

杨红欣, 唐兴萍, 杨正明, 等. 多光谱技术在食品无损检测中的应用进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 350–357. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040152

YANG Hongxin, TANG Xingping, YANG Zhengming, et al. Application Research and Prospects of Multispectral Technology in Non-destructive Testing of Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 350–357. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040152

· 专题综述 ·

多光谱技术在食品无损检测中的应用进展

杨红欣¹, 唐兴萍¹, 杨正明¹, 张 菊², 陆娅娟², 吴文斗^{1,2,*}

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201;

2. 云南农业大学大数据学院, 云南昆明 650201)

摘要: 食品检测技术在确保食品安全方面发挥着至关重要的作用, 传统的食品检测方法具有一定的破坏性且费时、低效、操作繁琐和不客观, 因此探究无损、快速、高效的检测技术, 对保障食品安全和质量评估具有十分重要的意义。多光谱成像 (Multispectral Imaging, MSI) 技术是一种新兴的无损检测技术, 具有快速、无损、客观等特点, 为食品领域快速、无损检测提供了新的方法和手段。论文介绍了 MSI 成像技术的原理、优缺点以及多光谱成像技术的数据分析方法, 对国内外多光谱技术在水果的品质评估、蔬菜分级、肉制品掺假和水产品的腐败变质检测等领域应用研究进展进行了综述, 最后对多光谱技术在未来食品的内部品质和外部品质无损检测中的发展进行总结展望。

关键词: 多光谱技术, 无损检测, 食品安全, 食品品质

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)08-0350-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040152



本文网刊:

Application Research and Prospects of Multispectral Technology in Non-destructive Testing of Food

YANG Hongxin¹, TANG Xingping¹, YANG Zhengming¹, ZHANG Ju², LU Yajuan², WU Wendou^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. College of Big Data, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Food safety hinges on effective detection technology. Traditional methods, while somewhat destructive, also prove time-consuming, inefficient, cumbersome, and subjective. Hence, it is of great significance to explore non-destructive, swift and efficient detection technology for ensuring food safety and quality assessment. Multispectral imaging (MSI), an emerging non-destructive detection technology, features rapidity, non-destructiveness, and objectivity. It introduces a new method for expeditious and non-destructive detection in the food industry. This paper introduces the principles, advantages and disadvantages, and data analysis method of MSI technology and conducts a review of related research on the application of MSI technology at home and abroad in the fields of fruit quality assessment, vegetable grading, meat adulteration and aquatic product spoilage detection. In the end, the paper makes a summary and future outlook on the development of MSI technology in the non-destructive detection of internal and external food quality.

Key words: MSI technology; non-destructive detection; food safety; food quality

食品质量与安全是人们共同关注的热点, 在食品销售链中如何保证食品及其原料的质量安全还面临诸多的问题和挑战, 如食品损坏、食品营养物质的

流失、食品污染和食品掺假等^[1]。因此对食品进行快速、客观的检测、分类和分级, 确保产品质量的优越性和一致性的同时, 还需在激烈的市场竞争下保持和

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 2021 年云南省“三区”科技人才支持计划-吴文斗 (A3032021156005); 科技创新-基于区块链的云南核桃产品追溯体系研究 (A303202105400202)。

作者简介: 杨红欣 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学大数据, E-mail: 1904814774@qq.com。

* 通信作者: 吴文斗 (1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农业大数据、食品大数据相关领域, E-mail: wuwd2004@126.com。

提高盈利能力^[2],这是当前食品面临和急需解决的难题。

传统食品检测(高效液相色谱、气相色谱、离子色谱等)方法,存在着昂贵、低效、复杂样品制备和操作等问题^[3]。因此,食品检测技术逐渐转向了无损检测领域,无损检测是指在不破坏检测样品的情况下,采用一定的检测技术和分析方法对样品的内部和外部品质进行测定,并按相关的标准对其作出评价的过程^[4]。目前应用于食品无损检测技术主要有电子鼻、机器视觉、高光谱、近红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱等,其各自优缺点如表 1 所示。

近年来以人机为载体的多光谱成像技术广泛应用于农业领域农作物生长状态监测^[5]、病虫害防治^[6]和农作物产量估测^[7]等。多光谱成像(Multi-spectral Imaging, MSI)是一种新型的、快速发展的分析检测技术,它将成像和光谱技术融合在一起,该技术具有无损、快速、无需样品预处理等优点^[8]。多光谱成像处理的是离散光谱范围内的窄带图像,可以捕获不连续光谱范围内的图像数据,生成目标物体中每个像素的特征波长,因此适用于食品质量分析和可视化的呈现^[9]。论文介绍了多光谱成像技术,并对该技术在水果、蔬菜、肉类及肉制品和水产品的检测中的应用进行了综述,对多光谱技术在未来食品无损检测中的发展进行总结展望。

1 多光谱技术介绍

1.1 多光谱系统组成及原理

多光谱成像可提供和采集从紫外到近红外波长范围(200~2500 nm)内多个离散波段的数据,并在此基础上新增光谱信息维度,组成了包括二维空间信息和一维光谱信息等多种信息的“三维信息立方体”。多光谱成像系统设备结构和组成简单易操作,主要由 CCD 相机、发光二极管(LED)和一个内层涂有哑光油漆的积分球三个主要部件组成。多光谱成像是一种多通道成像技术,即采用两个或两个以上波段,对样本进行三维信息的瞬时采集^[19]。多光谱成像原理是在光谱仪的内部,光线从激发光源发出,经过测试样本的吸收和反射,反射光通过一定波段范围的滤

光镜后进入成像系统,形成样本的多光谱信息,最后利用合适的化学计量学方法对其进行处理和分析^[20]。

1.2 多光谱数据分析

1.2.1 MSI 光谱的预处理方法 在光谱数据采集时,多光谱系统所采集的数据中不仅包括被测样品的光谱信息,还包含了散光、背景信息以及噪声的干扰,进而使建模效果不佳。因此在建模前需要对原始光谱数据进行预处理,以提高信噪比,减小无效和噪声信息对实验结果造成的误差,挖掘更多有价值的信息。目前应用较多的光谱预处理方法有:主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)^[21]是降低高光谱维数、增强感兴趣信息、去除噪声提供的一种有效的手段;平滑法(Savitzky-Golay, S-G)^[22]可以提高光谱的平滑性,降低噪音的干扰。其原理是将光谱分为数个窗口,在每个窗口内使用最小二乘法进行多项式拟合;多元散射校正法(Multiplicative Scattering Correction, MSC)^[23]将所有光谱样品的平均光谱作为标准光谱,对每个样品的光谱进行线性回归,得到平移量和偏移量,最后消除基线平移和偏移,得到校正后的光谱;标准归一化变量(Standard Normalized Variate, SNV)^[24]主要用于消除待测物固体颗粒大小、表面散射以及光程变化对光谱的影响等。

1.2.2 MSI 光谱的特征波长选择方法 特征提取在一定程度上降低了数据运算量、提高了检测效率。常见的提取多光谱特征波长的方法有:遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[25]是一种基于“适者生存”的生物进化机制获得全局最优解的搜索算法;连续投影算法(Successive Projections Algorithm, SPA)^[26]是一种使矢量空间共线性最小化的前向变量选择算法,它的优势在于提取全波段的几个特征波长,能够消除原始光谱矩阵中冗余的信息;无信息变量消除(Uninformation Variable Elimination, UVE)^[27]是基于偏最小二乘模型回归系数建立的一种特征波长的选取方法,其主要作用是剔除对模型没有贡献的波长点从而降低数据的维度;竞争性自适应重加权算法(Competitive Adaptive Reweighted Sampling, CARS)^[28]是以达尔文进化论的“适者生存”为指导

表 1 食品中常用的无损检测技术及优缺点

Table 1 Non-destructive testing techniques commonly used in food and their advantages and disadvantages

检测方法	优点	缺点	实例
电子鼻	响应时间短、灵敏度高、操作简单	缺乏通用性、对环境敏感性较高、灵敏度不足	霉心病苹果特征气味检测及无损检测模型建立 ^[10]
机器视觉	清晰度高、检测速度快	易受环境影响、数据量大	葡萄品质的无损检测 ^[11]
高光谱	图谱合一、分辨率高、模型多样	冗余度高、信噪比低、非线性强、设备昂贵	小白杏成熟度判别 ^[12]
近红外光谱	可靠性高、检测速度快、分析成本低	建模复杂、模型通用性弱、穿透能力较弱	无花果成熟度的快速判别 ^[13]
拉曼光谱	准确性高、无损快速高效、具有更窄、更清晰的峰特征	样品准备复杂、无法实时获取信息	检测香蕉果实中的淀粉 ^[14]
荧光光谱	高灵敏度、快速、无损、装置成本低	存在错峰重叠、归属不明的问题	果蔬中赤霉病和腐病的检测 ^[15]
磁共振成像	快速直观,能得到空间信息和不同切层图像信息	设备成本较高、成像速度较慢	注水猪肉的定性、定量检测 ^[16]
热成像	成像速度快、检测面积大	对比度弱、信噪比低、高度依赖环境条件	未成熟绿色柑橘果实的颜色和热成像检测 ^[17]
X射线成像	穿透能力强,能反应内部特征	成本相对较高,对安装及安全要求严格	核桃质量的检测 ^[18]

理论,采用蒙特卡洛采样以及偏最小二乘回归法的特征波长优选方法。

1.2.3 MSI 光谱分析模型的建立方法 从多光谱图像中提取的光谱和纹理信息,可以反映样品的物质组成、结构和性质等。结合化学计量学建立模型的目的是建立化学值与光谱和图像数据对应的联系,了解光谱、纹理变量与测试样品之间的定性或定量关系,模型的可靠性和准确性对于定量分析或定性判别具有重要意义。常用的建模方法有:支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[29]是基于统计学习的一种分类方法,要实现 SVM 分类目的主要是通过寻找各类样本间的分类超平面;反向传播神经网络^[30](Back Propagation Neural Network, BPNN)是一类能够比线性技术更精确地解决复杂问题的非线性神经网络。BPNN 采用基于梯度下降法的离线训练算法来更新网络权值,以确保所设计的神经网络收敛到期望的控制器输出;偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)^[31]是一种线性模型,在光谱建模分析中的应用较多,该建模方法将光谱变量转变为维度更小的建模因子,同时生成建模回归曲线,通过分析回归曲线,可以提取有效波长,以方便后续建模分析;偏最小二乘判别分析(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA)^[32]是一种基于 PLSR 用于解决多分类问题的线性监督分类算法;多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)^[33]选择多个特征峰数据作为自变量,对于含有多个特征峰的待测物定量分析有明显优势,但多元线性回归要求各自变量间相互独立,在实际应用中往往无法满足这一要求,因此具有一定局限性。

1.2.4 MSI 光谱分析模型的评估 采用确定系数(R^2)^[34]、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)^[35]、预测均方根误差(Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP)^[36]、校正集均方根误差(Root Mean Squared Error of Calibration, RMSEC)^[37]、剩余预测偏差(Residual Prediction Deviation, RPD)^[38]等来验证所建立的校准模型的准确性。RPD 值越高,该模型准确预测样本化学成分的概率就越大。RPD 值在 2.4 到 3.0 之间被认为是差的,模型只能用于非常粗略的筛选,而 RPD 值大于 3.0 表示模型性能较优越,可以用于实际检测和质量控制。一般来说,模型具有较高的 RPD 值,较低的 RMSEC 和 RMSEP 值时,表明所建模型的预测能力及适应性越强^[39]。定性模型则以模型预测的正确判别率作为评判标准,即判别正确的样本个数占样本总数的百分比,正确率越高,模型性能越好、精度越高。

2 多光谱成像技术在食品无损检测中的应用

多光谱成像技术在食品无损检测领域有着广泛的应用,使用多光谱成像技术可以准确有效地对食品进行定性定量分析,从而进一步达到食品品质评估、

质量分级或掺假鉴别的目的。

2.1 多光谱成像技术在水果品质无损检测中的应用

传统水果检测方法需对果实进行破坏、操作复杂、效率低,难以实现大批量检测^[40]。为了解决该难题,科研工作者将目光投向了无损检测技术,目前已有声学振动^[41]、电子鼻^[42]、数字图像^[43]等方法对果实进行检测,但这些方法获取的数据有限,对果实内部质量实时在线分级存在一定难度。而多光谱成像技术可以根据采集到的光谱和图像信息对水果进行快速检测,从而实现水果在线分选,满足水果产业需求。

水果品质不仅取决于外形、大小和色泽,还与成熟度、含糖量、果实硬度、含水量以及内部缺陷有关^[44]。Tang 等^[45]在 350~1200 nm 范围内使用多光谱成像系统采集富士苹果数据,而后采用 MLR 模型预测糖含量,获得 $R=0.8861$, $RMSE=0.8738$ 的结果,表明多光谱成像系统可以用于苹果的含糖量检测。Vetrekar 等^[46]使用多光谱成像方法区分自然和人工催熟香蕉,分类准确率达到 $88.82\%\pm 1.65\%$ 。杨甜军等^[47]基于虚拟仪器 LabVIEW 和多光谱成像技术设计了一套苹果品质检测的多光谱成像装置,能够对苹果大小、形状、损伤以及糖度等指标进行检测,具有无损和快速的特点。

水果病害是水果安全品质研究的核心问题之一,尽早发现病害便能最大程度上降低影响、减少经济损失。Hashim 等^[48]用多光谱成像系统检测芒果冷害,从实验可以得出最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)模型预测精度为 83.3%。Ghanei 等^[49]将多光谱成像系统用于柑橘青霉病的检测与分类,在接种真菌后第 4 d 和第 5 d 腐烂,腐烂和健康区域的分类准确率分别为 98.6% 和 100%。董建伟等^[50]提出一种基于多光谱图像的库尔勒香梨表面缺陷检测方法。对带有疤痕、病斑和腐烂缺陷的果实识别准确率可达 92% 以上,具有较高准确性,实验结果验证了该技术可用于库尔勒香梨的实时检测。

多光谱成像技术除了应用在整个水果的检测,还在即食水果中发挥其优势。Manthou 等^[51]利用多光谱成像技术对即食菠萝的颜色、气味、纹理三个方面进行质量评估,从实验中可以看出多光谱技术对于即食菠萝评估的准确度可以达到 85%。多光谱成像技术也用于水果干制品的品质检测和评估。Jdicke 等^[52]用芒果片在 40~80 °C 的空气温度和 5%~30% 的相对空气湿度下干燥,其中使用 PLS 进行建模和预测时,实现了 RSMEP 为 0.05 和 R^2p 为 0.96 的水分含量预测。PCA/PCR 预测复水后总可溶性固形物(TSS)的 R^2p 最高为 0.96,PLS 预测复水化产物 TSS 的 R^2p 为 0.93。多光谱成像技术在水果内部质量检测中研究较少,为研究者提供了以后研究的方向和目标,未来可以将多光谱技术更多地应用于水果的

糖度、硬度、颜色、成熟度和农药残留等检测中。

2.2 多光谱成像技术在蔬菜中的应用

目前多光谱技术在蔬菜中的应用主要在简单的分类、分级及损伤检测。Sendin 等^[53]使用 PLS-DA 模型,在区分完好玉米和不良材料方面表现良好,交叉验证的决定系数(Q^2)为 0.35 至 0.99 以及分类准确率为 83% 至 100%。Zhang 等^[54]探讨基于单镜头方法的新型多光谱成像系统在马铃薯缺陷检测和分类。利用 LSSVM 模型建立了马铃薯缺陷分类模型且测试集的分类准确率达到 90.70%。

玉米通常会受到玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)的污染,对人体造成严重危害。Liu 等^[55]采用多光谱成像技术结合不同机器学习方法对玉米中 ZEN 含量进行检测。利用 GA 结合 BPNN 可以筛选出不同程度 ZEN 含量的玉米,GA 结合 BPNN 方法对 ZEN 污染水平的检测准确率为 93.33%。因此多光谱成像与机器学习相结合适用于玉米中 ZEN 含量的快速测定。

影响蔬菜干制品品质的指标之一就是水分,水分过多不易长时间储藏并且会引起微生物污染,所以对于蔬菜干制品水分的控制至关重要。Younas 等^[56]通过多光谱成像技术结合化学计量学方法来测量热风干燥蘑菇中的水分状况。使用 PLS、BPNN 和 LSSVM 模型建立定量模型。其中, BPNN 模型的预测效果较好,决定系数 $R_c^2=0.9829$, $R_p^2=0.9639$ 。验证了多光谱成像预测水状况的潜力评估,为食品加工提供了合适的检测平台。Yu 等^[57]使用多光谱成像系统快速检测胡萝卜干切片的水分和收缩率,在运用的模型当中 LSSVM 模型获得了最佳结果,预测的决定系数(R_p)=0.942, RMSEP=0.0808%, RPD=2.636, $R_p=0.953$ 、RMSEP=0.0902% 和 RPD=3.271。该模型对于水分的准确测定,使生产者可以及时调整干燥装置的工艺参数,从而保证最终产品的质量。

2.3 多光谱成像技术在肉类及肉制品品质无损检测中的应用

目前,肉及肉制品的检测方法有感官评价、酶联免疫吸附试验、分子生物学方法、电子鼻技术等,但存在检出率低、耗时长、对样品破坏和操作复杂等缺点^[58]。多光谱作为一种快速、无创伤的分析技术,可以应用于肉类及肉制品的质量和安​​全评估,包括腐败检测、掺假鉴定、营养评估、微生物分析、颜色和嫩度测定等^[59]。

掺假通常是将便宜或质量较差的材料添加到价值高或质量好的材料中的手段,而这两种材料具有非常相似的化学特征^[60]。Ropodi 等^[61]利用多光谱成像与数据分析方法相结合,检测牛肉中掺入的碎马肉。检测掺假样品的分类模型性能受储存过程中肉色变化的影响,但使用 SVM 模型可以将所有纯样品和新鲜的样品正确分类,正确分类准确值达 95.31%。

其次,多光谱成像技术可用于对肉类营养价值

的评估和分类,其中金涛等^[62]研究多光谱成像技术测定牛肉干中水分含量,发现 BPNN 模型对牛肉干水分含量检测效果最佳,其 R^2 为 0.941、RMSEP 为 3.602% 和 RPD 为 4.142。Tsakanikas 等^[63]提出了一种利用多光谱成像特性进行食品质量评估和肉类样品污染可视化的新方法,开发了支持向量回归(Support Vector Regression, RVR)模型,以提供储存期间微生物计数的定量估计。实验结果显示了良好的性能,对于模型验证总体正确分类率在 89.2% 到 80.8% 之间。Li 等^[64]利用多光谱成像和机器学习分类器开发一个牛肉切割分类模型。使用单模和多模特征集,用不同的基于机器学习的分类器,即线性判别分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)、SVM 和随机森林(Random Forest, RF)算法来开发一个准确的分类模型。优化的 LDA 分类器在多模态特征融合的情况下达到了 90% 以上的预测精度。证明了机器学习和特征融合方法在未来农业应用中利用多光谱成像技术进行肉类分类的潜力。

另外,研究人员也将该技术用于肉类中异物的检测。Wang 等^[65]利用多光谱成像技术在 405~970 nm 范围内对瘦猪肉中的骨头碎片进行检测。选择 SPA 算法确定了七个关键波长(450、470、645、660、700、780 和 970 nm),与全光谱建立的模型相比,感兴趣区域在关键波长处提取的光谱数据的测试集分类最高为 100%。使用的 LPS 模型对瘦肉中骨头碎片的检测效果最佳,并且基于关键波长的训练和测试集的误分类率小于 1%。

2.4 多光谱成像技术在水产品品质无损检测中的应用

水产品组织结构脆弱,含有丰富的内源酶和嗜冷细菌,在储藏和运输过程中容易腐烂变质^[66]。因此水产品的质量和安全需要认真评估,以获得客户的信任 and 信心。目前,水产品的真实性、新鲜度、营养损失和细菌污染是水产业需要解决的主要问题^[67]。

新鲜度是判断食品食用属性的基本品质属性,也是易腐食品经处理后可能发生显著变化的品质属性^[68]。因此,新鲜度是作为评价鱼品质的最重要指标之一,总挥发性碱性氮^[69](Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)值可以反映水产品贮藏过程中酶和微生物的作用,常作为评价水产品新鲜度的化学指标。Omwange 等^[70]利用多光谱成像技术结合多元分析技术,提供一种快速、无损的方法来评估 5℃ 以下冷藏的完整日本鲭鱼的新鲜度。多光谱成像仅通过捕获不同激发波长的鱼类图像就可以成功地无损地评估鱼类的新鲜度。Cheng 等^[71]采用 5 个 SPA 算法和 6 个 GA,建立的 LSSVM 和 MLR 模型,对预测化学变质过程中草鱼鱼片中的 TVB-N 和 K 值表现良好,其中 $R^2_p>0.900$ 和 RPD>3.000。所以开发实时在线多光谱成像系统检测,用于草鱼鱼片质量评价和控制是可行和实用的。Khoshnoudi-Nia 等^[72]使用简单的多光谱成像系统以及线性和非线性回归来

评估,在 $4\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下储存 12 d 期间各种鱼类腐败指标。运用 LSSVM 模型的多光谱成像系统可以同时预测所有总挥发性基本氮和干冷营养板计数(Psychrotrophic Plate Count, PPC)和感官评分三项指标。以上研究均表明应用多光谱成像技术快速测定水产的品质和质量是可行的,为快速检测水产品提供了理论依据。

2.5 多光谱成像技术在其他食品检测中的应用

多光谱成像技术除了用于上述食品外,还用于其他类型食品的检测。例如多光谱用在小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(Deoxynivalenol, DON)毒素的检测, DON 被认为是 III 类致癌物并且小麦很容易受到脱氧雪腐镰刀菌烯醇的污染。Shi 等^[73]利用多光谱成像系统,建立了一种快速无损检测小麦中 DON 含量和污染程度的方法,其中 PCA-PLS 模型对污染程度分类的准确率达到 94.29%。除了病害的检测,多光谱技术在品种的识别也表现出相对优势。许学等^[74]利用多光谱成像技术和化学计量学方法建立相应的品种鉴定模型,实现小麦品种的快速无损鉴定。

食品分类可以提高其品质,也方便食品的储藏和销售。但目前在市场上运用的技术很难做到精准分类,而多光谱的出现使食品分类进入了新阶段。Liu 等^[75]选用三种外观与泰国茉莉花大米相似的大米,通过多光谱图像进行分类和定量预测实验。对于样品的分类, BPNN 模型可以很容易地对 4 种不同大米进行分类,准确度可达到 92%。Mihailova 等^[76]应用多光谱成像来区分烘焙的阿拉比卡咖啡豆和罗布斯塔咖啡豆,使用正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)模型,实现了测试数据集中两种咖啡物种的 100% 正确分类。Yu 等^[77]通过使用基于 PCA 和 SVM 的分析方法,尝试区分完整坚果和虫害坚果之间的反射光谱数据,在校准集和预测集中实现了高达 99.1% 和 97.5% 的分类准确率。Lianou 等^[78]选用等温条件下存储的乳制品中获取的多光谱图像的训练特征,输入到 SVM 模型,确定香草奶油的微生物质量。然后再用不同温度条件下(4、8、12 和 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)的两批奶油样品,分别是新鲜样品和变质样品,对两种奶油样品进行了分析。此模型验证两类分类的总体准确率为 91.7%。所以,多光谱成像技术可能是一种实时评估香草奶油样品微生物质量的方法。

掺假是食品中经常出现的问题,引入多光谱技术在一定程度上可以减少食品掺假事件的发生。Bandara 等^[79]将酒黄石米粉作为掺假物加入到姜黄中,使用 PCA 和 Bhattacharyya Distance 的算法,可以检测出其中的掺假物质。Liu 等^[80]利用多光谱成像结合化学计量学方法对番茄酱中的蔗糖掺假进行快速定性和定量检测。其中 LSSVM 提高了预测性能,番茄酱第 1 批次和第 2 批次 R^2 分别为 0.936 和

0.966, RMSEP 分别为 0.521% 和 0.445%, RPD 分别为 5.014 和 5.865。Herath 等^[81]利用透射率多光谱成像定量评估椰子油掺假,其中训练样本的 R^2 为 0.9876,测试样本的均方误差为(Mean Squared Error, MSE)0.0029。验证了多光谱成像系统能够准确地评估椰子油的掺假。

如表 2 所示,多光谱成像技术对不同成分光谱吸收具有差异性,通过差异性的光谱信息和图像信息可以更清楚地反映出食品当前状况。因此,多光谱成像对观察食品缺陷、化学成分及物理性质有独特优势,可更好地应用到不同类型的食品检测中。

表 2 多光谱成像技术在食品领域应用一览表
Table 2 List of multispectral imaging applications in the food sector

食品领域	样品	检测目的	模型	检测物	文献
水果	芒果	冷害	LSSVM模型	-	[48]
		品质评价	PLS模型	-	[52]
	苹果	糖度	MLR模型	含糖量	[45]
	蘑菇	品质评价	BPNN模型	水分	[56]
蔬菜	玉米	分类	PLS-DA模型	-	[53]
		污染检测	GA-BPNN模型	ZEN	[55]
	马铃薯	品质评价	LSSVM模型	-	[54]
	胡萝卜干	水分和收缩率	LSSVM模型	-	[57]
肉类	牛肉	掺假	SVM模型	马肉	[61]
		水分含量	BPNN模型	-	[62]
	日本鲑鱼	微生物污染	SVM模型	微生物	[63]
			PLS模型	-	[70]
水产品	草鱼	新鲜度	LSSVM模型	TVB-N	[71]
	鱼		LSSVM模型	TVB-N PPC	[72]
	小麦	污染检测	PCA-PLS模型	DON	[73]
	泰国茉莉花大米	分类 掺假	BPNN模型 LSSVM模型	- 三种相似大米	[75]
其他	番茄酱		LSSVM模型	蔗糖	[80]
	阿拉比卡咖啡豆	掺假	OPLS-DA模型	罗布斯塔咖啡豆	[76]

3 结论与展望

本文综述了多光谱成像技术在果蔬、肉类及肉制品和水产品的质量安全检测和品质评估中的应用,验证了多光谱成像技术运用于食品检测的可行性,该技术为食品领域提供了一种快速、高效的无损检测方法和手段,在未来食品无损检测应用方面具有巨大潜力。

近年来,多光谱技术在食品无损检测领域取得了显著的进展。研究人员通过优化光谱采集设备和算法,提高了检测的精度和效率。同时,结合人工智能技术,多光谱数据的处理和分析能力得到了进一步提升,为食品检测提供了更可靠的手段。

尽管多光谱技术在食品检测中取得了一系列的成果,但仍然面临一些挑战。例如,不同食品的光谱特性各异,需要针对性地优化检测方法。此外,多光谱技术在实际应用中的成本也需要进一步降低,以促

进其更广泛地应用。未来,可以考虑将多光谱技术与其他无损检测手段相结合,进一步提高检测的准确性和全面性。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 邓素梅,刘厦,康凯,等.表面增强拉曼光谱技术在食品检测中的应用研究进展[J].分析试验室,2022,41(2):232-239. [DENG S M, LIU X, KANG K, et al. Progress in the application of surface-enhanced Raman spectroscopy in food detection[J]. Analytical Laboratory, 2022, 41(2): 232-239.]
- [2] LU Y Z, HUANG Y P, LU R F. Innovative hyperspectral imaging-based techniques for quality evaluation of fruits and vegetables: A review[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(2): 189.
- [3] HE Y, BAI X L, XIAO Q L, et al. Detection of adulteration in food based on nondestructive analysis techniques: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(14): 2351-2371.
- [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. [WU L X, LI L, XI J L, et al. Research progress on nondestructive testing technology of peach quality[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 367-377.]
- [5] PRIKAZIUK E, NTAKOS G, TEN D T, et al. Using the SCOPE model for potato growth, productivity and yield monitoring under different levels of nitrogen fertilization[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 102997.
- [6] CHANDEL A K, KHOT L R, SALLATO B. Apple powdery mildew infestation detection and mapping using high-resolution visible and multispectral aerial imaging technique[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110228.
- [7] VATTER T, GRACIA-ROMERO A, KEFAUVER S C, et al. Preharvest phenotypic prediction of grain quality and yield of durum wheat using multispectral imaging[J]. *The Plant Journal*, 2022, 109(6): 1507-1518.
- [8] 王雪萌,何欣,张涵,等.基于多光谱成像技术快速无损检测紫花苜蓿人工老化种子[J].草业学报,2022,31(7):197-208. [WANG X M, HE X, ZHANG H, et al. Rapid and non-destructive detection of artificially aged alfalfa seeds based on multi-spectral imaging technology[J]. *Pratacultural Journal*, 2022, 31(7): 197-208.]
- [9] GOMES W P C, GONALVES L, DA S C B, et al. Application of multispectral imaging combined with machine learning models to discriminate special and traditional green coffee[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107097.
- [10] 张建超,张鹏,薛友林,等.基于电子鼻表征霉心病苹果特征气味及无损检测模型建立[J].食品与发酵工业,2022,48(2):267-273. [ZHANG J C, ZHANG P, XUE Y L, et al. Characterization of apple characteristic odor and establishment of non-destructive detection model based on electronic nose[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(2): 267-273.]
- [11] 刘云玲,张天雨,姜明,等.基于机器视觉的葡萄品质无损检测方法研究进展[J].农业机械学报,2022,53(S1):299-308. [LIU Y L, ZHANG T Y, JIANG M, et al. Research progress on nondestructive detection methods of grape quality based on machine vision[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2022, 53(S1): 299-308.]
- [12] 刘金秀,贺小伟,罗华平,等.基于高光谱成像技术的小白杏成熟度判别模型[J].食品研究与开发,2022,43(15):158-165. [LIU J X, HE X W, LUO H P, et al. Maturity discriminant model of Xiaobai apricot based on hyperspectral imaging technology[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(15): 158-165.]
- [13] 周靖宇,孙锐,余多,等.基于近红外技术和偏最小二乘判别法对无花果成熟度的快速判别[J].食品与机械,2020,36(11):107-111. [ZHOU J Y, SUN R, YU D, et al. Rapid identification of fig maturity based on near infrared technology and partial least squares discriminant method[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(11): 107-111.]
- [14] NAKAJIMA S, KUROKI S, IKEHATA A. Selective detection of starch in banana fruit with Raman spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134166.
- [15] SARIMOV R M, LEDNEV V N, SIBIREV A V, et al. The use of fluorescence spectra for the detection of scab and rot in fruit and vegetable crops[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 8: 640887.
- [16] 盖圣美,张中会,游佳伟,等.低场核磁共振技术结合化学计量学方法定性、定量检测注水猪肉[J].食品科学,2020,41(4):243-247. [GAI S M, ZHANG Z H, YOU J W, et al. Qualitative and quantitative detection of water-injected pork by low-field nuclear magnetic resonance combined with chemometrics[J]. *Food Science*, 2020, 41(4): 243-247.]
- [17] GAN H, LEE W S, ALCHANTIS V, et al. Immature green citrus fruit detection using color and thermal images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 152: 117-125.
- [18] GAO T Y, ZHANG S J, SUN H X, et al. Mass detection of walnut based on X-ray imaging technology[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(8): e14034.
- [19] 王众司,贾亚萍,张瑾,等.多光谱成像技术在植物学研究中的应用[J].植物学报,2021,56(4):500-508. [WANG Z S, JIA Y P, ZHANG J, et al. Application of multi-spectral imaging in botany[J]. *Journal of Botany*, 2021, 56(4): 500-508.]
- [20] 李红月,王金厢,李学鹏,等.多光谱成像技术在鱼肉新鲜度评价中的应用研究进展[J].渤海大学学报(自然科学版),2022,43(2):126-139. [LI H Y, WANG J X, LI X P, et al. Research progress on the application of multi-spectral imaging technology in fish freshness evaluation[J]. *Journal of Bohai University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(2): 126-139.]
- [21] MARTÍNEZ G, DIEGO M, NAVARRO S, et al. The advantage of multispectral images in fruit quality control for extra virgin olive oil production[J]. *Food Analytical Methods*, 2021(prepublish): 1-10.
- [22] TAHIR H E, ZUO Xiaobo, LI Zhihua, et al. Rapid prediction of phenolic compounds and antioxidant activity of Sudanese honey using Raman and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2017, 226: 202-211.
- [23] YU Y X, YU H Y, GUO L B, et al. Accuracy and stability improvement in detecting Wuchang rice adulteration by piece-wise multiplicative scatter correction in the hyperspectral imaging system[J]. *Analytical Methods*, 2018, 10(26): 3224-3231.
- [24] LONG J M, YANG J, PENG J, et al. Detection of moisture and carotenoid content in carrot slices during hot air drying based on multispectral imaging equipment with selected wavelengths[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2021, 17(9): 727-735.
- [25] ZHAO H S, BRUZZONE L, GUAN R C, et al. Spectral-spatial genetic algorithm-based unsupervised band selection for hyper-

- spectral image classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(11): 9616–9632.
- [26] PANG L, XIAO J, MA J J, et al. Hyperspectral imaging technology to detect the vigor of thermal-damaged *Quercus variabilis* seeds[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32: 461–469.
- [27] KANG Z L, GENG J J, FAN R S, et al. Nondestructive testing model of mango dry matter based on fluorescence hyperspectral imaging technology[J]. *Agriculture*, 2022, 12(9): 1337.
- [28] SUN H, ZHANG L, RAO Z H, et al. Determination of moisture content in barley seeds based on hyperspectral imaging technology[J]. *Spectroscopy Letters*, 2020, 53(10): 751–762.
- [29] FU X Z, BAI M J, XU Y W, et al. Cultivars identification of oat (*Avena sativa* L.) seed via multispectral imaging analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1113535.
- [30] LIU C H, LIU W, YANG J B, et al. Non-destructive detection of dicyandiamide in infant formula powder using multi-spectral imaging coupled with chemometrics[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(7): 2094–2099.
- [31] YOUNAS S, MAO Y, LIU C H, et al. Efficacy study on the non-destructive determination of water fractions in infrared-dried *Lentinus edodes* using multispectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289: 110226.
- [32] TUNNY S S, KURNIAWAN H, AMANAH H Z, et al. Hyperspectral imaging techniques for detection of foreign materials from fresh-cut vegetables[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 201: 112373.
- [33] LI X L, WEI Y Z, XU J, et al. SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 143: 112–118.
- [34] EYLENBOSCH D, DUMONT B, BAETEN V, et al. Quantification of leghaemoglobin content in pea nodules based on near infrared hyperspectral imaging spectroscopy and chemometrics[J]. *Journal of Spectral Imaging*, 2018, 7(1): a9.
- [35] HUANG Y R, WANG J, LI N, et al. Predicting soluble solids content in “Fuji” apples of different ripening stages based on multiple information fusion[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2021, 151: 76–84.
- [36] ZHENG X C, LI Y Y, WEI W S, et al. Detection of adulteration with duck meat in minced lamb meat by using visible near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Meat Science*, 2019, 149: 55–62.
- [37] SHENG M A W. Determination of shearing force by measuring NDF and ADF in tea stems with hyperspectral imaging technique[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2018, 51(17): 849–854.
- [38] BAI S H, TAHMASBIAN I, ZHOU J, et al. A non-destructive determination of peroxide values, total nitrogen and mineral nutrients in an edible tree nut using hyperspectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 492–500.
- [39] 高俊峰, 张初, 谢传奇, 等. 应用近红外高光谱成像技术预测甘蔗可溶性固形物含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2154–2158. [GAO J F, ZHANG C, XIE C Q, et al. Application of near-infrared hyperspectral imaging technology to predict the soluble solids content of sugarcane[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2154–2158.]
- [40] 孙梦梦, 鞠皓, 姜洪喆, 等. 水果成熟度无损检测技术研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(17): 354–362. [SUN M M, JU H, JIANG H Z, et al. Research progress on nondestructive detection technology of fruit maturity[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(17): 354–362.]
- [41] FATHIZADEH Z, ABOONAJMI M, BEYGI S R H. Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 262: 109073.
- [42] GILA D M M, GARCÍA J G, BELLINCONTRO A, et al. Fast tool based on electronic nose to predict olive fruit quality after harvest[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160: 111058.
- [43] MIM F S, GALIB S M, HASAN M F, et al. Automatic detection of mango ripening stages—An application of information technology to botany[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 156–163.
- [44] JIE D F, WEI X. Review on the recent progress of non-destructive detection technology for internal quality of watermelon[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 156–164.
- [45] TANG C X, HE H, LI E B, et al. Multispectral imaging for predicting sugar content of ‘Fuji’ apples[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 280–285.
- [46] VETREKAR N, PRABHU A K, NAIK A, et al. Collaborative representation of convolutional neural network features to detect artificial ripening of banana using multispectral imaging[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(10): e16882.
- [47] 杨甜军, 张箭, 朱哲, 等. 基于LabVIEW和多光谱成像技术的苹果品质无损检测装置[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(19): 4720–4722, 4726. [YANG T J, ZHANG J, ZHU Z, et al. Nondestructive detection device for apple quality based on Lab VIEW and multispectral imaging technology[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(19): 4720–4722, 4726.]
- [48] HASHIM N, ONWUDE D I, OSMAN M S. Evaluation of chilling injury in mangoes using multispectral imaging[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(5): 1271–1279.
- [49] GHANEI G N, GOLZARIAN M R, MAMARABADI M. Detection and classification of citrus green mold caused by *Penicillium digitatum* using multispectral imaging[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(9): 3542–3550.
- [50] 董建伟, 刘媛媛, 陈斐, 等. 基于多光谱图像的库尔勒香梨表面缺陷检测[J]. *农机化研究*, 2021, 43(9): 35–40. [DONG J W, LIU Y Y, CHEN F, et al. Surface defect detection of Korla fragrant pear based on multi-spectral image[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(9): 35–40.]
- [51] MANTHOU E, LAGO S L, DAGRES E, et al. Application of spectroscopic and multispectral imaging technologies on the assessment of ready-to-eat pineapple quality: A performance evaluation study of machine learning models generated from two commercial data analytics tools[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 175: 105529.
- [52] JDICKE K, ZIRKLER R, ECKHARD T, et al. High end quality measuring in mango drying through multi-spectral imaging systems[J]. *Chem Engineering*, 2020, 4(1): 8.
- [53] SENDIN K, MANLEY M, WILLIAMS P J. Classification of white maize defects with multispectral imaging[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 311–318.
- [54] ZHANG W W, ZHU Q B, HUANG M, et al. Detection and classification of potato defects using multispectral imaging system based on single shot method[J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(12): 2920–2929.
- [55] LIU W, DENG H Y, SHI Y L, et al. Application of multispectral imaging combined with machine learning methods for rapid and non-destructive detection of zearalenone (ZEN) in maize[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111944.
- [56] YOUNAS S, LIU C H, QU H, et al. Multispectral imaging for predicting the water status in mushroom during hot-air dehydra-

- tion[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(4): 903–909.
- [57] YU P, HUANG M, ZHANG M, et al. Rapid detection of moisture content and shrinkage ratio of dried carrot slices by using a multispectral imaging system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 108: 103361.
- [58] 李岩, 李芳芳, 于林宏, 等. 电子鼻和电子舌单独与联合检测掺大豆蛋白或淀粉的鸡肉糜[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(23): 309–316. [LI Y, LI F F, YU L H, et al. Electronic nose and electronic tongue alone and in combination for the detection of soy protein or starch adulterated chicken mince[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23): 309–316.]
- [59] MA F, ZHANG B, WANG W, et al. Potential use of multispectral imaging technology to identify moisture content and water - holding capacity in cooked pork sausages[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(5): 1832–1838.
- [60] 余卉茹, 纪艺, 彭城, 等. 肉类掺假检测技术研究进展[J]. *生物技术进展*, 2022, 12(2): 213–221. [YU H R, JI Y, PENG C, et al. Research progress of meat adulteration detection technology[J]. *Biotechnology Progress*, 2022, 12(2): 213–221.]
- [61] ROPODI A I, PANAGOU E Z, NYCHAS G J E. Multispectral imaging (MSI): A promising method for the detection of minced beef adulteration with horsemeat[J]. *Food Control*, 2017, 73: 57–63.
- [62] 金涛, 刘伟, 刘长虹. 基于多光谱成像技术的牛肉干水分含量快速无损检测研究[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(2): 204–205, 220. [JIN T, LIU W, LIU C H. Rapid non-destructive detection of moisture content in beef jerky based on multi-spectral imaging technology[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 204–205, 220.]
- [63] TSAKANIKAS P, PAVLIDIS D, PANAGOU E, et al. Exploiting multispectral imaging for non-invasive contamination assessment and mapping of meat samples[J]. *Talanta*, 2016, 161: 606–614.
- [64] LI A, LI C X, GAO M Y, et al. Beef cut classification using multispectral imaging and machine learning method[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 755007.
- [65] WANG W, ZHANG H F, YAN L, et al. A rapid and non-destructive approach to identify bone fragments embedded in lean pork slices based on multispectral imaging and chemometrics[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 113: 103575.
- [66] LI X X, WANG B, XIE T H, et al. Research progress on non-destructive testing technology for aquatic products freshness[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(5): e14025.
- [67] HONG H, REGENSTEIN J M, LUO Y. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(9): 1787–1798.
- [68] WU D, ZHANG M, CHEN H Z, et al. Freshness monitoring technology of fish products in intelligent packaging[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(8): 1279–1292.
- [69] WEN Q Y, JIA Y Y, ZI L Y, et al. Non-destructive monitoring the freshness of sea bass fillets using Raman spectroscopy with orthogonal signal correction and multivariate analysis[J]. *Microchemical Journal*, 2023, 191.
- [70] OMWANGE K A, SAAITO Y, ZI C H, et al. Evaluating Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish freshness during storage using multispectral images from visible and UV excited fluorescence[J]. *LWT*, 2021, 151: 112207.
- [71] CHENG J H, SUN D W, QU J H, et al. Developing a multispectral imaging for simultaneous prediction of freshness indicators during chemical spoilage of grass carp fish fillet[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 9–17.
- [72] KHOSHNOUDI-NIA S, MOOSAVI-NASAB M. Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1–11.
- [73] SHI Y L, LIU W, ZHAO P G, et al. Rapid and nondestructive determination of deoxynivalenol (DON) content in wheat using multispectral imaging (MSI) technology with chemometric methods[J]. *Analytical Methods*, 2020, 12(26): 3390–3396.
- [74] 许学, 马卉, 王钰, 等. 基于多光谱成像技术的小麦品种快速无损鉴定[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(15): 14–19. [XU X, MA H, WANG Y, et al. Rapid and non-destructive identification of wheat varieties based on multi-spectral imaging technology[J]. *China Agricultural Bulletin*, 2019, 35(15): 14–19.]
- [75] LIU W, XU X, LIU C H, et al. Nondestructive detection of authenticity of Thai jasmine rice using multispectral imaging[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 2021: 1–8.
- [76] MIHAILOVA A, LIEBISCH B, ISLAM M D, et al. The use of multispectral imaging for the discrimination of Arabica and Robusta coffee beans[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 14: 100325.
- [77] YU J, REN S, LIU C, et al. Non-destructive detection and classification of in-shell insect-infested almonds based on multispectral imaging technology[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156(9): 1103–1110.
- [78] LIANOU A, MENCATTINI A, CATINI A, et al. Online feature selection for robust classification of the microbiological quality of traditional vanilla cream by means of multispectral imaging[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4071.
- [79] BANDARA W G C, PRABHATH G W K, DISANAYAKE D W S C B, et al. Validation of multispectral imaging for the detection of selected adulterants in turmeric samples[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 266: 109700.
- [80] LIU C H, HAO G, SU M, et al. Potential of multispectral imaging combined with chemometric methods for rapid detection of sucrose adulteration in tomato paste[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 215: 78–83.
- [81] HERATH S, WEERASOORIYA H K, RANASINGHE D Y L, et al. Quantitative assessment of adulteration of coconut oil using transmittance multispectral imaging[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60(5): 1551–1559.