

芒果品质无损检测技术研究进展

刘彩华, 李 曦, 朱正杰, 包竹君, 谢晓娜, 杨郑州, 王 云, 刘 芳

Progress of Non-destructive Testing Technology in Mango Quality

LIU Caihua, LI Xi, ZHU Zhengjie, BAO Zhujun, XIE Xiaona, YANG Zhengzhou, WANG Yun, and LIU Fang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展

Research Progress of Non-destructive Detection Technique in Fruit Quality Evaluation

食品工业科技. 2020, 41(24): 354-359

近红外光谱技术在小麦粉品质检测方面的应用研究进展

Advances on Near-infrared Spectroscopy for Quality Detection of Wheat Flour

食品工业科技. 2020, 41(7): 345-352,357

电子束辐照对芒果品质的影响

Effect of Electron Beam Irradiation on Mango Quality

食品工业科技. 2021, 42(2): 279-283,289

农产品无损检测方法应用现状

Application Status of Nondestructive Testing Methods for Agricultural Products

食品工业科技. 2018, 39(15): 340-344

可见/近红外光谱技术无损检测新鲜鸡蛋pH及蛋白质的研究

Vis/NIR spectroscopy nondestructive examination of fresh eggs p H and protein detection

食品工业科技. 2017(20): 280-283

苹果品质高光谱成像检测技术研究进展

Progress of hyperspectral imaging detection technology in apple quality

食品工业科技. 2017(10): 389-394



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘彩华, 李曦, 朱正杰, 等. 芒果品质无损检测技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(22): 413-422. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090195

LIU Caihua, LI Xi, ZHU Zhengjie, et al. Progress of Non-destructive Testing Technology in Mango Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(22): 413-422. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090195

芒果品质无损检测技术研究进展

刘彩华, 李曦, 朱正杰, 包竹君, 谢晓娜, 杨郑州, 王赟, 刘芳*
(百色学院农业与食品工程学院, 广西百色 533000)

摘要: 芒果是世界五大水果之一, 深受人们喜爱。对芒果品质进行无损检测, 有利于芒果采后科学处理, 对提高其品质和市场竞争力, 具有重要的意义。文章主要论述了计算机视觉技术和可见/近红外光谱检测技术在芒果品质检测中的研究进展, 以及其他无损检测技术在芒果品质检测中的研究, 如电子鼻、超声波检测、高光谱检测、机械传感等, 并比较了国内外研究的差异, 总结了存在的问题, 进一步探讨了未来计算机视觉技术和可见/近红外光谱检测技术在芒果品质检测及全过程质量控制方面的发展趋势。本文将为芒果品质无损检测技术的发展和应用提供参考。

关键词: 芒果, 品质, 无损检测, 计算机视觉技术, 可见/近红外光谱检测技术

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)22-0413-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020090195



本文网刊:

Progress of Non-destructive Testing Technology in Mango Quality

LIU Caihua, LI Xi, ZHU Zhengjie, BAO Zhujun, XIE Xiaona, YANG Zhengzhou, WANG Yun, LIU Fang*

(College of Agriculture and Food Engineering, Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: Mango is one of the five most popular fruits in the world. The nondestructive testing of mango quality is beneficial to the scientific treatment of mango after harvest, and has important significance for improving its quality and market competitiveness. In this paper, the research progress of computer vision and visible/near infrared spectroscopy in mango quality detection is mainly summarized. The use of other non-destructive technology for assessing mango quality, such as electronic nose, ultrasonic testing, hyperspectral testing, mechanical sensing are also discussed. The differences of non-destructive technology for mango quality research at home and abroad are compared, and the existing problems are summarized. Furthermore, the development trend of computer vision technology and visible/near infrared spectroscopy technology in mango quality inspection and quality control in the whole process are discussed. This paper provides reference for the development and application of non-destructive technology in mango quality assessing.

Key words: mango; fruit quality; nondestructive testing; computer vision technology; visible/near infrared spectroscopy

芒果与柑橘、香蕉、葡萄、苹果并称世界五大水果, 素有“热带果王”之美誉, 含有糖、蛋白质、类胡萝卜素和维生素 A 等多种营养物质, 深受人们喜爱。芒果原产于亚洲南部热带地区, 现已广泛分布于热带、亚热带地区^[1]。在国内, 芒果主要分布在海南、广西和四川, 在广东、福建、云南、台湾等地也有种植。主产区均有其特色品种, 如海南主产贵妃芒、台农、水仙芒、金煌芒等, 广西特色品种为桂七芒和紫花芒, 四川主要生产凯特芒^[2]。

芒果品质主要包括产品外观与内在品质。外观

品质主要包括果实形状、果实大小、组织缺陷、果皮色泽等, 内在品质包括可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物、糖酸比、胡萝卜素等^[3-5]。对芒果品质进行评价和分级, 有利于芒果采后科学处理。品质较高的芒果进行销售或储存, 品质较低的芒果进行深加工处理, 对提高芒果经济价值和产业链发展具有重要的意义。芒果品质评价的最常用方法主要是感官评价, 针对果实外观品质进行。这种方法易受评价员自身主观性、经验、身体因素及外部环境等多种因素影响, 并且常因感官疲劳而导致准确率降低^[6]。实际上, 最

收稿日期: 2020-09-21

基金项目: 广西自然科学基金(2019GXNSFBA245065); 广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2019KY0756); 百色学院博士科研启动基金项目(DC2000002721); 广西大学生创新创业训练项目(202010609058)。

作者简介: 刘彩华(1985-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品质量与安全, 微生物发酵, E-mail: liucaihua519@126.com。

* 通信作者: 刘芳(1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 土壤地球化学, 食品质量与安全, E-mail: 44156257@qq.com。

影响芒果风味的是其内在品质因子,如可溶性糖和有机酸的组成成分、含量及糖酸比,在不同品种芒果中具有较明显的差异,最能体现芒果的价值和市场接受度^[4]。针对内在品质因子的传统评价方法主要是理化检测,能准确得出各品质因子的含量,但是该方法工作量大,具有破坏性,无法满足大批量芒果品质快速检测的需求,且易造成果实浪费^[7-9]。近年来有发展针对可溶性糖含量和总有机酸的快速检测方法,如糖度计、糖酸仪等,但是这些快检仪器也需要破坏芒果取得果汁进行检测。

多种无损检测技术的出现,为芒果品质的快速检测、成熟度预测以及产后分级,提供了有效的解决方案。无损检测技术不破坏被测对象,而是利用样品对光、电、声、磁、热等独特的“指纹”反应特征,采用特定的快速检测设备,结合软件处理、化学计量学等方法,实现对其外在和内在品质特性进行无损检测^[3,9]。目前,多种无损检测技术用于芒果品质的检测研究,如计算机视觉技术、可见/近红外光谱技术、高光谱成像技术、电子鼻技术以及超声波检测技术等^[6-11],用于对芒果果面缺损、体积、重量、果实颜色、形状、产量预估、品质分类、成熟度、腐烂程度、可溶性固形物、糖度、酸度、pH、果实硬度、 β -胡萝卜素和花青素含量等指标进行检测。但是对于国内外芒果品质无损检测技术的最新研究进展,还缺乏相应的报道。

本文论述了近年来国内外芒果品质无损检测技术的研究进展,总结了不同检测技术的主要应用方向,比较了国内外研究现状的差异,进一步分析了存在的问题,展望了两种主要技术——计算机视觉技术和可见/近红外光谱检测技术未来的发展趋势,以期为进一步提高无损检测技术的精度,拓宽其应用范围提供参考。

1 计算机视觉技术——外在品质检测

计算机视觉技术以计算机和图像获取为工具,通过相机采集水果图片,利用图像处理和分析技术进行处理,提取出水果大小、形状、颜色和表面缺陷等外部品质特征,再利用模式识别和分级技术,实现对水果外观品质的综合评价和分级^[12]。计算机视觉技术主要在果面坏损、品质分级、产量预估、品种鉴别等方面研究较多。

1.1 检测芒果重量和果面坏损

果面坏损和重量是最常用的水果品质分级指标。20世纪末,王江枫等^[13]设计了一套检测系统,由图像获取部分、解码器、图像采集卡、监视器、计算机等组成,对果面坏损的检测准确率达76%以上,对果重的检测准确率达92%以上。张立华^[14]利用计算机视觉技术结合模糊c-均值聚类算法对芒果表面缺陷进行检测和分类,检测结果与肉眼评价结果基本吻合。张烈平等^[15]结合计算机视觉技术和BP神经网络算法,对芒果斑痕和碰伤缺陷进行检测,创建

了3层BP神经网络模型,对芒果缺陷识别的准确率达85.5%以上。刘静等^[16]应用视觉系统开发模块对芒果表面缺陷进行检测,经过图像预处理,再利用面积标定法获得表面缺陷图像。试验结果表明,计算机视觉检测结果与人工检测结果误差小于0.3%。Pham等^[17]利用k均值算法在 $L^*a^*b^*$ 空间中根据欧氏颜色距离将原始图像分割成区域块,再采用最小生成树的合并方法,迭代地将相似区域合并成新的同构区域,从而实现坏损区域图像进行分割。在与人眼观察对比和处理时间方面,均显示较好的结果。Ashok等^[18]对芒果可见缺陷的特征提取方法进行了对比研究,通过顺序前向选择算法提取最相关特征,用广义线性模型分类器设计神经网络(neural network, NN),评价了不同输出激活函数如线性、logistic和softmax对分类器的性能影响,结果表明对果面坏损的检测交叉验证性能精度分别为90.09%、90.26%和90.26%。徐玉琼等^[19]通过芒果灰度图像来区分正常果面和缺陷果面,表皮损伤区域呈黑色或褐色,与正常果面灰度有明显区别,通过阈值设定分割出缺陷区域。但是由于果梗的影响,容易造成误判,影响判断结果的精准度。张光龙^[20]对芒果二维缺陷(晒伤、病斑及黑斑)和三维缺陷(凹陷、划痕等机械损伤)的计算机视觉检测进行了研究,利用数据滤波降噪,结合缺陷部分的像素面积与点云数据值映射,即得出二维缺陷区域的物理面积;通过直方图均衡化,Canny算子边缘检测,再进行“闭运算”和“空洞填充”处理得到二值图像,通过图像处理计算病斑像素面积与实际物理值映射,得到病斑的物理面积。结果显示缺陷部位面积检测的相对误差小于2.0%。Kumari等^[21]研究了图像分割算法和分类器对坏损芒果和健康芒果分类准确率的影响。所建立方法结合了模糊k均值聚类算法和基于反向传播的判别分类器(backpropagation based discriminant classifier, BBDC),而k-均值以及模糊c均值聚类方法,以及BPNN和朴素贝叶斯分类器(decision table and naïve bayes classifier, DTNB)方法均作为对比。结果显示所建立的方法具有最高精度,对等级C的坏损芒果的分类准确率达到99.68%。

在芒果果面坏损检测的研究中,国外研究者(如印度、韩国)更关注于图像处理算法和模型建立方法的研究,但国内专注于算法比较的研究报道较少。随着研究的发展,研究者更倾向于综合果面缺陷与果面大小、形状、颜色等多种特征,构建更为准确的分级依据,应用于芒果品质分级。

1.2 芒果品质分级

随着生活水平提高,消费者对水果的可食用品质提出了更高的要求 and 期望。我国虽然是芒果生产大国,但为了应对进口芒果的冲击,提升国产芒果品质及检测水平,快速精准鉴别芒果品质,有助于推动芒果产业可持续发展,增强国产芒果的市场竞争力^[2,10]。计算机视觉技术应用于芒果品质检测的研究

如表 1 所示。

2006 年, 孙树亮^[22] 利用计算机视觉技术结合不同算法, 依据芒果颜色、大小进行分类, 发现线性函数法在样本数量大时有较好分类效果, 准确率达 95.31%。李国进等^[12] 基于计算机视觉和使用粒子群算法优化后的极限学习神经网络模型, 依据芒果大小、形状、颜色、表面缺陷等综合特征对芒果进行分级, 与单纯极限学习神经网络模型、传统 BP 和支持向量机模型相比, 具有更高的分级精度。Sa'ad 等^[23] 联合傅里叶描述符法, 通过芒果形状进行分级。应用判别分析(discriminant analysis, DA)和支持向量机(support Vector machine, SVM)建模时, 分级准确率分别能达到 98.3% 和 100%; 应用圆柱近似分析法(cylinder approximation analyses method)估测芒果体积和质量, 重量分级法精度为 95%。Ibrahim 等^[24] 设计了基于机器视觉和压片法的芒果在线分拣设备, 主要关注长度、宽度、高度、重量等物理特性, 结果显示对芒果形状的判断准确率达到 92%, 基于芒果重量的分级准确率为 94%, 证实该系统在芒果自动分选中具有一定的潜力。Makino 等^[25] 利用色彩浓度(chroma)22 和色彩角(hue angle)52°对红色果皮进行筛选, 建立了依据果皮颜色的芒果分级方法。同时研究了花青素浓度与色彩角之间的关系, 推测计算机视觉技术可用于预估花青素含量。Nandi 等^[26] 利用支持向量机方法对芒果成熟度进行预测, 利用多属性决策系统对芒果品质进行预测, 再利用模糊增量学

习算法(fuzzy incremental learning algorithm)对芒果进行分级, 分级准确率达 87%, 预测重复率达 100%。辛华健^[27] 以大小、颜色和表面缺陷为芒果品质参数, 建立了 BP 神经网络模型, 芒果品质分级准确率超过 93%。向阳等^[28] 针对芒果形状不规则的问题, 通过柔性翻面机采集芒果正反面图像, 提出了一种基于迁移学习的卷积神经网络模型, 依据果皮颜色、果肉硬度和果肉颜色制定芒果成熟度标准, 用于芒果成熟度的分级, 平均准确率达 96.72%。芒果大小、果形、颜色、表面缺陷面积四种特征常作为综合特征应用于芒果分级的研究。近年来, 徐玉琼等^[19] 利用 Canny 算子和 BP 神经网络建立芒果分级模型, 分级平均准确率达到 90%。张光龙^[20] 采用 BP 神经网络和支持向量机(SVM)算法分别建立分级模型, 结果表明基于改进的粒度支持向量机(GSVM)算法分级效果好、准确率高(>90%), 在此基础上建立了基于流水线的芒果智能化分级系统。Anurekha 等^[29] 结合图像处理与自适应神经模糊推理系统 GANFIS(genetic adaptive neuro fuzzy inference system), 依据芒果质地进行分级。

应用计算机视觉技术对芒果品质进行分级, 研究热点主要集中于图像处理技术和分级模型算法的改进, 这也是影响计算机视觉技术对芒果分级的准确率的重要影响因素。此外, 模型的建立依据, 逐渐由颜色、重量等单个特征参数向结合了芒果大小、形状、颜色、表皮缺陷等多参数的综合特征发展, 使建

表 1 计算机视觉技术在芒果品质分级中的应用
Table 1 Application of computer vision technology in mango quality grading

芒果品质参数	图像预处理方法	芒果分级模型算法	准确度(%)	参考文献
大小、形状、颜色、表面缺陷	中值滤波, 灰度线性变换, 阈值分割, HSL彩色空间图	粒子群算法优化后的极限学习神经网络模型	100	李国进等 ^[12]
重量、果面坏损	二值化加权平均法, 峰值滤波, 线性灰度变换; Kirsch算子、“泼水法”	-	重量: 92~96 表面坏损: 76~80	王江枫等 ^[13]
表面缺陷	线性灰度变换, 双阈值法结合边缘检测法	模糊c-均值聚类算法	-	张立华 ^[14]
表面缺陷	二次中值滤波, 灰度线性变换法, 阈值分割法, RGB三分量特征参数	BP神经网络	85.5	张烈平等 ^[15]
果面缺陷	加权平均值法, 中值滤波, 分段线性变换, Sobel算子加权平均法, 双阈值分割, 数学形态运算	-	>99.7	刘静等 ^[16]
大小、果形、颜色、表面缺陷面积	权重值法, 直方图修正法, 中值滤波, 最大类间方差法 阈值分割, Canny算子检测	BP神经网络	90	徐玉琼等 ^[19]
色泽、果形、颜色、表面缺陷面积	双边滤波, Canny算子检测, 基于RGB彩色空间的B分量分割, 深度图像点云模型,	BP神经网络、改进的粒度支持向量机	>90	张光龙 ^[20]
表面缺陷	模糊k均值聚类算法	基于反向传播的判别分类器	99.68	Kumari等 ^[21]
颜色、大小	HIS颜色模型, 中值滤波, 最大方差法, 分支定界算法	C-均值法、最近邻法、线性函数法	95.3	孙树亮 ^[22]
形状、质量、体积	-	判别分析和支持向量机; 圆柱近似分析法	>95	Sa'ad等 ^[23]
大小、重量、形心	-	傅里叶描述符和大小-形状特性参数; 压片法	>92	Ibrahim等 ^[24]
大小、形状、表面缺陷、成熟度	-	支持向量机, 多属性决策系统, 模糊增量学习算法	87	Nandi等 ^[26]
大小、颜色、表面缺陷	维纳滤波, HSL加权, 自适应Canny算法	BP神经网络模型	>93	辛华健等 ^[27]
颜色、硬度	灰度拉伸和灰度转换,	基于迁移学习的卷积神经网络模型	96.72	向阳等 ^[28]
颜色、形状和质地	灰度共生矩阵, 局部二值模式, 遗传算法	自适应神经模糊推理系统	-	Anurekha等 ^[29]

立的模型分级依据更准确。近年来,除了理论研究外,越来越多的研究关注到智能检测系统的建立和应用,而这也是计算机视觉技术能实际应用于生产的关键所在。

1.3 芒果产量预估

芒果自然生境下的目标检测研究,对芒果精准种植中的智能喷施、生长监测、产量预估和劳动力需求预测等具有重要的实际意义。计算机视觉技术为水果自动检测提供了一种有效的手段。

Payne等^[30]利用机器视觉检测技术,结合RGB和YCbCr颜色分割以及纹理分割方法,通过计算合成斑点数,来估测收获前3周的芒果产量。但是随着芒果树上果实增多,或者拍摄时有直接阳光照射,模型的有效性会下降。薛月菊等^[31]提出了果园场景下未成熟芒果的改进YOLOv2检测方法,利用基于回归的YOLOv2算法,设计了带密集连接的Tiny-yolo网络结构,并利用标注遮挡或重叠芒果的前景区域样本来加强前景区域特征学习,结合数据扩增和多尺度策略训练网络,改进了YOLOv2芒果目标检测网络,测试集准确率达97.02%。熊俊涛等^[32]提出了一种基于无人机的树上芒果视觉检测技术,结合深度学习技术和YOLOv2模型,测试了绿色芒果的识别正确率,对芒果产量进行预估试验。结果表明不同光照条件下识别正确率为87.18%~3.42%,产量估计平均误差为12.79%。

1.4 品种鉴别

利用计算机视觉技术也可以实现芒果品种的鉴别。Behera等^[33]利用k均值聚类和灰度共生矩阵对13个参数(如对比度、相关性、均匀性、均值、平滑度、峰度、标准差、方差等)进行评价,再利用SVM算法进行训练,通过匹配训练集和测试集的特征,从而实现对不同品种芒果的鉴别。Sahana等^[34]首次通过同时提取水果图像的形态特征(如面积、周长、偏心度、形心等)和傅里叶特征(灰度图像经傅里叶变换后的均值和标准差),再利用决策树和朴素贝叶斯算法对水果进行分类。但是目前只能对不同品种的水果进行鉴别,如对芒果与苹果的鉴别,对同种水果不同亚类的鉴别还有待进一步研究。Anurekha等^[35]利用遗传自适应神经模糊推理系统(genetic adaptive neuro fuzzy inference system, GANFIS),以芒果的颜色、形状、纹理为特征,首先对芒果进行分类鉴别,再进行品质分级,结果显示该方法的敏感性达到98.05%,特异性达到97.39%,正确率达到99.18%。Hasna等^[36]利用机器视觉技术,结合卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和深度学习算法,通过深度输入图像的层可视化满足系统准确性,建立了基于芒果幼苗叶片的芒果品种鉴别方法,模型准确率为78.65%。芒果品种鉴定主要依据芒果的形态特征差异来实现,而基于芒果叶片的鉴别方法,更有利于芒果种植人群早期对芒果品种进行准

确判断。

计算机视觉技术在芒果果面坏损、品质分级、产量预估和品种鉴别中的研究较为丰富。国外研究者主要关注于图像处理算法和模型建立方法的研究,多采用k均值聚类、SVM、判别分析、神经模糊算法,近年来也将基于反向传播的判别分类器(BBDC)、BBP神经网络(BPNN)和朴素贝叶斯分类器DTNB应用于芒果品质的研究中。而国内主要采用建立BP神经网络算法来建立分级模型。建立的不同分级模型对芒果品质分级的准确率均在85%以上。针对芒果产量预估的研究,国内基于深度学习和YOLOv2算法,具有更高的准确率。而针对不同芒果品种的鉴别,国外主要通过果实形态分辨来实现,最新发展了基于叶片特征的鉴别技术。但是国内目前针对芒果品种的快速鉴别研究还未见报道。

1.5 存在问题

计算机视觉技术主要基于对芒果图像进行分析,只能对芒果的物理特征进行检测(表1),而与芒果的内在品质特性关联性不强,因此判断结果并不全面。此外,计算机视觉技术的图像分析主要依赖算法处理、算法自身的缺陷,如对颜色的误判、对微小或模糊特征的遗漏、对芒果不规则边缘的错误识别等,会导致判别的准确率下降。此外,计算机视觉技术对复杂多样的环境抗干扰性差,如不同光照条件、或不同生长环境,均会影响其品质评价的准确性。

2 可见/近红外光谱检测技术——内在品质检测

可见/近红外光谱检测技术主要基于生物分子对光的吸收特性。由于几乎所有生物大分子和功能基团能在380~2500 nm范围内形成稳定的光谱图,主要包括O-H、C-H、N-H键的振动吸收。因此,可见/近红外光谱技术广泛用于分析领域,具有分析速度快、无需样品预处理、非破坏性、无污染等特点。通过结合化学计量学方法,能无损检测水果的多个外在和内在品质指标,如硬度、色泽、可溶性固形物、糖度、酸度、维生素等^[8,37]。检测系统主要由光源、光源光纤和接收光纤、光谱仪、载物台和处理软件构成。

2.1 对芒果采后品质的无损检测

利用可见/近红外光谱检测技术,可以实现对芒果采后多个内在品质参数的预测,如糖度、酸度、可溶性固形物、pH和维生素含量等,如表2所示。

虞佳佳等^[38]利用近红外光谱技术结合偏最小二乘法和遗传算法优化神经网络技术(GA-BP),建立了芒果糖度和酸度的预测模型,结果显示相关系数分别为0.85409和0.83699,具有较好的预测能力。屠振华等^[39]利用偏最小二乘回归法,建立了芒果可溶性固形物和硬度的近红外定量分析模型,结果发现可溶性固形物的预测效果更好,相关系数达到0.8629,而硬度的预测只能基本满足要求。Jha等^[40]建立了印

表 2 可见/近红外光谱技术在芒果品质检测中的应用

Table 2 Application of VIS/NIR spectroscopy technology in mango quality detection

检测指标	波长范围(nm)	光谱预处理	建模算法	相关系数	预测性能	参考文献
酸度	325~1075	-	偏最小二乘法-遗传	$r=0.83699$	SEP-0.109447	虞佳佳等 ^[38]
糖度			算法优化人工神经网络	$r=0.85409$	SEP-0.60934	
糖度	580~1000	小波变换	偏最小二乘回归	$r=0.8629$	RMSEP-1.2778	屠振华等 ^[39]
硬度					$r=0.8308$	
可溶性固形物	1200~2200	倍增散射校正和二阶衍生	多元线性回归, 偏	$R_c=0.782 R_p=0.762$	-	Jha等 ^[40]
pH			最小二乘回归	$R_c=0.715 R_p=0.703$	-	
糖度	350~1000, 1000~2500	一阶微分和平滑处理	主成分回归法	$r=0.83869$	RMSEC-1.6284 MEP-1.2350	曹霞等 ^[41]
			偏最小二乘法	$r=0.97659$	RMSEC-0.2058 MEP-0.7383	
葡萄糖、蔗糖、柠檬酸、苹果酸、淀粉和纤维素	400~1100	二阶衍生	BP 神经网络	$R_c=0.9833$ $R_p=0.6639$		Theanjumol等 ^[42]
			偏最小二乘回归	$R_c^2=0.99$	SEP<0.5%	
颜色、可溶性固形物、酸度	700~1100	-	线性回归	$R_c^2(\text{FN})=0.99$ $R_c^2(\text{DMC})=0.96$		Watanawan等 ^[43]
可溶性固形物、硬度、果肉色度	600~1100, 900~1750	-	偏最小二乘法	$R_p^2: 0.833\sim 0.879$	RMSEP:0.403~0.537 RPD:2.341~2.826	Cortésa等 ^[44]
β 胡萝卜素	700~1100, 1000~2500	标准正态变量变换	偏最小二乘法	$R^2=0.941$	SECV-10.2%	Rungpichayapichet等 ^[45]
维生素C	1000~2500	多元散射校正和逆趋势校正	偏最小二乘回归	$r=0.86$	RPD-2.00	Munawar等 ^[46]
总酸	1000~2500	多元散射校正算法、基线线性校正	偏最小二乘法	$r=0.988$	RMSE-19.351 RPD-6.773	Hayati等 ^[47]
维生素C				$r=0.979$	RMSE-0.417 RPD-3.141	

注: r : 预测结果与测量值之间的相关系数; SEP: 预测标准差; RMSEP: 预测均方根误差; RMSEC: 校正均方根误差; MEP: 预测平均差; RPD: 剩余预测偏差; R_c : 校正集相关系数; R_p : 验证集相关系数; R_c^2 : 校正集决定系数; R_p^2 : 预测集决定系数; SECV: 交叉验证标准误差; RMSE: 均方根误差; TSS: 可溶性固形物; DMC: 固形物含量; FN: 硬度。

度芒果可溶性固形物和 pH 的预测模型, 结果显示对校正集和确认集, 可溶性固形物的复相关系数分别达到 0.782 和 0.762, pH 的复相关系数为 0.715 和 0.713, 具有较好的预测功能。曹霞等^[41] 比较了主成分回归法、偏最小二乘法和 BP 神经网络法建立的近红外模型对糖度的预测能力, 结果表明偏最小二乘法建立的模型预测能力较好, 对糖度的预测相关系数能达到 0.97659。近红外光谱法也用于对芒果 6 种主要化学成分(葡萄糖、蔗糖、柠檬酸、苹果酸、淀粉和纤维素)进行建模预测。结果表明利用这 6 种成分的二阶导谱, 能建立最好的偏最小二乘回归模型, 决定系数 R^2 达到 0.99, 并且对葡萄糖和蔗糖的预测最佳有效波长范围是 900~1000 nm, 苹果酸和柠檬酸的是 800~1000 nm, 淀粉的是 900~1000 nm, 纤维素的是 800~1000 nm^[42]。近红外光谱-反射模式结合线性回归模型用于泰国出口芒果的成熟度和品质指标(果皮和果肉颜色、可溶性固形物含量(TSS)、滴定酸度(TA)、TSS:TA)预测, 结果表明其近红外反射率随芒果成熟度增加而增加, 且与干固含量呈正相关、与果实硬度呈负相关, 对可溶性固形物含量预测精确度达到 99%^[43]。Cortés 等^[44] 分别利用可见/近红外分光光度计和光谱色度仪测量 Osteen 芒果的反射光谱, 通过最小二乘法建立 3 种不同的回归模型, 联合

“可溶性固形物含量”和“硬度和果肉色度”, 建立了芒果内在品质指标(internal quality index), 结果显示全光谱测量具有较好的预测性($R^2=0.833\sim 0.879$)。

可见近红外光谱检测技术也可用于芒果内部维生素含量的预测。反射光谱法结合标准正态变量变换方法, 建立偏最小二乘法模型, 结果表明, 模型对芒果的 β -胡萝卜素具有最好的预测能力(确定系数 $R^2>0.800$), 且长波段的近红外光谱预测性能更好^[45]。Munawar 等^[46] 利用台式傅里叶变换红外光谱(1000~2500 nm)系统测量芒果的吸收光谱, 再经多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)和逆趋势校正(de-trending, DT)处理光谱图像, 再利用偏最小二乘回归建立预测模型, 对维生素 C 的预测值与实际测量值的相关系数 r 为 0.86。基于积分球的增强型近红外光谱数据集用于预测芒果总酸度和维生素 C 含量。结果表明增强的近红外数据集可以用于快速、有效、无损的预测芒果内部品质^[46]。

综上所述可以看出, 芒果可溶性固形物、糖度、酸度是最常用于可见/近红外光谱预测的内在品质参数, 而偏最小二乘法是最常用的建模算法。随着研究的发展, 预测模型的相关系数越来越高, 预测性能发展更好, 如表 2 所示。因此, 建立基于上述内在品质的可见/近红外光谱预测模型, 对芒果品质分级, 具有重

要的指导意义。

对比国内外的研究现状可以看出,国外在利用可见/近红外光谱技术无损检测芒果糖度、酸度、可溶性固形物等品质参数方面,一直进行着持续研究,近年来还逐步发展了芒果中维生素含量的预测方法。此外,还建立了基于可见/近红外光谱技术的芒果成熟度预测模型,对芒果的科学采摘、采后加工储藏具有一定的指导意义。光谱预处理技术也从最初的一阶、二阶光谱衍生,发展到利用多元散射校正和逆趋势校正等技术。在预测模型建立方面,偏最小二乘法一直是最主要的算法。而国内在近5年内,针对芒果品质的可见/近红外光谱无损检测技术的研究,已鲜有报道。由于芒果属于中国南方的特色水果,芒果产业是地方支柱产业之一。发展基于可见/近红外光谱的芒果品质无损检测技术,有利于提高中国芒果的品质和市场竞争能力,值得进一步深入研究。

2.2 对芒果成熟度的预测

可见/近红外光谱技术除了用于对成熟芒果的内在品质进行预测外,还能对芒果成熟过程中不同内在品质因素的变化进行预测。

Subedi等^[48]利用可见-短波近红外光谱法(500~1050 nm)结合偏最小二乘法对芒果成熟过程的干物质含量、可溶性固形物含量、可溶性糖和淀粉含量进行了预测。结果发现模型可用于预测不同成熟期芒果的干物质含量,以及成熟芒果的可溶性固形物含量,而不能预测可溶性糖和淀粉含量。Izneid等^[49]建立了一种便携式近红外光检测系统,通过将透过芒果的近红外光信号转变为电信号,实现对不同成熟期的芒果的检测。Jha等^[50]结合近红外光谱法(1200~2200 nm)和偏最小二乘法建立模型,对芒果成熟指数 I_m 进行预测,对校准模型和验证模型的多元相关系数分别为0.74和0.68,且1600~1800 nm波段的光谱具有较好的预测效果。近红外光谱法建立的芒果后熟期品质预测模型稳健性受到采摘年份的影响,3年的采摘数据建立的预测模型比较合适^[51]。手持型近红外光谱仪也用于对芒果品质的无损检测研究中,预测模型对成熟过程中可溶性固形物的预测能力最好,确定系数达到0.92,预测均方根误差为 0.55°Brix ^[52]。

利用可见/近红外光谱技术对芒果成熟度进行预测,在国外研究较多,国内的研究报道还较为缺乏。不同品质参数中,可溶性固形物仍是最准确的预测因子,而综合参数“成熟指数 I_m (基于可溶性固形物含量、干物质含量以及可滴定酸度含量计算得到)”的预测准确性,还有待进一步研究。

2.3 存在问题

可见/近红外光谱检测技术主要依赖于光进入果实后再经反射、透射或半透射后带出果实内部的信息,但是光在果实中的透射或反射受到入射光强、芒果品种、检测部位、入射角度、果皮厚度、光滑度、果

皮颜色等因素影响,因此,一方面会限制光带出的信息量,另一方面也导致模型的稳健性和适用性受到影响。其次,建立模型前,需要对大量样品进行检测分析来对模型进行校准和验证,工作量相对较大。此外,模型预测精度问题一直是实际应用中的难题,主要来源于模型适应性、噪声去除、传感器漂移和模式识别最优解几个方面。因此,模型偏差最小化是研究的关键问题之一。

3 其他无损检测技术

芒果品质的无损检测中,除了基于芒果外在品质的计算机视觉检测技术,以及基于芒果内在品质的可见/近红外光谱检测技术,还发展了基于芒果气味响应的电子鼻检测技术,基于芒果声学响应的超声波检测技术,综合了成像与光谱检测的高光谱检测技术,以及不同检测技术的联用。此外,还发展了基于加速度传感的机械抓手设备。

芒果散发的气味可用于成熟度和腐烂程度的检测。李敏等^[53]利用电子鼻检测芒果的气味响应,同时测定芒果可溶性固形物和可滴定酸度,利用偏最小二乘法 PLS 和 BP 神经网络分别建立了预测模型。结果发现两种模型的相关系数均大于91%,预测性能均较好。

芒果介电特性也用于成熟和腐烂程度的检测。廖宇兰等^[54]利用智能 LCR 测量仪和平板电极系统,采用不同频率参数,测试芒果不同成熟度和腐烂程度的介电特性。结果发现用100 Hz测定芒果介电特性可获得最好的效果。芒果储存第7 d开始腐烂时,等效电容升至最大值,等效电感、阻抗等达到最低值。Yahaya等^[55]对芒果成熟阶段的介电特性进行了研究。在微波频率0.2~5 GHz下,测量芒果介电常数和损耗因子,同时测量芒果水分含量。通过比较,发现未成熟芒果的 ϵ' 值为19~24,而成熟芒果和过熟芒果的 ϵ' 值均为16~21。国内外利用介电特性对芒果品质进行检测的研究报道,近年来已较少。

浦宏杰等^[56]利用基于快速气象色谱仪的电子鼻检测芒果挥发性物质,同时测定表皮黑斑覆盖率,通过建立高斯模型,对腐烂程度的预测准确率可达90%以上。潘俊洋等^[57]构建了一种基于DSP6437开发板的芒果品质检测平台,将味觉传感器与视觉检测相结合,实现对芒果大小、成熟程度、腐烂程度的判断分类,具有平台体积小、运行稳定的特点。

超声波检测方法也用于芒果分级检测中。通过对回波信号构建模型,可对芒果分级^[58]。但是振动声学技术只适用于具有一定硬度或脆度的水果检测,对于质地柔软、不耐敲击,或果皮果肉硬度差异较大的水果实用性较差^[9]。

高光谱技术(380~1000 nm)用于青熟芒果储藏期品质的检测。模型能预测花青素含量和可溶性固形物含量,相关系数分别达到0.88和0.73^[59]。但是高光谱由于同时采集有图像信息和光谱信息,因此,

数据处理量很大,处理速度较慢^[11]。

计算机视觉技术联合比色传感器阵列分析(colorimetric sensor array)技术也被用于芒果品质的无损检测。主要检测指标包括芒果硬度和可溶性固形物含量。支持向量机分类模型用于芒果品质的定量描述。结果显示对训练集和预测集的准确率分别达到 98.75% 和 97.50%,表明该集成技术可用于预测芒果品质^[60]。

此外,基于内嵌加速传感器的机械抓手设备也被用于芒果品质的检测,通过建立偏最小二乘回归模型,对芒果硬度和成熟指数的相关系数分布达到 0.925 和 0.937^[61]。

4 展望

经过数年的发展,芒果无损检测已经有了很大的进展,多种无损检测技术应用于芒果品质的分级、成熟度的检测、产量预估、品种鉴定等。其中,计算机视觉技术和可见/近红外光谱检测技术应用最为广泛,未来研究将着重在这两个方面。发展趋势主要包括:

4.1 检测设备便携化、操作简单化

目前针对芒果品质无损检测的诸多研究仍停留在实验室阶段,较少应用于实际生产中。主要是因为芒果无损检测设备较为复杂,需要多台设备联用。对分散种植的农民来说,使用操作起来具有一定困难。因此,便携式芒果无损检测设备的开发是未来的发展趋势之一,特别是针对内在品质检测的便携式可见/近红外光谱检测仪。

4.2 多种无损检测技术的联合应用

芒果品质包含外观品质和内部品质。目前无损检测技术大多只针对某一类指标进行检测,由于方法本身的缺陷,检测和预测结果不一定准确。因此,联合不同无损检测技术,如近红外光谱法和机器视觉检测,可实现对外在物理品质和内在理化品质的同时检测,建立芒果内在品质和外在品质的检测模型,实现多指标同时检测的目标,建立更为全面的芒果检测技术^[50]。

4.3 稳健模型建立和模型在线更新

由于无损检测技术的基础在于设备,因此如何提高设备稳定性将是未来需解决的问题之一。其次,检测精度也十分依赖于算法和模型建立,将最新的数据处理、模型建立和模型迁移算法应用于芒果品质无损检测中,提高模型的稳健性和泛化能力,结合互联网技术和云平台技术,操作平台实现手机等移动端使用^[11],实现模型在线更新和升级。

4.4 芒果全生产过程质量控制指导

无损检测技术应用于芒果采后品质分级,固然能起到控制果品质量的作用。但芒果品质源于生产,将无损检测技术应用于芒果采前生产过程控制,如土壤微量元素及营养元素检测、病虫害早期监测、最佳

采收期预测等,将有助于实现芒果全生长过程的质量控制,指导相应预防性控制措施的实施,从生产全过程保证芒果品质。

5 总结

本文主要对国内外芒果品质无损检测技术的研究进展进行了简要介绍。计算机视觉技术基于芒果外在品质特点,主要应用于芒果果面坏损检测、品质分级、产量预估和品种鉴别等方面,而可见/近红外光谱检测技术基于芒果内在品质因子,主要应用于芒果的采后品质分级和成熟度预测。由于计算机视觉技术主要依靠图像处理,模型精确度与算法密切相关,因此发展更为精确的图像处理技术和分级模型算法是未来发展要点之一。芒果品质分级设备的建立是实现产业化应用的关键,因此,如何建立高速、智能的芒果自动分级系统,是未来研究的重点任务之一。可见/近红外光谱技术由于受到系统和检测方式的限制,模型稳健性和适用性较低,检测速度相对较慢,因此在批量检测应用方面可能并不适用。但是发展便携式光谱检测设备,再集成计算机视觉等其他无损检测技术,对芒果贮藏品质进行监测,有利于指导芒果分级储藏和储后科学处理。此外,未来通过种植地原位检测,还可实现芒果成熟度预测、芒果营养状态监测、病虫害早期监测等,有助于实现芒果全生长过程的质量控制,结合芒果品质大数据和云平台技术,有利于促进芒果全生产过程的数字化、智能化发展。

参考文献

- [1] 韦家少. 世界芒果产业发展概况[J]. *中国热带农业*, 2005, 5: 23-25. [WEI J S. Development of mango industry in the world[J]. *China Tropical Agriculture*, 2005, 5: 23-25.]
- [2] 贺梅英, 赵萍, 林依颖. 越南芒果在我国的市场竞争力分析[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(3): 722-728. [HE M Y, ZHAO P, LIN Y Y. Competitiveness of Vietnamese mango in the Chinese market[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(3): 722-728.]
- [3] JHA S, NARSAIAH K, SHARMA A, et al. Quality parameters of mango and potential of non-destructive techniques for their measurement-a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47(1): 1-14.
- [4] 赵家桔. 芒果品质构成及其发展规律的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. [ZHAO J J. Study on the development of Mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.]
- [5] 辛明, 张娥珍, 何全光, 等. 芒果果实品质评价因子的选择[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(10): 1818-1824. [XIN M, ZHANG E Z, HE Q G, et al. Selection of evaluation factors for mango fruit quality[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(10): 1818-1824.]
- [6] 冯建英, 李鑫, 原变鱼, 等. 智能感官技术在水果检测中的应用进展及趋势[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(3): 636-644. [FENG J, LI X, YUAN B Y, et al. Progress and trend of fruit detection by

- intelligent sensory technology[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(3): 636–644.]
- [7] 崔秀帅, 唐荣年, 杨举华, 等. 芒果无损检测方法的研究现状及发展趋势[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(7): 167–170. [CUI X S, TANG R N, YANG J H, et al. Current situation and developing trend of nondestructive detecting methods for mango[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2013, 41(7): 167–170.]
- [8] WANG H, PENG J, XIE C, et al. Fruit quality evaluation using spectroscopy technology: A review[J]. *Sensors*, 2015, 15: 11889–1192.
- [9] 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, 48. [XU S, SUN X P, ZHANG Q Q. Research progress on nondestructive testing technology applied to large thick-skinned fruit[J]. *Quality and Safety of Agro-products*, 2019, 5: 30–35, 48.]
- [10] 罗印斌, 蔡艳丽, 兰茜, 等. 农产品无损检测方法应用现状[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 340–344. [LUO Y B, CAI Y L, LAN H, et al. Application status of nondestructive testing methods for agricultural products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(15): 340–344.]
- [11] 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. [WANG S, HUANG X Y, LV R Q, et al. Research progress of nondestructive detection methods in fruit quality[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(11): 319–324.]
- [12] 李国进, 董第永, 陈双. 基于计算机视觉的芒果检测与分级研究[J]. *农机化研究*, 2015, 37(10): 13–18. [LI G J, DONG D Y, CHEN S. Research on Mango detection and classification by computer vision[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(10): 13–18.]
- [13] 王江枫, 罗锡文, 洪添胜, 等. 计算机视觉技术在芒果重量及果面坏损检测中的应用[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(4): 186–189. [WANG J F, LUO X W, HONG T S, et al. Application of computer vision technology in detecting mango weight and surface bruise[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14(4): 186–189.]
- [14] 张立华. 基于计算机视觉的芒果表面缺陷检测方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006. [ZHANG L H. Defect detection and classification of mango's surface based on computer vision[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.]
- [15] 张烈平, 曾爱群, 陈婷. 基于计算机视觉和神经网络的芒果检测与等级分类[J]. *农机化研究*, 2008, 30(10): 57–60. [ZHANG L P, ZENG AI Q, CHEN T. Mango examination and rank classification research based on computer vision and neural network[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2008, 30(10): 57–60.]
- [16] 刘静, 黄勇平, 章程辉. 视觉系统开发模块在芒果果面缺陷检测中的应用[J]. *食品与机械*, 2009, 25(2): 82–85. [LIU J, HUANG Y P, ZHANG C H. Application of NI vision development module in mango surface defect detection[J]. *Food & Machinery*, 2009, 25(2): 82–85.]
- [17] Pham V H, Lee B R. An image segmentation approach for fruit defect detection using k-means clustering and graph-based algorithm[J]. *Vietnam Journal of Computer Science*, 2015, 2(1): 25–33.
- [18] Ashok V, Vinod D S. A comparative study of feature extraction methods in defect classification of mangoes using neural network[C]// 2016 Second International Conference on Cognitive Computing and Information Processing (CCIP), Mysore, IEEE, 2016: 1–6.
- [19] 徐玉琼, 娄柯. 基于计算机视觉的芒果自动分级方法设计[J]. *荆楚理工学院学报*, 2019, 34(3): 24–29, 44. [XU Y Q, LOU K. Design of mango automatic grading method based on computer vision[J]. *Journal of Jingchu University of Technology*, 2019, 34(3): 24–29, 44.]
- [20] 张光龙. 基于芒果流水线的智能化检测分级系统研究[D]. 成都: 成都大学, 2020. [ZHANG G L. Research of mango intelligent detection and classification system based on pipeline[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020.]
- [21] KUMARI N, KR BHATT A, KR DWIVEDI R, et al. Hybridized approach of image segmentation in classification of fruit mango using BPNN and discriminant analyzer[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09747-z>.
- [22] 孙树亮. 基于计算机视觉的芒果分类[D]. 南宁: 广西大学, 2006. [SUN S L. Mango classification based on computer vision[D]. Nanning: Guangxi University, 2006.]
- [23] SA'AD F, IBRAHIM M, SHAKAFF A, et al. Shape and weight grading of mangoes using visible imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 115: 51–56.
- [24] IBRAHIM M, SA'AD F, ZAKARIA A, et al. In-Line sorting of Harumanis mango based on external quality using visible imaging[J]. *Sensors*, 2016, 16: 1753.
- [25] MAKINO Y, GOTO K, OSHITA S, et al. A grading method for mangoes on the basis of peel color measurement using a computer vision system[J]. *Agricultural Sciences*, 2016, 7: 327–334.
- [26] NANDI C S, TUDU B, COLEY C, et al. A machine vision technique for grading of harvested mangoes based on maturity and quality[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(16): 6387–6396.
- [27] 辛华健. 计算机视觉在芒果品质检测中的应用研究[J]. *农机化研究*, 2019(9): 190–193. [XIN H. Application of computer vision in mango quality testing[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2019(9): 190–193.]
- [28] 向阳, 林洁雯, 李亚军, 等. 芒果双面成熟度在线检测分级系统[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 259–266. [XIANG Y, LIN J W, LI Y J, et al. Mango double-sided maturity online detection and classification system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10): 259–266.]
- [29] ANUREKHA D, SANKARAN R. Efficient classification and grading of Mangoes with ganfis for improved performance[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79: 4169–4184.

- [30] PAYNE A, WALSH K, SUBEDI P, et al. Estimation of mango crop yield using image analysis-segmentation method[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 91: 57–64.
- [31] 薛月菊, 黄宁, 涂淑琴, 等. 未成熟芒果的改进 YOLOv2 识别方法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 173–179. [XUE Y J, HUANG N, TU S Q, et al. Immature mango detection based on improved YOLOv2[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(7): 173–179.]
- [32] 熊俊涛, 刘振, 林睿, 等. 自然环境下树上绿色芒果的无人机视觉检测技术[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 24–29. [XIONG J T, LIU Z, LIN R, et al. Unmanned aerial vehicle vision detection technology of green Mango on tree in natural Environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11): 24–29.]
- [33] BEHERA S K, SANGITA S, RATH A K, et al. Advances in computer, communication and control[M]. Singapore: Springer International Publishing, 2019.
- [34] SAHANA M, ANITA H B. Automatic classification of south Indian regional fruits using image processing[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, 10(13): 1–4.
- [35] ANUREKHA D, SANKARAN R A. Efficient classification and grading of MANGOES with GANFIS for improved performance[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79: 4169–4184.
- [36] HASNA H M, HELAL S M, SHAMIM R M, et al. Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of Smart Com 2020 [M]. Singapore: Springer International Publishing, 2020.
- [37] 苏东林, 李高阳, 何建新, 等. 近红外光谱分析技术在我国大宗水果品质无损检测中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(6): 460–464. [SU D L, LI G Y, HE J X, et al. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive detection of big yield fruits' quality in China[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(6): 460–464.]
- [38] 虞佳佳, 何勇, 鲍一丹. 基于光谱技术的芒果糖度酸度无损检测方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(12): 2839–2842. [YU J J, HE Y, BAO Y D. Nondestructive test on predicting sugar content and valid acidity of mango by spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(12): 2839–2842.]
- [39] 屠振华, 籍保平, 孟超英, 等. 芒果内部品质的 CCD-NIR 无损检测试验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 111–112. [TU Z H, JI B P, MENG C Y, et al. Non-destructive determination of internal quality of mango by CCD-NIR spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 111–112.]
- [40] JHA S, JAISWAL P, NARSAIAH K, et al. Non-destructive prediction of sweetness of intact mango using near infrared spectroscopy[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 138: 171–175.
- [41] 曹霞, 周学成, 范品良. 基于近红外漫反射光谱技术的芒果糖度无损检测方法研究[J]. *农机化研究*, 2013(1): 177–180. [CAO X, ZHOU X C, FAN P L. Nondestructive detection on predicting sugar content of mango by near-infrared diffuse reflectance[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2013(1): 177–180.]
- [42] THEANJUMPOL P, SELF G, RITTIRON R, et al. Selecting variables for near infrared spectroscopy (NIRS) evaluation of mango fruit quality[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2013, 5(7): 146–159.
- [43] WATANAWAN C, WASUSRI T, SRILAONG V, et al. Near infrared spectroscopic evaluation of fruit maturity and quality of export Thai mango (*Mangifera indica* L. var. Namdokmai)[J]. *International Food Research Journal*, 2014, 21(3): 1073–1078.
- [44] CORTÉS V, ORTIZ C, ALEIXOS N, et al. A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near-infrared reflection spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 118: 148–158.
- [45] RUNGPICHAYAPICHET P, MAHAYOTHEE B, KHUWI-JITJARU P, et al. Non-destructive determination of β -carotene content in mango by near-infrared spectroscopy compared with colorimetric measurements[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 38: 32–41.
- [46] MUNAWAR A A, KUSUMIYATI, WAHYUNI D. Near infrared spectroscopic data for rapid and simultaneous prediction of quality attributes in intact mango fruits[J]. *Data in Brief*, 2019, 27: 104789.
- [47] HAYATI R, MUNAWAR A, FACHRUDDIN F. Enhanced near infrared spectral data to improve prediction accuracy in determining quality parameters of intact mango[J]. *Data in Brief*, 2020, 30: 105571.
- [48] SUBEDI P, WALSH K. Assessment of sugar and starch in intact banana and mango fruit by SWNIR spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 62: 238–245.
- [49] IZNEID B, FADHEL M, AL-KHARAZI T, et al. Design and develop a nondestructive infrared spectroscopy instrument for assessment of mango (*Mangifera indica*) quality[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(11): 3244–3252.
- [50] JHA S, JAISWAL P, NARSAIAH K, et al. Nondestructive prediction of maturity of mango using near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 124: 152–157.
- [51] RUNGPICHAYAPICHET P, MAHAYOTHEE B, NAGLE M, et al. Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 31–40.
- [52] MARQUES E, FREITAS S, PIMENTEL M, et al. Rapid and non-destructive determination of quality parameters in the 'Tommy Atkins' mango using a novel handheld near infrared spectrometer[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(part B): 1207–1214.
- [53] 李敏, 高兆银, 朱迎迎, 等. 基于电子鼻的“贵妃”芒果糖度酸度无损检测技术应用[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(8): 1553–1557. [LI M, GAO Z Y, ZHU Y Y, et al. Non-destructive test on predicting sugar content and acidity of mango by electronic nose technology[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016,

- 37(8): 1553-1557.]
- [54] 廖宇兰, 翁绍杰, 张海德, 等. 芒果的成熟与腐烂对介电特性的影响[J]. *农机化研究*, 2010, 11: 174-177. [LIAO Y L, WENG S J, ZHANG H D, et al. Effect of dielectric properties of maturity and decay of mango[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2010, 11: 174-177.]
- [55] YAHAYA N Z, AYOB N S, RAMLI R M, et al. Microwave dielectric properties for detection of 'Harumanis' mangoes ripeness[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1083(1): 012020.
- [56] 浦宏杰, 汪迪松, 王辉, 等. 基于 zNose™ 电子鼻的芒果腐烂及成熟度检测[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(3): 304-310. [PU H J, WANG D S, WANG H, et al. Detection of rot and ripeness of mango with zNose™ electronic nose[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(3): 304-310.]
- [57] 潘俊洋, 项辉宇, 薛真. 基于 DSP 系统的芒果品质检测平台构建[J]. *食品与机械*, 2017, 33(11): 127-136. [PAN J Y, XIANG H Y, XUE Z. Construction of mango quality inspection platform based on DSP system[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(11): 127-136.]
- [58] 林瑜, 左江林, 罗宇强. BP 神经网络在超声波芒果分级检测中的应用[J]. *工业控制计算机*, 2016, 29(10): 52, 55. [LIN Y, ZUO J L, LUO Y Q. Application of BP neural network in fruit grading with ultrasonic testing[J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29(10): 52, 55.]
- [59] MAKINO Y, ISAMI A, SUHARA T, et al. Nondestructive evaluation of anthocyanin concentration and soluble solid content at the vine and blossom ends of green mature mangoes during storage by hyperspectral spectroscopy[J]. *Food Science and Technology Research*, 2015, 21(1): 59-65.
- [60] HUANG X, LV R, WANG S, et al. Integration of computer vision and colorimetric sensor array for nondestructive detection of mango quality[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(4): e12873.
- [61] BLANES C, CORTÉS V, ORTIZ C, et al. Non-destructive assessment of mango firmness and ripeness using a robotic gripper[J]. *Food Bioprocess Technology*, 2015, 8: 1914-1924.