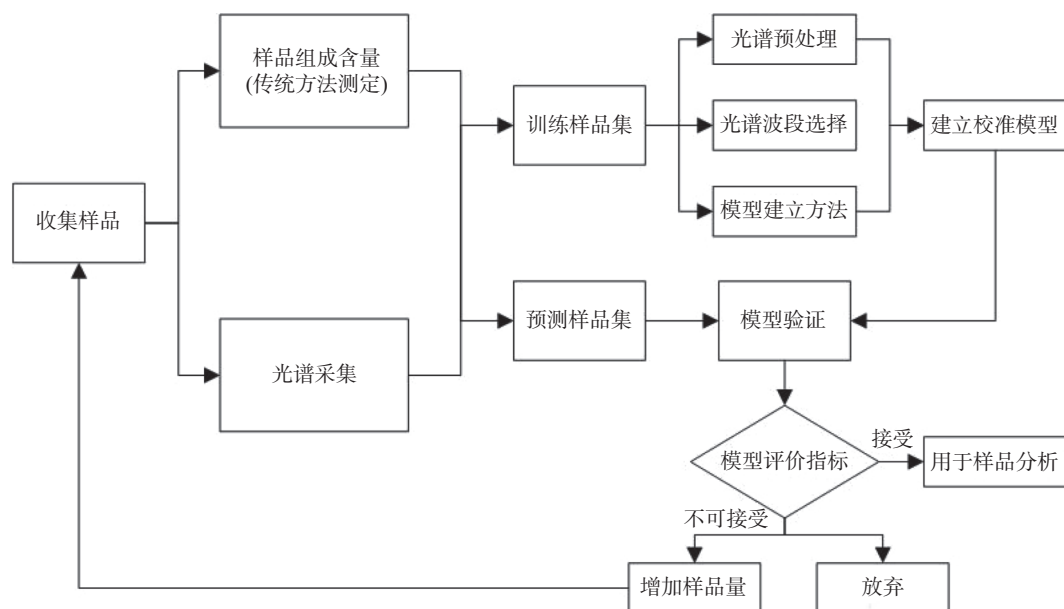


图 3 定量、定性分析流程

Fig. 3 Technical process for quantitative and qualitative analysis

3 NIR 在水果检测装置的应用

3.1 手持式便携光谱装置在苹果与桃子检测中的应用研究

近年来,手持式 NIR 装置在水果品质的快速检测中逐步展现出广泛应用潜力。樊书祥等^[47]基于日本滨松光子公司的 C11708MA 微型光谱仪,开发了一种便携式检测设备,应用于苹果与桃子糖度的无损检测。该装置在室内与户外环境下均完成了建模与验证实验,分别采集了 150 个桃子

和 140 个苹果的光谱数据,结合折光计测得的糖度作为参照构建回归模型。模型在苹果检测中表现出较高的预测准确性,预测相关系数(R_p)为 0.925,均方根误差(R_{MSEP})为 0.587%,而桃子糖度的预测结果略逊, R_p 为 0.821, R_{MSEP} 为 0.613%。

值得关注的是,该研究还构建了主-从设备间的模型共享机制,验证了模型在不同硬件平台间的传递可行性。目标设备在田间环境中对苹果与桃子糖度的预测结果依然维持较高一致性(苹果

$R_p=0.866$, 桃子 $R_p=0.816$), 显示出良好的模型鲁棒性和设备迁移能力。总体而言, 该研究不仅证明了微型近红外光谱仪在果品糖度快速检测中的实用性, 也为便携式装置在实际农业生产与品质分级中的推广应用提供了可靠技术基础。

3.2 手持式近红外光谱仪的梨品质检测研究

除苹果与桃子外, 近红外光谱仪在梨果品质无损检测中的应用也取得了积极进展。毛欣然等^[48]使用数字阵列微镜型手持式光谱仪 (IAS3125), 对雪梨、红肖梨、红香酥、蜜梨与酸梨等 5 个品种的 197 个样本进行光谱采集与建模分析。研究覆盖 900~1 700 nm 波段, 并通过一阶导数处理提升信噪比、降低果实形状差异带来的干扰。结果表明, 采用最小二乘支持向量机 (least squares support vector machines, LSSVM) 建立的非线性模型相比传统的 PLS 具有更高的预测精度与稳定性。该研究在光谱预处理、异常值剔除及模型优化方面均做出系统性探索。LSSVM 充分挖掘了光谱中的非线性特征, 显著提升了梨品质参数的预测能力, 展现出较强的泛化性能。尽管仍存在样本多样性与核函数选择等优化空间, 该成果为手持式 NIR 设备在梨果快速分级与质量监控中的应用提供了理论基础与方法参考, 具有良好的产业推广潜力。

4 结 语

光谱技术应用于水果品质检测, 通过分析水果光谱特性, 无损检测其品质及内在成分。相比传统检测方法, 光谱技术操作简便、结果准确, 且无损。不同果实对光吸收、反射特性各异, 特征峰与品质指数间关系可检测果实品质。光谱探测技术同步检测内外品质, 但模型构建复杂。NIR 技术快速发展, 因快速、无损、多组分检测等优点应用广泛。然而, 模型构建复杂、检测速度较慢、定量分析准确性需提升。未来需改进以提高应用效果。

参考文献:

- [1] 李赞, 刘思雨, 朱川, 等. 基于深度学习的水果识别系统设计 [J]. *农机化研究*, 2023, 45 (10): 187-191.
- [2] 雷琦, 周建军, 邵阳. 基于消失点的果树行中心线获取方法研究 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2022, 30 (3): 51-56.
- [3] 刘非凡. 水果无损检测技术综述 [J]. *食品安全导刊*, 2023 (6): 136-138.
- [4] 武琳霞, 李玲, 习佳林, 等. 桃品质的无损检测技术研究进展 [J]. *食品科学*, 2022, 43 (15): 367-377.
- [5] KURZ C, LEITENBERGER M, CARLE R, *et al.* Evaluation of fruit authenticity and determination of the fruit content of fruit products using FT-NIR spectroscopy of cell wall components [J]. *Food Chemistry*, 2010, 119 (2): 806-812.
- [6] 蔡雪珍. 基于近红外光谱技术分析的鲜食葡萄果实的无损检测与品质鉴定 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.
- [7] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [8] XIA Y, HUANG W Q, FAN S X, *et al.* Effect of fruit moving speed on online prediction of soluble solids content of apple using Vis/NIR diffuse transmission [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41 (8): e12915.
- [9] NCAMA K, OPARA U L, TESFAY S Z, *et al.* Application of Vis/NIR spectroscopy for predicting sweetness and flavour parameters of 'Valencia' orange (*Citrus sinensis*) and 'Star Ruby' grapefruit (*Citrus x paradisi* Macfad) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 193: 86-94.
- [10] UWADAIRA Y, SEKIYAMA Y, IKEHATA A. An examination of the principle of non-destructive flesh firmness measurement of peach fruit by using VIS-NIR spectroscopy [J]. *Heliyon*, 2018, 4 (2): e00531.
- [11] XU S, LU H Z, FERENC C, *et al.* Rapid nondestructive detection of water content and granulation in postharvest "Shatian" pomelo using visible/near-infrared spectroscopy [J]. *Biosensors*, 2020, 10 (4): 41.
- [12] POURDARBANI R, SABZI S, KALANTARI D, *et al.* Automatic non-destructive video estimation of maturation levels in Fuji apple (*Malus Malus pumila*) fruit in orchard based on colour (Vis) and spectral (NIR) data [J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195: 136-151.
- [13] SHEN F, ZHANG B, CAO C J, *et al.* On - line discrimination of storage shelf - life and prediction of post - harvest quality for strawberry fruit by visible and near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41 (7): e12866.
- [14] JAMSHIDI B. Ability of near-infrared spectroscopy for non-destructive detection of internal insect infestation in fruits: meta-analysis of spectral ranges and optical measurement modes [J]. *Spectrochimica Acta Part A: molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 225: 117479.
- [15] RIVERA N V, GÓMEZ-SANCHIS J, CHANONA-PÉREZ J, *et al.* Early detection of mechanical damage in

- mango using NIR hyperspectral images and machine learning [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 122: 91-98.
- [16] POMARES-VICIANA T, MARTÍNEZ-VALDIVIESO D, FONT R, *et al.* Characterisation and prediction of carbohydrate content in zucchini fruit using near infrared spectroscopy [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98 (5): 1703-1711.
- [17] TILAHUN S, PARK D S, SEO M H, *et al.* Prediction of lycopene and β -carotene in tomatoes by portable Chromameter and VIS/NIR spectra [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 136: 50-56.
- [18] 郎雷. 水果糖度可见/近红外光谱检测仪的研发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [19] 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.
- [20] 马本学. 基于图像处理和光谱分析技术的水果品质快速无损检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 1-117.
- [21] 吴静珠, 徐云. 基于 CARS-PLS 的食用油脂脂肪酸近红外定量分析模型优化 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (10): 162-166.
- [22] JHA S N, GARG R. Non-destructive prediction of quality of intact apple using near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47 (2): 207-213.
- [23] 孙炳新, 匡立学, 徐方旭, 等. 苹果有效酸度的近红外无损检测研究 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34 (15): 298-301.
- [24] 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.
- [25] MANCINI M, MAZZONI L, GAGLIARDI F, *et al.* Application of the non-destructive NIR technique for the evaluation of strawberry fruits quality parameters [J]. *Foods*, 2020, 9(4): 441.
- [26] OLAREWAJU O O, BERTLING I, MAGWAZA L S. Non-destructive evaluation of avocado fruit maturity using near infrared spectroscopy and PLS regression models [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 199: 229-236.
- [27] CHEN H Z, XU L L, TANG G Q, *et al.* Rapid detection of surface color of Shatian pomelo using Vis-NIR spectrometry for the identification of maturity [J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9 (1): 192-201.
- [28] 李顺峰, 张丽华, 刘兴华, 等. 基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (10): 158-161.
- [29] TIAN S J, ZHANG J H, ZHANG Z X, *et al.* Effective modification through transmission Vis/NIR spectra affected by fruit size to improve the prediction of moldy apple core [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 100: 117-124.
- [30] 赵杰文, 蒋培, 陈全胜. 雪莲花产地鉴别的近红外光谱分析方法 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41 (8): 111-114.
- [31] SAID M M, GIBBONS S, MOFFAT A C, *et al.* Near-infrared spectroscopy (NIRS) and chemometric analysis of malaysian and UK paracetamol tablets: a spectral database study [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2011, 415 (1/2): 102-109.
- [32] 朱咏莉, 李萍萍, 毛罕平, 等. 基于特征光谱提取的有机基质含水量快速测定方法 [J]. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 2011, 32 (2): 140-143.
- [33] [33] LI A, YAO C, XIA J, *et al.* Advances in cost-effective integrated spectrometers [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 174..
- [34] 吴瑞梅, 赵杰文, 陈全胜, 等. 近红外光谱技术结合特征变量筛选快速检测绿茶滋味品质 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31 (7): 1782-1785.
- [35] 刘欢, 王雅倩, 王小明, 等. 基于近红外高光谱成像技术的小麦不完善粒检测方法研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39 (1): 223-229.
- [36] SCALISI A, O'CONNELL M G. Application of visible/NIR spectroscopy for the estimation of soluble solids, dry matter and flesh firmness in stone fruits [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101 (5): 2100-2107.
- [37] LIN H, ZHAO J W, SUN L, *et al.* Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12 (2): 182-186.
- [38] CHEN Q S, ZHAO J W, LIU M H, *et al.* Determination of total polyphenols content in green tea using FT-NIR spectroscopy and different PLS algorithms [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2008, 46 (3): 568-573.
- [39] 邹涛. 基于便携式近红外光谱仪快速检测大豆蛋白优化方法的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [40] 谢丽娟. 转基因番茄的可见/近红外光谱快速无损检测方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [41] RABBANI N S, MIYASHITA K, ARAKI T. Development of non-contact strawberry quality evaluation system using visible-near infrared spectroscopy: optimization of texture qualities prediction model [J]. *Food Science and Technology Research*, 2022, 28 (6): 441-452.

- [42] 魏子朝, 卢苗, 雷文晔, 等. 一种融合叶绿素荧光技术与可见-近红外光谱的番茄幼苗热胁迫无损检测方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44 (6): 1613-1619.
- [43] 罗山, 郑彬. 机器视觉芒果分级系统中图像压缩算法研究 [J]. 机械设计与制造, 2025 (3): 96-99.
- [44] 李顿, 王雪梅, 李坤玉, 等. 基于变量筛选与机器学习算法的渭-库绿洲土壤有机质含量估测研究 [J]. 地球与环境, 2024, 52 (3): 375-385.
- [45] 李伟, 罗华平, 索玉婷, 等. 竞争性自适应加权采样算法和连续投影算法在南疆冬枣水分模型中的分析 [J]. 新疆农机化, 2019 (5): 20-23.
- [46] 郭亚. 一种便携式苹果糖度无损检测仪的设计 [D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- [47] 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.
- [48] 毛欣然, 夏静静, 徐惟馨, 等. 手持式近红外光谱仪测定梨三种品质指标通用模型建模方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44 (2): 406-412.
- (编辑 陈 红)

~~~~~

(上接第 161 页)

- [15] 邹超, 陈颖, 胡子豪, 等. 地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (6): 181-186.
- [16] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 1035-2022, 城市轨道交通上盖结构设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50157-2013, 地铁设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [18] 孙抒宇, 王经雨. 上海某地铁上盖项目大桁架下桩基础设计的探讨 [J]. 结构工程师, 2022, 38 (6): 126-133.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 55001-2021, 工程结构通用规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50476-2019, 混凝土结构耐久性设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50223-2008, 建筑工程抗震设防分类标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50909-2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范 (2016 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- (编辑 张永博)