

文章编号: 2096-3424(2025)03-0294-06

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3424.2024.074

水果糖度无损检测技术研究综述

熊宇恒¹, 石明明¹, 李军², 邹军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: 无损检测技术在食品品质评价领域中扮演着至关重要的角色, 尤其在水果糖度的快速准确检测方面。传统的破坏性检测方法不仅耗时耗力, 而且无法满足现代快速、高效的需求。随着光谱技术、成像技术和电子技术的发展, 无损检测技术逐渐成为研究热点。水果糖度作为衡量水果品质的重要指标之一, 其快速准确检测对于水果的分级、包装、贮藏和运输等环节具有重要意义。探讨当前水果糖度无损检测技术的研究进展, 分析其优势与局限性, 并对未来发展方向进行展望, 以期提升整个水果产业的竞争力提供科学依据。

关键词: 无损检测技术; 光谱技术; 介电特性检测技术; 水果糖度

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

A review of non-destructive testing technology for fruit sweetness

XIONG Yuheng¹, SHI Mingming¹, LI Jun², ZOU Jun¹

(1. School of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. Shanghai Chaoyong Technology Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Non-destructive testing technology plays a vital role in the field of food quality evaluation, especially in the rapid and accurate detection of fruit sweetness. Traditional destructive testing methods are not only time-consuming and labor-intensive but also fail to meet the demands of modern rapid and efficient processes. With the development of spectroscopy, imaging technology, and electronics, non-destructive testing technology has gradually become a research hotspot. Fruit sweetness, as one of the important indicators for evaluating fruit quality, has significant implications for fruit grading, packaging, storage, and transportation. This paper explores the current research progress of non-destructive testing technology for fruit sweetness, analyzes its advantages and limitations, and looks forward to future development directions, aiming to provide a scientific basis for enhancing the competitiveness of the entire fruit industry.

Key words: non-destructive testing technology; spectroscopy technology; dielectric property testing technology; fruit sweetness

收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 上海市科技创新行动计划(23N21900100); 浙江省“领雁”研发攻关计划(2024C01193); 江苏省重点研发计划(BE2023048); 云南省创新引导与科技型企业培育计划(202404BI090001)资助

作者简介: 熊宇恒(2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为植物补光。E-mail: 1147935869@qq.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: 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.

Citation: XIONG Yuheng, SHI Mingming, LI Jun, et al. A review of non-destructive testing technology for fruit sweetness[J]. Journal of Technology, 2025, 25(3): 294-299+312.



无损检测技术在食品品质评价领域具有重要地位,特别是在水果糖度检测方面。传统的破坏性检测方法不仅耗时耗力容易产生浪费,而且无法满足客户对高效检测水果糖度的需求。随着光谱技术、成像技术和电子技术的发展,无损检测技术逐渐成为研究的热点^[1]。水果糖度作为衡量水果品质的重要指标之一,其快速准确检测对于水果的分级、包装、贮藏和运输等环节具有重要意义。无损检测技术的应用不仅可以提高检测效率,降低成本,还能保证水果的完整性和新鲜度,对提升整个水果产业的竞争力具有积极作用。

1 水果糖度无损检测技术概述

1.1 水果糖度定义及其重要性

水果糖度是指水果中可溶性固形物的含量^[2]。它直接关联到水果的甜度和风味,是衡量水果成熟度和品质的关键指标之一。高糖度的水果往往更受消费者青睐,因此在水果的选品、贮藏和销售过程中,糖度的测定具有重要的实际意义。

1.2 无损检测技术原理

无损检测技术(non-destructive testing, NDT)^[3]是一种先进的检测方法,其通过利用声波、光波、磁场和电场等物理特性,来探测材料或结构内部的缺陷和不均匀性。这种技术的关键优势在于它能够在不损害被检测对象的使用性能的前提下进行检测,从而保证了检测过程的安全性和被检测对象的完整性^[4]。

在食品工业中,无损检测技术发挥着重要作用,尤其是在水果糖度的检测方面。在水果糖度无损检测领域,目前近红外光谱技术、高光谱成像技术、介电特性检测技术等传统技术已起到重要作用;随着科学的进步,新兴的机器视觉、图像分析和深度学习等技术也逐渐与传统技术结合,促进了新技术的产生^[5],例如激光散射图像分析技术^[6]、多光谱雷达远程感应技术^[7]等。这些新技术因其非破坏性、快速、准确等优点,在水果品质检测领域受到关注。

2 近红外光谱技术

2.1 理论基础

近红外光谱分析技术是通过检测近红外光(780~2 500 nm)与水果样品的相互作用,来进行水果糖度分析的检测技术^[8]。该技术的基本原理是根据近红外光与样品中含氢基团(如O—H、N—H、C—H)的振动合频和倍频吸收区数据^[9],

通过扫描样品的近红外光谱可以获取样品中有机分子含氢基团的特征信息。在水果糖度检测中,该技术利用水果内部成分对近红外光的吸收特性,通过光源发出的不同波长的光被水果吸收形成的独特吸收光谱,来获取糖度等化学成分信息^[10],如图1所示。

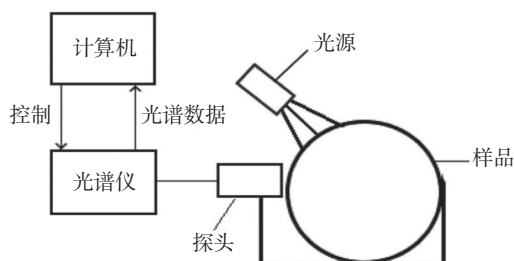


图1 近红外光谱无损检测原理图

Fig. 1 Non-destructive testing using near-infrared spectroscopy

2.2 近红外光谱技术在水果糖度无损检测中的应用

近红外光谱技术在水果糖度无损检测领域的应用已经取得了显著的研究进展。这种技术基于分子振动光谱的倍频和组合频谱带,主要针对含氢基团的吸收特性,能够快速、无损地测定水果内部的化学成分。从20世纪末至21世纪初,近红外光谱技术从实验室阶段的探索性研究,逐步发展至商业化产品(手持式检测仪等),随着技术逐渐成熟,相应的数据分析方法也得到了优化。

随着电子和计算机技术的发展,近红外光谱技术结合了更先进的数据处理方法,如偏最小二乘回归^[11]和人工神经网络^[12],这提高了检测的准确性和效率。研究者们开始探索如何将近红外光谱技术集成到便携式或在线检测设备中,以实现快速、现场的水果糖度检测。

近年来,随着设备的小型化和便携化趋势日益明显,许多企业在这一领域取得了显著进展。例如,奥普天成和绿盟科技等公司研发的手持式光谱分析仪已在湖北省成功应用于桃子糖度的无损检测。科研人员还探索了将智能手机与近红外光谱技术结合的新途径,开发了一种基于回归算法的便携式水果糖度无损检测装置^[13],有效提升了检测速度。与此同时,数据分析算法的不断优化推动了近红外光谱技术在实时监测及与物联网技术融合方面的创新。特别是,基于深度学习的方法已被用于提升水果糖度的可见/近红外光谱无损检测水平^[14]。这种方法通过融合多层感知机、卷积神经网络以及主成分分析和二维相关光谱矩阵等算法,不仅提升了检测的准确性,也极大地提

高了检测效率。此外,近红外光谱技术还被用于开发在线无损检测装置,这些装置不仅能够提高果品产业的附加值,还能增加果农的收入,推动果品产业化整体水平的升级。在实际应用中,国内外取得了显著进展。例如,华东交通大学与北京福润美农科技有限公司联合研制了我国首套具有自主知识产权的近红外光谱分选装置,并在山东烟台投入使用,成功打造了晶心高糖苹果品牌^[15]。在国际上,新西兰猕猴桃、澳大利亚苹果以及日本水果的在线近红外光谱分选应用也取得了成功^[16],这些应用不仅提高了水果的品质检测效率,也为近红外光谱技术在果业的进一步研究和应用提供了宝贵的经验。

3 高光谱成像技术

3.1 技术原理

高光谱成像技术是一种先进的遥感技术,它通过收集从紫外到红外范围内的连续光谱数据,为每个图像像素提供丰富的光谱信息^[17]。这种技术能够揭示物质的独特光谱特征,从而实现物质成分的精确识别和分类。如图 2 所示,高光谱成像系统通常包括一个成像光谱仪,该光谱仪能够将入射光分散成其组成波长,并通过一系列探测器捕获这些波长的光强度^[18]。

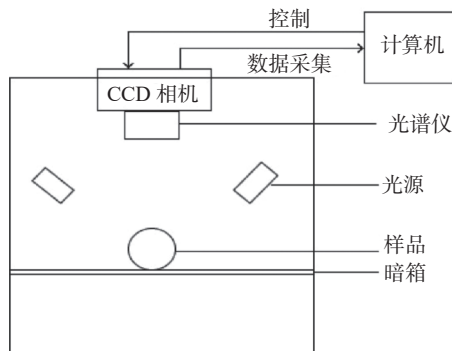


图 2 高光谱成像技术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hyperspectral imaging technology

3.2 光谱图像技术在水果糖度无损检测中的应用

自 20 世纪以来,高光谱成像技术在水果糖度检测领域的研究取得了显著进展。高光谱成像技术通过结合成像和光谱技术,能够同时捕获被测物体的空间和光谱信息,成为无损检测水果糖度的重要手段^[19]。在 20 世纪 90 年代,高光谱成像技术开始应用于农业领域,最初主要用于作物监测和资源勘探。随着技术的发展,研究者开始探索将其用于水果品质的无损检测。21 世纪初,高光

谱成像技术在水果糖度检测方面的应用逐渐增多,研究者利用该技术对苹果、草莓等水果进行糖度的无损检测,取得了初步成果^[20-22]。

近年来,高光谱成像技术在水果糖度检测方面的研究继续深入,技术不断优化,应用范围逐渐扩大。研究者们通过高光谱成像技术结合化学计量学方法,如偏最小二乘回归、人工神经网络^[23]等,建立了水果糖度的预测模型。例如,一些研究人员通过高光谱成像技术与化学计量法结合,该模型有效预测了苹果中的可溶性固形物含量^[24];同时还有一些研究者分别建立了检测红提糖度的偏最小二乘回归和最小二乘支持向量机模型,结果表明红提糖度的最优最小二乘支持向量机模型的校正集和预测集相关系数分别为 0.954, 0.952, 有效地提高了红提糖度预测性能^[25]。

此外,高光谱成像技术还被用于不同水果糖度的高精度模型研究^[26]。例如,通过分析不同糖度的西瓜和甜瓜在可见光/近红外波段的光谱差异,研究者发现在 630~650 nm 波段,尤其是 639.3 nm 处,水果糖度与光谱反射率的相关性最高^[27]。利用该波段的反射率构建的监测模型,其建模和检验的决定系数分别为 0.904 和 0.847,相对均方根误差为 6.78%,表明高光谱成像技术在检测水果糖度方面具有较高的准确性和可行性^[28]。

随着高光谱成像技术的不断发展,新技术如运动补偿高光谱成像、紧凑型热红外高光谱低温光学、宽波段一体化机载高光谱集成、基于分光的凝视型高光谱成像以及阶跃集成滤光片等技术^[29]不断涌现,这为水果糖度的高光谱成像检测提供了更多可能性。该技术具有巨大的应用潜力和发展前景,随着技术的不断进步和优化,其有望在水果品质检测领域得到更广泛的应用。

4 介电特性检测技术

4.1 技术原理

介电特性检测技术是一种基于物质介电特性的无损检测方法。该技术利用物质在外加电场中的极化特性,通过测量物质的介电常数和介电损耗来评估物质的品质^[30]。在水果糖度检测中,介电特性的变化与水果内部的化学成分和结构密切相关,因此可以用来推断水果的糖度。

4.1.1 介电特性定义

介电常数^[31]表示材料存储电能的能力,而介电损耗因数则表示材料在电场作用下能量耗散的程度。两者可以表征材料的介电特性。

4.1.2 测量方法

介电特性的测量通常采用频率响应分析法,通过在样品上施加交变电场并测量其响应,从而获得介电常数和介电损耗因数。常用的测量技术有平行板电容器法^[32]、同轴探头法^[33]和自由空间法等^[34],其中平行板电容器法如图3所示,同轴探头法如图4所示。

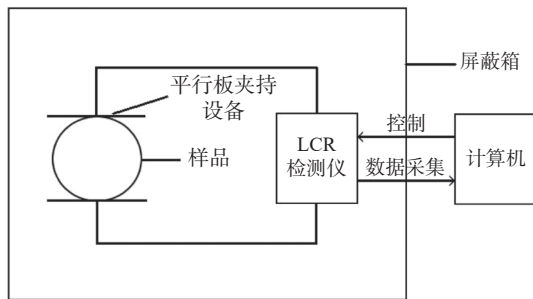


图3 平行板电容器法

Fig. 3 Parallel plate capacitor method

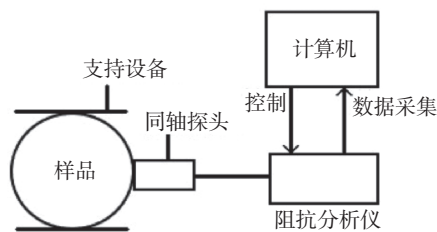


图4 同轴探头法

Fig. 4 Coaxial probe method

4.2 介电特性检测技术在水果糖度无损检测中的应用

介电特性检测技术在水果糖度无损检测领域的研究进程经历了一系列发展阶段。最初,研究集中在探索介电特性与食品原料新鲜度及腐烂程度之间的关系。相对介电常数在适当的频率范围内对食品的腐烂程度有较好的相关性,可以用于评价食品的内部品质^[35]。随着研究的深入,学者们开始关注介电特性与水果内部品质如糖度的相关性。

在20世纪60年代,已有研究利用介电特性对农产品品质进行快速无损检测^[36]。到了90年代,研究者们开始关注介电特性参数与水果品质指标之间的关系。这一时期,介电特性检测技术在水果品质无损检测中的应用逐渐增多,研究者们通过介电特性检测能够预测水果内部品质,如糖度、硬度和pH^[37]。例如,一些研究者通过测量灵武长枣的介电特性,分析了灵武枣糖度与介电特性之间的关系,研究发现,长枣串联等效电阻随

糖度的增加呈下降趋势,曲线决定系数为0.5619,利用串联等效电阻来分析枣果糖度具有一定的可行性^[38]。

进入21世纪,介电特性检测技术与化学计量学方法结合,这提高了检测的准确性和效率。研究者们开发了多种基于介电特性的无损检测方法,如一些研究人员利用介电特性建立库尔勒香梨糖度的最小二乘支持向量机和极限学习机模型^[39];还有研究者建立了番茄的多元线性回归、神经网络模型^[40],均对水果糖度检测开辟了新的方向。此外,介电特性检测技术也用于水果其他品质参数检测,如新鲜度、机械损伤、成熟度、含水量等^[41]。

5 激光散射图像分析技术

激光散射图像分析技术主要是通过激光与物质相互作用后的散射光进行分析^[42]。当激光照射到物体(如水果)表面时,由于表面的不规则性和内部结构的复杂性,光会发生散射。通过分析这些散射光的特性,可以获取物体内部结构和组成信息。这项技术可以非接触、无损地检测水果,对水果内部品质的评估尤为重要。

激光散射图像分析技术是基于模式识别技术的新兴技术,有研究者通过分析光斑图像的灰度值与苹果糖度的相关性成功建立了回归分析模型,其相关系数可以达到0.7759^[6],证明了光斑的灰度值与苹果糖度的相关性。

6 多光谱雷达远程感应技术

多光谱雷达遥感技术是一种结合了激光雷达的高精度空间信息获取能力和高光谱成像技术丰富的光谱信息的技术。这项技术通过使用不同波长的激光来探测目标,能够同时获取目标物体的三维结构和光谱特性,从而实现对物品的精确识别和分类。在水果检测领域,使用多光谱雷达遥感技术可以对水果内部品质无损检测。研究人员在约0.5m的距离,在不直接接触水果、不控制照明条件的情况下,对水果内部总可溶性固形物的估计准确性达到了0.73^[7],这展现了多光谱雷达遥感技术在水果内部品质监测和评估方面的有效性和潜力。

7 研究挑战与未来趋势

7.1 当前研究面临的挑战

7.1.1 模型的适应性

在构建水果糖度无损检测模型的过程中,确

保模型的准确性和稳定性是核心挑战。这通常涉及对一定数量的水果样本进行特征提取,并通过拟合这些特征与目标品质参数之间的映射关系来建立模型,以便后续用于水果品质的无损检测。然而,由于水果样本在时间序列、品种、地理分布等方面存在差异,这导致用于模型训练的样本可能无法涵盖所有后续待测样本的特征,从而引发模型适应性问题,影响检测的准确性^[43]。此外,模型训练时的环境参数(如温度、湿度)与实际检测时的环境参数可能存在差异,这可能导致传感器输出值的波动,进而影响模型的适应性。

7.1.2 检测精度

检测精度是水果无损检测领域的关键问题。目前,水果的无损检测的精度还无法与其有损检测相比^[17],例如,光谱检测过程中环境因素如光照条件、温度和湿度的变化会影响光谱数据的稳定性和模型的准确性;介电特性与内部成分之间的相关性不够强,不足以直接用于预测许多重要的指标参数,导致其在实际应用中受到限制^[44],且容易受测量频率影响,容易产生误差^[45]。而且,高精度的水果无损检测设备往往较为昂贵,这限制了其在大规模农业生产中的普及。

7.2 未来研究方向与技术趋势

7.2.1 增强模型的泛化能力

为了提高模型的泛化能力,需要构建更多样化的数据集,包括不同品种、成熟度和环境条件下的水果样本。此外,深度学习技术的应用为提高模型的泛化能力提供了新的可能性,特别是卷积神经网络和循环神经网络^[46],可提高模型的特征提取能力。同时,需探索迁移学习技术,使模型能够在不同数据集上快速适应和泛化^[42]。未来的研究者可以致力于半监督学习和迁移学习等方法,以减少对大量水果标注数据的依赖,并提高模型在不同数据集上的泛化性能。

7.2.2 多技术交叉融合

不同的技术有着不同的应用场景,将不同的方法结合使用分析检测同一样品可以相互扶持、提升整体的检测精度、带来一定的成本效益。例如,光谱技术与深度学习技术^[47]的融合,图像处理、机器学习技术与高光谱成像^[48]、多光谱散射图像技术的融合,计算机视觉与无损检测的融合^[49]等,可以为无损检测技术提供创新解决方案,带来新的视角与突破。利用大数据和深度学习技术,不仅可以提高现有模型的泛化能力和预测精度,还

可以通过构建融合模型,更好地理解水果内部品质与外部光谱特性之间的关系。

7.2.3 多功能化与成本降低

研究者可以开发多功能化的检测装置,使其不仅能够检测糖度,还能检测其他品质参数,如酸度、硬度等;并和客户合作,推动行业标准和规范的制定,促进技术的商业化和普及,降低现有技术的开发成本。此外,降低检测装置的使用门槛^[50]、加强相关人员培养,也有利于提升水果糖度无损检测技术的推广与创新。

8 结 语

本文综述了水果糖度无损检测技术的研究进展,包括近红外光谱技术、高光谱成像技术、介电特性检测技术、激光散射图像分析技术以及多光谱雷达远程感应技术。这些技术因其非破坏性、快速、准确等优点,在水果品质检测领域得到了广泛的研究和应用。然而,当前研究者仍需进一步解决水果无损检测的模型适应性和检测精度等问题。未来需增强模型的泛化能力,通过构建更多样化的数据集和应用深度学习技术来提高模型的准确性和效率。多技术交叉融合有望为无损检测技术提供创新解决方案,同时设备多功能化与成本降低将促进该技术的商业化与推广应用。综上所述,无损检测技术在提升水果品质评价效率和准确性方面具有巨大潜力,预计将在现代农业中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] MA J J, WANG K Q. Research progress of optical nondestructive testing technology for fruit quality [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42 (23): 427-437.
- [2] JANNOK P, KAMITANI Y, KAWANO S. Development of a common calibration model for determining the Brix value of intact apple, pear and persimmon fruits by near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2014, 22 (5): 367-373.
- [3] 高迎旺, 耿金凤, 饶秀勤. 果蔬采后内部损伤无损检测研究进展 [J]. *食品科学*, 2017, 38 (15): 277-287.
- [4] 夏星宇, 李飞, 谢康, 等. 作物种子活力无损检测技术研究进展 [J]. *种子*, 2024, 43 (10): 64-73.
- [5] RUIZENDAAL J, POLDER G, KOOTSTRA G. Automated and non-destructive estimation of soluble solid content of tomatoes on the plant under variable light conditions [J]. *Biosystems Engineering*, 2024, 242: 80-90.

- [6] 徐苗. 基于激光散射图像检测水果糖度和硬度的便携式仪器的设计与开发 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [7] MEDIC T, RAY P, HAN Y, *et al.* Remotely sensing inner fruit quality using multispectral LiDAR: estimating sugar and dry matter content in apples [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 224: 109128.
- [8] 姜北晨, 郝志勇. 利用近红外光线无损检测水果糖度的研究 [J]. *中国新技术新产品*, 2021 (22): 9-11.
- [9] TAN H Z, DONG Y Q, JIANG L W, *et al.* Simultaneous and non-destructive prediction of multiple internal quality characteristics in mandarin citrus with near-infrared spectroscopy and ensemble learning strategy [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 137: 106961.
- [10] 蒋雨鹏, 任玉, 蔡红星, 等. 基于随机森林算法以及可见-近红外光谱的苹果糖度无损检测 [J]. *传感器技术与应用*, 2022, 10 (2): 128-137.
- [11] 张欣欣, 李跑, 余梅, 等. 柑橘近红外光谱无损检测技术研究进展 [J]. *食品科学*, 2022, 43 (1): 260-268.
- [12] POBLETE-ECHEVERRIA C, DANIELS A J, NIEUWOUDT H H, *et al.* Artificial neural network as alternative method for prediction of sugar and acidity using near-infrared spectroscopy in table grapes [J]. *Acta Horticulturae*, 2020 (1292): 321-327.
- [13] LI J N, WANG Y R, MA K F, *et al.* A novel portable apple non-destructive testing system based on regression algorithm [C] // Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology. Nanjing, China: IEEE, 2022: 658-661.
- [14] 温馨. 基于深度学习的水果糖度可见/近红外光谱无损检测方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [15] 刘伟. 水果糖度便携式光谱无损检测方法研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.
- [16] 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.
- [17] 徐赛, 陆华忠, 丘广俊, 等. 水果品质无损检测研究进展及应用现状 [J]. *广东农业科学*, 2020, 47 (12): 229-236.
- [18] CHENG J H, NICOLAI B, SUN D W. Hyperspectral imaging with multivariate analysis for technological parameters prediction and classification of muscle foods: a review [J]. *Meat Science*, 2017, 123: 182-191.
- [19] MO C, KIM M S, KIM G, *et al.* Spatial assessment of soluble solid contents on apple slices using hyperspectral imaging [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 159: 10-21.
- [20] 何馥娴, 蒙庆华, 唐柳, 等. 高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展 [J]. *果树学报*, 2021, 38 (9): 1590-1599.
- [21] SEKI H, MA T, MURAKAMI H, *et al.* Visualization of sugar content distribution of white strawberry by near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Foods*, 2023, 12 (5): 931.
- [22] 廖少敏. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质无损检测的方法研究 [D]. 上海: 华东交通大学, 2024.
- [23] RAHMAN A, KANDPAL L M, LOHUMI S, *et al.* Nondestructive estimation of moisture content, pH and soluble solid contents in intact tomatoes using hyperspectral imaging [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7 (1): 109.
- [24] 黄文倩, 李江波, 陈立平, 等. 以高光谱数据有效预测苹果可溶性固形物含量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33 (10): 2843-2846.
- [25] 高升, 王巧华. 基于高光谱图像信息融合的红提糖度无损检测 [J]. *发光学报*, 2019, 40 (12): 1574-1584.
- [26] TANG C X, HE H Y, LI E B, *et al.* Multispectral imaging for predicting sugar content of 'Fuji' apples [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 280-285.
- [27] 徐赛, 孙潇鹏, 张倩倩. 大型厚皮水果的无损检测技术研究 [J]. *农产品质量与安全*, 2019 (5): 30-35.
- [28] 张飞, 罗华平, 高峰, 等. 高光谱成像技术在水果品质无损检测中的研究现状 [J]. *新疆农机化*, 2021 (6): 18-21.
- [29] MISHRA P, WOLTERING E, BROUWER B, *et al.* Improving moisture and soluble solids content prediction in pear fruit using near-infrared spectroscopy with variable selection and model updating approach [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 171: 111348.
- [30] 尹勇, 陈超, 牛希跃, 等. 基于电学特性的水果品质无损检测研究进展 [J]. *安徽农学通报*, 2022, 28 (5): 153-156.
- [31] 李博, 李传峰, 任松伟, 等. 基于介电特性在农产品品质无损检测中的应用研究 [J]. *农产品加工*, 2020 (2): 85-88.
- [32] 刘橙, 刘广同, 何金成, 等. 基于介电特性的水果成熟度无损检测研究进展 [J]. *农业工程*, 2021, 11 (12): 49-53.
- [33] 刘文超, 廖宇兰, 崔万春, 等. 基于介电特性的水果无损检测技术的应用分析 [J]. *食品研究与开发*, 2011, 32 (6): 90-93.
- [34] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃贮藏期电参数和生理参数的变化 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43 (1): 127-133.
- [35] 李元祥. 基于介电特性的果品品质无损检测技术研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2011.
- [36] 王顺, 黄星奕, 吕日琴, 等. 水果品质无损检测方法研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44 (11): 319-324.

(下转第312页)

- 图像分类算法 [J]. *应用技术学报*, 2023, 23 (4): 403-409.
- [4] 陈秋远, 李善平, 鄢萌, 等. 代码克隆检测研究进展 [J]. *软件学报*, 2019, 30 (4): 962-980.
- [5] INOUE K, ROY C K. Code clone analysis: research, tools, and practices [M]. Singapore: Springer, 2021.
- [6] SAINI V, FARMAHINIFARAHANI F, SAJNANI H, *et al.* Oreo: scaling clone detection beyond near-miss clones [C] //INOUE K, ROY C K. Code Clone Analysis: Research, Tools, and Practices. Singapore: Springer, 2021: 63-74.
- [7] 周志华. 机器学习 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [8] NIU C A, LI C Y, LUO B, *et al.* Deep learning meets software engineering: a survey on pre-trained models of source code [C] //Proceedings of the Thirty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence. Vienna: IJCAI, 2022: 5546-5555.
- [9] ZHOU X, HAN D G, LO D. Assessing generalizability of codebert[C]//2021 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME). New York: IEEE, 2021: 425-436.
- [10] BREIMAN L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45 (1): 5-32.
- [11] CHEN T Q, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C] //Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: ACM, 2016: 785-794.
- [12] HANCOCK J T, KHOSHGOFTAAR T M. CatBoost for big data: an interdisciplinary review [J]. *Journal of Big Data*, 2020, 7 (1): 94.
- [13] POPESCU M C, BALAS V E, PERESCU-POPESCU L, *et al.* Multilayer perceptron and neural networks [J]. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2009, 8 (7): 579-588.
- [14] BERRAR D. Cross-validation [J]. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, 2019, 1: 542-545.

(编辑 陈红)

(上接第 299 页)

- [37] 沈江洁, 黄森, 张院民. 基于果品介电特性的无损检测技术研究进展 [J]. *农机化研究*, 2011, 33 (5): 16-19.
- [38] 马晓明, 王松磊, 贺晓光, 等. 基于介电特性的宁夏灵武长枣内部品质检测方法研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2012, 35 (4): 334-339.
- [39] LAN H P, WANG Z T, NIU H, *et al.* A nondestructive testing method for soluble solid content in Korla fragrant pears based on electrical properties and artificial neural network [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8 (9): 5172-5181.
- [40] 王婷婷, 谭占明, 程云霞, 等. 利用电学参数和机器学习无损检测番茄可溶性固形物含量 [J]. *园艺学报*, 2024, 51 (2): 385-395.
- [41] NELSON S O, TRABELSI S, KAYS S J. Correlating honeydew melon quality with dielectric properties [C] //Proceedings of 2006 Portland. Oregon: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
- [42] 战钱. 苹果糖度检测中后向散射光斑最佳表征参数研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2015.
- [43] 张嘉君, 许海涛, 张子沫, 等. 苹果糖度无损检测技术研究进展分析 [J]. *食品安全导刊*, 2022 (22): 153-155.
- [44] LIN F, CHEN D J, LIU C, *et al.* Non-destructive detection of golden passion fruit quality based on dielectric characteristics [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14 (5): 2200.
- [45] FENG L L, GAO J L, SUI X N, *et al.* Frequency selection method with support vector machine to minimize the impact of individual differences on the electrical impedance spectra of fruits [J]. *LWT*, 2024, 210: 116817.
- [46] SHI H J, WANG Z X, PENG H Y, *et al.* Application research of non-destructive detection of apple sugar content based on convolution neural network [C] //Proceedings of the 2023 International Conference on Electronics and Communication, Network and Computer Technology. Guangzhou, China: IEEE, 2023: 168-171.
- [47] 黎兆镨, 宋亚男, 徐荣华, 等. 基于 SFM 与深度学习融合的水果体积测量算法 [J]. *计算机工程与设计*, 2023, 44 (6): 1699-1705.
- [48] 班兆军, 高喧翔, 马肆恒, 等. 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.
- [49] FILHO E V, LANG L, AGUIAR M L, *et al.* Computer vision as a tool to support quality control and robotic handling of fruit: a case study [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14 (21): 9727.
- [50] 王贺功. 西瓜内部品质移动式近红外光谱检测设备研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024.

(编辑 张永博)